

UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR LA VALORISATION D'ESPÈCES LIGNEUSES SECONDAIRES DES FORÊTS D'AFRIQUE CENTRALE



COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH

**UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR LA
VALORISATION D'ESPÈCES LIGNEUSES
SECONDAIRES DES FORÊTS D'AFRIQUE
CENTRALE**

Robin Doucet

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en
sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Pr Philippe Lejeune ; Dr. Benoit Jourez

Année civile : 2024

Copyright

Cette œuvre est sous licence Creative Commons. Vous êtes libre de reproduire, de modifier, de distribuer et de communiquer cette création au public selon les conditions suivantes :

- Paternité (BY) : vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'œuvre);
- Pas d'utilisation commerciale (NC) : vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales;
- Partage des conditions initiales à l'identique (SA) : si vous modifiez, transformez ou adaptez cette création, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci. À chaque réutilisation ou distribution de cette création, vous devez faire apparaître clairement au public les conditions contractuelles de sa mise à disposition. Chacune de ces conditions peut être levée si vous obtenez l'autorisation du titulaire des droits sur cette œuvre. Rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint le droit moral de l'auteur.

À mon père,

Aux trois femmes de ma vie, Maman, Florine et Marjorie.

En Afrique Centrale, l'exploitation du bois d'œuvre a un impact limité sur le couvert forestier. Dans les concessions aménagées, seulement un à deux pieds sont prélevés tous les 25 à 30 ans. Toutefois, historiquement focalisée sur un nombre limité d'espèces, l'exploitation industrielle a engendré un écrémage des peuplements. Aujourd'hui, le déficit de régénération naturelle de certaines espèces, ainsi que la diminution globale de la qualité des arbres, met en péril la viabilité d'un modèle d'aménagement dit durable. Afin de réduire la pression sur les espèces traditionnelles, la diversification de la production par l'exploitation d'essences jusqu'à présent ignorées pourrait être une solution. Néanmoins, le terme « essence » est une appellation commerciale pouvant correspondre à plusieurs espèces dont les propriétés du bois ou l'écologie, deux informations cruciales pour la gestion durable, pourraient différer. Avant de valoriser un nouveau taxon, il est donc nécessaire de pouvoir distinguer, tant sur le plan botanique qu'au niveau du bois, les différentes espèces potentiellement concernées.

Au travers d'une approche multidisciplinaire, l'objectif de cette thèse est d'évaluer la faisabilité de valoriser une série d'espèces dites secondaires identifiées sur base des volumes disponibles et de leur intérêt potentiel pour les sociétés œuvrant dans les deux grands types de forêts d'Afrique centrale (les forêts semi-décidues et sempervirentes). Cinq essences ont été identifiées comme répondant à ces critères : le Mubala (*Pentaclethra macrophylla* Benth.), l'Eyeke (*Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms), l'Eveuss (*Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl), l'Ossoko (*Scyphocephalum mannii* Warb.) et l'Omvong (*Dialium spp.*). Elles ont été étudiées dans deux concessions attribuées à des sociétés certifiées PEFC et/ou FSC : Pallisco en forêt semi-décidue et CEB-Precious Woods en forêt sempervirente.

Après une introduction (**Chapitre 1**) rappelant les principaux concepts liés à l'exploitation durable des massifs forestiers, les deux premiers chapitres sont dédiés à la clarification de la notion d'essence. Ils se focalisent sur les espèces du genre *Dialium* reprises sous le vocable Omvong. Dans le **Chapitre 2** les traits botaniques ainsi que la composition chimique du bois de trois morphotypes de *Dialium* sont comparés. Les différences significatives observées suggèrent la présence d'une nouvelle espèce. Ses folioles sont clairement distinctes de celles des espèces proches : *Dialium polyanthum* Harms et *Dialium lopense* Breteler. La composition du bois de cette nouvelle morpho-espèce est également différente et peut être identifiée sur base du spectre infrarouge de son bois. Le statut taxonomique de cette nouvelle espèce est ensuite traité dans le **Chapitre 3**. L'ensemble des traits botaniques fertiles et stériles, ainsi que leur variabilité au sein d'une population de l'est du Gabon y sont décrits. Sur base des occurrences collectées, son aire de répartition et son statut provisoire de conservation sont étudiés. Son écologie est finalement comparée à celle des autres espèces présentes dans le site d'étude. Cette nouvelle espèce est restreinte à l'est du Gabon et peut être classée comme *Endangered* (EN) selon les critères de l'UICN. Son écologie est différente des autres espèces du site d'étude.

Le **Chapitre 4** étudie une série de propriétés du bois des espèces sélectionnées. Elles ont ensuite été comparées à celles de 96 autres essences africaines sur base d'une analyse multivariée. Après identification des espèces commerciales les plus proches, une liste des usages potentiels a pu être dressée. L'Eveuss, le Mubala et les Omvong (à l'exception de *D. bambidiense* qui est moins durable) ont des bois utilisables pour des travaux lourds en contact avec l'eau douce. Ces essences ont des propriétés proches de celles de l'Azobé, du Tali ou de l'Okan. L'Eyek est davantage destiné aux travaux de menuiserie ou d'ébénisterie avec un bois similaire au Dabéma. L'Ossoko, valorisable en moulure ou en menuiserie intérieure, est dans un groupe d'espèces peu commercialisées comprenant l'Ozigo.

Le **Chapitre 5** se penche sur deux de ces espèces dont la conformation particulière rend difficile l'estimation des volumes mobilisables : *P. macrophylla* et *S. mannii*. Des équations de cubages spécifiques, intégrant différents paramètres de conformation, ont été ajustées pour chaque espèce. Ces mêmes paramètres ont également été corrélés avec leurs rendements de transformation. Il a été montré que l'utilisation des classes de qualités relevées lors des inventaires et de la profondeur des cannelures peut améliorer l'estimation de leurs volumes. D'autres paramètres (tels que le diamètre ou la hauteur du fût) peuvent être utilisés pour sélectionner les arbres et améliorer les rendements. Ce chapitre préconise finalement de n'exploiter que les arbres répondant à des critères stricts de qualité afin d'assurer une transformation rentable.

Le **Chapitre 6**, en considérant les résultats précédents, vise à proposer des mesures de gestion assurant une production rentable d'arbres de qualité sur le moyen terme. Pour ce faire, la croissance des espèces a été étudiée dans des dispositifs permanents et des modèles de croissance ont été ajustés. L'évolution des populations, en termes d'arbres exploitables par classe de qualité, a été modélisée sous différents scénarii sylvicoles à l'aide d'un modèle matriciel. Il s'est avéré que les exigences légales actuelles ne permettront pas de maintenir un niveau satisfaisant d'arbres de qualité sur le moyen terme sans l'adoption de certaines mesures complémentaires comme la généralisation du coefficient d'exploitation comme outils de gestion.

Finalement, le dernier chapitre (**Chapitre 7**) dresse une synthèse des freins à la valorisation des espèces secondaires étudiées et préconise des mesures de gestion pragmatiques pour la gestion durable des forêts d'Afrique Centrale

In Central Africa, timber logging has a limited impact on forest cover. In forest concessions, only one to two trees are harvested every 25 to 30 years. However, the historical focus on a limited number of species in industrial exploitation has led to a selective creaming of populations. Today, the deficit in natural regeneration of some species, along with a general decline in tree quality, jeopardizes the viability of a so-called sustainable management model. To alleviate pressure on traditional species, diversifying production by logging lesser known timber could be a solution. Nevertheless, the term "timber" is a commercial designation that may encompass several species with differing wood properties or ecology, crucial informations for sustainable management. Therefore, before promoting a new taxon, it is necessary to distinguish involved species both botanically and in terms of wood characteristics.

Through a multidisciplinary approach, the aim of this thesis is to assess the feasibility of promoting a series of species identified based on available volumes and their potential interest for societies operating in two major types of Central African forests (semi-deciduous and evergreen forests). Five species were identified as meeting these criteria: Mubala (*Pentaclethra macrophylla* Benth.), Eyek (*Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms), Eveuss (*Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl), Ossoko (*Scyphocephalium mannii* Warb.), and Omvong (*Dialium spp.*). They were studied in two concessions awarded to PEFC and/or FSC certified companies: Pallisco in semi-deciduous forest and CEB-Precious Woods in evergreen forest.

After an introduction (**Chapter 1**) recalling the main concepts related to sustainable exploitation of forest, the first two chapters are dedicated to clarifying the notion of "species." They focus on *Dialium* species grouped under the commercial name Omvong. In **Chapter 2**, botanical traits and the chemical composition of wood from three morphotypes of *Dialium* are compared. Significant differences suggest the presence of a new species. Its leaflets are distinct from those of closely related species: *Dialium polyanthum* Harms and *Dialium lopense* Breteler. The wood composition of this new morpho-species is also different and can be identified based on the infrared spectra of its wood. The taxonomic status of this new species is then addressed in **Chapter 3**, describing all fertile and sterile botanical traits and their variability within a population in East Gabon. Based on collected occurrences, its distribution range and provisional conservation status are studied. Its ecology is finally compared to that of other species present in the study site. This new species is restricted to Eastern Gabon and can be classified as Endangered (EN) according to IUCN criteria. Its ecology differs from other species at the study site.

Chapter 4 studies various wood properties of the selected species, comparing them to those of 96 other African species based on multivariate analysis. After identifying the closest timbers, a list of potential uses was compiled. Eveuss, Mubala, and Omvong (except for *D. bambidiense*, which is less durable) have wood suitable for heavy work in contact with fresh water, similar to Azobe, Tali, or Okan.

Eyek is more suitable for cabinetmaking with wood similar to Dabema. Ossoko, suitable for moulding or interior cabinetmaking, is in a group of less valued species including Ozigo.

Chapter 5 focuses on two species with unique conformations making it difficult to estimate mobilizable volumes: *P. macrophylla* and *S. mannii*. Specific volume equations, incorporating different conformation parameters, were adjusted for each species. These same parameters were also correlated with their processing yields. It was shown that using quality classes recorded during inventories and the depth of the buttresses can improve volume estimation. Other parameters (such as trunk diameter or height) can be used to select trees and improve yields. This chapter ultimately recommends exploiting only trees meeting strict quality criteria to ensure profitable processing.

Considering the previous results, **Chapter 6** aims to propose management measures ensuring profitable mid-term production of quality trees. To achieve this, species growth was studied in permanent plots, and growth models were adjusted. The evolution of populations in terms of harvestable trees by quality class was modeled under different silvicultural scenarios using a matrix model. It was found that current legal requirements will not maintain a satisfactory level of quality trees in the medium term without the adoption of additional measures, such as the widespread use of the exploitation coefficient as a management tool.

Finally, the last chapter (**Chapter 7**) provides a synthesis of barriers to the valorization of secondary species, recommends pragmatic management measures to ensure a sustainable management of forests.

Remerciements

On entend parfois dire « choisis un travail que tu aimes, et tu n'auras pas à travailler un seul jour de ta vie ». Au commencement de cette aventure je ne pouvais pas imaginer que cette phrase prendrait tout son sens. Si mon épanouissement dans mes recherches est évidemment issu du sujet fascinant que j'ai traité, je pense que le mérite revient en grande partie à mon environnement de travail et surtout aux personnes qui m'ont soutenu. Grâce à vous, cette thèse n'est pas le fruit de 5 années de travail mais de 5 années de passion.

J'aimerais particulièrement remercier les promoteurs de cette thèse de doctorat, le Pr. **Philippe Lejeune** et Dr. **Benoit Jourez**. Que ce soit à la faculté ou au CRA-W, vous avez toujours mis tout en œuvre pour que je puisse réaliser mes recherches dans de bonnes conditions. Grâce à vos expertises et vos conseils, j'ai pu développer des connaissances solides tant sur les aspects de télédétection et photogrammétrie que dans le domaine de la science du bois. Je vous remercie pour votre confiance et pour les bons moments passés ensemble durant le travail ou dans les moments de détente.

Ensuite, j'aimerais remercier mon Promoteur de l'ombre, mon Papa le Pr. **Jean-Louis Doucet**. Si les histoires du petit Toutou atténuaient à peine notre chagrin au départ de tes longues missions, elles m'ont assurément fait rêver de ces mystérieuses forêts. Le rêve est ensuite devenu réalité des années plus tard, grâce à tes enseignements passionnés et ton engagement pour que les étudiants puissent se former sur le terrain. Tes cours de botanique, tant lors du module au Cameroun que durant ma première mission au Gabon, sont sans aucun doute les éléments déclencheurs d'une passion qui n'a cessé de croître au fil de cette thèse. Si j'ai pu commencer et finir cette incroyable aventure c'est entièrement grâce à toi, merci d'avoir toujours été là pour moi.

Je remercie également les membres de mon comité de thèse, constitué du Pr. **Aurore Richel**, Pr. **Alain Souza**, Dr. **Patrick Martin** et du Pr. **Tom De Mil**. Que ce soit au laboratoire, dans les bureaux ou durant les comités de thèse, vos précieux conseils m'ont permis de m'orienter dans les nombreuses thématiques abordées au cours de ce travail. Grâce à vous, j'ai su me focaliser sur les champs de recherches pertinents et construire le fil rouge de cette thèse.

Je remercie les Dr. **Jean Gérard** et Dr. **Nicolas Picard** d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce travail. Vos expertises, respectivement en Technologie du bois et en Modélisation, ont considérablement amélioré la qualité de ce document.

Je remercie **Gaël Bibang Bengono** d'avoir largement partagé ce sujet d'étude avec moi, pour toutes nos collaborations sur les *Dialium* et pour tous les bons moments passés ensemble.

Je remercie vivement les mémorants et étudiants qui ont participé, de près ou de loin, à mes recherches. Avec un sujet si particulier, les échanges scientifiques peuvent être limités au quotidien. Grâce à vous tous j'ai pu discuter de ce sujet passionnant et trouver de nouvelles idées/perspectives tout au long de ces 5 années. Je remercie plus particulièrement **Marius Ruwet** pour son excellent mémoire sur

la distinction des *Dialium*, son implication, sa bonne humeur et pour avoir partagé, l'espace de quelques mois, ma passion pour cette thématique. Je remercie également **Alexandre Bûche** pour son mémoire sur les traitements thermiques de *S. mannii* et les bons moments passés à l'atelier. Je remercie **Patrice Ondoua** Ondoua pour son mémoire sur les facteurs influençant la qualité de *P. macrophylla*. Je remercie aussi **Victoria Iyabo** pour son mémoire sur l'estimation de la ressource valorisable des *Dialium*, son implication et sa curiosité scientifique. Je remercie également **Pierre Xavier** pour son futur mémoire sur l'anatomie des *Dialium* et la détermination dont il fait preuve. J'aimerais ensuite remercier les étudiants du travail de groupe ABAC (**Thibaud Dalimier, Camille Dubois, Claire Masson et Harold t'Serstevens**) pour leur travail sur l'anatomie et l'accroissement des *Dialium* et de *K. gabonensis* ainsi que tous les étudiants du master de Chimie et Bio-Industries ayant travaillé sur mes échantillons.

Je remercie le Programme pour la Promotion de l'Exploitation Certifiée des Forêts (PPECF) pour avoir soutenu financièrement cette thèse au travers du projet Essence à Haut Potentiel de Valorisation (EHPval). Je remercie également le Centre National de la Recherche Scientifique (CENAREST) et le Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Innovation (MINRESI) d'avoir autorisé mes recherches, respectivement au Gabon et au Cameroun. Je remercie aussi le Ministère des Eaux et Forêts du Gabon (MINEF) pour avoir délivré l'autorisation d'exportation de nos échantillons de bois.

Je remercie également les sociétés forestières Pallisco-CIFM et CEB Precious Wood Gabon d'avoir hébergé mes recherches et d'avoir assuré les besoins logistiques de mes missions. J'aimerais plus particulièrement remercier **Paul Lagoute, Michel Rougeron, Yanick Nkoulou et Fredo** pour leur soutien lors de mes séjours à Pallisco-CIFM. Je remercie aussi **Frédéric Ober, Jean MOUNGUENGUI, Markus Pfannkuch, Fabian Leu, Philippe Jeanmart, Etienne Lacroix, David Zakamdi, Stévy Ekome Nna, Belphégor Ngali, Vincent Monnet, Nicolas Zürcher, Mirco Moscatelli, Ghislain Mvong Aboghe, Handy Bounda, Luis Teixeira, Hilaire Bingoulou, Léo Mboumba, Jean Launay, Thierry, Stéphanie Daullé et Céline Perez** pour leur soutien durant mes missions à PW-CEB. J'aimerais particulièrement remercier **Armand Boubady, Jean-Bosco Bokomba, Augustin Assam, Blanchard Mombo Ngoulou, Jean Arnice Mboulamab, Jean-Louis Nziengui et Eustishe** pour nos longues journées de terrain et pour m'avoir tant appris sur les forêts gabonaises.

J'aimerais remercier les institutions dans lesquelles j'ai travaillé, à commencer par le CRA-W. Je pense évidemment en premier lieu au Laboratoire de Technologie du Bois (LTB), auquel je me permets d'associer l'asbl GEPROFOR. Cette unité, au sein de laquelle j'ai passé de longs mois à mesurer, scier, casser, humidifier et peser des échantillons de bois de toutes sortes, a été mon deuxième bureau. J'aimerais particulièrement remercier **Lahcen Hadiy** pour tout le temps et l'énergie que tu as mobilisés pour m'aider et pour ta gentillesse. Je remercie également **Cécile Verheyen, Yanick Delzant et Anne Bauvin** pour votre travail dantesque sur la durabilité naturelle. Je remercie également **Caroline Pollet, Jean-**

Marc Henin, Cécile Lesire pour leur aide et leur soutien. Il est injuste de cantonner ces remerciements à quelques exemples tant vous m'avez tous aidé et formé dans de nombreux domaines, depuis mon TFE jusqu'à la fin de cette thèse. Du fond du cœur, je vous remercie. Toujours au CRA-W, je remercie l'Unité « Qualité et Authentification des Produits » dans laquelle j'ai fait mes armes en spectroscopie infrarouge et en chimiométrie. Je remercie particulièrement **Juan Antonio Fernandez Pierna, Nicaise Kayoka Mukendi, Vincent Baetten, Damien Vincke, Quention Arnould, François Stevens et Lisa Plasman.**

Je remercie également le Jardin Botanique de Meise et Naturalis pour m'avoir permis de consulter leurs collections d'herbiers. Je remercie plus particulièrement **Jan Wieringa, Roxali Bijmoer, Ann Bogaerts et Stevens Janssens.** Je me permets de remercier ici également le botaniste **Fransiscus Jozef Breteler** pour son immense expertise et son aide précieuse pour la description de la nouvelle espèce de *Dialium*.

Je remercie mes collègues de l'unité *Biomass and Green Technologies* qui m'ont fait découvrir la chimie biologique. Même si ce domaine a parfois été déroutant pour le forestier que je suis, vous avez réussi à le rendre passionnant et je vous en remercie chaleureusement. Je remercie plus spécifiquement **Eric Groignet, Maroua Kammoun, Simon De Crane d'Heysselaer, Thibaut Istasse, Sophie Morin et Lionel Dumoulin.** Je remercie tout particulièrement **Isabelle Van de Vreken** pour son aide indispensable dans les manipulations, son expertise, sa motivation et les bons moments passés en laboratoire. Je profite de ce paragraphe pour remercier **Pierre-Yves Werrie** pour son aide dans la compréhension de cette matière nébuleuse mais surtout pour nos séances de course à pied où nos discussions autour d'un bon Riz Royal.

J'aimerais maintenant remercier tous mes collègues forestiers. C'est certainement grâce à vous que ces 5 années ont été si agréables au quotidien. Entre les mercredis pour la forme, les séances de volley/spike ball, les vendredrinks, les devinettes de mots tarabiscotés et les team(body)buildings il est clair qu'il règne une véritable « ambiance forestière ». J'aimerais particulièrement remercier l'irremplaçable **Jean-Yves De Vleeschouwer**, aka JY, pour son aide administrative indispensable, tous nos fous rires et son amitié. Je remercie également **Morgane Scalbert** pour avoir partagé nos moments de doutes, de joies, pour les épisodes parodiques dans la salle de réunion, pour ton amitié, et simplement car c'est toi le Docteur! Je remercie **Anaïs Pasiphae Gorel** pour nos explorations facultaires, nos frissons d'escalade, pour tes encouragements et pour ton amitié. Je remercie aussi tous les doctorants et collègues pour leur soutien et leur bonne humeur au jour le jour : **Davy Fonteyn, Romaric Ndonda Makemba, Gauthier Ligot, Sarah Tossens, Quentin Guidosse, Crispin Ilunga-Mulala Mushagalusa, Chloé Dupuis, Donatien Zébazé, Marjane Kaddouri, Justin Broers, Alexandre Delplanque, Modestine Kompanyi Amisi, Pedro Luiz Silva de Miranda, Simon Lhoest, Cédric Vermeulen, Violette Van Keymeulen, Stéphane Momo Takoudjou, Cédric Geerts, Alain Monseur, Marie Fombona, Hugues Claessens, Edouard Coenraets, Marie-Pierre Tasseroul, Simon Tossens, Nicolas Latte, Lucie**

Maus, Jérôme Perin, Allan Borremans, Edwin Autome, Boris Lemaigre, Samuel Quevauvillers, Jérôme Périn, Justin Holvoet, Lorna Zeoli, Alexandre Ernst, Nicolas Latte, Thierry Thissen.

Je remercie également les collègues de Nature+. Si l'appellation "collègues" n'est officielle que depuis quelques mois, en pratique, c'est évidemment le cas depuis mon arrivée dans le labo tropi. Je vous remercie tous pour votre soutien, particulièrement durant les trois derniers mois de rédaction, pour votre aide et cette vision plus terre à terre que vous m'avez apportée. Je remercie : **Cecilia Julve Larrubia, Marie-Alice Noizet, Sophie Jeanmart, Guillaume Neve, Barbara Haurez, Guillaume Baltus, Kasso Daïnou, Félicien Tosso, Jean-François Gillet et Nils Bourland.** Sans oublier mon désormais compatriote, estampillé ATIBT, **Franck Monthé.**

Je voudrais également remercier mes amis, avec qui j'ai eu la chance de vivre durant ces 5 années de thèse, que ce soit à Mazy (**Augustin, Romain, Nassim, Arnaud, Eugénie, Benoit et Jérôme**) ou à Bossière (**Gilles, Eloi, Pierre et Benjamin**). Je ne peux compter tous les bons moments passés ensemble et la joie que vous m'avez apportée au quotidien. Je voudrais remercier également les amis qui me suivent et me soutiennent depuis de très longues années (**Julien, Adrien, Sam et Quentin**).

J'aimerais remercier ma belle-famille (**François, Bertrand**) pour leur soutien depuis 5 ans. J'aimerais particulièrement remercier **Françoise** pour m'avoir soulagé d'une grosse charge mentale pour l'organisation d'un heureux événement en Juillet.

Enfin, j'adresse ces derniers remerciements à ma famille, **Papa, Maman, Florine**, vous ne pouvez imaginer à quel point nos fous rires, notre complicité et votre amour ont été un moteur pour moi, dans la thèse comme dans la vie. Je remercie également mes couz' **Quentin, Bastien et Julien** ainsi que ma **Marraine et Tonton Jacky** pour cette intime complicité que nous gardons depuis toujours. J'aimerais terminer ce paragraphe familial en remerciant ma future femme, **Marjorie**. C'est avec un peu de peine que je repense à la tristesse qui planait lors de mes premiers départs en mission. Si l'idée d'être séparés était difficile au début, tu as rapidement compris que j'avais enfin trouvé ma voie. Bien que le chagrin soit toujours présent à l'idée d'un potentiel voyage, il laisse maintenant place au soutien et à l'encouragement. Je te remercie pour cette grande preuve d'amour. Je te remercie également pour ces derniers mois qui n'ont clairement pas été simples pour moi. Grâce à ton humour légendaire, tes petites attentions et tes bons plats *healthy*, tu as réussi à me motiver, et ce même si je ne t'écoutais apparemment pas tout le temps (oupsi). Je te remercie d'avoir été là pour moi durant ces 5 années de thèse et d'avoir accepté de l'être pour toujours.

Chapitre 1 : Introduction Générale

1.1. L'exploitation forestière en Afrique centrale 32

1.2. La certification de gestion forestière durable 36

Le modèle de concession en péril ? 38

1.3. Une diversification bien pensée..... 42

1.4. Essence ou espèce ?..... 42

1.5. Objectifs et cadre conceptuel..... 45

1.6. Sites d'études et espèces cible 48

 1.6.1. *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms 50

 1.6.2. *Pentaclethra macrophylla* Benth. 51

 1.6.3. *Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl..... 52

 1.6.4. *Scyphocephalium manni* Warb. 53

 1.6.5. *Dialium* spp. L. 54

1.7. Liste des publications 56

Chapitre 2: Distinction morphologique et chimique des morphotypes exploitables de *Dialium*

2.1. Introduction 58

2.2. Material and methods 59

 2.2.1. *Study Area* 59

 2.2.2. *Herbarium Collection and Description*..... 59

 2.2.3. *Wood Material*..... 61

 2.2.4. *Wood Sample Preparation*..... 62

 Chemical Analyses and Moisture Content 62

 FTIR Measurements 62

 2.2.5. *Wood Primary Metabolites Content and Mineral* 62

 Cellulose, Hemicellulose and Lignin Content 63

 Ash Content 63

 Nitrogen Content 63

 Silica Content 63

 2.2.6. *Ethanol-Water Extracts Charaterisation*..... 63

 Phenolic Content 64

 Condensed Tannins Content..... 64

 2.2.7. *FT-IR Acquisition* 64

 2.2.8. *Statistical Analyses*..... 65

Conditional Inference Tree.....	65
PLS-DA.....	65
Variance Analyses.....	66
2.3. Results.....	66
2.3.1. <i>Leaf Morphological Traits</i>	66
Conditional Inference Tree.....	66
Variance Analyses.....	67
2.3.2. <i>Chemical Composition</i>	69
Primary Metabolites and Minerals.....	69
Ethanol Extracts.....	69
Wood FT-IR Distinction.....	72
2.4. Discussion.....	76
2.4.1. <i>Species Distinction in Forest Inventories</i>	76
2.4.2. <i>Wood Chemical Properties and Their Variation</i>	77
Primary Metabolites and Minerals.....	77
Ethanol-Water Extracts.....	78
2.4.3. <i>FT-IR Wood Distinction</i>	79
2.4.4. <i>Impacts on Tree Ecology, Forest Management, and Wood Production</i>	79

Chapitre 3: Découverte d'une nouvelle espèce et écologie comparée des *Dialium*

3.1. Introduction.....	83
3.2. Material and methods.....	84
3.2.1. <i>Taxonomic treatment</i>	84
Plant material and botanical description.....	84
Preliminary conservation status assessment and cartographic treatments	84
3.2.2. <i>Ecology</i>	85
Identification of co-occurring <i>Dialium</i> species.....	85
Topographic habitat classification.....	85
3.3. Results.....	86
3.3.1. <i>Taxonomic treatment</i>	86
3.3.2. <i>Ecology</i>	96
3.4. Discussion.....	98
3.4.1. <i>Dialium ecology variations</i>	98

Chapitre 4: Propriétés du bois et potentiel d'utilisation

4.1. Introduction 102

4.2. Matériel et méthodes 103

 4.2.1. *Echantillonnage*..... 103

 4.2.2. *Découpe des éprouvettes d'essais et description visuelle du bois*
..... 103

 4.2.3. *Mesure des propriétés du bois*..... 107

 4.2.4. *Traitement statistique* 107

4.3. Résultats 108

 4.3.1. *Aspect visuel*..... 109

 4.3.2. *Propriétés physiques*..... 119

 Masse volumique..... 119

 Infradensité 120

 Point de Saturation de la Fibre 121

 Retrait volumique total 122

 Retrait tangentiel total 123

 Retrait radial total 124

 Anisotropie 125

 Coefficient de retrait volumique..... 126

 4.3.3. *Propriétés mécaniques* 127

 Module d'élasticité 127

 Contrainte de rupture en flexion statique 128

 Travail de rupture en flexion dynamique 129

 Contrainte de rupture en compression axiale 130

 Dureté de Monnin..... 131

 4.3.4. *Durabilité naturelle*..... 132

 Trametes versicolor 132

 Coniophora puteana..... 133

 Stereum hirsutum..... 134

 4.3.5. *Hierarchical Clustering on Principal Component (HCPC)* . 135

4.4. Discussion 137

 4.4.1. *Séchage et stabilité*..... 137

 4.4.2. *Résistances mécaniques*..... 139

4.4.3. Durabilité naturelle et classe d'emplois.....	140
4.4.4. Usages.....	144
4.4.5. Du laboratoire à la pratique.....	150

Chapitre 5: Volume sur pied et rendements

5.1. Introduction.....	154
5.2. Matériel et méthodes.....	155
5.2.1. Mesure des entrées et du volume.....	155
Validation des mesures.....	158
5.2.2. Ajustement des tarifs de cubage.....	159
5.2.3. Classe de qualité.....	160
5.2.4. Rendements de transformation et conformation.....	160
Description des billes.....	160
Calcul des coefficients et rendements.....	161
Influence de la conformation sur les rendements.....	161
5.3. Résultats.....	162
5.3.1. Validation des méthodes non destructives.....	162
5.3.2. Equations de cubages.....	164
5.3.3. Qualité des arbres de <i>P. macrophylla</i>	166
5.3.4. Rendements.....	166
5.3.5. Relation entre conformation et rendements.....	167
5.4. Discussion.....	169
5.4.1. Pertinence des méthodes non destructives pour l'estimation des volumes.....	169
5.4.2. Sélection des entrées et des équations de cubage.....	169
5.4.3. Utilisation des classes de qualité pour l'estimation des volumes.....	170
5.4.4. Rendements et conformation.....	172

Chapitre 6: Dynamique et sylviculture

6.1. Introduction.....	176
6.2. Matériel et méthodes.....	177
6.2.1. Sites et espèces étudiés.....	177
6.2.2. Mesure de l'accroissement diamétrique.....	179
6.2.3. Distribution initiale de la qualité.....	179
6.2.4. Analyse des données.....	180
Mesure des accroissements et nettoyage des données.....	180
Calcul de l'accroissement annuel moyen.....	181

Modélisation de la croissance en fonction du diamètre.....	181
Modèle de dynamique	181
Simulation de l'écrémage	184
Comparaison des scénarios sylvicoles.....	185
6.3. Résultats	186
6.3.1. <i>Accroissement annuel moyen</i>	186
6.3.2. <i>Modèles de croissance</i>	187
6.3.3. <i>Etat initial de la ressource</i>	190
6.3.4. <i>Scénarios à moyen terme</i>	191
6.4. Discussion	196
6.4.1. <i>Variations de la croissance</i>	196
6.4.2. <i>Validité des modèles de dynamique</i>	197
6.4.3. <i>Relation entre la qualité des arbres et la dynamique</i>	198
6.4.4. <i>Une production durable sur le moyen terme ?</i>	198

Chapitre 7: Discussion générale et perspectives

7.1. La distinction des espèces morphologiquement proches : le cas de <i>Dialium</i>	202
7.1.1. <i>Pertinence de la nomenclature des Dialium</i>	204
7.1.2. <i>L'identification des espèces, une problématique sur le terrain</i>	207
7.2. Potentiel de valorisation	208
7.2.1. <i>Un changement de modèle industriel</i>	213
7.2.2. <i>Quel avenir pour la gestion durable des forêts ?</i>	214
7.2.3. <i>Recommandations pour une meilleure gestion</i>	215

Figure 1 : Carte des zones affectées à la production de bois d’œuvre (modèle de concession forestière en quadrillage jaune, autre modèle, quadrillage vert), aux aires protégées (quadrillage gris) et aux plantations agro-industrielles (vert clair) dans le Bassin du Congo. Source : FRM (2018)	32
Figure 2 : Effectifs de la population impliqués dans le calcul du taux de reconstitution pour A. le Gabon et B. le Cameroun.	35
Figure 3 : Vue d’ensemble des études comparant l’exploitation certifiée FSC ou l’EFIR (FSC/RIL) à l’exploitation conventionnelle (Conventional). Chaque carré représente une étude ou une méta-analyse, le numéro à l’intérieur faisant référence à la publication dans l’article original. La couleur des carrés renseigne quant à la performance du FSC/RIL par rapport à l’exploitation conventionnelle : vert = FSC/RIL plus performant, blanc/orange = pas de différence, rouge = FSC/RIL moins performant. Source: Burivalova et al. (2017).....	38
Figure 4 : Résultat d’une méta-analyse sur l’exploitation sélective de bois d’œuvre. (a) volume de bois commercialisable après une ou deux rotations, d’une durée de 20 à 40 ans selon le pays, si les espèces collectées restent les mêmes (“Same”) ou si des espèces additionnelles sont collectées également (“Same +”); (b) stock de carbone maintenu environ un an après exploitation; (c) richesse en espèces d’oiseaux, d’invertébrés, de mammifères et de plantes dans les forêts soumises à l’exploitation sélective par rapport aux forêts naturelles. Les moyennes et écarts-types ont été calculés sur base de 59, 22 et 109 études. Source : Putz et al. (2012)	40
Figure 5 : Concentration des villages (points noirs) le long des routes dans le nord du Gabon suite à la politique de “regroupement” durant la colonisation française. Source: Laurance et al. (2006)	41
Figure 6 : Évolution des effectifs exploitables d’une population de <i>T. scleroxylon</i> à Mbaïki en maintenant l’exploitation forestière telle qu’elle a été réalisée la première fois. Source: Karsenty and Gourlet-Fleury (2006).....	41
Figure 7 : Cadre conceptuel de la thèse de doctorat.....	47
Figure 8 : Localisation des sites d’étude dans les grands types forestiers d’Afrique Centrale (Réjou-Méchain et al. 2021).	49
Figure 9 : Fût de <i>Pachyelasma tessmannii</i> (Harms) Harms et distribution de l’espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).....	50
Figure 10 : Fût de <i>Pentaclethra macrophylla</i> Benth. et distribution de l’espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).	51
Figure 11 : Fût de <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre ex Engl. et distribution de l’espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).....	52

Figure 12 : Fût de <i>Scyphocephalum manni</i> Warb. et distribution de l'espèce. Les occurrences sont issues de la base de donnée RAINBIO (Dauby et al. 2016).	53
Figure 13 : Représentation de la distribution géographique des <i>Dialium</i> par sous-centre d'endémisme dans la région guinéo-congolaise. Les points d'occurrence proviennent des bases de données du Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève (CJBG, 2020), du Catalogue of Life Partnership via Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) et de la base de données RAINBIO (ArcGis version 10.4.1). Source : Bengono et al. (2021).....	54
Figure 14 : Fûts de trois espèces reprises sous l'appellation locale Omvong: (A) <i>Dialium lopense</i> Breteler, (B) <i>Dialium polyanthum</i> Harms et (C) <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	55
Figure 15 : Field herbarium examples of <i>Dialium polyanthum</i> Harms (a), <i>Dialium</i> sp. nov. (b) and <i>Dialium lopense</i> Breteler (c).....	61
Figure 16 : Conditional inference tree using the 25 leaf morphological variables to discriminate the 40 individuals for which all leaf traits could be measured.....	67
Figure 17 : Significant leaf morphological trait variations between <i>Dialium polyanthum</i> (identified as <i>D. pachyphyllum</i> in the figure), <i>Dialium</i> sp. nov., and <i>Dialium lopense</i> . p-values for species comparison are related to t-tests (ratio w/l of the basal leaflet, terminal leaflet width, ratio length of terminal leaflet/length of petiolule) and Wilcoxon tests (ratio petiol/rachis, ratio basal leaflet length/terminal leaflet length).	68
Figure 18 : Primary metabolite's variation in heartwood and sapwood among <i>D. polyanthum</i> (identified as <i>D. pachyphyllum</i> in the figure) and <i>D. sp. nov.</i> ; p-values concerning heartwood and sapwood are related to ANOVA test (Cellulose, Lignin and Hemicellulose) and Kruskal–Wallis test (Ash and Nitrogen); p-values that compare species are related to the t-test (Cellulose, Lignin and Hemicellulose) and Wilcoxon's test (Ash and Nitro-gen).....	70
Figure 19 : Extract yields and extract composition variation in heartwood and sapwood among among <i>D. polyanthum</i> (identified as <i>D. pachyphyllum</i> in the figure) and <i>D. sp. nov.</i> ; p-values concerning heartwood and sapwood are related to ANOVA test (Phe-nolic content and Condensed tannin content) and Kruskal–Wallis test (Extraction yields); p-values that compare species are related to the t-test (Phenolic content and Condensed tannin content) and Wilcoxon's test (Extraction yields).	71
Figure 20 : Upper plot presents average preprocessed (SNV + first derivatitive) spectrum of each species. The lower graph represents the difference (D. <i>polyanthum</i> , identified as <i>D. pachyphyllum</i> in the figure, and <i>D. sp. nov.</i>) between the average spectra. The 15 wavenumbers correspond to 15 high peaks of difference between the species.	73
Figure 21 : Overall classification error rate from the cross-validation procedure. The number of LVs selected is red-circled.....	76
Figure 22 : A. <i>Dialium bambidiense</i> occurrences in Gabon. B. Map showing the position of the trees used for the description and the 4-ha monitoring plots	

used for the assessment of population structure and topographic habitat preferences.....	90
Figure 23 : <i>Dialium bambidiense</i> A. Twig of a juvenile tree (Photograph taken in DYNAFAC monitoring plots on 21 Oct. 2022). B. Young tree stem (Photograph taken in DYNAFAC monitoring plots on 21 Oct. 2022). C. Mature tree stem (from R. Doucet 21). D. Straight buttresses often observed on mature trees (from R. Doucet 28). E. Bark section showing tree sapwood and the red exudate (from R. Doucet 27). Photographs by Robin Doucet.....	91
Figure 24 : <i>Dialium bambidiense</i> A. Mature tree leaf, adaxial side (from R. Doucet 28). B. Mature tree leaf, abaxial side (from R. Doucet 33). C. Detail on pilosity and secondary nerves insertion of dry leaflet abaxial side (from JL. Doucet & G. Bibang 10). D. Dry basal leaflet abaxial side showing secondary nervation and blade shape (from R. Doucet 22). E. Dry terminal leaflet showing secondary nervation and blade shape (from R. Doucet 21). F. Detail on tertiary venation of dry leaflet abaxial side (from JL. Doucet & G. Bibang 2). Photographs by Robin Doucet.....	92
Figure 25 : <i>Dialium bambidiense</i> A. Terminal panicles (from R. Doucet 33). B. Flowers and buds (from R. Doucet 28). C. Fruits – whole, with some eaten by monkeys (Photograph taken by JL. Doucet in Ndanguï forest on 14 Jun. 2019). D. Detail of fruit base and pilosity (from R. Doucet 5). E. Detail on flowers petal shape, anthers shape, ovary insertion on disc, alternation of brown and whitish band of hairiness on the ovary (R. Doucet 28). F. Detail on an opening flower and panicle pubescence (from R. Doucet 28). Photographs by Robin Doucet and Jean-Louis Doucet.	93
Figure 26 : A. <i>Dialium</i> population density variation within 4 ha forest plots. B. Distribution of stand density by diameter class in the 16 ha of monitored forest; 10 = [10-20[cm, 20 = [20-30[cm, 30 = [30-40[cm, 40 = [40-50[,..., 100=[100+ 97	
Figure 27 : <i>Dialium</i> spatial repartition within the four forests plots (200x200m, 4ha) and topographic habitat classification	98
Figure 28 : Processus de découpe des billons de base, dimensions en mm ; durabilité naturelle (d) ; travail de rupture flexion dynamique (K) ; densité à 12% MC (ρ_{12}) ; Infradensité (Bd) ; dureté de Monnin (N) ; retrait volumétrique total (β_{vol}) ; module de Young (E) ; résistance en flexion statique (σ_f) ; résistance à la compression axiale (σ_c) ; imprégnation (I) ; retrait radial/tangentiel linéaire total (β_{lin}) ; anisotropie (An) ; point de saturation des fibres (PSF).	106
Figure 29 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>D. bambidiense</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).	112
Figure 30 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>D. bambidiense</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).	113
Figure 31 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>D. bambidiense</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).	114

Figure 32 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>D. bambidiense</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).	115
Figure 33 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>P. tessamnnii</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Doucet et al. 2021).	116
Figure 34 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>P. macrophylla</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (InsideWood 2004).	117
Figure 35 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de <i>S. mannii</i> . Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (InsideWood 2004).	118
Figure 36 : Distribution de la masse volumique des 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « Très lourd », « Lourd », « Mi-lourd » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité **** correspond à une p-val < 0.0001 au test de Dunn comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	119
Figure 37 : Distribution de l'infradensité des 6 espèces testées. Le seuil de significativité **** correspond à une p-val < 0.0001 au test de Dunn comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	120
Figure 38 : Distribution de valeurs de point de Saturation de la fibre pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible » et « moyen » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité ** et *** correspondent respectivement à 0,01<p-val<0,001 et 0,001<p-val<0,0001 au test Tukey HSD comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	121
Figure 39 : Distributions de retrait volumique total pour les 6 espèces étudiées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Sallenave (1955). Le seuil de significativité ** correspond à 0,01<p-val<0,001 au test de Dunn comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	122
Figure 40 : Distribution du retrait tangentiel total pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et *** correspondent respectivement à 0,05<p-val<0,01 et 0,001<p-val<0,0001 au test Tukey HSD comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	123
Figure 41 : Distribution du retrait radial total pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et *** correspondent respectivement à 0,05<p-val<0,01 et 0,001<p-val<0,0001 au test de Dunn comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	124
Figure 42 : Distribution de l'anisotropie du retrait pour les 6 espèces testées. La limite de caractérisation séparant « risque de déformation élevé » et « risque de déformation faible » provient de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité * correspond respectivement à 0,05<p-val<0,01 au test de Dunn comparant les trois espèces de <i>Dialium</i>	125

Figure 43 : Distribution de l'anisotropie du retrait pour les 6 espèces testées. La limite de caractérisation séparant « risque de déformation élevé » et « risque de déformation faible » provient de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité * correspond respectivement à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*..... 126

Figure 44 : Distribution du module d'élasticité pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité ** correspond à $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ au test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*..... 127

Figure 45 : Distribution du module d'élasticité pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et ** correspondent respectivement à $0,05 < p < 0,01$ et $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ au test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*..... 128

Figure 46 : Distribution du travail de rupture en flexion dynamique pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Sallenave (1955). Les mentions « ns » sont issues du test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*..... 129

Figure 47 : Distribution de la contrainte de rupture en compression axiale pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les mentions « ns » sont issues du test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*..... 130

Figure 48 : Distribution de la dureté de Monnin les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « très dur », « dur », « mi-dur » et tendre proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité *, ***, et **** correspondent respectivement à $0,05 < p < 0,01$ et $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*..... 131

Figure 49 : Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *T. versicolor* pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les classes de durabilité 1 (très durable), 2 (durable), 3 (moyennement durable) et 4 (peu durable) proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité * et **** correspond à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*..... 132

Figure 50 : Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *C. puteana* pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories les classes de durabilité 1 (très durable), 2 (durable) et 3 (moyennement durable) proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité *** et **** correspond à $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*..... 133

Figure 51 : Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *S. hirsutum* pour les 4 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les classes de durabilité 1 (très durable) et 2 (durable)

proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité * correspond à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*..... 134

Figure 52 : À gauche, diagramme en bâtonnet du pourcentage de la variance totale expliquée par chaque composante et courbe de la variance total cumulée, à droite, le diagramme à points présente la qualité de la représentation des variables par les CPs, exprimée en cosinus carré. La ligne pointillée correspond au nombre limite de composantes sélectionnées pour le regroupement hiérarchique. 135

Figure 53 : En haut, classification hiérarchique utilisant la méthode d'agrégation "UPGMA" sur la distance "euclidienne" basée sur les 4 première CP de l'ACP (représentant 93.51% de la variance). En bas, diagramme à points présentant toutes les propriétés physiques et mécaniques standardisées correspondant à chaque espèce. Pour chaque propriété, les plus petits points jaunes correspondent aux valeurs les plus faibles observées dans la base de données et les plus gros points bleus à la valeur la plus élevée. Les groupements en ligne pointillées présentent les espèces le plus proches des espèces étudiées au même degré de dissimilarité. 136

Figure 54 : Déformations observables sur la face transversale des débits en fonction de leur position dans la bille et défauts observables sur les sciages..... 138

Figure 55 : Distribution de la perte de masse d'échantillons de *D. bambidiense* en fonction de la position radiale et de l'arbre après 16 semaines d'exposition à *T. versicolor*. Les échantillons ont radialement été échantillonnés proches de l'aubier (A), au centre du duramen (B) et proche du coeur (C). 142

Figure 56 : Distribution des valeurs de perte de masse de *K. gabonensis* en fonction du champignon testé (*T. versicolor* et *S. hirsutum*) et de la nature de son bois (transition ou duramen). 143

Figure 57 : Mise en oeuvre de *Dialium lopense* pour la réalisation de tables et d'un bar de brasserie (Gembloux, Belgique). 144

Figure 58 : Parement de tablette en *K. gabonensis* dans une maison Bruxelloise (Belgique). 145

Figure 59 : Plat tourné en loupe de *Dialium bambidiense* (Mazy, Belgique). 146

Figure 60 : Table extérieur en *Dialium polyanthum* selon une mise en œuvre appropriée. Seul des pièces sur quartier/faux quartier ont été utilisées. Les traverses intérieur sont espacées et uniquement vissées dans la rainure du montant pour laisser le retrait radiale s'exprimer (Namur, Belgique). 146

Figure 61 : Lames de platelage en *Pentaclethra macrophylla* produits par Pallisco-CIFM (Mindourou, Cameroun). 147

Figure 62 : Utilisation de *P. tessamnnii* pour la création de meubles intérieurs. Plateaux et tiroirs en *P. tessmannii* et piètements en chêne (Sart-Tilman, Belgique & Mazy, Belgique). 148

Figure 63 : Plateau de table en *S. mannii* réalisé par la menuiserie de PW-CEB (Bambidie, Gabon). 149

Figure 64 : Mesure des entrées du tarif de cubage à 1m30. La ligne noire épaisse correspond à la section du tronc, la ligne fine correspond à la mesure de diamètre sur les cannelures et la ligne rouge correspond à la profondeur de la plus grande cannelure. 156

Figure 65 : Position des cibles de références. Le centre des deux cibles en premier plan a été placé à exactement 50 cm de distance.	156
Figure 66 : Plan de vol du drone lors de l'acquisition d'image. a. positionnement du drone entre deux cibles et visualisation du centre de chaque cible; b. élévation du drone en maintenant les cibles dans le champ de vision de la caméra; c. descente en focalisant la visée sur le tronc.....	157
Figure 67 : Exemple de détournage des faces de <i>S. mannii</i> pour la création d'un polygone géoréférencé.	159
Figure 68 : Méthode de mesure dite "sous les cannelures" de <i>S. mannii</i> du plus grand diamètre de la première face de la bille (<i>D1g</i>) et du plus petit diamètre perpendiculaire (<i>D1p</i>).	162
Figure 69 : Graphique de Bland-Altman comparant: (a.) les volumes des fûts mesurés au relascope de Bitterlich (Volume mesure) et ceux mesurés par billons successifs après abattage (volume validation) de <i>P. macrophylla</i> , (b.) les aires des tranches mesurées sur les modèles 3D (aire mesure) et celles mesurées sur les photographies des tranches après abattage (aire validation) de <i>S. mannii</i> . h_{moy} = hauteur moyenne des tranches.....	163
Figure 70 : Répartition des résidus des modèles en fonction du volume prédit pour <i>Pentaclethra macrophylla</i> (a.) et <i>Scyphocephalum mannii</i> (b.).....	166
Figure 71 : Corrélations de Pearson pour <i>S. mannii</i> (a.) et de Kendall pour <i>P. macrophylla</i> (b.) entre les paramètres de conformation des arbres sur pied et les rendements de transformation. %C = coefficient de commercialisation (%); %S = rendement sciage (%); d = diamètre de l'arbre, d-c = diamètre de l'arbre corrigé; p = profondeur de la plus grande cannelure; h_c = hauteur de la plus grande cannelure; h = hauteur du fût.....	167
Figure 72 : Répartition de l'erreur de prédiction des différents rendements de transformation en fonction du rendement prédit. (a.) Modèle de prédiction du rendement sciage en fonction du diamètre corrigé de <i>S. mannii</i> ; (b.) Modèle de prédiction du coefficient de commercialisation en fonction de la hauteur de tige de <i>P. macrophylla</i>	168
Figure 73 : A. Représentation graphique de l'équation de cubage de <i>P. macrophylla</i> en fonction de la hauteur moyenne des fûts des arbres de chaque classe de qualité et de la hauteur moyenne de tous les arbres, indépendamment de la qualité (pointillé), B. Évolution du biais entre la prédiction du volume en utilisant la hauteur moyenne des arbres et la prédiction du volume utilisant la hauteur moyenne de chaque classe de qualité.	171
Figure 74 : A gauche, cœur creux observe à la base de la plupart des individus de <i>P. macrophylla</i> , à droite, au premier plan, portion supérieure d'une grume de <i>S. mannii</i> qui a été purgée suite à la présence d'une gouttière.	173
Figure 75 : Localisation des dispositifs DYNAFAC utilisés pour mesurer la croissance des espèces et des UFAs dont l'inventaire d'aménagement a été utilisé pour modéliser l'évolution des populations.	178
Figure 76 : Variation de l'accroissement annuel en fonction du diamètre pour les espèces dont les modèles étaient significatifs.	188

Figure 77 : Structure initiale de population de <i>Klainedoxa gabonensis</i> , <i>Pachyelasma tessmannii</i> , <i>Pentaclethra macrophylla</i> et <i>Scyphocephalum mannii</i>	190
Figure 78 : Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de <i>Klainedoxa gabonensis</i> . A. Scénario actuel B. Scénario prudent.	194
Figure 79 : Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de <i>Scyphocephalum mannii</i> . A. Scénario actuel B. Scénario prudent.	194
Figure 80 : Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de <i>Pentaclethra macrophylla</i> . A. Scénario actuel B. Scénario prudent.	195
Figure 81 : Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de <i>Pachyelasma tessmannii</i> . A. Scénario actuel B. Scénario prudent.	195
Figure 82 : Clef d'identification des <i>Dialium</i> à 5 folioles sur base de materiel stérile et récapitulatif de l'écologie connue de chaque espèce.	203
Figure 83 : Schéma de sciage propose pour la production de coeur enrobé d'Eveuss noir et d'avivés d'Eveuss blanc.	210
Figure 84 : Représentation graphique des avantages et inconvénients pour la valorisation essences étudiées : Mubala (<i>P. macrophylla</i>), Eyek (<i>P. tessmannii</i>), Eveuss noir (duramen vrai de <i>K. gabonensis</i>), Eveuss blanc (bois de transition de <i>K. gabonensis</i>), Sorro (<i>S. mannii</i>) et Omvong (<i>D. polyanthum</i>). a. Facilité d'identification botanique ; b. Facilité de substitution d'essences importantes sur le marché du bois ; c. Efficience de la transformation avec l'outil industriel actuel; d. Volume mobilisable par arbre ; e. Durabilité de l'exploitation sous le scénario actuel ; f. Durabilité de l'exploitation sous le scénario prudent.	211

Tableau 1 : Principales affectations des terres pour l'aménagement forestier dans le Bassin du Congo. Source: Mille and Louppe (2015)	33
Tableau 2 : Appellations d'espèces commerciales phares et moins connues (ATIBT 2016).....	43
Tableau 3 : Leaf morphological traits investigated.....	60
Tableau 4 : Dendrometric and environmental parameters of selected trees. Position: Em = "Emergent" and Can = "Canopy"; altitude (m); slope (°); p is stem perimeter (m); hp is the height at which the perimeter was measured (m); h1 is the sampling height at the base of the stem (m); h2 is the sampling height at the top of the stem (m); ht is the total tree height (m).	62
Tableau 5 : Experimental iterations on the four selected trees for each species and each modality combination of the studied variables, i.e., wood and sampling height.....	63
Tableau 6 : Confusion matrix obtained by predicting the independent validation dataset.....	72
Tableau 7 : Wavenumbers (W), expressed in cm^{-1} , that present 15 large peak differences ($\times 10 \times 10^{-3}$) between average species spectrum (Δ); Mean VIP scores from of PLS-DA model, shaded scores are upper to the 95th percentile of vip score within the LV, scores with n are not significantly higher than 1 according to the confidence interval from the cross-validation process; Bond: chemical bond assignment to the wavenumber; Mol corresponds to the molecular class in which the chemical bonds are found (L= Lignin, H= Hemicellulose, C= Cellulose, P = Polyphenol, T = Tannin); Ref. corresponds to references that mention the bond assignment.	74
Tableau 8 : Identification key for 3–5 leaflets <i>Dialium</i> species present in PW-CEB forests; on the left side of the table, the sections with the observable traits are presented; on the right side is either the species classification corresponding to the observed trait, or the reference of the section to continue the identification key; the range of values presented for the quantitative variables, in the third section, corresponds to the interval in which 50% of the observations made during this study occurs for each species.....	77
Tableau 9 : Comparison of genetically and morphologically similar 5-foliolate <i>Dialium</i> . Characteristics of <i>D. lopense</i> are from Breteler (1994), <i>D. pachyphyllum</i> and <i>D. polyanthum</i> from Rojo (1982). Characteristics of colour/appearance marked with * were not mentioned in descriptions and come from authors' field observations after identifying species with the description of the relevant author.	94
Tableau 10 : Arbres collectés pour la caractérisation des bois des 7 espèces étudiées. d = diamètre à la base du fût (cm); h_d = hauteur de mesure du diamètre (m); h_fût = hauteur du fût ; h_tot = hauteur totale de l'arbre (m); * = diamètre estimé.	105
Tableau 11 : Méthodes de calcul des propriétés du bois. m12 = masse 12% H (kg), V12 = volume 12% H (m^3), y in = interception de l'axe y de lm = modèle	

linéaire, H = teneur en humidité, S = surface de l'échantillon (m²), ma = masse anhydre (kg), Vs = volume au-dessus du PSF (m³), Va = volume anhydre (m³), Ls = longueur au-dessus du PSF (m), La = longueur anhydre (m), P = charge maximale avant rupture (N), l = distance entre deux points d'appui (m), t = distance entre deux points de chargement (m), m = distance entre les deux points de mesure de la flèche (m), a = hauteur de l'échantillon (cm), b = largeur de l'échantillon (cm), f = flèche induite par la charge (m), W = travail unitaire de rupture (kgm), p = largeur de l'empreinte du cylindre sur l'échantillon (mm), m0 = masse sèche théorique avant exposition au champignon (g), m16 = masse sèche après 16 semaines d'exposition au champignon ; Unités ; normes utilisées pour leur détermination et nombre d'échantillons sélectionnés par espèce : D.

polyanthum (N_{Dp}), *D. bambidiense* (N_{Db}), *D. lopense* (N_{Di}), *K. gabonensis* (N_{Kg}), *S. mannii* (N_{Sm}), *P. tessmannii* (N_{Pt}) et *P. macrophylla* (N_{Pm})..... 110

Tableau 12 : Définition des classes d'emplois selon la norme NF EN 335 et correspondance avec les classes de durabilité minimale au champignon basidiomycètes requise pour éviter l'utilisation de traitement de préservation selon la norme NF EN 460. La mention * renseigne que le risques d'attaque du ravageur est dépendant de l'aire de distribution de ce dernier. 141

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des utilisations potentielles des différentes espèces testées dans l'ordre de pertinence. ¹ Sous réserve d'une teneur en silice limitant les difficultés de transformation ; ² Uniquement après purge du bois de transition ; ³ Uniquement en zone peu exposée aux intempéries et avec une conception drainante ; ⁴ Sous réserve d'une mise en œuvre limitant les variations dimensionnelles du bois ; ⁵ Soumis à une humidité fréquente ou prolongée mais pas constante..... 150

Tableau 14 : Critères de classification de la qualité des arbres à Pallisco-CIFM pour *P. macrophylla* et *P. tessmannii*..... 160

Tableau 15 : Paramètres descriptifs de la distribution de chaque entrée utilisée pour l'élaboration des tarifs de cubage de *P. macrophylla* et *S. mannii*. d = diamètre à hauteur de poitrine (m); h= hauteur de la tige sur pied (m); p=profondeur de la plus grande cannelure (m)..... 164

Tableau 16 : Ajustement des tarifs de cubage à deux entrées reliant le volume du fût (V, en m³) au diamètre à hauteur de poitrine (en m) et à la hauteur du fût (en m) pour *P. macrophylla*. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, ** et *** correspondent respectivement à p>0,05 ; 0,01>p>0,001 et p<0,001) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochets. Le paramètre d'ajustement pour l'homogénéisation de la variance des résidus (δ), le coefficient de détermination (R²), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en m³) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. 164

Tableau 17 : Ajustement des tarifs de cubage à deux et trois entrées reliant le volume du fût (V, en m³) au diamètre à hauteur de poitrine (en m), à la profondeur de la plus grande cannelure (en m) et à la hauteur du fût (en m) pour *S. mannii*. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, *, ** et *** correspondent respectivement à p>0,05 ; 0,05>p>0,01 ;

0,01>p>0,001 et p<0,001) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochet. Le paramètre d'ajustement pour l'homogénéisation de la variance des résidus (δ), le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en m³) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. 165

Tableau 18 : Ajustement des régressions linéaires entre les rendements de transformation de *S. mannii* et *P. macrophylla* et la conformation des arbres sur pied. Les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, *, ** et *** correspondent respectivement à p>0,05 ; 0,05>p>0,01 ; 0,01>p>0,001 et p<0,001) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochets Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en %) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. %S = rendement sciage (%), %C = coefficient de commercialisation, d_c = diamètre corrigé (m), h= hauteur du fût (m). 168

Tableau 19 : Surfaces inventoriées pour l'élaboration des plans d'aménagements des différentes UFAs de PWG-CEB et Pallisco-CIFM. DME = Diamètre Minimum d'Exploitation légale du Pays du site d'étude (cm). 177

Tableau 20 : Localisation, type de dispositif, durée de suivi (d_suisvis) et nombre total d'arbres mesurés par espèce (n). 179

Tableau 21 : Critères de classification de la qualité des arbres à PWG-CEB pour *K. gabonensis* et *S. mannii* et à Pallisco-CIFM pour *P. macrophylla* et *P. tessmannii*. 180

Tableau 22 : Répartition du coefficient d'exploitation sur les différentes sous-populations dépendantes de la qualité des arbres. α est le coefficient d'exploitation total (%), pA, pB et pC sont les proportions d'arbres dans chaque classe de qualité exploitable juste avant exploitation, αA , αB , αC et αD sont les coefficients d'exploitation appliqués à chaque sous-population. A, B, C, D sont les quatre classes de qualité. 185

Tableau 23 : Accroissement diamétrique annuel moyen de chaque espèce (m, en cm), nombre d'individus caractérisé après suppressions des valeurs aberrantes (n), écart-type (σ , en cm), valeurs minimum et maximum (min et max, en cm) et diamètre moyen des arbres mesurés (m_dhp, en cm). 187

Tableau 24 : Ajustement des modèles de croissance reliant l'accroissement annuel diamétrique (cm/an) au diamètre pour les espèces dont un minimum de 40 arbres a été suivi. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, *, ** et *** correspondent respectivement à p>0,05 ; 0,05>p>0,01 ; 0,01>p>0,001 et p<0,001) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochet. Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en m³) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. Le meilleur modèle selon les paramètres présentés est présenté en gras pour chaque espèce. 189

Tableau 25 : Proportions initiales (p1) des différentes classes de qualité (A, B, C, D) pour les populations de *Klainedoxa gabonensis*, *Scyphocephalum mannii*, *Pachyelasma tessmannii* et *Pentaclethra macrophylla*. 191

Tableau 26 : Résumé des variables utilisées pour modéliser l'évolution des populations des espèces étudiées. $p1A$, $p1B$, $p1C$ et $p1D$ sont les proportions initiales (%) de la population dans les différentes classes de qualité, ai est l'accroissement annuel (cm/an) de la classe i , Di est le diamètre (cm) médian de la classe i , $Hmoy$ est la hauteur moyenne (19,5 m) du fût des individus de *S. mannii* utilisés pour l'élaboration du tarif de cubage au Chapitre 5, Hj est la hauteur moyenne du fût de *P. macrophylla* en fonction de la classe de qualité j ($HA= 16$ m, $HB= 13$ m et $HC= 9$ m), R = rotation forestière (années), t = turnover (%). 193

Tableau 27: Présentation des scénarios retenus. V_1 est le volume prélevé lors de la première exploitation (m^3/ha), R_4 est le taux de reconstitution après 4 rotations (%), V_a , V_b et V_c sont les volumes moyens collectés ($m^3/ha/rotation$), A , B , C et D sont les proportions de chaque classe de qualité dans la population totale après les 4 rotations (%). 193

Tableau 28 : Proposition de revision de la nomenclature des *Dialium* de la region guinéo-congolaise. Les statuts UICN mentionné sont: Non évalué (NE), Préoccupation mineure (LC), Quasi menace (NT), En danger (EN). Le symbole * indique que le statut renseigné est estimé, non reconnu par IUCN. Le symbole ^b indique que les propriétés du bois sont connues et qu'elles contribuent à l'attribution de la classe de qualité pour l'appellation. 206

Chapitre 1

Introduction générale



Forêt sempervirente gabonaise sous aménagement durable

1.1. L'exploitation forestière en Afrique centrale

Les Forêts Denses Humides Tropicales (FDHT) d'Afrique centrale constituent le deuxième plus grand massif forestier tropical continu au monde avec une superficie de près de 180 millions d'hectares (Louppe and Mille 2015). Elles s'étendent principalement sur 6 pays : Gabon, Cameroun, Congo, République Démocratique du Congo, République Centrafricaine et Guinée Equatoriale. Près de 54 millions d'hectares de FDHT sont actuellement affectés à la production de bois d'œuvre (Eba'a Atyi et al. 2022). Cela représente 27% de la superficie forestière dans cette sous-région. À titre de comparaison, les forêts à vocation de préservation n'en représentent que 15% (Vancutsem et al. 2021; Eba'a Atyi et al. 2022). Les forêts de production sont majoritairement représentées par le modèle de concession forestière (Figure 1).

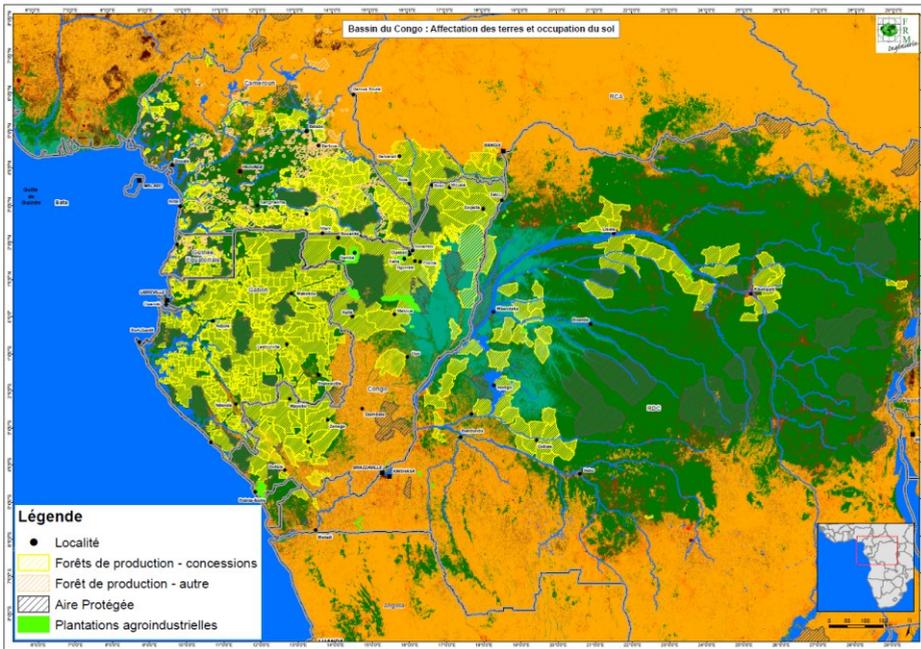


Figure 1: Carte des zones affectées à la production de bois d'œuvre (modèle de concession forestière en quadrillage jaune, autre modèle, quadrillage vert), aux aires protégées (quadrillage gris) et aux plantations agro-industrielles (vert clair) dans le Bassin du Congo. Source : FRM (2018)

Ce modèle repose sur les principes suivants : (i) les forêts naturelles sont la propriété de l'État (ii) l'état concède à un exploitant forestier une surface forestière Unité Forestière d'Aménagement, UFA¹, pour une durée de 20 à 35 ans (rotation forestière) et (iii) durant cette période le concessionnaire doit respecter les normes

¹ Les appellations de la superficie concédée varient d'un pays à l'autre : Unité Forestière d'Aménagement (UFA au Gabon, Congo et Cameroun), Permis d'Exploitation et d'Aménagement (PEA en RCA), Superficie Sous Aménagement (SSA en RDC).

d'aménagement fixées par l'État. À cette fin, le concessionnaire forestier est tenu de réaliser un plan d'aménagement (Eba'a Atyi et al. 2022). À ce jour, 60 % de la superficie attribuée aux exploitants forestiers est dotée de plans d'aménagement validés par les États (FRM 2018). Ce modèle de gestion assure 90% de la production annuelle de grumes d'Afrique centrale. Ce qui correspond à 11,4 millions de m³/an selon l'Organisation International des Bois Tropicaux (OIBT), soit 4,5% de la production annuelle mondiale de bois tropicaux.

Les lois définissant l'aménagement durable des FDHT ont été décrétées par les états d'Afrique Centrale à la fin des années 90, suite du Sommet de la Terre de Rio de 1992 (Nasi et al. 2006; Leroy et al. 2013). Elles s'appuient sur le principe de développement durable et visent à pérenniser la production forestière sur le long terme tout en maintenant les fonctions écologiques et sociales des forêts (Nasi et al. 2012a). En conséquence, la surface d'une UFA n'est donc pas uniquement vouée à la production de bois d'œuvre, mais divisée en différentes affectations des terres, nommées « séries d'aménagement ». Ces entités de gestion présentent des objectifs et des normes de gestion qui leur sont propres (Tableau 1). Dans certaines régions à forte pression démographique, la série agricole peut être très étendue alors que dans d'autres, en fonction de l'hydrographie ou du relief, c'est la série de protection qui prend une grande importance. Il en résulte que la série de production peut ne représenter que 55% de la surface totale de certaines UFA (FRM 2018). La série de production étant le pilier économique de ce modèle, sa planification est un enjeu capital pour le concessionnaire.

Tableau 1: Principales affectations des terres pour l'aménagement forestier dans le Bassin du Congo. Source: Mille and Louppe (2015)

Affectation des terres	Objectif spécifique
Série de production	Assurer une production soutenue en bois d'œuvre compatible avec la pérennité de la ressource et le maintien des fonctions écologiques et sociales de la forêt. Assurer l'approvisionnement en bois d'œuvre des industries locales Améliorer les revenus tirés par les différents partenaires impliqués dans la gestion forestière (État, opérateur économique, population locale).
Série de protection	Garantir le maintien du couvert forestier. Protéger les sols fragiles, les sources d'eau, les zones humides et marécageuses, les zones escarpées ou sensibles à l'érosion. Protéger les ressources culturelles
Série de conservation	Protéger les habitats d'espèces fauniques ou floristiques menacés ou sensibles à l'exploitation forestière. Protéger la diversité biologique.
Série agricole, de développement communautaire ou à usage des populations	Satisfaire les besoins des populations locales en produits agricoles et forestiers (ceux-ci pouvant être également prélevés dans la série de production en vertu des droits d'usage). Améliorer les revenus des populations locales en valorisant ces ressources.
Série de recherche	Améliorer les connaissances des ressources génétiques et biologiques (dynamique des peuplements, impact de l'exploitation...).
Série sylvicole	Mettre en place des plantations forestières. Expérimenter de nouvelles techniques sylvicoles.
Série à usage minier	Permettre la valorisation des ressources minières, en coexistence durable entre la société minière et le gestionnaire de la concession.

L'identification de cette dernière repose sur un inventaire préalable de la ressource forestière. Cet inventaire par échantillonnage, appelé inventaire d'aménagement, vise à évaluer la répartition diamétrique (nombre d'arbres par classe de diamètre) et le volume mobilisable de chaque espèce présente dans l'UFA. Le taux de sondage de cet inventaire peut varier en fonction de la diversité du massif, mais avoisine généralement 1% de la surface totale (Nasi et al. 2012b; Louppe and Mille 2015). En accord avec le cadre légal, un groupe de 20 à 30 espèces est généralement sélectionné sur base des volumes disponibles, de la qualité des arbres et de la possibilité de mise sur le marché de ces espèces (Louppe and Mille 2015). Le gestionnaire doit ensuite trouver un compromis entre une production rentable de bois et un renouvellement de la ressource satisfaisant pour la prochaine exploitation. Le renouvellement de la ressource est calculé par le Taux de Reconstitution (%RE) de chaque espèce (Bayol et al. 2010), dont la formule (Équation 1) a été proposée par le projet API Dimako (Durrieu De Madron et al. 1998).

$$\%RE = \left(\frac{[N_0(1 - \Delta)] * (1 - \alpha)^R}{N_p} \right) * 100 \quad (1)$$

Ce taux permet d'évaluer le pourcentage de tiges exploitables (N_p) qui seront remplacées à l'issue de la rotation forestière² (R). Il intègre également les dégâts de l'exploitation forestière sur le peuplement (Δ) ainsi que la mortalité annuelle naturelle des arbres (α). Pour un prélèvement moyen de 1-2 pieds/ha, l'exploitation engendre la mortalité de 6-11% des pieds (Picard et al. 2012a) et la mortalité naturelle annuelle est généralement estimée à 1% (Ligot et al. 2022). L'effectif à reconstituer (N_p) concerne l'ensemble des pieds au-dessus du Diamètre Minimum d'Aménagement (DMA), diamètre minimum à partir duquel une espèce pourra être prélevée durant l'exploitation de l'UFA. Cette valeur doit toujours être supérieure ou égale au Diamètre Minimum d'Exploitation (DME) légale fixé par chaque pays. Finalement, le nombre de tiges atteignant théoriquement le DMA au bout d'une rotation (N_0) dépend, d'une part de l'accroissement annuel diamétrique de l'espèce considérée, mais également de la répartition diamétrique de sa population et du DMA choisi (Figure 2). La plupart de ces paramètres étant dépendants de l'écologie des espèces ou du modèle d'exploitation actuel, le gestionnaire n'a que deux leviers d'action sur le %RE : les choix du DMA et de la durée de la rotation³.

² La durée d'une rotation forestière est toujours un multiple de 5 ans et doit être supérieur ou égale à 20 ans au Gabon, 25 ans en République Démocratique du Congo et en République Centrafricaine. Au Cameroun elle est toujours fixée à 30 ans.

³ En RDC, il existe un troisième levier d'action. L'effectif à reconstituer (N_p) peut être pondéré par un coefficient d'exploitation en fonction de la qualité de la ressource forestière.

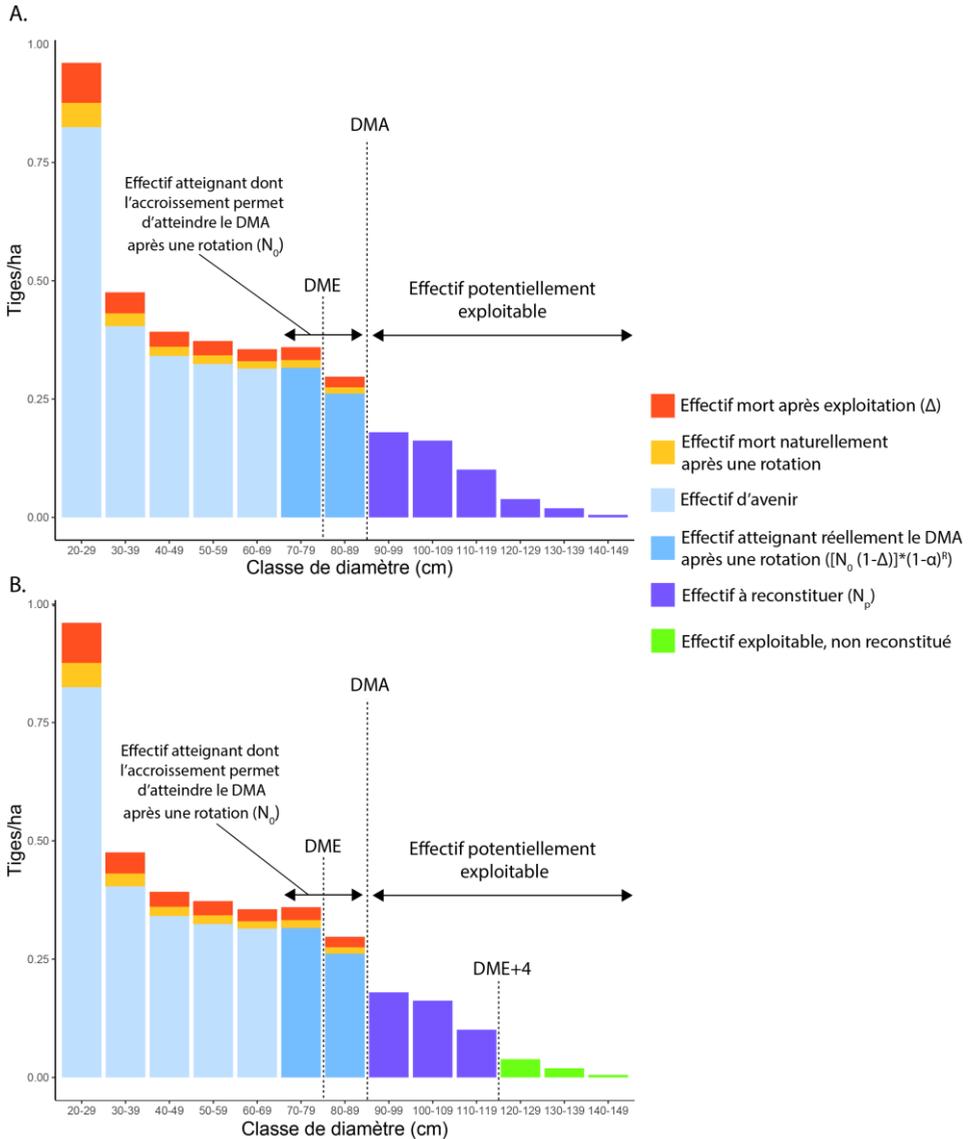


Figure 2: Effectifs de la population impliqués dans le calcul du taux de reconstitution pour A. le Gabon et B. le Cameroun.

Chaque pays a des normes qui lui sont propres. Par exemple, au Cameroun, il convient d'aménager au moins 20 essences représentant 75 % du volume des principales essences commerciales et de ne reconstituer que 50 % des 4 classes au-dessus du DME. Le reste est considéré comme un « bonus d'exploitation » car il a été considéré que 30 ans ne suffisaient pas à reconstituer un stock qui s'est créé après des centaines d'années (Figure 2). Au Gabon, il n'y a pas de bonus, mais des

exigences différentes en fonction des essences. Ainsi, le %RE de l'okoumé doit être d'au moins 75 %, celui des autres espèces devant dépasser 40 %.

Une fois ces paramètres fixés, la possibilité forestière (volume réellement mobilisable) est calculée à l'aide d'équations de cubage spécifiques faisant la relation entre le diamètre et le volume de l'arbre. Pour assurer une production constante pendant la rotation forestière, la possibilité forestière de l'UFA est répartie équitablement entre plusieurs "blocs quinquennaux"⁴. Chaque bloc correspond à une superficie forestière qui sera parcourue en cinq ans⁵. Le nombre de blocs dépend donc de la durée de rotation. Ceux-ci sont ensuite divisés en cinq Assiettes Annuelles de Coupe (AAC)⁶ de surface équivalente. Au fil de la rotation, les AACs seront parcourues les unes après les autres, année après année. Cependant, avant l'exploitation d'une AAC, le gestionnaire doit faire valider un Plan Annuel des Opérations (PAO) par les autorités forestières nationales. Ce PAO consigne les résultats d'un inventaire exhaustif de la ressource mobilisable (effectif, qualité, volumes, distribution spatiale), le parcellaire d'exploitation et l'infrastructure routière prévue de l'AAC (ATIBT 2007a).

Sans décrire les processus de planification des autres séries d'affectation, il est aisé de comprendre que l'élaboration d'un Plan d'Aménagement et la gestion annuelle de la production demandent une logistique importante, entraînant des coûts non négligeables. L'inventaire d'aménagement est l'opération la plus onéreuse avec un coût d'environ 4\$/ha en 2006, soit 400.000 à 600.000 dollars pour une concession moyenne (Nasi et al. 2006). Bien que les plans d'aménagement soient obligatoires depuis les années 2000, ces contraintes financières ont freiné les gestionnaires dans l'aménagement de leurs forêts. En 2017, environ 70% des UFA attribuées par les états d'Afrique Centrale disposaient effectivement d'un plan d'aménagement (FRM 2018). Si les surfaces aménagées continuent d'augmenter, la gouvernance des États de la région ne garantit pas toujours le respect des prescriptions d'aménagement (Karsenty 2019; Eba'a Atyi et al. 2022). Dès lors, pour assurer aux consommateurs le respect des normes d'aménagement dans leurs concessions et garantir la qualité de leur gestion, certains gestionnaires font certifier leurs forêts par un organisme indépendant.

1.2. La certification de gestion forestière durable

La certification forestière peut être définie comme un instrument de marché visant à promouvoir l'aménagement durable des forêts (Auld et al. 2008). Il prévoit une évaluation (audit) par un organisme, indépendant et non étatique, des méthodes de gestions forestières. Cet audit est toujours réalisé sur base de normes reconnues

⁴ L'appellation « Blocs Quinquennaux » est utilisée en RDC et au Cameroun. En RCA et au Congo, ces unités sont appelées Unités Forestières de Production (UFP). Au Gabon c'est l'appellation Unité Forestière de Gestion (UFG) qui est utilisée.

⁵ Au Congo, les UFP ne sont pas obligatoirement quinquennales et peuvent contenir un volume mobilisable sur 4 à 6 ans (Mille and Louppe 2015).

⁶ «Parcelles » en RCA.

internationalement ou nationalement. En contrepartie de cette démarche volontaire, l'obtention du label de certification doit théoriquement faciliter l'accès à certains marchés et augmenter le prix de vente du bois (Romero et al. 2017). En région tropicale, le principal organisme de certification de gestion durable est le *Forest Stewardship Council* (FSC).

Le FSC a été créé en 1993 et a délivré son premier certificat en Afrique centrale en 2005. À l'heure actuelle, le bassin du Congo est la région tropicale possédant la plus grande surface de forêts naturelles certifiées avec près de 4,6 millions d'hectares (FSC, 2023). Le label FSC garantit la gestion durable des forêts sur base de 10 grands principes déclinés en critères et indicateurs adaptés au contexte national (Forest Stewardship Council A.C. 2012). Selon l'Association Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT) et le Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) en 2014, le passage de l'exploitation dite « conventionnelle » à l'exploitation certifiée FSC passe notamment par l'amélioration de différentes pratiques telles que : l'application de l'Exploitation Forestière à Impact Réduit (EFIR), l'amélioration de la gestion des ressources humaines dans l'entreprise, une meilleure inclusion des populations riveraines dans le processus de gestion, le suivi et la gestion des populations d'espèces commerciales, la gestion de la faune, le contrôle du braconnage, l'identification et la gestion des zones à Hautes Valeurs de Conservation (HVC), le suivi et l'évaluation des performances et la mise en place d'un système efficace de traçabilité du bois. La méta-analyse de Burivalova et al. (2017) met en évidence les bénéfices de ces pratiques sur les plans environnementaux et sociaux (Figure 3).

L'autre grand système de certification est le PEFC. En Afrique centrale, les normes du PEFC sont proches de celles du FSC. Si les superficies certifiées par le PEFC y sont encore faibles (environ 600.000 ha selon l'ATIBT en 2023), elles vont certainement progresser au cours des années à venir. Certains programmes, comme le PPECF⁷, viennent en appui, notamment par un programme de coaching, aux sociétés désirant se lancer dans la démarche de certification. Cette démarche est volontaire, à l'exception du Gabon qui contraint les entreprises à être certifiées d'ici 2025 (ATIBT, 2023).

L'impact limité d'exploitation forestière certifiée sur les forêts a conduit plusieurs auteurs à recommander que les concessions certifiées soient vues comme une composante complémentaire au réseau d'aires protégées (Billand and Nasi 2008; Clark et al. 2009; Nasi et al. 2012a; Putz et al. 2012; Haurez et al. 2016; Lhoest et al. 2020). Malheureusement, même si les études tendent à démontrer que le FSC facilite l'accès à certains marchés et les prix de vente de ses produits, le coût des investissements dans les domaines sociaux et environnementaux rend les entreprises certifiées non concurrentielles par rapport aux acteurs illégaux (Sist et al. 2021) (Figure 3). Selon FRM (2018), la part du secteur informel dans la

⁷ Programme de Promotion de l'Exploitation Certifiée des Forêts.

production annuelle est de 34 % avec une forte variation selon les pays : 44 % au Cameroun contre 11 % au Gabon.

Dans ce contexte, la faillite de certaines entreprises certifiées telles que SFID (Groupe Rougier) est interpellant. Cette perte de superficie certifiée pourrait laisser place à des pratiques d'exploitation non durables telles que l'exploitation illégale de bois d'œuvre ou l'agriculture intensive (Karsenty et al. 2017). Outre la concurrence déloyale du secteur informel, la diminution des ressources valorisables est en partie la cause de ce déclin.

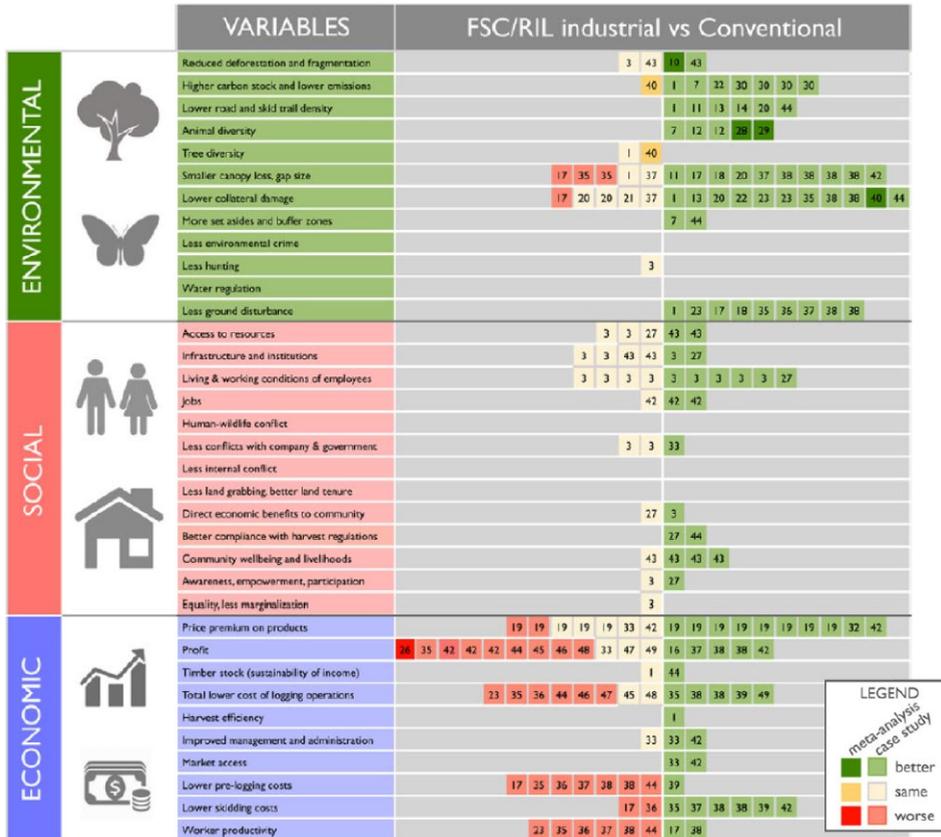


Figure 3: Vue d'ensemble des études comparant l'exploitation certifiée FSC ou l'EFIR (FSC/RIL) à l'exploitation conventionnelle (Conventional). Chaque carré représente une étude ou une méta-analyse, le numéro à l'intérieur faisant référence à la publication dans l'article original. La couleur des carrés renseigne quant à la performance du FSC/RIL par rapport à l'exploitation conventionnelle : vert = FSC/RIL plus performant, blanc/orange = pas de différence, rouge = FSC/RIL moins performant. Source: Burivalova et al. (2017)

Le modèle de concession en péril ?

Dans leur méta-analyse sur l'exploitation sélective de bois d'œuvre en forêt tropicale, Putz et al. (2012) mettent en évidence, d'une part, un impact modéré de

ce type d'exploitation sur la biodiversité et les stocks de carbone et de l'autre, une diminution significative de la ressource valorisable au fil des rotations (Figure 4). Cette diminution peut être en partie expliquée par la difficulté de reconstituer la totalité d'un effectif accumulé durant des centaines d'années après une rotation de 20 à 40 ans.

En Afrique centrale, des raisons historiques peuvent également être évoquées. En effet, suite à l'appauvrissement des ressources forestières en Europe, les puissances coloniales ont intensifié l'exportation de bois tropicaux au début des années 1920 (Chevalier 1928; Codou and Gibert 1975). Après un ralentissement de la production durant la Seconde Guerre mondiale, l'exploitation des forêts a redoublé d'intensité pour reconstruire l'Europe (Méniard 1948, 1949; Halley 1953). En l'absence de toute sylviculture (à l'exception de quelques initiatives pour *Aucoumea klaineana* Pierre et *Terminalia superba* Engl. & Diels.), les collectes abusives des forêts côtières, aisément accessibles par voie maritime, ont mené à un rapide épuisement de leur potentiel de production (Halley 1953; Codou and Gibert 1975; Nasi et al. 2006). La pression des marchés européens et l'installation des voies ferrées ont permis aux exploitants d'atteindre des massifs autrefois inaccessibles (Nasi et al. 2006). Cependant, considérant les possibilités limitées de transport jusqu'aux ports d'exportation ainsi que les coûts de production et de *freight* maritime élevés, seuls les arbres de très haute qualité ont été prélevés (Codou and Gibert 1975). Ce prélèvement exclusif des meilleurs individus n'a laissé que peu d'arbres de bonne conformation pour assurer la régénération, réduisant ainsi la qualité générale du peuplement (Fournols, 1958). Ce phénomène est appelé l'écémage des forêts (Bouvarel, 1956). Les rendements théoriques étant liés à la qualité des arbres (Fays 2008), cet écémage menace la rentabilité des opérations forestières depuis de nombreuses années (Fournols 1958; Biraud 1963; Oldfield 1988; Smith et al. 1994).

Malgré la grande diversité d'espèces potentiellement exploitables en Afrique Centrale (150 espèces pouvant fournir annuellement plus de 15.000 m³ de grume selon FRM en 2018), cet écémage a été concentré sur une poignée d'entre elles. Depuis près de 100 ans, certaines espèces phares monopolisent le marché du bois telles qu'*Aucoumea klaineana* (Okoumé), *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. (Ayous), *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague (Sapelli), *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg. (Iroko), *Lophira alata* Banks ex C.F. Gaertn. (Azobé), *Entandrophragma condollei* Harms (Sipo), *Terminalia superba* Engl. & Diels (Fraké) (Suchel 1968; Codou and Gibert 1975; Oldfield 1988; Karsenty et al. 2008). Sélectionnées au début de l'exploitation industrielle pour la flottabilité de leur grume, leur aptitude au déroulage ou encore leurs propriétés mécaniques exceptionnelles (Lasserre 1955), ces espèces assurent encore actuellement plus de 80% du volume de grume produit dans le Bassin du Congo (FRM 2018).

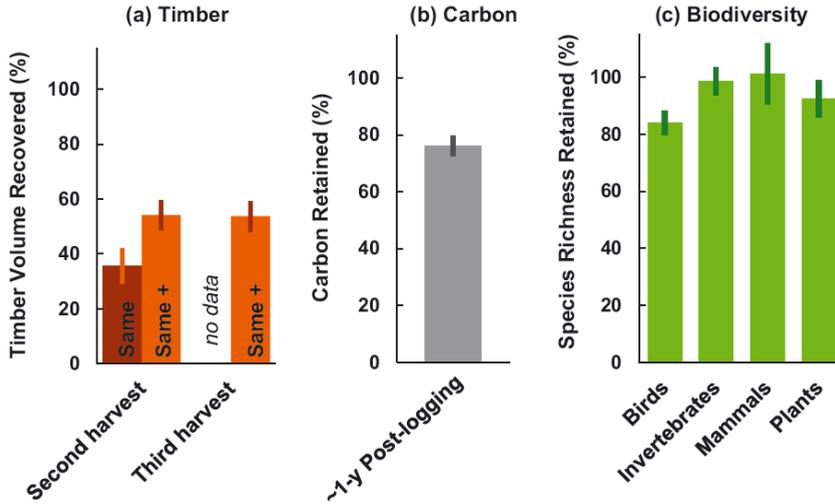


Figure 4: Résultat d'une méta-analyse sur l'exploitation sélective de bois d'œuvre. (a) volume de bois commercialisable après une ou deux rotations, d'une durée de 20 à 40 ans selon le pays, si les espèces collectées restent les mêmes ("Same") ou si des espèces additionnelles sont collectées également ("Same +"); (b) stock de carbone maintenu environ un an après exploitation; (c) richesse en espèces d'oiseaux, d'invertébrés, de mammifères et de plantes dans les forêts soumises à l'exploitation sélective par rapport aux forêts naturelles. Les moyennes et écarts-types ont été calculés sur base de 59, 22 et 109 études. Source : Putz et al. (2012)

Au-delà de l'écrémage subi depuis près d'un siècle, certaines espèces font face à un ralentissement de leur régénération naturelle. En effet, les besoins en lumière élevés pour le développement des espèces pionnières longévives telles que *A. klaineana*, *T. scleroxylon*, *T. superba*, *L. alata* ou *M. excelsa* (Doucet 2003; Biwolé et al. 2012; Morin-rivat 2018) ne sont plus que rarement rencontrés dans les forêts âgées, dédiées à la production. Plusieurs études récentes ont montré que ces espèces se sont surtout régénérées il y a environ 150 ans sur des terres abandonnées par les agriculteurs itinérants (Biwolé et al. 2015; Morin-Rivat et al. 2017; Ndonga Makemba et al. 2022). Suite aux politiques coloniales de regroupement et l'attraction des routes pour le commerce, les populations se sont concentrées le long des principaux axes routiers (Figure 5), laissant la canopée se refermer derrière eux.

Bien que l'exploitation sélective continue d'ouvrir localement le couvert forestier, la sélectivité des espèces et des individus implique un impact réduit sur le peuplement. Au Cameroun, dans la concession certifiée FSC gérée par Pallisco, Dupuis et al. (2023) ont montré que l'exploitation impacte le couvert à raison de seulement 3,8% de la surface exploitée. Soixante-huit pourcent de cette surface concerne les trouées d'abattage. L'ouverture d'une trouée variant de 0,02 à 0,04 ha (Durrieu de Madron et al. 2000; Medjibe et al. 2011), est bien moindre que celle d'un champ qui est en moyenne de 1-1,5 ha (Carrière 2003). Sous cette canopée peu impactée, la diminution de la régénération naturelle de ces espèces, combinées

aux méthodes de gestion actuelles, se traduit par une réduction des effectifs exploitables sur le long terme (Figure 6).

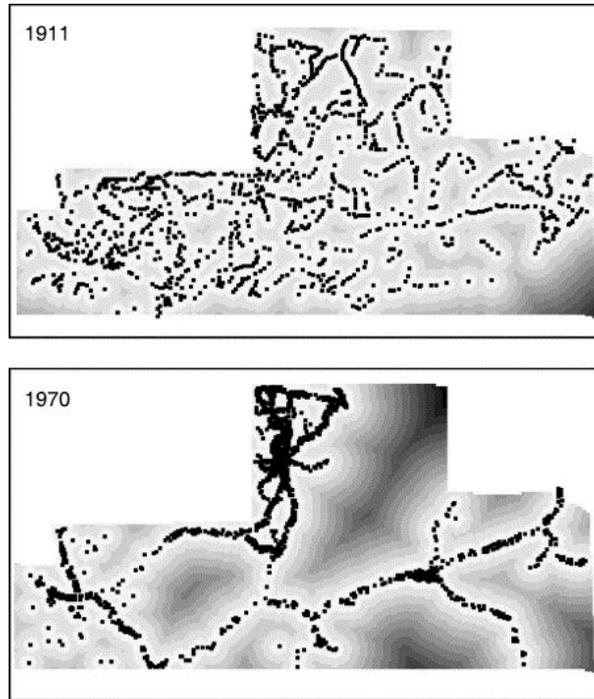


Figure 5: Concentration des villages (points noirs) le long des routes dans le nord du Gabon suite à la politique de “regroupement” durant la colonisation française. Source: Laurance et al. (2006)

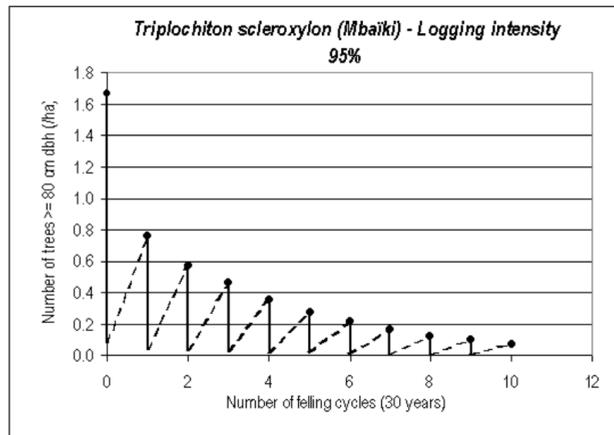


Figure 6 : Évolution des effectifs exploitables d’une population de *T. scleroxylon* à Mbaïki en maintenant l’exploitation forestière telle qu’elle a été réalisée la première fois. Source: Karsenty and Gourlet-Fleury (2006)

Pour enrayer cette réduction du potentiel économique des massifs forestiers et assurer la pérennité des concessions certifiées, la diversification des espèces de production est une piste à envisager (Karsenty and Gourlet-Fleury 2006a; Forest Stewardship Council A.C. 2012; Collectif DYNAFAC 2021; Sist et al. 2021).

1.3. Une diversification bien pensée

L'utilisation d'espèces secondaires, encore appelées espèces de promotion, *Lesser Known Timber Species* (LKTS), *Lesser Used Species* (LUS) ou plus récemment *Commercially Lesser Used Secondary Species* (CLUSS), pour diversifier la production n'est pas une thématique récente (Chevalier 1928; Oldfield 1988). Au cours des dernières années, cela s'est traduit par la commercialisation d'espèces de bois dur jusqu'à lors peu ou pas valorisées, comme le Tali (*Erythrophleum suaveolens* (Guill. & Perr.) Brenan et *Erythrophleum ivorense* A. Chev.), ou l'Okan (*Cylicodiscus gabonensis* Harms). Néanmoins, le nombre d'espèces nouvellement valorisées reste limité en raison d'une législation forestière est peu incitative (FRM 2018) et d'une méfiance des utilisateurs finaux à l'égard des espèces dites « secondaires ». Cette méfiance souligne le manque de dialogue entre le haut de la filière (les utilisateurs) et le bas de la filière (exploitants forestiers, scieurs). En effet, ces désignations sont généralement issues du bas de la filière et ne reflètent pas nécessairement à la qualité intrinsèque du bois. Elles résultent principalement de la conformation peu avantageuse de leurs arbres, d'une faible densité de pieds en forêts, de rendements décevants avec les outils industriels locaux. Pour réussir à commercialiser de nouvelles essences, il est donc nécessaire de renforcer le lien entre l'amont et l'aval de la filière et d'informer l'ensemble des acteurs sur les possibilités de valorisation de ces essences.

Cela passe par l'étude approfondie des propriétés de leurs bois, pour ensuite les comparer à celles des espèces traditionnellement utilisées et de proposer des utilisations optimales aux utilisateurs finaux (Chaowana 2013; Boamong et al. 2015). Il convient également d'évaluer la qualité des arbres dans le peuplement et l'influence qu'elle peut avoir sur leur mobilisation et leur transformation, à la base de la filière. Par ailleurs, la gestion durable implique de prendre des mesures des gestions qui assurent un renouvellement suffisant des arbres de qualité pour limiter l'écrémage économique des peuplements. La mise en place de telles mesures dépend cependant d'une identification précise des arbres exploités, ce qui nécessite un travail au niveau de l'espèce.

1.4. Essence ou espèce ?

Si dans le milieu scientifique l'espèce est généralement l'unité de base pour l'étude du vivant, ce concept n'est pas forcément adopté par les populations locales ou les acteurs de la filière bois (ATIBT 2016). Il faut donc différencier l'appellation taxonomique (composée du nom du genre, de l'épithète et du/des parrains), les noms vernaculaires (appellations utilisées dans le langage courant, variant entre les pays et les ethnies) et les noms pilotes ou essences (appellations retenues pour le

commerce du bois à l'international). Pour plusieurs espèces phares (par exemple l'Okoumé, l'Ayous, le Sapelli), bien que possédant toujours de nombreux noms vernaculaires, les noms scientifiques correspondent généralement à une appellation commerciale spécifique (Tableau 2). Pour d'autres espèces, il n'est pas rare qu'une appellation commerciale regroupe plusieurs espèces appartenant au même genre taxonomique. Ces regroupements sont généralement opérés pour faciliter les opérations de vente et l'acceptation des espèces sur le marché (ATIBT 2016). Si, pour des espèces ayant des bois similaires, ce regroupement ne pose pas de problème direct sur leur mise en œuvre, il n'en va pas de même pour la gestion durable de celles-ci dans les peuplements.

Au sein d'un même genre, l'écologie et l'aire de répartition des espèces peuvent considérablement différer, leur conférant des statuts de conservation distincts. Certains regroupements et l'absence de critères évidents de distinction peuvent nuire aux espèces les plus vulnérables.

Tableau 2: Appellations d'espèces commerciales phares et moins connues (ATIBT 2016).

Nom pilote/Essence	Noms taxonomiques	Noms vernaculaires
Okoumé	<i>Aucoumea klaineana</i> Pierre	Angouma, Mfumu, N'Goumi,...
Ayous	<i>Triplochyton scleroxylon</i> K. Schum.	Arere, Ayous, Bado, Eguess, M'Bado, Obeche, Samba, Wawa,...
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i> Sprague	Aboudikro, Assié-Sapelli, Lifak, M'Boyo,...
Iroko	<i>Milicia excelsa</i> C.C. Berg <i>Milicia regia</i> C.C. Berg	Abang, Bangui, Iroko, Kambala, Lokotin, Lusanga, Mandji, Odoum, Rokko,...
Tali	<i>Erythrophleum guinneense</i> G. Don <i>Erythrophleum ivorense</i> A. Chev. <i>Erythrophleum suaveolense</i> Brenan	Alui, Elondo, Elone, Eloun, Erun, Kassa, Mancone, Missanda, N'Kassa, Tali, Mwavi,...

La récente inscription à l'annexe II de la CITES (**Encadré 1**) de l'ensemble des espèces du genre *Pterocarpus* d'Afrique met en avant cette problématique. Ce genre comprend des espèces à large distribution pour lesquelles l'exploitation forestière ne constitue pas une menace (*P. soyauxii*) alors que d'autres sont d'avantage vulnérables (*Pterocarpus erinaceus* Poir. et *Pterocarpus tinctorius* Welw). Même si ces espèces peuvent être distinguées d'un point de vue botanique, les risques de confusions du bois ont été jugés trop importants et l'ensemble du genre a été classifié dans l'Annexe II (CITES 2022). La rédaction d'Avis de Commerce Non Préjudiciables (ACNP) par les pays producteurs et l'octroi de permis d'importation par les pays de l'Union Européenne va vraisemblablement freiner l'exportation de *P. soyauxii*, huitième essence la plus exploitée en 2016 dans le Bassin du Congo (FRM 2018). Ce qui va renforcer la pression sur les opérateurs économiques les plus vertueux déjà fortement handicapés par la

regrettable concurrence exercée par les acteurs informels. Si ce risque de confusion existe pour des espèces actuellement exploitées et donc relativement connues, il est encore plus important pour les espèces secondaires moins étudiées. C'est pourquoi il est nécessaire : (i) d'identifier clairement les espèces reprises sous les noms vernaculaires et commerciaux (ii) de proposer des critères d'identification simples des arbres en forêt, mais également du bois scié et (iii) évaluer l'aptitude à l'exploitation sélective de chaque espèce avant de les valoriser.

Encadré 1 : La Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacés d'extinction (CITES).

La CITES est un accord international entre les états visant à contrôler le commerce international de spécimens pour s'assurer qu'il ne menace pas la survie des espèces auxquelles ils appartiennent. Les espèces concernées par cette convention sont reprises dans 3 Annexes en fonction du degré de protection qu'elles requièrent :

- Annexe I : Liste des espèces les plus menacées dont le commerce international est interdit sauf à des fins non commerciales exceptionnelles (ex. recherche scientifique);
- Annexe II : Liste des espèces dont le statut de conservation est moins alarmant, mais qui pourrait le devenir si le commerce de leurs spécimens n'est pas étroitement contrôlé. Cette liste comprend également les « espèces semblables », soit les espèces dont les spécimens commercialisés ressemblent à ceux d'autres espèces inscrites dans cette annexe. Le commerce des espèces de l'Annexe II n'est autorisé qu'après délivrance d'un permis exportation. Pour que ce permis soit valide, une étude scientifique, prouvant que l'exportation de spécimens ne compromet pas la survie de l'espèce, doit être émise par une autorité scientifique de l'État d'exportation. Cette étude est appelée « Avis de Commerce Non Préjudiciable » (ACNP). Pour une importation dans un des États membres de l'Union Européenne, un permis d'importation, délivré par l'État membre, est également requis pour les importations d'espèces de l'Annexe II ;
- Annexe III : Liste des espèces inscrites à la demande d'une Partie qui en réglemente déjà le commerce et qui requière la coopération des autres Parties pour en éviter l'exploitation illégale ou non durable. L'exportation de spécimens d'espèces y étant inscrites n'est autorisée qu'après délivrance d'un permis d'exportation de l'État ayant inscrit ladite espèce.

L'inscription, la suppression ou encore le transfert d'espèces dans les Annexes I et II ne peuvent être actés que durant les sessions officielles de la Conférence des Parties. Néanmoins, une Partie peut décider en tout temps d'inscrire ou de supprimer des espèces de l'Annexe III.

1.5. Objectifs et cadre conceptuel

L'**Objectif général** de cette thèse est d'évaluer la faisabilité de valoriser durablement, dans le cadre de l'exploitation forestière sélective, une série d'espèces secondaires reprises sous 5 appellations commerciales différentes (Figure 7).

Ces appellations commerciales peuvent inclure plusieurs espèces dont les propriétés du bois, l'écologie ou encore le statut de conservation diffèrent. L'absence de critères évidents de distinction des espèces peut être délétère, tant pour l'industrie du bois que pour les espèces les plus vulnérables. Avant de proposer de valoriser un nouveau taxon, il convient donc de pouvoir distinguer, tant sur le plan botanique qu'au niveau du bois, les différentes espèces concernées. C'est l'objet de la première partie de la thèse qui correspond aux **Chapitres 2 et 3**.

Le groupe des Omvong (*Dialium* aux feuilles composées de 5 folioles) a été choisi pour illustrer la problématique de cette première partie. Dans le **Chapitre 2**, les traits botaniques des feuilles et les propriétés chimiques du bois des morphotypes de *Dialium* exploitables sont comparés. Après distinction du bois et des feuilles de ces morphotypes, deux ont été attribués à des espèces existantes, *Dialium lopense* Breteler et *Dialium polyanthum* Harms. Le troisième ne correspondait à aucune description botanique en vigueur et serait donc potentiellement une nouvelle espèce. Pour confirmer le statut taxonomique de cette dernière, le **Chapitre 3** en fait une description botanique détaillée. L'ensemble des traits botaniques fertiles et stériles, ainsi que leurs variations au sein de la population étudiée, y sont décrits. Dans ce chapitre, cette nouvelle espèce a également été différenciée des autres sur base de ses préférences topographiques, de sa structure de population et de sa densité d'arbres en forêt.

Après clarification des espèces exploitables reprises sous le vocable Omvong, toutes les espèces secondaires sont identifiées. Il faut ensuite définir les paramètres d'exploitation permettant d'assurer une production rentable sur le moyen terme des espèces étudiées. C'est l'objet de la deuxième partie de la thèse qui correspond aux **Chapitres 4, 5 et 6**.

Pour définir les usages du bois de chaque espèce, le **Chapitre 4** en étudie les propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle. Sur base de ces propriétés, des recommandations de mise en œuvre ont été discutées. Les espèces secondaires ont ensuite été comparées aux espèces commerciales pour identifier leur potentiel de substitution sur le marché du bois. Une liste d'utilisations a finalement été dressée sur base des recommandations de mise en œuvre et de leur potentiel de substitution. Le **Chapitre 5** se penche sur deux espèces dont les arbres présentent des conformations particulières pouvant affecter leur mobilisation : *Pentaclethra macrophylla* Benth. et *Scyphocephalum mannii* Warb. Pour ces espèces, des équations de cubage adaptées à leur morphologie ont été ajustées. La relation entre leur morphologie et les rendements de transformation a également été mesurée. Des recommandations pour améliorer la planification forestière et les rendements forestiers de ces deux espèces ont été formulées. Plus particulièrement, seuls les

arbres les mieux conformés sont actuellement rentables. C'est sur base de ce constat que le **Chapitre 6** vise finalement à statuer sur la faisabilité d'une production rentable sur le moyen terme. Pour ce faire, l'évolution des effectifs exploitables, des volumes produits ainsi que l'écrémage des peuplements ont été modélisés sous différents scénarios sylvicoles. Une comparaison du modèle de gestion actuel et d'un modèle assurant le maintien d'une production de qualité y est finalement réalisée.

Pour finir, le dernier chapitre (**Chapitre 7**) propose une synthèse globale et dresse des perspectives de recherche.

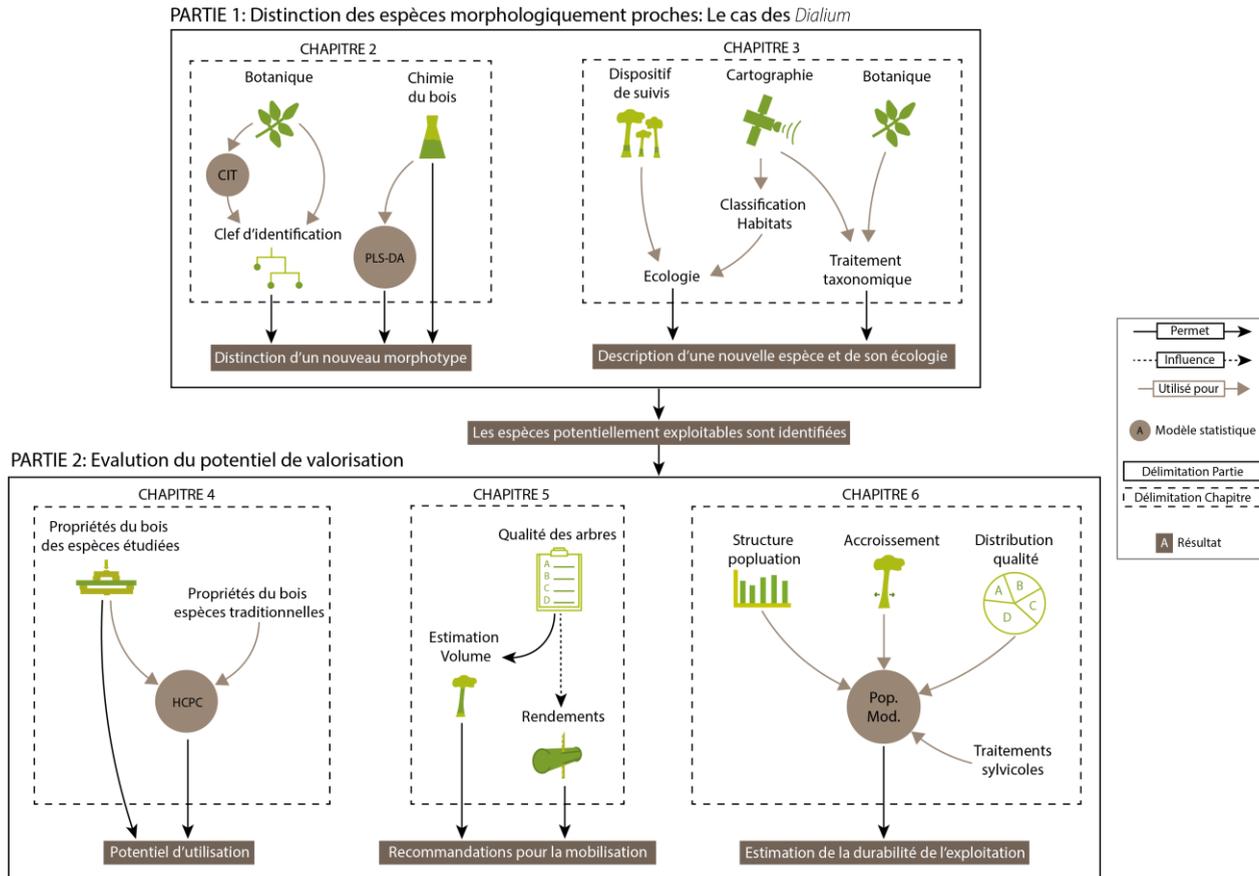


Figure 7 : Cadre conceptuel de la thèse de doctorat

1.6. Sites d'études et espèces cible

Les investigations de cette thèse ont été menées au sein de deux concessions forestières certifiées FSC : Pallisco-CIFM dans l'Est Cameroun et Precious Wood CEB (PW-CEB) à cheval entre le Haut-Ogooué et l'Ogooué-Lolo, au Gabon (Figure 8).

Les UFA gérées par Pallisco-CIFM sont caractérisées par un climat équatorial avec une température moyenne de 24°C et des précipitations annuelles de 1654mm (Fétéké et al. 2004). Elles se situent en partie dans des forêts semi-décidues et des forêts de transition entre les types semi-décidus et sempervirents. Les premières sont caractérisées par une saisonnalité marquée, une majorité d'espèces de *Fabaceae*, *Annonaceae* et *Malvaceae* ainsi la présence de certains taxons représentatifs tel que : *Pericopsis alata* (Harms) Meeuwen, *Fernandoa adolfi-friderici* (Gilg & Mildbr.) Heine, *Dasylepis seretii* De Wild., *Desplatsia spp.* et *Entandrophragma cylindricum* (Réjou-Méchain et al. 2021). Les secondes présentent une saisonnalité moins marquée, mais des espèces avec une densité moyenne de bois plus élevée et des diamètres moyens plus faibles. Ces forêts sont caractérisées par l'abondance de *Fabaceae*, *Annonaceae* et *Olacaceae* avec des taxons représentatifs tels que: *Uapaca spp.*, *Musanga cecropioides* R. Sm. Ex R. Br., *Annickia spp.*, *Croton spp.*, *Pseudospondias spp* (Réjou-Méchain et al. 2021).

Les UFAs gérées par PW-CEB sont soumises à un climat de type équatorial avec une température moyenne annuelle de 25°C et des précipitations annuelles de 1700mm/an (TerEA (Terre Environnement Aménagement) 2007). Elles sont majoritairement couvertes par des forêts sempervirentes mixtes et des forêts atlantiques sempervirentes de l'intérieur. Ces deux types forestiers sont caractérisés par des espèces ayant des bois de densité plutôt élevée. Le premier type se singularise par l'abondance de *Fabaceae*, *Olacaceae* et *Myristicaceae* et des espèces suivantes : *Diogoia zenkeri* (Engl.) Exell & Mendonça, *Elaeis guineensis* Jacq., *Cryptosepalum spp.*, *Bikinia spp.* et *Ochthocosmus spp.* Le second type est caractérisé par une abondance de *Fabaceae*, *Burseraceae* et *Myristicaceae*, avec les *Calpocalyx spp.*, *Letestua durissima* (A. Chev. Lecomte), *Eurypetalum tessmannii* Harms, *Coula edulis* Bail. et *Tetraberlinia bifoliolata* (Harms) Hauman (Réjou-Méchain et al. 2021).

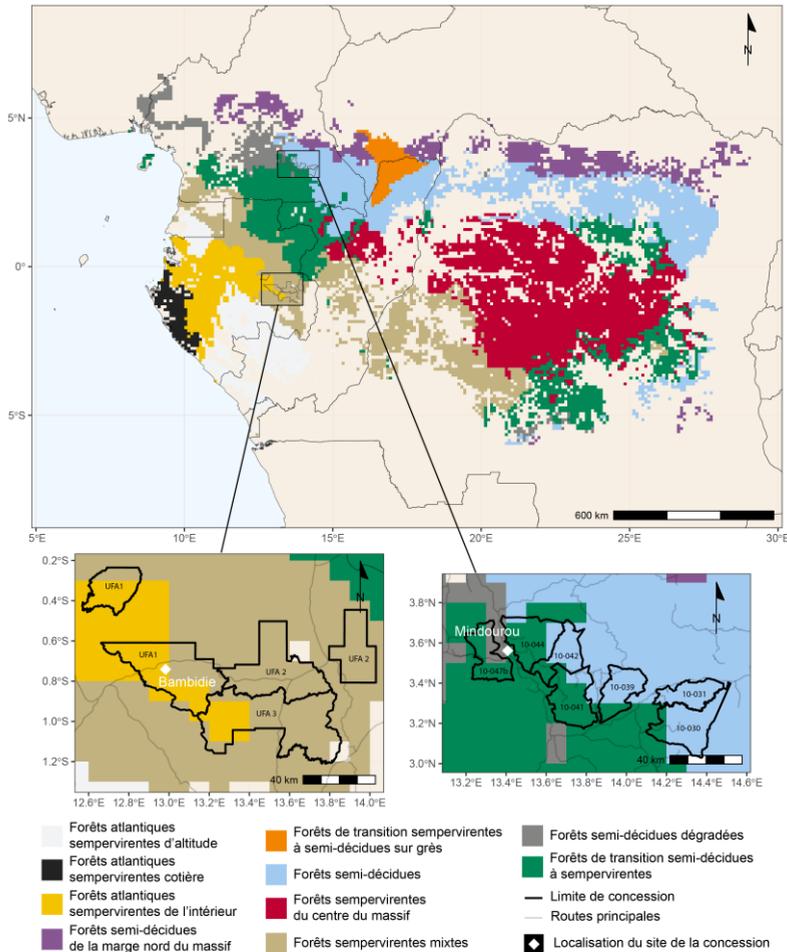


Figure 8 : Localisation des sites d'étude dans les grands types forestiers d'Afrique Centrale (Réjou-Méchain et al. 2021).

Les espèces étudiées au sein de ces sites d'études ont été sélectionnées sur base des éléments suivants: (i) les propriétés supposées avantageuses de leurs bois selon la littérature, (ii) leur conformation ou (iii) leur densité d'arbres exploitables sur les sites d'études ainsi que (iv) les volumes potentiellement mobilisables à l'échelle de l'Afrique Centrale. A Pallisco-CIFM, les espèces ayant été sélectionnées sont *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms et *Pentaclethra macrophylla* Benth. Dans les concessions de PW-CEB ce sont *Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl., *Scyphocephalum mannii* Warb. ainsi que les espèces du genre *Dialium* aux feuilles composées de 3 à 5 folioles, qui ont été étudiées.

1.6.1. *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms

P. tessmannii est un arbre de la famille des *Fabaceae*, sous-famille des *Caesalpinioideae*. Il est appelé Eyek ou Faux-Tali au Cameroun et Mekhogo au Gabon. C'est la seule espèce reprise sous l'appellation commerciale « Eyek ». Cet arbre, pouvant atteindre 60 m de haut et 2,5 m de diamètre, est un des plus grands des forêts d'Afrique Centrale (Figure 9). Son tronc est généralement droit et cylindrique, parfois déformé, avec des contreforts droit bien développés. Ses feuilles, composées bipennées de 2 à 6 paires de pennes portant chacune 9 à 20 foliolules, mesurent de 35 à 38,5 cm de long. Il est hermaphrodite et ses fruits sont des gousses quadrangulaires mesurant de 15 à 37 cm de longueur, 2 à 2,5 cm de largeur et 3,5 à 4 cm d'épaisseur (CJBG 2018). L'Eyek est distribué dans le sous-centre d'endémisme centrouguinéen (Figure 9). Son tempérament est encore débattu. Certains auteurs le classent comme tolérant à l'ombrage alors que la variation radiale de son infradensité est plutôt comparable à celle d'une héliophile longévive (Hubau et al. 2012; Fayolle et al. 2012; Doucet et al. 2021). Le bois de cette espèce n'est que peu valorisé localement. Ses fruits, une fois pilés, sont utilisés au Cameroun pour réaliser des lavements antidiarrhérique ou abortifs. Au Gabon et en RDC, les fruits et son écorce sont également utilisés comme puissant poison de pêche (Louppe et al. 2008). Au Cameroun, le DME de cette espèce est de 50 cm (MINFOF 2001). Il est de 70 cm au Gabon (MEFEPEPN 2004).

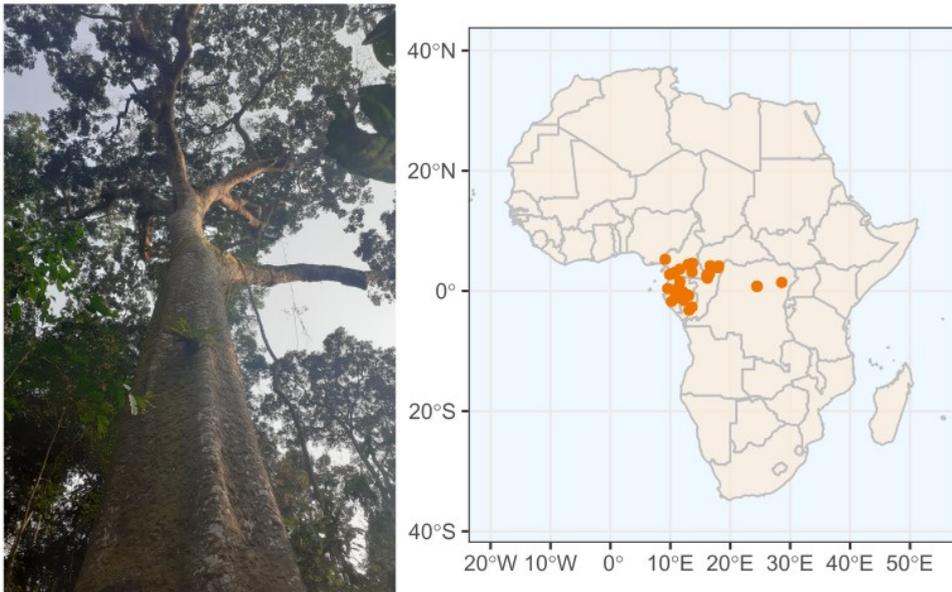


Figure 9: Fût de *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms et distribution de l'espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).

1.6.2. *Pentaclethra macrophylla* Benth.

P. macrophylla est un arbre de la famille des *Fabaceae*, sous-famille des *Caesalpinioideae*. Il est appelé Mubala au Cameroun, Owala en Côte d'Ivoire, Essiri au Congo ou African oil bean en anglais (ATIBT 2016). C'est la seule espèce reprise sous le nom commercial « Mubala ». C'est un arbre de dimension moyenne, atteignant 30 m de haut et rarement plus d'1m20 de diamètre. Son tronc est irrégulier, souvent bosselé, généralement avec présence d'empâtement, parfois de contreforts. Il possède des feuilles composées bipennées avec 4 à 9 pennes, lesquelles portent chacune 13 à 20 paires de foliolules. Il est hermaphrodite et ses fruits sont des gousses ligneuses de grande dimension (jusqu'à 65 x 10 cm). Cette espèce a une large distribution couvrant toute la région guinéo-congolaise (Figure 10). L'espèce tolérerait une gamme assez large de luminosité au stade juvénile et les graines sont majoritairement dispersées par explosion de la gousse (Meunier et al 2015). Son bois n'est pas valorisé, contrairement à ses graines qui sont très recherchées et font parfois l'objet d'un commerce. Elles peuvent être bouillies ou rôties et entrent dans la composition de sauces diverses. Au Cameroun, le DME de *P. macrophylla* est de 50cm (MINFOF 2001). Il est de 70 cm au Gabon (MEFEPEPN 2004). Selon le rapport de FRM (2018), cette espèce serait, en volume mobilisable par année, la 14^e espèce la plus importante des espèces secondaires avec 206.804 m³ dans le Bassin du Congo.

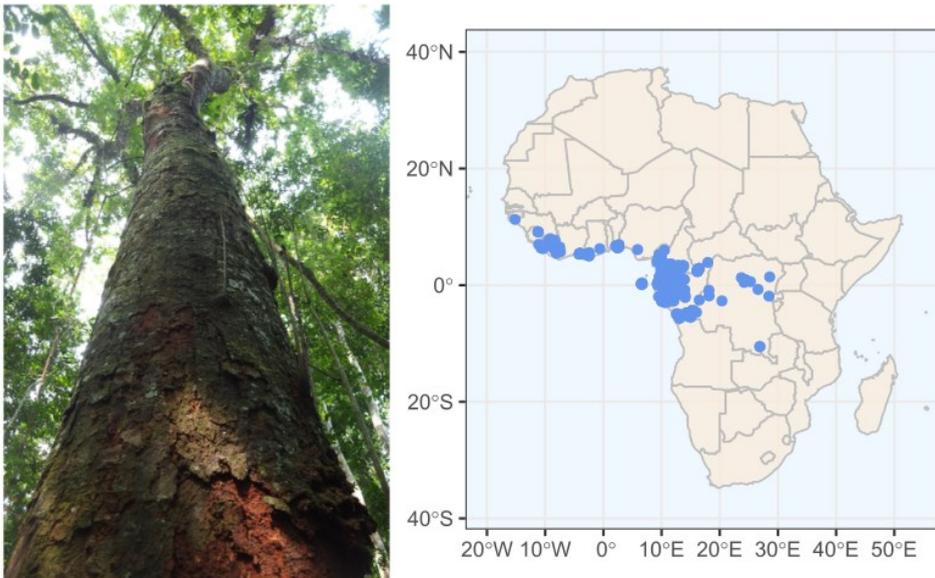


Figure 10: Fût de *Pentaclethra macrophylla* Benth. et distribution de l'espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).

1.6.3. *Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl.

K. gabonensis est un arbre de la famille des *Irvingiaceae*. Cet arbre est appelé Eveuss au Gabon et au Cameroun, Ngon au Cameroun, Kuma-Kuma au Congo et en RDC, Oboro en Centrafrique ou Odudu au Nigeria. Il est repris sous l'appellation commerciale « Eveuss » avec une autre espèce *Klainedoxa trillesii* Pierre ex Tiegh (ATIBT 2016). C'est un arbre de grande dimension atteignant 50 m de haut et 1,5m de diamètre. Son fût est assez cylindrique avec des contreforts souvent importants à la base. Il possède des feuilles simples, alternes et très coriaces et de longues stipules engainantes caractéristiques. Il est hermaphrodite et ses fruits sont des drupes. L'espèce est largement distribuée dans toute la région guinéo-congolaise (Figure 11). L'espèce serait héliophile et majoritairement dispersée par les éléphants (Meunier et al. 2015; Scalbert et al. 2023) . Son bois est dense et réputé très durable. Toutefois, la présence de bois de transition entre l'aubier et le duramen semble relativiser sa durabilité (Meunier et al. 2015). Au Gabon, son DME est de 70 cm (MEFEPEPN 2004) alors qu'il est de 50 cm au Cameroun (MINFOF 2001). Cette espèce serait la 4^e espèce la plus mobilisable des espèces secondaires avec 549.142 m³ de grumes par an dans les forêts du Bassin du Congo (FRM 2018) .

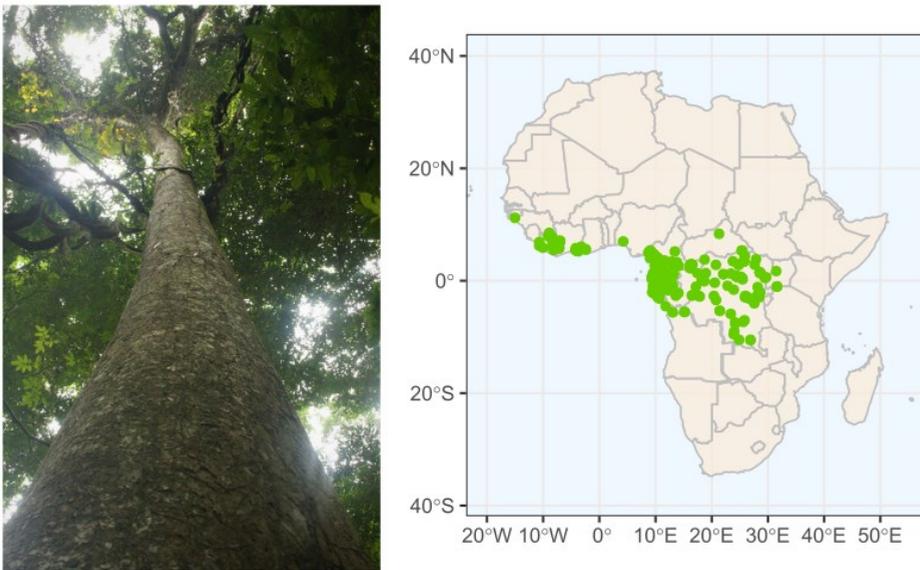


Figure 11: Fût de *Klainedoxa gabonensis* Pierre ex Engl. et distribution de l'espèce. Les occurrences sont issues de la base de données RAINBIO (Dauby et al. 2016).

1.6.4. *Scyphocephalium mannii* Warb.

S. mannii est un arbre de la famille des *Myristicaceae*. Il est appelé Sorro, Ossoko, Sogho ou encore N'Suku au Gabon. Au Cameroun, il est nommé Akurna ou Eboukzok. C'est la seule espèce reprise sous l'appellation commerciale « Ossoko ». C'est un arbre de hauteur moyenne, atteignant 35m de haut et jusque 1,5m de diamètre. Son tronc présente une section cannelée (étoilée) à la base et parfois jusque 5m de haut en fonction de la taille de l'individu. Il possède de longues feuilles simples (24 x 7 cm) et alternes. Il est hermaphrodite et son fruit est charnu. L'espèce n'est présente qu'au Cameroun et au Gabon (Figure 12). Son bois est localement utilisé pour la fabrication de pirogues. Ses fruits sont utilisés pour condimenter des sauces et son écorce sert à la médecine traditionnelle. Au Gabon, son DME est de 60 cm (MEFEPEPN 2004). Selon FRM (2018), la conformation des arbres rend difficile sa valorisation, mais cette espèce est la 6^e espèce la plus importante (espèces de promotion et commerciales confondues) en termes de volume mobilisable par année avec 1 à 1,5 million de mètres cubes de grumes.

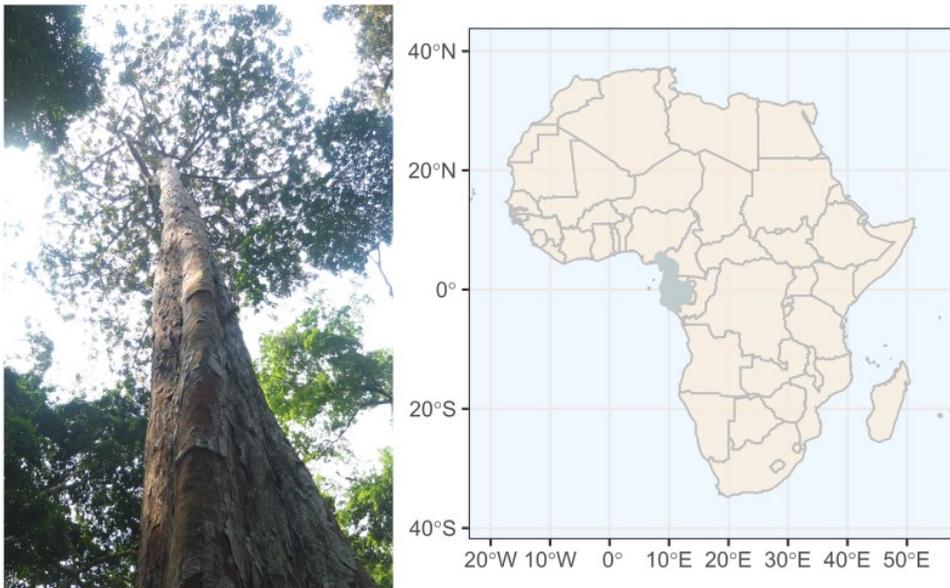


Figure 12: Fût de *Scyphocephalium mannii* Warb. et distribution de l'espèce. Les occurrences sont issues de la base de donnée RAINBIO (Dauby et al. 2016).

1.6.5. *Dialium* spp. L.

Les *Dialium* sont classés dans la famille des *Fabaceae*, sous-famille des *Dialioideae*. En considérant les incertitudes taxonomiques et les travaux récents sur la classification génétique des *Dialioideae* (Azani et al. 2017; Zimmerman et al. 2017), Bengono et al. (2021) comptent 22 espèces pour la région guinéo-congolaise. La Figure 13 présente la distribution géographique par sous-centre d'endémisme (White 1979, 1986, 1993) des 21 espèces pour lesquels les données d'occurrence sont disponibles. Les *Dialium* sont des arbres moyens à grands, rarement des arbrisseaux, leurs fûts sont généralement droits avec parfois des contreforts moyennement développés à la base. Leur feuilles sont composées imparipennées et comptent de 3 à 21 folioles. Les fleurs sont hermaphrodites et les fruits sont des petites drupes.

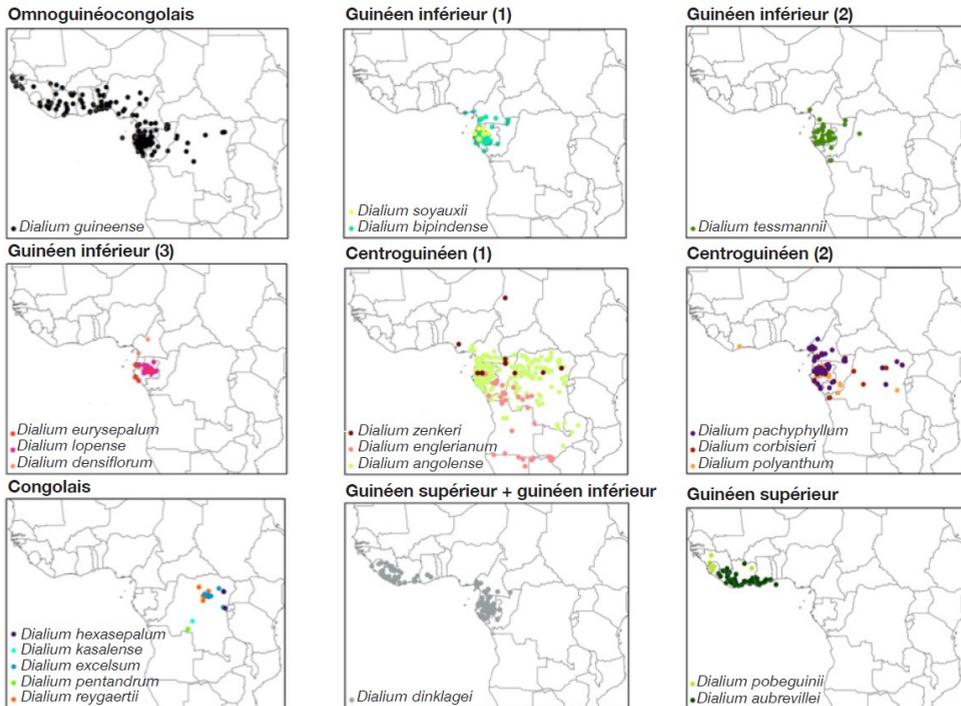


Figure 13 : Représentation de la distribution géographique des *Dialium* par sous-centre d'endémisme dans la région guinéo-congolaise. Les points d'occurrence proviennent des bases de données du Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève (CJBG, 2020), du Catalogue of Life Partnership via Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) et de la base de données RAINBIO (ArcGIS version 10.4.1). Source : Bengono et al. (2021).

La distinction des espèces étant complexe, elles sont toutes reprises sous l'appellation « Eyoum » (ATIBT 2016). Cependant, dans les inventaires forestiers, elles sont regroupées sous différents vocables. Les espèces dont les feuilles sont

composées de 3 à 5 folioles, soit *Dialium lopense* Breteler (Figure 13-A), *Dialium polyanthum* Harms (Figure 13- B), *Dialium pachyphyllum* Harms (Figure 13- C) et sont appelées Omvong au Gabon et Eyoum au Cameroun. Les autres espèces (plus de 5 folioles) sont appelées Eyoum au Gabon. Au Cameroun elles conservent l'appellation Eyoum, complétée par différents qualificatifs supplémentaires en fonction de l'espèce (Eyoum rouge, Eyoum blanc, Eyoum à petites feuilles,...). Les *Dialium* de grande taille sont plutôt tolérants à l'ombrage et dispersés par les primates. Ils ont généralement des bois résistants aux attaques de champignons lignivores, insectes et térébrants marins (Meunier et al. 2015; Gérard et al. 2016). Leur masse volumique est élevée et s'accompagne de hautes résistances mécaniques les rendant aptes pour les travaux lourds ou industriels. Bien que leurs bois présentent des propriétés intéressantes, leurs volumes commercialisés restent faibles. Cela pourrait notamment être dû au caractère abrasif du bois ou aux variations de durabilité naturelle entre les espèces (Gérard et al. 2016). Ils sont cependant utilisés localement pour : la construction de maison, de mortiers, de manches d'outils traditionnels, la production de charbon de bois ou pour le bois de chauffage. Au Gabon, toutes les espèces de *Dialium* ont un DME de 70 cm (MEFEPEPN 2004). Au Cameroun il est de 50 cm pour *Dialium guineense* Wild. et *Dialium zenkeri* Harms ou de 60cm pour les autres espèces (ONADEF 1992).



Figure 14: Fûts de trois espèces reprises sous l'appellation locale Omvong: (A) *Dialium lopense* Breteler, (B) *Dialium polyanthum* Harms et (C) *Dialium pachyphyllum* Harms

Selon FRM (2018), l'Omvong, soit les *Dialium* 3-5 folioles, serait la 10^e essence secondaire la plus importante en Afrique centrale avec 321.325 m³ de grumes mobilisables par an. C'est pourquoi seul ce clade a été retenu comme sujet d'étude de cette thèse. Pour éviter toute confusion avec les espèces ayant plus de 5 folioles, l'appellation vernaculaire « Omvong » sera préférée à l'appellation commerciale

« Eyoum » dans la suite de ce manuscrit. De plus amples informations sur ce genre botanique sont disponibles dans l'article de Bengono et al. (2022), dont nous sommes co-auteur (Annexe 1).

1.7. Liste des publications

Les articles suivants ont été publiés/soumis pour publication dans le cadre de la présente thèse de doctorat. Les **Publications 2, 3 et 4** ont été soumises dans des revues anglophones, c'est pourquoi certains chapitres de cette thèse sont rédigés en anglais.

Publication 1 : Gaël Bibang Bengono, Alain Souza, Félicien Tosso, Robin Doucet, Aurore Richel & Jean-Louis Doucet (2021). Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 25(3), 172-191.

Publication 2 : Robin Doucet, Jean-Louis Doucet, Philippe Lejeune, Cécile Verheyen, Tom De Mil, Patrick Martin, Paul Lagoute & Benoit Jourez (2021). Wood description and uses assessment of *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 80(1), 199-212.

Publication 3 : Robin Doucet, Gaël Bibang Bengono, Marius Ruwet, Isabelle Van De Vreken, Briec Lecart, Jean-Louis Doucet, Juan Antonio Fernandez Pierna, Philippe Lejeune, Benoit Jourez & Aurore Richel (2022). Highlighting a new morphospecies within the *Dialium* genus using leaves and wood traits. *Forests*, 13(8), 1339

Publication 4 : Robin Doucet, Franciscus Jozef Breteler, Marius Ruwet, Olivier Hardy, Gaël Bibang Bengono, Philippe Lejeune & Jean-Louis Doucet (under co-author revision). Description of a new *Dialium* tree species (Leguminosae, Dialioideae) in eastern Gabon and first insights on its ecology. *Plant Ecology and Evolution*

Chapitre 2

Distinction morphologique et chimique des morphotypes exploitables de *Dialium*



Au vu des incertitudes sur la taxonomie du genre *Dialium*, le terme « morphotype », définissant un groupe d'individus morphologiquement similaire entre eux, a été préféré au terme « espèces ». Ce chapitre correspond à la **Publication 3**, publiée dans la revue anglophone *Forests*. Dans ce manuscrit, le morphotype initialement attribué à *Dialium pachyphyllum* a été ré-identifié comme étant *Dialium polyanthum* après publication. Par soucis de clarté, l'appellation *D. pachyphyllum* a été remplacée par *D. polyanthum* dans le manuscrit de thèse. Au-delà de cette modification, aucune autre n'a été apportée à l'article originale.

2.1. Introduction

Despite efforts implemented by Central African countries in sustainable forest management, a progressive depletion of some timber flagship species has been observed (Karsenty and Gourlet-Fleury 2006a; Biwolé et al. 2019). This is mainly due to an extremely selective exploitation that focuses on a dozen species, (FRM 2018). Most of them are light-demanding and logging impacts (canopy openness of less than 10 % every cutting cycle of 25 years) are too small to positively influence their regeneration (Doucet 2003; Kleinschroth et al. 2015). This depletion of species jeopardizes forest biodiversity and the future of productive forests.

The timber sector, that covers 53 million ha (29 million with sustainable management plan) contributes significantly to employment and to Gross National Product (GNP), 4% in average (FRM 2018). Apart conservation areas, legal selective logging appears to be the least degrading use of forest ecosystems (Edwards and Laurance 2013; Edwards et al. 2014). Moreover, some certified companies (totaling 5 million ha for the label Forest Stewardship Council, FSC (FRM 2018)) goes further by bringing significant improvement to life condition of workers, implementing Reduce Impact Logging (RIL) techniques, regulating hunting or enriching forest (Forest Stewardship Council A.C. 2012; Burivalova et al. 2017; Cerutti et al. 2017). By assigning an economic value to forest, while having a limited impact on it, production forests can strengthen the network of 18 million hectares of protected area (Putz et al. 2012; Edwards and Laurance 2013; Edwards et al. 2014) and thus prevent land-use conversion.

Central African states plan to increase areas allocated to timber production and the intensity of logging by 50% by 2030 (FRM 2018) with a an average logging intensity of 8.7-9.5 m³/ha. In order to avoid depleting those forests, it is more necessary than ever to reduce the pressure on traditional species and to redirect the exploitation towards lesser-known timber species (Karsenty and Gourlet-Fleury 2006b; Forest Stewardship Council A.C. 2012; Sist et al. 2021) with : (i) a high wood quality, (ii) lower light requirements and thus a better regeneration than traditional light-demanding timber species.

Some species of the genus *Dialium* could meet such requirements (Gérard et al. 2017). They reach high densities in evergreen forests, have sustained regeneration, and very durable wood. However, the systematics of the genus remains unclear (Bengono et al. 2021b). In the forests of central and eastern Gabon, two species of *Dialium* can reach large dimensions and could interest the logging industry: *Dialium polyanthum* Harms and *Dialium lopense* Breteler (Bengono et al. 2021b). In the FSC certified concession of Precious Woods operating in this region, a group of similar individuals appears to have differences in morphological traits from previously known species, especially on the leaves. (Ruwet 2021). Those morphological distinctions suggests the presence of an undescribed *Dialium* morphospecies (Allaby 2010).

The species identification issue is not a recent topic and many tree species continue to be discovered in Central Africa (Wieringa and MacKinder 2012; Bissiengou et al. 2013; Kenfack et al. 2018). Recently, a species from the same genus, *Dialium heterophyllum* M. J. Falção & Mansano, was discovered in South Amazonian Basin (De Azevedo Falção and De Freitas Mansano 2020). An accurate identification of species is crucial to understand their ecology and their timber properties. Therefore, the aim of this study is to evaluate the feasibility of differentiation between closely related species based on vegetative characteristics. More specifically, it aims to: (i) objectify morphological leaves traits that discriminate the new morphospecies from the others, (ii) to determine chemical composition variation in the wood of harvestable species and (iii) to verify whether this chemical composition, using Fourier Transformed Infrared (FT-IR) Spectra and chemometrics, can allow discriminating this new morphospecies.

2.2. Material and methods

2.2.1. Study Area

The study was performed in in the logging concession granted to Precious Woods-Compagnie Equatoriale des Bois S.A. (PW-CEB). This FSC-certified logging company is located in Gambouli, Lastoursville (Gabon) (0°41.65' S–12°59.01' E). The average temperature and precipitation are 25 °C and 1700 mm, respectively (TerEA (Terre Environnement Aménagement) 2007). The forest is evergreen and its canopy is dominated by *Aucoumea klaineana* Pierre, *Scyphocephalum mannii* (Benth.) Warb., and *Julbernardia pellegriniana* Troupin. PW-CEB wishes to diversify its production to guarantee the maintenance of these activities in the long term. From this perspective, the possibility of valorizing *Dialium* wood has been analyzed. During field inventories, 3 morphospecies of “omvong” have been observed: *Dialium polyanthum*, *Dialium lopense*, and a new one *Dialium* sp. nov. All are present in the dynamic observation permanent plots set up by the Dynafac network (<https://www.dynafac.org>).

2.2.2. Herbarium Collection and Description

Samples (Figure 15) of *D. polyanthum*, *D. lopense*, and *D. sp. nov.* were collected in the field. In addition, reference herbaria from the botanical garden of Meise (Belgium) were studied (Appendix A). They were selected based on the quality of their identification by botanists specialized in the *Fabaceae* family. A total of 45 individuals were analyzed, including 29 individuals (diameter measured at 1.3 m, height >10 cm) collected in the field and 16 individuals from the Meise collection. For each sample, 25 leaf morphological traits were observed (Tableau 3). All traits were not systematically visible and/or available (e.g., absence of basal leaflet).

Tableau 3 : Leaf morphological traits investigated

Trait	Units/Modalities
Petiole type	“cylindrical”; “bulged”; “canaliculated”
Petiole length	mm
Rachis length	mm
Foliolate number	-
Pilosity on the upper face	“pubescent”; “glabrous”
Pilosity on the above face	“pubescent”; “glabrous”
Curved margin	“yes”; “no”
Acumen shape	“oblong”; “elliptical”; “lanceolate”; “ovate”; “obovate”; “oblanceolate”; “falciform”
Asymmetric leaflet base	“yes”; “no”
Tertiary venation	“tight and prominent”; “discrete”
Translucent dots	“yes”; “no”
Terminal leaflet lamina shape	“no acumen”; “sharp”; “tapered”; “retuse”; “obtuse”; “truncated”; “emarginated”
Terminal leaflet lamina length	mm
Terminal leaflet lamina width	mm
Basal leaflet lamina shape	“no acumen”; “sharp”; “tapered”; “retuse”; “obtuse”; “truncated”; “emarginated”
Basal leaflet lamina length	mm
Basal leaflet lamina width	mm
Coriaceous lamina	“yes”; “no”
Twisted lamina	“yes”; “no”
Petiolule length	mm
Ratio petiole/rachis	-
Ratio length/width of terminal leaflet	-
Ratio length/width of basal leaflet	-
Ratio basal leaflet length/terminal leaflet length	-
Ratio terminal leaflet length/petiolule length	-

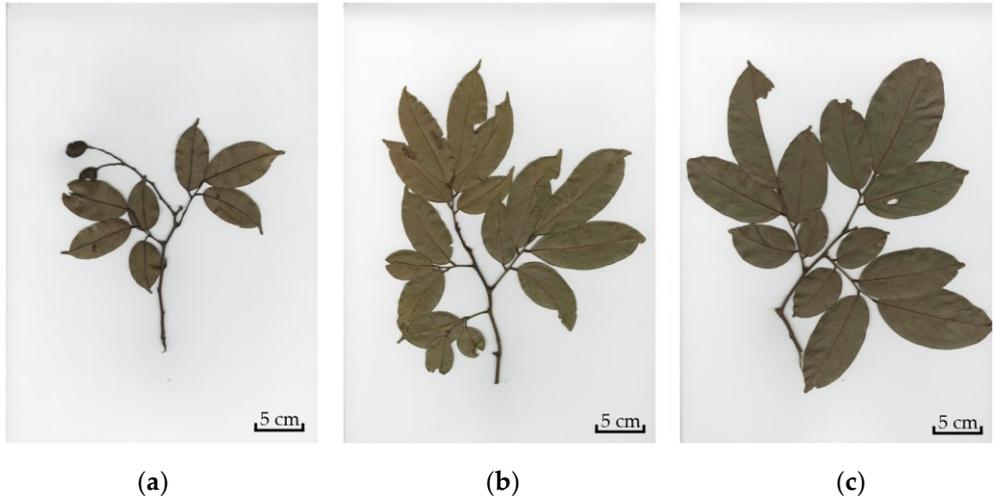


Figure 15 : Field herbarium examples of *Dialium polyanthum* Harms (a), *Dialium* sp. nov. (b) and *Dialium lopense* Breteler (c).

2.2.3. Wood Material

For each of the studied species, *D. polyanthum* and *D. sp. nov.*, four trees were cut following national regulations. Observed stems of *D. lopense* did not reach the legal minimum cutting diameter of 70 cm. Its wood properties were therefore not investigated. For each tree, altitude, floor slope, stem perimeter at the base of the log (measured at 1.3 m height when possible or above buttresses), position in the stand, and tree height were recorded (Tableau 4). Tree position in the stand was assessed from the ground. A tree with a completely shaded crown was considered as “dominated”, a crown situated in the canopy and partially lit as “canopy”, and a fully sunny crown above the canopy as “emergent”. Wood disk samples, 10 cm thick, were collected at two different heights: at the bottom of the stem, corresponding to base of the log after felling and removing buttresses which are too important for the sawing or rotten heart (h1), and at the top of the stem corresponding to the first living branch (h2). To avoid sample contamination by fuel and oil of the chainsaw, wooden disk faces were planned in the society carpentry. Finally, 100 g of both sapwood and heartwood (taken at least 15 cm away from the pith and 10 cm away from sapwood, to avoid both juvenile wood and potential transition wood) were cut in each disk.

Tableau 4 : Dendrometric and environmental parameters of selected trees. Position: Em = "Emergent" and Can = "Canopy"; altitude (m); slope (°); p is stem perimeter (m); hp is the height at which the perimeter was measured (m); h1 is the sampling height at the base of the stem (m); h2 is the sampling height at the top of the stem (m); ht is the total tree height (m).

Species	Tree Position	Altitude	Slope	p	hp	h1	h2	ht
<i>D. polyanthum</i>	1 Em	369	0	3.30	2.2	1.3	12.0	43.0
	2 Can	358	5	3.10	3.1	1.6	10.2	41.0
	3 Em	360	0	2.90	6.1	2.0	17.1	42.0
	4 Em	365	0	2.86	1.3	1.7	14.0	46.5
<i>D. sp. nov.</i>	1 Can	348	0	3.60	5.1	2.7	18.9	43.0
	2 Em	343	0	2.60	3.3	1.9	19.6	39.0
	3 Em	347	30	2.65	2.4	2.5	21.0	42.0
	4 Can	345	0	2.55	2.8	1.8	16.7	44.5

2.2.4. Wood Sample Preparation

Chemical Analyses and Moisture Content

Wood samples were first planed using an electric hand planer Black et Decker® DN 710 and shavings were collected by a dust collector. Shavings were then ground into <1 mm powder using a Fritsch Pulverisette universal cutting mill and stored at -18 °C before extraction. Moisture Content (MC) was assessed before each experiment by measuring the mass loss of 1 g of powder drying at 105 °C, this loss of mass was expressed as a percent-age of initial mass.

FTIR Measurements

For each of the 8 trees (4 *D. polyanthum* and 4 *D. sp. nov.*) described in Table 1, thin shavings were collected on 5 radially distributed heartwood strips (section 15 × 25 mm). Those strips were cut at the lower sampling height (h1). Shavings were produced using a Veritas® low-angle jack plane and a shooting board. Those thin shavings were then stored in a standard atmosphere of 20 ± 2 °C and 65 ± 5% air relative moisture.

2.2.5. Wood Primary Metabolites Content and Mineral

For each morphospecies, the variation of primary metabolites was investigated between heartwood and sapwood. Samples were collected at two heights h1 and h2 (Tableau 4). For each species, wood and sampling height combinations, experimental repetitions are presented in Tableau 5. All metabolites are expressed as a percentage of wood dry matter (DM). DM was calculated by subtraction of MC.

Tableau 5 : Experimental iterations on the four selected trees for each species and each modality combination of the studied variables, i.e., wood and sampling height.

Experimental Repetition (n)					
Tree	Hemicellulose	Cellulose	Lignin	Nitrogen	Ash
1	2	2	2	3	3
2	2	2	2	3	3
3	2	2	2	-	-
4	2	2	2	-	-

Cellulose, Hemicellulose and Lignin Content

Fibers and lignin content were assessed following the Van Soest method (Van Soest and Wine 1967; Van Soest 1990; Chen et al. 2010) using a FOSS© FT 122 FiberTech tm. This method consists in successive matter treatments to remove sequentially soluble hemicellulose, cellulose, and lignin.

Ash Content

Ash content was determined as the mass residue of 1 g wood anhydrous powder after calcining. The calcining was processed according to (Sluiter et al. 2005). It consisted in a first ramp from 21 °C to 575 °C within 2 h, including two temperature stages (102 °C for 12 min and 250 °C for 30 min). Then, a constant heating was processed at the reached temperature during 3 h.

Nitrogen Content

Wood nitrogen content was measured with the Kjeldahl method (Sheppard and Thompson 2000). A hundred mg of wood powder was weighted on a Nitrogen-free paper and placed into the test tube FOSS Tecator digester for the mineralization. The digestion took place during 2 h, at 360 °C with 7.2 mL of concentrate H₂SO₄ and a Kjeltabs tablette (1.5 g K₂SO₄ + 0.045 g CuSO₄.5H₂O + 0.045 g TiO₂). Tubes were then cooled and titrated with H₂SO₄ 0.02 N in a FOSS© Kjeltec 2300.

Silica Content

The silica content was measured on 1 g of wood ash (see the Ash content protocol) by the gravimetric measure after hydrofluoric acid (HF) attack on HClO₄/HNO₃ acid-insoluble compounds (Gérard et al. 2019). Due to economic issues, this test was only applied on 3 samples (from 3 different trees) of sapwood and heartwood, at the lowest sample height (h1), for both *D. sp. nov.* and *D. polyanthum*.

2.2.6. Ethanol-Water Extracts Characterisation

Extracts were prepared by maceration. After a preliminary test based on the Oreopoulou et al. (2019) review (Oreopoulou et al. 2019), the following extraction parameters were used: five grams of wood powder (W_M) (with a known MC) were incorporated into 100 mL of an ethanol-water (70–30, v/v) solution. Extraction was processed at 50 °C, using a rotary table for 2 h. Extracts were then vacuum filtered

using a Büchner funnel and a Whatman© cellulose filter, 11 µm pore size. The ethanol was then evaporated using a rotary evaporator and the filtrate was finally freeze-dried and the dry mass of extracts was recorded (E_{DM}). The extraction yields were finally measured using E_{DM} . All extractions were processed once for each combination of variables modalities (species, heartwood and sapwood, and sampling height) for each tree.

Phenolic Content

The Phenolic Content (PC) was measured using the Folin–Ciocalteu method (Ainsworth and Gillespie 2007) with some modifications. The tested solution was prepared by dissolving 50 µg of dry extracts into 10 mL of a methanol-water (70–30, v/v) solution. A volume of 100 µL of the tested solution was added into 500 µL of the Folin–Ciocalteu diluted in water (1:10, v/v). After 2 min, 2 mL of a 20% Na_2CO_3 solution was added. The mixture was then stirred and kept in a dark place at local temperature for 30 min. Finally, the mixture absorbance was recorded at 750 nm. The PC is expressed as mg gallic acid equivalent per g of dry extract (GAE). The GAE was obtained from a calibration curve of standard gallic acid dilution (from 0.5 g/L to 0.05 g/L). The PC determination was processed in triplicate for each extract.

Condensed Tannins Content

The Condensed Tannins Content (CTC) was measured using the Vanillin assay as mentioned by (Engozogho Anris et al. 2020) with some modifications. The tested solution was prepared by dissolving 50 µg of dry extract into 10 mL of a methanol-water solution (70–30, v/v). In a cuvette, 500 µL of tested solution was added to 1500 µL of a vanillin-methanol solution (4–96, m-v). Then, 750 µL of HCl 37% was added. After stirring the mixture, the reaction took place in a dark place at 20 °C for 20 min. Finally, the absorbance of the solution was recorded at 550 nm. The CTC is expressed as mg catechin Equivalent per g of dry extract (CE). The CE was obtained from a calibration curve of standard catechin dilution (from 0.5 g/L to 0.05 g/L). The CTC determination was processed in triplicate for each extract.

2.2.7. FT-IR Acquisition

FT-IR spectra acquisition was processed using a Bruker VERTEX 70 paired to a Bruker Platinum Attenuated Total Reflectance (ATR) accessory. ATR principle is based on a reflectance measurement; then, roughly prepared samples such as wood transversal shavings can be used. These have been therefore directly pressed under the crystal diamond of the device for the scans. Spectra were obtained by averaging 32 scans with a resolution of 2 cm^{-1} in a range of 4000 cm^{-1} to 400 cm^{-1} . For each tested heartwood strip, 3 different wood shavings were scanned and considered as 3 repetitions. Spectra were then preprocessed using first a standard normal variate and, then, the first derivative with the Savitzky–Golay algorithm (polynomic order = 1; window = 7) using the *mdatools* package (Kucheryavskiy 2020). Regions of 800–1775 and 2810–3000 cm^{-1} were chosen to focus the analyses on relevant

spectral information (Hobro et al. 2010; Wang et al. 2016). Average preprocessed spectra were calculated for each species and, then, *D. sp. nov.* spectra were subtracted from that of *D. polyanthum* to highlight the average differences between species.

2.2.8. Statistical Analyses

All statistical analyses and graphics were produced using RStudio (v 1.2.5001) (Posit Team 2022). Before the analyses, aberrant values (5 for lignin and 2 for hemicellulose) due to manipulation errors were removed from the datasets.

Conditional Inference Tree

To highlight most discriminant leaf morphological traits that allow morphospecies identification, the Conditional Inference Tree (CIT) was used (`ctree` function from the *partykit* package (Hothorn and Zeileis 2015)). This recursive partitioning method consists in testing the independence of all explicative variables (25 measured leaf traits) and the response variable (species determination) at each partitioning step. The variable that had the strongest association to the response value, and an association test *p*-value lower than the selected alpha (0.05), was selected and the population was segmented. Each subpopulation was submitted to the same procedure until getting homogenous populations (null hypothesis of the independence test accepted for all variables in each subpopulation). To counteract the negative effect of the “multiple comparisons problem” due to inferences, the Bonferroni correction was systematically applied.

PLS-DA

The Partial Least Square Regression Discriminant Analysis (PLS-DA) was used to discriminate *D. polyanthum* and *D. sp. nov.* based on their wood shaving FT-IR spectra. The outlier detection was carried out using Principal Component Analysis (PCA). Spectra were projected on PCs, score distance, and orthogonal distance were measured on the 5 first PCs accounting for 81.5% of the total variance. The region of acceptance proposed by (Pomerantsev 2008) was used on distances and no outliers were found. Then, the dataset was divided into a training set (containing all preprocessed spectra from 3 trees of each species) and a validation set (containing the remaining spectra from the last trees of each species). Each set was composed by an explicative X matrix (FT-IR spectra) and a response Y matrix (species affiliation). To process PLS on a categorical Y, the matrix was first coded as dummy blocks. Then, using *plsda* and *perf* functions from the *mixomics* package (Le Cao et al. 2016), a PLS-DA model was fitted. The PLS-DA procedure aims to create a linear combination of variable from X, called Latent Variables (LVs), that maximize the covariance with Y. Scores of samples are calculated for those new variables and projected on the new LVs n-dimensional space, where n corresponds to the number of LVs. For each Y modality (*D. sp. nov.* and *D. polyanthum*) parameter (such as centroids) of the n-dimensional scores, a distribution is calculated. Using those parameters and a distance metric, it is possible to measure

the distribution proximity of a new sample projected in the LVs space. Those distances to distributions are finally used to classify the samples. In this study, the Mahalanobis distance metric, which takes into account the shape of the distribution (Mahalanobis 1936), was chosen. The optimal number of LVs to select (that explain most of the Y variance while avoiding overfitting) was assessed using a k-fold (fold = 5) cross-validation repeated a hundred times. This cross-validation processed tree operations for a hundred times: (i) five samples were randomly selected in the training set, (ii) the PLS-DA model was fitted on the remaining dataset for 20 LVs, (iii) the five samples were predicted by the model and the Overall Classification Error rate (OCE) is computed for each LVs of the model. After all repetitions, mean and standard deviation of OCE were measured for each LV. The lowest LV number that minimized the OCE was selected. During this procedure, the Variable Importance in Projection score (VIP score) confidence interval ($\alpha = 0.05$) was calculated from its distribution for each variable on each selected LV. This interval was used to verify whether variable VIP scores were significantly higher than 1, the commonly used threshold to assess the importance of a variable in prediction (Chong and Jun 2005). Within LVs, VIP scores' 95th percentile were also measured to identify variables that were situated among the 5% most important in the considered LV. After fitting the model on the training dataset, the validation set was predicted by it and a confusion matrix has been built. A confusion matrix allows to measure model accuracy and classes sensitivity/specificity.

Variance Analyses

Analysis of variance (ANOVA) was used to investigate leaf trait differences between morphospecies but also the influence of wood (sapwood and heartwood) and sampling height (h1 and h2) on wood chemical properties. To confirm ANOVA preconditions, normality and homoscedasticity, the Ryan–Joiner and the Levene tests were used, respectively. If means were unequal, they were compared by using the post-HOC *t*-test (*t*). If the homoscedasticity precondition was not met, the non-parametric test of Kruskal–Wallis (χ^2) was used and medians were compared by using the Wilcoxon–Mann–Whitney (*W*) test. The selected α was 0.05 for all analyses excepted when variable modalities to compare were superior to two. In this case, the Bonferroni correction was applied to limit the family-wise error rate. Those analyses were conducted using the *rstatix* package (Kassambara 2021).

2.3. Results

2.3.1. Leaf Morphological Traits

Conditional Inference Tree

The algorithm only selected qualitative variables for the CIT construction (Figure 16). The first partition, based on venation type (variable independence test: $p < 0.001$) allowed discriminating all 15 *D. polyanthum* individuals that had a discrete tertiary venation from the 25 other trees. The second partition, based on terminal leaflet's acumen shape (variable independence test: $p = 0.024$) produced a pure

node with only *D. lopense* and a node with 68% of *D. sp.* and 32% of *D. lopense*. All individuals that presented leaves with a tight, prominent tertiary nervation and an obtuse/no acumen can therefore be predicted as *D. lopense*. However, trees which presented leaves with tight, prominent tertiary venation and a sharp, tapered or retuse acumen had 68% probability to belong to the *D. sp.* and 32% to *D. lopense*.

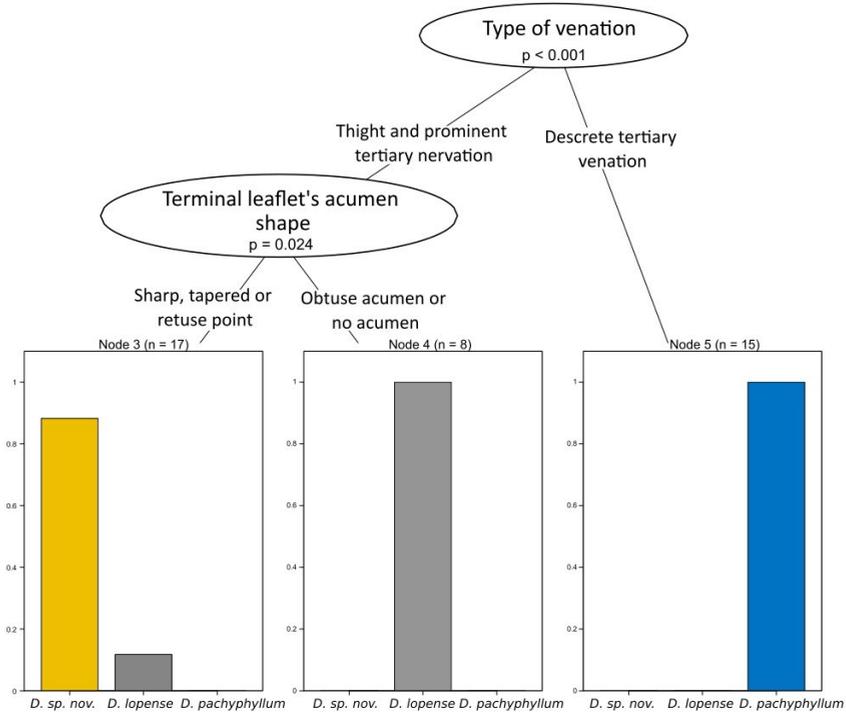


Figure 16 : Conditional inference tree using the 25 leaf morphological variables to discriminate the 40 individuals for which all leaf traits could be measured.

Variance Analyses

Variance analyses on quantitative variables highlighted many significant differences between *D. lopense* and *D. sp. nov.* (Figure 17). The mean width/length ratio of the basal leaflet was the most significant ($t = 3.31, p = 0.0043$), with 0.54 ± 0.08 and 0.45 ± 0.06 for *D. lopense* and *D. sp. nov.*, respectively. The mean terminal leaflet width also differed ($t = 2.96, p = 0.0073$) between the two morphospecies, 51.93 ± 13.48 mm and 39.4 ± 8.63 mm respectively. The mean width/length ratio on terminal leaflet is higher ($t = 2.64, p = 0.015$) for *D. lopense* (0.44 ± 0.084) than for *D. sp. nov.* (0.37 ± 0.05). The median petiole/rachis ratio is lower ($W = 38, p = 0.01$) for *D. lopense* (0.25 ± 0.24) than for *D. sp. nov.* (0.49 ± 0.44). The mean length of terminal petiolule/length of terminal leaflet ratio is lower ($t = -2.68, p = 0.012$) for *D. lopense* (0.06 ± 0.02) than for *D. sp. nov.* (0.07 ± 0.02). *D. polyanthum* only differed significantly ($W = 59.5, p = 0.018$) from *D. sp. nov.*

based on a lower petiole/rachis ratio median (0.22 ± 0.18 for *D. polyanthum*). It however varied from *D. lopense* in two traits. *D. polyanthum* had a higher ($t = -2.24, p = 0.034$) mean length of the terminal petiolule/length of terminal leaflet ratio (0.072 ± 0.022 and 0.057 ± 0.016 , respectively, for *D. polyanthum* and *D. lopense*) and a higher ($W = 35, p = 0.013$) basal leaflet length/terminal leaflet length ratio median (0.67 ± 0.11 and 0.58 ± 0.08 , respectively, for *D. polyanthum* and *D. lopense*).

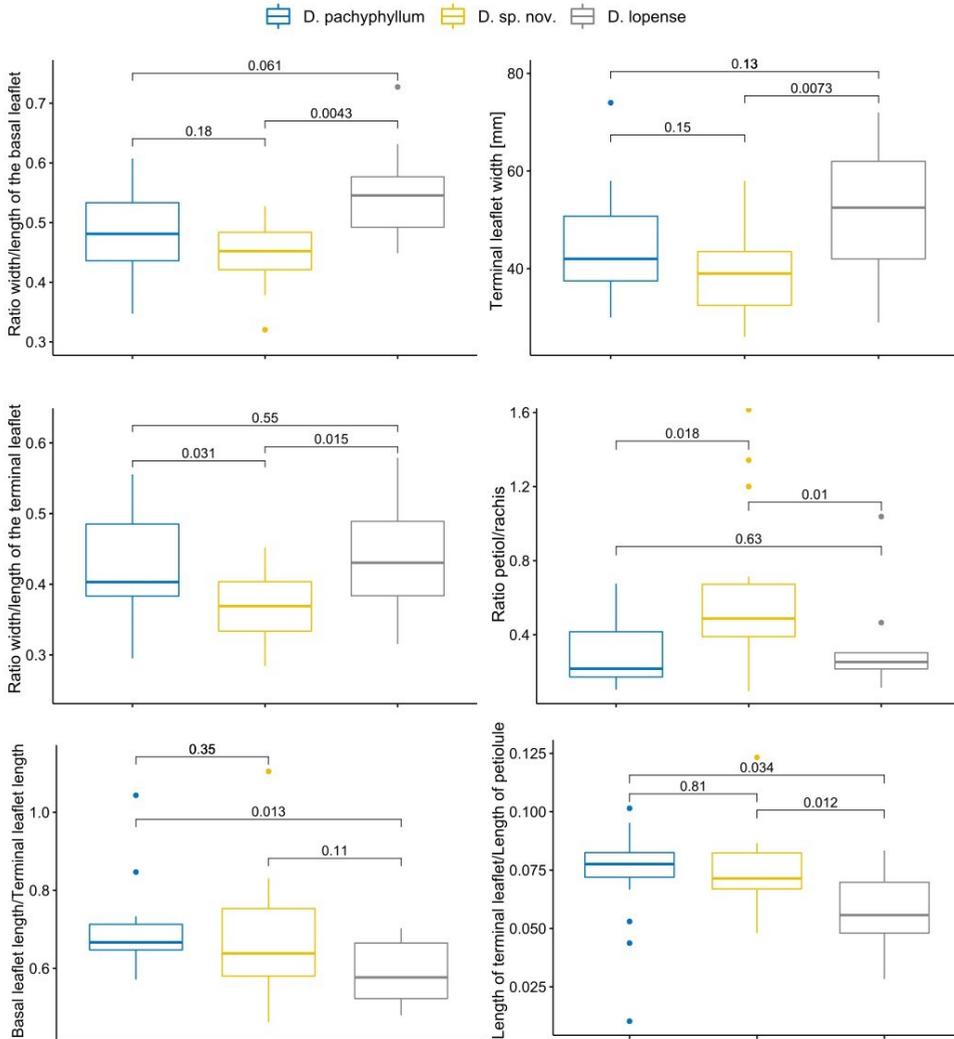


Figure 17 : Significant leaf morphological trait variations between *Dialium polyanthum* (identified as *D. pachyphyllum* in the figure), *Dialium* sp. nov., and *Dialium lopense*. p-values for species comparison are related to t-tests (ratio w/l of the basal leaflet, terminal leaflet width, ratio length of terminal leaflet/length of petiolule) and Wilcoxon tests (ratio petiol/rachis, ratio basal leaflet length/terminal leaflet length).

2.3.2. Chemical Composition

Primary Metabolites and Minerals

No significant effect of the sampling height was observed on primary metabolites. The mean cellulose content significantly differed ($F = 3.56, p = 0.0014$) between sapwood of *D. polyanthum* ($55.4 \pm 2.98\%DM$) and *D. sp. nov.* ($52.0 \pm 2.52\%DM$). The mean lignin content was significantly different between heartwood and sapwood ($F = 72.3, p < 0.001$) with a higher content in heartwood ($27.9 \pm 2.01\%DM$) than sapwood ($23.5 \pm 1.93\%DM$). As for lignin, the mean hemicellulose content was only significantly different between heartwood and sapwood ($F = 54.4, p < 0.001$). However, heartwood had a lower hemicellulose content ($12.4 \pm 1.14\%DM$) than sapwood ($14.9 \pm 1.4\%DM$).

The median ash content was significantly different ($\chi^2 = 25.9, p < 0.001$) between species ($2.46 \pm 0.78\%DM$ and $0.90 \pm 0.282\%DM$ for *D. sp. nov.* and *D. polyanthum*, respectively). The median nitrogen content was significantly ($\chi^2 = 25.9, p < 0.001$) different within sapwood ($0.28 \pm 0.04\%DM$) and heartwood ($0.35 \pm 0.05\%DM$). The median of this metabolite also significantly differed ($\chi^2 = 6.65, p = 0.009$) between species: $0.31 \pm 0.04\%DM$ for *D. polyanthum* and 0.35 ± 0.07 for *D. sp. nov.* However, this difference between species was due to samples from heartwood for which species differentiation ($0.32 \pm 0.03\%DM$ for *D. polyanthum* and $0.39 \pm 0.05\%DM$ for *D. sp. nov.*) was very significant ($W = -4.53, p < 0.001$) unlike sapwood (Figure 18).

The mean silicate content was higher in *D. sp. nov.* ($2.42 \pm 0.57\%DM$ and $2.64 \pm 0.59\%DM$ for sapwood and heartwood, respectively) than *D. polyanthum* ($1.23 \pm 0.39\%DM$ and $0.92 \pm 0.22\%DM$ for sapwood and heartwood, respectively).

Ethanol Extracts

Median extraction yields differed significantly ($W = 698, p < 0.001$) with the sampling height. Samples from the top of the stem had higher extraction yields ($2.6 \pm 1.0\%DM$) than samples at the bottom ($2.2 \pm 0.6\%DM$). *D. sp. nov.* sapwood ($2.7 \pm 0.7\%DM$) had a higher extraction yield ($W = 158, p = 0.007$) than *D. polyanthum* sapwood ($2.13 \pm 0.36\%DM$).

The mean PC was significantly affected by the three studied variables: for sampling height ($F = 5.0, p = 0.028$), for heartwood and sapwood ($F = 77.4, p < 0.001$), and for the species ($F = 37.5, p < 0.001$). The mean PC was lower at the lower sampling height (330 ± 84 GAE) than top of the stem (359 ± 11 GAE). The mean PC was higher for heartwood (402 ± 82 GAE) than sapwood (280 ± 72 GAE). Finally, it was lower for *D. polyanthum* (304 ± 93 GAE) than *D. sp. nov.* (384 ± 82 GAE). Figure 19 emphasizes the significant difference of mean PC between the two species for both sapwood (253 ± 72 GAE for *D. polyanthum*; 320 ± 57 GAE for *D. sp. nov.*) and heartwood (355 ± 83 GAE for *D. polyanthum*; 448 ± 4.6 GAE for *D. sp. nov.*).

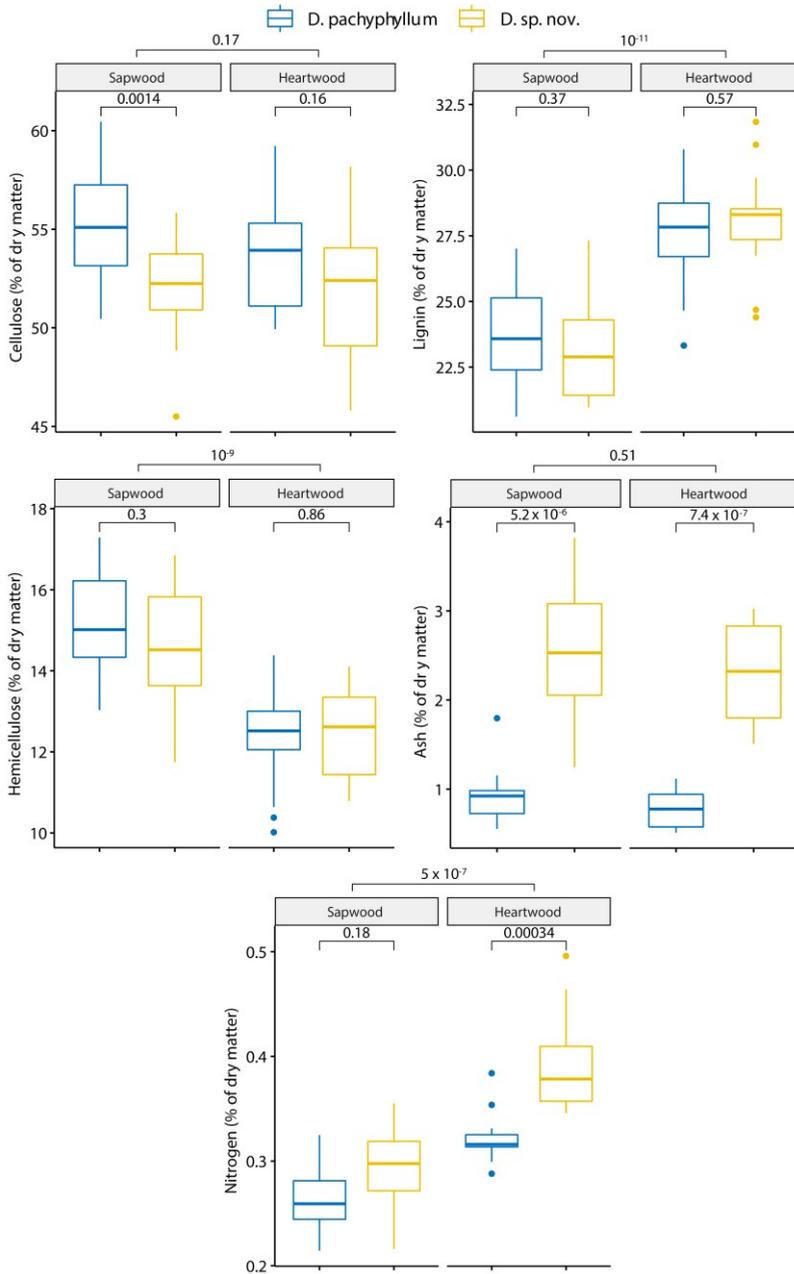


Figure 18: Primary metabolite's variation in heartwood and sapwood among *D. polyanthum* (identified as *D. pachyphyllum* in the figure) and *D. sp. nov.* ; p-values concerning heartwood and sapwood are related to ANOVA test (Cellulose, Lignin and Hemicellulose) and Kruskal–Wallis test (Ash and Nitrogen); p-values that compare species are related to the t-test (Cellulose, Lignin and Hemicellulose) and Wilcoxon's test (Ash and Nitro-gen).

The three variables also induced a significant variation of mean CTC: for sampling height ($F = 4.5$, $p = 0.037$), for heartwood and sapwood ($F = 22.3$, $p < 0.001$), and for species ($F = 35.3$, $p < 0.001$). The same PC variation pattern was observed: the mean CTC was lower at the lower sampling height (585 ± 265 CE and 677 ± 275 CE for lower and higher sampling height, respectively), higher for the heartwood (733 ± 248 CE and 528 ± 259 CE for heartwood and sapwood, respectively), and lower for *D. polyanthum* (502 ± 287 CE and 760 ± 185 CE for *D. polyanthum* and *D. sp. nov.*, respectively). Figure 5 highlights the difference of mean CTC between the two species for both sapwood (385 ± 241 CE for *D. polyanthum*; 672 ± 190 CE for *D. sp. nov.*) and heartwood (619 ± 285 CE for *D. polyanthum*; 848 ± 132 CE for *D. sp. nov.*).

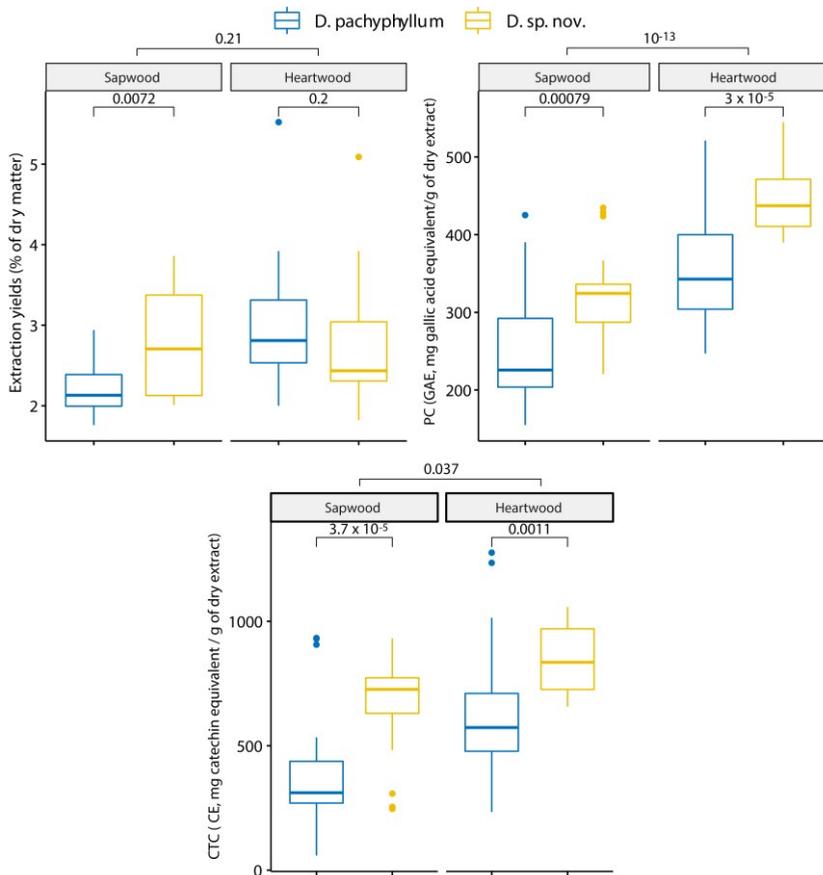


Figure 19 : Extract yields and extract composition variation in heartwood and sapwood among among *D. polyanthum* (identified as *D. pachyphyllum* in the figure) and *D. sp. nov.* ; p-values concerning heartwood and sapwood are related to ANOVA test (Phe-nolic content and Condensed tannin content)

and Kruskal–Wallis test (Extraction yields); p-values that compare species are related to the t-test (Phenolic content and Condensed tannin content) and Wilcoxon's test (Extraction yields).

Wood FT-IR Distinction

Average preprocessed spectra for each species are presented in Figure 20. The spectral differences (Δ) highlight 15 wavenumbers that present high peaks. The PLS-DA model was fitted using 7 LVs which reached an average OCE of 2% during the cross-validation procedure (Figure 21). After predicting the validation set, composed with an independent tree of each species, the accuracy (29/30) of 96.6% is close to cross-validation (Tableau 6). The sensitivity and specificity of *D. polyanthum* are, respectively, 93.8% and 100%. For *D. sp. nov.*, specificity and sensitivity are 100% and 87.5%, respectively. Those results highlight a high accuracy of the model and a low risk of predicting *D. sp. nov.* as *D. polyanthum*.

Tableau 7 compares the wavenumbers identified by the spectral difference (Δ) and their importance in the prediction model. The 1051 cm^{-1} shows the largest peak difference and reaches the top 5% of VIP scores for each LV. This variable therefore highly participated to species distinction. According to the literature, this band can be attributed to the C-H stretching bond from tannins (*Terminalia chebula* (Gaertner) Retz., *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, and *Schinopsis lorentzii* Engl. tannin extracts in their study (Grasel et al. 2016)). The 1114 cm^{-1} peak, although not the highest Δ , reaches top 5% VIP scores of 6 LVs and strongly contributes to the predictive model. As for the previous band, this wavenumber can be attributed to tannins (C-H bending observed in *S. lorentzii* and *Castanea sativa* Mill. extracts (Grasel et al. 2016)). In opposition, the 1253 cm^{-1} and 1270 cm^{-1} peaks did not show VIP scores significantly higher than 1, except for LV1 and 2, respectively. Those wavenumbers, assigned to lignin bonds, are not important in the discriminant model. Wavenumbers from 1714 cm^{-1} to 1511 cm^{-1} were assigned to bonds in lignin or phenols. Except the 1511 cm^{-1} band for LV5 and LV6, this range presents a significant importance in species differentiation. Peaks at 1413, 1471, and 1494 cm^{-1} had VIP scores higher than 1 and reached the top 5% for 1413 cm^{-1} on LV1 and 1471 cm^{-1} on LV1 and LV2. Those bands are associated to lignin bonds. The 1209 band, assigned to a cellulose bond, has a high Δ and a significant importance in all LVs. The two last bands investigated, 1133 and 958 cm^{-1} , are less important in the model (VIP scores around 1 or not higher) while presenting a medium Δ .

Tableau 6 : Confusion matrix obtained by predicting the independent validation dataset

		<i>D. polyanthum</i>	<i>D. sp. nov.</i>
Predicted	<i>D. polyanthum</i>	15	0
	<i>D. sp. nov.</i>	1	14

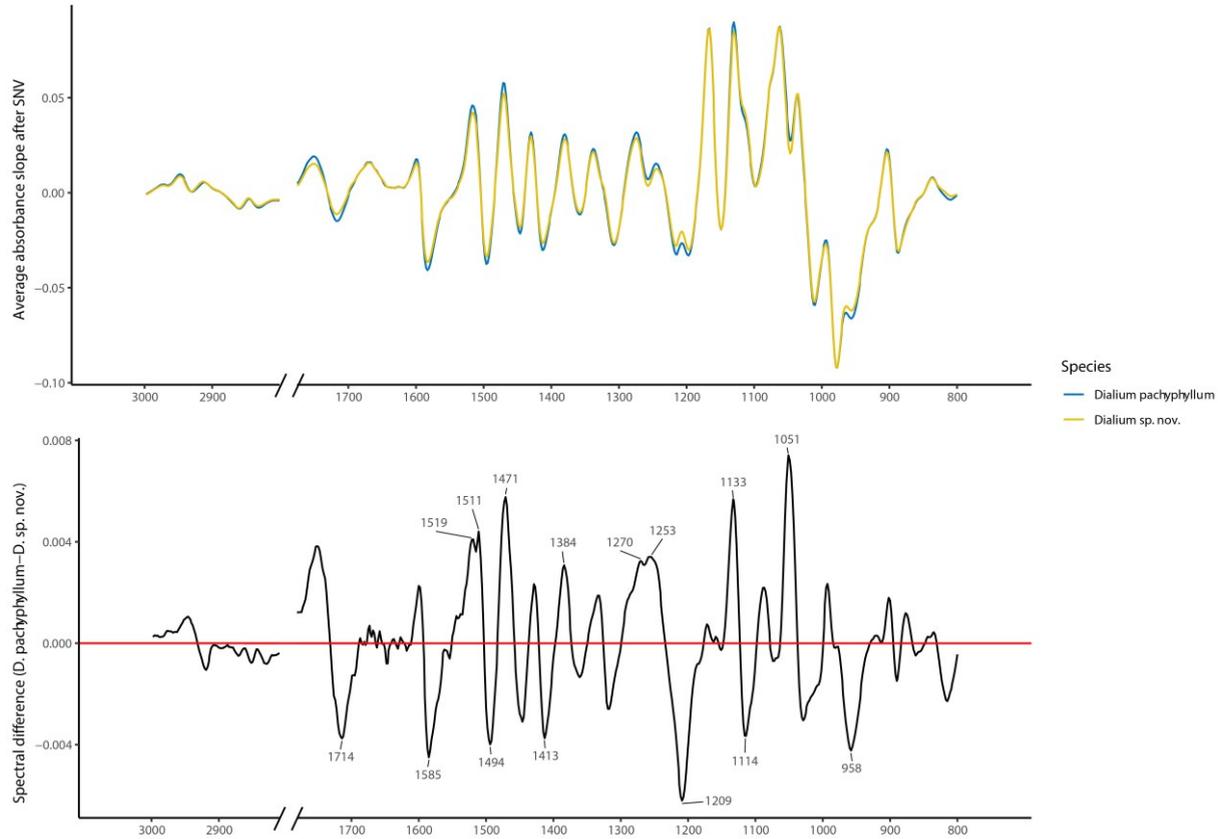


Figure 20 : Upper plot presents average preprocessed (SNV + first derivative) spectrum of each species. The lower graph represents the difference (*D. polyanthum*, identified as *D. pachyphyllum* in the figure, and *D. sp. nov.*) between the average spectra. The 15 wavenumbers correspond to 15 high peaks of difference between the species.

Tableau 7 : Wavenumbers (W), expressed in cm^{-1} , that present 15 large peak differences ($\times 10 \times 10^{-3}$) between average species spectrum (Δ); Mean VIP scores from of PLS-DA model, shaded scores are upper to the 95th percentile of vip score within the LV, scores with n are not significantly higher than 1 according to the confidence interval from the cross-validation process; Bond: chemical bond assignment to the wavenumber; Mol corresponds to the molecular class in which the chemical bonds are found (L= Lignin, H= Hemicellulose, C= Cellulose, P = Polyphenol, T = Tannin); Ref. corresponds to references that mention the bond assignment.

W	Δ	VIP Scores							Chemical Bond Assignment	Mol	Ref.
		LV1	LV2	LV3	LV4	LV5	LV6	LV7			
1714	38	1.47	1.19	1.14	1.12	1.10	1.08	1.09	1712 cm^{-1} : C=O groups	L	(González-Peña and Hale 2011)
1585	45	1.62	1.28	1.25	1.22	1.21	1.20	1.18	1585 cm^{-1} : Aromatic ring stretching	L	(Yap et al. 1991)
1519	41	1.56	1.29	1.22	1.20	1.19	1.16	1.15	1517 cm^{-1} : Aromatic skeletal vibration	L	(González-Peña and Hale 2011)
1511	44	1.37	1.13	1.07	1.05	1.04 ⁿ	1.02 ⁿ	1.05	1508–1513 cm^{-1} : Aromatic skeletal vibration	L, T	(González-Peña and Hale 2011; Grasel et al. 2016)
1494	40	1.60	1.31	1.24	1.23	1.22	1.19	1.19	1495 cm^{-1} : aromatic vibration	P, T	(Popescu et al. 2020)
1471	58	1.77	1.40	1.33	1.32	1.30	1.28	1.26	1460–1470 cm^{-1} : C-H vibration	L	(Backa et al. 2001; Shen et al. 2015)
1413	83	1.93	1.53	1.46	1.43	1.41	1.38	1.37	1413 cm^{-1} : C=C aromatic	L	(Trilokesh and Uppuluri 2019)
1384	31	1.49	1.20	1.14	1.13	1.14	1.11	1.10	1384 cm^{-1} : -OH bending of phenolic bond	L	(Abdul Latif et al. 2019)
1270	32	1.09 ⁿ	1.14	1.09	1.07	1.05 ⁿ	1.03 ⁿ	1.01 ⁿ	1265 cm^{-1} : C-O vibration	L	(Nuopponen et al. 2006b; Huang et al. 2008)
1253	33	1.07	0.89 ⁿ	0.85 ⁿ	0.84 ⁿ	0.83 ⁿ	0.82 ⁿ	0.81 ⁿ	1250 cm^{-1} : C-O-C asymmetric stretch	L	(Wang et al. 2016)
1209	62	1.50	1.21	1.15	1.13	1.11	1.10	1.09	1203–1210 cm^{-1} : O-H bending	C	(Özgenç et al. 2017)

Tableau 7 suite : Wavenumbers (W), expressed in cm^{-1} , that present 15 large peak differences ($\times 10 \times 10^{-3}$) between average species spectrum (Δ); Mean VIP scores from of PLS-DA model, shaded scores are upper to the 95th percentile of vip score within the LV, scores with n are not significantly higher than 1 according to the confidence interval from the cross-validation process; Bond: chemical bond assignment to the wavenumber; Mol corresponds to the molecular class in which the chemical bonds are found (L= Lignin, H= Hemicellulose, C= Cellulose, P = Polyphenol, T = Tannin); Ref. corresponds to references that mention the bond assignment.

W	Δ	VIP Scores							Chemical Bond Assignment	Mol	Ref.
		LV1	LV2	LV3	LV4	LV5	LV6	LV7			
1133	57	1.18	0.94 ⁿ	1.07 ⁿ	1.11	1.10	1.09	1.08	1134 cm^{-1} : C-O-C glycosidic vibration of xylan	H	(Nuopponen et al. 2006b)
1114	37	1.54	1.64	1.63	1.62	1.60	1.56	1.54	1112–1113 cm^{-1} : C-H bending in plane	T	(Grasel et al. 2016)
1051	98	1.73	1.64	1.56	1.53	1.51	1.50	1.48	1050 cm^{-1} : C-H stretching in plane	T	(Grasel et al. 2016)
958	42	1.33	1.12 ⁿ	1.12	1.13	1.11	1.09	1.08 ⁿ	957–961 cm^{-1} : C-H aromatic out of plane deformation	-	(Popescu et al. 2020)

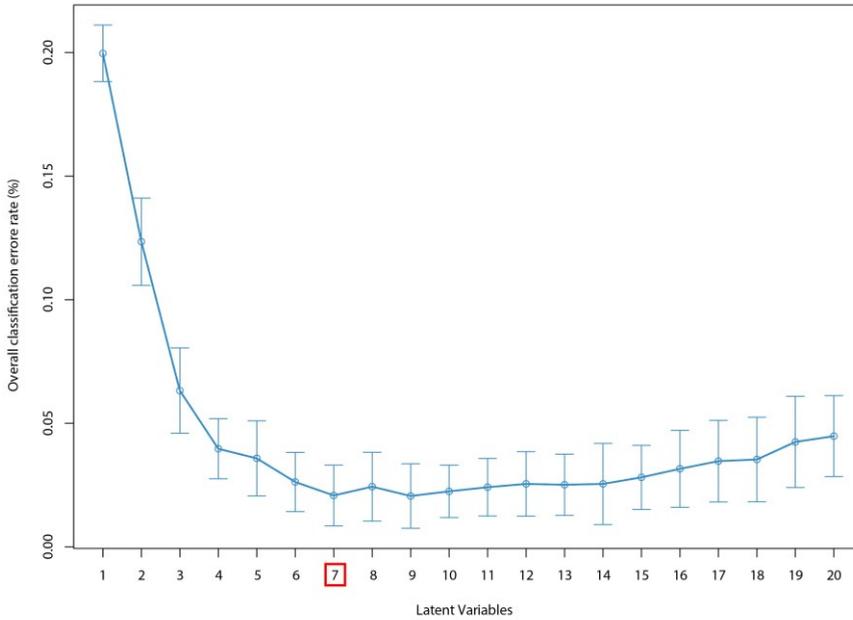


Figure 21: Overall classification error rate from the cross-validation procedure. The number of LVs selected is red-circled.

2.4. Discussion

2.4.1. Species Distinction in Forest Inventories

Species discrimination criteria based on leaf morphology is frequently used in the *Fabaceae* family (Pasquet 1993; Vandrot 2018) and, particularly in the *Dialium* genus (Rojo 1982). Furthermore, during field surveys, reproductive characteristics are generally not visible and only trunks and leaves can be observed. Leaves in *Dialium* can contribute to distinguishing species from each other (Zimmerman et al. 2013). For example, distinction of *Dialium heterophyllum* from other species in the Amazonian Basin is done by its reduced rachis and unifoliate to trifoliate leaves (De Azevedo Falcão and De Freitas Mansano 2020). Using the 7 significant leaf traits to classify this species seems therefore relevant. Tableau 8 presents the identification key for the 3–5 leaflets *Dialium* species that occur in the study area.

Tableau 8 : Identification key for 3–5 leaflets *Dialium* species present in PW-CEB forests; on the left side of the table, the sections with the observable traits are presented; on the right side is either the species classification corresponding to the observed trait, or the reference of the section to continue the identification key; the range of values presented for the quantitative variables, in the third section, corresponds to the interval in which 50% of the observations made during this study occurs for each species.

1.	-	Tight and prominent tertiary venation	2.
	-	Discrete tertiary venation	<i>D. polyanthum</i>
2.	-	Sharp, tapered or retuse terminal leaflet acumen	3.
	-	No terminal leaflet acumen or obtuse acumen	<i>D. lopense</i>
3.	-	Ratio width/length of the basal leaflet: [0.42–0.48]	<i>D. sp. nov.</i>
	-	Terminal leaflet width: [33–44] mm	
	-	Ratio width/length of the terminal leaflet: [0.33–0.40]	
	-	Ratio petiole/rachis: [0.39–0.67]	
	-	Length of terminal leaflet/length of petiolule: [0.06–0.08]	
3.	-	Ratio width/length of the basal leaflet: [0.49–0.57]	<i>D. lopense</i>
	-	Terminal leaflet width: [42–62] mm	
	-	Ratio width/length of the terminal leaflet: [0.38–0.49]	
	-	Ratio petiole/rachis: [0.22–0.30]	
	-	Length of terminal leaflet/length of petiolule: [0.05–0.07]	

2.4.2. Wood Chemical Properties and Their Variation

Primary Metabolites and Minerals

As Mbagou (2017) already observed, sampling height has no influence on structural primary metabolites (Bosco Mbagou 2017). However, many differences can be observed considering the radial position of the sample. Indeed, considering both species, the lignin content was 4.4%DM higher in heartwood than sapwood. This pattern was already observed by many authors (Adamopoulos et al. 2005; Lhate et al. 2010; Lourenço et al. 2015). Hemicellulose varies oppositely and, considering both species, is on average 2.5%DM lower in heartwood than sapwood. The difference is less pronounced but remains encountered in the literature (Lhate et al. 2010).

The highest cellulose content (55.4%DM) was obtained from the sapwood of *D. polyanthum* which appears to reach higher values than generally observed in African tropical woods. According to Gérard et al. (2019), the average is 42.2%DM, and the maximum observed is 58.1%DM (Gérard et al. 2019). For instance, *Aucoumea klaineana* present a cellulose content of 46.1%DM (Doat 1972), *Lophira alata* Banks ex C.F. Gaertn. of 40.0%DM (Gérard et al. 2019). This difference could be explained by the cellulose determination method. Heartwood

lignin content (27.9%DM in average) did not significantly differ between species and was a bit lower than in other tropical woods for both species. Gérard et al. (2019) measured an average lignin content of 29.2%DM for 549 tropical species tested (Gérard et al. 2019). Nuopponen et al. (2006) reported that the lignin content of tropical hardwoods can exceed that of softwoods and reach between 29%DM and 41%DM (Nuopponen et al. 2006a). Hemicellulose did not differ between species. Heartwood hemicellulose content seems comparable to the average pentosane content (major constituent of hemicellulose) for tropical hardwood of 15.9%DM (Gérard et al. 2019). Ash content was significantly higher in *D. sp. nov.* which had a high value (2.46%DM) compared to other tropical species that, on average, have 1.1%DM (Gérard et al. 2019). Concerning nitrogen content, *D. sp. nov.* heartwood has the highest value which is almost twice the average of 0.24%DM observed for 59 Panamanian tree species (Martin et al. 2014). Results about silica content follow the same pattern. *D. sp. nov.* has twice more silica content in sapwood (2.42%DM) and nearly three times more in heartwood (2.64%DM) than *D. polyanthum*. Both species had a very high silica content according to the 0.1%DM average silica content of 599 hardwoods (Gérard et al. 2019).

Ethanol-Water Extracts

Extract yields were higher at the top of the stem for both species. Gérardin et al. (2020) also obtained higher yields for water-ethanol extracts at the top of the trees (Gérardin et al. 2020). Concerning species distinction, extracts yields were higher in *D. sp. nov.* sapwood. However, using the same extraction method, several authors obtained higher yields than observed for both species. Saha Tchinda (2015), using hot water as solvent, obtained 8.4%DM from *Baillonella toxisperma* Pierre heartwood and 3.8%DM for *Distemonanthus benthamianus* Baill. heartwood. PC and CTC are significantly higher in the heartwood than sapwood. Those results are probably species-dependent since Engozogho et al. (2020) reported higher polyphenol and tannin levels in sapwood ($2 \pm 0.8\%$ DM) than heartwood ($0.7 \pm 0.1\%$ DM) of *Aucoumea klaineana*, whereas Mbagou et al. (2017) bring out significant higher PC in heartwood than sapwood for *Tessmania Africana* Harms, and Bikoro et al. (2018) had significantly more PC in sapwood but significantly more CTC in heartwood of *Khaya ivorensis* A. Chev. (Bikoro Bi Athomo et al. 2018). Considering species variation, *D. sp. nov.* has higher PC and CTC than *D. polyanthum*. According to Nisca et al. (2021), those metabolite are interesting to discriminate species (Nisca et al. 2021). *D. sp. nov.* heartwood PC is comparable to *Pterocarpus soyauxii* Hooker acetone extract (430 GAE) and both species have higher PC than *Baillonella toxisperma* for the acetone extract (Tchinda Saha et al. 2012).

2.4.3. FT-IR Wood Distinction

The high accuracy of the PLS-DA model (96.6%) on two independent trees of the training set added to the significant differences in analytical metabolite measurements, and proves the difference in wood composition between the two species. As already highlighted by Wang et al. (2016), spectroscopy is an adapted tool to discriminate closely related species as *Dalbergia* spp. (Wang et al. 2016). However, the interpretation of the spectra without the use of statistical techniques can be hazardous. Indeed, as it has been shown, the peak differences observed on the average spectra are not always associated to discriminant bands. This can come from a high intra-species variation being greater than inter-species variation. Knowing this, it is likely that the peaks at 1270 and 1253 cm^{-1} , despite a high Δ , present a large inter-species variation that do not allow discrimination. The peak at 1114 cm^{-1} assigned to tannin bonds, has the same delta but its importance in the predictive model might be due to low intra-species variations. The higher Δ peak at 1051 cm^{-1} is the most interesting because it represents the greatest average difference between the species and participates very strongly in the PLS-DA model. Added to the significant difference in CTC between *Dialium* species, those results are in lines with Nisca et al. (2021) to highlight the efficiency of this class of molecule in the distinction of closely related species.

2.4.4. Impacts on Tree Ecology, Forest Management, and Wood Production

Leaf traits are highly correlated to tree ecology (Poorter 2009). For instance, venation density significantly influences water management (Sack et al. 2003) and, therefore, tree light strategy. According to Martin A. et al. (2014), wood nitrogen content is negatively correlated to the relative growth rate and higher values could correspond to late successional species (Martin et al. 2014). As those two traits significantly discriminate the studied *Dialium* species, their ecology might differ. Consequently, *D. sp. nov.* should be discriminated in annual monitoring plots on the study site and its population dynamic should be separately modelled from the other species. Once population dynamic parameters will be known, management practices should be adapted. Moreover, before any valuation of the wood, the conservation status of the species, in relation to its distribution area, should be specified.

Wood properties are directly related to chemical composition (Barnett and Jeronimidis 2003). The cellulose proportion variation between *D. sp. nov.* and *D. polyanthum* could therefore lead to differences in mechanical properties (Cruz et al. 2018). The silica content increases resistance to marine borers (Dirol and Deglise 2001) while PC, CTC, and suberin increase durability against fungi (Akai and Fukutomi 1980; Scalbert 1992; Anouhe et al. 2018). However, silica content is highly abrasive and increases sawing difficulties (Bengono et al. 2021b). To know if the species should be promoted to a different timber sector, it will be interesting

to check whether the difference in chemical properties induces a significant difference in wood properties and processing.

Dialium polyanthum has a wide distribution in Central Africa while *Dialium lopense* is restricted to Gabon (Bengono et al. 2021b). As this new species has not yet been described, its area of occurrence as well as its exploitation potential are not known. If those are restricted, it may be interesting to control the production of this species. This control can be done through customs checks before export. In view of the ease of preparation of shavings chips and the accuracy of the model, these techniques could be used routinely to identify wood packages. However, this requires a large increase in the number of individuals to train the model to capture inter-specific variation. In addition, the model should favor a sensibility of 100% for *D. sp. nov.* to avoid classifying the samples into another species.

Chapitre 3

Description d'une nouvelle espèce et écologie comparée des *Dialium*



Fleurs de la nouvelle espèce de Dialium

Le **Chapitre 2** a mis en évidence de nombreuses différences significatives entre le bois et les feuilles du nouveau morphotype de *Dialium* et ceux des espèces reconnues. Afin de valider le statut taxonomique de celui-ci, le présent chapitre dresse une description botanique complète de la nouvelle espèce (**Encadré 2**). Il évalue également la nécessité de différencier les espèces dans l'aménagement au travers de leur écologie. Ce chapitre correspond à la **Publication 4**, il sera soumis dans la revue anglophone *Plant Ecology and Evolution*.

Encadré 2 : La description d'une nouvelle espèce de plante.

La description d'une nouvelle espèce d'arbre est un processus méthodique qui suit généralement un protocole rigoureux. Tout d'abord, des échantillons, généralement des herbiers comprenant rameaux, feuilles, fleurs/fruits, parfois du bois ou des écorces sont prélevés sur des spécimens appartenant à la nouvelle espèce supposée. Ces échantillons sont ensuite minutieusement examinés pour déterminer les caractéristiques morphologiques des différents organes (nombre, taille, forme, couleur, texture). Il faut ensuite s'assurer que les spécimens soient bien distincts des espèces semblables. Cette comparaison implique souvent une analyse des caractéristiques morphologiques avec des spécimens d'herbiers et des descriptions publiées d'espèces similaires. Cette étape requiert une grande expertise et les compétences de taxonomistes experts de la famille ou du genre botanique. Les analyses génétiques sont souvent utilisées en complément des analyses morphologiques pour valider l'existence d'un nouveau taxon.

Après la compilation et l'analyse des données, le taxonomiste élabore une description formelle de la nouvelle espèce, englobant toutes les caractéristiques morphologiques pertinentes, ainsi que des informations complémentaires sur l'anatomie, la génétique ou l'écologie. Lors de la rédaction de l'article scientifique, l'un des spécimens collectés est désigné comme "type", également appelé holotype. Ce spécimen, généralement le premier découvert ou le plus représentatif, sert de base à la description. D'autres spécimens peuvent être inclus dans la publication pour documenter les variations morphologiques au sein de l'espèce, étant alors désignés paratypes. Le taxonomiste attribue le nom de l'espèce dans la publication, souvent en choisissant l'épithète qui fait référence à une caractéristique morphologique distinctive, à l'écologie ou à la localisation géographique. Les publications sont ensuite soumises à des revues spécialisées, où elles sont examinées par des pairs, généralement des experts dans les familles botaniques concernées. La reconnaissance officielle de la nouvelle espèce n'intervient qu'après la validation par les pairs et la publication de l'article scientifique.

Les spécimens utilisés, en particulier l'holotype, doivent être déposés dans des collections internationalement reconnues, tels que les musées ou conservatoires. Il est d'ailleurs recommandé de déposer plusieurs herbiers du spécimen dont provient l'holotype dans différentes collections pour s'assurer de sa préservation. Ces herbiers complémentaires à l'holotype sont appelés isotypes. Ces collections jouent un rôle crucial en tant que dépôts sécurisés et références pour les taxonomistes, facilitant la comparaison avec d'autres espèces et permettant des études à long terme.

3.1. Introduction

The creation of the genus *Dialium* L. dates back to 1767, with the description of the type species *Dialium indum* L. (Linnaeus, 1767), a tree native to India. This genus, initially classified in the *Leguminosae* family and *Caesalpinioideae* sub-family by de Candolle (1825), is nowadays classified in the *Leguminosae* family and sub-family *Dialioideae* (LPWG 2017). Members of this genus are small to large-sized trees, rarely shrub in African savannas, characterised by a reddish exudate, imparipinnate leaves, zygomorphic flowers (rarely actinomorphic), 3 or 5 sepals, usually no petals (sometimes 1 or 2), and small globose indehiscent one-seeded pods considered as the genus signature (Rojo 1982; De Azevedo Falcão et al. 2016; De Azevedo Falcão and De Freitas Mansano 2020).

In 1951, Steyaert's work recorded a total of 35 species, divided into two sub-genera: *Arouna* (receptacle with puberulent disc) and *Dialium* (receptacle absent or poorly developed). He also divided the subgenus *Arouna* into two sections on the basis of filament shape: *Recta* section (straight filament) and *Geniculata* (geniculate filament). This number was then reduced to 27 by Rojo in 1982 on the basis of morphological characteristics, panylogy, cytology and phytochemistry. He reorganized the genus into subgenera, sections and subsections. The first is the subgenus *Arouna* whose flower receptacle has a disc much wider than the ovary. It includes two sections: *Arouna* whose anthers have a pointed apex (sub-sections *Pirula* and *Indranentosa* whose filament of the stamen is respectively straight and geniculate) and *Codarium* whose anthers have a narrow apex. In the two other subgenera the disc is either absent to as wide as the ovary. The subgenus *Dialium* has five sepals. The subgenus *Dansera* has maximum three sepals and includes two sections: *Hova* (with three petals) and *Dansera* (without petals). Following the latest discovery in Central Africa (Breteler 1993), recent discoveries in the neotropics (De Azevedo Falcão et al. 2016; De Azevedo Falcão and De Freitas Mansano 2020) and the study on the phylogeny of *Dialioideae* of LPWG in 2017, the total number of species currently stands at 44. Members of this pantropical genus are mainly found in Africa (including Madagascar), which accounts for about thirty species. More specifically, Bengono et al. (2021) report 23 species in the Guinean-Congolese region.

In this region, *Dialium* species occurs in various types of habitats such as: wooded savannas, forest galleries, riparian forests and some are indicative of mature evergreen forests. (Rojo 1982; Doucet 2003; Lemmens et al. 2012; Meunier et al. 2015). In evergreen forest, the densities of 5-leaflet *Dialium* trees are sometimes high, and their trees can reach large dimensions (Bengono et al. 2021b). Due to their wood commonly being regarded as hard and durable against degradation agents (Gérard et al. 2011, 2017; Lemmens et al. 2012), this species complex is considered a future resource for forest exploitation by 2030 (BAD 2019). However, they are generally grouped under a generic term (Omvong in Gabon and Eyoum in Cameroon) in logging management plans. While convenient for management

purposes, this grouping is neither justified from a technological standpoint nor an ecological perspective. This arbitrary aggregation can have two consequences: (i) the species actually exhibit significant variations in their wood properties that impact their uses, and (ii) undifferentiated logging jeopardizes the populations of less present or adapted species. It was during the attempt to differentiate wood and ecology of the 5-leaflet *Dialium* species that Doucet et al. (2022) uncovered the existence of a new large-sized tree morphotype in eastern Gabon. It was differentiated from other related species based on leaf morphology and wood chemical composition (Doucet et al. 2022). However, the authors had no fertile herbarium specimens to assess the taxonomic status of this morphospecies. Since this publication, new specimens with flowers and fruits were collected. This article describes and illustrates all its morphological traits (vegetative and fertile) and their variation within a population in eastern Gabon. To verify whether the ecology of the species is different, in the same way as wood composition, tree density, diameter distribution and topographic preferences of the new species and the other related species were studied in a permanent monitoring plot.

3.2. Material and methods

3.2.1. Taxonomic treatment

Plant material and botanical description

The botanical description of the new species is based on the characteristics and observations of specimens collected during fieldwork. It was carried out from 2019 to 2022, in the forest concession granted to the company PWG-CEB (Figure 22-b). This FSC-certified logging company manages nearly 600,000 ha of evergreen rainforest and straddles Haut-Ogooué and Ogooué-Lolo in Gabon. During this period, 29 trees of the new species were observed and collected at different seasons. With the exception of the trunk and leaves, it was not possible to observe all organs of each tree (Annexe 2). Diameters were measured with a tape and heights (bole and tree) with a Vertex. Other measurements related to trunks, branches, leaves, inflorescences, and fruits were taken with a calliper. All organs are observed on fresh material, except for bracteoles, buds and flowers conserved in ethanol water solution (95-5, v-v) which were measured with a stage micrometer and stereomicroscope. To calculate the variation within the quantitative traits, the confidence interval (considering a normal distribution and $\alpha = 0.05$) was considered. Rare or extreme values are indicated in parentheses. All new specimens collected during fieldwork are deposited at BR, some of them also at WAG and LBV.

Preliminary conservation status assessment and cartographic treatments

In order to estimate global distribution of this new species, additional *Dialium* spp. collections from BR and WAG were consulted and 4 specimens were re-

identified as the new species (Annexe 3). To comply with IUCN guidelines (IUCN Standards and Petitions Committee 2022), all occurrences from field collection and herbarium were then uploaded in GeoCat to comply its extent of occurrence (EOO) and its area of occupancy (AOO), using a cell size of 2×2 km (Bachman et al. 2011). To complement this conservation status assessment, land cover (ESA and UCLouvain 2010), land uses (Ministère des Eaux et Forêts/World Resources Institute) and forest typology (Réjou-Méchain et al. 2021) were also mapped (Annexe 4). This cartographic processing was carried out with RStudio (Posit Team 2022) using the following packages: *sf* (Pebesma 2018), *raster* (Hijmans 2023), *rgdal* (Bivand et al. 2023) and *ggspatial* (Dunnington 2022).

3.2.2. Ecology

To evaluate the potential differences in ecology between co-occurring similar *Dialium* species, topographic habitat preferences and stems diametric distribution were studied in the DYNAFAC annual monitoring plots (www.dynafac.org) located in PW-CEB concession (Figure 22-b). Within 16 ha of forests (4 plots of 200×200 m), all individuals of *Dialium* with 5 large leaflets were examined.

Identification of co-occurring *Dialium* species

Three other morphologically similar *Dialium* morphotypes (leaves 3-5 foliolate with broad leaflets) have been identified in the studied forests. Herbarium specimens of these morphotypes were also collected during the fieldwork (Annexe 5). The first was easily identified as *Dialium lopense* Breteler, whose differentiation criteria are easily observed. The second one was attributed to *Dialium pachyphyllum* Harms following Rojo (1982)'s classification due to sepals rather persistent in fruits. Following this classification and the current revision of Breteler J.F. (previously announced in his description of *D. lopense* in 1994), the third morphotype is *Dialium polyanthum* Harms due to its golden-brown hairy fruits and glabrous leaflets.

Topographic habitat classification

To evaluate topographic habitat preferences of the new and other related species, a topographic habitat classification was based on three indices. The Topography Wetness Index (TWI) was calculated using SAGA GIS v.7.8.2 software. The SRTM-DEM (Farr et al. 2007) of the region, with 30m resolution, was downloaded from the Google Earth Engine platform. It was resampled using the "bilinear" method to reach 15m resolution. This SRTM-DEM was then pre-processed with the "fill sink" algorithm, using minimal slope threshold of 0.1° , to identify and fill surface depression (Wang and Liu 2006). Then a Flow Accumulation Raster (FAR) was produced using the Multiple Flow Direction method (Freeman 1991; Quinn et al. 1991), which appears to be the most suitable for ecological analyses (Kopecký and Čížková 2010). The pre-processed DEM and FAR were used to produce a Specific Catchment Area (SCA) raster and a slope raster was produced using the initial DEM and the Least Squares Fitted Planes method (Costa-Cabral and Burges

1994). Finally, the TWI was computed using the slope raster and the SCA. Two other Topographic Position Indices (TPIs) were also calculated with the DEM on SAGA GIS. Those indices, calculated using different radii (50 pixels for TPI_50, and 500 pixels for TPI_500), allow tree position to be evaluated on a local and landscape scale (Weiss 2001). Indices were standardised and combined to produce 11 landform classes (Annexe 6). To evaluate species' topographic preferences and compare species proportions, odds ratios were used by comparing topographic habitat one by one. The significance of odds was measured using the *Chi-square* test with the package *stats* of RStudio (R Core Team 2023). All odds comparison tables and *Chi-square* significances are available in Suppl. material 6. Tree population density and diametric repartition were computed and plotted using the following packages of RStudio: *dplyr* (Wickham et al. 2022), *tidyr* (Wickham et al. 2023) and *ggplot2* (Ggplot2 Development Team 2012).

3.3. Results

3.3.1. Taxonomic treatment

Dialium bambidiense R.Doucet & J.L.Doucet, **sp. nov.**

Figure 22-Figure 23 Figure 25, Tableau 9

Type. GABON – Ogooué-Lolo • Baposso ; 0°69'70"S, 13°20'10"E; 358m; 01 Nov. 2022; fl.; *R. Doucet 28*; holotype: BR; isotypes: WAG, LBV

Diagnosis. *Dialium bambidiense* is morphologically close other large 5-foliolate *Dialium* species, particularly *Dialium lopense*. Nevertheless it can be differentiate by its ginger-brown pubescence on leaflets abaxial face, 8-10 prominent secondary nerves, 1 white petal and geniculate filaments.

Description. Large tree up to 50 m tall and 130 cm DBH. Trunk reaching 30 m high, with straight buttresses 2.3–3.0(–5) m high; bark flaky, sometimes very strongly so, with lenticels that are generally orange but sometimes the same colour as the bark, outside part of the bark white-grey to brown-green, inner part orange, 3.8–4.5 mm thick, with a red viscous and sticky exudate either abundant or in spots. Branches ginger-brown hairy when young and glabrescent with age, lenticels early light brown becoming brown-grey with age, stipules early caducous. Leaves, 4–5(–7) folioliate; petiole (3–)4.7–5.8(–7) mm long, 2.3–2.7 mm thick and terete, rachis green, (29–)45–54(–70) mm length, both ginger (ginger-brown) pubescent, glabrescent with age; leaflets alternate, sometimes opposite; petiolules brown often terete, sometimes canaliculate above, 6.5–7.6(–11) mm long, 1.7–1.9 mm thick, pubescent as rachis; blade coriaceous, adaxial face glabrous, green and shiny, abaxial face sparsely ginger-brown hairy, light green and mat; leaflets oval to elliptic, sometimes lanceolate, (22–)34–38(–58) mm width, (52–)78–91(–137) mm long, base oblique on basal leaflet and obtuse on terminal one, apex mostly narrowly acuminate, sometimes broadly or abruptly acuminate, rarely sharply, (5–)8–10(–15) pairs of main lateral nerves; secondary nerves rather straights, ginger-brown hairy, more prominent than the tertiary reticulate venation; midrib hairy as

secondary nerves, margin narrowly revolute at the base becoming recurve near the apex. Panicles terminal, sometimes with lower primary side branches subtended by leaves, generally compound with few axillary axes, rachis (5–)9–16(–20) cm long, ginger-brown velutinous pubescent; bracteoles, brown to ginger-brown hairy outside, caducous; buds generally ovoid-truloid, sometimes slightly ellipsoid-oblong, 2.7–3.0 mm long, 2.1–2.4 mm wide, whitish hairy; pedicels (0.3–)0.8–1.4(–1.8) mm long; Flowers sepals, 5, spreading, triangular, concave, whitish velutinous on both side, 2.1–2.4 mm long, 2.7–3.0 mm wide, caducous; petal, 1, white, clawed, obovate, unguiculate, sparsely whitish hooked hairy along principal veins, rarely along secondary veins, on the abaxial face, 3.1–3.7 mm long, 1.1–1.3 mm wide, caducous; stamens, 2(–3); filaments +/- erect, straight to slightly bend, sometimes slightly canaliculated at the base of the abaxial side, apex recurved to geniculate at anther insertion, glabrous, 1.5–1.9 mm long; anthers, yellow, slightly sickle-shaped when young, more pronounced with age, equal-sided at the base rarely slightly asymmetric, pointed apex on the abaxial side and acute to retuse on the adaxial side, basipetal-longitudinal dehiscence, whitish hooked hairy on abaxial connectives, sometimes also sparsely along slits, 1.7–1.8 mm long; disc white, glossy on fresh material, sparsely brown-pubescent, generally more densely around the pistil; pistil, ± centrally attached to disc, obliquely inserted, sessile, 3.2–4.2 mm long; ovary pubescence brown to whitish, sometimes both colours alternate in hairy bands; style recurved, generally sparsely brown to whitish pubescent at the base and glabrous at the apex, apex rarely as hairy as the base; stigma truncate. Fruits compressed, discoid to ellipsoid, 18–33 mm long, 14–19 mm wide, sessile, mucro (base of the style) generally inconspicuous, sometimes absent, exocarp brown to dark brown, velvety.

Distribution. At the moment, restricted to Gabon. Most occurrences were recorded between three major rivers (Ogooué, Séré and Lassio) near Bambidie, Okondja and Lastourville in the Ogooué-Lolo and Haut-Ogooué province. The most westerly occurrence was at Makandé, still in Ogooué-Lolo. All individuals were recorded into Atlantic inland evergreen and mixed evergreen forest types (Réjou-Méchain et al., 2021).

Habitat. All observations of *D. bambidiense* were made in close to open rainforest, no individuals were observed in savanna. Occurrences were recorded from 290 m to 630 m altitude.

Phenology. Panicle formation begins from late September to October. The flowers start blooming at the end of October and the flowering occurs throughout the month of November. Ripe fruits occur in March to May (June).

Vernacular name. Locally called “omvong” like the other 5-foliolate species *Dialium lopense*, *Dialium pachyphyllum*, and *Dialium polyanthum*. The commercial name used for this complex of species is “eyoum” (ATIBT 2016).

Etymology. The specific epithet refers to Bambidie, the village where the logging company that provided support for this study is located (Fig. 1B).

Preliminary IUCN conservation assessment. Endangered: EN B1ab(ii,iii,v) + 2ab(ii,iii,v). The Extent of Occurrence (EOO) of *Dialium bambidiense*, considering the 33 occurrences from fieldwork and herbarium collections, is estimated at 4400 km², which is within the limits of the Endangered category. Its Area of Occupancy (AOO), using the 2 × 2 km grid, is 100 km², which is within the limits of the Endangered category. Those 33 occurrences were observed in 6 locations: 5 Sustainable Forest Management Units and 1 in area of human occupancy, no occurrences in protected areas. The location in area of human occupancy is only represented by 1 tree around the city Lastourville. This occurrence might be isolated and it is therefore advisable to consider only the 5 locations (B. a) in forest management units for this assessment. Logging activities in those locations could have an impact on habitat quality (B. b(iii)). Moreover, this species, reaching large dimensions, could be logged in the future, impacting the number of mature individuals (B. b(v)). Considering the mining sector, 22 occurrences are recorded in areas authorised for mining licences, the rest of occurrence is in areas prospected for potential mining activities. Although no mining licence has yet been issued in its EOO or AOO, this sector could possibly threaten the habitat of this species in the future (B. b(ii)). Based on IUCN guidelines and current data on this species, *Dialium bambidiense* should therefore be provisionally assigned a status of Endangered under both B1 and B2 criteria [EN B1ab(ii,iii,v) + 2ab(ii,iii,v)].

Additional material examined. GABON – **Haut-Ogooué** • Logging road near Okondja; 0°55'80"S, 13°50'99"E; 631m; 07 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 17*; BR, WAG, LBV. – **Ogooué-Lolo** • Bambidie surroundings; 0°71'24"S, 12°88'72"E; 332m; 17 Jun. 2021; fr.; *R. Doucet 9*; BR • Bambidie surroundings; 0°72'98"S, 12°97'00"E; 293m; 19 Jun. 2021; fr.; *R. Doucet 12*; BR • Bambidie surroundings; 0°73'26"S, 12°96'86"E; 283m; 19 Jun. 2021; fr.; *R. Doucet 14*; BR • Bambidie surroundings; 0°73'25"S, 12°96'87"E; 285m; 19 Jun. 2021; st.; *R. Doucet 15*; BR • Logging road between Bambidie and Lelama; 0°85'16"S, 13°28'19"E; 336m; 02 Nov. 2022; fl.; *R. Doucet 30*; BR, WAG, LBV • Logging road between Bambidie and Lelama; 0°86'83"S, 13°09'13"E; 333m; 04 Nov. 2022; fl.; *R. Doucet 33*; BR, WAG, LBV • Logging road, Okondja; 0°67'82"S, 13°50'94"E; 545m; 20 Oct. 2022; fb.; *R. Doucet 22*; BR, WAG, LBV • Logging road near Okondja; 0°72'68"S, 13°37'57"E; 424m; 16 Jun. 2021; fr.; *R. Doucet 5*; BR • Logging site, Baposso; 0°72'44"S, 13°19'98"E; 336m; 06 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 16*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°72'21"S, 13°15'91"E; 343m; 17 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 18*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°69'60"S, 13°20'35"E; 353m; 19 Oct. 2022; fb.; *R. Doucet 21*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°68'65"S, 13°18'00"E; 318m; 21 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 23*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°69'99"S, 13°20'30"E; 336m; 28 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 24*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°71'75"S, 13°19'99"E; 372m; 31 Oct. 2022; fl.; *R. Doucet 26*; BR, WAG, LBV • Logging site, Baposso; 0°71'74"S, 13°19'98"E; 360m; 31 Oct. 2022; *R. Doucet 27*; BR, WAG, LBV • Logging site, Milolé; 0°66'58"S, 12°85'31"E; 348m; 15 July 2019; st.; *R. Doucet LOL*; BR, LBV

• Logging site, Milolé; 0°65'69"S, 12°85'00"E; 343m; 15 July 2019; st.; *R. Doucet LO2*; BR, LBV • Logging site, Milolé; 0°65'89"S, 12°84'11"E; 347m; 15 July 2019; st.; *R. Doucet LO4*; BR, LBV • Logging site, Okondja; 0°65'42"S, 12°84'75"E; 345m; 15 July 2019; st.; *R. Doucet LO5*; BR, LBV • Ndangui surroundings; 0°52'41"S, 13°08'35"E; 354m; 30 Mar. 2021; fr.; *JL. Doucet & G. Bibang 2*; BR • Ndangui surroundings; 0°56'61"S, 13°09'82"E; 357m; 30 Mar. 2021; st.; *JL. Doucet & G. Bibang 3*; BR • Ndangui surroundings; 0°53'11"S, 13°07'78"E; 370m; 30 Mar. 2021; fr.; *JL. Doucet & G. Bibang 4*; BR • Ndangui surroundings; 0°51'12"S, 13°09'96"E; 378m; 31 Mar. 2021; st.; *JL. Doucet & G. Bibang 8*; BR • Ndangui surroundings; 0°51'23"S, 13°10'11"E; 431m; 31 Mar. 2021; st.; *JL. Doucet & G. Bibang 9*; BR • Ndangui surroundings; 0°51'42"S, 13°10'27"E; 451m; 31 Mar. 2021; fr.; *JL. Doucet & G. Bibang 10*; BR • Ndangui surroundings; 0°50'89"S, 13°11'55"E, 414 m; 31 Mar. 2021; fr.; *JL. Doucet & G. Bibang 11*; BR • Ndangui surroundings; 0°50'29"S, 13°11'45"E; 398m; 31 Mar. 2021; st.; *JL. Doucet & G. Bibang 12*; BR

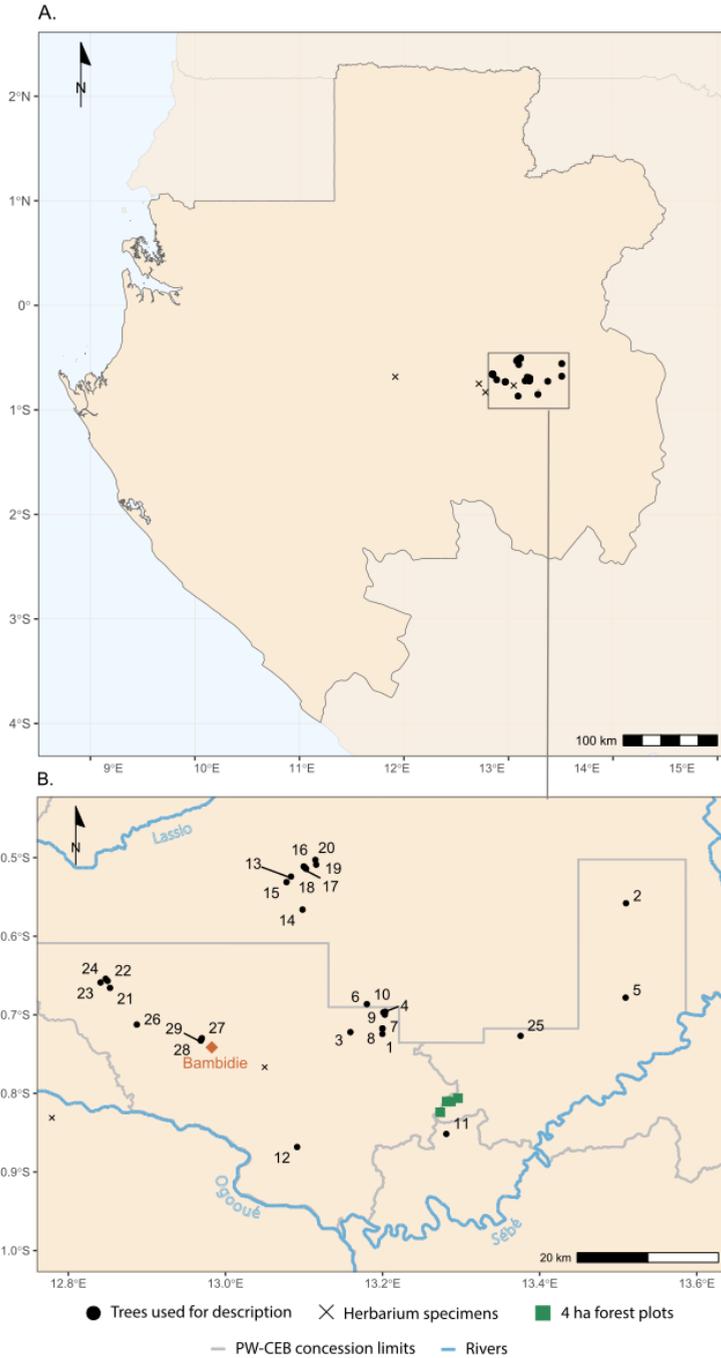


Figure 22. A. *Dialium bambidiense* occurrences in Gabon. B. Map showing the position of the trees used for the description and the 4-ha monitoring plots used for the assessment of population structure and topographic habitat preferences.

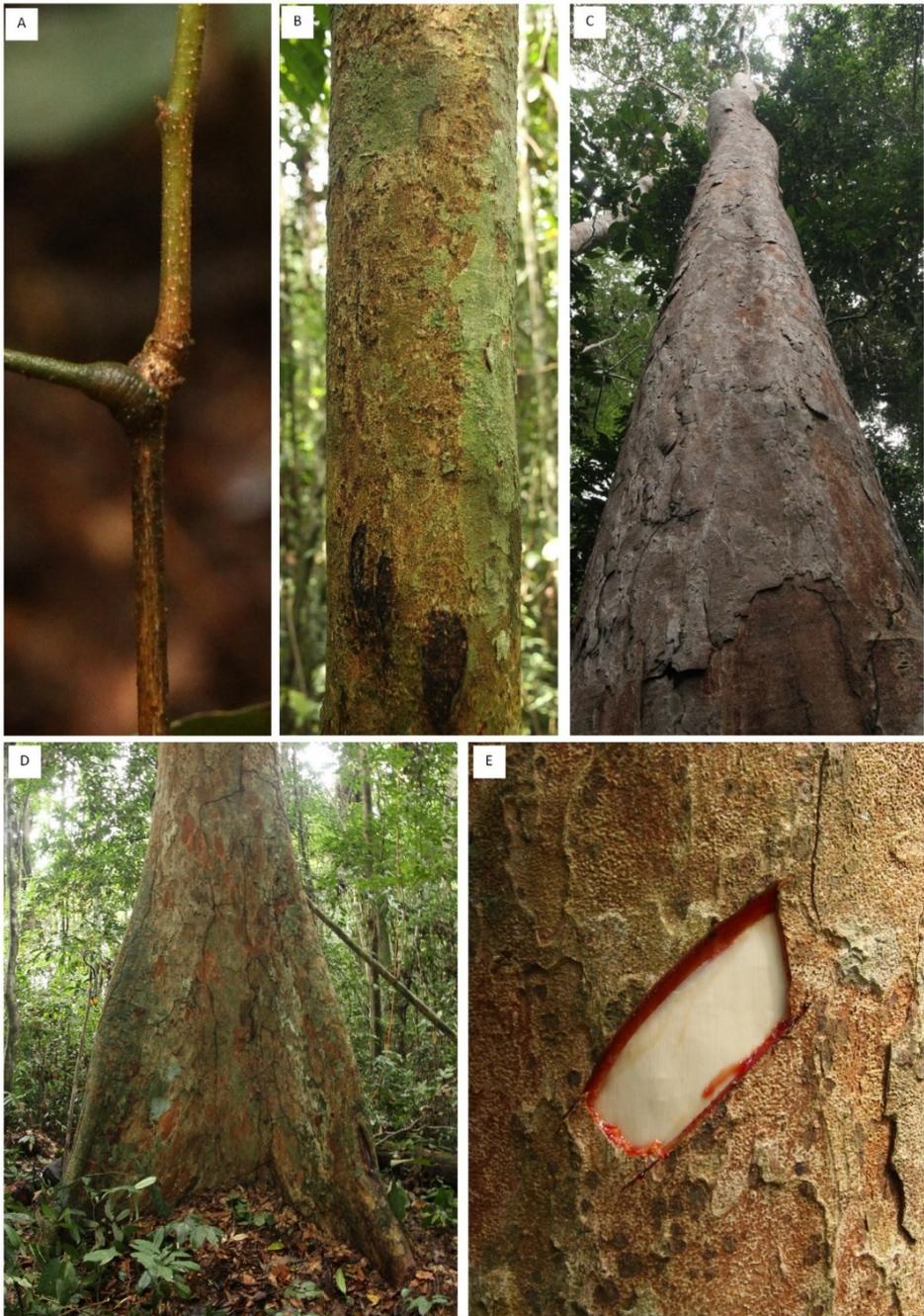


Figure 23. *Dialium bambidiense* A. Twig of a juvenile tree (Photograph taken in DYNAFAC monitoring plots on 21 Oct. 2022). B. Young tree stem (Photograph taken in DYNAFAC monitoring plots on 21 Oct. 2022). C. Mature tree stem (from R. Doucet 21). D. Straight buttresses often observed on mature trees (from R. Doucet 28). E. Bark section showing tree sapwood and the red exudate (from R. Doucet 27). Photographs by Robin Doucet.

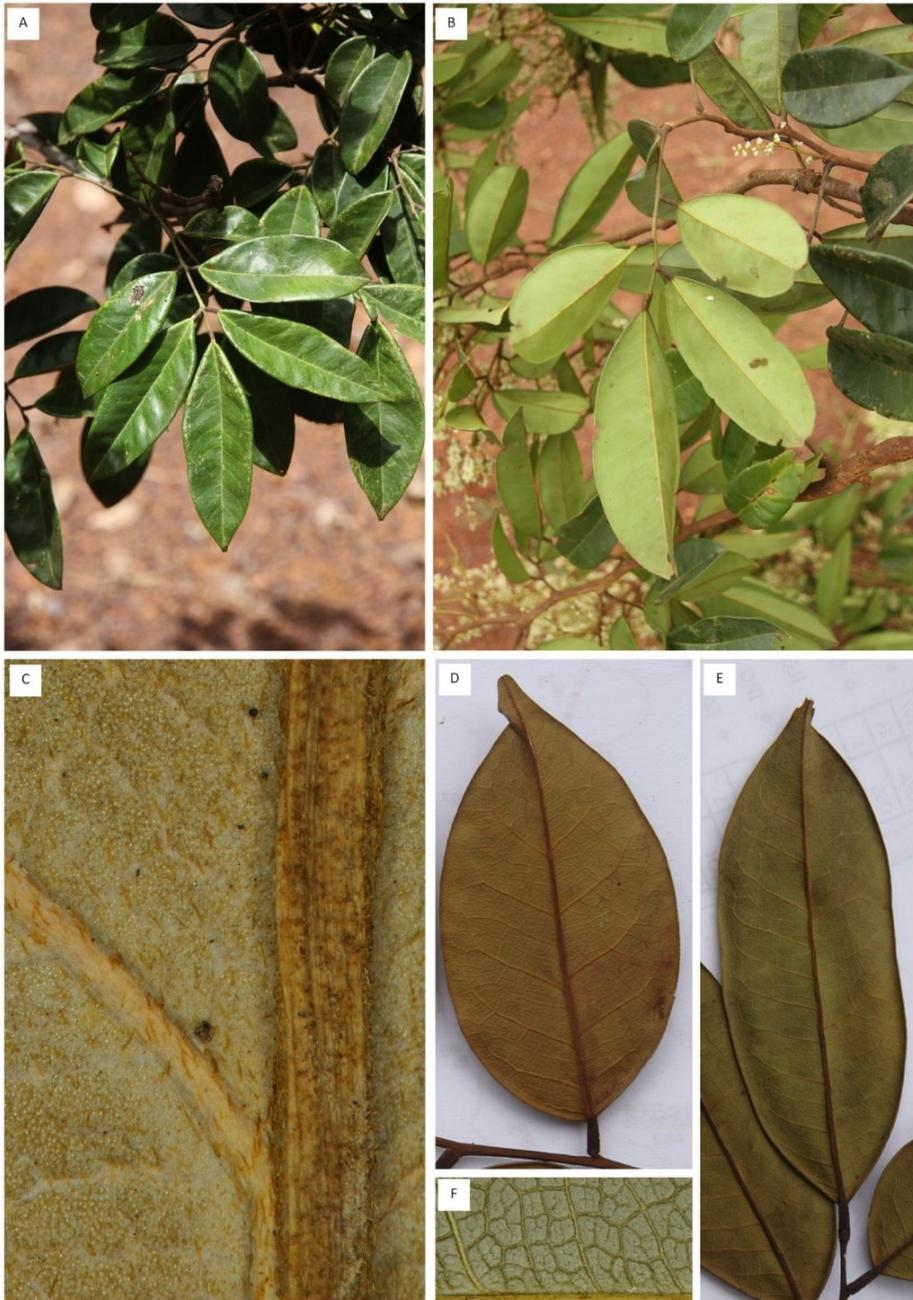


Figure 24. *Dialium bambidiense* A. Mature tree leaf, adaxial side (from R. Doucet 28). B. Mature tree leaf, abaxial side (from R. Doucet 33). C. Detail on pilosity and secondary nerves insertion of dry leaflet abaxial side (from JL. Doucet & G. Bibang 10). D. Dry basal leaflet abaxial side showing secondary nervation and blade shape (from R. Doucet 22). E. Dry terminal leaflet showing secondary nervation and blade shape (from R. Doucet 21). F. Detail on tertiary venation of dry leaflet abaxial side (from JL. Doucet & G. Bibang 2). Photographs by Robin Doucet.

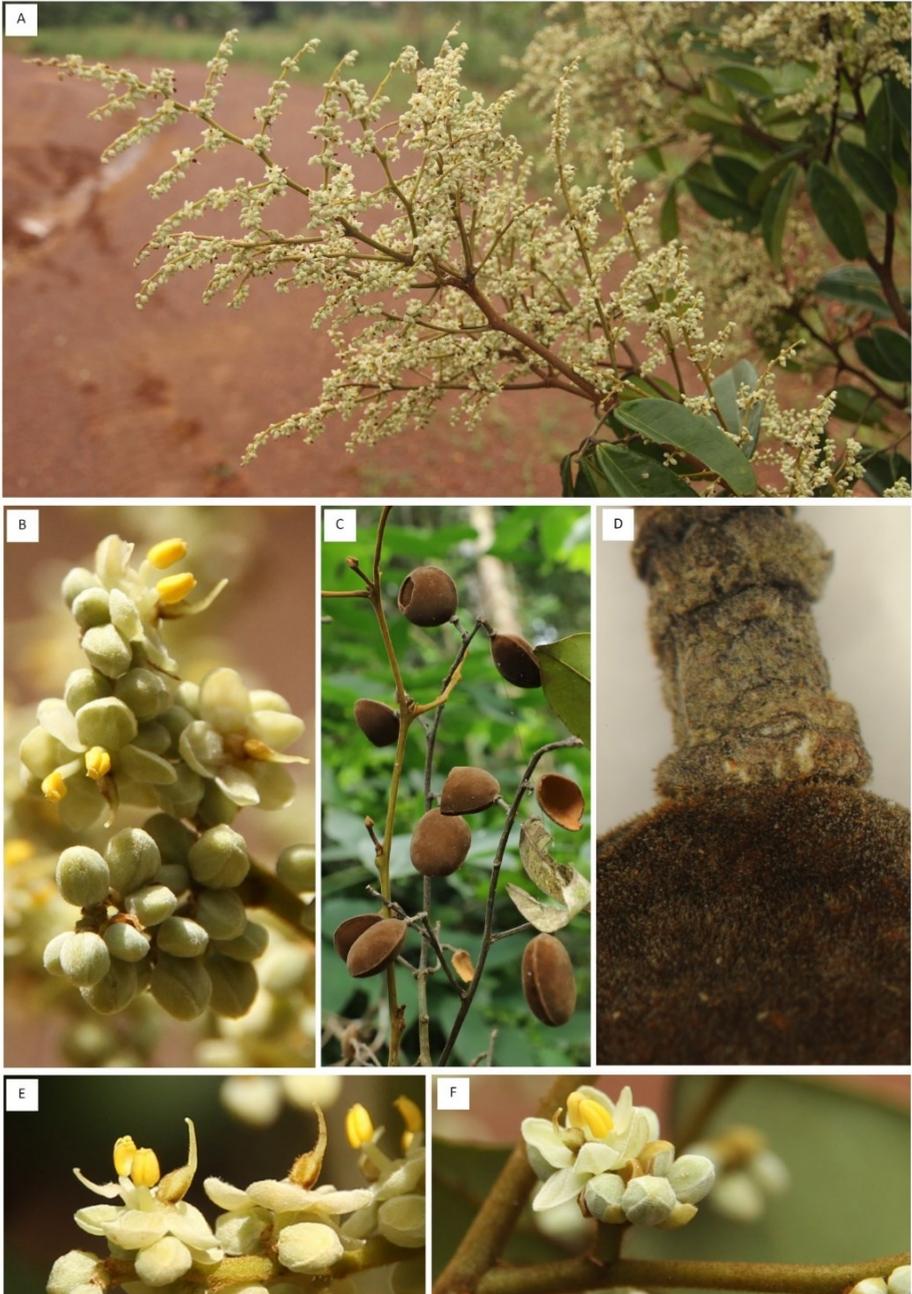


Figure 25. *Dialium bambidiense* A. Terminal panicles (from R. Doucet 33). B. Flowers and buds (from R. Doucet 28). C. Fruits – whole, with some eaten by monkeys (Photograph taken by J.L. Doucet in Ndangu forest on 14 Jun. 2019). D. Detail of fruit base and pilosity (from R. Doucet 5). E. Detail on flowers petal shape, anthers shape, ovary insertion on disc, alternation of brown and whitish band of hairiness on the ovary (R. Doucet 28). F. Detail on an opening flower and panicle pubescence (from R. Doucet 28). Photographs by Robin Doucet and Jean-Louis Doucet.

Tableau 9: Comparison of genetically and morphologically similar 5-foliolate *Dialium*. Characteristics of *D. lopense* are from Breteler (1994), *D. pachyphyllum* and *D. polyanthum* from Rojo (1982). Characteristics of colour/appearance marked with * were not mentioned in descriptions and come from authors' field observations after identifying species with the description of the relevant author.

Character	<i>D. bambidiense</i>	<i>D. lopense</i>	<i>D. pachyphyllum</i>	<i>D. polyanthum</i>
Tree	Large-sized, up to 50 m	Medium-sized, up to 30 m	Small to medium-sized, up to 30 m	Medium to large-sized up to 40m*
Leaflets number	4–5(–7)	(2–)4–5	(3–)5(–6)	(3–)5(–7)
Petioliules length	6–8(–11) mm	(2–)4–6(–8) mm	4–7(–10) mm	(3–)4–7 mm
Leaflet shape	Mostly elliptic, sometimes ovate or lanceolate	Mostly elliptic sometimes ovate or obovate	Oblong-elliptic, sometimes obovate	Elliptic to oblong-elliptic, sometime lanceolate
Leaflet length	6–11(–14) cm	(4–)7–17 cm	(5–)8–15(–21) cm	(4–)5–9(–12) cm
Leaflet width	(2–)3–4(–6) cm	(2–)3–7 cm	(3–)4–6(–9.5) cm	(2–)3–4(–5.5) cm
Blade base	Oblique or obtuse	Obtuse-subcordate	Cuneate, obtuse sometime rounded	Rounded to cuneate
Blade apex	Narrow to abrupt acumen rarely sharp	Rounded to obtuse, sometimes obtuse acumen	Long acuminate, sometime acute	Abrupt to long acumen, sometimes almost caudate
Blade abaxial face	Dull, ginger-brown hair	Dull*, brown hair	Shiny*, glabrous	Shiny*, glabrous
Nervation prominence	Secondary prominent	Secondary and tertiary reticulate prominent	Non-prominent but distinct	Non-prominent but distinct
Secondary nerves pairs	(5–)8–10(–17)	5–8(–9)	(7–)8–12(–14)	(5–)6–10(–12)
Panicles hairs	Ginger-brown	Brown	Whitish*	Whitish

Tableau 9 suite: Comparison of genetically and morphologically similar 5-foliolate *Dialium*. Characteristics of *D. lopense* are from Breteler (1994), *D. pachyphyllum* and *D. polyanthum* from Rojo (1982). Characteristics of colour/appearance marked with * were not mentioned in descriptions and come from authors' field observations after identifying species with the description of the relevant author.

Character	<i>D. bambidiense</i>	<i>D. lopense</i>	<i>D. pachyphyllum</i>	<i>D. polyanthum</i>
Buds	Ovoid-truloid to slightly ellipsoid-oblong	-	Truloid, sometimes ovate-lanceolate	Ellipsoid-ovoid, sometimes slightly truloid
Buds hairs	White	Brown	Whitish*	Whitish to brownish
Pedicel length	(0.4-)0.8-1.4(-1.8)	1-3 mm	2-4 mm	0.5-1(-2) mm
Sepals shape	Triangular	Ovate-oblong	Triangular	-
Sepals dimensions	2.7-3.1 × 2.2-2.5 mm	3-4 × 1.5-3 mm	2.5-3 × 1-1.5 mm	2.5-4 × (1.5-) 2-3 mm
Petal	1, white	1, white to pale yellow	1, yellow*	1, yellow to orange*
Anthers pubescence	Hooked hair on abaxial connective, sometimes along slits	Hooked hair along slits and on connectives	Glabrous to rarely hairy	Sparse hair on adaxial side of connectives
Anthers symmetry	Symmetric to slightly asymmetric	Symmetric	Asymmetric	Slightly asymmetric
Anthers length	1.7-1.8 mm	2-2.5 mm	1.5-2 mm	1.5 mm
Anthers colour	Yellow	-	Yellow*	Light brown*
Filament pubescence	Glabrous	Glabrous	Glabrous to rarely hairy	Glabrous
Filament upper shape	Geniculate to recurved	Not geniculate	Geniculate	Geniculate
Fruit shape	Compressed discoid to ellipsoid	Sublenticular	Slightly compressed, discoid to slightly ovoid	Compressed discoid
Fruit hairiness	Velutinous	Velutinous	Velutinous	Velutinous*
Fruit sepals persistence	Caducous	Caducous	Persistent	Caducous

3.3.2. Ecology

Of the nine habitat classes present in monitoring plots, *D. bambidiense* was only observed in five habitats: humid deep valleys, midslope drainage, midslope ridges or small hills in plains, plains, and ridges. The calculation of the odds (that measure the relationship between a variable and the likelihood of an event occurring) was therefore only possible for these habitats but it should be noted that *D. bambidiense* was also observed on local ridges in the valley, upland drainage and upland plains outside plots. *D. pachyphyllum* and *D. polyanthum* were observed in the 9 habitats of the monitoring plots (Figure 27). *D. lopense* was present at low density in forest surroundings but not in monitoring plots.

Unlike *D. pachyphyllum* and *D. polyanthum*, *D. bambidiense* has never been observed in areas with the highest Topographic Wetness Index (TWI) values corresponding to swamp or rivers. The chances of finding this species in midslope drainage and plains are respectively 3.2 times ($\chi^2= 3.64$, $p=0.056$) and 2.8 times ($\chi^2= 2.70$, $p=0.1$) higher than on the midslope ridges (see Suppl. material 6 for more details on odds calculations). The ratio *D. bambidiense*/*D. pachyphyllum* is 4 times more likely to be higher ($\chi^2= 4.86$, $p=0.03$) in midslope drainage and 4.6 times superior ($\chi^2= 5.64$ $p=0.018$) in plains than midslope ridges or hills in plains. The stems proportion *D. bambidiense*/*D. polyanthum* is 5.3 times more likely to be superior ($\chi^2=3.48$, $p=0.062$) in midslope drainage than midslope ridges or plains hills (Annexe 7).

Although present in swamps, *D. pachyphyllum* significantly has 7.7 times more chance of being present in midslope ridges/small hills in plains ($\chi^2=4.17$, $p=0.04$) and ridges ($\chi^2= 4.07$, $p=0.04$) and 11.4 times more chance of being present ($\chi^2=4.71$, $p=0.03$) in upland drainage. The ratio *D. pachyphyllum*/*D. bambidiense* is 3.4 times more likely to be higher ($\chi^2=2.79$, $p=0.09$) on the ridges than on the plains, suggesting that it is more competitive than *D. bambidiense* in this habitat. The ratio *D. pachyphyllum*/*D. polyanthum* tends to be 8 times ($\chi^2=3.15$, $p=0.08$) more likely to be higher in midslope drainage, 5.9 times higher ($\chi^2=3.00$, $p=0.08$) in midslope ridges /small hills in plains and 7.3 times superior ($\chi^2=3.5$, $p=0.06$) in Ridges than local ridges in valley.

Concerning *D. polyanthum*, no significant odds were observed. Only a slight tendency to be 8.8 times more present ($\chi^2= 3.27$, $p=0.07$) in upland plains than midslope drainage. The ratio *D. polyanthum*/*D. pachyphyllum* tends to be 16 times higher in upland plains than midslope drainage ($\chi^2= 2.99$, $p=0.08$), 11.9 times higher in upland plains than midslope ridges/small hills in plains ($\chi^2= 2.71$, $p=0.1$) and 14.5 times higher in upland plains than midslope drainage ($\chi^2= 3.19$, $p=0.07$).

Regarding stems densities, *D. bambidiense* is less present (1.75 ± 1.17 trees/ha) in monitoring plots than other *Dialium* (2.94 ± 1.09 trees/ha and 14.4 ± 0.69 trees/ha for *D. polyanthum* and *D. pachyphyllum* respectively). Its coefficient of variation among plots (67%) is the highest, followed by *D. polyanthum* (37%) and *D. pachyphyllum* (5%). Both *D. pachyphyllum* and *D. polyanthum* have a significant

proportion of their population in lower diameter classes. However, a portion of the *D. polyanthum* population reaches the 100 cm diameter class, while *D. pachyphyllum* does not exceed the 60 cm class. On the other hand, *D. bambidiense* exhibits a higher proportion of trees in larger diameter classes, and few individuals in the first regeneration class (Figure 26).

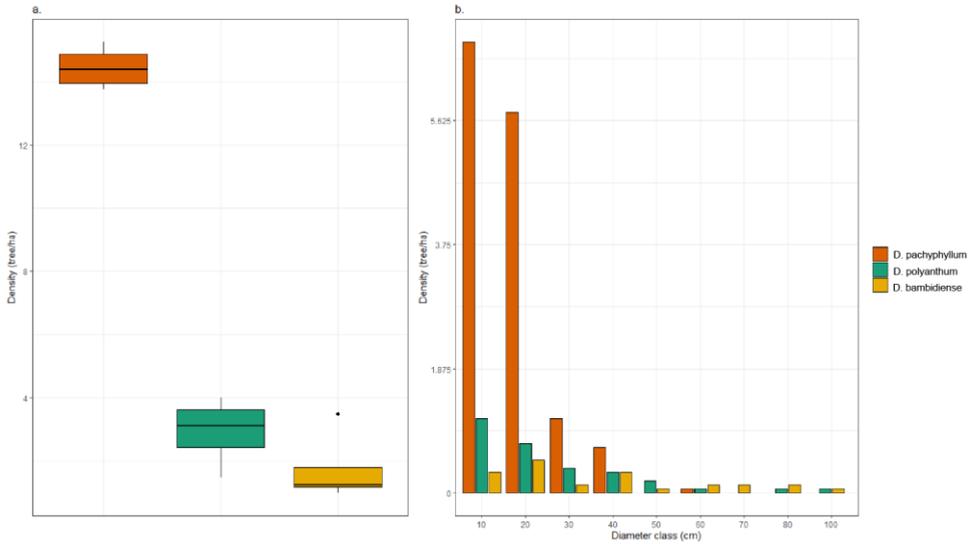


Figure 26. A. *Dialium* population density variation within 4 ha forest plots. B. Distribution of stand density by diameter class in the 16 ha of monitored forest; 10 = [10-20[cm, 20 = [20-30[cm, 30 = [30-40[cm, 40 = [40-50[, ..., 100=[100+

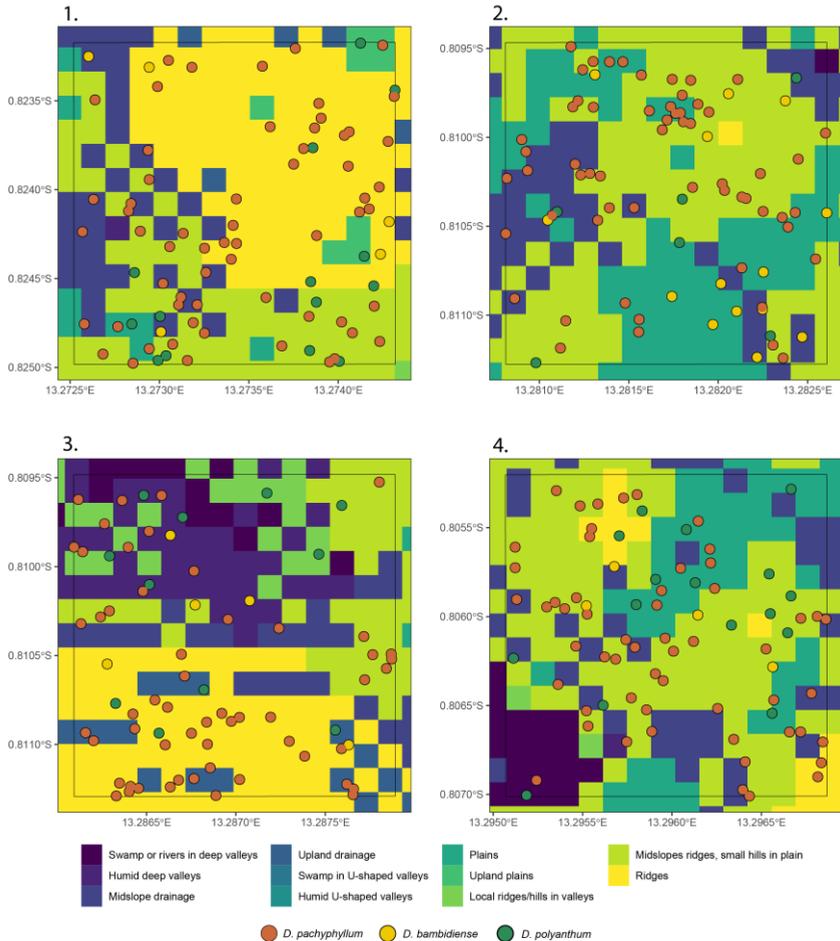


Figure 27. *Dialium* spatial repartition within the four forests plots (200x200m, 4ha) and topographic habitat classification

3.4. Discussion

3.4.1. *Dialium* ecology variations

Although few significant differences in topographic preferences were observed, the findings provide insights into the ecological amplitude of *D. bambidiense*, which is notably absent from swampy areas and exhibits a preference for moderately humid zones such as plains or mid-slope drainage rather than arid ridges. These ecological requirements may contribute to its limited geographical distribution and classification as an *Endangered* species. Within the study area, the presence of *D. bambidiense* is relatively low, averaging 1.75 ± 1.17 trees per hectare, with uneven distribution across plots, particularly one plot reaching a density of 3.7 trees per hectare. While habitat preferences alone may not fully

explain this clustering, an alternative explanation could be attributed to the species' light requirements during the juvenile stage. Windfall events that open the canopy could result in increased light levels within the understorey, creating favourable conditions for growth. This hypothesis finds support in the diametric distribution of the population, showing lack of regeneration in this closed canopy forest (Doucet 2003). However, it is important to consider potential sampling limitations in its preferred habitat. To further investigate the causes of clustering and potential regeneration deficits, future actions should involve expanding the sample size and comparing light requirements of different species under controlled light intensities.

D. pachyphyllum, which is also found in swamps or rivers, exhibits a broader ecological range but shows a preference for drier and higher regions in the landscape, such as mid-slope ridges, small hills in plains, or upland drainage, rather than marshy areas. It also demonstrates a higher competitive ability compared to other species within these zones. In the study plots, *D. pachyphyllum* is uniformly present at high densities, averaging 14.4 ± 0.69 trees per hectare, suggesting its dominance within the stands. Its population distribution follows the typical inverted J-shaped pattern commonly observed in *Dialium* species within closed evergreen forests (Bengono et al. 2021). However, the species does not reach diameters exceeding 70 cm. These findings align with those of Rojo (1982), which classify *D. pachyphyllum* as a co-dominant species in rainforest forests, swampy areas, and drylands.

D. polyanthum is found in all habitats without any particular preference. There is a tendency for it to be more present and competitive in upland plains compared to *D. pachyphyllum*. Its forest density and inter-plot variation fall within an intermediate range compared to the other two species (2.94 ± 1.09). The diametric distribution of *D. polyanthum* conforms to the typical pattern observed in *Dialium* species in rainforests, characterised by an inverted J-shaped distribution with a notable proportion of individuals attaining diameters exceeding 100 cm (Bengono et al. 2021b). It does not exhibit dominance within the population, which is consistent with Rojo's observations categorising *D. polyanthum* as a species found in evergreen forests spanning from dry to flooded conditions.

Timber management

Given its conservation status, it is evident that exploitation of *D. bambidiense* should be carefully controlled in the absence of further information on its distribution. This is particularly true within the study site, where a significant proportion of its population exceeds the Gabonese minimum exploitable diameter threshold of 70 cm (Loi n°16/01 du 31/12/2001 2001). *D. pachyphyllum* cannot be logged due to its inadequate diameter. *D. polyanthum*, characterised by its capacity to attain significant dimensions, favourable natural regeneration, and a conservation status classified as Least Concern (BGCI & IUCN SSC Global Tree Specialist Group 2019), is the species that can most be supported as a potential candidate to meet the requirements of future of the timber sector.

Chapitre 4

Propriétés du bois et potentiel d'utilisation



Après une clarification des espèces reprises sous le vocable Omvong dans les **Chapitres 1 et 2**, il s'avère que seuls trois d'entre elles atteignent des diamètres supérieurs au DME gabonais (70cm): *D. polyanthum*, *D. bambidiense* et *D. lopense*. Dès lors seuls les bois de ces espèces exploitables ont été étudiés et comparés dans ce chapitre. La méthodologie de caractérisation du bois et d'évaluation de son utilisation utilisée dans ce chapitre est la même que celle développée pour *P. tessmannii* dans la **Publication 2**, publiée dans la revue *European Journal of Wood and Wood Products*, disponible à l'Annexe 8.

4.1. Introduction

En tant que matériau naturel, le bois hérite certaines particularités de ses fonctions biologiques (Laboratory Forest Products 2010). Au sein de l'arbre, le bois est le tissu végétal qui assure le soutien mécanique de la tige et la conduction de l'eau depuis les racines jusqu'aux feuilles (Olorunnisola 2018). Il est formé par le cambium suite à la croissance en épaisseur de l'arbre. Ce cambium incrémente des couches de bois concentrique, appelées cernes et composées de cellules majoritairement orientées dans selon l'axe de la tige (axe longitudinal), au fur et à mesure des saisons de végétation (Shmulsky and Jones 2011). Cette organisation anatomique spécifique confère au bois une anisotropie, modifiant ses propriétés selon le plan d'étude. Les plans ligneux sont au nombre de trois: le plan tangentiel aux cernes (tangentiel), le plan orienté selon la direction reliant le centre de l'arbre à l'écorce (radial) et le plan perpendiculaire à l'axe de la tige (transversale) (Laboratory Forest Products 2010; Olorunnisola 2018). En raison de son rôle structural, le bois peut naturellement résister à des contraintes mécaniques, d'intensité différentes en fonction du plan ligneux sollicité (Kollmann and Coté 1968). En plus de sa fonction mécanique, le bois, en assurant la conduction de la sève, est intrinsèquement poreux et donc hygroscopique. Son taux d'humidité varie donc selon les conditions atmosphériques, impactant non seulement sa masse, mais également ses propriétés mécaniques et dimensionnelles en deçà d'un certain pourcentage d'humidité (Spear and Walker 2006). Finalement, en tant que matériau biologique, le bois est naturellement sujet à la dégradation par divers agents spécifiques tels que les champignons ou les insectes (Khatib 2009).

Bien que ces caractéristiques soient partagées par toutes les espèces ligneuses, leur expression peut varier, conduisant certaines, comme *Lophira alata*, à être utilisées pour des traverses de chemin de fer, tandis que d'autres, telles qu'*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb., sont réservées au modélisme (Gérard et al. 2017). Pour étudier le bois, ces particularités se traduisent en propriétés quantifiables, dont les plus communes sont regroupées en trois groupes : les propriétés physiques, les propriétés mécaniques et la durabilité naturelle (Olorunnisola 2018). Les valeurs obtenues pour ces propriétés conditionnent en grande partie l'usages des espèces (Sallenave 1955; Tschiamala-Tshibangu et al. 1993; Pollet et al. 2008, 2012; Boadu et al. 2017; Ndongmo Zebaze et al. 2023). Au-delà de ces propriétés plutôt liée à la mise en œuvre du matériau, l'aspect visuel est également déterminant pour son utilisation (Hillaby 2000).

Afin de promouvoir une espèce ligneuse peu connue au sein d'une filière traditionnellement conservatrice, une étude approfondie de ses propriétés s'avère donc indispensable (Chaowana 2013; Boampong et al. 2015). Cependant, leur interprétation peut parfois s'avérer complexe pour les personnes non-initiées. Pour pallier cette difficulté, de nombreux auteurs comparent les espèces étudiées avec des espèces plus connues, permettant ainsi d'établir une liste optimale d'utilisation,

assimilable par les acteurs de la filière (Tschiamala-Tshibangu et al. 1993; Pollet et al. 2012; Boadu et al. 2017; Ndongmo Zebaze et al. 2023).

C'est pourquoi ce chapitre vise à (i) caractériser le bois des 7 espèces étudiées au travers de leur aspect visuel, 7 propriétés physiques, 5 propriétés mécaniques et leur durabilité naturelle face à 3 souches de champignons, (ii) comparer ces propriétés à celles de 96 autres essences africaines plus connues et (iii) définir une liste d'utilisation optimales de ces espèces.

4.2. Matériel et méthodes

4.2.1. Echantillonnage

Au total, 26 arbres ont été collectés et transformés pour produire le matériel expérimental (Tableau 10). Pour les arbres provenant de PW-CEB (*Dialium lopense*, *Dialium polyanthum*, *Dialium bambidiense*, *Klainedoxa gabonensis* et *Scyphocephalum mannii*) le diamètre de l'arbre, la hauteur du fût (hauteur mesurée de l'arbre du sol jusqu'à la première branche) ainsi que la hauteur totale de l'arbre ont pu être relevés (Tableau 8). Les diamètres ont été mesurés au mètre ruban soit à 1m30, soit au-dessus des défauts (empâtements, cannelures ou contreforts) à l'exception des individus de *S. mannii* pour lesquels la mesure a systématiquement été réalisée à 1m30. Les hauteurs ont été mesurées à l'aide d'un appareil Vertex. Pour les espèces collectées à Pallisco-CIFM (*Pachyelasma tessmannii* et *Pentaclethra macrophylla*) le diamètre à 1m30 a été estimé sur base du diamètre des grumes après exploitation. Afin de répondre à la norme d'échantillonnage ISO 3129 (2012), un minimum de 4 arbres a été prélevé par espèce à l'exception de *Dialium lopense*. Cette norme définit le seuil minimal d'échantillonnage pour caractériser une espèce. Dès lors les résultats obtenus pour *D. lopense* ne pourront être utilisés qu'à titre d'indication et ne seront pas extrapolables pour définir cette espèce.

4.2.2. Découpe des éprouvettes d'essais et description visuelle du bois

Un billon de 2 m a été découpé à la base de chacune des 26 grumes. Dans ce billon un plateau de cœur (plateau sur quartier et centré sur la moelle) de 10 cm d'épaisseur a été prélevé. La largeur de l'aubier a été mesurée en 5 positions équidistantes sur les deux côtés du plateau. La couleur, la texture ainsi que le fil du bois ont été observés dans l'aubier et le duramen sur un plan longitudinal radial et tangentiel. Finalement l'observation macroscopique des éléments anatomiques du plan ligneux visibles sur la face transversale des plateaux a été réalisée en les ponçant avec un grain croissant de 80 à 1200. Par la suite, les plateaux ont été refendus longitudinalement sur le cœur et tronçonnés radialement en trois segments notés A, B et R (R pour rebut). Le segment A a été délimité en lamelles (11 à 16 en fonction de la largeur des segments). Le segment B a été délimité quant à lui en carrelets (4-8 en fonction de la largeur du segment) (Figure 28). Les

lamelles ont finalement été découpées en différentes éprouvettes d'essais comme indiqué sur la Figure 16 et aux dimensions prescrites par les normes d'essais. Pour chaque test un minimum de 2 éprouvettes sans défauts a été sélectionné dans chaque lamelle. Seules les lattes composées, entièrement ou en partie, d'aubier ont été mise de côté. Dès lors, le bois de transition composant parfois une large proportion des grumes de *K. gabonensis*, a été maintenue pour caractériser de cette espèce. La sélection d'éprouvettes dites « sans défauts » a été opérée en regard de la norme ISO 3129 (2012). Les éprouvettes d'essais ont finalement été conditionnées dans une atmosphère standard de 20 ± 2 °C et de 65 ± 5 % d'humidité de l'air afin d'atteindre une humidité d'équilibre (H) de 12 % (ISO 2012). Cette humidité d'équilibre a été régulièrement mesurée sur des éprouvettes indépendantes surnuméraires en utilisant l'équation suivante: $H = (mh - ma)/ma * 100$ où mh = masse de l'échantillon humide (g), ma = masse de l'échantillon anhydre constante après séchage en étuve à 103 °C (g).

Tableau 10 : Arbres collectés pour la caractérisation des bois des 7 espèces étudiées. d = diamètre à la base du fût (cm); h_d = hauteur de mesure du diamètre (m); h_fût = hauteur du fût ; h_tot = hauteur totale de l'arbre (m); * = diamètre estimé.

Gestionnaire	Espèce	arbres	d	h_d	h_fût	h_tot	
PWG-CEB	<i>Dialium polyanthum</i>	1	105	2,2	12,1	43	
		2	99	3,1	10,4	41	
		3	86	1,3	20,6	42	
		4	92	6,1	18,3	42	
		5	91	1,3	15,7	47	
	<i>Dialium bambidiense</i>	1	115	5,1	14	43	
		2	83	3,3	15	39	
		3	84	2,4	12	42	
		4	81	1,7	14	45	
	<i>Dialium lopense</i>	1	76	2,7	17	40	
	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	1	113	2,0	19	43	
		2	108	2,6	21	42	
		3	109	3,3	26	37	
		4	100	1,3	23	40	
	<i>Scyphocephalum manni</i>	1	135	1,3	28	32	
		2	128	1,3	22	41	
		3	99	1,3	26	30	
		4	118	1,3	12	41	
	Pallisco-CIFM	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	1	85*	-	-	-
			2	80*	-	-	-
3			80*	-	-	-	
4			90*	-	-	-	
<i>Pachyelasma tessmannii</i>		1	115*	-	-	-	
		2	125*	-	-	-	
		3	80*	-	-	-	
		4	150*	-	-	-	

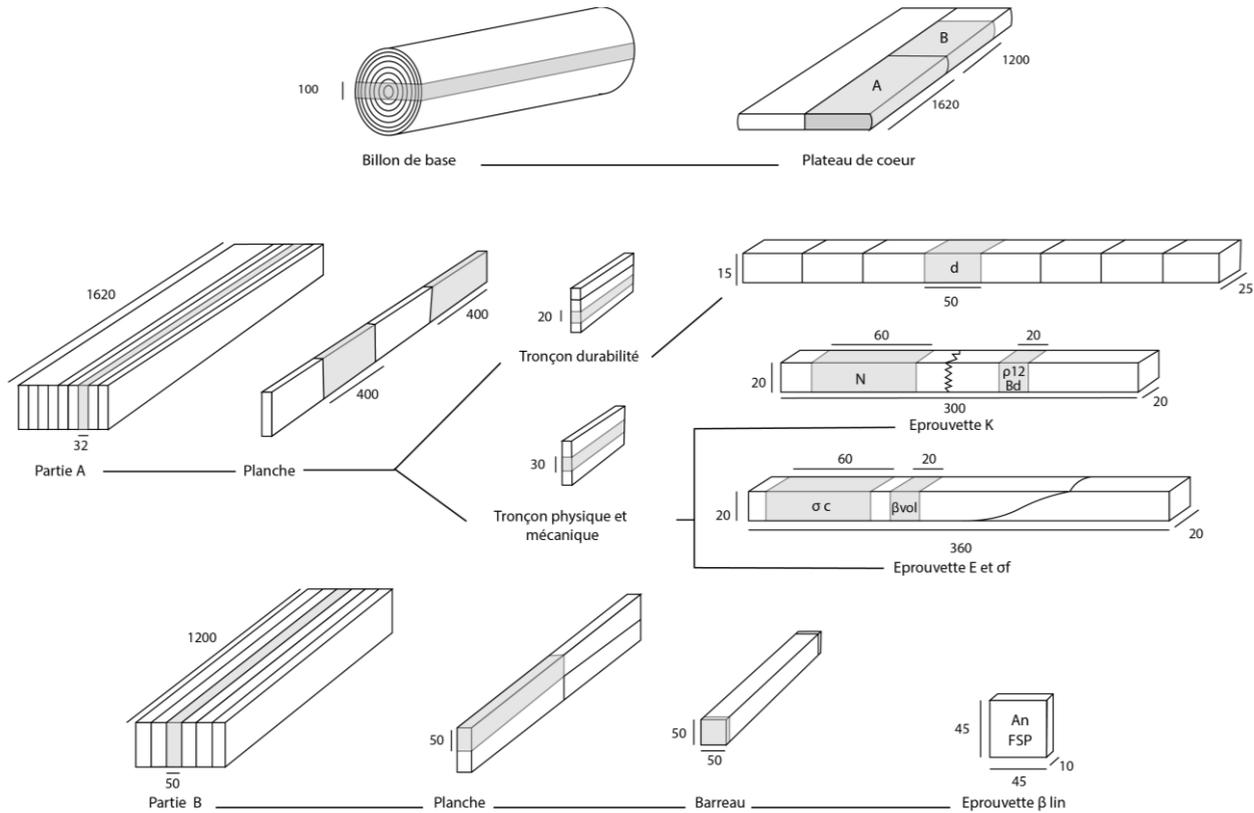


Figure 28 : Processus de découpe des billons de base, dimensions en mm ; durabilité naturelle (d) ; travail de rupture flexion dynamique (K) ; densité à 12% MC (ρ_{12}) ; Infradensité (Bd) ; dureté de Monnin (N) ; retrait volumétrique total (β_{vol}) ; module de Young (E) ; résistance en flexion statique (σ_f) ; résistance à la compression axiale (σ_c) ; imprégnation (I) ; retrait radial/tangentiel linéaire total (β_{lin}) ; anisotropie (An) ; point de saturation des fibres (PSF).

4.2.3. *Mesure des propriétés du bois*

Les propriétés étudiées, les calculs pour leur détermination et les normes utilisées, ainsi que le nombre total d'éprouvettes testées par espèce sont résumés dans le Tableau 11. Le calcul du point de saturation delà fibre (PSF) a été réalisé en conditionnant les échantillons en étuves pour atteindre 4 paliers de condition hygrométrique. Ces différents paliers ont conditionnés le bois à des valeurs d'humidité d'équilibre (H) comprises entre 20% et 0%. Pour chaque H, la surface de l'échantillon correspondante a été calculée comme le produit des dimensions tangentielle et radiales. Le PSF, considéré comme l'humidité d'équilibre du bois à partir de laquelle le retrait commence pendant le séchage, a été extrapolée par régression linéaire entre le retrait de surface mesuré et son humidité d'équilibre correspondante (Kollmann et Coté 1968 ; Bossu et al. 2016).

Toutes les propriétés mécaniques ont été déterminées à l'aide d'une machine Instron-5582®, à l'exception travail de rupture en flexion dynamique qui a été déterminée à l'aide d'un mouton-pendule d'Amsler. En raison du manque de connaissances sur le séchage de ces essences, certaines propriétés mécaniques n'ont pas été mesurées exactement à 12% d'humidité. Lorsque les normes le permettaient, les valeurs d'essais ont pu être corrigées et ramenée à 12% d'humidité. Dans le cas contraire, l'humidité du bois au moment de l'essai est mentionnée. Lorsque l'humidité d'équilibre du bois est inférieure au PSF, il existe une relation négative entre l'humidité d'équilibre et les propriétés mécaniques (Kollmann and Coté 1968; Gerhards 1982; Kretschmann and Green 1996). De ce fait, les valeurs d'essais mécaniques dont l'humidité est supérieur à 12% sous-estiment la valeur corrigée et inversement.

La durabilité naturelle est ici considérée comme la résistance du bois aux attaques des champignons basidiomycètes. Dans cette étude, deux champignons de pourriture blanche, *Trametes versicolor* (L.) Lloyd (souche CTB 863) et *Stereum hirsutum* (Wild.) Pers. (souche MUCL 40165) ainsi qu'un champignon de pourriture brune, *Coniophora puteana* (Schumach.) P. Karst. (souche BAM Ebw. 15) ont été testés.

4.2.4. *Traitement statistique*

Dans un premier temps, les valeurs aberrantes dues aux erreurs expérimentales ont été supprimées des jeux de données. Ces valeurs ont été pré-identifiées lorsqu'elles se trouvaient en dehors de l'intervalle : $[Q1-1,5*IQR ; Q3+1,5*IQR]$. Une fois les valeurs aberrantes éliminées, les statistiques descriptives ont pu être calculées. Ensuite une analyse de variance, ANOVA (F), a été réalisée pour étudier les différences de propriétés entre les 3 espèces de *Dialium*. Pour vérifier la normalité et l'homoscédasticité, les tests de Shapiro et de Levene ont respectivement été utilisés. Si les conditions étaient respectées et une différence significative était identifiée, les moyennes ont été structurées à l'aide du test *Honest Significant Difference* (HSD) de Tukey (HSD) à un niveau de confiance de 95 %. Ce test permet de réduire les chances de commettre une erreur de type I lorsque que l'on compare deux à deux plus de deux distributions (Nanda et al. 2021). Si l'homoscédasticité n'était pas vérifiée, le test non

paramétrique de Kruskal-Wallis (χ^2) a été utilisé et les médianes ont été structurées en utilisant le test de Dunn (z) à un niveau de confiance de 95%. Pour éviter une nouvelle fois le risque d'erreur de type I, les p-valeurs du test de Dunn ont été ajustées par la méthode de Bonferroni.

Les moyennes des propriétés mécaniques (E, σ_f , σ_c , et N), physiques (ρ_{12} , %V, β_{linR} , β_{linT} , AN et FSP) ainsi que la classe de durabilité (numérotée de 1 à 5 par ordre croissant de durabilité) face au champignon le plus virulent (d) du duramen des différentes espèces ont été comparées à celles d'autres bois africains obtenues à partir de la base de données du CIRAD (Gérard et al. 2011). Toutes les valeurs mentionnées dans cette base de données ont été déterminées sur des échantillons sans défauts de mêmes dimensions et selon les mêmes normes que celles mentionnées dans la Tableau 11 (Martin 2020). L'ensemble de propriétés n'ayant pas pu être testé pour *S. mannii*, les valeurs manquantes pour cette analyse ont été tirées de l'Atlas des Bois Tropicaux (Gérard et al. 2017). Pour identifier les essences ayant des propriétés similaires, une analyse en composantes principales (ACP) et un *Hierarchical Clustering on Principal Components* (HCPC) ont été effectuées. Cette méthode non supervisée permet de réduire le nombre de variables à quelques variables non corrélées, appelées Composantes Principales (CP) qui résumant efficacement l'information (Lever et al. 2017). Cependant, cette affirmation n'est vérifiée que si le nombre de composantes sélectionnées est optimal. En effet, la variance cumulée expliquée par les CP sélectionnées doit représenter la majeure partie de la variabilité du jeu de données, tout en évitant de sélectionner un trop grand nombre de composantes qui pourraient induire du bruit statistique. Ensuite, la distance euclidienne entre les espèces a été calculée sur les scores des CP sélectionnées afin de créer la matrice de dissimilarité utilisée pour regrouper les espèces avec la méthode d'agrégation UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic mean*).

Toutes les analyses et tous les graphiques ont été traités avec le logiciel R 4.2.2. (R Core Team 2023) à l'aide des packages suivants : *Dplyr* v1.1.2 (Wickham et al. 2022), *rstatix* v0.7.2 (Kassambara 2021), *ggpubr* v0.6.0 (Kassambara 2019), *ggplot2* (Wickham 2016) et *FactoMineR* (Lê et al. 2008b).

4.3. Résultats

Après le façonnage des éprouvettes, il s'est avéré que l'arbre 3 de *Dialium bambidiense* présentait un fil ondulé. Cette ondulation du fil impacte directement les propriétés mécaniques dont la valeur dépend de l'orientation et de la rectitude des fibres du bois. Elle s'est également avérée avoir une influence sur la plupart des propriétés physiques. Ce fil du bois n'ayant été observé que sur l'un des quatre arbres, il a été considéré comme une exception et cet individu a été éliminé du jeu de données. De ce fait, *D. bambidiense* ne sera caractérisé que par 3 arbres, soit le seuil minimal d'échantillonnage recommandé par la norme ISO 3129 (ISO 2012). On notera au passage, que chez certaines espèces, le fil ondulé peut être une caractéristique recherchée et synonyme de haute valeur ajoutée pour certains usages.

Lorsque les différences de propriétés entre les *Dialium* ont été évaluées sur base du test ANOVA, les valeurs moyennes de toutes les espèces sont présentées. Lorsque c'était le test Kruskal-Wallis, les médianes ont été présentées. L'ensemble des statistiques descriptives sont néanmoins disponibles à l'Annexe 9.

4.3.1. Aspect visuel

L'aspect visuel du bois et des grumes sont présentés sous forme de fiches (Figures 29 à 35).

Tableau 11 : Méthodes de calcul des propriétés du bois. m_{12} = masse 12% H (kg), V_{12} = volume 12% H (m^3), y_{in} = interception de l'axe y de l_m = modèle linéaire, H = teneur en humidité, S = surface de l'échantillon (m^2), ma = masse anhydre (kg), V_s = volume au-dessus du PSF (m^3), V_a = volume anhydre (m^3), L_s = longueur au-dessus du PSF (m), L_a = longueur anhydre (m), P = charge maximale avant rupture (N), l = distance entre deux points d'appui (m), t = distance entre deux points de chargement (m), m = distance entre les deux points de mesure de la flèche (m), a = hauteur de l'échantillon (cm), b = largeur de l'échantillon (cm), f = flèche induite par la charge (m), W = travail unitaire de rupture (kgm), p = largeur de l'empreinte du cylindre sur l'échantillon (mm), m_0 = masse sèche théorique avant exposition au champignon (g), m_{16} = masse sèche après 16 semaines d'exposition au champignon ; Unités ; normes utilisées pour leur détermination et nombre d'échantillons sélectionnés par espèce : *D. polyanthum* (N_{Dp}), *D. bambidiense* (N_{Db}), *D. lopense* (N_{Dl}), *K. gabonensis* (N_{Kg}), *S. mannii* (N_{Sm}), *P. tessmannii* (N_{Pt}) et *P. macrophylla* (N_{Pm}).

Propriété	Symbole	Méthode de calcul	Unité	Standards / Références	N_{Dp}	N_{Db}	N_{Dl}	N_{Kg}	N_{Sm}	N_{Pt}	N_{Pm}
Masse volumique (H=12%)	ρ_{12}	$\rho_{12} = m_{12}/V_{12}$	kg/ m^3	NF B51-005 (AFNOR 1985a)	76	37	10	62	-	83	58
Point de Saturation de la Fibre	PSF	y_{in} l_m (H~S)	%	(Kollmann and Coté 1968; Bossu et al. 2016)	32	17	6	41	-	31	34
Infradensité	Bd	$Bd = ma/V_s$	kg/ m^3	NF B51-005 (AFNOR 1985a)	76	37	10	62	-	83	58
Retrait volumique total	β_{vol}	$\beta_{vol} = (V_s - V_a)/V_s * 100$	%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	76	37	10	62	-	83	58
Coefficient de retrait volumique	%V	%V = β_{vol} / FSP	%/%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	76	37	10	62	-	83	58
Retrait linéaire total	β_{linT} β_{linR}	$\beta_{lin} = (L_s - L_a)/L_s * 100$	%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	104	47	16	105	-	78	69
Anisotropie	An	$AN = \beta_{linT} / \beta_{linR}$	-	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	104	47	16	105	-	78	69
Module d'élasticité	E	$E = 3P(I-t) m^2 / 8ba^3 f$	MPa	NF B51-016 (AFNOR 1987a)	76	37	10	60	59	86	57
Résistance à la flexion statique	σ_f	$\sigma_f = 3Pl / 2ba^2$	MPa	NF B51-008 (AFNOR 1987b)	76	37	10	62	59	86	57
Travail de rupture en flexion dynamique	K	$K = W / ab$	kg/ cm^2	NBN 225 (IBN 1956)	62	35	10	60	29	68	56

Tableau 11 suite : Méthodes de calcul des propriétés du bois. m12 = masse 12% H (kg), V12 = volume 12% H (m³), y in = interception de l'axe y de lm = modèle linéaire, H = teneur en humidité, S = surface de l'échantillon (m²), ma = masse anhydre (kg), Vs = volume au-dessus du PSF (m³), Va = volume anhydre (m³), Ls = longueur au-dessus du PSF (m), La = longueur anhydre (m), P = charge maximale avant rupture (N), l = distance entre deux points d'appui (m), t = distance entre deux points de chargement (m), m = distance entre les deux points de mesure de la flèche (m), a = hauteur de l'échantillon (cm), b = largeur de l'échantillon (cm), f = flèche induite par la charge (m), W = travail unitaire de rupture (kgm), p = largeur de l'empreinte du cylindre sur l'échantillon (mm), m0 = masse sèche théorique avant exposition au champignon (g), m16 = masse sèche après 16 semaines d'exposition au champignon ; Unités ; normes utilisées pour leur détermination et nombre d'échantillons sélectionnés par espèce : *D. polyanthum* (N_{Dp}), *D. bambidiense* (N_{Db}), *D. lopense* (N_{Di}), *K. gabonensis* (N_{Kg}), *S. mannii* (N_{Sm}), *P. tessmannii* (N_{Pt}) et *P. macrophylla* (N_{Pm}).

Propriété	Symbole	Méthode de calcul	Unité	Standards / Références	N _{Dp}	N _{Db}	N _{Di}	N _{Kg}	N _{Sm}	N _{Pt}	N _{Pm}
Résistance à la compression axiale	σ_c	$\sigma_c = P/ab$	MPa	NF B51-007 (AFNOR 1985c)	76	37	10	62	-	85	50
Dureté de Monnin	N	$N = (15 - (\sqrt{900 - p^2})/2)^{-1}$	-	NF B51-013 (AFNOR 1985d)	76	37	10	62	58	85	57
Durabilité <i>T. versicolor</i>	d	$d = (m_0 - m_{16})/m_0$	%	CEN/TS 15083-1 (CEN 2005)	140	90	20	120	-	64	64
Durabilité <i>C. puteana</i>	d	$d = (m_0 - m_{16})/m_0$	%	CEN/TS 15083-1 (CEN 2005)	140	90	20	111	-	64	64
Durabilité <i>S. Hirsutum</i>	d	$d = (m_0 - m_{16})/m_0$	%	CEN/TS 15083-1 (CEN 2005)	140	90	20	125	-	-	-

Dialium bambidiense R.Doucet & JL.Doucet

- **Grume:** Section ovale à circulaire, grume droite dans la partie inférieure, tortueuse près des branches, généralement présence de fentes de cœur.
- **Aubier :** Blanc-grisâtre nettement différencié d'une largeur moyenne de $7,2 \pm 2,2$ cm
- **Duramen:** Brun clair avec de large bandes brunes foncées dues a des variations d'épaisseur de parenchyme.
- **Fil:** Droit
- **Grain :** Moyen
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de $181 \mu\text{m}$ de diamètre en moyenne, 3-4 par mm^2 , isolés, parfois groupés par 2-3.
 - Parenchyme axial juxtavasculaire et en lignes minces

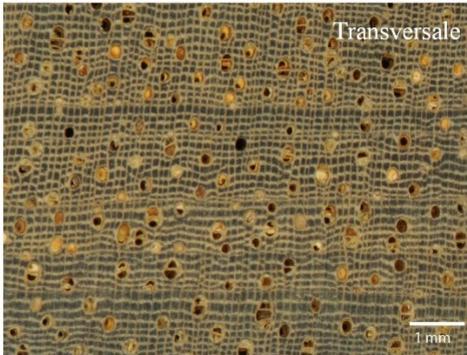


Figure 29 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *D. bambidiense*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).

Dialium lopense Breteleur

- **Grume:** Section ronde, parfois légèrement en étoile, généralement tortueuses, présence de fentes de cœur.
- **Aubier :** Blanc-grisâtre nettement différencié d'une largeur moyenne de $7,5 \pm 2,4$ cm
- **Duramen:** Alternance de fines bandes brunes et brunes claires dues à des différences d'épaisseur de parenchyme.
- **Fil:** Droit
- **Grain :** Moyen
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de $184 \mu\text{m}$ de diamètre en moyenne, 3-4 par mm^2 , isolés, parfois groupés par 2-3.
 - Parenchyme axial juxtavasculaire et en lignes minces

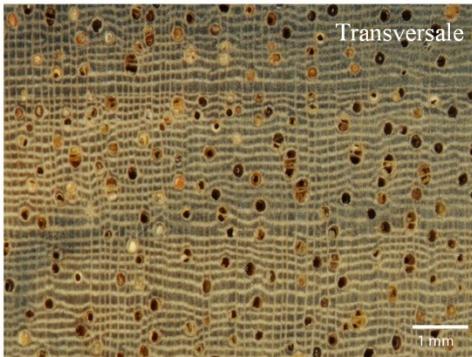


Figure 30: Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *D. bambidiense*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).

Dialium polyanthum Harms

- **Grume:** Section circulaire, grume droites, généralement présence de fentes de cœur
- **Aubier :** Blanc-grisâtre nettement différentié d'une largeur moyenne de $6,6 \pm 1,0$ cm
- **Duramen:** Brun clair avec par fois de fines bandes brunes foncées dues a des variations d'épaisseur de parenchyme.
- **Fil:** Droit
- **Grain :** Grain moyen
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de $173 \mu\text{m}$ de diamètre en moyenne, 3-4 par mm^2 , isolés, parfois groupés par 2-3.
 - Parenchyme axial juxtavasculaire et en lignes minces



Figure 31: Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *D. bambidiense*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).

Klainedoxa gabonensis Pierre

- **Grume:** Section circulaire, grume droites, fentes de cœur, parfois roulures partielles et fractures internes
- **Aubier :** Aubier peu différencié du duramen brun clair
- **Duramen:** Brun clair, cœur brun foncé, tendant parfois vers le noir
- **Fil:** Large contrefil accusé
- **Grain :** Grossier
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de 214 μm de diamètre en moyenne, 3-4 par mm^2 , isolés, parfois groupés par 2.
 - Parenchyme axial en minces ou larges bandes, parfois aliforme ou anastomosé.



Figure 32: Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *D. bambidiense*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Dalimier et al. 2021).

Pachyelasma tessmannii Harms

- **Grume:** Grume droite présentant parfois des roulures ou des fentes de cœur.
- **Aubier :** Blanc nettement différencié, largeur moyenne de $9,8 \pm 3,2$ cm
- **Duramen:** De rosâtre à brun voir brun rougeâtre.
- **Fil:** Contrefil et ondulation tangentielle donnant un aspect flammé.
- **Grain :** Grossier
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de grande dimensions visibles à l'œil nu ($> 200\mu\text{m}$), 2-3 par mm^2 , isolés, parfois groupés par 2-3;
 - Parenchyme axial en bande, aliforme et parfois confluent.

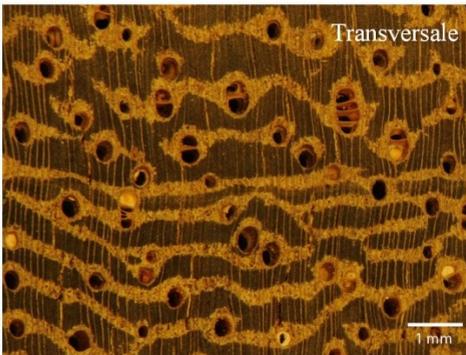


Figure 33 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *P. tessmannii*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (Doucet et al. 2021).

Pentaclethra macrophylla (Harms) Harms

- **Grume:** Grume plutôt tortueuse présentant parfois des galeries d'insectes, des fentes de cœur, de la déviation de fil et des nœuds.
- **Aubier :** Blanc grisâtre nettement différencié, largeur moyenne de $4,9 \pm 0,9$ cm
- **Duramen:** Brun foncé à brun orangé, présentant parfois des veines plus sombres
- **Fil:** Contrefil accusé de faible largeur
- **Grain :** Grossier
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux de grande dimensions visibles à l'œil nu ($> 200\mu\text{m}$), 3 à 5 par mm^2 , parfois isolés, parfois groupés par 2-3;
 - Parenchyme circumvasculaire ou en losange autour des vaisseaux.



Figure 34 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *P. macrophylla*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (InsideWood 2004).

Scyphocephalum mannii (Benth. & Hook.f.)
Warb.

- **Grume:** Section étoilée à la base, devenant circulaire près des branches, droites, parfois présence de cœur creux à la base et de gouttières dans la partie supérieures suite à la perte de branches
- **Aubier :** Aubier peu différentiable du duramen non coloré
- **Duramen:** Duramen de couleur claire, cœur brun et présence de veine brunes foncées dites veines grasses.
- **Fil:** Droit
- **Grain :** Moyen à fin
- **Aspect de la section transversale:**
 - Porosité diffuse;
 - Vaisseaux 100-200 μ m , < 5 par mm², isolés ou groupés par 2.
 - Parenchyme axial absent ou extrêmement rare



Figure 35 : Fiche descriptive des grumes et de l'aspect visuel du bois de *S. mannii*. Les valeurs renseignées dans la section « Aspect de la section transversale » est issue de (InsideWood 2004).

4.3.2. Propriétés physiques

Masse volumique

Il existe une différence significative de masse volumique entre les 3 espèces de *Dialium* ($\chi^2=37,4$; p-val. < 0,001). Cependant la valeur médiane des bois des trois espèces de *Dialium* reste classifiée comme « bois lourd ». *D. polyanthum* présente une masse volumique ($931 \pm 23 \text{ kg/m}^3$) significativement supérieure ($z=5,05$; p-val < 0.001) à *D. bambidiense* ($897 \pm 29 \text{ kg/m}^3$) et également supérieure ($z=4,36$; p-val < 0.001) à *D. lopense* ($862 \pm 45 \text{ kg/m}^3$). Les bois de *K. gabonensis* et *P. macrophylla* sont tous deux classifiés comme « très lourd » avec des valeurs médianes de $996 \pm 46 \text{ kg/m}^3$ et $1011 \pm 43 \text{ kg/m}^3$, respectivement. La valeur médiane ($814 \pm 68 \text{ kg/m}^3$) de masse volumique de *P. tessmannii* le classifie comme bois « lourd » (Figure 36). Cependant la valeur médiane étant très proche de la limite du bois « mi-lourd », près de la moitié des éprouvettes testées sont classées dans la cette dernière catégorie.

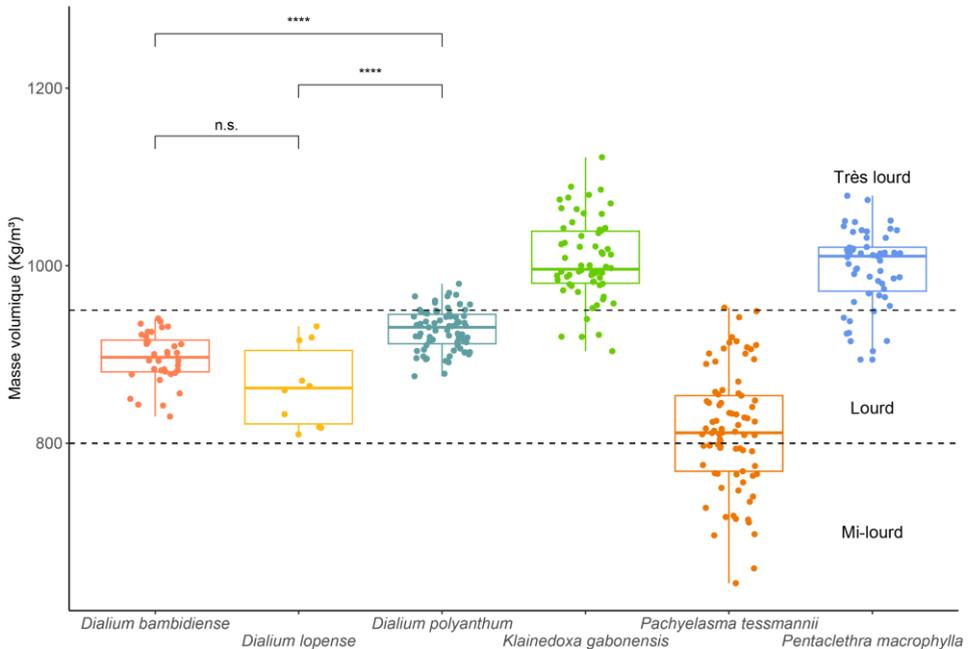


Figure 36: Distribution de la masse volumique des 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « Très lourd », « Lourd », « Mi-lourd » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité **** correspond à une p-val < 0.0001 au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Infradensité

Il existe une différence significative entre les trois espèces de *Dialium* ($\chi^2=50,1$; p-val < 0,001). L'infradensité médiane du bois de *D. polyanthum* ($765 \pm 16 \text{ kg/m}^3$) est significativement supérieure à celle des autres espèces de *Dialium* ($z=5,96$ et p-val < 0,001, $z=4,95$ et p-val < 0,001, respectivement par rapport à *D. bambidiense* et *D. lopense*). Les valeurs médianes de *D. bambidiense* ($738 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) et *D. lopense* ($711 \pm 38 \text{ kg/m}^3$) ne diffèrent pas significativement ($z=-1,26$; p-val = 0,207). *P. macrophylla* présente la plus haute médiane d'infradensité suivis par *K. gabonensis* avec respectivement $845 \pm 38 \text{ kg/m}^3$ et $817 \pm 29 \text{ kg/m}^3$. *P. tessmannii* présente quant à lui la plus faible valeur médiane avec $670 \pm 52 \text{ kg/m}^3$ (Figure 37).

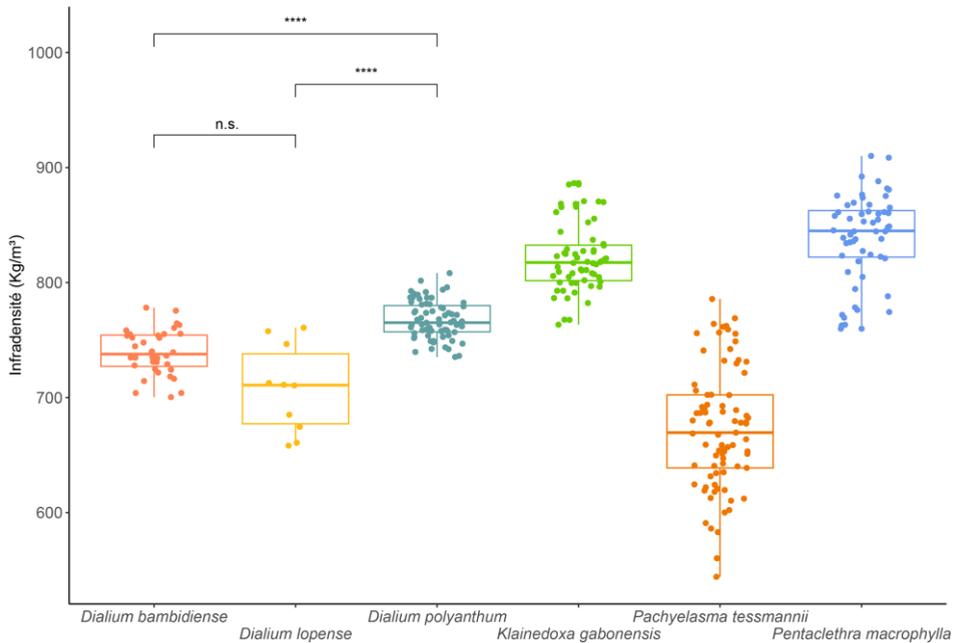


Figure 37 : Distribution de l'infradensité des 6 espèces testées. Le seuil de significativité **** correspond à une p-val < 0.0001 au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Point de Saturation de la Fibre

Le Point de Saturation de la Fibre (PSF) varie significativement entre les 3 espèces de *Dialium* ($F=10,4$; $p\text{-val} < 0,001$). *D. lopense* a un PSF moyen de $25,8 \pm 0,8\%$ significativement supérieur aux deux autres espèces (diff=1,8 ; $p\text{-val}=0,006$ et diff=2,3 ; $p\text{-val}<0,001$ respectivement par rapport à *D. bambidiense* et *D. polyanthum*). Le PSF moyen de *D. bambidiense* ($24,0 \pm 0,9\%$) n'est significativement pas différent de celui de *D. polyanthum* ($23,5 \pm 1,3\%$). *D. lopense* présente une valeur de PSF moyenne alors que les deux autres espèces présentent une valeur faible. *K. gabonensis* a un PSF moyen ($25,3 \pm 0,9\%$) tout en ayant une proportion non négligeable de valeurs considérées comme faible (Figure 38). *P. tessmannii* présente la plus haute valeur moyenne de PSF ($26,2 \pm 1,3\%$) qui reste considéré comme moyen. *P. macrophylla* possède la plus faible valeur de PSF ($20,3 \pm 0,3\%$) mais également la plus faible dispersion de ses valeurs.

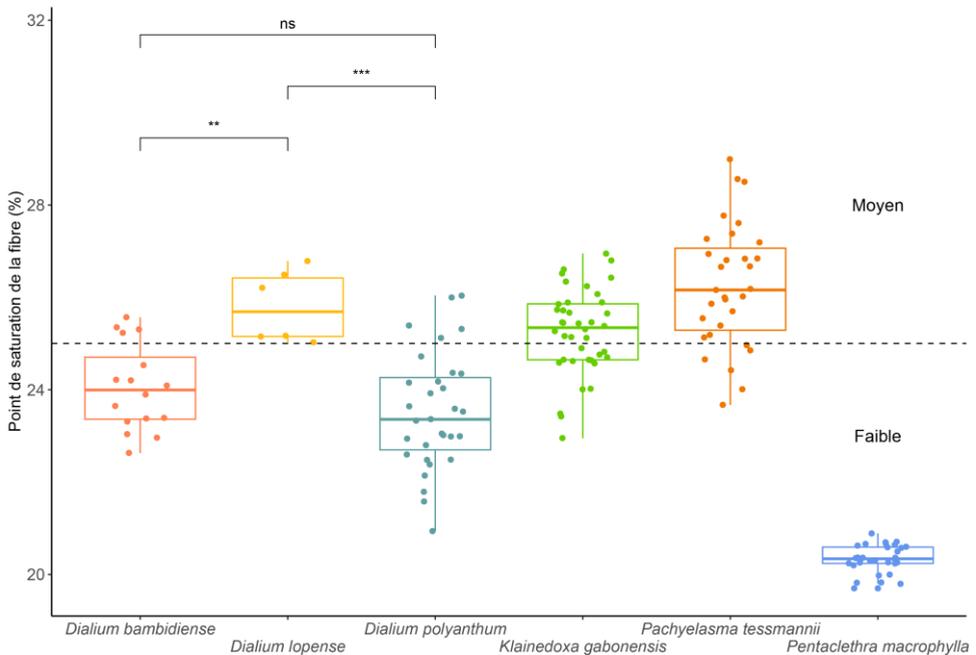


Figure 38 : Distribution de valeurs de point de Saturation de la fibre pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible » et « moyen » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité ** et *** correspondent respectivement à $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ et $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ au test Tukey HSD comparant les trois espèces de *Dialium*.

Retrait volumique total

Le retrait volumique varie significativement entre les espèces de *Dialium* ($\chi^2=10,3$; $p\text{-val}=0,006$). La médiane de retrait volumique total de *D. bambidiense* ($15,2 \pm 0,9\%$) est significativement supérieur ($z=-3,18$; $p\text{-val}=0,004$) à celle de *D. polyanthum* ($14,8 \pm 1,4\%$). La médiane de *D. lopense* ($14,9 \pm 0,7\%$) n'est significativement différente d'aucune des deux autres espèces. Les trois espèces sont très proches du seuil de 15%, limite entre le retrait moyen et le retrait fort. La plus haute valeur médiane est celle de *K. gabonensis* ($16,3 \pm 0,9\%$) qui peut être considéré comme ayant un fort retrait volumique. La plus faible valeur médiane est celle de *P. macrophylla* ($14,1 \pm 0,8\%$) qui peut être considérée comme moyenne (Figure 39). *P. tessmannii* présente la plus grande dispersion de ses données et une valeur médiane de $14,2 \pm 2,1\%$, considérée comme moyenne.

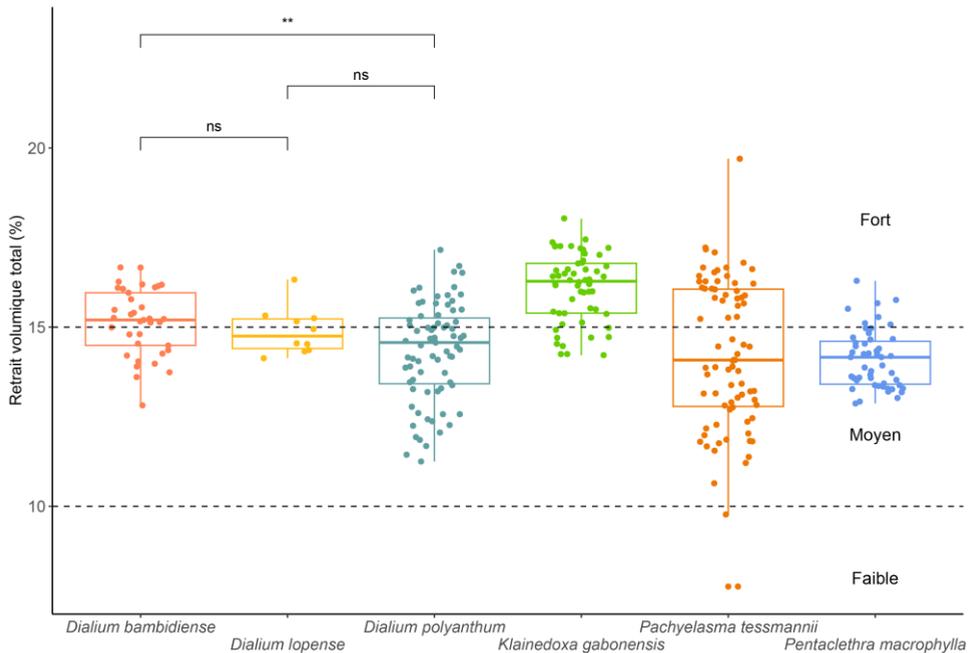


Figure 39 : Distributions de retrait volumique total pour les 6 espèces étudiées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Sallenave (1955). Le seuil de significativité ** correspond à $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Retrait tangentiel total

Il existe une différence significative ($F=9,4$; $p\text{-val}<0,001$) de retrait tangentiel total entre les différentes espèces de *Dialium*. *D. lopense* a une valeur moyenne ($10,3 \pm 0,4\%$) significativement supérieure aux deux autres espèces ($\text{diff}=0,66$; $p\text{-val}<0,001$ et $\text{diff}=0,37$; $p\text{-val}=0,04$ respectivement par rapport à *D. bambidiense* et *D. polyanthum*). Son retrait tangentiel peut être considéré comme fort. Le retrait tangentiel total moyen de *D. polyanthum* ($9,9 \pm 0,6\%$) et significativement supérieur ($\text{diff}=0,29$, $p\text{-val}=0,01$) à celui de *D. bambidiense* ($9,6 \pm 0,5\%$). Bien que la moyenne de *D. polyanthum* soit en dessous du seuil de retrait fort, sa médiane en est très proches (Figure 40), il est donc difficile de le classer. *D. bambidiense* présente une valeur moyenne de retrait moyenne. La plus grande valeur moyenne de retrait tangentiel est celle de *K. gabonensis* ($10,4 \pm 0,7\%$), classe comme retrait fort. La plus faible valeur moyenne est celle de *P. macrophylla* ($8,45 \pm 0,6$) dont toutes mesures sont classé dans la catégorie de retrait tangentiel moyen. *P. tessmannii* présente la plus grande dispersion de valeurs et une valeur moyenne de $9,53 \pm 1,2\%$ considéré comme retrait moyen.

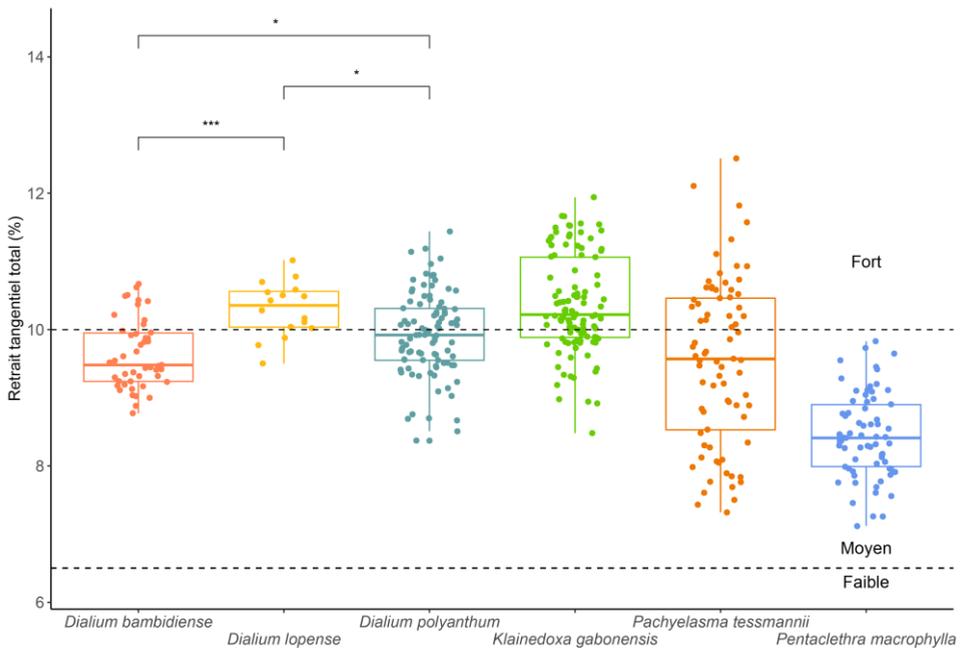


Figure 40 : Distribution du retrait tangentiel total pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et *** correspondent respectivement à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ et $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ au test Tukey HSD comparant les trois espèces de *Dialium*.

Retrait radial total

Il existe une différence significative ($\chi^2=24,8$; $p\text{-val}<0,001$) de retrait radial total entre les différentes espèces de *Dialium*. *Dialium lopense* présente médiane de retrait radial ($5,5 \pm 0,3\%$) significativement supérieure ($z=2,89$; $p\text{-val}=0,01$) à *D. bambidiense* ($5,0 \pm 0,8\%$) mais également significativement supérieur ($z=-4,74$; $p\text{-val}<0,001$) à *D. polyanthum* ($4,7 \pm 0,7\%$). Le retrait radial médian de *D. bambidiense* est significativement supérieur ($z=-2,49$; $p\text{-val}=0,03$) à *D. polyanthum* dont la dispersion des valeurs est la plus élevée et couvre les trois catégories de retrait (Figure 41). Le retrait radial médian des trois espèces reste néanmoins considéré comme moyen. *K. gabonensis* présente le retrait radial médian le plus élevé ($6,1 \pm 0,8\%$) toujours considéré comme moyen. Une certaine proportion des mesures présentent néanmoins des valeurs de retrait fortes.

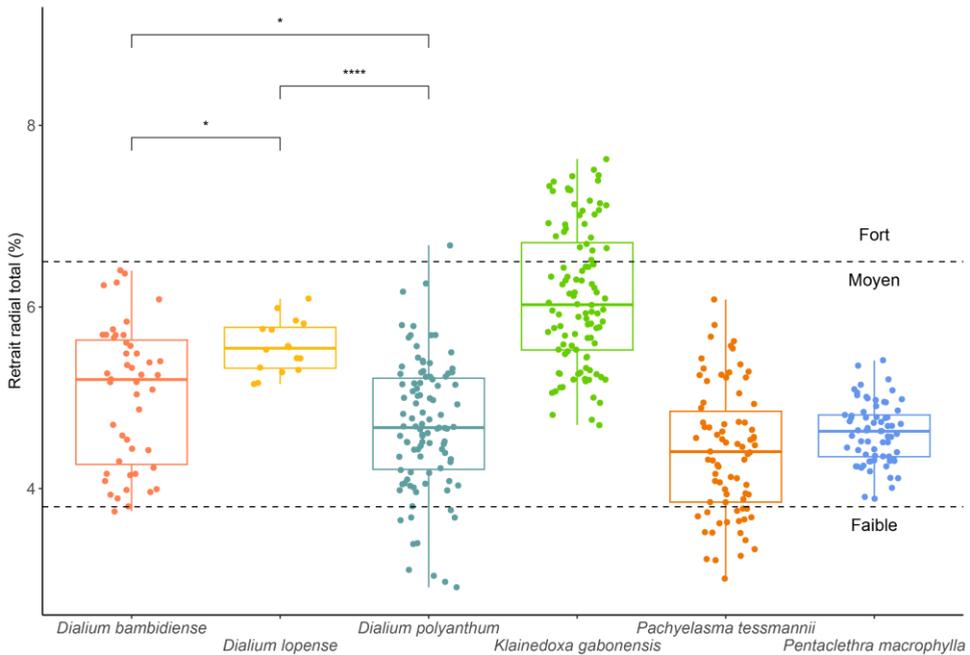


Figure 41 : Distribution du retrait radial total pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation « faible », « moyen » et « fort » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et *** correspondent respectivement à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ et $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Anisotropie

Il existe une différence significative d'anisotropie du retrait entre les trois espèces de *Dialium* ($\chi^2=12,1$; $p\text{-val}=0,002$). *D. polyanthum* présente une valeur médiane ($2,03 \pm 0,3$) significativement supérieure ($z=2,49$; $p\text{-val} = 0,038$) à celle de *D. bambidiense* ($1,95 \pm 0,27$) et également significativement supérieure ($z=2,91$; $p\text{-val}=0,011$) à *D. lopense* ($1,85 \pm 0,09$). *D. polyanthum* et *D. bambidiense* présentent néanmoins une grande dispersion de leurs valeurs et une médiane très proche du seuil (Figure 42), il est donc difficile de les différencier sur base de ce dernier. *D. lopense* semble néanmoins présenter un risque de déformation faible. *K. gabonensis* a la plus faible médiane d'anisotropie ($1,70 \pm 0,19$) présentant donc un risque de déformation faible. *P. tessmannii* présente la médiane la plus élevée ($2,22 \pm 0,26$) et un haut risque de déformation. *P. macrophylla* présente une médiane ($1,85 \pm 0,12$) équivalente à *D. lopense*, soit un risque de déformation assez faible, mais avec une plus grande dispersion de ses valeurs.

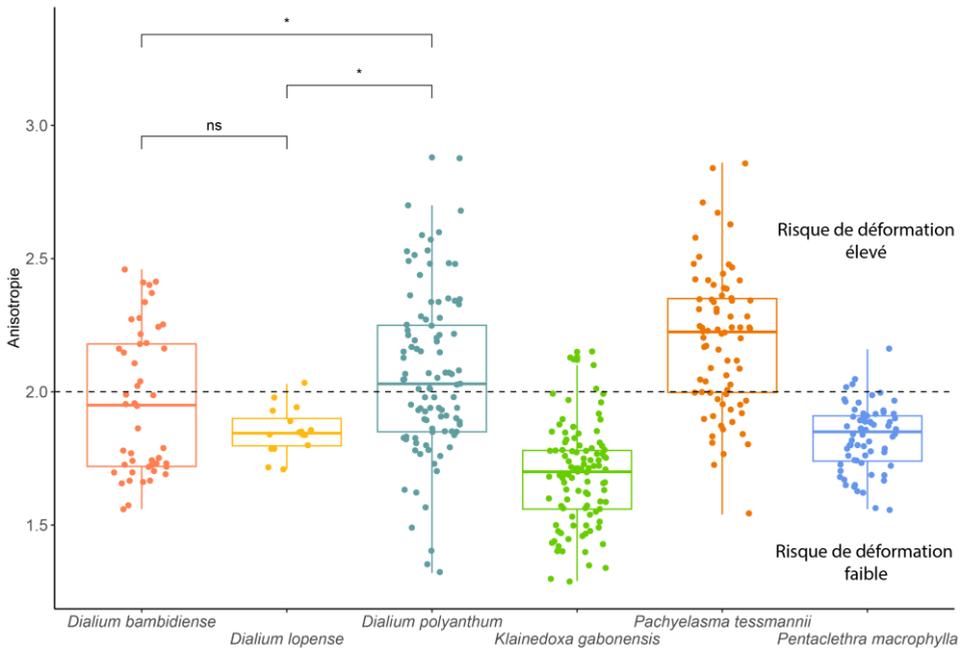


Figure 42 : Distribution de l'anisotropie du retrait pour les 6 espèces testées. La limite de caractérisation séparant « risque de déformation élevé » et « risque de déformation faible » provient de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité * correspond respectivement à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Coefficient de retrait volumique

Il existe une différence significative ($\chi^2=10,8$; $p\text{-val}=0,005$) entre les médianes de coefficient de retrait volumique des trois espèces de *Dialium*. *D. bambidiense* présente une valeur médiane du coefficient ($0,63 \pm 0,04$ %/%) significativement supérieure ($z=-3,22$; $p\text{-val} = 0,004$) à celle de *D. lopense* ($0,58 \pm 0,03$ %/%). *D. lopense* n'est cependant pas significativement différent de *D. polyanthum* ($0,62 \pm 0,06$ %/%). Les trois espèces présentent un fort coefficient de retrait volumique. *P. macrophylla* ($0,70 \pm 0,04$ %/%) et *K. gabonensis* ($0,64 \pm 0,04$ %/%) se également classé dans cette catégorie de retrait. Seul *P. tessmannii* est classifié dans la catégorie moyenne selon sa médiane ($0,54 \pm 0,08$ %/%). Sa dispersion de valeur est cependant élevé et prêt de la moitié de observations classé dans la catégorie supérieure (Figure 43).

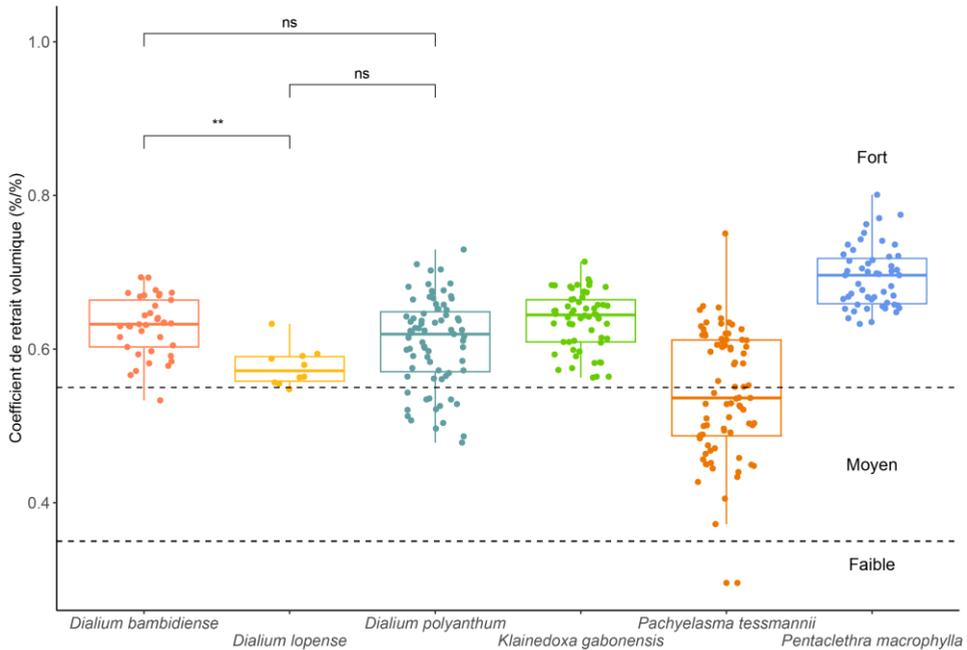


Figure 43 : Distribution de du coefficient de retrait volumique pour les 6 espèces testées. La limite de caractérisation séparant « risque de déformation élevé » et « risque de déformation faible » provient de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité * correspond respectivement à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

4.3.3. Propriétés mécaniques

Module d'élasticité

Pour cette propriété toutes les valeurs ont pu être corrigées à 12% d'humidité d'équilibre du bois. Il existe une différence significative ($F=8,2$; $p\text{-val}<0,001$) de module d'élasticité entre les trois espèces de *Dialium*. *D. bambidiense* a une valeur moyenne de module d'élasticité (24.835 ± 2.881 MPa) significativement supérieure ($\text{diff}=3435$; $p\text{-val}=0,002$) à celle de *D. lopense* (21.400 ± 1.552 MPa). Elle est également significativement supérieure ($\text{diff}=1497$; $p\text{-val}=0,003$) à la moyenne de *D. polyanthum* (22.897 ± 2.866 MPa). *D. polyanthum* et *D. lopense* ne diffèrent significativement pas entre eux. Les trois espèces présentent un module d'élasticité élevé. *P. macrophylla* (24.147 ± 2.658 MPa) et *K. gabonensis* (22.155 ± 3.227 MPa) sont également classés dans cette catégorie (Figure 44). *P. tessmannii* présente un module d'élasticité moyen (16.781 ± 3.155 MPa) et *S. mannii* un module d'élasticité faible (10.225 ± 2.509 MPa).

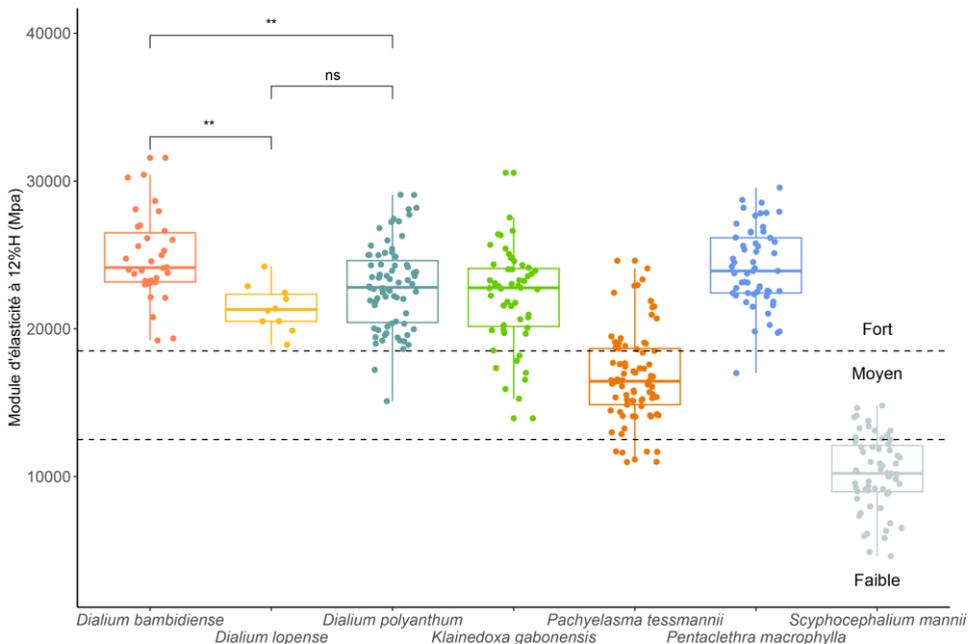


Figure 44 : Distribution du module d'élasticité pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Le seuil de significativité ** correspond à $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ au test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*.

Contrainte de rupture en flexion statique

Pour cette propriété les valeurs n'ont pas toujours pu être corrigées. Les valeurs de *P. macrophylla* ayant été en moyenne mesurées à 12%H, elles sous-estiment la valeur corrigée. L'inverse est également observable pour *S. mannii*, les autres espèces sont assez proches de 12%H. Il existe une différence significative ($F=5,3$; $p\text{-val} = 0,006$) entre les espèces de *Dialium*. Les valeurs moyennes de *D. bambidiense* (168 ± 20 MPa) et de *D. polyanthum* (173 ± 23 MPa) sont significativement supérieures ($\text{diff}=18$; $p\text{-val} = 0,05$ et $\text{diff}=23$; $p\text{-val}=0,005$ respectivement) à celle de *D. lopense* (150 ± 14 MPa). Les trois espèces présentent néanmoins toutes une forte contrainte de rupture en flexion statique. Bien qu'ayant toutes deux une proportion de leurs valeurs dans la catégorie moyenne, les moyennes de *K. gabonensis* (138 ± 28 MPa) et *P. macrophylla* (144 ± 26 MPa) sont catégorisées comme forte. *P. tessmannii* présente la valeur moyenne la plus faible (78 ± 22 MPa) au seuil de la catégorie moyenne, cependant la moitié des observations sont classées comme faibles. Bien que surestimée, la valeur moyenne de *S. mannii* peut être catégorisée comme moyenne avec cependant une partie des observations dans la catégorie faible (Figure 45).

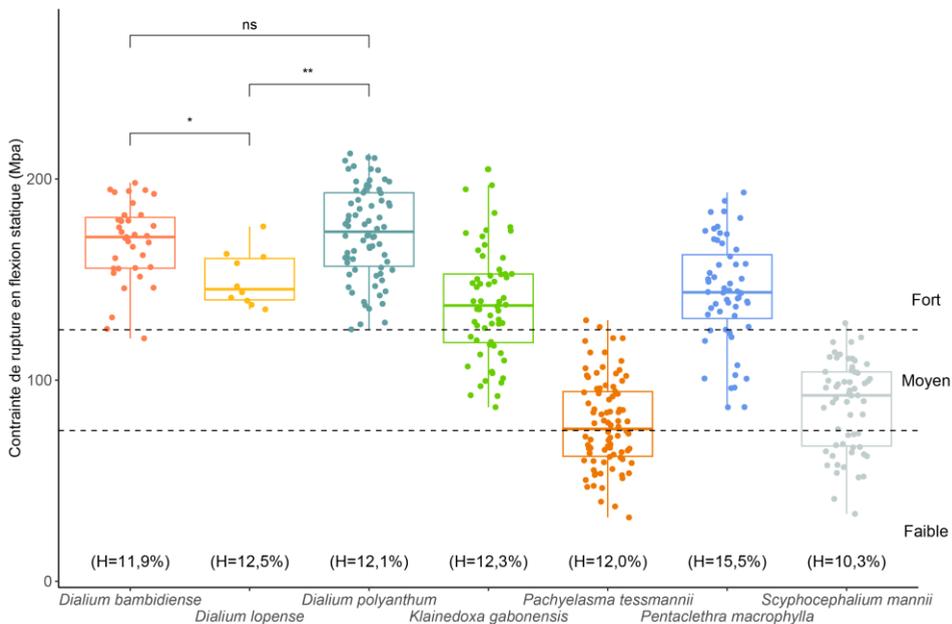


Figure 45 : Distribution de la contrainte de rupture pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité * et ** correspondent respectivement à $0,05 < p < 0,01$ et $0,01 < p\text{-val} < 0,001$ au test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*.

Travail de rupture en flexion dynamique

Pour cette propriété les valeurs d'humidité d'équilibre du bois n'ont pas pu être corrigées. Cependant elles restent toutes proches de 12%*H* (différences maximales observées = 1%) et donc plutôt comparables. Il n'existe pas de différence significative de moyenne du travail de rupture en flexion dynamique entre les espèces de *Dialium* ($F=0,2$; $p\text{-val}=0,8$). Bien qu'ayant toutes une large dispersion de leur données, *D. bambidiense* ($1,32 \pm 0,38 \text{ kg/cm}^2$), *D. lopense* ($1,26 \pm 0,24 \text{ kg/cm}^2$) et *D. polyanthum* ($1,27 \pm 0,39 \text{ kg/cm}^2$) sont classés dans la plus haute catégorie. *K. gabonensis* ($0,71 \pm 0,27 \text{ kg/cm}^2$) et *P. macrophylla* ($0,57 \pm 0,21 \text{ kg/cm}^2$) sont classés dans la catégorie moyenne alors que *S. mannii* ($0,30 \pm 0,11 \text{ kg/cm}^2$) et *P. tessmannii* ($0,19 \pm 0,09 \text{ kg/cm}^2$) sont catégorisés comme faibles (Figure 46).

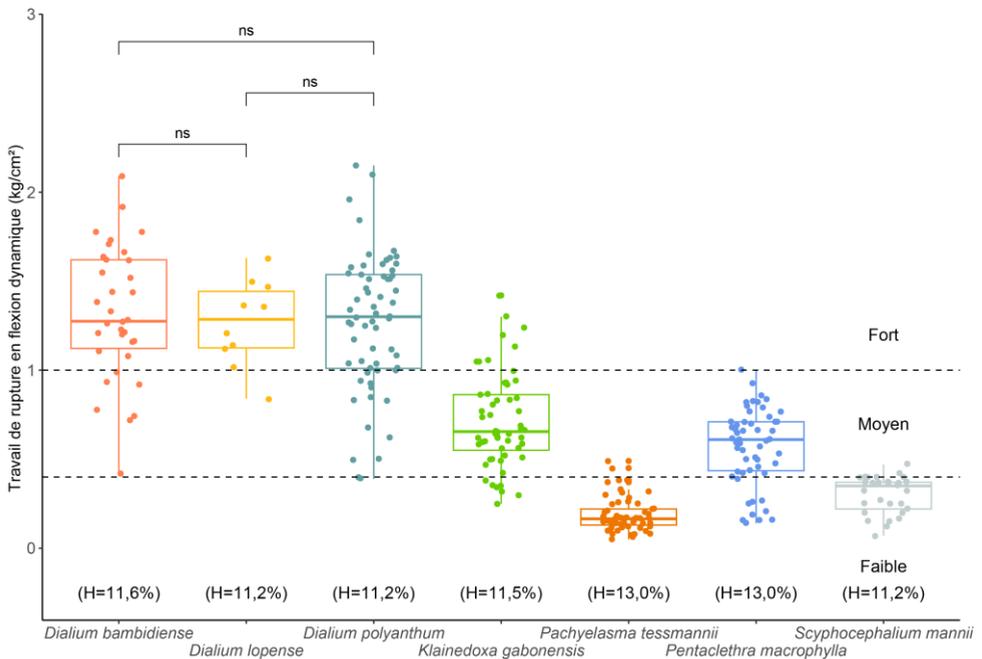


Figure 46 : Distribution du travail de rupture en flexion dynamique pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Sallenave (1955). Les mentions « ns » sont issues du test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*.

Contrainte de rupture en compression axiale

Pour cette propriété, toutes les valeurs ont pu être corrigées à 12% d'humidité d'équilibre du bois et sont donc comparables. Il n'existe pas de différence significative entre les moyennes de contrainte de rupture en compression axiale des espèces de *Dialium* ($F=2,2$; $p\text{-val}=0,12$). *D. bambidiense* (81 ± 5 MPa), *D. lopense* (80 ± 5 MPa), *D. polyanthum* (83 ± 5 MPa), *K. gabonensis* (83 ± 9 MPa) et *P. macrophylla* (90 ± 7 MPa) sont toutes catégorisées comme ayant une forte résistance. *P. tessmannii* présente une valeur moyenne de 57 ± 7 MPa, le classant comme moyennement résistant à la compression axiale (Figure 47).

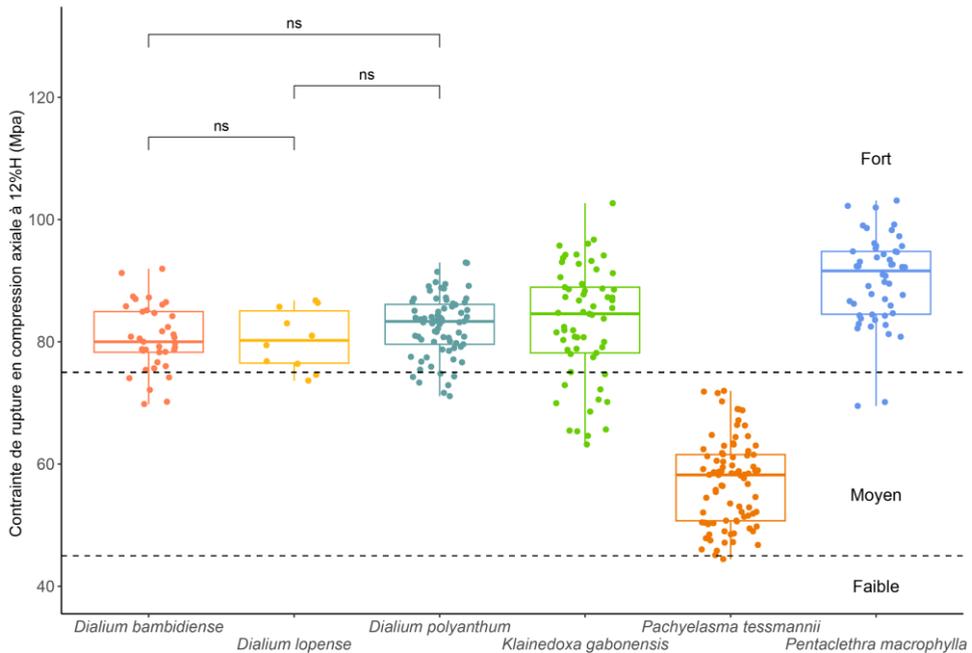


Figure 47 : Distribution de la contrainte de rupture en compression axiale pour les 6 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « fort », « moyen » et « faible » proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les mentions « ns » sont issues du test HSD Tukey comparant les trois espèces de *Dialium*.

Dureté de Monnin

Les valeurs de la dureté de Monnin n'ont pas pu être corrigées à 12% d'humidité d'équilibre du bois. Cependant, seul *P. macrophylla* et *P. tessmannii* présentent des valeurs d'humidité moyenne (14,6%H) éloignée de l'humidité de référence. Les valeurs obtenues pour ces essences sous-estiment donc la valeur corrigée. Il existe une différence significative de dureté entre les espèces de *Dialium* ($\chi^2=34,5$; p-val<0,00). *D. polyanthum* présente la plus haute valeur médiane ($9,2 \pm 1,1$), significativement différente ($z=4,0$; p-val<0,001) de *D. bambidiense* ($7,9 \pm 1,5$) et également ($z=5,0$; p-val < 0,001) de *D. lopense* ($6,3 \pm 0,8$). *D. bambidiense* est également significativement plus dur ($z=-2,53$, p-val=0,03) que *D. lopense*. *D. polyanthum* est catégorisé comme très dur, cependant prêt de la moitié des échantillons présente des valeurs dans la catégorie inférieur. Les deux autres espèces de *Dialium* sont catégorisées comme durs. *K. gabonensis* présente la plus haute médiane de dureté ($10,8 \pm 1,8$). *P. macrophylla* présente une valeur médiane équivalente ($9,2 \pm 1,5$) à celle de *D. polyanthum* et une dispersion de ses valeurs assez semblable (Figure 48). Elle est catégorisée comme très dur. *P. tessmannii* et *S. mannii* sont quant à eux respectivement catégorisés comme mi-dur ($4,2 \pm 0,8$) et tendre ($2,3 \pm 0,6$).

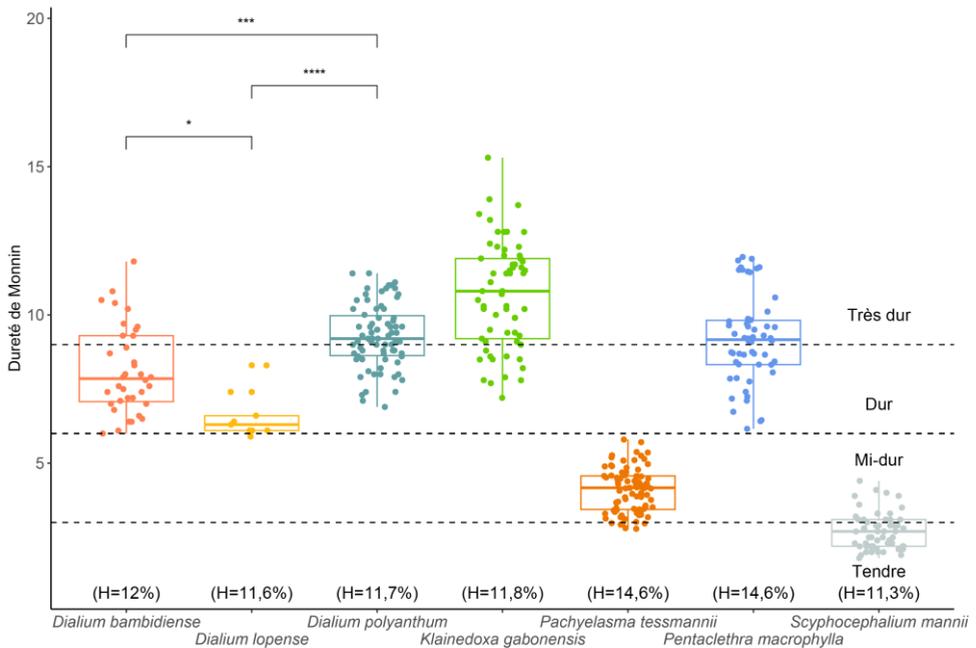


Figure 48 : Distribution de la dureté de Monnin les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories « très dur », « dur », « mi-dur » et tendre proviennent de Gérard, Guibal, Paradis, & Cerre (2017). Les seuils de significativité *, *** et **** correspondent respectivement à $0,05 < p < 0,01$ et $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

4.3.4. Durabilité naturelle

Trametes versicolor

Il existe une différence significative de durabilité naturelle entre les espèces de *Dialium* ($\chi^2=67,6$; $p\text{-val}<0,001$). La perte médiane de masse de *D. bambidiense* ($11,2 \pm 7,1$ %) est significativement supérieure ($z=-8,2$, $p\text{-val}<0,001$) à celle de *D. polyanthum* ($4,8 \pm 3,1\%$) et significativement supérieure ($z=-2,78$, $p\text{-val}=0,016$) à celle de *D. lopense* ($4,8 \pm 3,4\%$). *D. bambidiense* présente la plus grande perte de masse médiane (classé comme moyennement durable) mais également la plus grande dispersion de ses valeurs pouvant être catégorisées de très durable à peu durable. *D. lopense* et *D. polyanthum* ne sont pas significativement différentes entre elles et sont classées comme très durable (Figure 49). Elles ont cependant quelques valeurs catégorisées comme moyennement durables. *K. gabonensis* ($4,4 \pm 4,1\%$) est également classé comme très durable avec quelques valeurs classées moyennement durable. *P. tessmannii* est classé comme durable ($8,7 \pm 5,3\%$) et *P. macrophylla* est classé comme très durable ($0,5 \pm 0,7\%$) avec la totalité de ses valeurs dans cette catégorie.

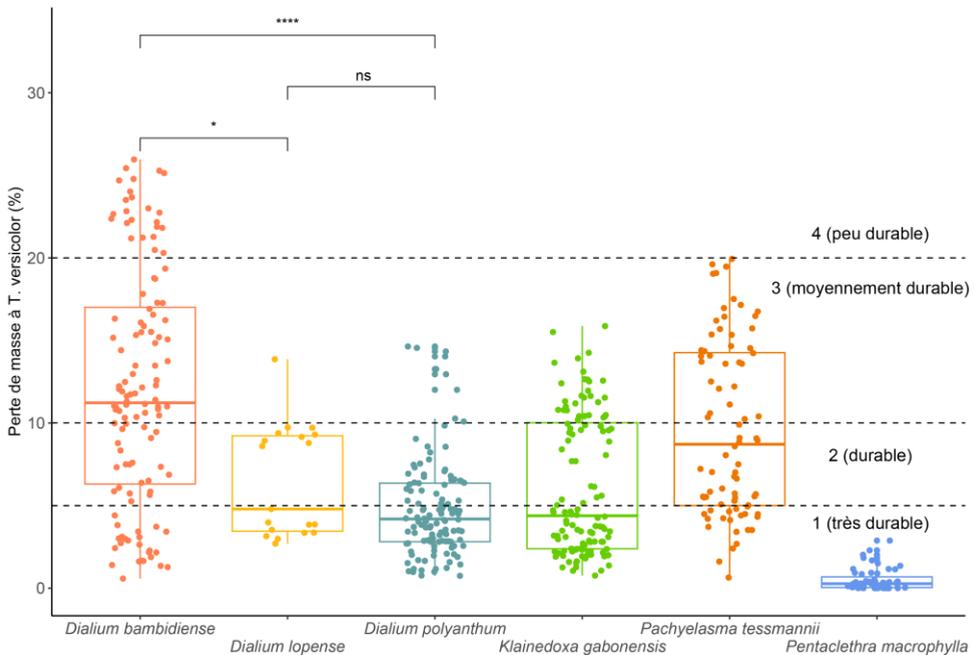


Figure 49: Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *T. versicolor* pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les classes de durabilité 1 (très durable), 2 (durable), 3 (moyennement durable) et 4 (peu durable) proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité * et **** correspondent à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Coniophora puteana

Il existe une différence significative de résistance contre *C. puteana* entre les espèces de *Dialium* ($\chi^2=26,3$; $p\text{-val}<0,001$). La perte médiane de masse de *D. bambidiense* ($0 \pm 3,33$ %) est significativement supérieure ($z=-4,19$, $p\text{-val}<0,001$) à celle de *D. polyanthum* ($0 \pm 0,14\%$) et significativement supérieure ($z=-4,11$, $p\text{-val}<0,001$) à celle de *D. lopense* ($0 \pm 0\%$). *D. bambidiense* présente la plus grande dispersion de valeur avec quelques éprouvettes classées comme « Durable » et « Moyennement durable ». Toutes les espèces de *Dialium* restent néanmoins classées comme « Très durable » vis-à-vis de ce champignon (Figure 50). *P. tessmannii* présente également une certaine dispersion de ses données (4 éprouvettes classée « Durable ») mais reste classé « Très durable » ($0,71 \pm 1,28$ %), au même titre que *K. gabonensis* ($0,52 \pm 0,43$ %) et *P. macrophylla* ($0 \pm 0\%$).

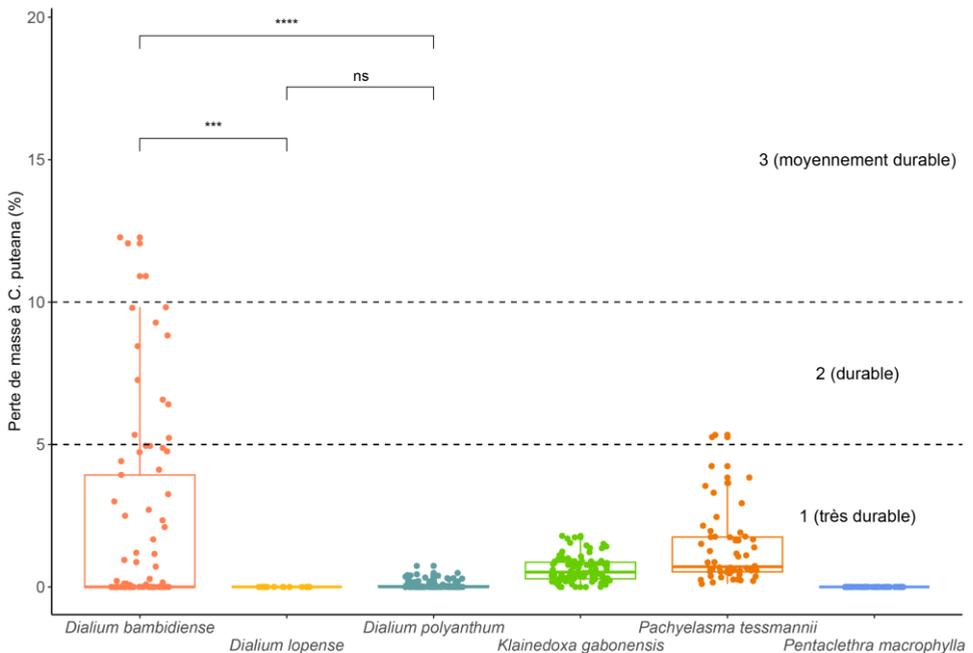


Figure 50: Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *C. puteana* pour les 7 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les catégories les classes de durabilité 1 (très durable), 2 (durable) et 3 (moyennement durable) proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité *** et **** correspondent à $0,001 < p\text{-val} < 0,0001$ et $p\text{-val} < 0,0001$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

Stereum hirsutum

Les *Dialium* présentent une différence significative de durabilité naturelle vis-à-vis de *S. hirsutum* ($\chi^2=10,9$; p-val=0,004). La perte médiane de masse de *D. bambidiense* ($1,44 \pm 1,58\%$) est significativement supérieure ($z=-2,44$; p-val=0,044) à celle de *D. polyanthum* ($1,26 \pm 0,85\%$) et significativement supérieure ($z=-2,88$; p-val<0,012) à celle de *D. lopense* ($0,86 \pm 0,45\%$). *K. gabonensis* ($3,18 \pm 2,26\%$), montre une forte variation de ses valeurs mais reste classé « Très durable » (Figure 51)

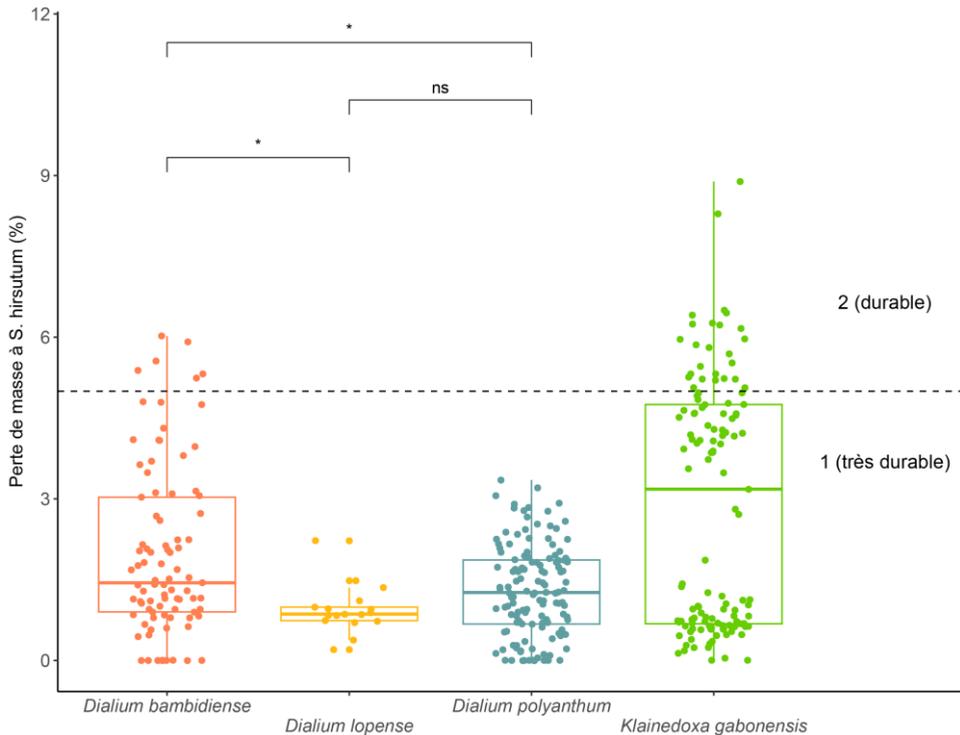


Figure 51: Distribution perte de masse des éprouvettes suite à 16 semaines d'exposition à *S. hirsutum* pour les 4 espèces testées. Les limites de caractérisation séparant les classes de durabilité 1 (très durable) et 2 (durable) proviennent de (CEN 2004). Les seuils de significativité * correspondent à $0,05 < p\text{-val} < 0,01$ au test de Dunn comparant les trois espèces de *Dialium*.

4.3.5. Hierarchical Clustering on Principal Component (HCPC)

Le pourcentage cumulé de la variance expliquée par les axes atteint 93.51% avec les quatre premières composantes (Figure 52). La qualité de la représentation des variables sur une Composante Principale (CP) est exprimée par le cosinus carré calculé entre la variable et sa projection sur la CP dans l'espace multi-vectorel créé par l'ACP. La première composante est fortement corrélée avec les ρ_{12} , E, N, σ_c , σ_f , %V et moyennement corrélée avec β_{linR} et la durabilité naturelle (d). La seconde est corrélée avec les paramètres de stabilité (PSF, β_{linR} et β_{linT}). AN est fortement corrélé et β_{linR} modérément corrélé au troisième. Enfin, d est modérément corrélé à la quatrième composante. Compte tenu de la variance cumulée élevée expliquée par ces quatre composantes et de la faible qualité de représentation des variables sur les PC de la cinquième composante (cosinus carré minimal < 0,1), seules les quatre premières composantes ont été conservées pour le regroupement hiérarchique.

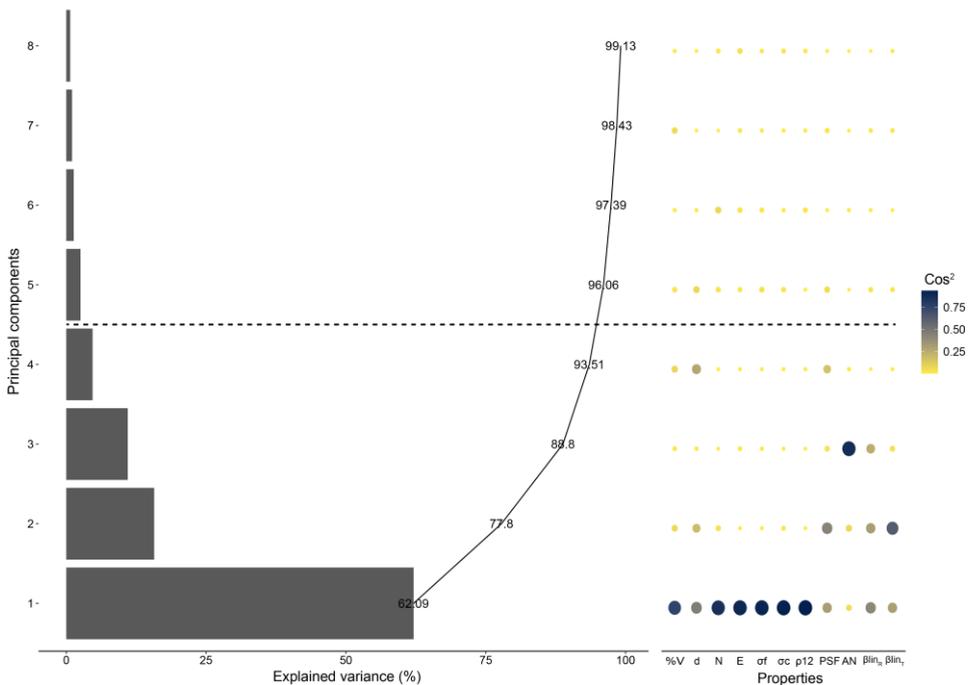


Figure 52 : À gauche, diagramme en bâtonnet du pourcentage de la variance totale expliquée par chaque composante et courbe de la variance total cumulée, à droite, le diagramme à points présente la qualité de la représentation des variables par les CPs, exprimée en cosinus carré. La ligne pointillée correspond au nombre limite de composantes sélectionnées pour le regroupement hiérarchique.

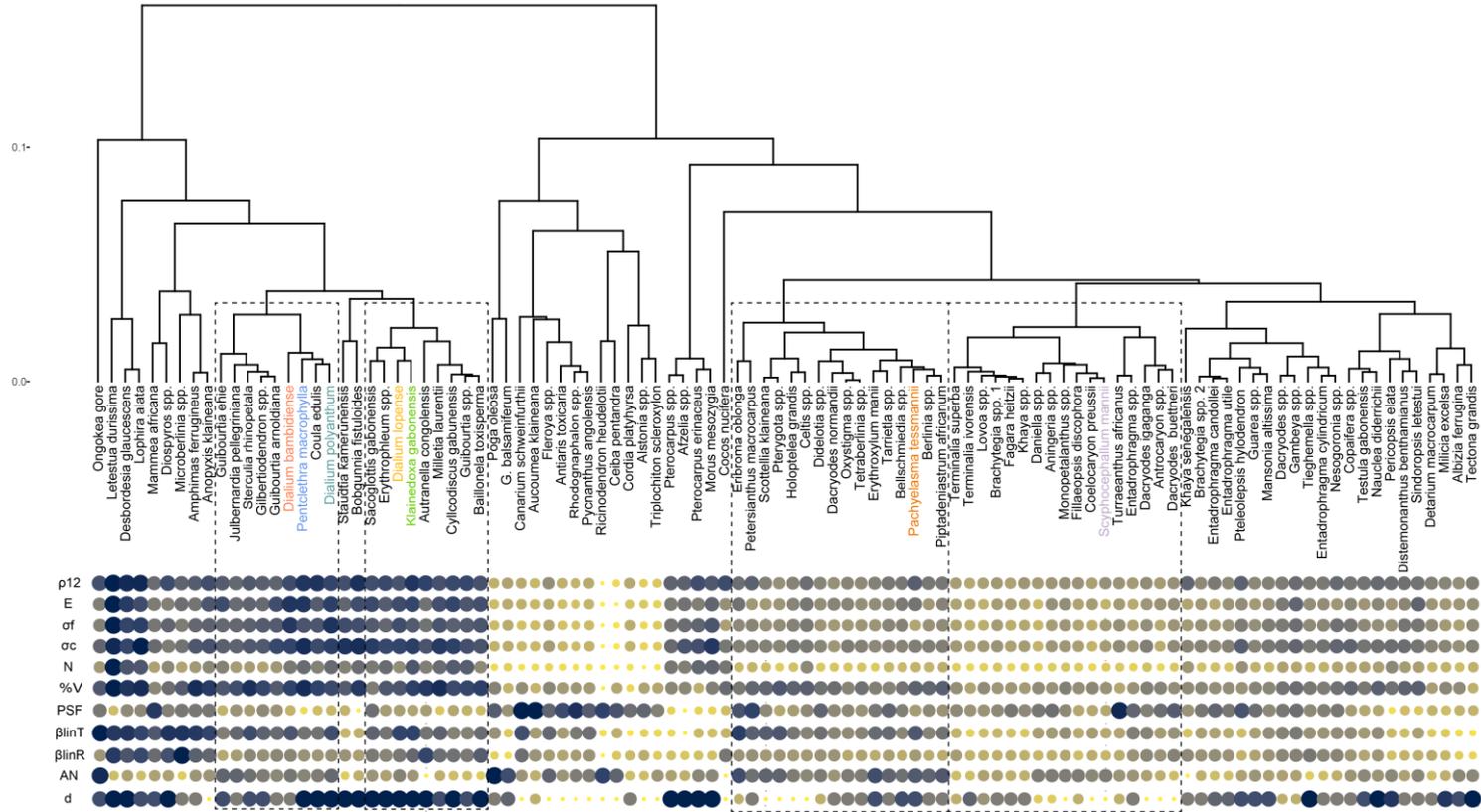


Figure 53 : En haut, classification hiérarchique utilisant la méthode d'agrégation "UPGMA" sur la distance "euclidienne" basée sur les 4 première CP de l'ACP (représentant 93.51% de la variance). En bas, diagramme à points présentant toutes les propriétés physiques et mécaniques standardisées correspondant à chaque espèce. Pour chaque propriété, les plus petits points jaunes correspondent aux valeurs les plus faibles observées dans la base de données et les plus gros points bleus à la valeur la plus élevée. Les groupements en ligne pointillées présentent les espèces le plus proches des espèces étudiées au même degré de dissimilarité.

4.4. Discussion

4.4.1. Séchage et stabilité

La plupart des espèces étudiées présentent de hautes valeurs de masse volumique et d'infradensité. En région tempérée, de nombreux auteurs ont mis en évidence une corrélation négative entre la densité du bois et sa stabilité dimensionnelle (Kollmann and Coté 1968; Mantanis et al. 1994; Kord et al. 2010). Cependant, la complexité des structures anatomiques ainsi que les taux plus élevés de métabolites secondaires de certains arbres tropicaux viennent nuancer cette conclusion (Toong et al. 2014; Bossu et al. 2016; de Almeida et al. 2017). C'est observable à la Figure 53 où ρ_{12} est majoritairement corrélé avec les propriétés mécaniques sur la première CP et les paramètres de stabilité se partagent les 3 autres CP. Il est dès lors nécessaire d'étudier chaque propriété physique avec attention.

Le PSF indique l'humidité d'équilibre du bois (H) à partir de laquelle l'eau liée aux parois cellulaires commence à se retirer lors du séchage, se traduisant par le début du retrait du bois (Derbal et al. 2015). Plus sa valeur est élevée, plus l'espèce exprimera de retrait avant d'atteindre les conditions de mise en œuvre. *P. macrophylla* présente une valeur très faible de PSF et, à retrait volumique total équivalent, ne perdra que peu de volume lors de son séchage par rapport aux autres espèces. Pour une utilisation aux hautes teneurs d'humidité (contact avec l'eau, extérieur) son retrait sera limité et potentiellement évité. *D. bambidiense* et *D. polyanthum* présente également une valeur faible de PSF alors que *D. lopense* une valeur moyenne. Cette différence contribue en partie à éloigner *D. lopense* des deux autres espèces dans l'HCPC (Figure 53). A humidité de mise en œuvre équivalente, *P. tessmannii* est l'espèce qui exprimera le plus de retrait avant sa mise en œuvre.

Le retrait volumique total encore appelé mouvement du bois est un indicateur du volume perdu lors du séchage. Il renseigne également sur la nécessité de débiter les grumes avant séchage (Sallenave 1955). Selon cet auteur les retraits volumiques totaux supérieurs à 15% provoquent de grandes fentes de dessiccation sur les grumes et nécessitent un débit avant séchage. Un débit préalable est donc recommandé pour *K. gabonensis* et *D. bambidiense*. Bien que leur médianes soient inférieures à ce seuil, la dispersion des valeurs de *D. polyanthum*, *D. lopense* et *P. tessmannii* est élevée et de nombreuses mesures dépassent 15%. Il sera donc préférable de les débiter également avant séchage. *P. macrophylla* présenterait quant à lui des risques plus faibles d'apparition de fentes sur les grumes et pourrait être conservé en bois rond ou produire des sciages à cœur inclus.

Le retrait volumique total peut également être décomposé en trois retraits linéaires encore appelé travail du bois : tangentiel, radial et longitudinal, ce dernier étant généralement très faible et difficile à mesurer (Gérard et al. 2017). Cependant l'étude isolée de chaque retrait n'apporte que peu d'information en comparaison de l'anisotropie, soit le rapport entre les retraits tangentiel et radial. Plus cette valeur est élevée, plus les variations d'humidité risquent d'induire des déformations sur les

pièces de bois débitées (Figure 54). Cette valeur permet notamment d'évaluer le comportement des débits au séchage (Skaar 1988; Spear and Walker 2006; Hai et al. 2009). Au-delà d'une valeur de 2 les risques de déformations sont importants a contrario, plus cette valeur tend vers 1 moins les débits auront tendance à se déformer (Sallenave 1955; Gérard et al. 2017). Dès lors *P. tessmannii*, avec une valeur médiane de 2,22 présente un risque élevé de déformation au séchage. De plus, cette espèce présente systématiquement un contrefil accusé et du fil ondé (Figure 33) augmentant ainsi le risque de gauchissement (Figure 54) des pièces de bois (Dalois 1993), rendant généralement ces dernières inutilisables (Fays 2008). *D. polyanthum* a une valeur médiane d'anisotropie de 2,03 et une dispersion élevée il est donc difficile de conclure quant aux risques de déformation qui varie de faible à très élevé. N'ayant pas de déviation du fil semblable à *P. tessmannii* il sera néanmoins moins enclin aux déformations délassantes. Bien que n'étant pas significativement différente de *D. lopense*, la valeur médiane de *D. bambidiense* reste proche de 2 (1,95 précisément) et la dispersion de ses valeurs est forte, au même titre que *D. polyanthum*. *D. lopense* et *P. macrophylla* présentent des valeurs inférieures (1,85) aux trois premières espèces et *K. gabonensis* possède l'anisotropie médiane la plus faible (1,7), il devrait donc être le moins soumis aux déformations. Il est donc vivement recommandé de favoriser le sciage sur quartier de *P. tessmannii* et dans une moindre mesure de *D. polyanthum* et *D. bambidiense*. Ce type de sciage réduit le ratio des dimensions tangentiel et radial et limite le risque de déformation des planches (Dalois 1990), notamment du tuilage (Figure 54).

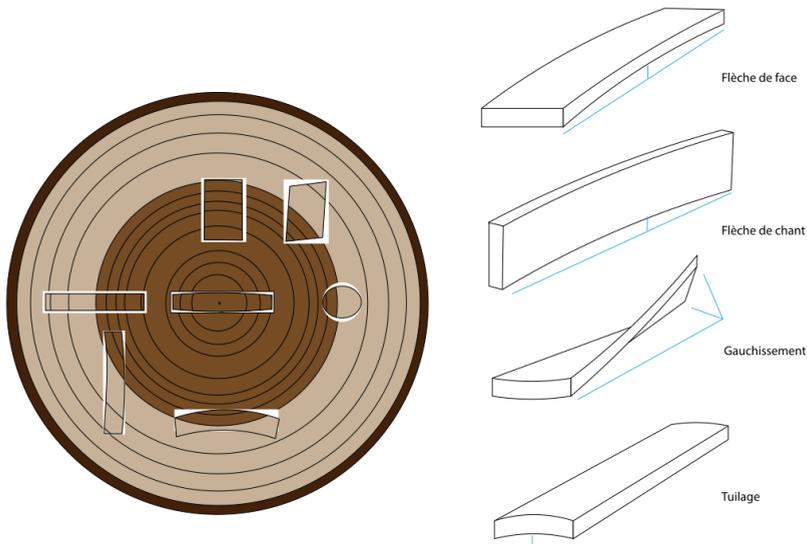


Figure 54 : Déformations observables sur la face transversale des débits en fonction de leur position dans la bille et défauts observables sur les sciages.

Après séchage, la stabilité du bois mis en œuvre peut, en partie, être estimée à l'aide du coefficient de rétractabilité (%V). Cette valeur exprime la variation de volume induite dans le bois lors d'un changement de 1% de l'humidité, soit la nervosité du bois selon Sallenave (1955). Selon sa classification, toutes les espèces à l'exception de *P. tessmannii*, possèdent un bois nerveux. Plus particulièrement *P. macrophylla* dont de nombreuses valeurs dépassent 0,75%/%. Au-delà de ce seuil il est conseillé d'utiliser le bois dans des milieux à humidité constante. Seul *P. tessmannii* pourrait être classé comme moyennement nerveux avec une médiane en dessous de 55%/%, cependant près de 50% des observations présentent des valeurs supérieures. Selon ce critère et la classification de Sallenave, cette espèce serait donc plus adaptée pour le bois de service et de construction.

Il faut également noter que les caractéristiques physiques d'échantillons de bois parfait ne peuvent, à elle seules, expliquer le comportement au séchage et la stabilité dimensionnelle. Lors du séchage, l'hétérogénéité de l'humidité au sein de la pièce de bois peut également induire des déformations. Il est dès lors conseillé de sécher les pièces lentement, ou à l'aide d'un programme adapté, pour éviter que les faces sèchent plus vite que le cœur des pièces (CIIB asbl 1995). Concernant la stabilité une fois mis en œuvre, de nombreux facteurs, difficilement mesurables, entrent en compte : les contraintes internes de croissance, la présence de bois de réaction, la rapidité avec laquelle le bois sèche ou reprend de l'humidité ainsi que la pente du fil sur les pièces débitées (CIIB asbl 1995). La présence de bois de réaction ou de contrainte de croissance importante dans les arbres de *K. gabonensis*, pourrait expliquer les nombreuses déformations observées après son séchage, malgré son anisotropie plus faibles que les autres espèces.

4.4.2. Résistances mécaniques

La masse volumique étant fortement corrélée avec les propriétés mécaniques (Figure 52), les espèces étudiées présentent globalement de bonnes résistances à l'exception de *S. mannii* avec sa densité moyenne à 12%H de 590 kg/m³ (Gérard et al. 2011) et de *P. tessmannii*. Les trois espèces de *Dialium* sont toujours classées dans les meilleures catégories de résistances à l'exception de la dureté de Monnin pour laquelle *D. bambidiense* et *D. lopense* se retrouvent dans la 2^{ème} catégorie la plus haute. Plus particulièrement la résistance à la flexion dynamique, soit la résistance aux chocs, de ces essences est très élevée. En divisant leurs résistances moyennes aux chocs par leurs masses volumiques prises au carré, il est possible de calculer leurs côtes de résistance au choc (Sallenave 1955). Elles sont toutes supérieures à 1,45 (respectivement 1,64, 1,73 et 1,47 pour *D. bambidiense*, *D. lopense* et *D. polyanthum*), leurs bois sont donc particulièrement adaptés aux utilisations soumises à des chocs violent (manches d'outils, défense d'accostage, traverse de chemin de fer par exemple). *K. gabonensis* et *P. macrophylla* sont classés de façon équivalente dans les différentes catégories de résistances, soit dans toutes les catégories supérieures à l'exception de la résistance aux chocs où ils sont classés dans la catégorie intermédiaire. Ces 5 espèces se retrouvent toutes dans la

première division de la classification hiérarchiques représentée par des bois avec de hautes propriétés mécaniques, masse volumiques et de haut coefficient de retrait volumique, soit les propriétés corrélée à la première CP. Ces caractéristiques rendent ces espèces d'une part aptes aux travaux lourds fortement sollicités (traverses, bois de calage, planchers industriels,...) mais, d'autre part limite leur utilisations dans les mises en œuvre où le poids de l'ouvrage est important (Fenêtres portes extérieurs, mobilier déplaçable, bardage,...). Malgré sa masse volumique assez haute, *P. tessmannii* montre des propriétés mécaniques moyennes (E , σ_T , σ_C , N) à faible (K). Son rapport résistance/masse étant médiocre son utilisation en structure est à éviter (Martin and Vernay 2016). Ce faible rapport résistance/masse peut être attribué à l'ondulation tangentielle du bois observée sur les 4 arbres testés (Tsehaye and Walker 1995; Brémaud et al. 2011b). En effet, la déviation du fil observée sur les échantillons, comprise entre 15° et 20°, pourrait diminuer de 20 à 35% le module de rupture en flexion statique et de 10 à 20 % celui en compression axiale (Kollmann and Coté 1968). La résistance aux chocs est particulièrement affectée par cette particularité. Pour les emplois pouvant subir cette sollicitation, il est d'ailleurs recommandé d'utiliser bois dont l'angle du fil est inférieur à 2° (Harris 1989).

Bien qu'ayant une masse volumique moyenne plus faible, *S. mannii* présente de meilleures résistances en flexion (dynamique ou statique) que *P. tessmannii* et serait donc plus apte à la structure. Ses résistances restent néanmoins moyennes à faibles, les utilisations telles que la charpente ou les éléments de construction sont à éviter. Il serait préférable de l'utiliser pour la fabrication de panneaux en mélange avec d'autres espèces ou de la menuiserie intérieure.

4.4.3. Durabilité naturelle et classe d'emplois

La différence de durabilité observée entre *D. bambidiense* et les deux autres espèces de *Dialium* pour les trois souches de champignons pourrait expliquer la différence de durabilité mentionnée dans la fiche Tropix des Eyoum (Gérard et al. 2011). Cette variabilité viendrait alors d'une confusion des espèces lors des tests. Bien qu'ayant été pressentie comme plus durable au **Chapitre 3** car possédant de plus hautes teneurs en tanins et polyphénols, il s'avère que *D. bambidiense* n'est que moyennement durable aux attaques de champignons basidiomycète. La durabilité naturelle de ces espèces pourrait être expliquée par la présence d'autres molécules qui n'ont pas été quantifiées tels que les alcaloïdes ou les terpènes (Chen et al. 2017; Anouhe et al. 2018). En se référant aux normes NF EN 460 :1994 (AFNOR 1994) et NF EN 335-1 (AFNOR 2007), les classes d'emplois, la durabilité naturelle requise pour éviter l'utilisation de produits de préservation contre les attaques de champignons basidiomycètes sont repris dans le Tableau 11.

Tableau 12: Définition des classes d'emplois selon la norme NF EN 335 et correspondance avec les classes de durabilité minimale au champignon basidiomycètes requise pour éviter l'utilisation de traitement de préservation selon la norme NF EN 460. La mention * renseigne que le risques d'attaque du ravageur est dépendant de l'aire de distribution de ce dernier.

Classe d'emplois	Classe durabilité requise	Situation en service	Emplois	Risques d'attaques
1	5-4	Bois à l'intérieur, toujours sec ($H < 20\%$) et non exposés aux intempéries.	Mobilier, Parquet	Insectes xylophages Termites*
2	3	Bois sec, soumis à une humidification occasionnelle, non permanente	Charpente, ossature	Insectes xylophages Termites* Champignons
3.1	3	Bois soumis à une humidification fréquente avec séchage rapide	Bardage faiblement exposé ou ouvrage avec une conception drainante	Insectes xylophages Termites* Champignons
3.2	2	Bois soumis à une humidification fréquente avec humidification prolongée	Bardage fortement exposé ou ouvrage avec des pièges à eau	Insectes xylophages Termites* Champignons
4	2	Humidité toujours $> 20\%$, contact direct avec le sol ou l'eau	Terrasses, menuiserie extérieure	Insectes xylophages Termites* Champignons
5	1	Contact permanent de l'eau salée ou immersion régulière	Ponton, jetée	Insectes xylophages Termites* Champignons Térébrants marins

En prenant en compte les résultats du champignon le plus virulent (*T. versicolor* pour toutes les espèces), la durabilité naturelle face aux champignons de *D. polyanthum* et *D. lopense* est théoriquement suffisante pour couvrir les 5 classes d'emplois. *D. bambidiense* n'atteindrait que la classe 3.1, soit les emplois extérieurs faiblement exposés avec une conception drainante. En plus de sa perte de masse plus élevée face aux champignons basidiomycètes, cette espèce montre une variabilité plus importante que les autres. La variabilité intraspécifique de la durabilité naturelle est souvent expliquée par les individus, mais également par la position radiale (Stringer and Olson 1987; Nadine et al. 2008; Yannick et al. 2008; Lehnebach 2015). La distribution de la perte de masse face à *T. versicolor* a donc été différenciée en fonction de l'arbre testé et de la position radiale des échantillons

(Figure 55). En effet, ces deux variables semblent expliquer une partie de la durabilité naturelle de *D. bambidiense*. Les échantillons prélevés proche du cœur de l'arbre sont moins durables que les échantillons prélevés proche de l'aubier. Cette différence pourrait être expliquée par la présence d'une large proportion de bois juvénile dans cette espèce. Le bois juvénile est le bois formé durant les premières années de vie de l'arbre, il est généralement caractérisé par une structure anatomique différente et une durabilité inférieure au bois mature (Zobel and Sprague 1998; Bhat et al. 2001; Latorraca et al. 2011). S'il est possible d'éviter les bois de cœur, la variabilité individuelle au sein de *D. bambidiense* reste très forte et cette espèce reste en classe d'emplois 3.1. Il est donc impératif de clairement différencier les *Dialium* lors de l'exploitation pour éviter des problèmes de durabilité des ouvrages extérieurs.

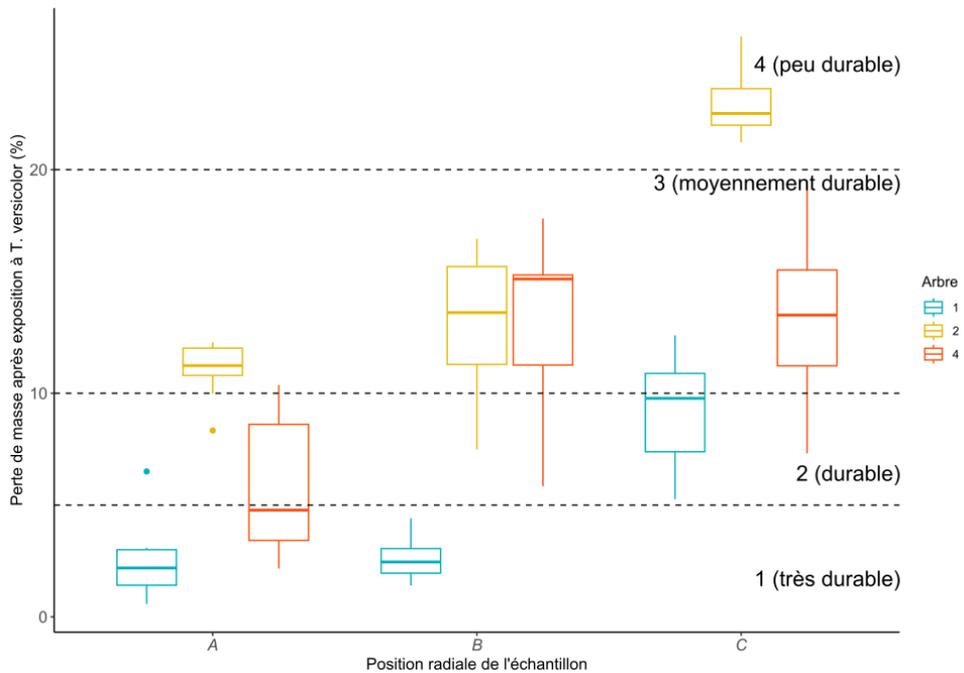


Figure 55 : Distribution de la perte de masse d'échantillons de *D. bambidiense* en fonction de la position radiale et de l'arbre après 16 semaines d'exposition à *T. versicolor*. Les échantillons ont radialement été échantillonnés proches de l'aubier (A), au centre du duramen (B) et proche du cœur (C).

Concernant *K. gabonensis*, bien que sa médiane soit systématiquement classée en dessous de 5% de perte de masse, la distribution des données semble former deux sous-groupes distincts. Le bois de *K. gabonensis* est caractérisé par la présence de bois de transition. Ce type bois correspond à des couches intérieures à l'aubier dont la couleur et les propriétés générales sont à l'intermédiaire entre celles de l'aubier

et du duramen (IAWA 1964). En reclassant les échantillons en fonctions de leur nature (bois de transition et duramen), les tests statistiques ne sont pas nécessaires pour constater l'origine de cette variabilité (Figure 56). Le bois de transition de *K. gabonensis* n'atteint que la classe d'emplois 3.1 alors que le duramen couvre les 5 classes. Pour éviter des problèmes de durabilité des ouvrages, il faut, soit s'assurer d'avoir purgé le bois de transition pour une mise en œuvre en condition d'humidité prolongée, soit considérer que l'ensemble du bois de *K. gabonensis* ne peut pas être utilisé au-delà de la classe 3.1.

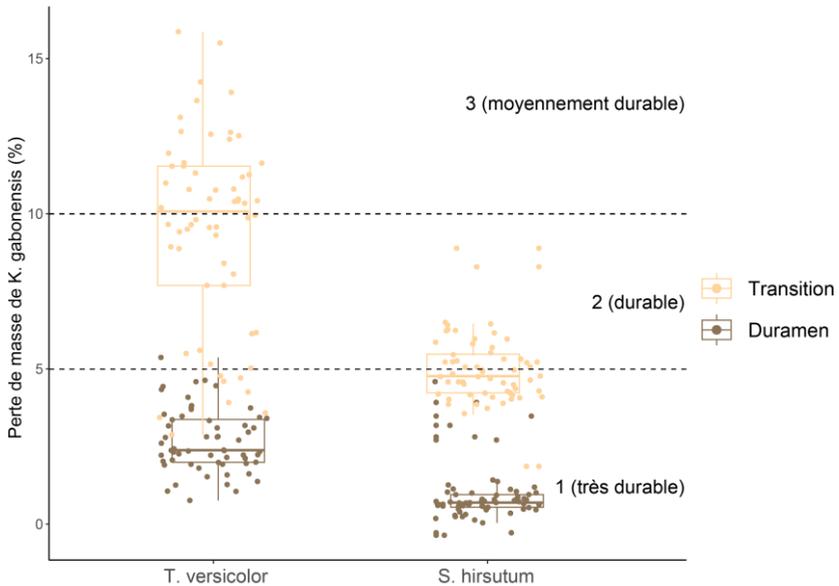


Figure 56: Distribution des valeurs de perte de masse de *K. gabonensis* en fonction du champignon testé (*T. versicolor* et *S. hirsutum*) et de la nature de son bois (transition ou duramen).

En considérant uniquement la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons, le bois de *P. tessmannii* pourrait être utilisés jusqu'en classe 4. Cependant, au vu de la variabilité des échantillons et la médiane proche de 10% de perte de masse, il serait plus prudent de cantonner l'utilisation de cette espèce à la classe 3.2. *P. macrophylla* peut être utilisé jusqu'en classe d'emplois 5 et *S. mannii* ne peut être utilisé qu'en classe 1 (Gérard et al. 2017), soit à l'intérieur toujours au sec. Il faut préciser que les classes d'emplois proposées ne se basent que sur la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons basidiomycètes. Si ces espèces sont sensibles à un autre des ravageurs mentionné dans le Tableau 11 il faudra revoir cette classification.

4.4.4. Usages

Les *Dialium*, *P. macrophylla* et *K. gabonensis* se retrouvent dans le grand groupe des espèces à haute densité et retraits élevés (Figure 53). Les essences de bois dense étant en progression sur le marché du bois depuis quelques années (Eba'a Atyi et al. 2022), leur potentiel de valorisation peut s'avérer intéressant.

Pour commencer *Dialium lopense* se différencie des autres espèces de *Dialium* et se retrouve proche de *K. gabonensis* (Figure 53). Ils sont tous deux dans un groupe qui, à l'exception de *Sacoglottis gabonensis* Urb., ne contient que des espèces emblématiques de l'exploitation sélective en termes de volume ou de reconnaissance internationale (Doucet and Kouadio 2007; FRM 2018). Ce groupe versatile peut, en fonction l'esthétique du bois (Martin and Vernay 2016) convenir pour les instruments, l'ébénisterie de luxe ou pour de l'ouvrage extérieur. Le grain fin et l'aspect esthétique de l'alternance de bande de parenchyme de *D. lopense* (Figure 29) pourraient d'avantage le préconiser pour des utilisations plus nobles (Figure 55) au même titre que les bois de *Baillonela toxisperma* Pierre (Moabi), *Guibourtia spp.* (Bubinga) ou *Millettia laurentii* De Wild. (Wengé). Sa forte résistance aux chocs pourrait également être un avantage pour la réalisation d'instruments de percussion ou de manches à outils. Cependant, la conformation des grumes peut limiter la longueur des pièces. Si sa teneur en silice s'avère aussi élevée que les autres espèces, elle pourrait également limiter sa transformation.



Figure 57: Mise en oeuvre de *Dialium lopense* pour la réalisation de tables et d'un bar de brasserie (Gembloux, Belgique).

K. gabonensis sera plutôt destiné au gros œuvre comme les *Erythrophleum spp.* (Tali), *Cylicodiscus gabunensis* (Okan) ou *Austranella congolensis* (De Wild.) A. Chev. (Mukulungu). Il faudra cependant purger le bois de transition lors de la transformation pour la plupart des usages extérieurs. Ne présentant pas de difficultés de sciage ou de transformation particulières, il peut également servir à l'aménagement intérieur en petites sections (Figure 56).



Figure 58: Parement de tablette en *K. gabonensis* dans une maison Bruxelloise (Belgique).

Les autres espèces de *Dialium* et *P. macrophylla* se distinguent du groupe précédent par une anisotropie plus élevée et un point de saturation de fibre un peu plus faible (Figure 52). Les sciages sur dosse de ces dernières auront donc potentiellement plus tendance à se déformer avec les variations d'hygrométrie que le groupe précédent. La durabilité naturelle plus faible de *D. bambidiense*, ne permettant que des usages extérieurs limités, la rapproche du groupe composé de *Guibourtia ehie* (A. Chev.) J. Léonard (Ovengkol), *Guibourtia arnlodiana* (De Wild. & T. Durand) J. Léonard (Mutenye), *Julbernardia pellegriniana* Troupin (Awoura) ou *Sterculia rhinopetala* K. Schum. (Lotofa). Ces espèces sont principalement valorisées avec une transformation poussée tel que l'ébénisterie de luxe, le tournage, la fabrication d'instruments de musique ou le placage tranché (Gérard et al. 2017). Même si elle est envisageable (Figure 56) la teneur extrême en silice de *D. bambidiense* rend sa transformation très difficile. Avec ses hautes résistances mécaniques (notamment aux chocs) les emplois minimisant la transformation te que les fond de véhicules, les planchers industriels ou encore la charpentes lourde devraient être favorisés.



Figure 59 : Plat tourné en loupe de *Dialium bambidiense* (Mazy, Belgique).

Pour *D. polyanthum* et *P. macrophylla*, les utilisations extérieures nécessitant une bonne stabilité telles que les lames de terrasse, le bardage extérieur nécessiteront une mise en œuvre appropriée (Figure 57). Ces deux espèces pourront majoritairement être utilisées pour les ouvrages lourds en extérieur, en contact ou non avec l'eau. Avec sa haute résistance au choc, sa teneur en silice limitant la transformation et une bonne conformation de grumes, *D. polyanthum* pourrait plus particulièrement convenir à la fabrication de traverse (ATIBT 2022a).



Figure 60: Table extérieur en *Dialium polyanthum* selon une mise en œuvre appropriée. Seul des pièces sur quartier/faux quartier ont été utilisées. Les traverses intérieur sont espacées et uniquement vissées dans la rainure du montant pour laisser le retrait radiale s'exprimer (Namur, Belgique).

Les dimensions et la conformation des grumes de *P. macrophylla* limitent la taille des pièces pouvant être produites. Les traverses en bois étant souvent destinées aux zones d'aiguillage, elles demandent des pièces de grandes dimensions jusque 15*35*680 cm (ATIBT 2022a). Le sciage et la transformation n'étant pas contraignants, cette espèce sera préférée pour des pièces moyennes pouvant être usinées. Son point de saturation de la fibre très bas induit un coefficient de retrait volumique élevé et donc une variation de volume importante avec les variations d'hygrométrie. Cependant, pour une utilisation en classe d'emplois 4 (humidité > 20%) l'humidité du bois serait toujours supérieure au point de saturation de la fibre, empêchant le bois d'exprimer son retrait. De plus, les pièces pour travaux hydrauliques sont généralement usinés à l'état vert pour faciliter la coupe (ATIBT 2022b). Plus le PSF est bas, plus le séchage sera long avant qu'il n'induisse des modifications de propriétés mécaniques. En ce sens le Mubala offre donc plus de flexibilité sur le temps de transport entre les unités de sciage et d'usinage.

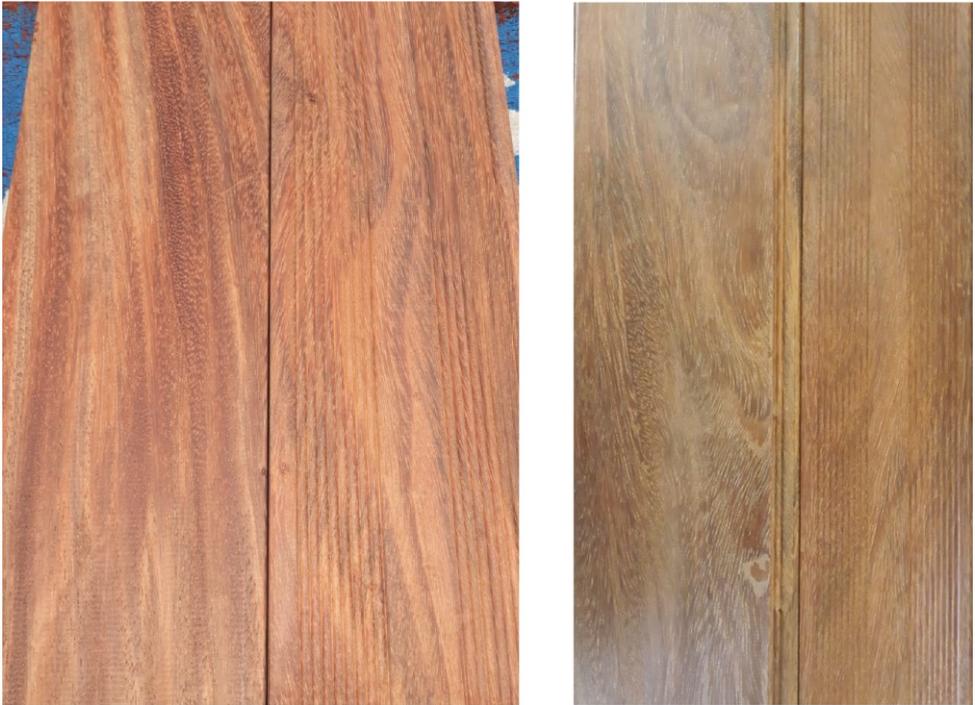


Figure 61: Lames de platelage en *Pentaclethra macrophylla* produits par Pallisco-CIFM (Mindourou, Cameroun).

Le bois de de *P. tessmannii* est classé dans un groupe de densité moyenne a élevée avec une anisotropie forte, due au retrait tangentiel élevé. Son bois est particulièrement similaire à celui de *Piptadeniastrium africanum* (Hook. F.) Brenan (Dabéma), aux *Berlinia spp.* (Ebiara) et aux *Bellschmeidia spp.* (Kanda). Ces

espèces sont parfois utilisées pour de la charpente ou des utilisations en mouvement (Gérard et al. 2017). Cependant *P. tessmannii* possède un bois plus lourd, un rapport résistance/masse plus faible et une résistance aux chocs très basse. Dès lors la charpente, les utilisations en structure, les planchers industriels, les boîtes/emballages, les emplois mobiles ou les fond de véhicules devraient être évités. Les autres utilisations de ces espèces sont principalement catégorisées en menuiserie, ébénisterie et aménagement intérieur ou extérieur. Le fil ondé observé sur les 4 arbres, esthétique sur de larges planches (Figure 59), le rend potentiellement plus intéressant pour le mobilier ou l'ébénisterie.



Figure 62: Utilisation de *P. tessmannii* pour la création de meubles intérieurs. Plateaux et tiroirs en *P. tessmannii* et piètements en chêne (Sart-Tilman, Belgique & Mazy, Belgique).

S. mannii se classe dans un groupe de densité moyenne à faible et de faible dureté. Son bois est proche de ceux de *Coelocaryon preussii* Warb. (Ekoune), des *Monopetalanthus spp.* (Andoung), des *Aningeria spp.* (Aningre) et des *Daniella spp.* (Faro). Ces espèces sont actuellement peu valorisées. D'autres espèces, avec un point de saturation de la fibre un plus élevé, une anisotropie plus faible, mais une durabilité naturelle équivalente sont plus utilisées telles que *Dacryodes buettneri* (Engl.) H.J. Lam (Ozigo), *Dacryodes igaganga* Aubrév. & Pellegr. (Igaganga) ou *Turraeanthus africanus* (Welw. Ex D. DC.) Pelledr. (Avodire). Ces espèces sont majoritairement valorisées pour la fabrication de panneaux contreplaqués (Martin and Vernay 2016; Gérard et al. 2017). La section étoilée de *S. mannii*, du moins à la base du fût, empêche le déroulage d'une portion importante des grumes (Richter 2015). A partir de sciage, ces espèces sont plutôt valorisées en

menuiserie et aménagement intérieur. Le grain très fin et l'absence de contrefil de cette espèce permet un bon état de surface après rabotage, idéal pour la réalisation de moulure, lambris ou pour le tournage. Il faudra néanmoins vérifier son aptitude à la finition par vernis ou peinture. En effet, la présence d'une large proportion de bois de transition de couleur différente du duramen (Figure 61) peut diviser quant à son esthétique.



Figure 63: Plateau de table en *S. mannii* réalisé par la menuiserie de PW-CEB (Bambidie, Gabon).

L'ensemble des utilisations potentielles, proposées par ordre de pertinence, sont résumés au Tableau 12. Ces propositions sont faites sur base d'éprouvettes sans défauts et d'une série limitée de propriétés. Des essais supplémentaires notamment concernant la durabilité face à d'autres agents de dégradation (termites ou térébrants marins), la rapidité de prise d'humidité du bois ou encore des essais d'usinage et d'assemblage permettraient d'affiner ces propositions.

Tableau 13: Tableau récapitulatif des utilisations potentielles des différentes espèces testées dans l'ordre de pertinence. ¹ Sous réserve d'une teneur en silice limitant les difficultés de transformation ; ² Uniquement après purge du bois de transition ; ³ Uniquement en zone peu exposée aux intempéries et avec une conception drainante ; ⁴Sous réserve d'une mise en œuvre limitant les variations dimensionnelles du bois ; ⁵ Soumis à une humidité fréquente ou prolongée mais pas constante.

Espèce	Utilisation potentielles
<i>D. lopense</i>	Instrument de musique (percussion) ¹ , Articles tournés ¹ , Ebénisterie et mobilier ¹ , Agencement, Manches d'outils, Parquet, Bardage ¹ , Porte et fenêtre, Escalier (intérieur extérieur), Lame de terrasse, Platelage, Planchers industriels, Fond de véhicules
<i>K. gabonensis</i>	Parquet industriel, Charpente lourde extérieur ³ , Traverse et bois de calage ² , Platelage ² , Pont ² , Travaux hydrauliques ² , Piquets ² , Parquet, Agencement intérieur
<i>D. bambidiense</i>	Planchers industriels intérieurs, Fonds de véhicules, Charpente lourde intérieur et extérieure ³ , Manche d'outils, Parquet, Escaliers intérieurs, Menuiserie intérieure, Ebénisterie et mobilier
<i>D. polyanthum</i>	Traverse et bois de calage, Pont (en contact ou non avec l'eau), Travaux hydrauliques, Charpente lourde, Manches d'outils, Platelage, Lame de terrasse ⁴ , Menuiserie et agencements extérieurs ⁴ , Fond de véhicules, Plancher industriel, Parquet
<i>P. macrophylla</i>	Travaux hydrauliques, Pont (contact ou non avec l'eau), Charpente lourde, Piquets, Poteaux, Platelage ⁴ , Lame de terrasse ⁴ , Menuiserie et aménagement extérieurs ⁴ , Parquet
<i>P. tessmannii</i>	Ebénisterie et mobilier intérieurs et extérieurs ⁵ , Aménagement, Bardage, Volet, Tournage, Placage tranché, Parquet, Escaliers intérieurs
<i>S. mannii</i>	Moulure, Lambris, Tournage, Placage tranché, Agencement intérieur, Porte et huisserie, Meuble et Ebénisterie.

4.4.5. Du laboratoire à la pratique

Les études scientifiques sur les bois tropicaux permettent d'élargir nos connaissances, mais leur application directe par les acteurs de l'industrie reste limitée. Dans ce chapitre, toutes les propriétés étudiées (à l'exception du PSF) ont été évaluées selon des normes strictes et reconnues par l'Union Européenne. Les valeurs obtenues pourraient donc être transférées vers des outils tels que les fiches TROPIX (Gérard et al. 2011). Ces fiches, en accès libre, servent de référence aux acteurs francophones de la filière bois d'Afrique Centrale. Elles sont cependant très complètes et décrivent certaines propriétés, telles que la résistance aux termites, aux térébrants marins ou encore la stabilité dimensionnelle qui n'ont pas pu être évaluée dans ce chapitre. Nous recommandons donc de compléter nos essais pour proposer des fiches exhaustives. Les fiches TROPIX restent des documents techniques et les résultats devraient également être davantage vulgarisés. Des communications simplifiées pourraient être diffusées par les canaux de

l'Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT), notamment sur le site internet *Fair and Precious*.

Une fois les acteurs informés sur les usages potentiels de ces bois, il faut qu'ils puissent les utiliser. Certaines applications nécessitent une garantie quant à la durabilité naturelle du bois (ouvrages extérieurs, châssis de fenêtre...). Nos tests de résistance aux champignons basidiomycètes répondent aux exigences de la norme CEN/TS 15083-1. Celle-ci étant reconnue par l'Union Européenne, nous proposons d'amender la norme NF EN 350-2, portant sur la définition de la durabilité naturelle des essences de bois. Nos résultats seraient alors officiellement valables et reconnus par les pays membres de l'UE. Pour l'utilisation du bois en structure, les propriétés calculées sur des échantillons de bois sans défauts ne sont pas suffisantes. Le bois de structure étant destiné à assurer le support et la stabilité de bâtiments ou d'ouvrage d'art, il doit donc répondre à des exigences strictes en terme de résistance mécanique. Les valeurs théoriques obtenues sur du bois parfait ne sont que rarement observées sur des pièces de grande longueur comprenant des nœuds et des variations de fil. C'est pourquoi, au sein de l'Union Européenne, le classement mécanique des bois (norme NF EN 338) requière de mesurer les propriétés mécaniques selon la norme NF EN 14081, sur des pièces de grandes dimensions (50 x 150 x 3600 mm) (Collet 2017). De tels échantillons ont été sciés pour *D. polyanthum* pour mener ces essais. Ils n'ont malheureusement pas pu être testés pour des raisons budgétaires. Le classement mécanique des bois est cependant nécessaire pour l'attribution du marquage CE, référence indispensable pour l'utilisation du bois dans les marchés publics européens. Ces marchés publics étant un des rares secteurs encore enclins de payer le surcout de la certification durable (ATIBT & FFEM; Eba'a Atyi et al. 2022), nous recommandons vivement de mener ces essais pour les espèces étudiées.

Chapitre 5

Volume sur pied et rendement



Le **Chapitre 4** a permis de définir les utilisations potentielles des 7 espèces étudiées. Cependant, la conformation particulière des arbres de *S. manni* et *P. macrophylla* rend leur mobilisation hasardeuse. Ce chapitre vise à ajuster des équations de cubage adaptées à leur morphologie et évaluer l'influence de cette morphologie sur les rendements de transformation.

5.1. Introduction

La planification de la série de production étant basée sur une répartition équilibrée des volumes exploitables (Louppe and Mille 2015), leur estimation est un paramètre crucial pour l'aménagement des forêts. Cependant, les tarifs de cubage proposés par les administrations forestières sont parfois peu précis pour les espèces traditionnelles (Fayolle et al. 2013; Ligoit et al. 2018). Dans le cas des espèces secondaires, la conformation particulière de certaines d'entre elles, telle que *P. macrophylla* (faibles dimensions) et *S. mannii* (cannelures prononcées), rend leur estimation encore plus hasardeuse. Ces espèces n'étant, par définition, que peu ou pas exploitées, les opportunités de calculer leurs volumes après abattage sont réduites. Ce contexte particulier rend les méthodes de mesure de volume non destructives particulièrement pertinentes (Bauwens et al. 2017). Au-delà de l'impact de la conformation sur l'estimation des volumes, elle influence également les rendements de transformation (Riesco Muñoz et al.).

C'est pourquoi le **Chapitre 5** vise à (i) estimer le volume de ces arbres sur base de deux méthodes non destructives (ii) leur ajuster des tarifs de cubage spécifique prenant en compte leur conformation et (iii) vérifier l'effet de la conformation sur le rendement pour proposer des recommandations lors de la sélection des arbres sur pied.

5.2. Matériel et méthodes

5.2.1. Mesure des entrées et du volume

Dans ce chapitre le volume considéré est mesuré sur écorce. Il correspond donc au volume total, comprenant ainsi le volume du bois et de l'écorce. Afin de construire un tarif de cubage pour *P. macrophylla*, 91 arbres ont été échantillonnés dans l'UFA 10-044 (Figure 8). Pour chaque arbre, le diamètre à hauteur de poitrine (dhp), soit à 1m30 de hauteur, a été mesuré à l'aide d'un mètre ruban. Une fois cette mesure réalisée, une piste a été ouverte dans la végétation pour positionner le Relascope de Bitterlich à la distance requise ($25 * dhp$), validée soit par l'appareil, soit par un décamètre (ministère de la Coopération 1976). Cette piste a été créée dans la direction offrant la meilleure visibilité sur le fût. Ensuite, la hauteur totale du fût (hauteur mesurée de la base du fût jusqu'à la première charpentière) a été mesurée à l'aide du relascope. Finalement, 2 à 15 mesures de diamètres, et de leurs hauteurs respectives ont été réalisées en fonction de la hauteur totale du fût, de sa sinuosité et de la visibilité due à la végétation alentour. Le volume de chaque arbre a finalement été mesuré selon la formule du tronc de cône proposée par Rondeux (1999), soit l'Équation 1.

$$V = \sum_{i=2}^n \frac{\pi h_{i,i-1}}{12} * (D_i^2 + D_i * D_{i-1} + D_{i-1}^2) \quad (1)$$

Où, V est volume du fût (m^3), n est le nombre de mesures optiques de diamètre par arbre, $h_{i,i-1}$ est la différence de hauteur entre la $i^{ème}$ mesure de diamètre et la $i-1$ (m) et D_i est l' $i^{ème}$ diamètre mesuré (m).

Pour la construction du tarif de cubage de *S. mannii* 78 arbres ont été échantillonnés dans l'UFA 1 (Figure 8). Pour chaque arbre, le dhp a été mesuré en positionnant le mètre sur les cannelures (Figure 64). Afin d'inclure l'importance des cannelures dans le modèle, la profondeur de la plus grande d'entre elles a été mesurée comme étant la plus grande distance à l'enveloppe convexe de l'arbre à 1m30 (Figure 64). Ensuite, la hauteur totale du fût a été mesurée à l'aide d'un Vertex. Une fois ces trois entrées collectées, la végétation ($dhp < 10cm$) a été dégagée dans un rayon de 5m autour de l'arbre. Un ensemble de cibles de références nécessaires à l'alignement des images a été positionné équitablement autour de l'arbre: 10 grandes cibles au sol ainsi que 10 piquets positionnés derrière chacune d'elles. Les piquets étaient composés de 2 cibles dont la distance exacte entre leur centre avait soigneusement été mesurée à l'aide d'une règle avec une précision de 1mm (Figure 65). En plus de ces 10 références, deux paires de cibles au sol, situées de part et d'autre de l'arbre, ont également été positionnées à une distance standard de 50 cm exactement.

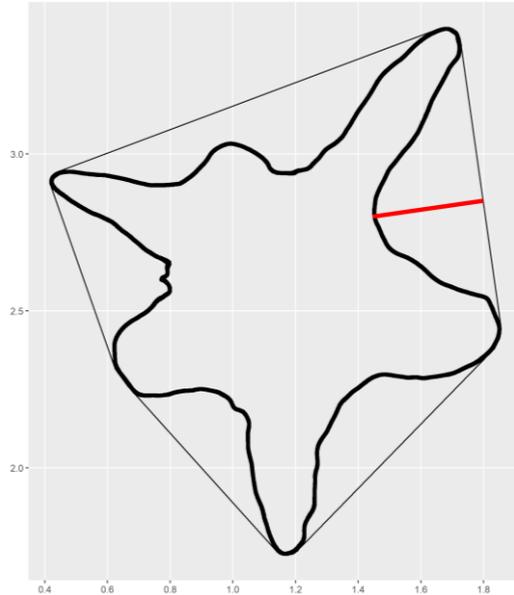


Figure 64: Mesure des entrées du tarif de cubage à 1m30. La ligne noire épaisse correspond à la section du tronc, la ligne fine correspond à la mesure de diamètre sur les cannelures et la ligne rouge correspond à la profondeur de la plus grande cannelure.



Figure 65 : Position des cibles de références. Le centre des deux cibles en premier plan a été placé à exactement 50 cm de distance.

Une fois l'ensemble des cibles positionné, le fût a été filmé à l'aide d'un drone Parrot Anafi équipé d'une caméra. Pour visualiser l'ensemble de ce dernier, 9 vols ont été réalisés par arbre. Chaque vol (Figure 66) a été décomposé en trois phases :

(i) positionnement du drone entre deux cibles et orientation de la caméra pour visualiser le centre de toutes les cibles, (ii) élévation rectiligne du drone en maintenant les cibles dans le champ de vision de la caméra et (iii) descente rectiligne en focalisant la visée uniquement sur le tronc.

Les vidéos ont ensuite été traitées à l'aide du logiciel Agisoft Metashape v1.5.5. Une image a été extraite toutes les 2,5 secondes de chaque film, donnant entre 300 et 600 photos par arbres. Les images ont ensuite été alignées et les centres des cibles non repérés automatiquement ont été pointés manuellement. Pour valider l'alignement des photos, l'erreur moyenne (e) entre les distances de cibles calculées par le modèle et les distances réelles a été estimée. Lorsque celle-ci était inférieure à 1 cm, l'alignement a été validé. Un nuage de point dense a alors été généré et nettoyé manuellement pour ne conserver que le tronc de l'arbre. Finalement un *mesh* a été généré pour créer un modèle 3D sur base de ce dernier. L'axe z des modèles a ensuite été aligné sur l'axe du fût à l'aide du logiciel CloudCompare v2.12.

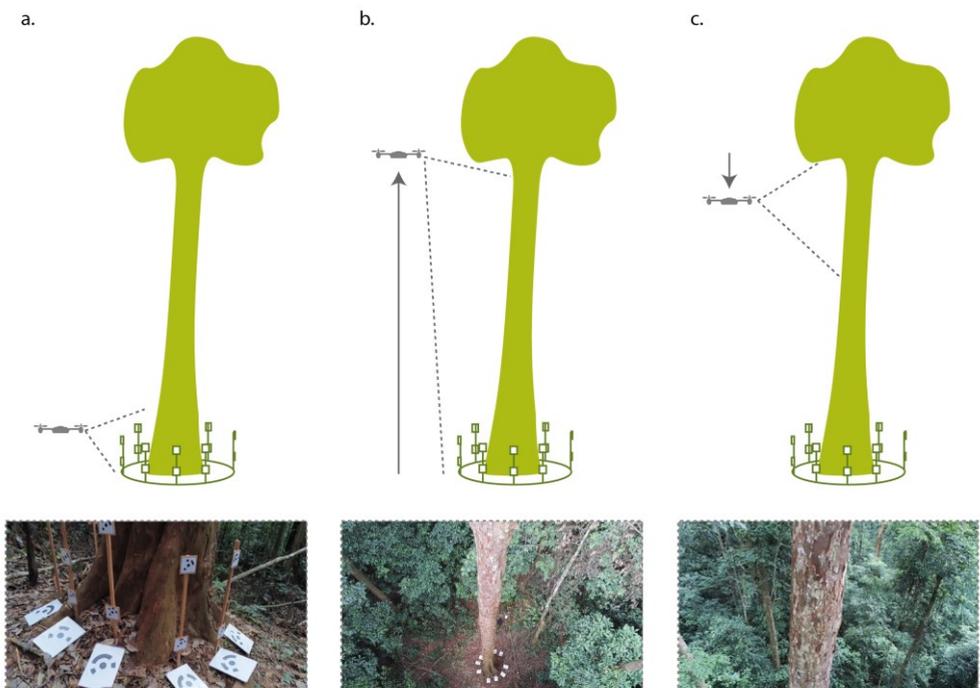


Figure 66: Plan de vol du drone lors de l'acquisition d'image. a. positionnement du drone entre deux cibles et visualisation du centre de chaque cible; b. élévation du drone en maintenant les cibles dans le champ de vision de la caméra; c. descente en focalisant la visée sur le tronc.

Ces modèles ont ensuite été convertit en nuage de point pour finalement être traités à l'aide du logiciel R (R Core Team 2023) avec les packages suivants : *sf*

(Pebesma 2018), *sp* (Pebesma and Bivand 2005), *raster* (Hijmans 2023), *rdgal* (Bivand et al. 2023), *lidR* (Roussel et al. 2020), *rgeos* (Bivand and Rundel 2023), *spDataLarge* (Nowosad and Lovelace 2023) and *conconveman* (Gombin and Vaidyanathan 2020). Le volume de chaque nuage de point a été mesuré sur base de l'aire de sections transversales, échantillonnées à différentes hauteurs. Pour ce faire, le squelette du fût a d'abord été modélisé en reliant les centroïdes de chaque sections de tronc (2cm d'épaisseur), prises tous les 10 cm perpendiculairement l'axe Z. Ensuite, une section transversale (2cm d'épaisseur) du tronc a été prise tous les 50 cm dans le plan perpendiculaire à la courbe du squelette créé (Bauwens et al. 2017). Le volume du fût a finalement été calculé selon l'Équation 2.

$$V = \sum_{i=2}^n \frac{A_i - A_{i-1}}{2} * 0.5 \quad (2)$$

Où V est le volume du fût (m^3), n est le nombre de sections transversales et A_i est l'aire de la $i^{\text{ème}}$ section transversale (m^2).

Validation des mesures

Afin de valider les mesures du relascope de Bitterlich, 24 des 90 arbres mesurés ont été abattus. Leur volume a été estimé par la méthode des billons successifs. Le diamètre de la grume a été mesuré tout les mètres sur toute sa longueur à l'aide d'un mètre ruban (Ligot et al. 2018). Le volume de chaque billon a ensuite été calculé en utilisant la formule du tronc de cône (Équation 1). Le volume du fût a finalement été obtenu en sommant le volume de chaque billon.

Les cannelures prononcées de *S. mannii* ne permettant pas d'utiliser la méthode des billons successifs, une méthode de validation alternative a donc été utilisée. Pour vérifier si les modèles représentaient correctement l'irrégularité des sections de tronc de *S. mannii*, l'aire des sections des modèles a été comparée à l'aire réelle des sections après abattage. Pour ce faire, 7 des 78 arbres mesurés ont été abattus. Deux tranches (situées proche de la base et de l'extrémité du tronc) ont été tronçonnées perpendiculairement à l'axe du fût de chaque arbre. Ensuite, 5 cibles ont été positionnées dans le même plan que les faces et ces dernières ont été photographiées (Bauwens et al. 2017). Les photographies ont ensuite été géoréférencées sur base de la distance entre les cibles à l'aide du logiciel Qgis v3.22.11. Un polygone a alors été créé en délimitant manuellement la face (Figure 67) et l'aire de ces polygones a été considérée comme l'aire réelle après abattage.

Pour chaque espèce, les méthodes de mesures et de validation ont été comparées au moyen du biais et du RMSE (Ligot et al. 2018). La significativité du biais a été vérifiée au moyen d'un test T de Student sur échantillon apparié. Pour visualiser la relation entre la différence des deux méthodes et la variable étudiée, un graphique de Bland Altman a également été produit (Giavarina 2015).



Figure 67 : Exemple de détourage des faces de *S. mannii* pour la création d'un polygone géoréférencé.

5.2.2. Ajustement des tarifs de cubage

Pour ajuster un modèle allométrique, en prenant le dhp et la hauteur du fût comme prédicteurs, six modèles adaptés de Ligot et al. (2018) ont été testés pour *P. macrophylla* (Equations 4-9). Pour *S. mannii*, les mêmes modèles ont été testés ainsi que des modèles modifiés incluant l'importance des cannelures dans l'équation. Pour ce faire, le diamètre y a été corrigé en y soustrayant la taille de la cannelure. (Équation 10-15).

$$Vi = cD_i^2h_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$Vi = a + cD_i^2h_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$Vi = bD_ih_i + cD_i^2h_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$Vi = a + bD_ih_i + cD_i^2h_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

$$Vi = a + bD_i^c h_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

$$Vi = bD_i^c h_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

$$Vi = c(D_i - p_i)^2 h_i + \varepsilon_i \quad (10)$$

$$Vi = a + c(D_i - p_i)^2 h_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

$$Vi = b(D_i - p_i)h_i + c(D_i - p_i)^2 h_i + \varepsilon_i \quad (12)$$

$$Vi = a + b(D_i - p_i)h_i + c(D_i - p_i)^2 h_i + \varepsilon_i \quad (13)$$

$$Vi = a + b(D_i - dp_i)^c h_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

$$Vi = b(D_i - dp_i)^c h_i + \varepsilon_i \quad (15)$$

Où Vi est le volume prédit pour l'arbre i (m^3), D_i est le diamètre i mesuré à 1,3 m de hauteur (m), h_i est la hauteur i du fût (m), p_i est la profondeur de la plus grande

cannelure de l'arbre i (m), a , b , c et d sont les paramètres du modèle à ajuster et ε_i est le résidu observé entre la valeur prédite et la valeur réelle mesurée. La variance des résidus augmentant avec le diamètre de l'arbre (Picard et al. 2012c), elle a été modélisée en fonction de D_i (Equation 18).

$$var(\varepsilon_i) = \sigma^2 * (D_i)^{2\delta} \tag{18}$$

Où σ^2 et δ sont les paramètres à ajuster. Afin de sélectionner le meilleur modèle, le critère d'information d'Akaike (AIC) a été utilisé. L'erreur quadratique moyenne (RMSE), exprimée en m^3 , a également été calculée. L'ajustement des tarifs a été réalisé à l'aide du logiciel R 4.2.2. (R Core Team 2023) et du package *nlme* v.3.1-163 (Pinheiro et al. 2023).

5.2.3. Classe de qualité

Lors des mesures de volumes, la qualité des arbres ($d_{hp} > 40$ cm) de *P. macrophylla* a été évaluée selon les critères utilisés lors des inventaires d'exploitation de Pallisco-CIFM (Tableau 14).

Tableau 14: Critères de classification de la qualité des arbres à Pallisco-CIFM pour *P. macrophylla* et *P. tessmannii*.

Classe	Hauteur de fût exploitable	Défauts acceptables
A	Plus de 16 m	<u>10 premiers mètres</u> : Courbure < 1cm, nœuds sains, blessure cicatrisée.
		<u>Au-delà de 10 m</u> : Courbure, méplat, bosse, branche morte, gouttière peu accentuée.
B	12 m à 16 m	<u>6 premiers mètres</u> : courbure, méplat, bosse, branche morte, gouttière peu accentuée.
		<u>Au-delà de 6 m</u> : courbure 4 cm, nœuds sains ou pourris, blessures ouvertes, grains d'orge, trou, gros gourmand, 2 ou 3 branches vivantes.
C	6 m à 12 m	<u>6 premiers mètres</u> : courbure 4 cm, nœuds sains ou pourris, blessures ouvertes, grains d'orge, trou, gros gourmand, 2 ou 3 branches vivantes.
D	Non exploitable	Arbre de très mauvaise qualité (gros trous, cannelures profondes, fourches basses...).

5.2.4. Rendements de transformation et conformation

Description des billes

Pour chaque espèce, le nombre d'arbres testé ainsi que la moyenne et l'écart-type des paramètres de conformation (diamètre, hauteur de mesure du diamètre, profondeur de la plus grande cannelure, diamètre corrigé, hauteur de la cannelure

et hauteur du fût sur pied) ont été calculés sur base des mêmes méthodes de mesure qu'en 2.1.1.

Calcul des coefficients et rendements

Le coefficient de commercialisation (%C, en %) est défini comme étant le rapport entre le volume utilisable d'une grume après purge des défauts (volume commercial, en m³), et le volume total abattu (en m³) (Cailliez 1980; Fournier-Djimbi and Fouquet 1998). Ce coefficient a été calculé sur 22 arbres de *P. macrophylla* et 16 arbres de *S. mannii*. Le volume des grumes, avant et après purges, de *P. macrophylla* a été mesuré avec la méthode des billons successifs (cf. 2.1.2.) tandis que les volumes de *S. mannii* ont été mesurés selon les normes de CEB-PWG, soit « sous cannelures » (Figure 68) et à l'aide de l'équation 20.

$$V_b = \left(\frac{D_{1g} + D_{1p} + D_{2g} + D_{2p}}{8} \right)^2 * \pi * l_b \quad (20)$$

Où, V_b est le volume de la bille (m³), D_{1g} est le plus grand diamètre mesuré sur la première face de la bille (m), D_{1p} est le plus petit diamètre, perpendiculaire au plus grand, mesuré sur la première face de la bille (m), D_{2g} est le plus grand diamètre mesuré sur la deuxième face de la bille (m), D_{2p} est le plus petit diamètre, perpendiculaire au plus grand, mesuré sur la deuxième face de la bille (m), l_b est la longueur de la bille (m).

Le rendement de sciage (%S, en %) est défini comme le rapport entre le volume de bois scié (en m³) et le volume commercial (en m³). Pour *P. macrophylla*, 23 arbres ont été sciés en lambourdes de section fixe de 45 x 140 mm et de longueurs variables de [2100 – 2700] mm. Pour augmenter le rendement, les rebus de sciage ont été utilisés pour produire du lambris de section 19 x 80 mm et de longueur équivalente. Pour *S. mannii*, 16 arbres ont été sciés en avivés de section variable de 45 x [100 – 420] mm et de longueurs variables de [2400 - 3900] mm.

Influence de la conformation sur les rendements

L'influence des différents paramètres de conformation a été testée sur les rendements de transformation. Le rendement de sciage n'ayant pas été différencié en fonction des arbres pour *P. macrophylla*, il n'a pu être étudié que pour *S. mannii*. Dans un premier temps, la corrélation entre les paramètres de conformation et les rendements a été calculée (Riesco Muñoz et al. 2013). La normalité de la distribution de chaque variable a été testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Lorsque celle-ci était vérifiée, c'est la corrélation de Pearson (r) qui a été utilisée. Dans le cas échéant, c'est la corrélation de Kendall (τ) qui a été employée. Après identification du paramètre le plus hautement corrélé, et significatif, aux différents rendements, un modèle de régression linéaire classique (Equation 3) a été ajusté sur ce dernier. Dans ce modèle, y_i est le rendement de l'arbre i (%), x_i est le paramètre de conformation considéré de l'arbre i (m), a et b sont les paramètres à ajuster et ε_i

est le résidu observé entre la valeur prédite et la valeur réelle mesurée. Pour ajuster au mieux la régression au nuage de points, différentes transformations de x ont été testées ($\log(x)$, \sqrt{x} , $1/x$, x^2), celle minimisant l'AIC et le RMSE a été retenue. Le modèle linéaire a été ajusté avec le logiciel R 4.2.2. (R Core Team 2023).



Figure 68 : Méthode de mesure dite “sous les cannelures” de *S. mannii* du plus grand diamètre de la première face de la bille (D_{1g}) et du plus petit diamètre perpendiculaire (D_{1p}).

5.3. Résultats

5.3.1. Validation des méthodes non destructives

Le biais entre les volumes mesurés au relascope de Bitterlich de *P. macrophylla* et ceux mesurés par billons successifs après abattage n'est pas significatif (biais = -0,46 ; $t = -1,15$; $p = 0,26$). Le RMSE entre les deux méthodes est de $1,98 \text{ m}^3$, valeur élevée par rapport au volume moyen mesuré au relascope de $7,3 \text{ m}^3$. La Figure 69-a. met en évidence une augmentation de l'imprécision avec le volume moyen des deux méthodes. L'intervalle d'acceptation (intervalle comprenant 95% des différences observées entre les deux méthodes) est de $-4,31 \text{ m}^3$ à $3,40 \text{ m}^3$. Le biais entre l'aire des tranches mesurées sur les modèles 3D de *S. mannii* et celles mesurées sur les tranches photographiées après abattage est également non significatif (biais = 0,0004 ; $t = 0,03$; $p = 0,97$). Le RMSE entre les deux méthodes est de $0,05 \text{ m}^2$ pour une aire moyenne de tranche de $0,59 \text{ m}^2$ mesurée sur les modèles 3D. L'imprécision de mesure entre les deux méthodes semble plus élevée à la base du fût et l'intervalle d'acceptation est de $-0,09$ à $0,09$.

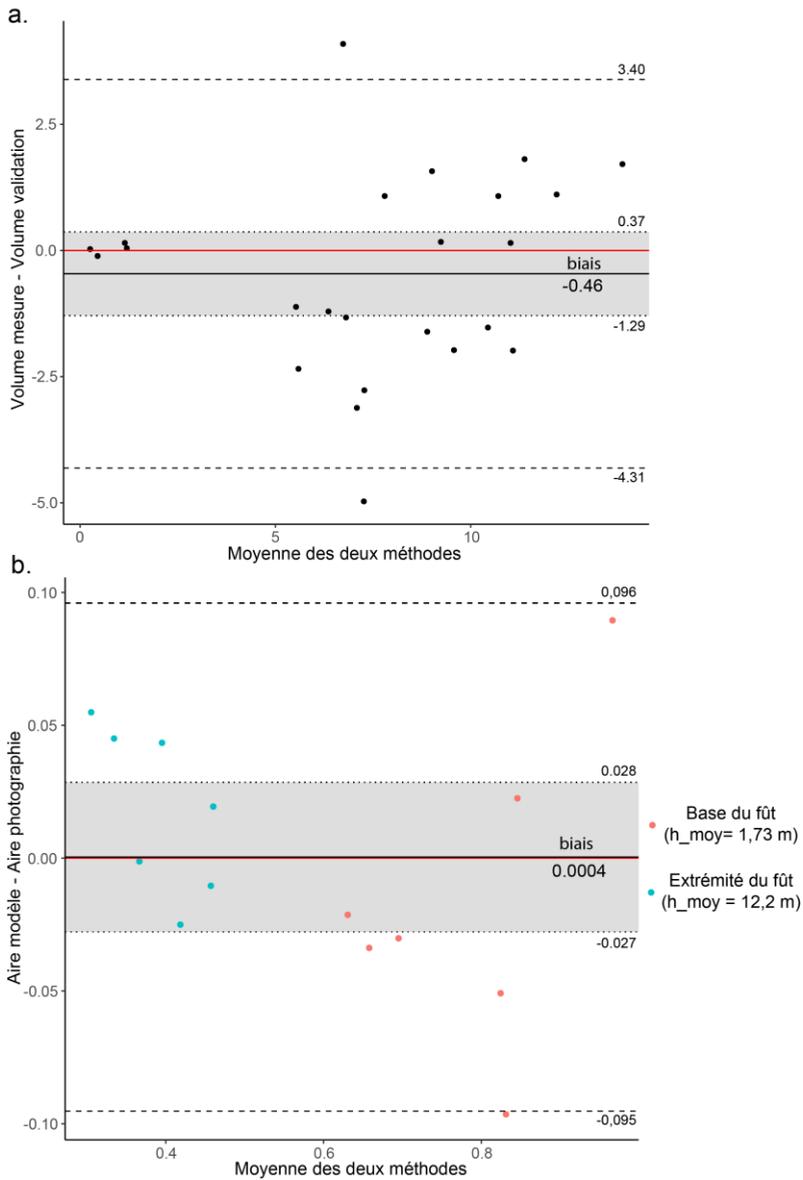


Figure 69: Graphique de Bland-Altman comparant: (a.) les volumes des fûts mesurés au relascope de Bitterlich (Volume mesure) et ceux mesurés par billons successifs après abattage (volume validation) de *P. macrophylla*, (b.) les aires des tranches mesurées sur les modèles 3D (aire mesure) et celles mesurées sur les photographies des tranches après abattage (aire validation) de *S. mannii*. h_{moy} = hauteur moyenne des tranches.

5.3.2. Equations de cubages

Les paramètres descriptifs des entrées utilisées pour la réalisation des tarifs de cubage sont repris au Tableau 15. Pour *P. macrophylla*, l'équation 7 se démarque des autres avec son AIC plus faible (Tableau 15). Pour cette équation, la pondération a permis d'obtenir une distribution aléatoire des résidus autour de la valeur 0, avec néanmoins une augmentation de la dispersion des résidus avec le diamètre (Figure 70-a.). Concernant *S. mannii*, la correction du diamètre avec la profondeur de la plus grande cannelure diminue l'AIC de tous les modèles (Tableau 17). Le modèle optimisant le plus l'AIC est l'équation 14. Cependant, avec seulement 2 points d'AIC de plus et un RMSE très proche de l'équation 14, l'équation 10 évite l'utilisation d'un coefficient pour corriger le diamètre et sera donc préférée pour sa simplicité. La répartition des résidus de ce modèle est homogène en fonction du volume prédit (Figure 70-b.).

Tableau 15: Paramètres descriptifs de la distribution de chaque entrée utilisée pour l'élaboration des tarifs de cubage de *P. macrophylla* et *S. mannii*. d = diamètre à hauteur de poitrine (m); h= hauteur de la tige sur pied (m); p=profondeur de la plus grande cannelure (m).

Espèce	Entrée	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Min	max
<i>P. macrophylla</i>	diamètre	0,88	0,94	0,30	0,23	1,33
	hauteur du fût	12,3	11,6	4,0	5	24,9
<i>S. mannii</i>	diamètre	0,86	0,81	0,27	0,33	1,64
	hauteur du fût	14,3	13,9	8,1	8,1	24,7
	profondeur cannelure	0,11	0,09	0,10	0,01	0,49

Tableau 16 : Ajustement des tarifs de cubage à deux entrées reliant le volume du fût (V, en m³) au diamètre à hauteur de poitrine (en m) et à la hauteur du fût (en m) pour *P. macrophylla*. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, ^{**} et ^{***} correspondent respectivement à p>0,05 ; 0,01>p>0,001 et p<0,001) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochets. Le paramètre d'ajustement pour l'homogénéisation de la variance des résidus (δ), le coefficient de détermination (R²), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en m³) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés.

Eq	a	b	c	δ	R ²	RMSE	AIC
4	-	-	0,626 ^{***} [0,610 – 0,642]	1,11	0,96	0,84	151
5	-0,009 ^{ns} [-0,052 – 0,034]	-	0,629 ^{***} [0,610 – 0,647]	1,09	0,96	0,83	153
6	-	-0,33 ^{**} [-0,057 – -0,009]	0,672 ^{***} [0,637 – 0,707]	1,04	0,96	0,77	146
7	0,190^{***} [0,117 – 0,263]	-0,121^{***} [-0,162 – -0,079]	0,748^{***} [0,702 – 0,794]	1,20	0,97	0,74	127
8	-	0,103 ^{***} [0,078 – 0,129]	1,656 ^{***} [1,548 – 1,764]	1,18	0,68	2,23	314
9	0,065 ^{ns} [-0,072 – 0,203]	0,084 ^{***} [0,043 – 0,125]	1,729 ^{***} [1,537 – 1,921]	1,24	0,66	2,30	316

Tableau 17: Ajustement des tarifs de cubage à deux et trois entrées reliant le volume du fût (V , en m^3) au diamètre à hauteur de poitrine (en m), à la profondeur de la plus grande cannelure (en m) et à la hauteur du fût (en m) pour *S. mannii*. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, *, ** et *** correspondent respectivement à $p > 0,05$; $0,05 > p > 0,01$; $0,01 > p > 0,001$ et $p < 0,001$) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochet. Le paramètre d'ajustement pour l'homogénéisation de la variance des résidus (δ), le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en m^3) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés.

Eq	a	b	c	d	δ	R^2	RMSE	AIC
4	-	-	0,416*** [0,402 – 0,430]	-	1,33	0,68	1,59	149
5	0,174* [0,043 – 0,305]	-	0,387*** [0,365 – 0,409]	-	1,15	0,77	1,33	147
6	-	0,090*** [0,057 – 0,123]	0,292*** [0,249 – 0,334]	-	0,94	0,88	0,97	138
7	-0,526** [-0,912 – -0,140]	0,199*** [0,112 – 0,285]	0,218*** [0,149 – 0,286]	-	0,94	0,90	0,87	131
8	-	0,117*** [0,090 – 0,145]	1,409*** [1,321 – 1,497]	-	0,79	0,87	0,99	168
9	-1,098* [-1,981 – -0,216]	0,362** [0,099 – 0,554]	1,111*** [0,904 – 1,318]	-	0,73	0,92	0,82	160
10	-	-	0,519*** [0,508 – 0,531]	-	0,55	0,98	0,45	84
11	0,018 ^{ns} [-0,132 – 0,165]	-	0,518*** [0,497 – 0,538]	-	0,55	0,98	0,45	86
12	-	-0,001 ^{ns} [-0,036 – 0,034]	0,521*** [0,475 – 0,566]	-	0,55	0,98	0,45	86
13	0,117 ^{ns} [-0,272 – 0,506]	-0,026 ^{ns} [-0,117 – 0,065]	0,539*** [0,462 – 0,616]	-	0,55	0,98	0,45	87
14	-0,072 ^{ns} [-0,392 – 0,248]	0,491*** [0,460 – 0,521]	1,882*** [1,690 – 2,074]	0,829*** [0,695 – 0,964]	0,52	0,98	0,43	82
15	-	0,487*** [0,461 – 0,513]	1,918*** [1,819 – 2,016]	0,836*** [0,707 – 0,965]	0,51	0,98	0,43	84

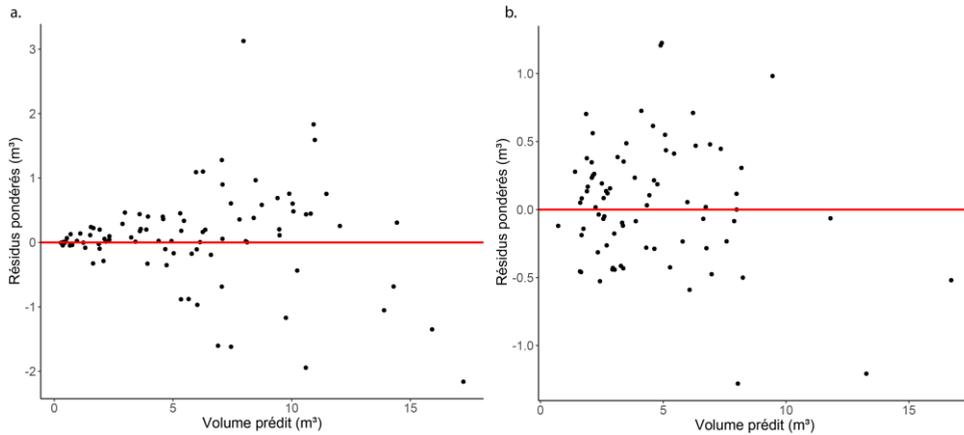


Figure 70 : Répartition des résidus des modèles en fonction du volume prédit pour *Pentaclethra macrophylla* (a.) et *Scyphocephalum mannii* (b.).

5.3.3. Qualité des arbres de *P. macrophylla*

Sur les 84 arbres (dhp > 40cm), un seul a été classé dans la classe A, 17 dans la classe B, 42 dans la classe C et 24 dans la classe D (non exploitable).

5.3.4. Rendements

Le coefficient de commercialisation de *S. mannii* est de 67 ± 17 %. Son rendement sciage est de 23% avec, proportionnellement, un grand écart-type et donc une grande dispersion de ses valeurs. Le coefficient de commercialisation de *P. macrophylla* est plus élevé et varie moins (81 ± 16 %) que celui de *S. mannii*. Le rendement sciage de *P. macrophylla* (17%) a été calculé sur base de volume total de grume avant sciage et du volume total de lambourde/bardage, sans distinction des arbres. Il n'a donc pas été possible de calculer un écart-type pour cette valeur.

Table 1: Rendements de transformation moyens par espèce ainsi que moyenne et écart-type des paramètres de conformation des arbres testés.

	<i>S. mannii</i>	<i>P. macrophylla</i>
Nombre d'arbres testés	16	22
Diamètre (d)	1,23 ± 0,25 m	1,13 ± 0,10 m
Profondeur de la plus grande cannelure (p)	0,21 ± 0,11 m	-
Diamètre corrigé (d-p)	1,02 ± 0,16 m	-
Hauteur des cannelures	3,9 ± 1,7 m	-
Hauteur du fût	19,8 ± 3,7 m	11,5 ± 2,9 m
Coefficient de commercialisation (%C)	67 ± 17 %	81 ± 16 %
Rendement sciage (%S)	23 ± 10 %	17 %

5.3.5. Relation entre conformation et rendements

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les paramètres de conformation de *S. mannii* et le coefficient de commercialisation (Figure 71). Il existe cependant une relation significative entre le diamètre, le diamètre corrigé (dhp – profondeur de la plus grande cannelure, cf. 3.1.2.) et le rendement sciage. C'est le diamètre corrigé qui a été retenu pour l'ajustement de l'équation de prédiction car (i) il présente la plus haute corrélation (0,61) et (ii) ce paramètre (diamètre – profondeur de la plus grande cannelure) est le même que celui sélectionné pour l'ajustement du tarif de cubage. Pour *S. mannii* le diamètre est corrélé avec tous les autres paramètres de conformation des arbres, soulignant une certaine constance dans l'architecture de cette espèce. Concernant *P. macrophylla*, seule la hauteur du fût est significativement corrélée au coefficient de commercialisation (0,47).

Pour chaque espèce, l'équation avec la valeur minimale d'AIC a été sélectionnée (Tableau 15). Le modèle de prédiction du rendement sciage en fonction du diamètre corrigé de *S. mannii* montre une distribution homogène des résidus (Figure 72) et un RMSE de 8%. Le modèle de prédiction du coefficient de commercialisation en fonction de la hauteur de tige de *P. macrophylla* a également une répartition homogène des résidus en fonction de la variable prédite et un RMSE de 13,7%.

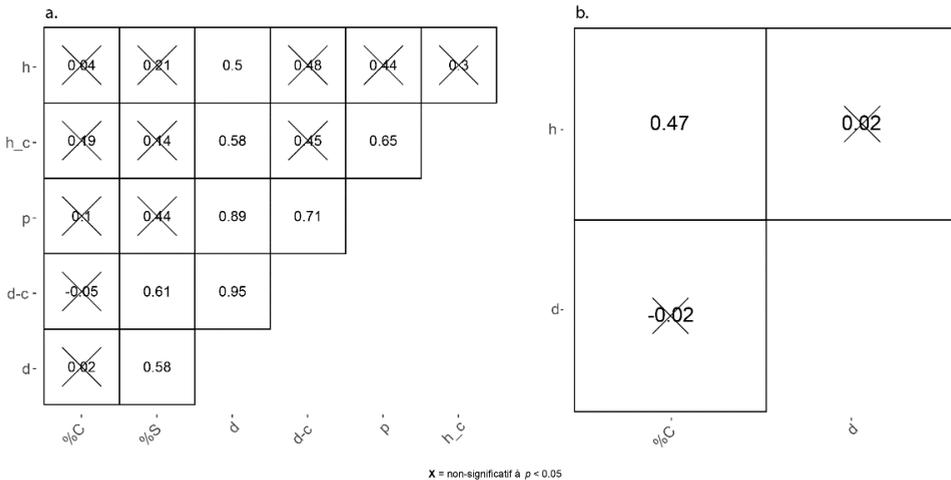


Figure 71 : Corrélations de Pearson pour *S. mannii* (a.) et de Kendall pour *P. macrophylla* (b.) entre les paramètres de conformation des arbres sur pied et les rendements de transformation. %C = coefficient de commercialisation (%); %S = rendement sciage (%); d = diamètre de l'arbre, d-c = diamètre de l'arbre corrigé; p = profondeur de la plus grande cannelure; h_c = hauteur de la plus grande cannelure; h = hauteur du fût.

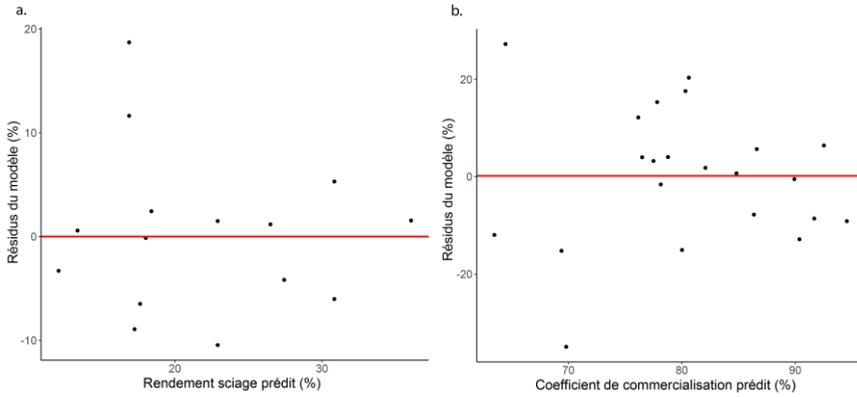


Figure 72 : Répartition de l'erreur de prédiction des différents rendements de transformation en fonction du rendement prédit. (a.) Modèle de prédiction du rendement sciage en fonction du diamètre corrigé de *S. mannii*; (b.) Modèle de prédiction du coefficient de commercialisation en fonction de la hauteur de tige de *P. macrophylla*

Tableau 18: Ajustement des régressions linéaires entre les rendements de transformation de *S. mannii* et *P. macrophylla* et la conformation des arbres sur pied. Les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (ns, *, ** et *** correspondent respectivement à $p > 0,05$; $0,05 > p > 0,01$; $0,01 > p > 0,001$ et $p < 0,001$) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochets Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadrique moyenne (RMSE, en %) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. %S = rendement sciage (%), %C = coefficient de commercialisation, d_c = diamètre corrigé (m), h= hauteur du fût (m).

Espèce	y	x	a	b	R^2	RMSE	AIC
<i>S. mannii</i>	%	d_c	-16,8 ^{ns} [-45,6 – 12,0]	38,0* [10,2 – 65,8]	0,40	7,4	109
		d_c ²	-2,6 ^{ns} [-12,2 – 17,4]	18,2* [5,0 – 31,4]	0,41	7,4	108
		log(d_c)	21,7 ^{***} [17,2 – 26,1]	38,7* [9,9 – 67,5]	0,39	7,4	109
		$\sqrt{d_c}$	-55,5 ^{ns} [-112,9 – 1,9]	77,0* [20,2 – 133,7]	0,40	7,4	109
	S	1/d_c	60,6 ^{***} [31,0 – 90,2]	-38,4* [-67,7 – -9,2]	0,38	7,5	109
		d_c	-	22,0 ^{***} [17,6 – 26,3]	0,32	7,8	108
		d_c ²	-	20,4^{***} [16,6 – 24,2]	0,40	8,0	107
		log(d_c)	-	48,6 ^{ns} [-35,7 – 132,9]	-4,71	22,9	140
		$\sqrt{d_c}$	-	22,2 ^{***} [17,4 – 27,1]	0,20	8,6	111
		1/d_c	-	20,7 ^{***} [13,9 – 27,4]	-0,54	11,9	121
<i>P. macrophylla</i>	%	h	50,2 ^{***} [22,9 – 77,6]	2,63* [0,33 – 4,94]	0,22	14,0	194
		h ²	66,3 ^{***} [50,8 – 81,9]	0,01* [0,00 – 0,20]	0,18	14,4	186
		log(h)	4,6 ^{ns} [-56,5 – 65,8]	31,5* [6,3 – 56,7]	0,25	13,8	184
		\sqrt{h}	18,5 ^{ns} [-33,7 – 70,7]	18,4 ^{ns} [3,1 – 33,8]	0,24	13,9	184
	C	1/h	112 ^{***} [87,3 – 136,7]	-339,8* [-598,0 – -81,5]	0,24	13,6	183
		h	-	6,74 ^{***} [6,03 – 7,45]	-0,34	19,5	194
		h ²	-	0,48 ^{***} [0,39 – 0,58]	-3,06	32,1	219
		log(h)	-	33,4^{***} [30,8 – 35,9]	0,25	13,7	182
		\sqrt{h}	-	23,8 ^{***} [22,0 – 25,7]	0,21	14,0	183
		1/h	-	791,7 ^{***} [641,2 – 942,2]	-2,97	31,7	219

5.4. Discussion

5.4.1. Pertinence des méthodes non destructives pour l'estimation des volumes

Les deux méthodes testées (Relascope de Bitterlich et le Photogrammétrie) demandent une bonne visibilité du tronc et donc un dégagement de la végétation (Bauwens et al. 2017). Dans le cas particulier du relascope de Bitterlich, la distance à laquelle les mesures s'opèrent est proportionnelle au diamètre de l'arbre (ministère de la Coopération 1976). Bien qu'un layon ait été correctement dégagé entre l'opérateur des mesures et la base du fût, la densité de la végétation limite parfois la visualisation de la partie supérieure du fût. La détermination de la première branche, et donc de la hauteur du fût, était donc d'autant plus difficile que le diamètre des arbres était élevé. Ajoutés à cela, certains défauts, faisant varier la hauteur d'étêtage après abattage, n'étaient pas toujours visibles depuis le sol. Ces deux facteurs pourraient expliquer l'augmentation de l'imprécision des mesures entre les deux méthodes avec le volume (Figure 69-a.). Ces variations n'ont néanmoins pas induit de biais significatif entre celles-ci.

Les approches de photogrammétries pour la modélisation des fûts se focalisent généralement sur la base (jusque 5m) de ces derniers (Surový et al. 2016; Bauwens et al. 2017; Mokroš et al. 2018). L'utilisation du drone a permis de modéliser une portion plus importante du fût avec une hauteur moyenne des modèles de 15,5m et une hauteur maximale de 25,6m. L'absence de biais ainsi que le RMSE de 0,05 m² semble valider la précision des modèles dans l'intervalle de hauteur des tranches testés par la méthode de validation, soit entre 1,3 m et 16,34 m de haut. Les volumes obtenus sur base de tranches échantillonnées à des hauteurs supérieures à cet intervalle seront donc à considérer avec précaution. Il faut également noter l'imprécision observée entre les deux méthodes est plus importante à la base du fût (Figure 69-b.). Cela pourrait indiquer une difficulté des modèles à reproduire avec précision les sections cannelées. Les résultats obtenus restent néanmoins encourageants et de nouveaux tests, basés sur un échantillon d'arbres et sur une gamme de hauteurs supérieures, permettraient certainement de valider cette méthode.

5.4.2. Sélection des entrées et des équations de cubage

Bien que des modèles n'intégrant que le diamètre n'aient pas été testés, il est largement accepté que la hauteur du fût améliore les prédictions (Rondeux 1999; Akindele and LeMay 2006). C'est pourquoi elle a été retenue pour les deux espèces. Pour *S. mannii*, l'intégration de la profondeur de la plus grande cannelure dans le modèle s'est justifiée par une nette diminution de l'AIC qu'elle a apporté. Ce critère, proposé par Akaike (1974), pondère la vraisemblance de l'échantillon pour la valeur estimée du modèle avec le nombre de paramètres libres estimés (Picard et al. 2012c). Dès lors, à vraisemblance égale, le modèle ayant le moins de paramètres estimés sera favorisé. Ce critère respecte donc le principe de parcimonie qui, en

science, veut que les modèles expliquent un phénomène avec un minimum de cause. Dans l'équation choisie pour *S. mannii*, la soustraction de la profondeur de la cannelure n'implique pas d'estimer de paramètres supplémentaires à l'équation 4 qui est son équivalent à deux entrées (diamètre et hauteur). La diminution de l'AIC entre les deux modèles est donc expliquée par une nette augmentation de la vraisemblance de l'équation 10, qui se traduit par une diminution du RMSE. D'un point de vue pratique, cette nouvelle entrée n'est que peu contraignante, car elle peut être directement retranchée au diamètre par les opérateurs forestiers. Ce modèle parcimonieux, et aisément interprétable, permettra une nette amélioration de l'estimation de volumes de *S. mannii* à PW-CEB. En effet, lors du dernier inventaire d'aménagement des UFAs de PW-CEB, le diamètre des arbres de *S. mannii* était visuellement estimé sous les cannelures (Neve 2023). Concernant *P. macrophylla* le modèle minimisant l'AIC est pourtant celui qui nécessite d'estimer le plus de paramètres. Il reste donc peu parcimonieux et son utilisation n'est pas recommandée en dehors des intervalles de grandeurs des variables utilisées pour son ajustement. Pour cette espèce, il serait intéressant de tester d'autres modèles, plus particulièrement les modèles exponentiels, utilisés pour l'estimation de la biomasse (Picard et al. 2012c; Panzou et al. 2016).

5.4.3. Utilisation des classes de qualité pour l'estimation des volumes

Dans leurs révisions des tarifs de l'administration forestière Fayolle et al. (2014) et Ligot et al. (2018) ont mis en évidence un biais négatif significatif entre les volumes réellement exploités et les volumes prédits par les tarifs officiels. Ils précisent également que ce biais augmente généralement avec le diamètre de l'arbre. Les auteurs fournissent des pistes de réflexion quant à son origine : (i) la méthode ou la qualité des mesures de volumes utilisés pour l'ajustement des tarifs de l'administration n'est pas suffisante (ii) la conformation des arbres utilisés pour l'ajustement des tarifs de l'administration n'est pas la même que dans leurs échantillonnages, basés uniquement sur des arbres exploités. La méthode d'estimation des volumes de *P. macrophylla* étant la même que celle utilisée par l'administration camerounaise (Fayolle et al. 2013), il est possible de se focaliser sur la deuxième hypothèse. Pour optimiser les opérations forestières, les exploitants forestiers prélèvent préférentiellement les individus les mieux conformés (**Chapitre 1**). Dans les faits, seules les classes de qualités les plus élevées sont donc abattues. Pour vérifier l'effet de la sélection de l'exploitation, l'équation de cubage de *P. macrophylla* a été représentée graphiquement en prenant en compte la hauteur moyenne des arbres de chacune des classes de qualité attribuée durant cette étude (Figure 73-A.). Sur cette figure, la courbe pointillée correspond à l'équation utilisant la hauteur moyenne de l'échantillon, sensiblement équivalente à une équation ne prenant en compte que le diamètre. On constate que le biais entre les volumes prédit pour les arbres de qualité A et B et le volume prédit pour un arbre moyen est négatif et qu'il augmente avec le diamètre (Figure 72-B.). La relation

décroissante observée est exactement la même que celle constatée par Fayolle et al. (2014) et Ligot et al. (2018).

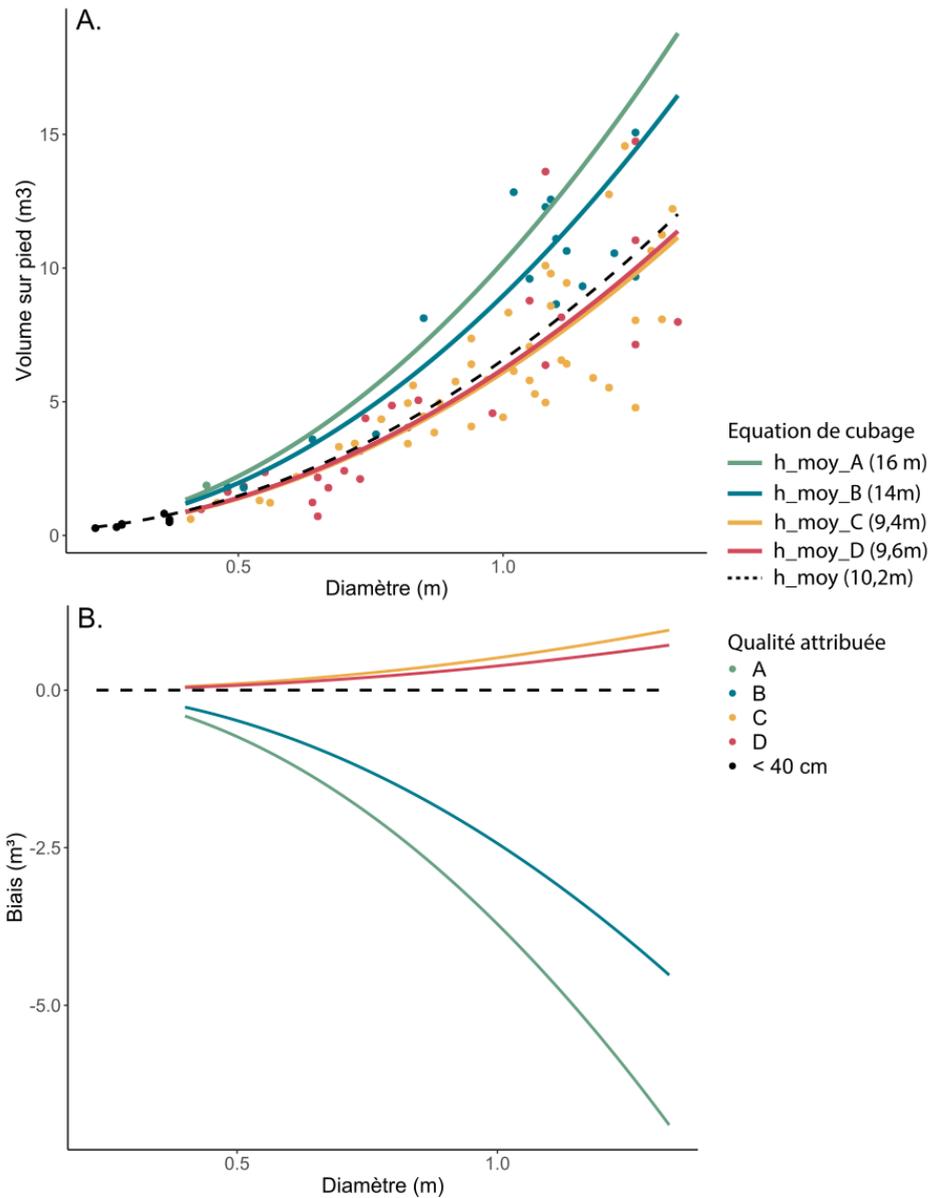


Figure 73: A. Représentation graphique de l'équation de cubage de *P. macrophylla* en fonction de la hauteur moyenne des fûts des arbres de chaque classe de qualité et de la hauteur moyenne de tous les arbres, indépendamment de la qualité (pointillé), B. Évolution du biais entre la prédiction du volume en utilisant la hauteur moyenne des arbres et la prédiction du volume utilisant la hauteur moyenne de chaque classe de qualité.

On peut dès lors supposer que les tarifs administratifs à une entrée évalués par les auteurs ont été ajustés sur un échantillon représentatif de l'ensemble de la population. Plus la population sera hétérogène et les individus de bonne qualité seront rares, plus leurs volumes devraient être sous-estimés avec un tarif à une entrée. C'est le cas de *P. macrophylla* où le biais entre le volume estimé pour un arbre moyen ($d=1\text{m}$) et celui estimé pour un arbre de qualité A ($d=1\text{m}$) atteint -3.7 m^3 (Figure 72-B.). Lors des inventaires d'exploitation, focalisés le volume réellement mobilisable, l'ajustement d'un tarif particulier tel que ceux de Fayolle et al. (2014) et Ligot et al. (2018) ou l'utilisation d'un tarif intégrant la hauteur des arbres est donc nécessaires. Malheureusement, la hauteur du fût n'est généralement pas mesurée lors de ces derniers. Elle est cependant estimée lors de l'attribution des classes de qualité (Tableau 14). Utiliser la hauteur moyenne des arbres par classe de qualité, tel que réalisé à la Figure 73, permet de simplifier l'implémentation de cette entrée dans le processus d'inventaire tout en améliorant la précision des tarifs. Dans le cas particulier de *P. macrophylla*, l'arbre de qualité A avait une hauteur de 16 m, ceux de la qualité B avaient une hauteur de fût moyenne de 14 m alors que ceux de la qualité C ne mesurent en moyenne que 9,5 m.

5.4.4. Rendements et conformation

Le coefficient de commercialisation peut varier fortement d'un site à l'autre. En moyenne de 52% (sous écorce) pour la Côte d'Yvoir (Lanly and Lepitre 1970), il atteint 83% (sur écorce) en moyenne à Pallisco-CIFM (Fotso 2021). *P. macrophylla* (81%) semble donc présenter un coefficient de commercialisation moyen pour sa zone d'étude. La variabilité de ces coefficients est en partie expliquée par la conformation des arbres. En effet, le coefficient de commercialisation de *P. macrophylla* augmente avec la hauteur du fût. Cela vient probablement de la présence d'un cœur creux à la base du fût, de longueur a priori constante, observé sur la plupart des arbres (Figure 74). Cette constante peut expliquer l'augmentation de la proportion du volume commercialisable avec l'augmentation de la hauteur du fût. Ce défaut est également observé pour *S. mannii*. Cependant, il est parfois accompagné d'une « gouttière » (Figure 74) dans la partie supérieure des fûts. Ces défauts survenant généralement suite à la perte d'une branche (Richter 2015) sont récurrents et difficilement détectables lors de la sélection des pieds, rendant le coefficient d'exploitation aléatoire. Contrairement à la seule étude sur ce sujet de Fournier-Djimbi and Fouquet (1998) pour *Aucoumea Klaineana*, aucune relation positive entre le coefficient de commercialisation et le diamètre n'a été observée.



Figure 74: A gauche, cœur creux observe à la base de la plupart des individus de *P. macrophylla*, à droite, au premier plan, portion supérieure d'une grume de *S. mannii* qui a été purgée suite à la présence d'une gouttière.

Les rendements sciage moyens des deux espèces sont faibles par rapport à la moyenne de 30% observée pour la sous-région (FRM 2018). Les rendements sciage ayant été calculés uniquement sur les arbres les mieux conformés (qualités A et B), exploiter des qualités d'arbres inférieurs semble illusoire avec les outils industriels actuels. Le diamètre des grumes est généralement un bon prédicteur du rendement sciage (Sandberg 2005; Riesco Muñoz et al. 2013), choisir un DME élevé permettrait donc théoriquement d'améliorer le rendement. Selon la régression entre le diamètre corrigé de *S. mannii* et son rendement, il serait possible d'atteindre 30% de rendement à partir d' 1,21 m de diamètre. Bien que le RMSE de la régression soit trop élevé pour le prédire avec précision, définir un DME d'1,2m devrait néanmoins améliorer les rendements moyens. La variabilité observée dans les rendements de cette espèce pourrait être expliquée par la fissure ou l'éclatement de certaines planches dans le processus de sciage. Ce défaut, déclassant une partie parfois importante de la production, peut être lié à la présence de fentes d'abattage, le relâchement de tensions de croissance ou la présence de bois de réaction (Richter 2015). Bien que les rendements des deux espèces soient faibles ils restent néanmoins comparables à certaines espèces sur leurs site d'études respectifs (Fotso 2021).

Chapitre 6

Dynamique et sylviculture



*Evaluation de la qualité d'un pied de *P. macrophylla**

Comme démontré dans le **Chapitre 5**, la qualité des arbres a une influence sur les volumes exploitables et les rendements de transformation. La durabilité de l'exploitation sur le moyen terme dépend donc du maintien d'arbres de qualité suffisante dans le peuplement au fil des rotations forestière. Pour le vérifier, ce chapitre ambitionne de modéliser l'évolution des effectifs exploitables, des volumes produits et de l'écrémage des espèces étudiées sous différents scénarii sylvicoles.

6.1. Introduction

Les modèles matriciels sont largement utilisés pour étudier l'évolution des populations de nombreux taxons. Contrairement au taux de reconstitution utilisé lors de l'aménagement, ces modèles ont l'avantage de pouvoir intégrer de nombreux processus biologiques (Picard et al. 2012a). Ils restent néanmoins sensibles aux paramètres qui les composent et plus particulièrement à la croissance des arbres dans le cas de la reconstitution de la ressource forestière (Picard et al. 2012a). Cette croissance peut elle-même être influencée par des facteurs biotiques et abiotiques inhérents au site d'étude tels que la fertilité du sol, la densité du peuplement ou encore l'accès à la lumière (King et al. 2005; Rozendaal et al. 2020; Gourlet-Fleury et al. 2023). Pour un même site, les modalités de gestion du peuplement influencent également l'accès à la lumière et donc la croissance des arbres (Ligot et al. 2019). À l'échelle de l'espèce, le site d'étude explique donc une part généralement importante de la variance de la croissance (Biwolé et al. 2019; Ligot et al. 2022; Gourlet-Fleury et al. 2023). Enfin, la croissance varie également en fonction du stade de développement de l'arbre, autrement appelé l'ontogénèse (Brienen and Zuidema 2006; Rozendaal et al. 2010, 2020; Biwolé 2015; Ligot et al. 2022).

La plupart des modèles évaluant la reconstitution de la ressource forestière se focalisent sur le nombre total d'arbres reconstitué après une rotation forestière (Sist et al. 2003; Gourlet-Fleury et al. 2005; Karsenty and Gourlet-Fleury 2006a; Biwolé 2015). Cette définition est pertinente pour vérifier le maintien des fonctions écologiques des populations (Collectif DYNAFAC 2021), mais reste limitée pour évaluer la durabilité de l'exploitation. En effet, comme l'a démontré le **Chapitre 5**, la conformation des arbres influence la rentabilité de leur exploitation. La rentabilité étant un des piliers de la gestion forestière durable (Leroy et al. 2013), elle doit être assurée tout en maintenant les fonctions écologiques du peuplement exploité. Or, en vérifiant l'évolution de la proportion d'arbres de qualité rentable, il serait possible d'évaluer dans quelle mesure l'exploitation engendre un écrémage des peuplements.

En conséquence, ce chapitre vise à (i) étudier la croissance des espèces et sa relation au stade ontogénique et (ii) modéliser l'évolution des effectifs exploitables, des volumes produits et de l'écrémage des espèces étudiées sous différents scénarios sylvicoles en intégrant la distribution initiale de la qualité des arbres dans les modèles.

6.2. Matériel et méthodes

6.2.1. Sites et espèces étudiés

La croissance des espèces a été étudiée dans les dispositifs DYNAFAC représentant le mieux le contexte de chaque site d'étude (Collectif DYNAFAC 2021). Le premier dispositif se situe dans la société forestière PW-CEB, plus précisément dans l'UFA 2 (Figure 75). Dans celui-ci, c'est la croissance de *D. pachyphyllum*, *D. lopense*, *D. polyanthum*, *D. bambidiense*, *K. gabonensis* et *S. mannii* qui a été suivie. La croissance de *P. macrophylla* a été suivie dans le dispositif de la concession forestière CIB-Olam, à Loundoungou en République du Congo (Figure 75). Le site de Loundoungou a été choisit car il est situé en forêt semi-sempervirente au même titre qu'une partie des UFAs de Pallisco-CIFM (Réjou-Méchain et al. 2021). N'ayant aucune donnée concernant *P. tessmannii*, sa croissance a été obtenue sur base des documents de l'administration camerounaise (MINFOF 2001). Les mesures ont été réalisées dans deux types de dispositifs: les parcelles et les sentiers. Les parcelles sont des dispositifs d'inventaire où l'ensemble des arbres, toutes espèces confondues, sont suivis sur une surface définie. Les sentiers sont des dispositifs, répartis dans une large superficie forestière, reliant entre eux les pieds d'essences commerciales. Dans les deux cas les arbres sont suivis périodiquement (tous les ans ou tous les deux ans).

L'évolution de la population des espèces cibles a été modélisée à partir des structures initiales de population. Elles ont été calculées sur base des inventaires d'aménagement de des deux sociétés forestières (Tableau 19). Pour Pallisco-CIFM, les UFAs 10-044,41,42 ont été choisies car elles présentent des densités significatives de *P. macrophylla* et *P. tessmannii* (Fétéké et al. 2004). Pour PW-CEB, l'UFA 2 a été choisie car le dispositif de suivis DYNAFAC s'y trouve. Les données de croissances devraient donc être particulièrement adaptées au contexte local. Pour cette UFA, seule l'évolution de population de *K. gabonensis* et *S. mannii* a été modélisée. L'inventaire ayant été réalisé avant la finalisation de cette thèse, les espèces de *Dialium* n'y ont pas été clairement distinguées. Au vu des différences de structure de population entre les espèces (**Chapitre 3**), il est impossible d'estimer la structure de chaque espèce sur base de l'inventaire d'aménagement.

Tableau 19: Surfaces inventoriées pour l'élaboration des plans d'aménagements des différentes UFAs de PWG-CEB et Pallisco-CIFM. DME = Diamètre Minimum d'Exploitation légale du Pays du site d'étude (cm).

Espèce	Concession	UFA	Surface inventoriée	DME
<i>K. gabonensis</i>	PW-CEB	UFA 2	1976 ha	70
<i>S. mannii</i>				60
<i>P. macrophylla</i>	Pallisco-CIFM	UFAs 10.041-42-44 regroupées	1136 ha	50
<i>P. tessmannii</i>				50

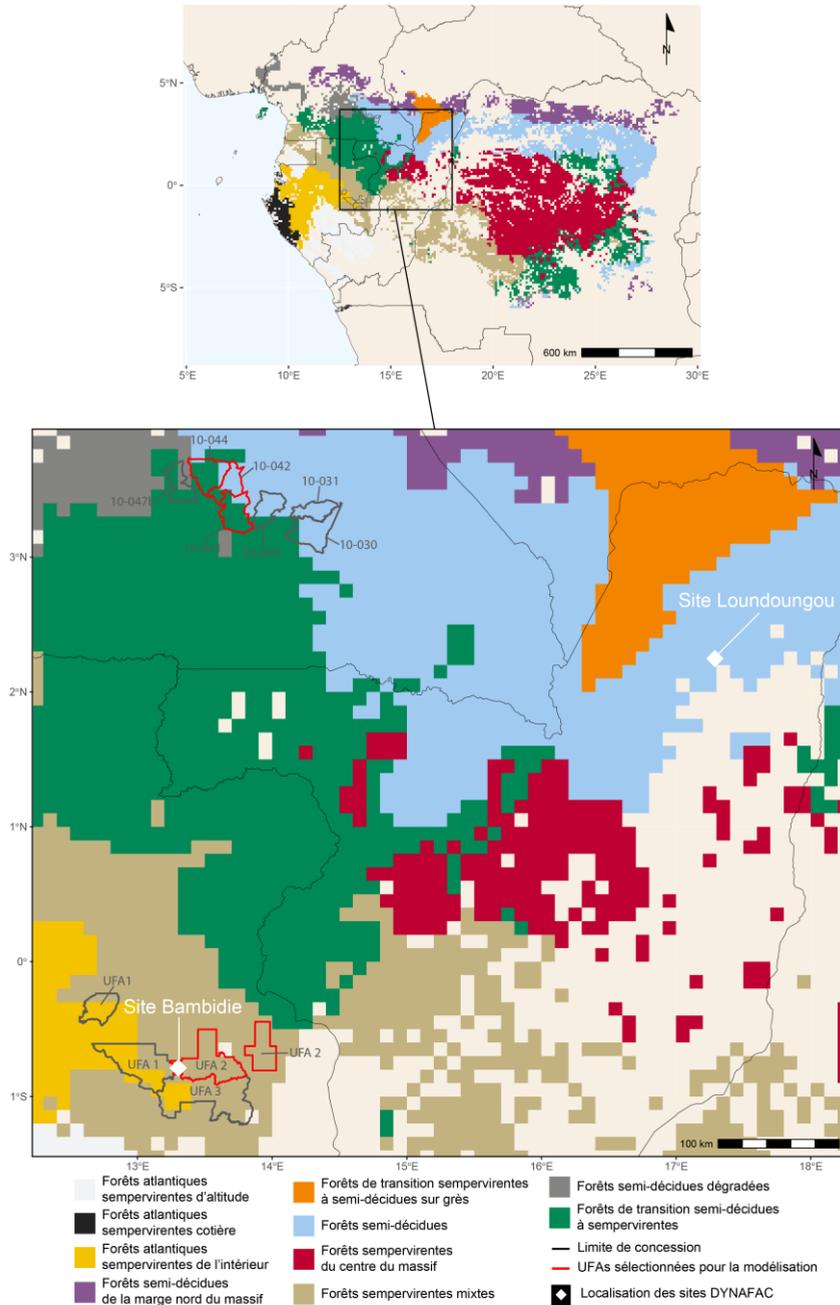


Figure 75: Localisation des dispositifs DYNAFAC utilisés pour mesurer la croissance des espèces et des UFAs dont l'inventaire d'aménagement a été utilisé pour modéliser l'évolution des populations.

6.2.2. Mesure de l'accroissement diamétrique

Dans chaque dispositif, les diamètres des arbres ont été mesurés à l'aide d'un mètre ruban avec une précision de l'ordre du mm. En l'absence de contreforts, de cannelures ou d'irrégularités, le diamètre a été pris à hauteur de poitrine, soit 1m30 (dbh). Dans le cas contraire, il a été mesuré soit 1m au-dessus des défauts, soit directement à 4m50 pour les espèces développant rapidement des contreforts ou cannelures. Les arbres issus du dispositif de parcelles de Bambidie ont été mesurés trois fois entre 2019 et 2022. La campagne de remesurage des sentiers ayant pris du retard, les arbres n'y ont été mesurés que deux fois, une mesure en 2019 et une mesure en 2021. Les arbres du dispositif de Loundougou ont été mesurés une fois en 2015 et une seconde fois en 2018 (Tableau 20).

Tableau 20: Localisation, type de dispositif, durée de suivi (d_suisvis) et nombre total d'arbres mesurés par espèce (n).

Espèce	Localisation	Dispositif	n_tot
<i>D. bambidiense</i>	Bambidie	Parcelles ; sentiers	106
<i>D. polyanthum</i>	Bambidie	Parcelles ; sentiers	137
<i>D. pachyphyllum</i>	Bambidie	Parcelles	231
<i>D. lopense</i>	Bambidie	Parcelles	8
<i>K. gabonensis</i>	Bambidie	Parcelles	54
<i>S. manni</i>	Bambidie	Parcelles	386
<i>P. macrophylla</i>	Loundougou	Parcelles ; sentiers	157
<i>P. tessmannii</i>	Bambidie	Parcelles	1

6.2.3. Distribution initiale de la qualité

Durant les inventaires d'aménagement, les arbres (dhp > 40cm) de chaque espèce, à l'exception de *P. macrophylla*, ont été classés dans 4 catégories de qualité selon des critères propres à chaque zone d'étude (Tableau 21). La distribution de la qualité de *P. macrophylla* a été estimée dans le **Chapitre 5**.

Tableau 21: Critères de classification de la qualité des arbres à PWG-CEB pour *K. gabonensis* et *S. mannii* et à Pallisco-CIFM pour *P. macrophylla* et *P. tessmannii*.

Classe	PW-CEB		Pallisco-CIFM
	Portion de fût sans défauts	Hauteur de fût	Défauts acceptables
A	Minimum une portion de plus de 12 m sans défauts.	+ 16 m	<u><10m</u> : Courbure < 1cm/m, nœud sain, blessure cicatrisée <u>>10m</u> : Courbure > 1cm/m, méplat, bosse, branche morte, gouttière peu accentuée.
B	Une portion de 8 m ou deux portions de 4 m sans défauts	12 à 16 m	<u><6m</u> : courbure < 4cm/m, méplat, bosse, branche morte, gouttière peu accentuée. <u>>6m</u> : courbure >4cm/m, nœuds sains ou pourris, blessures ouvertes, grains d'orge, trou, gros gourmand, 2 ou 3 branches vivantes.
C	Une portion de 6 m sans défauts	6 à 12 m	<u><6m</u> : courbure 4cm, nœuds sains ou pourris, blessures ouvertes, grains d'orge, trou, gros gourmand, 2 ou 3 branches vivantes.
D	Non exploitable	Non exploitable	Arbre de très mauvaise qualité (gros trous, cannelures profondes, fourches basses...).

6.2.4. Analyse des données

Mesure des accroissements et nettoyage des données

Les arbres ne présentant qu'une seule mesure (recrûs ou morts) ont premièrement été éliminés du jeu de données. Pour les dispositifs n'ayant été mesurés que deux fois, l'accroissement annuel diamétrique a été défini comme étant la différence entre la seconde mesure de diamètre et la première mesure de diamètre. Pour les dispositifs ayant été mesurés 3 fois, une régression linéaire entre le diamètre (d_i , exprimé en cm) et le temps écoulé depuis la première mesure (t_i , exprimé en années) a été ajustée pour chaque arbre (Equation 1).

$$d_i = a + b * t_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Où a et b sont les paramètres à ajuster et ε_i est le résidu. La valeur de la pente de cette régression (b) a été utilisée pour estimer l'accroissement.

Une fois l'accroissement de chaque arbre mesuré, les valeurs aberrantes, issues d'erreurs de mesures ou de la perte d'écorce, ont d'abord été éliminées. N'ayant maximum que 3 mesures, la méthode d'élimination des valeurs aberrantes basée sur la distance de Cooks et les résidus (Ligot et al. 2022) ne s'est pas avérée efficace. Dès lors, toutes les données en dessous du 1^{er} percentile et au-dessus du 99^{ème} percentile ont été considérées comme extrêmes. Elles ont ensuite été vérifiées et éliminées si besoin (Ligot et al. 2022).

Calcul de l'accroissement annuel moyen

L'accroissement annuel moyen a été calculé pour chaque espèce. La médiane ainsi que les valeurs minimale et maximale ont également été calculées. Un intervalle de confiance (alpha = 95%), faisant l'hypothèse que toutes les distributions sont normales, a également été calculé. Pour finir, le diamètre moyen des arbres a également été mesuré.

Modélisation de la croissance en fonction du diamètre

Pour ajuster un modèle de croissance, en prenant le diamètre comme prédicteur de l'accroissement annuel, les trois modèles utilisés par Biwolé et al. (2019), log normal (Equation 2), puissance (Equation 3) et Korf (Equation 4), ont été ajustés. Les modèles de croissance ont uniquement été ajustés pour les espèces dont le nombre d'individus suivis était supérieur à 40.

$$A_i = a * e^{-\left(b * \ln\left(\frac{c}{D_i}\right)\right)^2} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$A_i = a * D_i^b + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$A_i = a * D_i * \ln\left(\frac{b}{D_i}\right) + \varepsilon_i \quad (4)$$

Où A_i est le l'accroissement annuel prédit pour l'arbre i (cm/an), D_i est le diamètre de l'arbre i (m), a , b et c sont les paramètres du modèle à ajuster et ε_i est le résidu observé entre la valeur prédite et la valeur réelle mesurée. La sélection du meilleur modèle a été basée, d'une part sur la significativité des paramètres ajustés et, de l'autre, sur le critère d'information d'Akaike (AIC). L'erreur quadratique moyenne (RMSE), exprimée en cm/an, et le coefficient de détermination (R^2) ont également été calculés. L'ajustement de ces modèles non linéaires a été réalisé sur R (R Core Team 2023) avec le package *nlme* (Pinheiro et al. 2022).

Modèle de dynamique

L'évolution de la population des différentes espèces a été modélisée lors des rotations forestières successives à l'aide de la matrice d'Usher (Gourlet-Fleury et al. 2005; Picard et al. 2012b; Biwolé et al. 2019). Ce modèle permet de prédire l'évolution d'une population exprimée en nombre d'arbres vivants par classes de diamètre (Equation 5). Les effectifs d'arbres de chaque espèce ont été groupés en k classes de diamètre de 10 cm d'amplitude à partir de 20 cm de diamètre et jusque 140 cm. Tous les individus d'un diamètre supérieur à 140 cm ont été regroupés dans la même classe.

$$N_{i+1} = (G(P) + F) * N_i \quad (5)$$

N_i est un vecteur de longueur k contenant le nombre d'arbres dans chaque classe de diamètre à l'année i , N_1 étant la structure de population observée lors de

l'inventaire d'aménagement avant exploitation, N_{i+1} est un vecteur de longueur k contenant le nombre d'arbres dans chaque classe de diamètre à l'année $i+1$, $G(P)$ est la matrice de transition annuelle, de dimensions $k \times k$ entre les différentes classes de diamètre qui représente la croissance et la mortalité annuelles de l'espèce considérée (Equation 6). F est la matrice de fécondité qui correspond à la participation de chaque classe de diamètre au recrutement (Equation 7).

$$G(P) = \begin{bmatrix} 1 - p_1 - m_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ p_1 & \ddots & \ddots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 1 - p_i - m_i & \ddots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & p_i & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{(k-1)} & 1 - m_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & \dots & f_i & \dots & f_k \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dans ces matrices, p_i est la probabilité qu'un arbre se trouvant dans la classe de diamètre i survive et passe dans la classe de diamètre supérieure $i+1$, m_i est la mortalité de la classe i et f_i est la participation de la classe i au recrutement. La probabilité p_i est calculée selon l'Equation 8, où a_i est l'accroissement annuel de la valeur médiane de la classe de diamètre i (en cm/an), min_i est la valeur inférieure de la classe i (en cm), max_i est la valeur supérieure de la classe i (en cm).

$$p_i = \frac{a_i}{(min_i - max_i)} \quad (8)$$

La durée des suivis étant faible (2 à 3 ans), une estimation précise de la mortalité et du recrutement n'est pas fiable (Biwolé et al. 2019). Il a donc été décidé de calculer un taux annuel commun pour la mortalité et le recrutement appelé *turnover*, exprimé en %/an (Biwolé et al. 2019). Cette hypothèse considère que l'évolution de la population ne sera pas influencée par ces taux mais uniquement par les différentes méthodes sylvicoles testées. Le *turnover* a été calculé selon l'Equation 9 pour les espèces pour lesquelles plus de 100 individus ont été clairement identifiés et suivis dans les parcelles, soit seulement *S. mannii* et *P. macrophylla*. Dans cette équation, n_r est le nombre d'arbres recrutés durant la période de suivis, n_m est le nombre d'arbres morts durant la période de suivis et n_t est le nombre total d'arbres inventoriés lors de la campagne initiale d'inventaire et d est la durée du suivi (en année).

$$t = \frac{n_r + n_m}{2 * d * n_t} * 100 \quad (9)$$

Pour les autres espèces le *turnover* a été considéré comme équivalent à la mortalité moyenne de 1%, validée par Ligot et al. (2022). Pour finir, en l'absence de données quant à la relation entre l'ontogenèse et les deux paramètres estimés par le turnover, la mortalité (m_i) et le recrutement (f_i) ont été considérés comme égaux pour chaque classe de diamètre.

Pour modéliser l'exploitation forestière, une matrice d'exploitation (Équation 10) a été appliquée selon les durées de rotations forestières (r) des deux sites d'études, soit tous les 25 et 30 ans, respectivement pour PW-CEB et Pallisco-CIFM. Dans cette équation N_{i*r} est le vecteur de longueur k contenant la densité d'arbres dans chaque classe de diamètre à chaque multiple de la rotation forestière r , N_{i*r+1} est le vecteur k contenant le nombre d'arbres dans chaque classe de diamètre l'année après exploitation, E_α est une matrice de dimension $k \times k$ représentant l'exploitation forestière.

$$N_{i*r+1} = (G(P) * E_\alpha + F) * N_{i*r} \quad (10)$$

La matrice E_α est le produit de deux matrices diagonales, de dimensions $k \times k$ représentant, d'une part les dégâts d'exploitation sur le peuplement forestier (D , Équation 11) et la récolte des arbres ($P_{DMA\alpha}$, Equation 12).

$$D = \begin{bmatrix} 1 - \beta_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 1 - \beta_i & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \beta_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P_{DMA\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 1 - \alpha_{DMA} & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \alpha_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

Les dégâts d'exploitation subis par la classe de diamètre i (β_i) ont été estimés selon la formule utilisée par Picard et al. (2012). Cette formule (Equation 13) fait l'hypothèse que les dégâts moyens d'exploitation sont répartis selon une courbe sigmoïde décroissante jusque 70 cm de diamètre, seuil au-delà duquel les arbres ne sont plus impactés car (i) le risque d'interception des arbres en cours d'abattage est

trop élevé, (ii) ils ne peuvent plus être déracinés par les bœufs lors de l'ouverture des pistes et (iii) dans une exploitation certifiée FSC, ces arbres sont clairement marqués et protégés pour l'exploitation future (Van Der Hout 2000). Dans cette formule, D_i est le diamètre médian de la classe i , v est le seuil de diamètre au-delà duquel l'exploitation n'affecte plus les arbres, ici $v = 70\text{cm}$, ξ est un écart autour de ce seuil de 8cm (Picard et al. 2012b) et Z est une constante de normalisation pour que la moyenne des dégâts d'exploitation soit de 10% (ici $Z=0,0521$). Le seuil de 10% a été choisi car il est situé dans l'intervalle de prédiction de $6\%-11\%$ pour une exploitation de $1-2$ arbres/ha (Picard et al. 2012a).

$$\beta_i = Z * \left\{ 1 - \tanh\left(\frac{(D_i - v)}{\xi}\right) \right\} \quad (13)$$

La matrice $P_{DMA \alpha}$ est construite en fonction des deux paramètres sylvicoles à tester: le Diamètre Minimum d'Aménagement (DMA) et l'intensité du prélèvement (α). L'intensité du prélèvement correspond à la proportion d'arbres, dont le diamètre est supérieur au DMA, qui est effectivement prélevée lors de l'exploitation. Cette intensité a été considérée comme constante en fonction des classes de diamètre. Le DMA est la classe de diamètre à partir de laquelle les arbres sont prélevés.

Simulation de l'écrémage

L'écrémage de la population initiale a été simulé en la divisant en 4 sous-populations proportionnelles à la distribution initiale des 4 classes de qualités dans le peuplement (Equation 14).

$$N_{1j} = N_1 * p_{1j} \quad (14)$$

Où, N_{1j} est le vecteur représentant la structure initiale de population de la classe de qualité j , N_1 est la structure de population observée suite à l'inventaire d'aménagement et p_{1j} est la proportion d'arbres de la qualité j dans la population initiale. Nous avons donc fait l'hypothèse que cette proportion ne variait pas en fonction du diamètre. Cela se justifie par le fait que les espèces étudiées n'ont jamais été exploitées auparavant dans la zone d'étude. Leurs populations n'ont donc pas fait l'objet d'un écrémage antérieur.

Le modèle de dynamique a ensuite été appliqué à chaque sous-population distinctement en faisant les deux hypothèses simplificatrices suivantes : (i) les individus d'une classe de qualité donnée ne participent qu'au recrutement de jeunes arbres de qualité équivalente et (ii) la concession forestière exploite systématiquement tous les arbres de la plus haute qualité avant d'exploiter des arbres de qualité inférieure. Pour répondre à la deuxième hypothèse, le coefficient

d'exploitation (α) a été réparti entre les différentes sous-populations conformément au Tableau 22 à chaque rotation forestière.

Tableau 22: Répartition du coefficient d'exploitation sur les différentes sous-populations dépendantes de la qualité des arbres. α est le coefficient d'exploitation total (%), p_A , p_B et p_C sont les proportions d'arbres dans chaque classe de qualité exploitable juste avant exploitation, α_A , α_B , α_C et α_D sont les coefficients d'exploitation appliqués à chaque sous-population. A, B, C, D sont les quatre classes de qualité.

Condition	α_A	α_B	α_C	α_D
$\alpha \leq p_A$	$\frac{\alpha}{p_A} * 100$	0	0	0
$p_A < \alpha \leq p_A + p_B$	100	$\frac{(\alpha - p_A) * 100}{p_B}$	0	0
$p_A + p_B < \alpha \leq p_A + p_B + p_C$	100	100	$\frac{(\alpha - p_A - p_B) * 100}{p_C}$	0
$p_A + p_B + p_C < \alpha$	100	100	100	0

Comparaison des scénarios sylvicoles

Afin d'estimer l'effet de l'exploitation sur le moyen terme, l'évolution des populations a été modélisée sur 4 rotations forestières, soit 100 ans pour les espèces présentes à PW-CEB et 120 ans pour les espèces présentes à Pallisco-CIFM. Différents scénarios sylvicoles ont été testés. Un scénario sylvicole correspond à une combinaison d'un choix de DMA et d'une intensité d'exploitation (α). Pour évaluer ces scénarios, 5 indicateurs ont été mesurés : le taux de reconstitution de la première rotation prenant en compte toutes les classes de diamètre au-dessus du DMA (R_1), le volume produit à la première exploitation (V_1), le taux de reconstitution du stock initialement exploitable au bout des 4 rotations (R_4), le volume moyen produit par hectare et par rotation de chaque classe de qualité (V_a , V_b , V_c) et la proportion des différentes classes de qualité (A, B, C, D) dans la population à la fin de la modélisation. Parmi l'ensemble des scénarios sylvicoles testés, seuls deux ont été présentés. Le premier est le « scénario actuel » (SA), il représente une situation où l'opérateur forestier doit optimiser une production forestière rentable sur la première rotation tout en respectant les taux de reconstitution légaux⁸ (Karsenty et al. 2017). Dès lors, Pallisco-CIFM étant au Cameroun, l'exploitant n'est pas tenu de reconstituer le stock au-dessus des quatre classes de diamètre supérieures au DME. Au vu des résultats du chapitre précédent, la classe de qualité C sera considérée comme actuellement non rentable pour toutes les espèces testées et ne sera donc jamais collectée à la première rotation. Le

⁸ Les taux minimums de reconstitution légaux varient en fonction du pays. Au Gabon, il est nécessaire de reconstituer minimum 70% de l'ensemble du groupe d'essence autre que l'Okoumé et l'Ozigo avec un minimum de 40% par espèce. Au Cameroun, l'exploitant forestier doit assurer la reconstitution de minimum 50% des effectifs (4 classes de diamètre au dessus du DME) de chaque espèce.

scénario actuel maximise donc V_1 , sans prélever de qualité C à la première rotation, tout en maintenant R_1 supérieur au taux minimum de reconstitution du pays considéré. Le second scénario, « scénario prudent » (SP), représente une situation où les individus initialement non rentables ne sont prélevés à aucune rotation forestière, il essaye également de maintenir le stock initial de la ressource après 4 rotations forestières. Le scénario sélectionné ne prélève donc aucun arbres initialement non rentables ($V_c=0$), tout en faisant tendre R_4 vers 100%. Pour certaines espèces, R_4 n'atteint jamais 100%, le scénario sélectionné maximise alors la valeur de R_4 . Pour d'autres, certains scénarios permettent un R_4 supérieur à 100%, le scénario sélectionné est celui qui se rapproche le plus de 100% pour éviter une surcapitalisation du volume et maximiser V_a et V_b .

Les volumes prélevés ont été estimés en utilisant les équations ajustées au **Chapitre 5**. Pour *P. macrophylla*, les tarifs ont été modifiés en fonction de la classe de qualité pour répondre aux recommandations de ce même chapitre. En l'absence d'une hauteur moyenne des individus de *S. mannii* par classe de qualité, la hauteur moyenne (19,8m) des fûts des arbres prélevés pour l'estimation des rendements au **Chapitre 5** a été appliquée à toutes les qualités exploitables. Pour les autres espèces, les équations proposées par Bile Allogho (1999), Azegue Temgoua (2004) et par le Ministère des Forêts et de la Faune (2005) ont été utilisées. Lors de l'inventaire d'aménagement de l'UFA 2 pour PW-CEB, le diamètre des individus de *S. mannii* a été estimé à 1m30 par projection visuelle du tronc sous les cannelures (Neve 2023). Le diamètre mentionné dans cet inventaire devrait donc approximativement correspondre au diamètre corrigé utilisé pour l'élaboration du tarif de cubage au **Chapitre 5**.

6.3. Résultats

6.3.1. Accroissement annuel moyen

Le diamètre moyen des arbres étudiés était compris entre 24 cm (*P. macrophylla*) et 65 cm (*D. bambidiense*). L'Accroissement diamétrique Annuel Moyen (AAM) a varié de 0,27 cm/an pour *K. gabonensis* à 0,52 cm/an pour *S. mannii* (Tableau 23), sur une durée de suivi de 2 à 3 ans. L'accroissement maximal a été observé pour *S. mannii* avec une valeur de 3,0 cm/an (Tableau 23).

Tableau 23: Accroissement diamétrique annuel moyen de chaque espèce (m, en cm), nombre d'individus caractérisé après suppressions des valeurs aberrantes (n), écart-type (σ , en cm), valeurs minimum et maximum (min et max, en cm) et diamètre moyen des arbres mesurés (m_dhp, en cm).

Espèce	n	m	IC ₉₅	min	max	m_dhp
<i>D. bambidiense</i>	102	0,50	[0,43 - 0,57]	-0,25	1,34	65
<i>D. polyanthum</i>	133	0,42	[0,37 - 0,48]	-0,31	1,48	56
<i>D. pachyphyllum</i>	226	0,29	[0,25 - 0,33]	-0,44	1,19	18
<i>D. lopense</i>	8	0,28	[0,02 - 0,53]	-0,08	0,75	62
<i>K. gabonensis</i>	50	0,27	[0,18 - 0,37]	-0,05	1,82	32
<i>S. mannii</i>	360	0,52	[0,43 - 0,58]	-1,93	3,00	60
<i>P. macrophylla</i>	157	0,30	[0,23 - 0,36]	0	1,90	24

6.3.2. Modèles de croissance

Les modèles retenus expliquent de 2% (*S. mannii*) à 20% (*K. gabonensis*) de la variance totale de la croissance des arbres (Tableau 24, Figure 76). Des valeurs faibles à moyennes qui sont habituelles pour des modèles utilisant le diamètre comme variable explicative de la croissance (Ligot et al. 2022; Gourlet-Fleury et al. 2023). Le modèle de Korf a été sélectionné pour *D. bambidiense* et *D. polyanthum* et le modèle puissance pour *D. pachyphyllum*. Pour *P. macrophylla*, c'est le modèle log normal qui minimise l'AIC et qui a été retenu. Les paramètres d'ajustement de ce modèle étant aisément interprétables (Canham et al. 2004; Biwolé et al. 2019), on peut estimer que *P. macrophylla* atteint son accroissement annuel maximal de 0,60 cm/an (paramètre a du modèle log normal) à 67 cm de diamètre (paramètre c du modèle log normal). Cependant, la forme de la courbe semble être fortement influencée par un seul individu dépassant 80 cm de diamètre. Pour *K. gabonensis* et *S. mannii* le modèle log normal a également été retenu. Leur accroissement annuel maximal serait respectivement de 0,47 cm/an à 46 cm de diamètre et de 0,59 cm/an à 79 cm de diamètre.

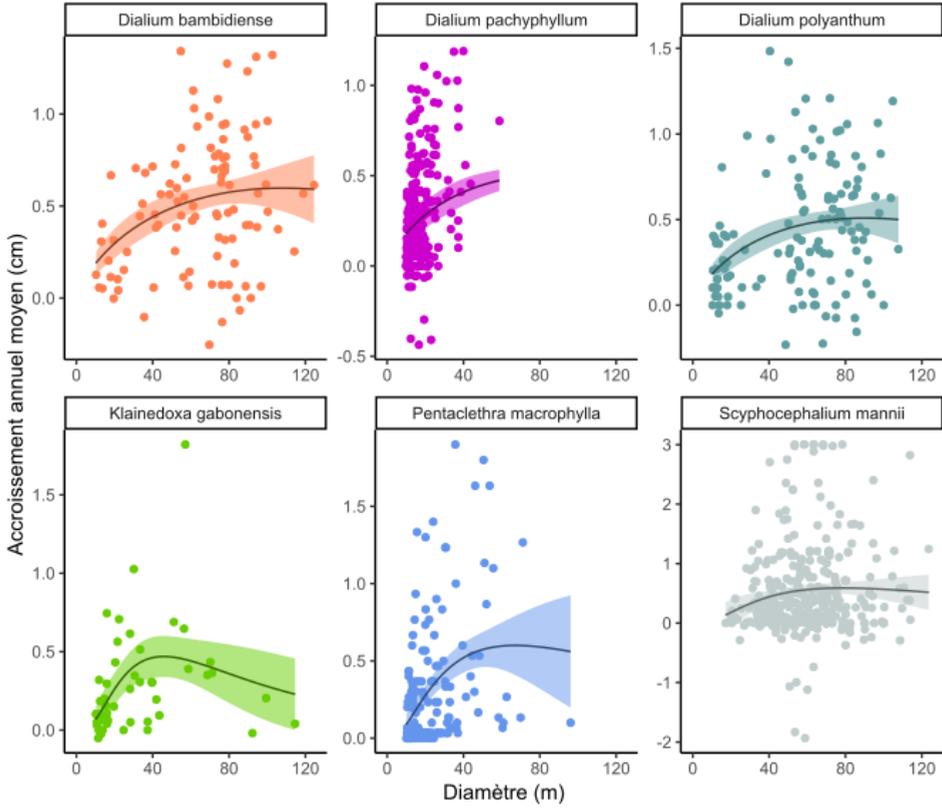


Figure 76: Variation de l'accroissement annuel en fonction du diamètre pour les espèces dont les modèles étaient significatifs.

Tableau 24: Ajustement des modèles de croissance reliant l'accroissement annuel diamétrique (cm/an) au diamètre pour les espèces dont un minimum de 40 arbres a été suivi. Pour chaque équation (Eq), les paramètres ajustés sont présentés avec leurs p-valeur (^{ns}, *, ** et *** correspondent respectivement à $p > 0,05$; $0,05 \geq p > 0,01$; $0,01 \geq p > 0,001$ et $p \leq 0,001$) ainsi que leur intervalle de confiance à 95% entre crochet. Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE, en m^3) et le critère d'information d'Akaike (AIC) sont également présentés. Le meilleur modèle selon les paramètres présentés est présenté en gras pour chaque espèce.

Espèce	Eq	a	b	c	R^2	RMSE	AIC
<i>D. bambidiense</i>	Log-normal	0,58*** [0,48 – 0,69]	0,60* [-1,09 – -0,99]	92,68 ^{ns} [-6,17 – 191,53]	0,12	0,33	74
	Puissance	0,08 ^{ns} [-0,03 – 0,20]	0,44** [0,12 – 0,76]	-	0,10	0,34	73
	Korf	0,006** [0,002 – 0,009]	294,16* [54,71 – 533,61]	-	0,11	0,33	72
<i>D. polyanthum</i>	Log-normal	0,50*** [0,39 – 0,62]	0,48* [0,01 – 0,95]	92,079 ^{ns} [-72,01 – 256,15]	0,10	0,34	99
	Puissance	0,08 ^{ns} [-0,01 – 0,18]	0,41** [0,14 – 0,69]	-	0,09	0,34	98
	Korf	0,006** [0,002 – 0,009]	245,38** [70,08 – 420,69]	-	0,10	0,34	98
<i>D. pachyphyllum</i>	Log-normal	1,51 ^{ns} [-6,00 – 9,03]	0,40 ^{ns} [-0,33 – 1,125]	437,14 ^{ns} [-4272,27 – 5146,56]	0,15	0,28	67
	Puissance	0,02* [0,00 – 0,04]	0,93*** [0,67 – 1,20]	-	0,15	0,28	66
	Korf	0,001 ^{ns} [-0,003 – 0,005]	3,3e6 ^{ns} [-1,7e6 – 17 ^e 6]	-	0,15	0,28	66
<i>K. gabonensis</i>	Log-normal	0,47*** [0,31 – 0,63]	0,92*** [0,47 – 1,40]	45,79*** [26,65 – 64,92]	0,20	0,29	27
	Puissance	0,08 ^{ns} [-0,05 – 0,20]	0,39 ^{ns} [-0,06 – 0,83]	-	0,08	0,31	31
	Korf	0,007** [0,003 – 0,011]	152,96** [62,77 – 243,16]	-	0,15	0,30	28
<i>S. mannii</i>	Log-normal	0,59*** [0,48 – 0,70]	0,80* [0,04 – 1,55]	78,69** [24,71 – 132,66]	0,02	0,74	816
	Puissance	0,10 ^{ns} [-0,09 – 0,28]	0,41 ^{ns} [-0,04 – 0,87]	-	0,01	0,75	816
	Korf	0,006** [0,002 – 0,010]	293,13 ^{ns} [-22,45 – 608,72]	-	0,01	0,74	815
<i>P. macrophylla</i>	Log-normal	0,60*** [0,37 – 0,83]	0,73** [0,28 – 1,18]	67,15* [1,64 – 132,66]	0,15	0,37	142
	Puissance	0,03 ^{ns} [-0,00 – 0,06]	0,74 ^{ns} [0,042 – 1,06]	-	0,12	0,38	144
	Korf	0,00 ^{ns} [0,00 – 0,01]	857,71 ^{ns} [-1961,38 – 3676,81]	-	0,13	0,37	143

6.3.3. Etat initial de la ressource

K. gabonensis et *P. macrophylla* ont une structure globalement décroissante mettant en avant une bonne régénération de la population. *K. gabonensis* a plus de 85% de sa population classée dans les deux meilleures classes de qualité. Cette espèce est présente à raison de 0,91 pied/ha dans l'UFA 2 avec 0,16 pied/ha au-dessus du DME. Contrairement à *K. gabonensis*, la population de *P. macrophylla* est composée majoritairement d'arbre de qualité C (57%) avec seulement 21% des pieds dans les deux meilleures classes de qualités. Elle est abondante dans les UFAs de Pallisco-CIFM avec 3,73 pieds/ha dont 1,90 pied/ha dépassent le DME (Tableau 25). *S. mannii* présente une structure de population en cloche avec une grande proportion d'arbres entre 50 et 70 cm de diamètre. Les qualités A et B ne représentent que 50% de la population de cette espèce. Elle est présente à très haute densité (12,88 arbres/ha), y compris au-dessus du DME (3,62 arbres/ha). *P. tessmannii* présente une structure de population vieillissante avec une grande proportion d'individus de gros diamètres. Il y a néanmoins une recrudescence du recrutement dans la première classe de diamètre. Seuls 43% des arbres de cette espèce sont classés dans les deux premières catégories de qualité. Elle est présente à de faible densité (0,16 arbre/ha) avec une très grande partie de sa population au-dessus du DME (0,13 arbre/ha).

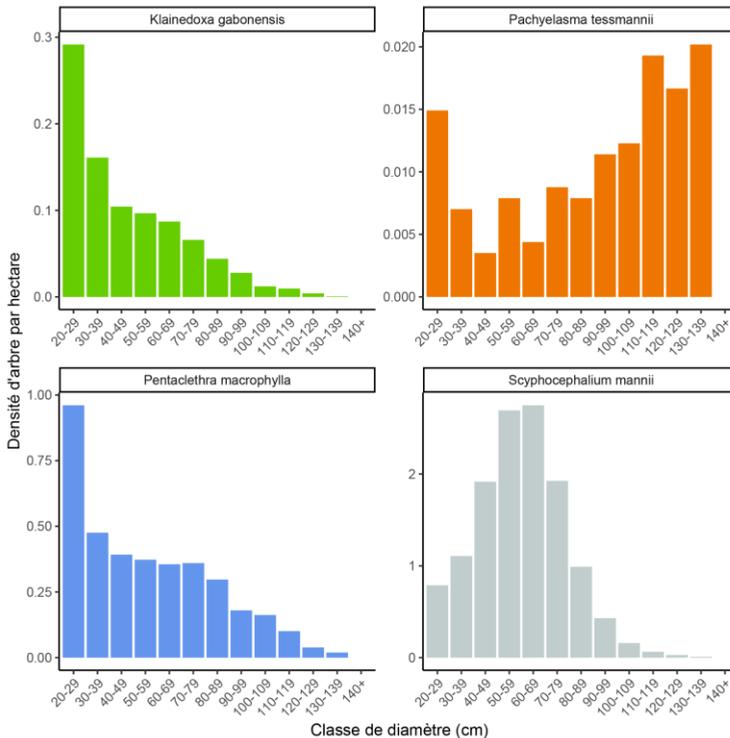


Figure 77: Structure initiale de population de *Klainedoxa gabonensis*, *Pachyelasma tessmannii*, *Pentaclethra macrophylla* et *Scyphocephalum mannii*.

Tableau 25: Proportions initiales (p_1) des différentes classes de qualité (A, B, C, D) pour les populations de *Klainedoxa gabonensis*, *Scyphocephalum mannii*, *Pachyelasma tessmannii* et *Pentaclethra macrophylla*.

Espèce	Densité totale (arbres/ha)	Densité > DME (arbres/ha)	p_{1A} (%)	p_{1B} (%)	p_{1C} (%)	p_{1D} (%)
<i>K. gabonensis</i>	0,91	0,16	58,5	27,8	6,37	7,26
<i>S. mannii</i>	12,88	3,62	17,7	34,5	21,2	26,6
<i>P. macrophylla</i>	3,73	1,90	1,0	20,0	57,0	22,0
<i>P. tessmannii</i>	0,16	0,13	21,0	23,0	49,0	7,0

6.3.4. Scénarios à moyen terme

Les variables utilisées pour chaque modèle sont récapitulées dans le Tableau 26. Au vu de la faible part de la variance de la croissance de *S. mannii* expliquée par le modèle de Korf ($R^2=0,02$), l'accroissement annuel moyen (0,52 cm/an) a été préféré pour définir la matrice de transition annuelle. L'AAM de *P. tessmannii* ne pouvant être estimé en raison des faibles effectifs suivis, c'est la valeur de 0,4 cm proposée par l'administration forestière camerounaise qui a dû être utilisée. Les scénarios produits pour chaque espèce sont repris dans l'Annexe 10. Les recommandations du **Chapitre 5**, concernant les rendements de transformation, ont été prises en compte pour *P. macrophylla* et *S. mannii* : les diamètres respectivement en dessous de 1m et de 1,2m n'ont pas été considérés.

Dans le « scénario actuel » (SA), les volumes totaux prélevés, sans considération pour la qualité, montrent différentes trajectoires. Pour *K. gabonensis* et *P. tessmannii* on observe une diminution du volume total collecté après la première rotation. Pour les deux autres espèces, le volume total prélevé augmente. Celui de *P. macrophylla* il augmente jusqu'à la troisième rotation puis semble se stabiliser alors qu'il augmente exponentiellement pour *S. mannii*. Pour chaque espèce, la qualité C est prélevée dès la deuxième rotation, à l'exception de *S. mannii* (Figures 76 à 81-a.). Pour cette espèce, le DMA choisi combiné à son AAM élevé suffit pour éviter le prélèvement d'arbres de qualité C jusqu'à la troisième exploitation. Dans ce scénario, la reconstitution du stock sur 4 rotations est faible pour *K. gabonensis* (40%) et très faible pour *P. tessmannii* (6%). Pour les deux autres espèces, il y a une capitalisation du nombre de tiges au-dessus du DMA avec une reconstitution de 211% et 3776% après 4 rotations pour *P. macrophylla* et *S. mannii*.

Le choix du « scénario prudent » (SP), induit une baisse systématique du coefficient d'exploitation pour maintenir une production exclusive des qualités A et B à moyen terme (Figure 78 à Figure 81). De cette réduction du coefficient d'exploitation découle une diminution inévitable du volume prélevé à la première exploitation (Tableau 27). Dans ce scénario, seul le volume total prélevé de *P. tessmannii* diminue au fil des rotations. Pour les autres espèces, le prélèvement total est, soit constant, soit en augmentation au fil des rotations. Ces variations de

volumes totaux collectés influencent les taux de reconstitutions de la ressource. Seul le taux de reconstitution sur 4 rotations de *P. tessmannii* est inférieur à 100%.

Les volumes moyens prélevés dans la classe de qualité A sont globalement équivalents entre les deux méthodes à l'exception de *K. gabonensis*. Pour cette espèce, les volumes prélevés sont inférieurs dans le SP. La proportion des qualités A et B dans la population diminue à la fin de tous les scénarios.

Tableau 26: Résumé des variables utilisées pour modéliser l'évolution des populations des espèces étudiées. p_{1A} , p_{1B} , p_{1C} et p_{1D} sont les proportions initiales (%) de la population dans les différentes classes de qualité, a_i est l'accroissement annuel (cm/an) de la classe i , D_i est le diamètre (cm) médian de la classe i , H_{moy} est la hauteur moyenne (19,5 m) du fût des individus de *S. mannii* utilisés pour l'élaboration du tarif de cubage au Chapitre 5, H_j est la hauteur moyenne du fût de *P. macrophylla* en fonction de la classe de qualité j ($H_A=16$ m, $H_B=13$ m et $H_C=9$ m), R = rotation forestière (années), t = turnover (%).

Espèce	p_{1A}	p_{1B}	p_{1C}	p_{1D}	a_i	V_{ij}	R	t
<i>K. gabonensis</i>	58,5	27,8	6,37	7,26	$0,40e^{-(-0,83 \ln(\frac{39,39}{D_i}))^2}$	$0,000347 * D_i^{2,21}$ (Azegue Temgoua 2004)	25	1
<i>S. mannii</i>	17,7	34,5	21,2	26,6	0,52	$0,577 * D_{-C_i}^2 * H_{moy}$	25	0,2
<i>P. macrophylla</i>	1,0	20,0	50,0	29,0	$0,60e^{-(0,73 \ln(\frac{67,15}{D_i}))^2}$	$0,190 - 0,121 * D_i * H_j + 0,748 * D_i^2 * H_j$	30	0,6
<i>P. tessmannii</i>	21,0	23,0	49,0	7,0	0,40	$0,000461 * D_i^{2,17}$ (Ministère des Forêts et de la Faune 2005)	30	1

Tableau 27: Présentation des scénarios retenus. V_1 est le volume prélevé lors de la première exploitation (m³/ha), R_4 est le taux de reconstitution après 4 rotations (%), V_a , V_b et V_c sont les volumes moyens collectés (m³/ha/rotation), A, B, C et D sont les proportions de chaque classe de qualité dans la population totale après les 4 rotations (%).

Espèces	Scénario «situation actuelle»											Scénario «situation prudente»												
	α	DMA	R_1	V_1	R_4	V_a	V_b	V_c	A	B	C	D	α	DMA	R_1	V_1	R_4	V_a	V_b	V_c	A	B	C	D
<i>K. gabonensis</i>	80	70	59	0,94	40	0,33	0,16	0,035	55	27	7	11	65	90	93	0,37	102	0,24	0,1	0	56	28	7	8
<i>S. mannii</i>	50	120	385	0,56	3776	1,88	3,67	0,621	17	34	22	27	40	120	391	0,45	3998	1,88	3,22	0	17	34	22	27
<i>P. macrophylla</i>	20	100	171	0,78	211	0,04	0,85	0,592	1	16	59	24	10	100	179	0,39	240	0,04	0,76	0	1	17	60	23
<i>P. tessmannii</i>	40	90	41	0,66	6	0,09	0,1	0,078	12	14	62	12	35	140	58	0,18	14	0,05	0,05	0	20	22	51	7

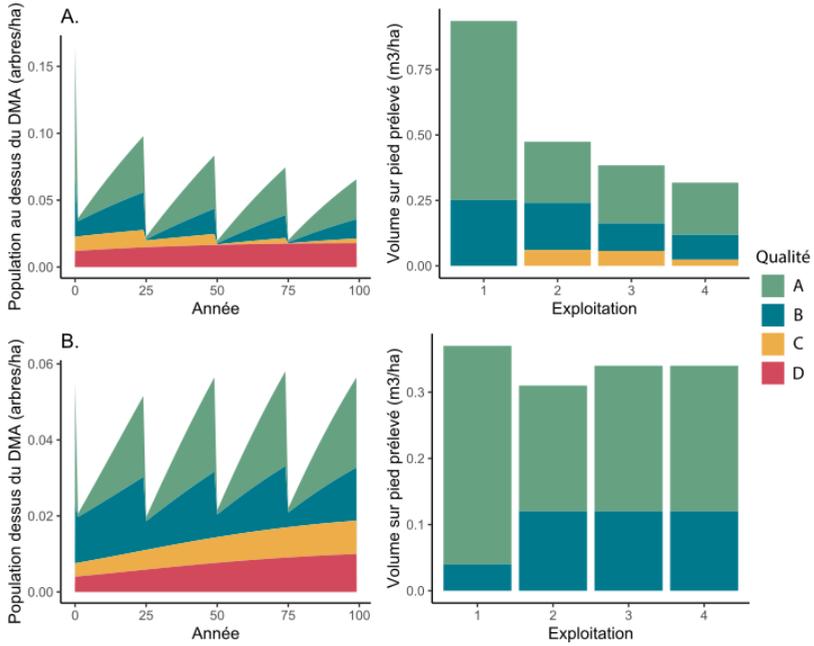


Figure 78: Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de *Klainedoxa gabonensis*. A. Scénario actuel B. Scénario prudent.

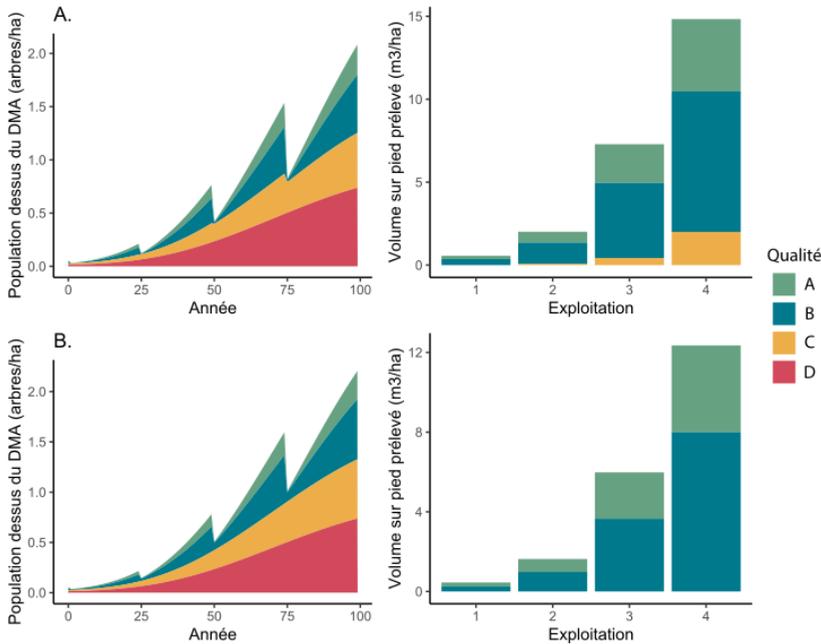


Figure 79: Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de *Scyphocephalum mannii*. A. Scénario actuel B. Scénario prudent.

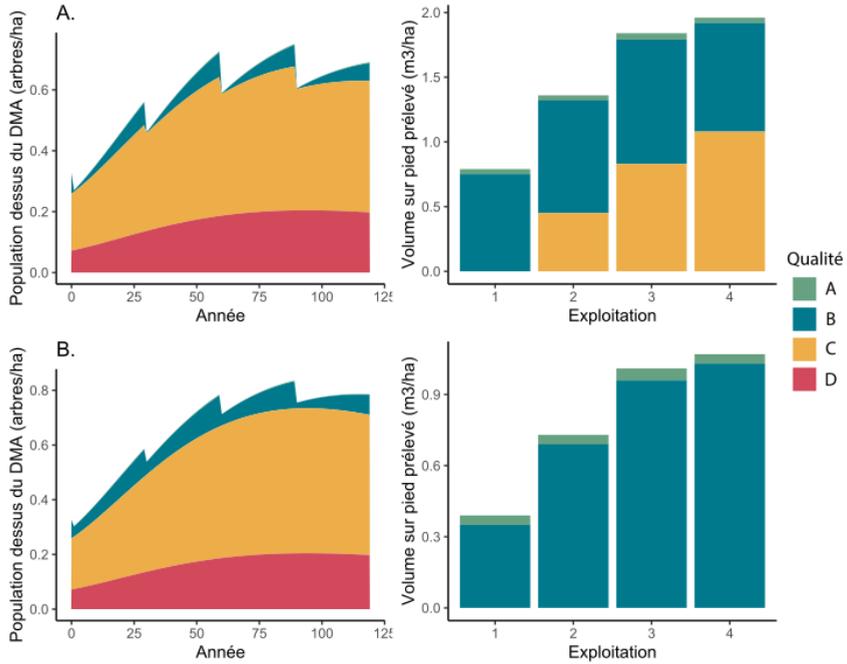


Figure 80: Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de *Pentaclethra macrophylla*. A. Scénario actuel B. Scénario prudent.

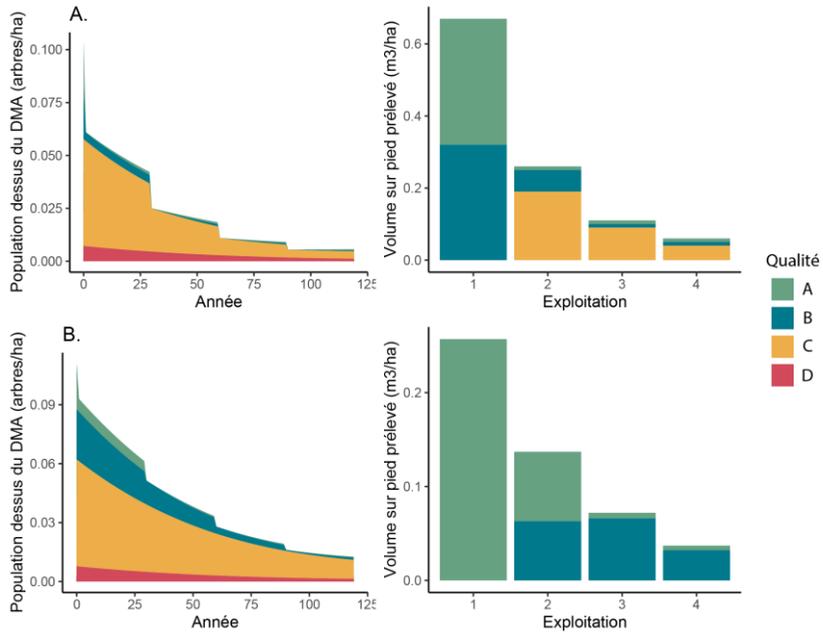


Figure 81: Evolution de la population au-dessus du DMA et des volumes prélevés à chaque rotation de *Pachyelasma tessmannii*. A. Scénario actuel B. Scénario prudent.

6.4. Discussion

6.4.1. Variations de la croissance

Les Accroissements diamétriques Annuels Moyens (AAM) des *Dialium* varient en fonction des espèces. En considérant les IC₉₅ calculés, L'AAM de *D. bambidiense* (0,50 cm/an ; IC₉₅ = [0,43-0,57]) et de *D. polyanthum* (0,42 cm/an ; IC₉₅ = [0,37-0,48]) seraient significativement supérieurs à celui de *D. pachyphyllum* (0,29 cm/an ; IC₉₅ = [0,25-0,33]). Néanmoins les valeurs moyennes sont difficilement comparables car l'accroissement est dépendant de l'ontogenèse des arbres et donc des structures de population (Brienen and Zuidema 2006; Rozendaal et al. 2010; Ligot et al. 2022; Gourlet-Fleury et al. 2023). Dans le cas des *Dialium*, le diamètre de l'arbre explique 10 à 15% de la variation de la croissance. Le modèle de croissance de *D. bambidiense* ne semble pas significativement différent de celui de *D. polyanthum* (Tableau 24). Pour ces deux espèces, on constate une augmentation progressive de l'accroissement jusqu'à un palier, proche de 80cm de diamètre, alors que le modèle de *D. pachyphyllum* montre une augmentation plus rapide sans tendance à se stabiliser (Figure 76). *D. pachyphyllum* n'atteignant pas de très grandes dimensions (Rojo 1982), cette différence pourrait être due à un manque de représentativité dans les plus hautes classes de diamètre que cette espèce peut atteindre. Pour éviter ce genre de biais, une répartition homogène de l'effectif serait nécessaire. Dans leur étude, Ligot et al. échantillonnent 20 arbres par classe de diamètre pour ajuster leurs modèles. À l'échelle de la communauté végétale, les *Dialium* 3-5 folioles (particulièrement *D. bambidiense* et *D. polyanthum*) ont une croissance élevée compte tenu de la densité de leur bois (Rozendaal et al. 2020; Gourlet-Fleury et al. 2023). Ces espèces ont des AAM comparables aux espèces ayant une densité comprise entre 200 et 400 kg/m³ selon Gourlet-Fleury et al. (2023). Au vu de la densité de population de ce taxon dans les forêts gabonaises (4,25 arbres/ha en moyenne à PW-CEB, jusque 6,42 arbres/ha dans l'UFA 1), ces espèces participent significativement à l'accroissement annuel de la biomasse des forêts du centre du Gabon telles que définies par Poulsen et al. (2020).

Les autres espèces possédant un bois de haute densité (*K. gabonensis* et *P. macrophylla*) ont des AAM plus faibles, proches des moyennes observées par Gourlet-Fleury et al. (2023). L'AAM mesuré de *K. gabonensis* (0,27 cm/an ; IC₉₅ = [0,18-0,37]) est significativement inférieur à la valeur de 0,45 cm/an utilisée dans le plan d'aménagement de PW-CEB en 2015, avant la mise en place du dispositif de suivis. La valeur de 0,4 cm/an mentionnée par le MINFOF (2001) et Laporte et Doucet (2013) est également significativement supérieure. Dans ce cas-ci, l'utilisation des valeurs consignées dans le plan d'aménagement ou dans la littérature aurait certainement induit une surestimation de la reconstitution de la ressource. Cet exemple démontre une fois encore la nécessité d'utiliser des données de croissance adaptées au site d'étude (Collectif DYNAFAC 2021).

L'accroissement élevé de *S. mannii* (0,52 cm/an ; IC₉₅ = [0,43-0,58]) est à considérer avec précaution car plusieurs mesures à 3 cm/an, réparties de manière

anormalement homogène en fonction du diamètre (Figure 76), tirent la moyenne vers le haut. Cette valeur reste néanmoins plausible au vu des résultats de Ligot et al. (2022) qui enregistrent des AAM jusque 1,47 cm/an pour *Triplochyton scleroxylon* dans le dispositif de Djoum au Cameroun. Concernant *P. tessmannii*, il serait nécessaire d'installer des dispositifs afin de préciser sa vitesse de croissance.

6.4.2. Validité des modèles de dynamique

Bien qu'essayant de représenter au mieux le contexte de chaque site d'étude, les modèles de dynamique utilisés comportent certaines faiblesses:

- (i) Comme mentionné précédemment, les hypothèses émises pour simuler l'écrémage des peuplements simplifient la réalité. En effet, le prélèvement des arbres en forêt est en réalité dépendant des contrats. Les exploitants peuvent donc ponctuellement récolter des qualités inférieures pour remplir les contrats urgents avant d'épuiser la totalité des plus hautes qualités d'une UFA. La répartition de la qualité dans la population est également simplifiée. En effet, la division de la population en 4 sous-populations qui ne contribuent qu'à leurs propres recrutements ne prend pas en compte l'ontogenèse des arbres. A la sénescence, observée dans les plus hautes classes de diamètre atteignables par une espèce, les arbres dépérissent et perdent ainsi en qualité. Ne pas la prendre en compte revient à surestimer la proportion d'arbres rentables dans les plus hautes classes de diamètre ;
- (ii) Dans ce modèle, les paramètres sylvicoles choisis au début de la modélisation sont répétés à chaque rotation. En pratique, ces paramètres sont réévalués à chaque rotation et peuvent donc changer pour s'adapter à l'évolution du contexte légal, mais aussi de la ressource ;
- (iii) La distribution initiale de la qualité de *P. macrophylla* n'a été estimée que sur un nombre très limité d'arbres (84) ;
- (iv) Les modèles de croissance de *K. gabonensis* et *P. macrophylla* ont été ajustés sur un échantillon de population peu représentatif des larges individus. Plus particulièrement, la courbe de *P. macrophylla* est fortement influencée par un seul individu au-dessus de 80 cm. L'incertitude quant à l'accroissement de cette espèce est très élevée au-delà de 60 cm de diamètre. De plus, l'utilisation de ces modèles ou d'un taux fixe ne prend pas en compte la variabilité individuelle qui peut significativement influencer le taux de reconstitution (Brienen and Zuidema 2006; Rozendaal et al. 2010) ;

Néanmoins, ces modèles n'ont pas pour vocation de prédire avec précision les volumes et taux de reconstitution attendu pour chaque espèce. Ils servent uniquement à estimer les conséquences de différents scénarios d'exploitation sur les espèces étudiées.

6.4.3. Relation entre la qualité des arbres et la dynamique

La distribution de la qualité d'une espèce exploitée influence indirectement la dynamique de sa population. Pour le vérifier, les scénarios de *P. macrophylla* et de *K. gabonensis* peuvent être comparés. Avec une structure de population semblable (Figure 77), la population au-dessus du DMA des deux espèces évolue différemment dans les deux scénarios présentés (Figure 78 et Figure 80). Cette différence pourrait être expliquée par le DMA choisi. Néanmoins, à DMA semblables dans le SP (90 cm et 100 cm respectivement pour *K. gabonensis* et *P. macrophylla*), les taux de reconstitution R_1 et R_4 restent radicalement différents. La seule variable restante pour expliquer cette divergence est le coefficient d'exploitation, qui est six fois plus élevé chez *K. gabonensis* dans le SP. Étant lui-même influencé par la proportion d'arbres initialement exploitables, cette dernière contribue indirectement à l'intensité des prélèvements. Les espèces dont les arbres sont majoritairement bien conformés telles que *K. gabonensis*, seront donc plus exploitées que les autres. C'est pourquoi les volumes au-dessus du DMA de *K. gabonensis* diminuent drastiquement dès la deuxième rotation dans le SA. Pour assurer de maintenir les qualités A et B sur le moyen terme dans le SP, cette espèce est celle dont le coefficient d'exploitation diminue le plus, malgré une augmentation du DMA de deux classes de diamètre. Dès lors, paradoxalement, plus le potentiel de mobilisation d'une espèce en forêt est élevé, plus les prélèvements, et donc le volume initialement exploitable, doivent être limités pour assurer son maintien sur le moyen terme. Néanmoins, des analyses complémentaires, telles que les analyses de sensibilité (Guedje et al. 2003; Picard et al. 2012b), devraient être menées pour nuancer cette conclusion en clarifiant le rôle de chaque variable dans la dynamique de population.

6.4.4. Une production durable sur le moyen terme ?

Considérant les hypothèses et paramètres utilisés pour la construction des modèles, une production rentable de *K. gabonensis*, *S. manni* et *P. macrophylla* est envisageable sur le moyen terme.

En faisant l'hypothèse que seules les qualités A et B restent rentables au fil des rotations, seuls les scénarios prudents permettent de maintenir une production rentable sur le moyen terme de ces espèces. Ce scénario implique néanmoins une réduction du coefficient d'exploitation, proportionnelle à l'effectif initialement rentable, par rapport au SA. En renonçant à une partie volume rentable dès la première rotation, l'exploitant assure une production totale constante ou en augmentation au fil des rotations. De plus, ce scénario permet d'exploiter le même volume moyen de qualité A que les scénarios actuels (à l'exception de *K. gabonensis*) et un volume légèrement inférieur à la qualité B. Malheureusement, cette perspective n'est envisageable qu'en adoptant une vision au-delà de la première rotation, ce qui n'est actuellement pas le cas en Afrique Centrale (Doucet 2003; Mabika et al. 2003; Karsenty and Gourlet-Fleury 2006a; Picard et al. 2012b). Le système actuel n'engage l'état et l'exploitant que pour la durée d'une rotation

(Louppe and Mille 2015). Au-delà, ce dernier n'a aucune garantie de pouvoir continuer à exploiter la zone qui lui a initialement été concédée. Les incertitudes quant à la pérennité de leurs concessions (Karsenty and Vermeulen 2016) obligent les gestionnaires à rentabiliser leurs investissements dès la première rotation. Ces pressions économiques ne laissent alors que peu de marge de manœuvre pour la capitalisation d'un volume de qualité en forêt. De plus, les scénarios envisagés nécessitent de pouvoir choisir un coefficient d'exploitation pour modéliser l'évolution de la ressource. D'un point de vue légal, seuls la RDC et le Cameroun permettent à l'exploitant de définir ce coefficient dans les plans d'aménagement. Dans la politique d'harmonisation d'une partie des lois forestière pour l'Afrique Centrale proposée par FRM (2018) et le Collectif DYNAFAC (2021), l'utilisation de ce taux pourrait également être généralisée. Pour que le scénario prudent puisse être adopté, une attribution de la concession pour 2 ou 3 rotations serait également nécessaire.

Une deuxième hypothèse serait que l'arrivée de nouvelles technologies industrielles, survenant suite au découplage entre l'exploitation forestière et la transformation, permettent de valoriser les qualités inférieures (Karsenty et al. 2008; Collectif DYNAFAC 2021; Karsenty 2021). Dans ce cas, certains « scénarios actuels » permettraient également de maintenir une production soutenue sur le moyen terme. C'est le cas pour *P. macrophylla* et *S. mannii*. Pour ces espèces, le scénario actuel permet le maintien, voire l'augmentation des stocks exploitables, tout en évitant les arbres non exploitables (qualité D). En exploitant également la qualité C, il permet une production moyenne totale plus élevée que le scénario prudent.

Le volume produit par arbre de *P. tessmannii* compense sa faible densité de population et permet de produire des volumes équivalents aux autres espèces à la première rotation. Néanmoins sa structure de population vieillissante ne permet de reconstituer, au mieux, que 14% de stock initialement exploitable après 4 rotations. Dans le SA, il est légalement possible de ne reconstituer que 41% du stock à la première rotation, engendrant une reconstitution de seulement 6% du stock initialement exploitable après 4 rotations. Cette situation met en lumière la faiblesse du système de « bonus » de la législation Camerounaise. En effet, les espèces peu étudiées, tel que les espèces secondaires se voient systématiquement attribuées un DME de 50 cm (MINFOF 2001). Il n'existe donc actuellement aucune obligation de reconstituer les stocks de ces espèces au-delà de 90cm de diamètre, seuil au-delà duquel se trouve une grande partie de la population de *P. tessmannii*. Les arbres monumentaux exploités, et composant majoritairement sa population, contribuent à la structure verticale des forêts, moteur clé de la diversité biologique de plusieurs taxons (Yuan et al. 2012; Gouveia et al. 2014; Martins et al. 2017). Les intérêts économiques à très court terme qu'offre cette espèce ne justifient pas de sacrifier son rôle écologique. Nous recommandons d'être extrêmement prudent si son exploitation est envisagée, en limitant au maximum les prélèvements et en compensant le manque de régénération. Bien que ses besoins en lumière soient

encore débattus (Hubau et al. 2012; Fayolle et al. 2012; Doucet et al. 2021), la recrudescence du recrutement observée (Figure 77) pourrait coïncider avec le début de l'exploitation de cette zone dans les années 90 (Fétéké et al. 2004). L'ouverture de la canopée suite aux opérations forestières aurait fourni des conditions d'éclaircissement suffisantes pour sa régénération. Les graines de l'espèce sont effectivement dormantes et germent dans les trouées où les semenciers ont été abattus (Neve 2023). En conséquence, cette espèce serait plutôt recommandée pour les opérations de reboisement.

Enfin, aucun des scénarios ne semble résoudre la problématique de l'écrémage. Bien que le scénario prudent limite l'augmentation de la proportion de la qualité D à la fin de la simulation, l'exploitation exclusive des meilleures classes de qualité diminue inévitablement leur proportion totale dans la population. Ce phénomène pourrait néanmoins être atténué par la protection des tiges d'avenir lors de l'exploitation qui n'a pas été prise en compte dans le modèle. Si, les tiges d'avenir les mieux conformées sont correctement protégées, les dégâts d'exploitation devraient être redirigés sur les classes de qualité inférieures. Cela diminuerait la proportion globale des arbres de moins bonne qualité dans le peuplement. D'autres méthodes, tel que le maintien de semenciers de bonnes qualités ou l'enrichissement des peuplements avec des plants produits à partir de semences sélectionnées devraient être mises en place pour atténuer ce phénomène (collectif DYNAFAC 2021).

Chapitre 7

Discussion générale et perspectives



La présente thèse ambitionnait d'évaluer le potentiel de valorisation durable, dans le cadre de l'exploitation sélective, d'une série d'espèces secondaires reprises sous 5 appellations commerciales différentes : le Mubala, l'Eyek, l'Eveuss, l'Ossoko et l'Omvong. Pour y parvenir, cette recherche a été divisée en deux parties. La première visait à identifier l'ensemble des espèces reprises sous l'une de ces appellations commerciales. Elle s'est donc focalisée sur les Omvong, un vocable gabonais regroupant différentes espèces de *Dialium* aux feuilles composées de 5 folioles. Pour y parvenir, nous avons distingué les différents morphotypes de ce genre sur base de leurs traits foliaires, de la composition chimique de leur bois, de leur morphologie et de leur écologie (Figure 82). Une fois toutes les espèces identifiées, la seconde partie visait à évaluer le potentiel de valorisation des 5 essences étudiées sur le moyen terme. Pour ce faire, une approche multidisciplinaire combinant la science du bois, la dendrométrie, la modélisation et la dynamique des populations a été adoptée (Figure 84).

7.1. La distinction des espèces morphologiquement proches : le cas de *Dialium*

Nos résultats montrent que 4 espèces sont reprises sous le vocable Omvong dont une nouvelle espèce: *Dialium bambidiense* (Figure 82). Cette dernière, au même titre que *D. lopense*, est restreinte au Gabon alors que *D. polyanthum* et *D. pachyphyllum* sont plus largement distribuées. Dans les forêts sempervirentes mixtes (Réjou-Méchain et al. 2021) du site d'étude, les 4 espèces sont présentes à des densités significativement différentes, de moins de 0,06 pied/ha (*D. lopense*) à 14,4 pieds/ha (*D. pachyphyllum*). Leurs structures de populations sont également différentes. *D. polyanthum* et *D. pachyphyllum* ont une bonne régénération naturelle alors que *D. bambidiense* semble montrer un ralentissement de cette dernière. Elles ont également des préférences topographiques différentes avec une absence notable de *D. bambidiense* des zones marécageuses. Au-delà de ces différences écologiques, elles sont également morphologiquement différentes selon de nombreux traits botaniques (**Chapitre 3**). Notamment, *D. pachyphyllum*, dont les arbres sont plus petits, n'atteint pas les dimensions d'exploitabilité. Pour les trois espèces exploitables, une clef d'identification des feuilles, sur base de traits significativement différents entre les espèces, a été réalisée (**Chapitre 2**). Finalement, la composition chimique du bois de *D. bambidiense* diffère significativement de *D. polyanthum*. Les différences observées par dosage analytique entre ces espèces ont ensuite été confirmées appuyées avec l'ajustement d'un modèle permettant de distinguer le bois de ces espèces sur base de spectre FTIR (**Chapitre 2**).

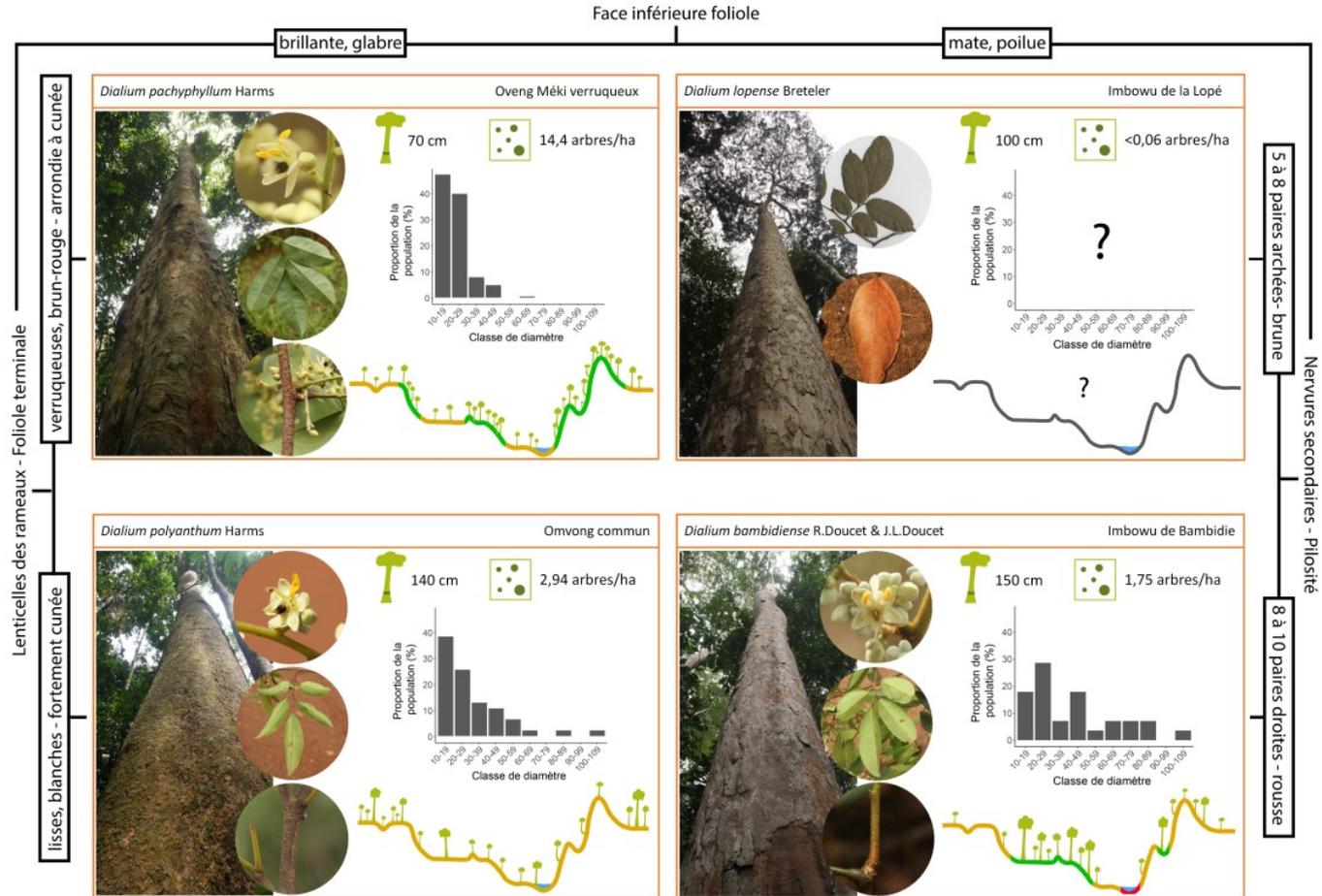


Figure 82: Clef d'identification des *Dialium* à 5 folioles sur base de matériel stérile et récapitulatif de l'écologie connue de chaque espèce.

7.1.1. Pertinence de la nomenclature des *Dialium*

Selon nos résultats, seuls *D. polyanthum* et *D. pachyphyllum* possèdent une régénération soutenue dans les forêts matures étudiées. Pourtant, cette caractéristique est extrapolée au Omvong de manière générale dans ce type de forêt (Bengono et al. 2021a). Cette différence pourrait être expliquée par le tempérament des espèces. *D. bambidiense* aurait des besoins en lumière situés entre ceux de *D. lopense*, plutôt savanicole (Breteler 1993), et les deux autres. Il est donc probable que ces espèces apparaissent séquentiellement dans les stades évolutifs forestiers. Elles ont également des préférences topographiques différentes avec une absence notable de *D. bambidiense* dans les zones marécageuses. C'est pourquoi nous pensons que le taxon *Dialium polyanthum* et/ou *Dialium angolense* mentionné par Doucet (2003) comme appartenant au fond commun des forêts Centro-gabonaises, pourrait en réalité contenir 3 espèces : *D. polyanthum*, *D. pachyphyllum* et *D. bambidiense*. La proportion de ces espèces varierait selon la typologie forestière et son stade de succession. Au-delà des différences écologiques observées entre les espèces de ce genre, toutes ne sont pas exploitables. En effet, *D. pachyphyllum*, l'espèce la plus abondante, n'atteint généralement pas le DME gabonais de 70 cm de diamètre (Rojo 1982). Une planification de l'exploitation sur base de l'inventaire combiné de toutes ces espèces reviendrait à : (i) sous-estimer la reconstitution des espèces réellement exploitables sur le moyen terme, (ii) modifier leurs proportions naturelles dans le peuplement et (iii) faire pression sur les taxons plus vulnérables sans s'en rendre compte, dans ce cas-ci sur *D. bambidiense* et *D. lopense* (Gayot and Sist 2004; Dainou et al. 2016; Mboma et al. 2022; **Chapitre 3**). Pour ces raisons, il est évident que l'appellation Omvong, au même titre que n'importe quel regroupement commercial, n'a pas de raison d'être dans le contexte de l'exploitation et de la gestion des forêts (Doucet 2003; Doumenge et al. 2016; Bouka Dipelet et al. 2019; Mboma et al. 2022). Les inventaires d'aménagement de PW-CEB ayant été finalisés avant cette thèse, les différentes espèces de *Dialium* à 5 folioles n'y ont malheureusement pas été différenciées et sont toutes reprises sous le même nom. C'est pourquoi aucun scénario d'exploitation n'a été abordé au pour les *Dialium* dans le **Chapitre 6**.

Au-delà des conséquences écologiques que peuvent avoir les groupements commerciaux, ils peuvent également tromper le consommateur (Helgason et al. 1996; Wieringa 1999). Le **Chapitre 4** a mis en évidence une différence significative de durabilité naturelle entre *D. bambidiense* et les deux autres espèces. Selon plusieurs documents (FRM 2018; ATIBT 2022a, b), l'Omvong serait une essence de classe d'emplois 4 et pourrait venir en appui à la production d'Azobé, de Tali et d'Okan. Inclure *D. bambidiense*, dont la classe d'emplois n'est que de 3.1, risque de mettre en péril la durabilité des ouvrages. Cela ternirait la réputation de cette essence auprès des consommateurs et donc ses chances de valorisation. C'est pourquoi une étude approfondie des propriétés des bois de chaque espèce est préférable avant de valoriser de nouvelles espèces sous une même appellation.

Néanmoins, lorsqu'ils sont correctement réalisés, ces regroupements permettent de: (i) mutualiser les volumes d'espèces, qui vendues seules, ne présentent pas un volume intéressant pour l'industrie, (ii) faciliter les opérations de vente et l'acceptation des espèces sur le marché, (iii) substituer des essences ayant été raréfiée par l'exploitation par d'autres espèces mieux adaptées aux méthodes sylvicoles (Détienne and Vernay 2011; ATIBT 2016; FRM 2018). Dans une stratégie de diversification de la production par des essences secondaires, les appellations commerciales restent donc pertinentes pour la vente de bois. Il faut cependant veiller à créer des groupes commerciaux qui (i) n'amalgament pas des espèces à large distribution aux espèces espèces vulnérables et (ii) dont les propriétés du bois sont homogènes entre les espèces (Détienne and Vernay 2011). Les propriétés du bois utilisées pour les regroupements ne sont cependant pas transférables d'un genre à l'autre. En Asie tropicale, les genres *Shorea* et *Parashorea* comptent plus de 50 espèces commerciales importantes classées sous 4 à 10 vocables commerciaux en fonction des nomenclatures (Gottwald 1968; Durand 1985; ATIBT 2016). Les groupements de ces genres se basent uniquement sur la couleur et la densité du bois. Si ces critères sont pertinents pour des espèces globalement utilisées en menuiseries et faiblement exposées à l'humidité (Gérard et al. 2017), ils ne le sont pas pour le genre que nous avons étudié. Pour les *Dialium*, la classe d'emplois semble être le facteur limitant et devrait être utilisée pour améliorer la nomenclature du genre.

La nomenclature actuelle regroupe l'ensemble des espèces de *Dialium* de la région guinéo-congolaise sous une appellation commerciale unique « Eyoum » (ATIBT 2016). Sur base de nos résultats (**Chapitre 2 et 3**) et de la **Publication 1**, nous proposons de l'actualiser, du moins pour les espèces à 5 folioles retrouvées dans les forêts denses humides. Les espèces dont les folioles sont glabres, dont les arbres atteignent de grandes dimensions (30-40 m) et dont l'aire de distribution est large sont regroupées sous l'appellation « Omvong » : *D. polyanthum*, *D. corbisieri*, *D. pentandrum* et *D. aubrevillei*. Selon nos résultats, *D. polyanthum* et *D. aubrevillei* couvrirait la classe d'emplois 4. Nous recommandons néanmoins de mener des essais complémentaires sur *D. pentandrum* et *D. corbisieri* pour valider cette classe d'emplois. Les espèces dont les folioles sont pubescentes sur la face inférieure, dont l'aire de distribution est réduite au Gabon sont regroupées sous l'appellation « Imbowu » : *D. bambidiense* et *D. lopense*. Cette appellation correspond à la désignation de ces espèces en langue Kota, dialecte utilisé dans le Haut-Ogooué et l'Ogooué-Lolo au Gabon. Nous proposons de limiter la classe d'utilisation de ce groupe à celle de *D. bambidiense*, soit 3.1. Les espèces dont les arbres atteignent des dimensions moyennes (25-30 m), dont les folioles sont glabres et l'aire de distribution est moyenne à large sont regroupées sous l'appellation « Oveng Méki » : *D. pachyphyllum*, *D. gossweileri*, *D. reygartii*. Cette appellation désigne généralement *D. pachyphyllum* dans les dialectes du groupe ethnique Fang (Meunier et al. 2015). Selon la **Publication 1**, *D. pachyphyllum* couvrirait la classe d'emplois 4, nous attribuons pour l'instant cette classe d'emplois au groupe en

l'attente d'étude complémentaires sur les bois *D. gossweileri* et *D. reygartii*. La dernière espèce, dont le statut de conservation officiel est préoccupant, est *D. eurysepalum* que nous proposons d'inclure sous une appellation unique. N'ayant pas d'information quant à ses noms vernaculaires, nous proposons Eurysepalum en l'attente d'un nom plus pertinent. Nous ne pouvons statuer sur les autres espèces de *Dialium* que nous maintenons sous l'appellation Eyoum. Néanmoins, une révision de la nomenclature des Eyoums et des propriétés du bois des espèces qui y sont reprises est nécessaire.

Tableau 28: Proposition de revision de la nomenclature des *Dialium* de la region guinéo-congolaise. Les statuts UICN mentionné sont: Non évalué (NE), Préoccupation mineure (LC), Quasi menace (NT), En danger (EN). Le symbole * indique que le statut renseigné est estimé, non reconnu par IUCN. Le symbole ^b indique que les propriétés du bois sont connues et qu'elles contribuent à l'attribution de la classe de qualité pour l'appellation.

Appelation	Morphologie	Espèces reprises	UICN	Distribution	Classe d'emploi
Omvong	Arbres grands (30-40m)	<i>D. polyanthum</i> ^b	LC	Controguinéen	4
	Folioles glabres	<i>D. corbsieri</i>	NE	Congolais	
	Ecorce écailleuse	<i>D. pentandrum</i>	NT	Congolais	
		<i>D. aubrevillei</i> ^b	LC	Guinéen supérieur	
Imbowu	Arbres grands (30-50m)				3.1
	Folioles pubescentes sur la face inférieure	<i>D. bambidiense</i> ^b	EN*	Gabon	
	Ecorce écailleuse	<i>D. lopense</i> ^b	LC	Gabon	
Oveng Méki	Arbres moyens (25-30m)	<i>D. pachyphyllum</i> ^b	LC	Centroguinéen	4
	Folioles glabres	<i>D. gossweileri</i>	NE	Mayombe	
	Ecorce écailleuse	<i>D. reygartii</i>	NT	Foret du centre RDC	
Eurysepalum	Arbres moyens Folioles pubérulentes sur la face inférieure Ecorce lisse	<i>D. eurysepalum</i>	EN	Gabon	?
Eyoum	Arbrisseaux ou Arbres petits à grands (15-40m) 3-17 folioles soit pubescentes sur la face inférieure, soit glabres Ecorce lisse ou écailleuse	<i>D. spp.</i>	-	-	?

7.1.2. L'identification des espèces, une problématique sur le terrain

Dans le cadre de l'exploitation sélective, l'unité de gestion devrait donc être l'espèce. Les noms scientifiques étant parfois peu appropriables, une solution est de décliner l'appellation commerciale par une épithète spécifique (Mboma et al. 2022). Dans le cas des *Dialium* à 5 folioles étudiés, les appellations Imbowu de la Lopé (*D. lopense*), Imbowu de Bambidie (*D. bambidiense*), Omvong commun (*D. polyanthum*) et Oveng Méki verruqueux (*D. pachyphyllum*) pourraient, par exemple, être utilisées. Malheureusement, une dénomination claire n'est pas synonyme d'une gestion durable des populations.

Mboma et al. (2022) l'illustre au travers du cas de l'Andoung au Gabon. Cette appellation commerciale regroupe neuf espèces des genres *Aphanocalyx* et *Bikinia* (ATIBT 2016), initialement regroupées dans le genre *Monopetalanthus* (Wieringa 1999). Sur les 308 arbres identifiés comme Andoung dans les inventaires forestiers analysés par les auteurs, seul 65% correspondaient effectivement à ces neuf espèces. Dans le cas où le prospecteur mentionnait une épithète spécifique en plus du nom commercial, il n'était correct qu'à raison de 11%. Brancalion et al. (2018) font le même constat pour l'Ipé, essence de haute valeur commerciale au Brésil regroupant les espèces du genre *Handroanthus*. Seul 61% des 152 arbres inventoriés sous cette appellation appartenaient effectivement au genre botanique considéré. La première cause de confusion identifiée est un problème de transfert des connaissances du monde scientifique vers le secteur industriel (Iglésias et al. 2010; Mboma et al. 2022).

Si la taxonomie de nombreux clades a été mise à jour depuis l'implémentation des normes d'aménagement (Bremer et al. 2009; Daïnou et al. 2016; Azani et al. 2017; Ewédjè et al. 2020), elle n'est généralement pas traduite dans les lois forestières. Dès lors, les seules entreprises ayant connaissance de ces avancées sont celles qui hébergent la recherche, généralement les concessions certifiées durables. Une actualisation régulière des lois forestière est donc nécessaire pour diffuser les avancées scientifiques à l'ensemble des acteurs et assurer une meilleure gestion des populations d'arbres. Si les états ont leur part de responsabilité dans la transmission de l'information, les scientifiques doivent également adapter leurs pratiques. En effet, les classifications des taxonomistes, généralement basées sur des herbiers fertiles, ne sont pas toujours utilisables par les prospecteurs. Sur le terrain, seuls le tronc et les feuilles au sol sont accessibles aux opérateurs toute l'année. C'est pourquoi, comme réalisé dans le **Chapitre 2**, des clefs d'identification sur base de matériel stériles devraient être fournies en parallèles des clefs traditionnelles. Au-delà du manque de connaissance, certains auteurs attribuent ces confusions à une fraude volontaire pour augmenter les volumes d'espèces à haute valeur commerciale (Détienne 1979; Brancalion et al. 2018; Xue et al. 2022).

Pour l'éviter, des systèmes de contrôle efficaces tant en forêts qu'aux douanes doivent être mis en place (Brancalion et al. 2018). Si la vérification en forêts peut

être réalisée par un botaniste averti, l'identification du bois est plus complexe. En effet, la microscopie traditionnelle ne se limite généralement qu'à une identification précise du genre, sans aller jusqu'à l'espèce (Gasson 2011; Price et al. 2022). C'est pourquoi des méthodes telles que spectroscopie et la chimiométrie se sont largement développées pour la lutte contre l'exploitation illégale (Tsuchikawa and Kobori; Wang et al. 2022). Nous avons démontré que, la spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) combinée à la *Partial Least Square Discriminant Analysis* (PLS-DA), est efficace pour distinguer *D. polyanthum* de *D. bambidiense* (**Chapitre 2**). Cependant cette méthode d'analyse est supervisée et nécessite donc de définir les classes à prédire au préalable. Une autre approche de spectrométrie, faisant consensus pour l'identification du bois, pourrait être testée : la *Direct Analysis in Real Time Time-of-Flight Mass Spectrometry* (DART-TOFMS). Cette méthode de spectroscopie de masse permet de distinguer efficacement les espèces d'un même genre via une analyse non supervisée tel que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Cody et al. 2012; Lancaster and Espinoza 2012). De nombreuses xylothèques collaborent pour créer une base de données de spectre de masse (ForeST©) qui compte déjà plus de 12000 spectres pour 1267 espèces d'arbres (Price et al. 2022). Il serait donc intéressant de comparer les spectres de l'ensemble des espèces de *Dialium* présentes sur le continent Africain avec cette méthode.

7.2. Potentiel de valorisation

Selon nos résultats, le Mubala (*Pentaclethra macrophylla*) se démarque comme l'essence présentant le plus fort potentiel de valorisation. Cette essence est facilement identifiable, ne présente pas de risques de confusion lors des inventaires. Elle est principalement destinée à des travaux lourds, en contact avec l'eau douce, voir avec l'eau de mer si sa résistance aux térébrants marins est avérée (**Chapitre 4**). Au cours des deux dernières décennies, les seules espèces secondaires ayant réussi à se populariser, tel que l'Okan, sont valorisée en classe d'emplois 4 ou 5 (Karsenty and Ferron 2017). Ces espèces, dites de « bois durs » substituent principalement l'Azobé dont la ressource tend à diminuer (Biwolé et al. 2019). *P. macrophylla* a donc un bon potentiel de substitution sur le marché du bois, bien que son utilisation soit cependant restreinte par la taille des pièces pouvant être sciées. Le faible volume produit par ses arbres (**Chapitre 4**) est compensé par son abondance sur le site d'étude. Selon le scénario prudent, près de 0,8 m³/ha.rotation de Mubala peuvent être mobilisés en moyenne sur les 4 rotations (**Chapitre 6**). Elle peut donc contribuer significativement au prélèvement de Pallisco-CIFM, qui exploite environ 9,3 m³/ha.rotation (FRM 2018). Dans le deux scénarios (actuel et prudent), le taux de reconstitution des tiges après 4 rotations est supérieur à 100%, soulignant une mobilisation durable sur le moyen terme. Cependant, les arbres exploitables (seulement 21% de la population à l'heure actuelle) n'atteignent que 17% de rendement sciage, un résultat médiocre en comparaison de la moyenne de

30% en Afrique Centrale (FRM 2018). En l'absence d'améliorations techniques sa rentabilité ne peut être assurée que par un prix de reviens élevé.

L'Eveuss est l'appellation commerciale retenue pour deux espèces, *Klainedoxa gabonensis* et *Klainedoxa trilesii*. Bien que les deux espèces soient aisément différenciables par le nombre de nervures secondaires composant leurs feuilles (Meunier et al. 2015), des risques de confusions subsistent. Au même titre que le Mubala, le duramen de *K. gabonensis* peut être valorisé dans la 4^{ème} classe d'emplois, en substitut à l'Azobé, l'Okan ou le Tali. Cependant, la partie duraménisée ne représente qu'une proportion variable des grumes. L'autre partie est composée de bois de transition n'atteignant que la classe d'emplois 3.1 (**Chapitre 4**). Si la valorisation de cette essence dépend uniquement du duramen, les rendements sciages seront vraisemblablement trop faibles. C'est pourquoi nous suggérons de valoriser les deux types de bois sous deux appellations commerciales, différentes: Eveuss noir et Eveuss blanc en référence à leur couleur. Si *K. trilesii* est également composé de ces deux types de bois, et que ses propriétés son équivalentes à *K. gabonensis*, elle pourrait également faire partie de cette classification. Pour optimiser la valorisation, nous recommandons de scier la partie duraménisée en cœur enrobé (Figure 83) pour les ouvrages hydrauliques (ATIBT 2022b). La partie restante du duramen et le bois de transition serait valorisé sous forme d'avivés de différentes sections. Ce type de production nécessite néanmoins une chaîne de sciage spécialisée avec une possibilité de retourner les grumes sur la scie de tête. Si l'Eveuss noir peut aisément substituer des essences actuellement exploitées, l'Eveuss blanc n'est utilisable que dans certaines situations (fond de véhicules, charpente lourde non exposée). Les chances de commercialisation du bois de transition restent donc limitées. Sur le site d'étude, la population de *K. gabonensis* est composée de 86% d'arbres actuellement exploitables. Selon nos prédictions, le maintien de cette ressource le moyen terme nécessite de capitaliser le volume sur pied. Cela passe par le choix d'un coefficient d'exploitation plus faible dès la première exploitation (**Chapitre 6**).

L'Ossoko (*S. manni*) ne présente aucun risque de confusion et est l'essence étudiée ayant le plus grand potentiel de mobilisation. Dans les deux scénarios (actuel et prudent), le volume total exploité croît exponentiellement jusqu'à la 4^{ème} rotation et les taux de reconstitutions sont largement supérieurs à 100%. Dans le scénario prudent, cette espèce pourrait fournir en moyenne plus de 5 m³/ha.rotation, soit une grande partie de la production de 8,75 m³/ha.rotation de PW-CEB selon FRM (2018). Cette mobilisation exponentielle n'est valable que sur le moyen terme. *S. manni* est une espèce héliophile succédant à la colonisation des savanes par l'Okoumé (Doucet 2003). Dans les forêts matures peu impactées par l'exploitation sélective, ces espèces souffrent d'un manque de régénération naturelle comme observé dans sa structure de population. Dans les deux scénarios, les effectifs au-dessus du DMA atteignent leurs pics durant la 4^{ème} rotation (**Chapitre 6**). Au-delà de notre simulation, il est probable que les taux de reconstitution chutent et que la ressource s'épuise si aucun programme de

reboisement n'est mise en place. Malgré son potentiel de mobilisation élevé, sa valorisation est fortement freinée par son potentiel d'utilisation. L'espèce la plus connue qu'il pourrait substituer est l'Ozigo au Gabon. Cette espèce est principalement valorisée par déroulage pour la fabrication de panneau ou d'emballage (Gérard et al. 2017; Birinci 2022). La conformation de l'Ossoko empêchant cette transformation, son bois est plutôt réservé au profilage (moulure, lambris) et la menuiserie intérieure (**Chapitre 4**). Sur le marché Européen, plus de 86% des produits de seconde transformation importés en bois tropicaux sont des bois profilés. Cependant, l'Afrique ne participe qu'à raison de 7% de ces importations, le reste étant produit par l'Asie et l'Amérique du Sud (White et al. 2019). A l'heure actuelle ce marché est donc peu développé en Afrique qui exporte principalement le bois sous forme de sciages ou de grumes (FAO 2013; FRM 2018; White et al. 2019; Eba'a Atyi et al. 2022). N'ayant que peu d'espèces de référence dans un marché peu développé, les chances de vendre cette essence à des prix couvrant son faible rendement sciage (20%) sont réduites.

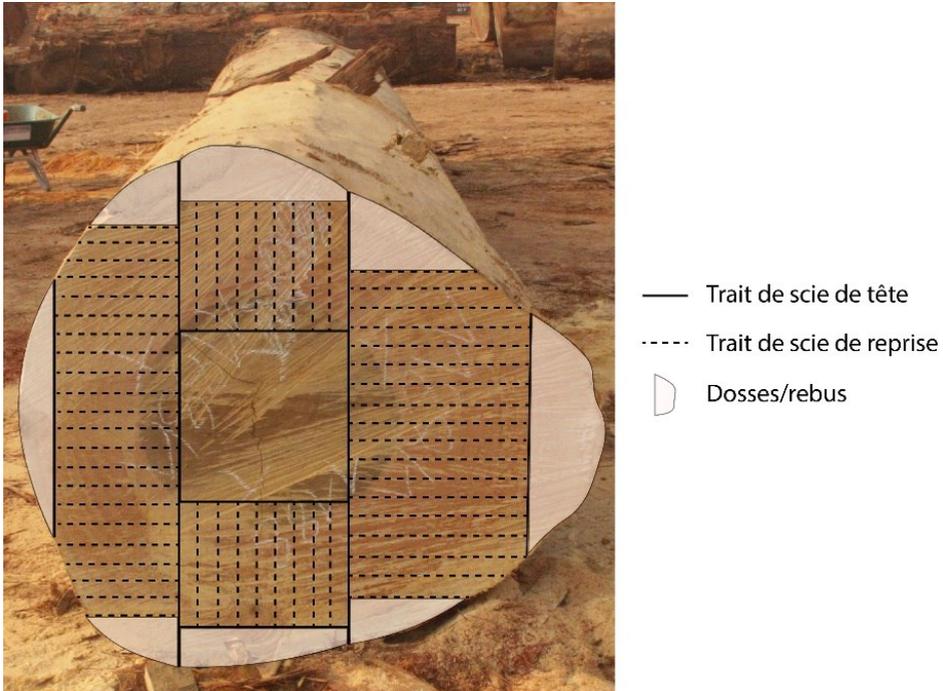


Figure 83: Schéma de sciage proposé pour la production de coeur enrobé d'Eveuss noir et d'avivés d'Eveuss blanc.

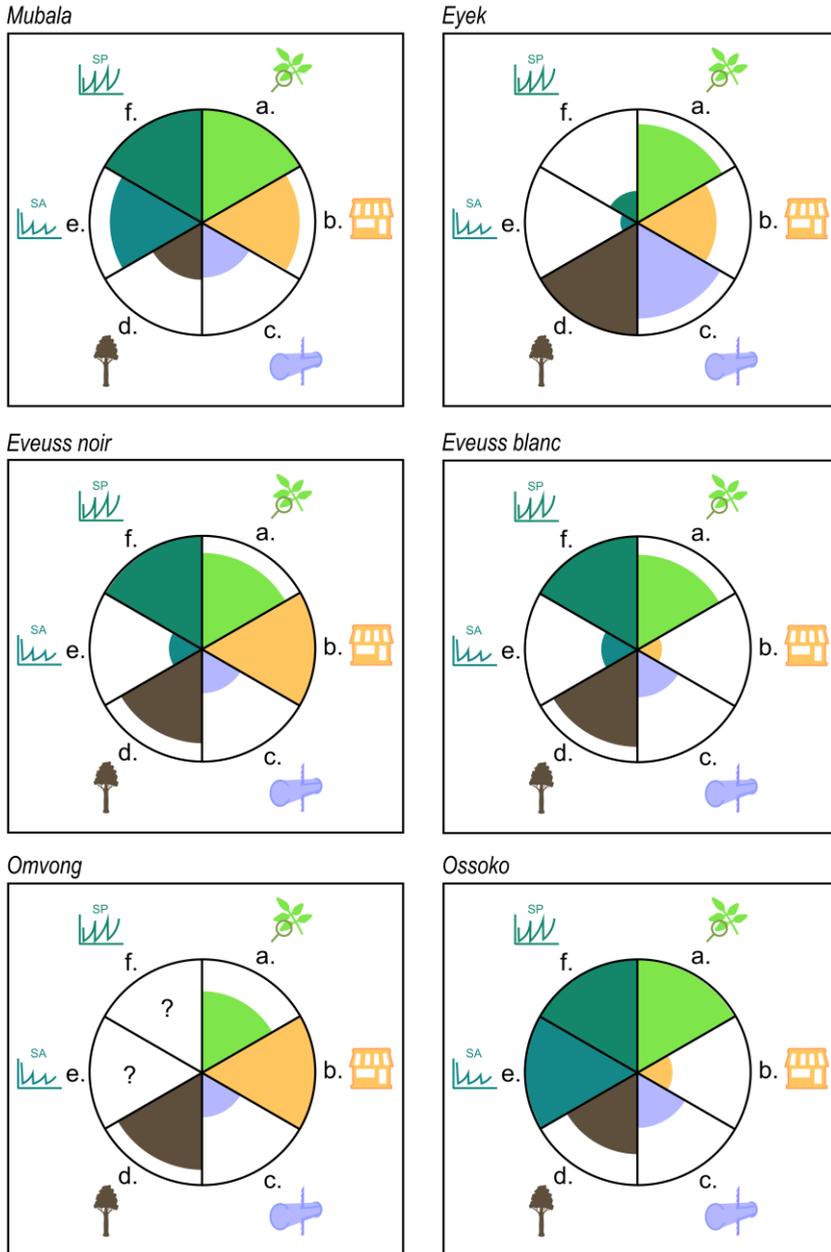


Figure 84: Représentation graphique des avantages et inconvénients pour la valorisation essences étudiées : Mubala (*P. macrophylla*), Eyek (*P. tessmannii*), Eveuss noir (duramen vrai de *K. gabonensis*), Eveuss blanc (bois de transition de *K. gabonensis*), Ossoko (*S. mannii*) et Omvong (*D. polyanthum*). a. Facilité d'identification botanique ; b. Facilité de substitution d'essences importantes sur le marché du bois ; c. Efficacité de la transformation avec l'outil industriel actuel; d. Volume mobilisable par arbre ; e. Durabilité de l'exploitation sous le scénario actuel ; f. Durabilité de l'exploitation sous le scénario prudent.

L'Eyeke (*P. tessmannii*) présente un léger risque de confusion dans les inventaires avec le Tali, d'où son appellation Faux-Tali. Son bois est très proche du Dabéma, 11^{ème} essence la plus exploitée en Afrique Centrale en 2016 (FRM 2018). Sa résistance aux chocs limite cependant son emploi par rapport à cette dernière, diminuant son potentiel de substitution. Les motifs moirés de son bois sont cependant intéressants et dirigent essentiellement cette essence vers la menuiserie ou l'ébénisterie (**Chapitre 4**). Ces utilisations nobles confèrent au bois une valeur économique plus élevée. Bien que n'ayant pas pu mesurer le rendement sciage de cette espèce, aucune difficulté particulière concernant son sciage n'a été identifiée. Les outils industriels actuels semblent donc adaptés pour cette espèce. Les grands volumes que produisent ses arbres compensent aisément sa faible densité de population et permettent de produire légalement 0,66 m³/ha à la première rotation dans le SA (**Chapitre 6**). Cependant, les volumes exploitables chutent dès la deuxième rotation. Après 4 rotations, la structure vieillissante de sa population ne permet de reconstituer, au mieux, que 16% des tiges initialement au-dessus du DMA après 4 rotations. Les arbres monumentaux qui composent sa population, participent à la structure verticale des forêts. Nous pensons que l'intérêt économique à très court terme de cette espèce ne justifie pas de sacrifier son rôle écologique. Sur le site d'étude, nous recommandons d'être extrêmement prudent si son exploitation est envisagée en limitant les prélèvements et en compensant le manque de régénération.

Selon la nouvelle nomenclature proposée (cfr. 7.1.1.) l'Omvong ne correspondrait plus qu'à *D. polyanthum* sur le site d'étude, les autres espèces étant regroupées sous les appellations Imbowu (*D. bambidiense* et *D. lopense*) et Oveng Méki (*D. pachyphyllum*). La clé d'identification élaborée dans le cadre de cette thèse permet de distinguer ces quatre espèces sur base de matériel stérile. Cependant, certains critères, tels que les lenticelles des rameaux, peuvent parfois être difficiles à observer. Il existe donc toujours un risque de confusion entre les jeunes arbres de *D. polyanthum* et *D. pachyphyllum*. Compte tenu des faibles densités d'arbres de *D. lopense*, du statut de conservation provisoire de *D. bambidiense* (EN) et des propriétés désavantageuses du bois de cette dernière (taux de silice élevé et classe d'emplois 3.1), nous recommandons de ne pas d'exploiter les Imbowu. Les arbres de *D. pachyphyllum* n'atteignant pas le DME, seul *D. polyanthum* pourrait être valorisé en classe d'emplois 4 et répondre aux attentes des différents acteurs de la filière (FRM 2018; ATIBT 2022a, b). Doté d'arbres de grandes dimensions et d'une bonne résistance aux chocs, *D. polyanthum* peut également être valorisé sous forme de traverses et de bois de calage (ATIBT 2022a). Il se révèle ainsi plus polyvalent que *P. macrophylla*, présentant un fort potentiel de substitution. Cependant, comme il n'a pas été distingué des autres espèces lors de l'inventaire d'aménagement, il nous a été impossible d'étudier sa mobilisation à moyen terme. La structure de population de cette espèce dans le dispositif DYNAFAC est exponentiellement décroissante (**Chapitre 3**). Si cette structure de population est extrapolable à l'ensemble de l'UFA 2, il est probable

que, dans le scénario prudent, *D. polyanthum* soit mobilisable à moyen terme. Bien que son taux de silice soit inférieur à celui de la nouvelle espèce (0,92% et 2,64% respectivement pour *D. polyanthum* et *D. bambidiense*, **Chapitre 2**), il reste significativement supérieur à la moyenne de 0,1% observée par Gérard et al. (2019). Cette inclusion minérale étant fortement abrasive, les lames stellées utilisées dans l'industrie (Loehnertz et al. 1996) s'émousent trop rapidement pour permettre un sciage efficace.

Nos résultats mettent en évidence un frein commun à la valorisation de plusieurs essences: l'inadéquation de l'outil industriel actuel.

7.2.1. Un changement de modèle industriel

Depuis les années 90, certains pays tels que la République centrafricaine (RCA), la République du Congo (RC) et la République démocratique du Congo (RDC) ont instauré une obligation de créer des unités de première transformation lors de l'attribution d'une concession forestière (Eba'a Atyi et al. 2022). Cette initiative des États visait à encourager les exploitants à transformer le bois sur leurs territoires, dans le but d'augmenter la valeur ajoutée et de créer des emplois (FAO 2013; Eba'a Atyi et al. 2022). Cependant, parallèlement à ces obligations, les exportations ont continuées à être autorisées. En conséquence, la plupart des scieries mises en place ont été dimensionnées dans le seul but de valoriser les grumes de qualité insuffisante pour l'export (Kombila-Mouloungui 2019). Ces unités de transformations ont donc, pour la plupart, été munies d'outils industriels basiques et leur agencement a été adapté aux essences traditionnellement exploitées (Dalois 1993b; Loehnertz et al. 1996). Au-delà de ces pays, ce modèle industriel a largement été adopté (FRM 2018). Bien que l'industrie se soit développée depuis les années 90, plus particulièrement au Gabon et au Cameroun (FAO 2013), les exportations sous forme de grumes sont restées prédominantes, avec des unités de transformation peu efficaces et focalisée sur la première transformation (Langbour and Gérard 2007; Kombila-Mouloungui 2019). Si ce modèle a persisté pendant plusieurs décennies, il a révélé ses limites en 2010. Cette année, le Gabon a interdit toute exportation de bois sous forme de grumes afin de favoriser la transformation locale (Kombila-Mouloungui 2019). Les exploitants ont été contraints de valoriser les grumes dans leurs scieries, entraînant une forte diminution de la rentabilité pour la plupart des opérateurs. Selon Karsenty and Ferron (2017), les rendements matières (36% dans les scieries classiques) devraient atteindre plus de 52% pour compenser le coût d'opportunité de la vente de grumes. Si les exploitants avaient du mal à valoriser correctement des essences à haute valeur commerciale, il semblait alors impensable de valoriser de nouvelles espèces dont les rendements matière ne dépassent pas 20% (**Chapitre 5**). Cependant, malgré les répercussions sur la rentabilité de certains acteurs et les recettes fiscales de l'État (Karsenty and Ferron 2017), cette décision a entraîné une véritable évolution du système industriel. Entre 2009 et 2018, le nombre d'unités de transformation a augmenté de 86,6% sur le territoire (Kombila-Mouloungui 2019). Pour les approvisionner, un

marché national de la grume s'est développé. Celui-ci, offrant plusieurs possibilités d'approvisionnement, donne la possibilité aux industriels de valoriser une ressource peu abondante localement et de se spécialiser (FRM 2018). Parallèlement, l'état Gabonais, avec l'aide du groupe industriel Indien Olam, a mis en place un pôle de compétitivité industriel dans lequel les lois économiques ont été adoucies. Cette zone, appelée Zone Economique Spéciale (ZES), permet notamment de faciliter l'investissement et de développer la 2^{ème} et 3^{ème} transformation. Le marché intérieur de la grume ainsi que la mise en place de ZES, permettrait un développement d'un outils industriel sophistiqué, propice à la valorisation d'essences secondaire (Karsenty et al. 2008; FRM 2018; Collectif DYNAFAC 2021; Karsenty 2021). Si ce modèle il semble idéal, il demande un réel investissement des états pour accompagner ce changement, notamment par la libéralisation du marché intérieur de la grume et le développement d'une infrastructure de transport efficace (FAO 2013; FRM 2018; Kombila-Mouloungui 2019).

Ces dernières années le Cameroun a également développé le marché intérieur de la grume avec des conséquences similaire sur l'industrialisation (Hiolhiol 2020). Cette tendance devrait se généraliser avec la décision de la CEMAC d'étendre l'interdiction d'exportation de grumes à l'ensemble du Bassin du Congo. Initialement prévue pour début 2023, elle devrait être effective au cours des prochaines années avec les défis économiques et les opportunités industrielles qu'elle apporte. Cependant la première vocation de ce changement est d'augmenter la participation du secteur forestier au PIB national, pas de réduire la pression sur les essences commerciales. La vision stratégique pour l'horizon 2030 est d'augmenter le volume total prélevé en forêt, la diversification des essences n'étant qu'un outil pour y arriver (FRM 2018).

7.2.2. Quel avenir pour la gestion durable des forêts ?

En Afrique Centrale, les performances des concessions forestières certifiées durable (FSC/PEFC) en termes de préservation des écosystèmes ne sont plus à démontrer (Billand and Nasi 2008; Clark et al. 2009; Nasi et al. 2012a; Putz et al. 2012; Haurez et al. 2016; Lhoest et al. 2020). Cependant, la certification forestière reste une démarche volontaire pour répondre à un marché, en l'occurrence au besoin des consommateurs de s'assurer que le produit qu'ils achètent provient d'une forêt gérée durablement (Auld et al. 2008). Ces mécanismes de certification, déjà mise à mal par la concurrence déloyale et la raréfaction des ressources (Burivalova et al. 2017; Sist et al. 2021) se heurtent actuellement à une autre difficulté : un changement de consommateurs. Si au début des années 2000 la demande en produit certifiée était élevée dans les pays européens, aujourd'hui le coût des produits devient trop élevé et seuls quelques marchés publiques acceptent encore de payer le surcout de la certification (ATIBT & FFEM; Eba'a Atyi et al. 2022). La plupart de la production est désormais absorbée par les pays Asiatiques tels que la Chine, principal partenaire commercial de la région. Si ces pays montrent une volonté de certifier leur concession ou consommer du bois certifié sur la scène

internationale, elle n'est que rarement transcrite en actions concrètes (Karsenty et al. 2008; Jégourel and Chalmin 2019). Au vu de l'intensification des prélèvements prévus dans les prochaines années, plus 50% d'ici 2030 selon le rapport de FRM (2018) il est urgent d'agir. Les états ne peuvent plus se reposer sur quelques opérateurs certifiés indépendants, et de plus en plus précaires, pour assurer la gestion durable de leurs forêts. C'est pourquoi cette transition industrielle devrait être accompagnée d'une révision des plans d'aménagement pour faire naître des exigences légales une gestion réellement durable (Karsenty et al. 2008; Karsenty 2019). En ce sens, le Gabon a déjà commencé sa reconversion et les concessions aménagées sur son territoire doivent répondre aux exigences FSC depuis 2023 (ATIBT 2023).

7.2.3. Recommandations pour une meilleure gestion

Pour aider les décideurs dans cette révision de la législation forestière, le collectif DYNAFAC (2021) a fait une synthèse de mesures pragmatiques pour améliorer les plans d'aménagement. Bien que nos travaux se soient focalisés sur 5 essences secondaires, nous pensons que les 7 recommandations suivantes sont pertinentes pour l'ensemble de la filière et pourraient amender leur proposition :

(i) L'unité de gestion de l'aménagement forestier doit obligatoirement être l'espèce.

Lorsque plusieurs espèces sont regroupées sous une même appellation, celle-ci doit être déclinée par une épithète spécifique à laquelle correspond une unique dénomination scientifique. Cette déclinaison doit être officielle et publiée par l'État (**Chapitre 2 et Chapitre 3**).

(ii) Les appellations commerciales peuvent être maintenues pour la vente de bois.

Nous recommandons néanmoins de réviser les groupes d'espèces peu connue pour former des ensemble cohérent en termes de propriétés du bois et qui évite l'amalgame entre les espèces exploitables et les espèces plus vulnérables. (**Chapitre 3 et Chapitre 4**).

(iii) Des tarifs de cubages spécifiques devraient être ajustés aux espèces nouvellement valorisées.

Nous recommandons d'ajuster ces tarifs sur base du diamètre et de la hauteur du fût. De cette manière, les tarifs pourront être ajustés en fonction des hauteurs moyennes des différentes classes de qualité rencontrées dans les peuplements des opérateurs forestiers (**Chapitre 5**).

(iv) La distribution de la qualité des arbres doit être intégrée dans le calcul de reconstitution de la ressource.

Elle pourrait être intégrée en utilisant le calcul matriciel, comme réalisé au **Chapitre 6**. D'une autre manière, le taux de reconstitution pourrait être calculé uniquement sur base des effectifs de qualité exploitables. Le calcul ne prendrait donc plus en compte l'ensemble des tiges, toutes qualités confondues.

(v) Le coefficient d'exploitation devrait être généralisé à l'ensemble de la sous-région comme outils de gestion.

Il permettrait aux exploitants d'affiner la gestion de leur peuplement et d'évaluer plus précisément la reconstitution de la ressource (**Chapitre 6**).

(vi) Un système d'incitation doit être mis en place pour aider les exploitants à capitaliser le volume sur pied.

Ces incitations peuvent être des incitations fiscales, compensations ou garanties que les opérateurs puissent continuer à exploiter leur peuplement s'ils capitalisent un certain volume en forêt. Si cette mesure n'est pas prise, une production durable sur le moyen terme n'est pas envisageable (**Chapitre 6**).

(vii) Les arbres d'avenir doivent être protégés lors de l'exploitation.

Pour limiter l'écrémage, tous les arbres de plus de 40 cm dont la qualité est estimée suffisante pour être rentable doivent être protégés lors de l'exploitation. Les dégâts d'abattage inévitables doivent être redirigés sur les individus les moins bien conformés pour contrebalancer le prélèvement des arbres de haute qualité. (**Chapitre 6**).

Références bibliographiques

- Abdul Latif MH, Attiya HG, Al–Abayaji MA (2019) Lignin FT-IR study of Iraqi date palm *Phoenix dactylifera* frond bases wood. *Plant Arch* 19:327–332
- Adamopoulos S, Voulgaridis · E, Passialis · C, Voulgaridis E (2005) Variation of certain chemical properties within the stemwood of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Variation verschiedener chemischer Eigenschaften im Stammholz von Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.). <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0018-3>
- AFNOR (1985a) NF B51-005: Bois. Détermination de la masse volumique. Paris
- AFNOR (1985b) NF B51-006: Bois. Détermination du retrait. Paris
- AFNOR (1987a) NF B51-016 : Bois. Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défauts. Paris
- AFNOR (1987b) NF B51-008 : Bois. Essai de flexion statique. Paris
- AFNOR (1985c) NF B51-007 : Bois. Essai de compression axiale. Paris
- AFNOR (1985d) NF B 51-013 : Bois. Détermination de la dureté de Monnin. Paris
- AFNOR (1994) NF EN 460: Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Durabilité naturelle du bois massif. Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque
- AFNOR (2007) NF EN 335: Durabilité du bois et des matériaux à base de bois. Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois
- Ainsworth EA, Gillespie KM (2007) Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nat Protoc* 2:875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
- Akai S, Fukutomi M (1980) Preformed Internal Physical Defenses. In: Horsfall JG, Cowling EB (eds) *How Plants Defend Themselves*, Academic P. Elsevier, pp 139–159
- Akaike H (1974) A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Trans Automat Contr* 19:716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Akindele SO, LeMay VM (2006) Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *For Ecol Manage* 226:41–48. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.01.022>
- Allaby M (2010) *A Dictionary of Ecology*. Oxford University Press

- Alroy J (2017) Effects of habitat disturbance on tropical forest biodiversity. *Proc Natl Acad Sci U S A* 114:6056–6061. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611855114>
- Anouhe JBS, Niamké FB, Faustin M, et al (2018) The role of extractives in the natural durability of the heartwood of *Dicorynia guianensis* Amsh: new insights in antioxydant and antifungal properties. *Ann For Sci* 75:. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0691-0>
- ATIBT-FFEM (2014) Etude sur le plan pratique d'Aménagement des Forêts Naturelles de Production Tropicales Africaines - Application au cas de l'Afrique Centrale - Volet 1: Gestion Durable et préconisations en vue de la certification
- ATIBT (2007a) Etude sur le plan pratique d'Aménagement des Forêts Naturelles de Production Tropicales Africaines Application au cas de l'Afrique Centrale Volet 1 « Production Forestière». Paris
- ATIBT (2023) 10 millions d'ha certifiés gestion durable dans le bassin du Congo à horizon 2025. https://www.atibt.org/fr/news/13289/10-millions-d-ha-certifies-gestion-durable-dans-le-bassin-du-congo-a-horizon-2025#_ftn1. Accessed 9 Nov 2023
- ATIBT (2016) Nomenclature générale des bois tropicaux, Associatio. Nogent-sur-Marne
- ATIBT (2022a) Timber under rails and related uses. Fiches Tech. 16 1–24
- ATIBT (2022b) Les bois pour ouvrages hydrauliques. Fiches Tech. 14 18
- ATIBT (2006) La lettre de l'ATIBT n°24: Statistiques 2005. Paris
- ATIBT (2007b) La lettre de l'ATIBT n°26: Statistiques 2006. Paris
- ATIBT & FFEM Quel avenir pour les produits bois éco-certifiés africains sur le marché européen?
- Auld G, Gulbrandsen LH, McDermott CL (2008) Certification schemes and the impacts on forests and forestry. *Annu Rev Environ Resour* 33:187–211. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.013007.103754>
- Azani N, Babineau M, Bailey CD, et al (2017) A new subfamily classification of the leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon* 66:44–77. <https://doi.org/10.12705/661.3>
- Azegue Temgoua RC (2004) Etude d'impact environnemental du projet minier de

Geovic à Nkamouna. Rapport d'inventaire forestier

- Bachman S, Moat J, Hill AW, et al (2011) Supporting red list threat assessments with GeoCAT: Geospatial conservation assessment tool. *Zookeys* 150:117–126
- Backa S, Brodin A, Nilsson T (2001) Characterisation of fungal degraded birch wood by FTIR and Py-GC. *Holzforschung* 55:225–232. <https://doi.org/10.1515/HF.2001.037>
- BAD (2019) Développement intégré et durable de la filière bois dans le Bassin du Congo: Opportunités, défis et recommandations opérationnelles
- Barnett J, Jeronimidis G (2003) *Wood quality and its Biological Basis*. Blackwell Publishing Ltd, Carlton Victoria
- Bauwens S, Fayolle A, Gourlet-Fleury S, et al (2017) Terrestrial photogrammetry: a non-destructive method for modelling irregularly shaped tropical tree trunks. *Methods Ecol Evol* 8:460–471. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12670>
- Bayol N, Cassagne B, Billand A, et al (2010) Les taux de reconstitution, un outil pour les gestionnaires forestiers dans le bassin du Congo. In: *La lettre de l'ATIBT n°32*. pp 46–49
- Bayol N, Demarquez B, De Wasseige C, et al (2012) *Forest management and the timber sector in Central Africa*. Luxembourg
- Bengono GB, Souza A, Tosso F, et al (2021a) Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise (synthèse bibliographique). *Base* 25:172–191. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.19114>
- Bengono GB, Souza A, Tosso F, et al (2021b) Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise (synthèse bibliographique). *BASE* 25:172–191. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.19114>
- BGCI & IUCN SSC Global Tree Specialist Group (2019) *Dialium polyanthum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T144272728A149029201
- Bhat KM, Priya PB, Rugmini P (2001) *Characterisation of juvenile wood in teak**. Springer-Verlag
- Bikoro Bi Athomo A, Engozogho Anris SP, Safou-Tchiama R, et al (2018) Chemical composition of African mahogany (*K. ivorensis* A. Chev) extractive and tannin structures of the bark by MALDI-TOF. *Ind Crops Prod* 113:167–178. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.013>

- Bile Allogho J (1999) Étude sur les ressources forestières du Gabon. Rome, Itlay
- Billand A, Nasi R (2008) Production dans les forêts de conservation, conservation dans les forêts de production. In: La gestion concertée des ressources naturelles. pp 201–219
- Biraud J (1963) Causes générales de l'évolution de l'économie forestière gabonaise. Bois Forêts des Trop 92:
- Birinci E (2022) Determination of physical and mechanical properties of plywood produced using beech, okoume and ozigo species. Anadolu Orman Araştırmaları Derg 8:11–15. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1141172>
- Bissiengou P, Chatrou LW, Wieringa JJ, Sosef MSM (2013) Taxonomic novelties in the genus *Campylospermum* (Ochnaceae). Blumea J Plant Taxon Plant Geogr 58:1–7. <https://doi.org/10.3767/000651913X667817>
- Bivand R, Keitt T, Rowlingson B (2023) rgdal: Bindings for the “Geospatial” Data Abstraction Library
- Bivand R, Rundel C (2023) rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS')
- Biwolé AB (2015) Origine et dynamique des populations d'arbres des forêts denses humides d'Afrique Centrale, le cas de *Lophira alata* Banks ex Gaertn C.F. (Ochnaceae). Université de Liège - Gembloux Agro-Bio tech
- Biwolé AB, Bourland N, Daïnou K, Doucet J (2012) Définition du profil écologique de l'azobé, *Lophira alata*, une espèce ligneuse africaine de grande importance : synthèse bibliographique et perspectives pour des recherches futures. Biotechnol Agron Soc Environ 16:217–228
- Biwolé AB, Morin-Rivat J, Fayolle A, et al (2015) New data on the recent history of the littoral forests of southern Cameroon: an insight into the role of historical human disturbances on the current forest composition. Plant Ecol Evol 148:19–28. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2015.1011>
- Biwolé AB, Ouédraogo D-Y, Betti JL, et al (2019) Dynamique des populations d'azobé, *Lophira alata* Banks ex C. F. Gaertn., et implications pour sa gestion durable au Cameroun. Bois Forêts Des Trop 342:55–68. <https://doi.org/10.19182/bft2019.342.a31670>
- Boadu KB, Antwi-Boasiako C, Frimpong-Mensah K (2017) Physical and mechanical properties of *Klainedoxa gabonensis* with engineering potential. J For Res 28:629–636. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0331-1>

- Boampong E, Effah B, Antwi K, et al (2015) Factors influencing the choice of timber for furniture and joinery production in Ghana. *Eur J Eng Technol* 3:48–59. <https://doi.org/ISSN 2056-5860>
- Bosco Mbagou J (2017) Variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques Et chimiques du *Tessmania africana* en provenance du Gabon. Université de Laval
- Bossu J, Beauchêne J, Estevez Y, et al (2016) New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: The case of a fast-growing tropical species *Bagassa guianensis* aubl. *PLoS One* 11:150777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150777>
- Bouka Dipelet UG, Doumenge C, Loumeto JJ, et al (2019) Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières : l'exemple des acajous d'Afrique (*Khaya*, Meliaceae). *Bois Forests Des Trop* 339:17. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31714>
- Bouvarel P (1956) Génétique forestière et amélioration des arbres forestiers (Première Partie). *Bull la Société Bot Fr* 103:35–74. <https://doi.org/10.1080/00378941.1956.10833348>
- Brancalion PHS, De Almeida DRA, Vidal E, et al (2018) Fake legal logging in the brazilian amazon. *Sci Adv* 4:. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1192>
- Brémaud I, Amusant N, Minato K, et al (2011a) Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Sci Technol* 45:461–472. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0337-3>
- Brémaud I, Gril J, Thibaut B (2011b) Anisotropy of wood vibrational properties: Dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Sci. Technol.* 45:735–754
- Bremer B, Bremer K, Chase MW, et al (2009) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Bot J Linn Soc* 161:105–121. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00996.x>
- Breteler FJ (1993) Novitates gabonses (14) *Dialium lopense*, a new Leguminosae-Caesalpinoideae from central Gabon. *Bull du Jard Bot Natl Belgique / Bull van Natl Plantentuin van België* 63:201–204
- Brienen RJW, Zuidema PA (2006) The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species. *For Ecol Manage* 226:256–267. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.038>

- Burivalova Z, Hua F, Koh LP, et al (2017) A Critical Comparison of Conventional, Certified, and Community Management of Tropical Forests for Timber in Terms of Environmental, Economic, and Social Variables. *Conserv Lett* 10:4–14. <https://doi.org/10.1111/conl.12244>
- Cailliez F (1980) Forest volume estimation and yield prediction V1 - Volume estimation
- Canham CD, LePage PT, Coates KD (2004) A neighborhood analysis of canopy tree competition: Effects of shading versus crowding. *Can J For Res* 34:778–787. <https://doi.org/10.1139/x03-232>
- Carrière S (2003) *Les orphelins de la forêt*. IRD Éditions
- CEN (2005) CEN 15083-1 : Durability of wood and wood-based products – Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods – Part1 : Basidiomycetes
- CEN (2004) CEN/TR 14734:2004 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Détermination de l'imprégnabilité d'essences de bois par des produits de préservation - Méthode de laboratoire
- Cerutti PO, Lescuyer G, Tacconi L, et al (2017) Social impacts of the Forest Stewardship Council certification: An assessment in the Congo basin. *Int For Rev* 19:50–63. <https://doi.org/10.17528/cifor/004487>
- Chaowana P (2013) Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites. *J Mater Sci Res* 2:. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v2n2p90>
- Chardin A (1951) Méthodes américaines et sciage des bois tropicaux. *Bois Forets des Trop* 19:126–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/bft1951.19.a18435>
- Chen H, Ferrari C, Angiuli M, et al (2010) Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydr Polym* 82:772–778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.052>
- Chen YH, Lin CY, Yen PL, et al (2017) Antifungal agents from heartwood extract of *Taiwania cryptomerioides* against brown root rot fungus *Phellinus noxius*. *Wood Sci Technol* 51:639–651. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0901-1>
- Chevalier A (1928) Une exploitation industrielle des Bois de la forêt équatoriale africaine d'après M. Léon Géraud. *Rev Bot appliquée d'agriculture Colon* 8:322–333. <https://doi.org/10.3406/jatba.1928.4614>

- Chong IG, Jun CH (2005) Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. *Chemom Intell Lab Syst* 78:103–112. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.12.011>
- CIIB asbl (1995) Bois, Fiches Techniques. Bruxelles
- CIRAD (2015) Les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales. *Tropix* 7.5.1
- CITES (2022) Examen des propositions d'amendement des annexes I et II. Panama
- CJBG (2018) Base de données des plantes d'Afrique. <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/afrika/details.php?langue=fr&id=69634>. Accessed 13 May 2020
- Clark CJ, Poulsen JR, Malonga R, Elkan PW (2009) Logging concessions can extend the conservation estate for central African tropical forests. *Conserv Biol* 23:1281–1293. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01243.x>
- Codou A, Gibert G (1975) L'exploitation forestière en République Populaire du Congo. *Cah d'outre-mer* 28:114–136. <https://doi.org/10.3406/caoum.1975.2732>
- Cody RB, Dane AJ, Dawson-Andoh B, et al (2012) Rapid classification of White Oak (*Quercus alba*) and Northern Red Oak (*Quercus rubra*) by using pyrolysis direct analysis in real time (DART TM) and time-of-flight mass spectrometry. *J Anal Appl Pyrolysis* 95:134–137. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.01.018>
- Collectif DYNAFAC (2021) Dynamique des forêts d'Afrique centrale: Pour une amélioration de la durabilité des plans d'aménagement forestiers
- Collet R (2017) Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. *École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Pari Tech*
- Costa-Cabral MC, Burges SJ (1994) Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resour Res* 30:1681–1692. <https://doi.org/10.1029/93WR03512>
- Cruz N, Bustos C, Aguayo MG, et al (2018) THM densification of wood. *BioResources* 13:2268–2282
- Daïnou K, Blanc-Jolivet C, Degen B, et al (2016) Revealing hidden species diversity in closely related species using nuclear SNPs, SSRs and DNA sequences - a case study in the tree genus *Milicia*. *BMC Evol Biol* 16:1–15.

- <https://doi.org/10.1186/s12862-016-0831-9>
- Dalimier T, Dubois C, Masson C, T'Serstevens H (2021) Etude de croissance du bois d'essences de promotion pour diversifier l'exploitation forestière en Afrique centrale. Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège
- Dalois C (1993) Le sciage sur quartier des bois tropicaux modèle de scierie. Bois Forêts des Trop 237:61–67. <https://doi.org/10.19182/BFT1993.237.A19781>
- Dalois C (1990) Manuel de sciage et d'affûtage
- Dauby G, Zaiss R, Blach-Overgaard A, et al (2016) RAINBIO: a mega-database of tropical African vascular plants distributions. PhytoKeys 74 1-18 74:1–18. <https://doi.org/10.3897/PHYTOKEYS.74.9723>
- de Almeida TH, de Almeida DH, De Araujo VA, et al (2017) Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods. BioResources 12:6579–6590. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6579-6590>
- De Azevedo Falcão MJ, De Freitas Mansano V (2020) *Dialium heterophyllum* (Fabaceae: Dialioideae), a new tree species from the Amazon. Phytotaxa 477:47–59. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.477.1.3>
- De Azevedo Falcão MJ, Pinto RB, De Freitas Mansano V (2016) A Taxonomic Revision of the genus *Dialium* (Leguminosae: Dialiinae) in the Neotropics. Phytotaxa 283:123. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.283.2.2>
- Deklerck V, De Mil T, Kondjo P, et al (2019) Sleeping beauties in materials science: Unlocking the value of xylarium specimens in the search for timbers of the future. Holzforschung 73:889–897. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0269>
- Derbal W, Zerizer A, Gérard J, Guibal D (2015) Point de saturation des fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie
- Détienne P (1979) Les erreurs dans les dénominations commerciales des bois tropicaux. Bois Forêt des Trop 186:61–64
- Détienne P, Vernay M (2011) Les espèces du genre *Tabebuia* susceptibles de fournir le bois d'ipé. BOIS FORETS DES Trop 307:69. <https://doi.org/10.19182/bft2011.307.a20483>
- Dirol D, Deglise X (2001) Durabilité des bois et problèmes associés. Hermès Science, Paris
- Doat J (1972) Etude papetière de l'Okoumé. Essais de laboratoire, semi-industriels

- et industriels (1re partie). *BOIS FORETS DES Trop* 146:31–52. <https://doi.org/10.19182/BFT1972.146.A19142>
- Doucet J-L (2003) L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon. Université de Liège-Gembloux Agro-Bio tech
- Doucet JL, Daïnou K, Ligot G, et al (2016) Enrichment of Central African logged forests with high-value tree species: testing a new approach to regenerating degraded forests. *Int J Biodivers Sci Ecosyst Serv Manag* 12:83–95. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1168868>
- Doucet JL, Kouadio YL (2007) Le Moabi, une espèce "phare" de l'exploitation forestière en Afrique centrale
- Doucet JL, Kouadio YL, Monticelli D, Lejeune P (2009) Enrichment of logging gaps with moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) in a Central African rain forest. *For Ecol Manage* 258:2407–2415. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.08.018>
- Doucet R, Bibang Bengono G, Ruwet M, et al (2022) Highlighting a New Morphospecies within the *Dialium* Genus Using Leaves and Wood Traits. *Forests* 13:1–22. <https://doi.org/10.3390/f13081339>
- Doucet R, Doucet JL, Lejeune P, et al (2021) Wood description and timber use investigation of *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms. *Eur J Wood Wood Prod* 80:199–212. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01758-3>
- Doumenge C, Mboma R, Sist P, et al (2016) La connaissance des espèces : une quête du Graal pour la gestion durable des forêts tropicales. In: Rakotoarisoa NR, Blackmore S, Riera B (eds) *Botanists of the twenty century. Roles, challenges and opportunities*, Proceedings of the Unesco international conference, UNESCO, Paris, France, pp 40–49
- Dunnington D (2022) ggsfatial: Spatial Data Framework for ggplot2
- Dupuis C, Fayolle A, Bastin J-F, et al (2023) Monitoring selective logging intensities in central Africa with sentinel-1: A canopy disturbance experiment. *Remote Sens Environ* 298:113828. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113828>
- Durand Y (1985) Nomenclature commerciale des *Shorea* et *Parashorea*. *Bois Forests des Trop* 210:51–57
- Durrieu de Madron L, Fontez B, Dipapoundji B (2000) Dégats d'exploitation et de débardage en fonction de l'intensité d'exploitation en forêt dense humide d'Afrique centrale. *Bois Forêt des Trop* 264:57–60

- Durrieu De Madron L, Karsenty A, Loffeier E, Pierre J-M (1998) Le projet d'Aménagement Pilote Intégré de Dimako (Cameroun). In: Série FORAFRI 1998, CIRAD-Forêt. Montpellier, p 169
- Eba'a Atyi R, Hiol Hiol F, Lescuyer G (2022) Les forêts du bassin du Congo : État des Forêts 2021. Center for International Forestry Research (CIFOR)
- Edwards DP, Laurance WF (2013) Biodiversity Despite Selective Logging. *Science* (80-) 339:646–647. <https://doi.org/10.1126/science.339.6120.646-b>
- Edwards DP, Magrach A, Woodcock P, et al (2014) Selective-logging and oil palm: Multitaxon impacts, biodiversity indicators, and trade-offs for conservation planning. *Ecol Appl* 24:2029–2049. <https://doi.org/10.1890/14-0010.1>
- Engozogho Anris SP, Bi Athomo AB, Safou Tchiana R, et al (2020) The condensed tannins of Okoume (*Aucoumea klaineana* Pierre): A molecular structure and thermal stability study. *Sci Rep* 10:1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58431-7>
- ESA and UCLouvain (2010) GlobCover: Global Land Cover Map
- Evans R, Stringer S, Kibblewhite RP (2000) Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita J* 53:450–457
- Ewédjè EEBK, Jansen S, Koffi GK, et al (2020) Species delimitation in the African tree genus *Lophira* (Ochnaceae) reveals cryptic genetic variation. *Conserv Genet* 21:501–514. <https://doi.org/10.1007/s10592-020-01265-7>
- FAO (2013) Vers une stratégie de développement de l'industrie de transformation du bois dans les pays du bassin du Congo. Rome, Itlay
- FAO (2011) The State of Forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, et al (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev Geophys* 45:RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fayolle A, Engelbrecht B, Freycon V, et al (2012) Geological Substrates Shape Tree Species and Trait Distributions in African Moist Forests. *PLoS One* 7:e42381. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042381>
- Fayolle A, Picard N, Doucet JL, et al (2014) A new insight in the structure, composition and functioning of central African moist forests. *For Ecol Manage* 329:195–205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.014>

- Fayolle A, Rondeux J, Doucet JL, et al (2013) Revising volume tables for better management of cameroon's forests. *Bois Forêts des Trop* 67:35–49. <https://doi.org/10.19182/bft2013.317.a20521>
- Fays R (2008) Des forêts... Des bois...
- Fétéké F, Nkolong E, Hubert D (2004) Unité Forestières d'Aménagement 10.041, 10.042 et 10.044 regroupées - Plan d'aménagement
- Forest Stewardship Council A.C. (2012) FSC Forest Stewardship Council standard for the Congo Basin
- Fotso A (2021) Communication personnelle
- Fournier-Djimbi M, Fouquet D (1998) Estimation de la qualité des arbres sur pied. *CIRAD-Forêt* 27
- Fournols J (1958) Le marché de l'Okoumé. *Bois Forêts des Trop* 58:64–71
- Freeman TG (1991) Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Comput Geosci* 17:413–422. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-I)
- FRM (2018) Vision stratégique et industrialisation de la filière bois dans les 6 pays du Bassin du Congo, Horizon 2030. Montpellier
- FSC (2023) Forest Stewardship Council Africa. <https://africa.fsc.org/fr-cd/sous-regions/la-sous-region-du-bassin-du-congo>. Accessed 9 Nov 2023
- Gartner BL, Milota MR, Hua L (1997) Variation in the anatomy and specific gravity of wood within and between trees of red alder (*Alnus rubra* Bong.). *Wood Fiber Sci* 29:10–20
- Gasson P (2011) How precise can wood identification be? wood anatomy's role in support of the legal timber trade, especially cites. *IAWA J* 32:137–154. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000049>
- Gayot M, Sist P (2004) Vulnérabilité des espèces de maçaranduba face à l'exploitation en Amazonie brésilienne : nouvelles normes d'exploitation à définir. *Bois forêts des Trop* 280:75–90
- Gérard J, Guibal D, Paradis S, et al (2011) *Tropix* 7
- Gérard J, Guibal D, Paradis S, Cerre J-C (2016) Atlas des bois tropicaux : caractéristiques technologiques et utilisations
- Gérard J, Guibal D, Paradis S, Cerre J-C (2017) Tropical Timber Atlas, Quae.

Versailles

- Gérard J, Paradis S, Thibaut B (2019) Survey on the chemical composition of several tropical wood species. *Bois Forests des Trop* 342:79–91. <https://doi.org/10.19182/bft2019.342.a31809>
- Gérardin P, Fritsch C, Cosgun S, et al (2020) Effet de la hauteur de prélèvement sur la composition quantitative et qualitative des polyphénols de l'écorce d'*Abies alba* Mill. *Rev For française* 72:411–423. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2020.5338>
- Gerhards CC (1982) Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. *Wood Fiber* 14:4–36
- Ggplot2 Development Team (2012) Ggplot2-0.9.0. Production 1–41
- Giavarina D (2015) Understanding Bland Altman analysis Lessons in biostatistics. *Biochem Medica* 25:141–51. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>
- Gombin J, Vaidyanathan R (2020) concaveman: A Very Fast 2D Concave Hull Algorithm
- González-Peña MM, Hale MDC (2011) Rapid assessment of physical properties and chemical composition of thermally modified wood by mid-infrared spectroscopy. *Wood Sci Technol* 45:83–102. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0307-9>
- Gottwald HPJ (1968) L'identification et l'appellation des bois de "Lauan" et de "Meranti." *Bois Forests des Trop* 121:35–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/bft1968.121.a19030>
- Gourlet-Fleury S, Cornu G, Jéssel S, et al (2005) Using models to predict recovery and assess tree species vulnerability in logged tropical forests: A case study from French Guiana. *For Ecol Manage* 209:69–85. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2005.01.010>
- Gourlet-Fleury S, Rossi V, Forni E, et al (2023) Competition and site weakly explain tree growth variability in undisturbed Central African moist forests. *J Ecol* 111:1950–1967. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14152>
- Gouveia SF, Villalobos F, Dobrovolski R, et al (2014) Forest structure drives global diversity of primates. *J Anim Ecol* 83:1523–1530. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12241>
- Grasel FDS, Ferrão MF, Wolf CR (2016) Development of methodology for

- identification the nature of the polyphenolic extracts by FTIR associated with multivariate analysis. *Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc* 153:94–101. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.08.020>
- Guedje NM, Lejoly J, Nkongmeneck BA, Jonkers WBJ (2003) Population dynamics of *Garcinia lucida* (Clusiaceae) in Cameroonian Atlantic forests. *For Ecol Manage* 177:231–241. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00444-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00444-9)
- Hai PH, Jansson G, Hannrup B, et al (2009) Use of wood shrinkage characteristics in breeding of fast-grown *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth in Vietnam. *Ann For Sci* 2009 666 66:611–611. <https://doi.org/10.1051/FORREST/2009048>
- Halley M (1953) Quelques prix, quelques rendements obtenus dans une exploitation forestière au Cameroun. *BOIS FORETS DES Trop* 32:15–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/bft1953.32.a18479>
- Harris JM (1989) *Spiral Grain and Wave phenomena in Wood Formation*, Springer-V. Berlin
- Haurez B, Tagg N, Petre CA, et al (2016) Short term impact of selective logging on a western lowland gorilla population. *For Ecol Manage* 364:46–51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.030>
- Helgason T, Russell SJ, Monro AK, Vogel JC (1996) What is mahogany? The importance of a taxonomic framework for conservation. In: *Botanical Journal of the Linnean Society*. No longer published by Elsevier, pp 47–59
- Hernández RE (2007) Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Sci Technol* 41:249–265. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0114-5>
- Hernández RE, Almeida G (2003) Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods. *Wood Fiber Sci* 35:154–166
- Hijmans RJ (2023) *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*
- Hillaby A (2000) The visual context of wood. *Gt. Vancouver Woodturners Guild Newsl.* 1:1–6
- Hiolhiol F (2020) *Etat de lieux des acteurs du secteur privé de la filière forêt-bois au Cameroun*
- Hobro AJ, Kuligowski J, Döll M, Lendl B (2010) Differentiation of walnut wood

- species and steam treatment using ATR-FTIR and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA). *Anal Bioanal Chem* 398:2713–2722. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4199-1>
- Hothorn T, Zeileis A (2015) Partykit: A modular toolkit for recursive partytioning in R. *J Mach Learn Res* 16:3905–3909
- Huang A, Zhou Q, Liu J, Fei B (2008) Distinction of three wood species by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation IR spectroscopy. *J Mol Struct* 883–884:160–166. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2007.11.061>
- Hubau W, Van den Bulcke J, Kitin P, et al (2012) Charcoal identification in species-rich biomes: A protocol for Central Africa optimised for the Mayumbe forest. *Rev Palaeobot Palynol* 171:164–178. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.11.002>
- IBN (1956) NBN 225 : Bois. Méthodes d'essai de qualification. Bruxelles
- Iglésias SP, Toulhoat L, Sellos DY (2010) Taxonomic confusion and market mislabelling of threatened skates: Important consequences for their conservation status. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 20:319–333. <https://doi.org/10.1002/aqc.1083>
- Iida Y, Poorter L, Sterck FJ, et al (2012) Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. *Funct Ecol* 26:274–282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01921.x>
- InsideWood (2004) InsideWood. <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search>
- International Association of Wood Anatomists. Committee on Nomenclature (1964) Multilingual glossary of terms used in wood anatomy
- Ishiguri F, Eizawa J, Saito Y, et al (2007) Variation in the wood properties of *Paraserianthes falcataria* planted in Indonesia. *IAWA J* 28:339–348. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001645>
- ISO (2012) ISO 3129 : Bois – Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques de petites éprouvettes de bois net
- IUCN Standards and Petitions Committee (2022) Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 15.1.
- Jégourel Y, Chalmin P (2019) Bois tropicaux. In: L'afrique et les marchés mondiaux de matières premières. Polic Center for the New South, pp 170–176

- Karsenty A (2019) Certification of tropical forests: A private instrument of public interest? A focus on the Congo Basin. For Policy Econ 106:. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.101974>
- Karsenty A (2021) Problématique de l'économie industrielle du bois en Afrique centrale et de l'interdiction annoncée d'exporter des grumes. Les Cah d'analyses Prospect CyclOpe 1–8
- Karsenty A, Drigo IG, Piketty MG, Singer B (2008) Regulating industrial forest concessions in Central Africa and South America. For Ecol Manage 256:1498–1508. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.001>
- Karsenty A, Ferron C (2017) Recent evolutions of forest concessions status and dynamics in Central Africa. Int For Rev 19:10–26
- Karsenty A, Gourlet-Fleury S (2006a) Assessing Sustainability of Logging Practices in the Congo Basin's Managed Forests: the Issue of Commercial Species Recovery. Ecol Soc 11:art26. <https://doi.org/10.5751/ES-01668-110126>
- Karsenty A, Gourlet-Fleury S (2006b) Assessing Sustainability of Logging Practices in the Congo Basin's Managed Forests: the Issue of Commercial Species Recovery. Ecol Soc 11:13. <https://doi.org/10.2307/26267810>
- Karsenty A, Romero C, Cerutti PO, et al (2017) Deforestation and timber production in Congo after implementation of sustainable management policy: A reaction to the article by J.S. Brandt, C. Nolte and A. Agrawal (Land Use Policy 52:15–22). Land use policy 65:62–65. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.032>
- Karsenty A, Vermeulen C (2016) Vers des concessions 2.0 : Articuler gestion inclusive et exclusive dans les forêts de production en Afrique centrale. In: La gestion inclusive des forêts d'Afrique centrale. pp 205–223
- Kassambara A (2021) rstatix: pipe-friendly framework for basic statistical tests.
- Kassambara A (2019) ggpubr: “ggplot2” Based Publication Ready Plots
- Keller R (2009) Des caractéristiques nouvelles pour l'étude des propriétés mécaniques des bois : les composantes de la densité. Ann des Sci For 25:237–249. <https://doi.org/10.1051/forest/19680402>
- Kenfack D, Sainge MN, Chuyong GB, Thomas DW (2018) The genus cola (Malvaceae) in Cameroon's Korup national park, with two novelties. Plant Ecol Evol 151:241–251. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2018.1410>

- Khatib JM (2009) Sustainability of Construction Materials
- King DA, Davies SJ, Nur Supardi MN, Tan S (2005) Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia. *Funct Ecol* 19:445–453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.00982.x>
- King DA, Davies SJ, Tan S, Noor NSM (2006) The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees. *J Ecol* 94:670–680. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01112.x>
- Kleinschroth F, Gourlet-Fleury S, Sist P, et al (2015) Legacy of logging roads in the Congo Basin: How persistent are the scars in forest cover? *Ecosphere* 6:art64. <https://doi.org/10.1890/ES14-00488.1>
- Kollmann FFP, Coté WAJ (1968) Principles of Wood Science and Technology, Springer-V. Berlin
- Kombila-Mouloungui AG (2019) L'arrêt de l'exportation des grumes au Gabon: Enjeux et Perspectives. Université de Pau et des pays de l'Adour
- Kopecký M, Čížková Š (2010) Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? *Appl Veg Sci* 13:450–459. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x>
- Kord B, Kialashaki A, Kord B (2010) The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish J Agric For* 34:121–126. <https://doi.org/10.3906/tar-0903-14>
- Kretschmann DE, Green DW (1996) Modeling moisture content-mechanicalproperty relationships for clear southern pine. *Wood fiber Sci* 28:320–337
- Kucheryavskiy S (2020) mdatools – R package for chemometrics. *Chemom Intell Lab Syst* 198:103937. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.103937>
- Laboratory Forest Products (2010) Wood handbook : wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190, Departemen. Madison
- Lamb D, Erskine PD, Parrotta JA (2005) Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* (80-.). 310:1628–1632
- Lancaster C, Espinoza E (2012) Analysis of select *Dalbergia* and trade timber using direct analysis in real time and time-of-flight mass spectrometry for CITES enforcement. *Rapid Commun Mass Spectrom* 26:1147–1156. <https://doi.org/10.1002/RCM.6215>

- Langbour P, Gérard J (2007) La transformation plus poussée en Afrique centrale. 7–10
- Lanly JP, Lepitre C (1970) Estimation des volumes commercialisables dans les inventaires forestiers tropicaux par sondages. *Bois Forêt des Trop* 129:49–68
- Laporte J, Doucet J-L (2013) Évaluation de l'aménagement et de l'état des populations des essences exploitées par la société Precious Woods Gabon
- Lasserre G (1955) Okoumé et chantiers forestiers du Gabon. *Cah d'outre-mer* 8:119–160. <https://doi.org/10.3406/caoum.1955.1959>
- Latorraca JVF, Dünisch O, Koch G (2011) Chemical composition and natural durability of juvenile and mature heartwood of *Robinia pseudoacacia* L. *Ann Brazilian Acad Sci* 83:1059–1068
- Laurance WF, Alonso A, Lee M, Campbell P (2006) Challenges for forest conservation in Gabon, Central Africa. *Futures* 38:454–470. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.07.012>
- Le Cao K-A, Rohart F, Gonzalez I, et al (2016) mixOmics: Omics Data Integration Project. R package version 6.1.1.
- Lê S, Josse J, Husson F (2008a) FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw* 25:1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.
- Lê S, Josse J, Husson F (2008b) FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *J Stat Softw* 25:. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lehnebach R (2015) Etude de la variabilité ontogénique du profil ligneux chez quelques espèces forestières tropicales de Guyane française. Université de Montpellier
- Lemmens RHMJ (Roeland HMJ, Louppe D, Oteng-Amoako A, Corbière H (2012) Ressources végétales de l'Afrique tropicale. *Prota* 7(2): bois d'oeuvre 2. Fondation PROTA, Wageningen, Netherlands
- Leroy M, Derroire G, Vendé J, Leménager T (2013) La gestion durable des forêts tropicales. De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion
- Lever J, Krzywinski M, Altman N (2017) Points of Significance: Principal component analysis. *Nat. Methods* 14:641–642
- Lhate I, Cuvilas C, Terziev N, Jirjis R (2010) Chemical composition of traditionally and lesser used wood species from Mozambique. *Wood Mater Sci Eng* 5:143–

150. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.484867>
- Lhoest S, Fonteyn D, Daïnou K, et al (2020) Conservation value of tropical forests: Distance to human settlements matters more than management in Central Africa. *Biol Conserv* 241:108351. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108351>
- Lichtenegger H, Reiterer A, Stanzl-Tschegg SE, Fratzl P (1999) Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization. *J Struct Biol*. <https://doi.org/10.1006/jsbi.1999.4194>
- Ligot G, Dubart N, Hapi MT, et al (2018) Réviser les tarifs de cubage pour prendre en compte l'évolution de la ressource au Cameroun. *Bois Forests des Trop* 338:57–71. <https://doi.org/10.19182/bft2018.338.a31677>
- Ligot G, Fayolle A, Gourlet-Fleury S, et al (2019) Growth determinants of timber species *Triplochiton scleroxylon* and implications for forest management in central Africa. *For Ecol Manage* 437:211–221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.042>
- Ligot G, Gourlet-Fleury S, Dainou K, et al (2022) Tree growth and mortality of 42 timber species in central Africa. *For Ecol Manage* 505:119889. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119889>
- Loehnertz SP, Cooz IV, Guerrero J (1996) Hardwood sawing technology in five tropical countries. *For Prod J* 46:51–56
- Louppe D, Mille G (2015) *Mémento du forestier tropical*, Quae. Editions Quae, Versailles
- Louppe D, Oteng-Amoako A, Brink M (2008) *Ressources végétales de l'Afrique tropicale* 7(1). Bois d'oeuvre 1. PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands
- Lourenço A, Neiva DM, Gominho J, et al (2015) Characterization of lignin in heartwood, sapwood and bark from *Tectona grandis* using Py–GC–MS/FID. *Wood Sci Technol* 49:159–175. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0684-6>
- Mabika J, Brunel S, Berron H, et al (2003) *Exploitation et gestion durable de la forêt gabonaise: analyse géographique et problèmes de gestion et d'aménagement forestier*. Montpellier 3
- Mahalanobis PC (1936) On the Generalised Distance in Statistics. *Proc Natl Inst Sci India* 2:49–55

- Mantanis GI, Young RA, Rowell RM (1994) Swelling of wood Part 1. Swelling in water. Springer-Verlag
- Marsoem N, Kikata Y (1987) The effect of interlocked grain on the mechanical properties of white meranti. *Bull Nagoya Univ* 9:51–57
- Martin AR, Erickson DL, Kress WJ, Thomas SC (2014) Wood nitrogen concentrations in tropical trees: Phylogenetic patterns and ecological correlates. *New Phytol* 204:484–495. <https://doi.org/10.1111/nph.12943>
- Martin P (2020) Communication personnelle
- Martin P, Vernay M (2016) Guide d'utilisation des bois africains éco-certifiés en Europe, ATIBT
- Martins ACM, Willig MR, Presley SJ, Marinho-Filho J (2017) Effects of forest height and vertical complexity on abundance and biodiversity of bats in Amazonia. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.039>
- Mboma R, Chevillotte H, Doumenge C, et al (2022) Lack of Coherence Between Commercial and Scientific Names for Timber Species : Implications for the Sustainable Exploitation of Andoung in Gabon
- Medjibe VP, Putz FE, Starkey MP, et al (2011) Impacts of selective logging on above-ground forest biomass in the Monts de Cristal in Gabon. *For Ecol Manage* 262:1799–1806. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2011.07.014>
- MEFEPEPN (2004) Arrêté n°000118/PR/MEFEPEPN fixant les diamètres minima d'exploitabilité administratifs des bois d'oeuvre. 3
- Méniaud J (1948) Etat actuel de la production et du commerce des bois exploités dans nos forêts africaines. *BOIS FORETS DES Trop* 6:175–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/bft1948.6.a18338>
- Méniaud J (1949) L'évolution du marché des bois tropicaux africains depuis janvier 1948. Perspectives actuelles. *BOIS FORETS DES Trop* 10:204–207. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/bft1949.10.a18390>
- Meunier Q, Moumbogou C, Doucet J-L (2015) Les Arbres Utiles du Gabon, les presse. Gembloux, Belgique
- Mille G, Louppe D (2015) Mémento du forestier tropical, Quae. Versailles
- MINFOF (2001) Arrêté N°0222 du 25 Mai 2001 fixant les procédures d'élaboration, approbation, de suivi et de contrôle de la mise en oeuvre, des plans d'aménagement des forêts de production du domaine forestier

permanent.

- Ministère de la coopération (1976) *Mémento du forestier tropicale*, Ministère. Paris
- Ministère des Eaux et Forêts/World Resources Institute Gabon Forest Atlas. <https://www.wri.org/data/interactive-forest-atlas-gabon-atlas-forestier-interactif-du-gabon>. Accessed 10 Mar 2023
- Ministère des Forêts et de la Faune (2005) *Le cadre juridique des forêts et de l'environnement au Cameroun - Recueil de texte*
- Mitchard ETA (2018) The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* 559:527–534
- Mokroš M, Výboštok J, Tomašík J, et al (2018) High precision individual tree diameter and perimeter estimation from close-range photogrammetry. *Forests* 9. <https://doi.org/10.3390/f9110696>
- Morin-rivat J (2018) Des arbres et des hommes : nouvelles perspectives sur les relations entre l'Homme et son environnement dans les forêts humides d'Afrique. *Bois Forêts des Trop* 335:2017–2019. <https://doi.org/10.19182/bft2018.335.a31501>
- Morin-Rivat J, Fayolle A, Favier C, et al (2017) Present-day central African forest is a legacy of the 19th century human history. *Elife* 6. <https://doi.org/10.7554/eLife.20343>
- Nadine A, Meriem F, Jacques B (2008) Colour and decay resistance and its relationships in *Eperua grandiflora*. *Ann For Sci* 65:806. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/forest:2008061>
- Nanda A, Mohapatra DBB, Mahapatra APK, et al (2021) Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. *Int J Stat Appl Math* 6:59–65. <https://doi.org/10.22271/math.2021.v6.i1a.636>
- Nasi R, Billand A, van Vliet N (2012a) Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *For Ecol Manage* 268:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.005>
- Nasi R, Billand A, van Vliet N (2012b) Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *For Ecol Manage* 268:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.005>
- Nasi R, Cassagne B, Billand A (2006) Forest management in Central Africa: Where are we? *Int For Rev* 8:14–20. <https://doi.org/10.1505/ifor.8.1.14>

- Nature + asbl & Pallisco (2015) Plan d'aménagement : unité forestière d'aménagement N° 10-47, Région de l'Est
- Ndonda Makemba R, Moupela C, Tosso F, et al (2022) New evidence on the role of past human activities and edaphic factors on the fine-scale distribution of an important timber species: *Cylicodiscus gabunensis* Harms. *For Ecol Manage* 521:. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120440>
- Ndongmo Zebaze A, Biwolé AB, Zobo Mfomo J, et al (2023) Physical and mechanical properties of *Brachystegia cynometroides* wood from Cameroon, a potential substitute for timbers used for engineering applications. *J Indian Acad Wood Sci* 20:157–164. <https://doi.org/10.1007/s13196-023-00321-2>
- Neve G (2023) Communication personnelle
- Nisca A, Ștefănescu R, Stegăruș DI, et al (2021) Comparative Study Regarding the Chemical Composition and Biological Activity of Pine (*Pinus nigra* and *P. sylvestris*) Bark Extracts. *Antioxidants* 2021, Vol 10, Page 327 10:327. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX10020327>
- Normand D, Paquis J (1976) Manuel d'identification des bois commer, Centre Tec. Nogent-sur-Marne
- Nowosad J, Lovelace R (2023) *spDataLarge*: Large datasets for spatial analysis
- Nuopponen MH, Birch GM, Sykes RJ, et al (2006a) Estimation of wood density and chemical composition by means of diffuse reflectance mid-infrared fourier transform (DRIFT-MIR) spectroscopy. *J Agric Food Chem* 54:34–40. <https://doi.org/10.1021/jf051066m>
- Nuopponen MH, Wikberg HI, Birch GM, et al (2006b) Characterization of 25 tropical hardwoods with fourier transform infrared, ultraviolet resonance raman, and ¹³C-NMR cross-polarization/magic- angle spinning spectroscopy. *J Appl Polym Sci* 102:810–819. <https://doi.org/10.1002/app.24143>
- Ocloo J., Laing E (2003) Correlation of relative density and strength properties with anatomical properties of the wood of Ghanaian *Celtis* species. *Discov Innov* 15:186–196
- Oldfield S (1988) *Rare Tropical Timbers*. Gland, Switzerland and Cambridge, UK
- Olorunnisola AO (2018) *Design of Structural Elements with Tropical Hardwoods*. Springer Nature
- ONADEF (1992) *Norme d'études d'arbres*. Yaoundé, Cameroun

- Oreopoulou A, Tsimogiannis D, Oreopoulou V (2019) Extraction of Polyphenols From Aromatic and Medicinal Plants: An Overview of the Methods and the Effect of Extraction Parameters. In: *Polyphenols in Plants*. Elsevier, pp 243–259
- Özgenç Ö, Durmaz S, Boyacı IH, Eksi-Kocak H (2017) Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry. *Spectrochim Acta - Part A Mol Biomol Spectrosc* 171:395–400. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2016.08.026>
- Panzou GJL, Doucet J-L, Loumeto J-J, et al (2016) Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Base* 20:508–522. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13232>
- Pasquet RS (1993) Classification infraspecific des formes spontanées de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Fabaceae) à partir de données morphologiques. *Bull du Jard Bot Natl Belgique / Bull van Natl Plantentuin van België* 62:127. <https://doi.org/10.2307/3668271>
- Pebesma E (2018) Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *R J* 10:439. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma E, Bivand R (2005) Classes and methods for spatial data in R. *R News* 5:. <https://doi.org/https://>
- Picard N, Gourlet-Fleury S, Forni É (2012a) Estimating damage from selective logging and implications for tropical forest management. *Can J For Res* 42:605–613. <https://doi.org/10.1139/X2012-018>
- Picard N, Gourlet-Fleury S, Forni É (2012b) Stock recovery rates are not the panacea to assess timber yield sustainability: Evidence from managed Central African forests. *For Ecol Manage* 281:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.013>
- Picard N, Saint-André L, Henry M (2012c) Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres. De la mesure de terrain à la prédiction. FAO; Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Pinheiro J, Bates D, R Core Team (2023) nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models
- Pinheiro J, Bates D, R Core Team (2022) Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package
- Plourde BT, Boukili VK, Chazdon RL (2015) Radial changes in wood specific

- gravity of tropical trees: Inter- and intraspecific variation during secondary succession. *Funct Ecol* 29:111–120. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12305>
- Pollet C, Jourez B, Hébert J (2008) Natural durability of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) wood grown in Wallonia, Belgium. *Can J For Res* 38:1366–1372. <https://doi.org/10.1139/X07-244>
- Pollet C, Verheyen C, Hébert J, Jourez B (2012) Physical and mechanical properties of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood grown in Belgium. *Can J ...* 42:831–840
- Pomerantsev AL (2008) Acceptance areas for multivariate classification derived by projection methods. *J Chemom* 22:601–609. <https://doi.org/10.1002/CEM.1147>
- Poorter L (2009) Leaf traits show different relationships with shade tolerance in moist versus dry tropical forests. *New Phytol* 181:890–900. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02715.x>
- Popescu C –M, Jones D, Kržišnik D, Humar M (2020) Determination of the effectiveness of a combined thermal/chemical wood modification by the use of FT–IR spectroscopy and chemometric methods. *J Mol Struct* 1200:. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2019.127133>
- Posit Team (2022) RStudio: Integrated Development Environment for R
- Poulsen JR, Medjibe VP, T White LJ, et al (2020) Old growth Afrotropical forests critical for maintaining forest carbon. *Glob Ecol Biogeogr* 29:13. <https://doi.org/10.1111/geb.13150>
- Présidence de la République P (2001) Loi n° 016/01 du 31 décembre 2001 portant code forestier en République gabonaise.
- Price ER, McClure PJ, Huffman AN, et al (2022) Reliability of wood identification using DART-TOFMS and the ForeST© database: A validation study The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (. <https://doi.org/10.1016/j.fsiae.2022.100045>
- Putz FE, Zuidema PA, Synnott T, et al (2012) Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: The attained and the attainable. *Conserv Lett* 5:296–303. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00242.x>
- Quinn P, Beven K, Chevallier P, Planchon O (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrol Process* 5:59–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>

- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Réjou-Méchain M, Mortier F, Bastin JF, et al (2021) Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature* 593:90–94. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03483-6>
- Richter C (2015) Wood Characteristics
- Riesco Muñoz G, Andrés &, Gete R, Regueiro MG Variation in log quality and prediction of sawing yield in oak wood (*Quercus robur*). <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0314-8>
- Riesco Muñoz G, Remacha Gete A, Gasalla Regueiro M (2013) Variation in log quality and prediction of sawing yield in oak wood (*Quercus robur*). *Ann For Sci* 70:695–706. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0314-8>
- Rojo JP (1982) Studies in the genus *Dialium* (Cassieae-Caesalpinioideae). Oxford University
- Romero C, Sills EO, Guariguata MR, et al (2017) Evaluation of the impacts of Forest Stewardship Council (FSC) certification of natural forest management in the tropics: A rigorous approach to assessment of a complex conservation intervention. *Int For Rev* 19:36–49. <https://doi.org/10.1505/146554817822295902>
- Rondeux J (1999) La mesure des arbres et des peuplements forestiers. 544
- Roussel J-R, Auty D, Coops NC, et al (2020) lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sens Environ* 251:112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Rozendaal DM, Soliz-Gamboa CC, Zuidema PA (2010) Timber yield projections for tropical tree species: The influence of fast juvenile growth on timber volume recovery. *For Ecol Manage* 259:2292–2300. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.02.030>
- Rozendaal DMA, Phillips OL, Lewis SL, et al (2020) Competition influences tree growth, but not mortality, across environmental gradients in Amazonia and tropical Africa. *Ecology* 101:1–11. <https://doi.org/10.1002/ecy.3052>
- Rungwattana K, Hietz P (2018) Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics. *Funct Ecol* 32:260–272. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12970>
- Ruwet M (2021) Caractérisations morphologiques, spectrales et génétiques des Eyoum (*Dialium* spp.). Université de Liège

- Sack L, Cowan PD, Jaikumar N, Holbrook NM (2003) The 'hydrology' of leaves: co-ordination of structure and function in temperate woody species. *Plant Cell Environ* 26:1343–1356. <https://doi.org/10.1046/J.0016-8025.2003.01058.X>
- Sallenave P (1955) Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française. Nogent-sur-Marne
- Sandberg D (2005) Radially sawn timber-the Primwood Method for improved properties. *Holz als Roh - und Werkst* 63:94–101. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0531-9>
- Scalbert A (1992) Tannins in Woods and Their Contribution to Microbial Decay Prevention. In: *Plant Polyphenols*. Springer, Boston, MA, pp 935–952
- Scalbert M, Vermeulen C, Breuer T, Doucet JL (2023) The challenging coexistence of forest elephants *Loxodonta cyclotis* and timber concessions in central Africa. *Mamm. Rev.* 53:15–31
- Schmelzer GH, Gurib-Fakim A (2008) Medicinal plants 1. PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands
- Schulgasser K, Witztum A (2015) How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. *Wood Sci Technol* 49:389–401. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0699-7>
- Shen D, Liu G, Zhao J, et al (2015) Thermo-chemical conversion of lignin to aromatic compounds: Effect of lignin source and reaction temperature. *J Anal Appl Pyrolysis* 112:56–65. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2015.02.022>
- Sheppard PR, Thompson TL (2000) Effect of Extraction Pretreatment on Radial Variation of Nitrogen Concentration in Tree Rings. *J Environ Qual* 29:2037–2042. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900060042x>
- Shmulsky R, Jones PD (2011) *Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition*
- Sholadoye IO, Abubakar I, Annafi QB, Ejeh SP (2016) Evaluation of Some Wood Properties of Nigeria Timber Using Four-Point Bending Test. *Adv Multidiscip Res J* 2:133–144
- Sist P, Picard N, Gourlet-Fleury S (2003) Sustainable cutting cycle and yields in a lowland mixed dipterocarp forest of Borneo. *Ann For Sci* 60:803–814. <https://doi.org/10.1051/forest:2003075>
- Sist P, Pioniot C, Kanashiro M, et al (2021) Sustainability of Brazilian forest concessions. *For Ecol Manage* 496:119440.

<https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.119440>

- Skaar C (1988) *Wood-Water Relations*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Slik JWF, Arroyo-Rodríguez V, Aiba SI, et al (2015) An estimate of the number of tropical tree species. *Proc Natl Acad Sci U S A* 112:7472–7477. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423147112>
- Sluiter A, Hames B, Ruiz RO, et al (2005) Determination of Ash in Biomass. *Renew. Energy Lab. Golden, CO, USA, Laboratory Analytical Procedure (LAP)*, Colorado
- Smith JP, Plumptre RA, Brazier JD, et al (1994) “Prospect” for Improved Use of Tropical Timbers
- Spear M, Walker JCF (2006) Dimensional instability in timber. In: J.C.F. Walker (ed) *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, Springer. Dordrecht, pp 95–120
- Stringer JW, Olson JR (1987) Radial and vertical variation in stem properties of juvenile black locust (*Robinia pseudoacacia*). *Wood Fiber Sci* 19:59–67
- Suchel J-B (1968) L’exploitation forestière en République Centrafricaine. *Cah d’outre-mer* 21:324–330. <https://doi.org/10.3406/caoum.1968.4168>
- Surový P, Yoshimoto A, Panagiotidis D (2016) Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry. *Remote Sens* 8:. <https://doi.org/10.3390/rs8020123>
- Tchinda Saha J-B, Abia D, Dumarç Ay S, et al (2012) Antioxidant activities, total phenolic contents and chemical compositions of extracts from four Cameroonian woods: Padouk (*Pterocarpus soyauxii* Taubb), tali (*Erythrophleum suaveolens*), moabi (*Baillonella toxisperma*), and movingui (*Distemonanthus benthamianus*). *Ind Crops Prod* 41:71–77. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.012>
- TerEA (Terre Environnement Aménagement) (2007) *Résumé du plan d’aménagement*. Compagni Equatoriale des bois. Precious Wood Gabon
- Toong W, Ratnasingam J, Mohamad Roslan MK, Halis R (2014) The prediction of wood properties from anatomical characteristics: The case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources* 9:5184–5197. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.5184-5197>
- Trilokesh C, Uppuluri KB (2019) Isolation and characterization of cellulose

- nanocrystals from jackfruit peel. *Sci Rep* 9:16709. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53412-x>
- Tschiamala-Tshibangu N, Foudjet AE, Tchoffo B, Bengono AG (1993) Valorisation des bois secondaires du cameroun par la connaissance de leursteneur en silice, ainsi que de leurs propriétés tant physiques que mécaniques: Cas de essia et de mubala. *Holzforschung* 47:62–67. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1993.47.1.62>
- Tsehaye A, Walker JCF (1995) Spiral grain in Canterbury Pinus radiata: within- and between-tree variations and effect on mechanical properties. *New Zeal J For Sci* 25:358–366
- Tsuchikawa S, Kobori H A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>
- Van Der Hout P (2000) Testing the applicability of reduced impact logging in greenheart forest in Guyana
- Van Soest PJ (1990) Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. II. A Rapid Method for the Determination of Fiber and Lignin. *J AOAC Int* 73:491–497. <https://doi.org/10.1093/jaoac/73.4.491>
- Van Soest PJ, Wine RH (1967) Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. IV. Determination of Plant Cell-Wall Constituents. *J AOAC Int* 50:50–55. <https://doi.org/10.1093/jaoac/50.1.50>
- Vancutsem C, Achard F, Pekel J-F, et al (2021) Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Sci Adv* 7:. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe1603>
- Vandrot H (2018) Nomenclature of the new caledonian genera arthroclianthus Baill. and nephrodesmus schindl. (Fabaceae-Desmodieae). *Adansonia* 40:103–129. <https://doi.org/10.5252/adansonia2018v40a8>
- Wang L, Liu H (2006) An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *Int J Geogr Inf Sci* 20:193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wang SN, Zhang F Da, Huang AM, Zhou Q (2016) Distinction of four Dalbergia species by FTIR, 2nd derivative IR, and 2D-IR spectroscopy of their ethanol-benzene extractives. *Holzforschung* 70:503–510. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0125>
- Wang Y, Xiang J, Tang Y, et al (2022) A review of the application of near-infrared

- spectroscopy (NIRS) in forestry. *Appl Spectrosc Rev* 57:300–317. <https://doi.org/10.1080/05704928.2021.1875481>
- Weddell E (1961) Influence of interlocked grain on the bending strength of timber, with particular reference to utile and greenheart. *J Inst Wood Sci* 7:56–72
- Weiss A (2001) Topographic positions and landforms analysis (Conference Poster). In: ESRI International User Conference. San Diego, pp 9–13
- White F (1993) The AETFAT Chorological Classification of Africa: History, Methods and Applications. *Bull du Jard Bot Natl Belgique / Bull van Natl Plantentuin van België* 62:225. <https://doi.org/10.2307/3668279>
- White F (1979) The Guineo-Congolian Region and Its Relationships to Other Phytocoria. *Bull du Jard Bot Natl Belgique / Bull van Natl Plantentuin van België* 49:11. <https://doi.org/10.2307/3667815>
- White F (1986) La végétation de l’Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l’Afrique Unesco, ORSTOM & U. AETFAT/UNSO, Paris
- White G, van Benthem M, Oldenburger J, Teeuwen S (2019) Comprendre le marché des produits de seconde transformation en bois tropical grâce aux données
- Wickham H, Averick M, Bryan J, et al (2019) Welcome to the Tidyverse. *J Open Source Softw* 4:1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham H, François R, Henry L, Müller K (2022) *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*
- Wickham H, Vaughan D, Girlich M (2023) *tidyr: Tidy Messy Data*
- Wiemann M, Williamson G (1988) Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers. *Wood fiber Sci* 20:344–349
- Wiemann M, Williamson G (1989) Radial gradients in the specific gravity of wood in some tropical and temperate trees. *For Sci* 35:197–210. <https://doi.org/10.1093/forestscience/35.1.197>
- Wieringa JJ (1999) *Monopetalanthus* exit. A systematic study of *Aphanocalyx*, *Bikinia*, *Icuria*, *Michelsonia* and *Tetraberlinia* (Leguminosae, Caesalpinioideae). Wageningen University, Netherlands
- Wieringa JJ, MacKinder BA (2012) *Novitates Gabonensis* 79: *Hymenostegia elegans* and *H. robusta* spp. nov. (Leguminosae-Caesalpinioideae) from Gabon. *Nord J Bot* 30:144–152. [245](https://doi.org/10.1111/j.1756-</p></div><div data-bbox=)

1051.2011.01260.x

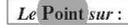
- Woodcock D, Shier A (2002) Wood specific gravity and its radial variations: The many ways to make a tree. *Trees - Struct Funct* 16:437–443. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0173-7>
- Woodcock DW, Shier A (2003) Does Canopy Position Affect Wood Specific Gravity in Temperate Forest Trees? *Ann Bot* 91:529–537. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg054>
- Xue X, Chen Z, Wu H, Gao H (2022) Identification of *Guiboutia* species by NIR-HSI spectroscopy. *Sci Rep* 12:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15719-0>
- Yannick C, Dominique J, Notburga G, Luc EP (2008) Original article Variation in the decay resistance of larch to fungi. *Ann For Sci* 65:810
- Yap MGS, Que YT, Chia LHL (1991) FTIR characterization of tropical wood-polymer composites. *J Appl Polym Sci* 43:2083–2090. <https://doi.org/10.1002/app.1991.070431115>
- Yuan Z, Gazol A, Wang X, et al (2012) What happens below the canopy? Direct and indirect influences of the dominant species on forest vertical layers. *Oikos* 121:1145–1153. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0706.2011.19757.X>
- Zhang SY (1997) Wood specific gravity-mechanical relationship at species level. Springer-Verlag
- Zimmerman E, Herendeen PS, Lewis GP, Bruneau A (2017) Floral evolution and phylogeny of the dialioideae, a diverse subfamily of tropical legumes. *Am J Bot* 104:1019–1041. <https://doi.org/10.3732/ajb.1600436>
- Zimmerman E, Prenner G, Bruneau A (2013) Floral ontogeny in Dialiinae (Caesalpinioideae: Cassieae), a study in organ loss and instability. *South African J Bot* 89:188–209. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.06.020>
- Zobel BJ, Sprague JR (1998) *Juvenile Wood in Forest Trees*. Springer Berlin Heidelberg

Annexes

Annexe 1. Publication 1



Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2021 25(3), 172-191



Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise (synthèse bibliographique)

Gael Bibang Bengono ^(1,2), Alain Souza ⁽²⁾, Félicien Tosso ⁽³⁾, Robin Doucet ⁽¹⁾,
Aurore Richel ⁽¹⁾, Jean-Louis Doucet ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Forest is life. Terra Teaching and Research Centre. Passage des Déportés, 2. BE-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : gael.bibangbengono@student.uliege.be; gaelprestige2015@gmail.com

⁽²⁾ Université des Sciences et Techniques de Masuku. Faculté des Sciences. Département de Biologie. Laboratoire de Génie Biologique et Pharmacologie. BP 941. Franceville (Gabon).

⁽³⁾ Nature + asbl s/c Forest is life. TERRA Teaching and Research Centre. Passage des Déportés, 2. BE-5030 Gembloux (Belgique).

Reçu le 4 décembre 2020, accepté le 3 juin 2021, mis en ligne le 30 juin 2021.

Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)

Introduction. Le présent travail dresse une synthèse des connaissances sur le genre *Dialium* (Fabaceae, Dialioideae) dans la région guinéo-congolaise. Il examine plus particulièrement la possibilité de valoriser durablement le bois de ces espèces et les coproduits de leur transformation en vue de diminuer la pression sur d'autres espèces de bois durs dont les populations se raréfient.

Littérature. Bien qu'il n'existe pas de consensus parmi les botanistes, le genre *Dialium* comprendrait 44 espèces, dont 22 espèces seraient inféodées à la région guinéo-congolaise. Les différences entre espèces sont parfois ténues et les descriptions reposent sur un nombre limité d'individus. Les espèces vivant en forêt dense humide ont des structures de populations équilibrées. À part leur mode de dispersion, lequel est zoochore, les connaissances écologiques sont très lacunaires. L'absence de données sur la dynamique des populations est particulièrement problématique dans le cadre de l'aménagement durable des forêts. Les propriétés physiques, mécaniques et biochimiques du bois ont seulement été caractérisées pour un nombre limité d'espèces.

Conclusions. Cet article, en proposant une clé de détermination des espèces de la région guinéo-congolaise, a tenté de clarifier la taxonomie du genre *Dialium* tout en soulevant la nécessité de mener des études génétiques complémentaires. En Afrique centrale, certaines espèces du genre *Dialium* sont localement abondantes et semblent se régénérer correctement. Elles offrent de nombreuses perspectives de valorisation car leur bois est très durable et pourrait renfermer des molécules intéressantes. Les recherches à venir devraient se concentrer en priorité sur la dynamique démographique de ces espèces et sur les propriétés de leur bois.

Mots-clés. Taxonomie, phylogénie, écologie, bois, métabolites, pharmacologie.

The *Dialium* of the Guinean-Congolese region. A review

Introduction. The present study provides a synthesis of current knowledge on the genus *Dialium* (Fabaceae, Dialioideae), focusing on the species of the Guinean-Congolese region. In particular, it examines the possibility of sustainably using the wood and sawing co-products of *Dialium* species in order to reduce the pressure on other hardwood species whose populations are declining.

Literature. Although there is no consensus among botanists, the *Dialium* genus is known to include 44 species, 22 of which are endemic to the Guinean-Congolese region. The differences between species are sometimes tenuous, and descriptions are based on a limited number of individuals. Species living in rainforests have balanced population structures. Apart from their mode of dispersal, which is zoochorous, ecological knowledge of *Dialium* species is very incomplete. The lack of data on population dynamics is particularly problematic in the context of sustainable forest management. The physical, mechanical and biochemical properties of the wood of these plants have only been characterized for a limited number of species.

Conclusions. By proposing a key for determining the *Dialium* species of the Guinean-Congolese region, this article has attempted to clarify the taxonomy, while raising the need for further genetic studies. In Central Africa, some species of the

genus *Dialium* are locally abundant and seem to regenerate well. They offer many prospects for development because their wood is very durable and could contain molecules of interest. Future research should focus primarily on the demographic dynamics of these species and the properties of their wood.

Keywords. Taxonomy, phylogeny, ecology, wood, metabolites, pharmacology.

1. INTRODUCTION

En Afrique, pour des raisons de marché, les rendements de matière de la transformation des bois tropicaux (volume de produits sur volume de grumes entré en usine) sont très faibles (30 % pour les sciages et entre 45 et 50 % pour les placages déroulés et les contreplaqués) (FRM, 2018). Cela s'explique d'une part par les règles exigeantes de classement des bois sur les marchés internationaux (ATIBT, 2017) et, d'autre part, par la concurrence déloyale du bois illégal sur les marchés nationaux (Reborredo, 2013). Cette concurrence empêche toute valorisation des sciages de moindre qualité suite à des coûts de transports prohibitifs. Par ailleurs, la valorisation de certaines espèces (comme les *Dialium*) demande des investissements supplémentaires car leur bois est très abrasif et nécessite d'utiliser des lames au carbure. Les coproduits de la transformation sont donc généralement brûlés, à défaut de pouvoir être valorisés. Cela se traduit par un gaspillage difficilement acceptable, alors que les espèces de bois durs traditionnels se raréfient (Biwolé, 2015 ; Gorel et al., 2015 ; Makemba et al., 2019), mettant en danger la survie de certaines entreprises.

Aujourd'hui, les difficultés du secteur bois en Afrique centrale obligent les acteurs à s'orienter progressivement vers des essences regroupées sous le nom d'espèces de promotion (*lesser known timber species*) ou vers de nouveaux produits (Koyo, 1982 ; ATIBT, 2017). Ce paradigme suppose :

- la mise sur le marché d'essences dont les propriétés technologiques et mécaniques sont supposées similaires à celles des espèces habituellement commercialisées ;
- la valorisation éco-efficace et directement applicable sur les sites de transformation des coproduits actuellement non utilisés par l'industrie du bois (ATIBT, 2017).

L'exploitation de ces espèces à promouvoir devra en outre intégrer des modalités de gestion adaptées afin de garantir le maintien de leurs populations sur le long terme (Vantomme, 1991). En effet, l'exploitation forestière en Afrique centrale est extensive et s'apparente à une cueillette, en moyenne de moins de deux arbres par hectare tous les 20 à 30 ans. Bien que ce type d'exploitation ait un impact limité sur le couvert forestier, il engendre une raréfaction progressive des espèces héliophiles caractérisées par un déficit de régénération dans les forêts matures (Karsenty &

Gourlet-Fleury, 2006). Il est donc indispensable d'avoir une connaissance approfondie de l'écologie des espèces mises sur le marché.

Le genre *Dialium*, de la famille des Fabaceae (sous-famille des Dialioideae), regroupe de nombreuses espèces multi-usages, que ce soit pour la valorisation du bois ou des molécules (Raponda-Walker & Sillans, 1961). Le présent article ambitionne de synthétiser les connaissances disponibles sur les espèces de ce genre vivant dans le centre d'endémisme guinéo-congolais (White, 1986). Dans cette optique, ont été consultées les bases de données spécialisées suivantes : *Science Finder*, *Sciences Direct*, *Scopus*, *Pubmed* et *Google Scholar* ainsi que les ressources documentaires disponibles dans la bibliothèque de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège). La combinaison des mots-clés suivants a été utilisée en français et/ou leurs équivalents en anglais : *Dialium*, phylogénie, botanique, germination, densité de population, écologie, phénologie, croissance, valorisation, criblage phytochimique, sciures de bois, molécule. En outre, pour la taxonomie, les sites suivants ont été consultés : <https://www.jstor.org/>, <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa/>, <https://www.floredatafriquecentrale.be>, <http://www.theplantlist.org/>

2. HISTOIRE DE LA TAXONOMIE ET PHYLOGÉNIE DU GENRE

La création du genre *Dialium* L. remonte à 1767, avec la description de l'espèce-type *Dialium indum* L. (Linnaeus, 1767), arbre originaire d'Inde, à feuilles composées pennées (sept paires de folioles) et à fleurs dotées de cinq pétales, de deux étamines avec des anthères oblongues et d'un ovaire supère. Deux autres espèces furent décrites quelques années plus tard : *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith (basionyme : *Arouna guianensis* Aubl.) d'Amérique tropicale par Fusée Aublet (1775) et *Dialium guineense* Willd. d'Afrique de l'Ouest par Willdenow (1796).

Au cours du 19^e siècle, le débat autour de la classification des *Dialium* fut très animé. Il débuta par De Candolle en 1825 qui classa le genre dans la tribu des Cassieae, famille des Leguminosae et sous-famille des Caesalpinioideae. En 1892, Taubert proposa une subdivision du genre *Dialium* basée sur la présence ou non de pétales (Taubert, 1892). Il distingua deux sections : *Arouna* (espèces sans pétales) et *Codarium* (espèces ayant un ou deux pétales). Deux décennies plus tard, Harms (1915) établit une nouvelle classification

basée cette fois sur les étamines et proposa trois sections : *Eudialium* (espèces à deux étamines), *Mesodialium* (espèces à cinq étamines) et *Neodialium* (espèces à dix étamines). Steyaert (1951), suite à la description de nouvelles espèces d'Afrique, d'Amérique tropicale et d'Asie, proposa une subdivision en sous-genres sur base du type de réceptacle. Il identifia deux sous-genres : *Arouna* (réceptacle en disque pubéruleux) et *Dialium* (réceptacle absent ou peu développé) et scinda le sous-genre *Arouna* en deux sections sur base de la forme du filament. Plus tard, Hutchinson (1964) reconnut à son tour 70 espèces dans le genre, mais la classification du genre au plan infra-générique ne faisait toujours pas l'unanimité.

En 1982, Rojo proposa une nouvelle classification en combinant des caractères morphologiques, de la palynologie, de la cytologie et de la phytochimie. Il reconnut finalement 27 espèces dans le genre qu'il réorganisa en sous-genres, sections et sous-sections. Le premier est le sous-genre *Arouna* dont le réceptacle des fleurs a un disque beaucoup plus large que l'ovaire. Il comprend deux sections : *Arouna* dont les anthères ont un apex pointu (sous-sections *Pirula* et *Indranentosa* dont le filament des étamines est respectivement droit et géciculé et *Codarium* dont les anthères ont un apex rétu). Les deux autres sous-genres présentent un disque absent, étroit ou aussi large que l'ovaire. Le sous-genre *Dialium* a cinq sépales. Le sous-genre *Dansera* a trois sépales et comprend deux sections : *Hova* (avec trois pétales) et *Dansera* (dépourvu de pétales).

Toutefois des incertitudes demeurent. Certaines espèces (par exemple, *D. hexasepalum* Harms) considérées comme douteuses par Rojo (1982) sont reconnues par l'*African Plant Database* (version 3.4.0.) qui, à l'inverse, classe d'autres espèces en synonymie (par exemple, *D. polyanthum* Harms et *D. pachyphyllum* Harms).

Finalement, en utilisant les séquences du génome chloroplastique matK, les *Dialium* ont été classés dans les Dialioideae reconnus comme un clade différent des Caesalpinioideae (LPWG, 2017). Cette sous-famille regroupe à présent 85 espèces et 17 genres dont le plus représenté est le genre *Dialium* avec 44 espèces recensées (LPWG, 2017 ; Zimmerman et al., 2017).

Le genre *Dialium* serait proche des genres *Apuleia*, *Petalostylis* et *Zenia* sur la base de la phylogénie et des séquences chloroplastiques rbcL et matK (Kajita et al., 2001 ; LPWG, 2017).

3. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET DESCRIPTION BOTANIQUE DES ESPÈCES GUINÉO-CONGOLAISES

3.1. Répartition géographique

Le genre *Dialium* a une répartition pantropicale. Il est distribué entre le 19° parallèle nord au Mexique et Belize jusqu'au 23° parallèle sud à Madagascar (Rojo, 1982). En Afrique, on retrouve des représentants du genre du centre du Sénégal jusqu'à Maputo en Afrique australe. L'*African Plant Database* (version 3.4.0.) lui reconnaît 30 espèces africaines (y compris malgaches) dont trois incertaines (voir ci-après).

En considérant les incertitudes susmentionnées, et en confrontant les différents travaux, c'est la région guinéo-congolaise qui comporterait le plus d'espèces. Vingt-deux espèces seraient présentes (en excluant *D. graciflorum* Harms, *D. latifolium* Harms, *D. poggei* Harms dont le statut est unanimement incertain). Ce nombre intègre des espèces rejetées par Rojo (1982) et inclut des espèces qu'il considère comme de bonnes espèces (Tableau 1). La figure 1 présente la distribution géographique par sous-centre d'endémisme (White,

Tableau 1. Clé d'identification des *Dialium* de la région guinéo-congolaise — *Identification key for the Dialium of the Guinean-Congolese region.*

1. Arbre ; 5 sépales	2
1. Arbrisseau ; 6 sépales	<i>D. hexasepalum</i>
2. 3 à 7 folioles	3
2. 7 folioles et plus	16
3. Fruits glabres ou glabrescents	4
3. Fruits pubescents	7
4. 5 étamines, boutons floraux avec une pilosité brune, espèce exclusivement congolaise	<i>D. pentandrum</i>
4. 2 étamines, boutons floraux avec pilosité blanche, espèce d'Afrique centrale ou de l'Ouest	5
5. Arbre d'Afrique centrale	6
5. Arbre d'Afrique de l'Ouest	<i>D. aubrevillei</i> (syn. <i>D. polyanthum</i> selon Rojo, 1982)

1..

Tableau 1 (suite). Clé d'identification des *Dialium* de la région guinéo-congolaise — *Identification key for the Dialium of the Guinean-Congolese region.*

6. Généralement 5 folioles, parfois 3	<i>D. corbisieri</i> (syn. <i>D. polyanthum</i> selon Rojo, 1982)
6. Généralement 3 folioles, parfois 5	<i>D. polyanthum</i> (syn. <i>D. pachyphyllum</i> selon <i>African Plant Database</i> , version 3.4.0.)
7. Face inférieure des folioles pubescente	8
7. Face inférieure des folioles glabrescente à glabre	9
8. 4 à 5 folioles ; limbe obtus au sommet, de 7 à 17 cm de long et 3 à 7 cm de large, coriace à cartacé	<i>D. lopense</i>
8. 5 à 7 folioles ; limbe longuement acuminé au sommet, de 4 à 12 cm de long et de 1,5 à 3,5 cm de large, cartacé	<i>D. tessmannii</i>
9. Folioles de plus de 3 cm de long et de 1,5 cm de large	10
9. Folioles plus petites	<i>D. reygartii</i>
10. 3 à 5 folioles, anthères à apex pointu sur la face adaxiale	11
10. 5 à 7 folioles, anthères à apex rétu, plus ou moins aplati sur la face adaxiale	<i>D. guineense</i>
11. 3 folioles	12
11. 5 folioles (parfois de 3 à 7)	13
12. Folioles elliptiques à ovales, aiguës au sommet, de 3-7 cm de long ; gousse discoïde, veloutée, noire	<i>D. angolense</i>
12. Folioles lancéolées, acuminées, de 5,5-10 cm de long ; gousse obovoïde, pubérolente, brune ; sépales persistants	<i>D. kasaiense</i> (variété de <i>D. angolense</i> selon Rojo, 1982)
13. Réseau de nervilles lâche ou peu visible	14
13. Réseau de nervilles à mailles serrées	15
14. Folioles 3-5 x 3-4 cm	<i>D. pobeguini</i>
14. Folioles 7-8 x 3 cm	<i>D. eurysepalum</i> (syn. <i>D. bipindense</i> selon Rojo, 1982)
15. Gousses globulaires-obovales, légèrement aplaties avec sépales persistants ; filet des étamines glabre	<i>D. pachyphyllum</i>
15. Gousses sessiles, discoïdes à subglobulaires ; filet des étamines poilus	<i>D. gossweileri</i> (syn. de <i>D. pachyphyllum</i> selon Rojo, 1982)
16. Folioles 7-11	17
16. Folioles 11-21	<i>D. dunklagei</i>
17. Face inférieure des folioles pubescente	18
17. Face inférieure des folioles glabre	20
18. Réseau de nervilles serré et saillant, pas de points translucides	19
18. Réseau de nervilles lâche, points translucides	<i>D. bipindense</i>
19. Limbe ovale et aigu à oblong-elliptique et longuement acuminé ; ovaire et gousse stipités, globulaires-aplatis ; 2 étamines ; 1 (ou 2) pétales	<i>D. zenkeri</i>
19. Limbe ovale ou lancéolé ; gousse sessile, ellipsoïde à sommet et base aigus ; 5 étamines ; 5 pétales	<i>D. englerianum</i>
20. Limbe de plus de 7,5 cm de long et de 2,5 cm de large, pas de points translucides	21
20. Limbe plus petit, points translucides	<i>D. excelsum</i>
21. Réseau de nervilles très apparent ; folioles claires dessous ; ovaire sessile	<i>D. densiflorum</i> (syn. <i>D. zenkeri</i> selon Rojo, 1982)
21. Réseau de nervilles plus ou moins estompé ; folioles ternes dessous ; ovaire stipité	<i>D. soyauxii</i> (syn. <i>D. zenkeri</i> selon Rojo, 1982)

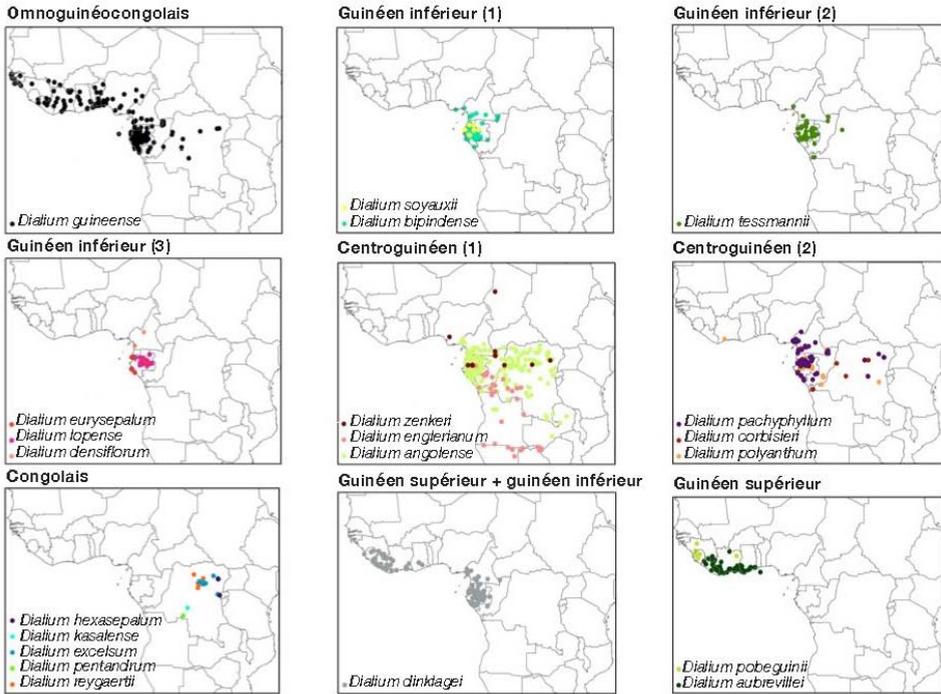


Figure 1. Représentation de la distribution géographique des *Dialium* par sous-centre d’endémisme dans la région guinéo-congolaise — Geographical distribution of *Dialium* by sub-centre of endemism in the Guinean-Congolese region.

Les points d’occurrence proviennent des bases de données du Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève (CJBG, 2020), du Catalogue of Life Partnership via Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) et de la base de données RAINBIO (ArcGis version 10.4.1) — The points of occurrence come from the databases of the Conservatory and Botanical Garden of the City of Geneva (CJBG, 2020), the Catalogue of Life Partnership via Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) and the RAINBIO database (ArcGis version 10.4.1).

1979 ; White, 1986 ; White, 1993) de 21 espèces pour lesquelles des données d’occurrence sont disponibles.

3.2. Caractérisation botanique

La description botanique des espèces du genre *Dialium* de la région guinéo-congolaise est établie avec détails par plusieurs auteurs. Selon Steyaert (1952), les *Dialium* sont des arbres moyens ou grands, rarement des arbrisseaux. Leur fût est droit, parfois tortueux. Leur base peut avoir des contreforts moyennement développés. L’écorce est lisse ou écailleuse et la tranche exsude une gomme-résine rouge ou brunâtre. Les feuilles sont composées imparipennées, à pétiole et pétioles épaissis à la base, ridés transversalement.

Les folioles, dont le nombre varie entre 3 et 21, sont généralement subopposées à alternes, parfois opposées. Elles sont entières avec un réticulum plus ou moins dense. Les inflorescences sont des panicules terminales, parfois axillaires. Les bractées cupulaires sont caduques, à indument plus ou moins soyeux. Les boutons pyramidaux ou ellipsoïdes ne dépassent guère 6-7 mm de long, à préfloraison du calice quinconciale. Les fleurs hermaphrodites sont pédicellées ; avec 5 à 6 (7) sépales subégaux ; 0 ou 1(-3), rarement 5 petits pétales, de ± 2 mm de long. Les étamines, généralement 2, parfois 5, rarement 10, sont insérées sur le bord du disque, à filet droit ou géniculé. L’ovaire est sessile et central ou stipité et généralement excentrique, densément velouté. Il est uniloculaire et contient deux

ovules. Le style est dressé, aussi long que l'ovaire. Le fruit est une gousse indéchiscente, globulaire ou discoïde, à pulpe entourant une ou deux graines. Celles-ci sont subréniiformes, à testa sillonné.

Rojo (1982) propose une clé d'identification des espèces qui s'avère toutefois peu pratique sur le terrain car elle se base essentiellement sur les caractéristiques des fleurs. Tenant compte d'espèces mises avec certitude en synonymie, de celles pour lesquelles il n'existe pas de consensus et d'autres découvertes ultérieurement (Breteler, 1994), nous proposons une nouvelle clé pour les 22 espèces potentielles de la région guinéo-congolaise. Elle se base essentiellement sur les caractéristiques des feuilles et des fruits, ces derniers demeurant présents assez longtemps à la base des arbres les ayant produits. Toutefois, vu la proximité de certaines espèces, le recours à des caractéristiques florales n'a pu être totalement évité (Tableau 1, Figure 2).

4. ÉCOLOGIE

4.1. Exigences environnementales

Les espèces du genre *Dialium* de la région guinéo-congolaise sont rencontrées sous les climats équatoriaux à tropicaux Af, Am et Aw de la classification de Köppen (Kottek et al., 2006). Elles fréquentent divers types d'habitats (Rojo, 1982 ; Pendje, 1994 ; White & Abernethy, 1996 ; Doucet, 2003 ; Lemmens et al., 2012 ; Meunier et al., 2015). Certaines espèces sont observées préférentiellement dans les savanes boisées ou dans les galeries forestières, c'est le cas de *D. angolense*, *D. kasaiensis*, *D. englerianum* et *D. guineense*. D'autres affectionnent particulièrement les forêts riveraines, notamment *D. reygartii*, *D. pobeguini* et *D. zenkeri*. Enfin, certaines sont plutôt indicatrices de forêt sempervirente âgée : *D. pachyphyllum*, *D. pentandrum*, etc. La plupart des espèces sont majoritairement retrouvées à des altitudes inférieures à 1000 m. Toutefois, *D. angolense* a été observée sur les rochers de quartz entre 700 et 1275 m d'altitude (Oliver, 1871).

4.2. Densités et structures de population

Concernant les espèces forestières, les inventaires d'aménagement fournissent, au niveau du genre, de précieuses informations sur les densités et répartitions par classe diamétrique (Réjou-Méchain et al., 2011). L'obtention de données spécifiques est plus délicate, surtout dans le genre *Dialium*, car la distinction des différentes espèces est une tâche très complexe. Au Gabon, le terme « omvong » regroupe les espèces possédant de 3 à 5 folioles (*D. pachyphyllum*,

D. angolense, *D. polyanthum*, *D. lopense*), alors que toutes les autres espèces sont regroupées sous le vocable « eyoum ». Au Cameroun, les espèces ayant 3 à 5 folioles sont appelées « eyoum » et les autres espèces « eyoum rouge, eyoum blanc, eyoum à petites feuilles, etc. ».

Le tableau 2 présente les données issues d'inventaires d'aménagements de concessions forestières couvrant environ 1600000 ha au Cameroun et au Gabon. Ces données indiquent que les densités (diamètre à hauteur de poitrine : $d_{hp} \geq 20$ cm) varient selon le type forestier. Elles sont plus élevées en forêts sempervirentes qu'en forêts semi-décidues. Les *Dialium* ayant de 3 à 5 folioles peuvent atteindre des densités de 6,42 pieds par hectare dans les forêts sempervirentes, alors qu'elles culminent à 0,23 en forêt semi-décidue. Les autres espèces de *Dialium* atteignent 2,7 pieds en forêt sempervirente et 0,58 dans les forêts semi-décidues. Les figures 3a, 3b, 3c et 3d illustrent les structures de population obtenues pour les deux groupes dans les concessions forestières pour lesquelles les données sont présentées dans le tableau 2. La structure de population est identique pour les deux groupes, qu'on soit en forêt sempervirente ou en forêt semi-décidue. Décroissant de façon exponentielle, elle suggère une régénération assurée dans le long terme. Le groupe des *Dialium* avec 3 à 5 folioles comprend toutefois des individus pouvant atteindre de plus gros diamètres.

4.3. Phénologie, dispersion des graines et germination

Les espèces du genre *Dialium* dominent certaines forêts tropicales sempervirentes de plaine et du bassin central du Congo (Beaune et al., 2013c). La plupart fleurissent en saison des pluies sur une assez longue période (Aubréville, 1968). La présence de fruits a été signalée entre novembre et juillet au Gabon (Lemmens et al., 2012 ; White & Abernethy, 1996). *Dialium lopense*, par exemple, fleurit entre décembre et janvier et fructifie d'avril à début juillet (White & Abernethy, 2016). Le tableau 3 synthétise les rares informations disponibles sur les périodes de floraison et de fructification des *Dialium* de la région guinéo-congolaise.

Les graines de *D. aubrevillei* ont probablement une dormance de type tégumentaire car les délais de germination peuvent varier de deux semaines à trois mois, avec un taux de germination modéré, généralement proche de 50 % (De La Mensbrughe, 1966 ; Lemmens et al., 2012). L'endocarpe des fruits est adapté à l'endozoochorie (Beaune et al., 2013a ; Beaune et al., 2013b). Les graines sont dispersées par les primates (principalement les bonobos et les gorilles), les éléphants ou encore les petits rongeurs (Idani, 1986 ; Beaune et al., 2013a ; Ahoua et al., 2015 ; Haurez,



Figure 2. Partie de (a) fût, (b) plantule et (f) tranche exsudant un liquide poisseux rougeâtre de *Dialium lopesse* ; (c) fleurs de *Dialium cf. polyanthum* ; (d) fruits et (e) feuilles de *Dialium dinklagei* — (a) trunk, (b) plant and (f) slash exuding a sticky reddish liquid of *Dialium lopesse*; (c) flowers of *Dialium cf. polyanthum*; (d) fruits and (e) leaves of *Dialium dinklagei*.
© J.-L. Doucet

2015). Plusieurs travaux ont montré que les graines transitant par le tube digestif des primates ont un taux de germination plus élevé que les graines non ingérées (Takasaki, 1983 ; Idani, 1986 ; Beaune et al., 2013b). En outre, d'autres observations ont montré que de

petits primates tels que les mangabeys noirs à crête (*Lophocebus aterrimus*) participaient à la dispersion des graines de *Dialium* en crachant les graines (souvent égratignées) après dégustation de la pulpe (Beaune et al., 2013a). En l'absence de disperseurs de graines,

Tableau 2. Densités des populations du genre *Dialium* dans les forêts sempervirentes et semi-décidues (dhp \geq 20 cm) – Population densities of *Dialium* in evergreen and semi-deciduous forests (dbh \geq 20 cm).

Type forestier	Taxon	Densité	Superficie	Localisation	Source
Forêts sempervirentes	<i>Dialium</i> à 3-5 folioles	3,12	335954	Sud-est du Gabon	SBL, 2003
		6,42	198653	Sud-est du Gabon	Precious Woos and Terea, 2015a
		3,66	198734	Sud-est du Gabon	Precious Woos and Terea, 2015b
		1,32	199435	Sud-est du Gabon	Precious Woos and Terea, 2015c
		5,00	36440	Sud du Cameroun	WIJMA, 2011
		5,59	199015	Est du Gabon	Nature + asbl & Olam Gabon, 2014a
		6,06	19905	Est du Gabon	Nature + asbl & Olam Gabon, 2014b
		5,14	83948,16	Sud-ouest du Cameroun	Wijma S.A & Nature+ asbl, 2016
	Autres espèces	1,16	335954	Sud-est du Gabon	SBL, 2003
		2,12	198653	Sud-est du Gabon	Precious Woods & Terea, 2015a
		2,70	198734	Sud-est du Gabon	Precious Woods & Terea, 2015b
		1,05	199435	Sud-est du Gabon	Precious Woods & Terea, 2015c
		Forêts semi-décidues	<i>Dialium</i> à 3-5 folioles	0,04	43934,13
0,23	120092,98			Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020a
0,12	82743,92			Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020b
0,15	75830,34			Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020c
Autres espèces	0,58			43934,13	Sud-est du Cameroun
	0,21		120092,98	Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020a
	0,11		82743,92	Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020b
	0,23		75830,34	Sud-est du Cameroun	Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020c

la dormance peut être interrompue par imitation du processus naturel, permettant à la graine d'absorber de l'eau, de gonfler et d'activer la germination (Beaune et al., 2013b). Beaune et al. (2013b) conseillent, par exemple pour *D. corbisieri*, de scarifier l'endocarpe à l'aide d'un couteau jusqu'à l'apparition de l'endosperme. Cela permet de passer d'un taux de germination de 0 à 96 %. Par ailleurs, un prétraitement de 5 min à l'acide sulfurique pur (H₂SO₄) des graines de *D. guineense* améliorerait sa germination (Todd-Bockarie & Duryea, 1993 ; McDonal & Omoruyi, 2003).

La germination est phanérocotyle et épigée avec des cotylédons charnus (Rojo, 1982). L'hypocotyle et l'épicotyle mesurent de 2 à 5 cm. Les premières feuilles sont simples et opposées, verticillées par deux ou quatre, à limbe cordiforme ou arrondi à la base et longuement acuminé au sommet (*D. aubrevillei*, *D. dinklagei*, *D. guineense*) (De La Mensbrughe, 1966).

5. AMÉNAGEMENT FORESTIER

En Afrique centrale, les forêts dédiées à la production de bois d'œuvre doivent faire l'objet d'un plan d'aménagement. Celui-ci repose notamment sur un inventaire statistique des ressources ligneuses, l'utilisation de tarifs de cubage, le respect de diamètres minimums légaux d'exploitation, le calcul de taux de reconstitution.

5.1. Tarif de cubage

Très peu d'équations permettant d'estimer les volumes sont disponibles pour le genre *Dialium*. L'office national de développement des forêts du Cameroun (Ministère des Forêts et de la Faune, 2005) propose trois tarifs de cubage :

$$V = 0,000672D^{2,07027} \quad (\text{Éq. 1})$$

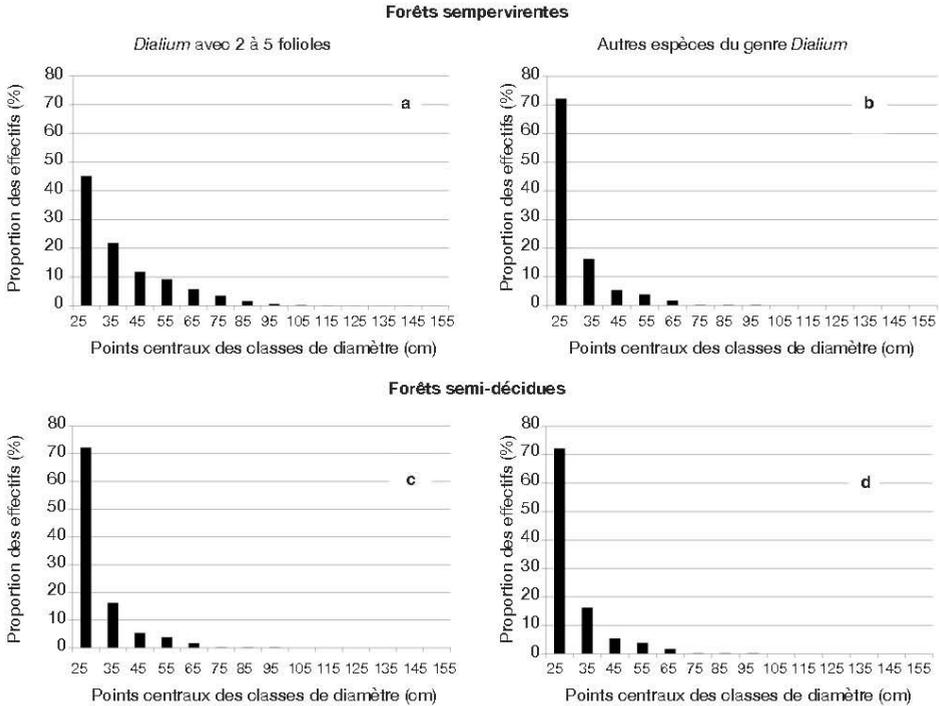


Figure 3. Structures diamétriques globales du genre *Dialium* dans les forêts sempervirentes et semi-décidues du Cameroun et du Gabon — *Global diameter structures of Dialium in evergreen and semi-deciduous forests in Cameroon and Gabon.*

Source : **Tableau 2** — *Table 2.*

$$V = 0,00005876 D^{2,253504} \quad (\text{Éq. 2})$$

$$V = 1,858 - 0,03518D + 0,0010283D^2 \quad (\text{Éq. 3})$$

où D représente le diamètre de l’arbre en cm, V est le volume de l’arbre en m³.

L’équation 1 doit être appliquée dans les forêts sempervirentes, l’équation 2 dans les forêts semi-décidues et l’équation 3 dans les forêts de transition (congolaises). Toutefois, ces équations, non spécifiques au genre *Dialium*, sont potentiellement biaisées (Fayolle et al., 2013 ; Ligot et al., 2018), le nombre d’arbres et la gamme de diamètre ayant permis de les construire n’étant pas précisés (Ligot et al., 2018).

Pour *D. guineense*, Akindede (2005) a construit un tarif de cubage à deux entrées (diamètre en cm et hauteur en m), à partir de 12 individus (diamètres compris entre 20 et 158 cm) (Éq. 4) :

$$V = -0,0553 + 0,000560D^{1,3336} H^{0,9561} \quad (\text{Éq. 4})$$

Enfin, au Gabon, pour *D. pachyphyllum*, Bile Allogho (1999) propose le tarif suivant (Éq. 5) :

$$V = 9,72D^{2,46} \quad (\text{Éq. 5})$$

où D représente le diamètre en m et V le volume en m³

5.2. Diamètre minimum d’exploitation (DME)

Le diamètre minimum d’exploitabilité ou DME est défini par les législations nationales. Il est fixé, pour toutes les espèces du genre *Dialium*, à 70 cm au Gabon (Loi n°16/01 du 31/12/2001) et en République centrafricaine (Loi n°08.022) et à 60 cm dans les deux Congo (Arrêté n°036/CAB/MIN/ECN-EF ; Décret n°2002-437 du 31/12/2002, article 91). Au Cameroun,

Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise

Tableau 3. Périodes de floraison et de fructification de quelques espèces de *Dialium* au Gabon, Cameroun, République démocratique du Congo (R.D.C.), Congo Brazzaville et Libéria — *Flowering and fruiting periods of some Dialium species in Gabon, Cameroon, Democratic Republic of Congo (D.R.C.), Congo Brazzaville and Liberia.*

Espèce	Gabon		Cameroun		R.D.C.		Congo		Libéria	
	Floraison	Fructification	Floraison	Fructification	Floraison	Fructification	Floraison	Fructification	Floraison	Fructification
<i>D. tessmannii</i>	Déc-juin	Mars								
<i>D. pachyphyllum</i>	Nov-juin	Fév								
<i>D. densiflorum</i>	Sept-oct									
<i>D. soyauxii</i>	Sept-déc	Déc								
<i>D. eurysepalum</i>	Sept	Sept-janv								
<i>D. bipindense</i>	Sept-janv	Juil		Juin						Juin
<i>D. dinklagei</i>	Mars-nov	Avril-nov								
<i>D. lopense</i>	Déc-janv	Avril-juil								
<i>D. guineense</i>			Août	Sept	Août	Oct-janv				
<i>D. polyanthum</i>	Avril-mai	Oct-sept	Avril-mai	Oct-sept			Avril-mai	Oct-sept		
<i>D. aubrevillei</i>									Juil-oct	Mai
<i>D. zenkeri</i>										
Références	Aubréville, 1968 ; Abemethy, 1996 ; Harris, 2002 ; Mensah, 2012		Harris, 2002 ; Aubréville, 1970 Hutchinson & Dalziel, 1958		Aubréville, 1968				Aubréville, 1970 ; Harris, Lemmens et al., 2012	

il est de 50 cm (*D. guineense*, *D. zenkeri*) ou de 60 cm (les autres espèces) (ONADEF, 1992).

5.3. Taux de reconstitution et accroissements diamétriques

Le taux de reconstitution (%RE) exprime la proportion d'individus exploités au cours d'une rotation (cycle d'exploitation) que l'on retrouvera lors de la rotation suivante. La formule généralement utilisée est celle fournie par Durrieu De Madron & Forni (1997) :

$$\%RE = 100 [B(1-\Delta)(1-\alpha)^R]/A \quad (\text{Éq. 6})$$

avec B : effectif des tiges d'avenir susceptibles de dépasser le DME après le temps de rotation, Δ : taux de dégâts dus à l'exploitation, A : nombre de tige de diamètre supérieur au DME en début de rotation, α : taux de mortalité naturelle annuelle, R : rotation (années).

L'effectif susceptible de dépasser le DME au cours de la rotation dépend de l'accroissement diamétrique moyen. Peu d'informations sont disponibles dans la littérature à ce sujet. Au Cameroun, l'ONADEF (1992) suggère d'utiliser 0,35 cm-an⁻¹ pour *D. pachyphyllum* et 0,4 cm-an⁻¹ pour les autres espèces. À défaut de données locales, Picard & Gourlet-Fleury (2011) recommandent d'utiliser la valeur de 0,25 cm-an⁻¹ par tous les *Dialium*.

Si le taux de reconstitution obtenu n'atteint pas le seuil minimal requis (Tableau 4), le DME devra être relevé afin d'y arriver. On parle alors de DMA (diamètre minimum d'aménagement).

6. USAGES

6.1. Bois

L'anatomie du bois de diverses espèces de *Dialium* a fait l'objet de plusieurs études et est bien décrite (Steyaert, 1951 ; Steyaert, 1953 ; Rojo, 1982 ; Lemmens et al., 2012). Elle se caractérise par un parenchyme en nombreuses couches tangentielles (2-6 par mm), plus fines que les bandes de tissus fibreux, tantôt continues et rectilignes, tantôt sinueuses et plus ou moins discontinues (Normand & Paquis, 1976).

Tableau 4. Taux de reconstitution minimum exigé dans les réglementations des pays d'Afrique centrale – *Minimum recovery rate required in the regulations of Central African countries.*

Pays	Taux de reconstitution minimum	Remarque	Source
Cameroun	50 %	Par essence	Ministère des Eaux et Forêts/République du Cameroun, 2001
Congo	75 %	Ensemble des essences des peuplements exploités	CNIAF/MEFE, 2005
	50 %	Groupe essences commercialisées	
Gabon	75 %	Okoumé	Présidence de la république/Gabon, 2004
	70 %	Groupe « bois divers »	
	40 %	Essences prises individuellement	
RCA	50 %	Par essence aménagée	Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche, chargé de l'Environnement, 2009
RDC	30 %	Par essence aménagée	Ministère des Eaux et Forêts, 2006
	50 %	Groupe d'essences aménagées	

Les *Dialium* ont généralement des bois durables, résistants aux champignons, aux termites, aux térabranants marins et aux insectes (Meunier et al., 2015 ; Gérard et al., 2016). Le bois peut être employé en parqueterie, ébénisterie, pour le revêtement extérieur, pour la construction des ponts et d'autres usages industriels en travaux lourds (Gérard et al., 2011 ; Lemmens et al., 2012 ; Meunier et al., 2015 ; Gérard et al., 2016 ; Martin & Vernay, 2016). Par contre, ils ne peuvent être utilisés en milieux marins (Gérard et al., 2016 ; Martin & Vernay, 2016). La classe d'emploi est de type 4 (utilisation en contact avec le sol ou l'eau douce). Le **tableau 5** dresse les caractéristiques physico-mécaniques et de durabilité naturelle des espèces étudiées.

Aucune statistique concernant l'exploitation, la transformation ou la commercialisation des *Dialium* n'ayant été trouvée, il est raisonnable de penser que les volumes commercialisés sont très faibles. Cela pourrait notamment être dû à la difficulté de transformation de ces espèces. Le bois est en effet particulièrement désaffutant et le recours à des lames au carbure de tungstène est nécessaire (Gérard et al., 2016).

6.2. Usages traditionnels

Les fruits de *Dialium* sont récoltés dans certains pays, plus particulièrement dans les régions sèches (Normand & Paquis, 1976 ; Ayessou et al., 2014). Acidulés et sucrés, ils sont très prisés par les populations (Oliver, 1871 ; Wild & Exell, 2007). La poudre des graines est utilisée comme succédané du café en Inde (Rojo, 1982). En pharmacopée, les décoctions d'écorces de *D. angolense* au Congo ou de *D. guineense* en Afrique de l'Ouest sont utilisées pour le traitement

du paludisme (Yetein et al., 2013 ; Chinsebu, 2015). Dans le domaine magico-religieux, les cendres issues de la combustion d'écorces de *D. dinklagei* et de la peau de céphalophe bleu (*Phitalomba congica*) étaient autrefois utilisées au Gabon pour repousser la malchance durant les périodes de chasse et rapporter de gros butins (Raponda-Walker & Sillans, 1961). En artisanat, les écorces étaient utilisées pour la confection d'œuvres d'art et pour sculpter des figures comme des amulettes, des statuette et des objets d'ornement (Raponda-Walker & Sillans, 1961)

Enfin, le bois est traditionnellement utilisé dans les constructions de maisons ou de greniers, pour la fabrication de mortiers, de manches d'outils traditionnels, de charbon de bois ou comme bois de chauffage (Raponda-Walker & Sillans, 1961 ; Lokonon et al., 2013).

Le **tableau 6** synthétise les principales utilisations connues en médecine traditionnelle de quelques espèces du genre *Dialium*.

7. VALORISATION DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES

Les légumineuses comprennent généralement des glycosides cyanogénétiques, des saponines, des tanins, du mucilage et des anthocyanes (Saidi, 2019). Les alcaloïdes y sont aussi généralement communs (Trease & Evans, 2002). De nombreux genres de cette famille ont fait l'objet d'études phytochimiques, mais le genre *Dialium* demeure encore peu étudié. En effet, sur les 44 espèces de *Dialium* reconnues à ce jour, nous en avons recensé seulement 5 ayant fait état d'une étude d'activité et/ou d'un screening phytochimique. C'est

Tableau 5. Caractéristiques anatomiques et technologiques et de durabilité naturelle des bois de quelques espèces du genre *Dialium*. Les propriétés suivantes : densité, dureté de Monnin, module de rupture en flexion statique, module d'élasticité et contrainte de rupture en compression axiale sont présentées à 12 % d'humidité d'équilibre du bois — *Anatomical and technological characteristics and natural durability of the woods of some species of the genus Dialium. The following properties: density, Monnin hardness, modulus of rupture in static bending, modulus of elasticity and breaking stress in axial compression are presented at 12% equilibrium wood moisture content.* Sources : Lemmens et al., 2012 ; Gérard et al., 2016 ; www.itto.int.fr

Propriété	Unité	<i>D. aubrevillei</i>	<i>D. pachyphyllum</i>	<i>D. bipindense</i>	<i>D. dinklagei</i>
Densité du bois	kg·m ⁻³	900-1 050	890-1 060	1 070	940
Point de saturation des fibres	%	28	28	28	28
Rétractabilité tangentielle totale	%	10,4	10,4-11	8,7	7,7
Rétractabilité radiale totale	%	5,2	5,3-5,8	4,9	4,7
Dureté de Monnin	-	8,2-11,3	10,6	10,8	8
Module de rupture en flexion statique	Mpa	165-203	172-263	123	149
Module d'élasticité	Mpa	20 600-25 500	20 100-25 200	22 700	21 950
Contrainte de rupture en compression axiale	Mpa	96-128	73-116	97	79
Durabilité champignons basidiomycètes	-	Classe 1 très durable	Classe 1 très durable	Classe 1 très durable	Classe 1 très durable
Durabilité insectes bois sec	-	Durable	Durable	Durable	Durable
Durabilité termites	-	Classe D durable	Classe D durable	Classe D durable	Classe D durable

Tableau 6. Principales utilisations en médecine traditionnelle des *Dialium* — *Main uses of Dialium in traditional medicine.*

Espèce	Parties utilisées	Modes de préparation	Maladies et symptômes soignés	Sources
<i>D. angolense</i>	Écorces	Décoction	Paludisme	Manya et al., 2020
<i>D. indum</i>	Écorces	Décoction	Cancer, maux de tête et douleurs	Ijowa & Ajiwe, 2017
<i>D. indum</i>	Feuilles	Macération	Fièvre, douleurs prénatales et œdème	Ijowa & Ajiwe, 2017
<i>D. indum</i>	Fruits	Décoction	Diarrhée	Ijowa & Ajiwe, 2017
<i>D. guineense</i>	Écorces	Décoction	Fièvre, maux de tête	Ezeja et al., 2011
<i>D. guineense</i>	Écorces, feuilles	Décoction, macération	Aménorrhée, infertilité féminine, anurie, jaunisse, gonorrhée, dysménorrhée, fièvre, palpitations, diarrhées et paludisme	Odukoya et al., 1996 ; Bero et al., 2009
<i>D. guinense</i>	Feuilles	Décoction	Paludisme	Bero et al., 2009 ; Bero et al., 2011 ; Yetein et al., 2013 ; Chinsembu, 2015
<i>D. gossweileri</i>	n.d.	n.d.	Anémie et troubles sanguins	Catarino et al., 2019
<i>D. dinklagei</i>	Feuilles	Décoction	Jaunisse, hématurie, fièvre	Lemmens et al., 2012
<i>D. dinklagei</i>	Écorces	Infusion	Arthrite	Lemmens et al., 2012

n.d. : non défini — *undefined*.

D. guineense qui est de loin l'espèce la plus étudiée pour ses activités biologiques et sa composition chimique (Ogu et al., 2013 ; Moronkola et al., 2017 ; Ajiboye et al., 2018 ; Gnansounou et al., 2018). Globalement, très peu d'études ont fait état d'un criblage poussé basé sur des méthodes de chromatographie telles que la chromatographie liquide/gazeuse couplée à la spectroscopie de masse (LC-MS/GC-MS). Les activités les plus fréquemment rencontrées chez les espèces du genre *Dialium* sont de type antioxydant, antibactérien, antimicrobien et antiparasitaire. Certaines espèces permettraient aussi une régulation du taux de sucre dans le sang (Bero et al., 2009 ; Bero et al., 2011 ; Afolabi et al., 2018). Le **tableau 7** présente une synthèse des études phytochimiques réalisées sur quelques espèces du genre.

À ce jour, une seule molécule spécifique au genre a été mise en évidence. Il s'agit d'un triterpène appelé Dialiumoside (ou olean-18-ène) isolé de *D. excelsum*. Cette molécule a une cytotoxicité contre les cellules KB-3-1 du carcinome du col de l'utérus humain et les cellules KB-V1 multi-résistantes (Awantu et al., 2011).

8. STATUT DE CONSERVATION

Certaines espèces de *Dialium* sont répertoriées dans la liste rouge de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). La synthèse des statuts de vulnérabilité est dressée au **tableau 8**. Quatre espèces sont considérées comme menacées. Parmi celles-ci, seule *D. hexasepalum* est présente dans la région guinéo-congolaise.

Selon Beaune et al. (2013c), ces espèces sont aussi menacées à cause de la chasse à but commercial vidant l'écosystème forestier des potentiels disperseurs de graines, dont les primates, ce qui pourrait perturber sur le long terme la dynamique de population de ces espèces (Terborgh et al., 2008 ; Beaune et al., 2013c).

9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

De cette synthèse bibliographique, il ressort globalement que le genre *Dialium* reste très peu étudié. Si le genre est relativement bien documenté au niveau botanique, sa taxonomie est toujours soumise à controverse. De nombreuses espèces n'ont été décrites qu'à partir d'un très faible nombre d'échantillons et divers auteurs proposent de regrouper certaines espèces, mais les mises en synonymie proposées varient selon ces auteurs. Une taxonomie unanimement reconnue serait pourtant l'étape préliminaire à toute étude écologique ou à toute perspective de valorisation. Le recours à des marqueurs moléculaires pourrait permettre de clarifier le statut taxonomique des différents taxons abordés dans cette synthèse.

Les connaissances en écologie (tempérament, croissance, reproduction, régénération) sont très lacunaires. Les paramètres (mortalité naturelle, croissance) utilisés lors des aménagements forestiers sont en conséquence imprécis.

Les propriétés physico-mécaniques du bois ont été étudiées pour un nombre limité d'espèces. Par ailleurs, sur les 22 espèces potentielles de la région guinéo-congolaise, à peine trois ont fait l'objet d'un criblage phytochimique et/ou d'études de leurs activités biochimiques.

Pourtant, dans un contexte de raréfaction des essences commerciales principales, il est indispensable de mieux valoriser les ressources en limitant la pression sur les espèces principales et en valorisant les coproduits issus de la transformation du bois. À l'inverse d'espèces dont les propriétés technologiques semblent proches (par exemple l'azobé, *Lophira alata*), les populations de *Dialium* affichent des structures de population particulièrement favorables à une reconstitution de la ressource sur le long terme (Biwolé et al., 2019).

La transformation du bois devrait idéalement s'accompagner d'une valorisation des molécules issues des coproduits du sciage, d'autant que les quelques données biochimiques disponibles laissent entrevoir des perspectives particulièrement intéressantes. Ce secteur d'activité, qui est déjà très développé en Europe (par exemple, la fabrication des premiers aérogels par condensation des tanins, Szczyrek et al., 2019), en est encore à ses balbutiements en Afrique. Les principes actifs issus du métabolisme secondaire des plantes sont pourtant utilisés depuis des époques très anciennes, par exemple pour leur potentiel antiparasitaire (Bakkali et al., 2008)

En outre, la forte présomption de présence de polyphénols au sein des espèces du genre *Dialium* laisse entrevoir des perspectives potentiellement très intéressantes dans les domaines pharmaceutique, cosmétique et/ou agro-alimentaire.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des sociétés dont les données d'aménagement forestier ont été valorisées (Pallisco, CEB-Precious Woods, GRUMCAM, SBL, Wijma). Nous remercions le projet PPECF EHPVAL (Essences à Haut Potentiel de Valorisation), les fonds ERASMUS et l'asbl Nature + pour le financement de nos travaux.

Bibliographie

Abernethy K., 1996. *Génétique des arbres de la forêt tropicale humide (étude pilote)*. Bruxelles : AGRICO-CTFT.

Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise

185

Tableau 7. Études phytochimiques réalisées chez quelques espèces du genre *Dialium* — *Phytochemical studies carried out in some species of the Dialium genus.*

Espèce	Organes étudiés	Extraits	Familles des composés	Molécules caractérisées et/ou isolées	Méthodes de caractérisation	Activités concernées	Sources
<i>D. cochinchinense</i>	Graines	EthanOH	Polyphénols, flavonoïdes, alcaloïdes, saponines, coumarines, etc.	n.d.	color test	Antioxydante, antimicrobienne, cytotoxique	Bui et al., 2019
<i>D. cochinchinense</i>	Écorces	Aqueux EthanOH	Composés phénoliques, etc.	1,2-Benzenediol, 2-O-Méthyl-D-xylose, 2-Pentanethiol, etc.	GC-MS	Antioxydante	Chhouk et al., 2018
<i>D. dinklagei</i>	Fruits	DCM	Terpènes	(Z)-3-hexenal, α -pinène, méthyl 2-furoate, limonène, etc.	GC, GC-MS, GC-olfactif	Profil aromatique	Lasekan & See, 2015
<i>D. excelsum</i>	Écorces et fruits	DCM-MeOH	Terpènes	Olean-18-ene triterpénoïde, etc.	GC-MS	Cytotoxicité	Awantu et al., 2011
<i>D. guineense</i>	Feuilles	DCM-MeOH	n.d.	n.d.	n.d.	Cytotoxicité, antiparasitaire (trypanosome, leishmaniose, plasmodium)	Bero et al., 2009
<i>D. guineense</i>	Feuilles, écorces, fruits	Huile essentielle	Esther, aldéhydes, saponines, stéroïdes, glycosides, etc.	(4E)-4-hexenylacetate, 2-ethylhexanol, nonanal, β -linalool, etc.	GC, GC-MS	n.d.	Moronkola et al., 2017
<i>D. guineense</i>	Feuilles	EthanOH	Alcaloïdes, flavonoïdes, saponine, phénols, tanins et stéroïdes, etc.	n.d.	color test	Antibactérienne	Osugwu & Enne, 2013
<i>D. guineense</i>	Fruits	Huile essentielle DCM	Esther, aldéhydes, etc.	(Z)-3-hexenal, α -pinène, méthyl 2-furoate, limonène, etc.	GC, GC-MS, GC-olfactif	Olfactive	Lasekan & See, 2015
<i>D. guineense</i>	Écorces de tige	MeOH	n.d.	n.d.	n.d.	Analgésique	Ezeja et al., 2011
<i>D. guineense</i>	Fruits et écorces	EthanOH	Saponines, tanins, alcaloïdes et glycosides, etc.	n.d.	color test	Antibactérienne	Ajiboye et al., 2018
<i>D. guineense</i>	Feuilles	DCM-MeOH	Triterpène	3-O- β -D-glucopyranosiduronic acid) oleanolic, etc.	GC-MS	Molluscicide	Odukoya et al., 1996
<i>D. guineense</i>	Feuilles	DCM-MeOH	n.d.	n.d.	n.d.	Antiplasmodiale	Bero et al., 2009

/..

Tableau 7 (suite). Études phytochimiques réalisées chez quelques espèces du genre *Dialium* — *Phytochemical studies carried out in some species of the Dialium genus.*

Espèce	Organes étudiés	Extraits	Familles des composés	Molécules caractérisées ou isolées	Méthodes de caractérisation	Activités concernées	Sources
<i>D. guineense</i>	Fruits	Ethanol	Glucose, fructose, protéines, lipides et vitamines	Acide ascorbique, B-carotène, etc.	HPLC	Nutritive	Ayessou et al., 2014
<i>D. guineense</i>	Fruits	Ethanol	Flavonoïdes, alcaloïdes, tanins, saponines, oxalates et glycosides	n.d.	color test	Antibactérienne	Ajiboye et al., 2015
<i>D. guineense</i>	Feuilles	MeOH	Tanins, alcaloïdes, flavonoïdes	n.d.	color test	Anti-vibro	Akimpelu et al., 2011
<i>D. guineense</i>	Fruits	Ethanol	Polyphénol	n.d.	color test	Anti-hépatite	Besong et al., 2016
<i>D. guineense</i>	Écorces	MeOH	Carbohydrates; tanins, saponines, glycosides/ cardiaques, stéroïdes/ triterpènes, alcaloïdes....	n.d.	color test	Anti-diarrhéique	Ogu et al., 2013 ; Besong et al., 2016
<i>D. indum</i>	Fruits	MeOH	Polyphénols, etc.	p-Hydroxybenzaldehyde, vanilline, aldéhyde syringique, acide vanillique, acide azelaïque, aldéhyde conferyl, acide myristique	GC-MS	Antioxydante	Osman et al., 2018
<i>D. indum</i>	Feuilles	MeOH	Saponines, alcaloïdes, stéroïdes, terpénoïdes, flavonoïdes, composés phénoliques, tanins, glycosides cardiaques, glycosides cyanogéniques, etc.	n.d.	n.d.	Antimicrobienne	Ijowa & Ajawe, 2017
<i>D. indum</i>	Fruits	Ethanol	Acides aminés, acides organiques, acides gras, tocophérol, polyols, sesquiterpène, saccharides, acide phénolique, etc.	Proline, serine, thréonine, acide pyroglutamique, phénylalanine, acide glutamique, tartaric, etc.	GC-MS	Antioxydante, inhibition enzymatique (gestion du diabète de type 2)	Afolabi et al., 2018 ; Osman et al., 2018
<i>D. pachyphyllum</i>	Fruits	DCM, huiles essentielles	Esther, aldéhyde, etc.	(Z)-3-hexenal, a-pinène, méthyl 2-furoate, benzyl,	GC, GC-MS, GC-olfactif	Olfactive	Lasekan & See, 2015

DCM : dichlorométhane — *dichloromethane* ; MeOH : méthanol — *methanol* ; Ethanol : éthanol — *ethanol* ; GC-MS : chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse — *liquid chromatography coupled to mass spectrometry* ; LC-MS : chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse — *liquid chromatography coupled to mass spectrometry*.

Les *Dialium* de la région guinéo-congolaise

187

Tableau 8. Statut de vulnérabilité UICN des espèces du genre *Dialium* — *IUCN vulnerability status of some species of the genus Dialium.*

Espèce	Statut	Menaces	Sources
<i>D. bipindense</i>	Presque menacé	Exploitation forestière et développement de l'agriculture	IUCN, 2019
<i>D. cochinchinense</i>	Presque menacé	Surexploitation de bois d'œuvre	World Conservation Monitoring Center, 1998 ; IUCN, 2019 ; Beaune et al., 2013c
<i>D. dunklagei</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. englerianum</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. excelsum</i>	Préoccupation mineure	Exploitation minière, surexploitation pour production de charbon de bois et expansion agricole	Beaune et al., 2013c ; IUCN, 2019 ; Dauby et al., 2021
<i>D. guianense</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. hexasepalum</i>	En danger	Expansion agricole, production de charbon de bois	Dauby et al., 2021
<i>D. holtzii</i>	Préoccupation mineure	Pas de menaces majeures connues	Beaune et al., 2013c ; IUCN, 2019 ; Gereau et al., 2020
<i>D. kunstleri</i>	Presque menacé	Expansion des routes forestières, activités d'exploitation illégale, développement de plantations pour des espèces non indigènes (palmier), feux de forêt	Barstow, 2020
<i>D. latifolium</i>	Données insuffisantes		Contu, 2012
<i>D. lopense</i>	Presque menacé	Exploitation forestière	Beaune et al., 2013c ; IUCN, 2019 ; World Conservation Monitoring Center, 1998
<i>D. madagascariense</i>	Vulnérable	Perte d'habitat suite à l'expansion agricole et forestière, production de charbon de bois	IUCN, 2019
<i>D. occidentale</i>	Préoccupation mineure	Expansion agricole, feux de brousse, production du bois de chauffage et de charbon de bois	Ramanantsialonina, 2019
<i>D. orientale</i>	Presque menacé	Surexploitation des forêts.	Beaune et al., 2013c ; Beaune et al., 2013b ; IUCN, 2019
<i>D. orientale</i>	Presque menacé	Défrichement	Lovett & Clack, 1998 ; BGCI & IUCN, 2019
<i>D. pachyphyllum</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. pobeguinii</i>	Vulnérable	Expansion de l'agriculture, incendies agricoles, construction de barrages, développement urbain, collecte de bois de chauffage, exploitation minière et déforestation	IUCN, 2019 ; Bachman et al., 2011
<i>D. polyanthum</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. procerum</i>	Presque menacé	Expansion agricole, incendie	Barstow, 2020
<i>D. tessmanii</i>	Préoccupation mineure		BGCI & IUCN, 2019
<i>D. travancoricum</i>	En danger critique d'extinction	Développement urbain, agricole et exploitation forestière	Beaune et al., 2013c ; Beaune et al., 2013c ; IUCN, 2019 ; World Conservation Monitoring Center, 1998
<i>D. unifoliolatum</i>	Presque menacé	Agriculture itinérante et le pâturage	Member of the IUCN SSC Madagascar Plant Specialist Group & Missouri Botanical

- Afolabi O.B. et al., 2018. *In vitro* antioxidant potential and inhibitory effect of hydro-ethanolic extract from African black velvet tamarind (*Dialium indium*) pulp on type 2 diabetes linked enzymes. *Potravinárstvo Slovak J. Food Sci.*, **12**(1), 413-421, doi.org/10.5219/911.
- African Plant Database (version 3.4.0.), 2021. <http://africanplantdatabase.ch>. Genève, Suisse : Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève ; Pretoria : South African National Biodiversity Institute.
- Ahoua A.R.C., Konan A.G., Bonfoh B. & Koné M.W., 2015. Antimicrobial potential of 27 plants consumed by chimpanzees (*Pan troglodytes verus* Blumenbach) in Ivory Coast. *BMC Complementary Altern. Med.*, **15**(1), 1-12, doi.org/10.1186/s12906-015-0918-7
- Ajiboye A.E., Ameen M.T. & Adedayo M.R., 2015. Antimicrobial activity and phytochemical screening of the fruit pulp of *Dialium guineense* (velvet tamarind) on some microbial isolates. *J. Microbiol. Antimicrob.*, **7**(4), 33-41, doi.org/10.5897/jma2014.0332
- Ajiboye A.E. et al., 2018. Antibacterial activity of the seed of *Dialium guineense* against selected enteric bacteria. *Covenant J. Phys. Life Sci.*, **6**(2), 1-10.
- Akindele S.O., 2005. *Volume functions for common timber species of Nigeria's forests - a technical document*. Phd thesis: University of British Columbia, Vancouver (Canada); Federal University of Technology, Akure (Nigeria).
- Akinpelu A.D. et al., 2011. Anti-vibrio and preliminary phytochemical characteristics of crude methanolic extracts of the leaves of *Dialium guineense* (Wild). *J. Med. Plants Res.*, **5**(11), 2398-2404, doi.org/10.5897/JMPR.9000116
- ATIBT (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux), 2017. *Rapport d'activité 2017*. Paris : ATIBT.
- Aubréville A., 1968. *Flore du Gabon. Légumineuse-Caesalpinioïdées*. Paris : Museum National d'Histoire Naturelle.
- Aubréville, 1970. *Flore du Cameroun*. T. 9. Paris : Museum National d'Histoire Naturelle.
- Awantu A.F. et al., 2011. Dialiumoside, an olean-18-ene triterpenoid from *Dialium excelsum*. *Z. Naturforsch.*, **66**, 624-628, doi.org/10.1515/znb-2011-0610
- Ayessou N.C. et al., 2014. Nutrient composition and nutritional potential of wild fruit *Dialium guineense*. *J. Food Compos. Anal.*, **34**(2), 186-191, doi.org/10.1016/j.jfca.2014.01.002
- Bachman S. et al., 2011. Supporting red list threat assessments with GeoCAT: geospatial conservation assessment tool. *ZooKeys*, **150**, 117-126, doi.org/10.3897/zookeys.150.2109
- Bakkali F., Averbeck S., Averbeck D. & Idaomar M., 2008. Biological effects of essential oils – A review. *Food Chem. Toxicol.*, **46**, 446-475, doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106
- Barstow M., 2020. *Dialium kunstleri*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T62023205A62023207*, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T62023205A62023207.en>, (15/06/2021).
- Beaune D. et al., 2013a. The Bonobo – *Dialium* positive interactions: seed dispersal mutualism. *Am. J. Primatol.*, **403**, 394-403, doi.org/10.1002/ajp.22121
- Beaune D. et al., 2013b. Artificial germination activation of *Dialium corbisieri* by imitation of ecological process. *J. Sustainable For.*, **32**(6), 565-575, doi.org/10.1080/10549811.2013.780199
- Beaune D. et al., 2013c. Seed dispersal strategies and the threat of defaunation in a Congo forest. *Biodivers. Conserv.*, **22**, 225-238, doi.org/10.1007/s10531-012-0416-x
- Bero J. et al., 2009. *In vitro* antiplasmodial activity of plants used in Benin in traditional medicine to treat malaria. *J. Ethnopharmacol.*, **122**(3), 439-444, doi.org/10.1016/j.jep.2009.02.004
- Bero J. et al., 2011. *In vitro* antitrypanosomal and antileishmanial activity of plants used in Benin in traditional medicine and bio-guided fractionation of the most active extract. *J. Ethnopharmacol.*, **137**(2), 998-1002, doi.org/10.1016/j.jep.2011.07.022
- Besong E.E. et al., 2016. Medicinal and economic value of *Dialium guineense*. *Afr. J. Biomed. Res.*, **19**(3), 163-170.
- BGCI (Botanic Gardens Conservation International) & IUCN SSC Global Tree Specialist Group, 2019. *Dialium guianense*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T62023187A146782202*, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T62023187A146782202.en>, (21/06/2021).
- Bile Allogho J., 1999. *Étude sur les ressources forestières du Gabon*. Rome : FAO.
- Biwolé A.B., 2015. *Origine et dynamique des populations d'arbres des forêts denses humides d'Afrique Centrale, le cas de Lophira alata Banks ex Gaertn C.F. (Ochnaceae)*. Thèse de doctorat : Gembloux Agro-Bio Tech - Université de Liège (Belgique).
- Biwolé A.B. et al., 2019. Dynamique des populations d'azobé, *Lophira alata* Banks ex C.F. Gaertn., et implications pour sa gestion durable au Cameroun. *Bois For. Trop.*, **342**, 55-68, doi.org/10.19182/bft2019.342.a31670
- Breteler F.J., 1994. Novitates gabonenses (14). *Dialium lopense*, a new leguminosae-Caesalpinioideae from central Gabon. *Bull. Jardin Bot. National Belg.*, **63**, 201-204
- Bui L.T.K. et al., 2019. Evaluation of antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activities of *Dialium cochinchinensis* seed extract. *Indian J. Pharm. Sci.*, **81**(5), 975-980, doi.org/10.36468/pharmaceutical-sciences.594
- Catarino S. et al., 2019. Conservation and sustainable use of the medicinal Leguminosae plants from Angola. *PeerJ*, **7**, e6736, doi.org/10.7717/peerj.6736
- CJBG, 2020. <http://africanplantdatabase.ch>, (21/06/2021).

- Chhouk K., Wahyudiono, Kanda H. & Goto M., 2018. Efficacy of supercritical carbon dioxide integrated hydrothermal extraction of Khmer medicinal plants with potential pharmaceutical activity. *J. Environ. Chem. Eng.*, **6**(2), 2944-2956, doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.036
- Chinsembu K.C., 2015. Plants as antimalarial agents in Sub-Saharan Africa. *Acta Trop.*, **152**, 32-48, doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.08.009
- CNIAF/MEFE, 2005. *Normes nationales d'inventaire d'aménagement forestier*. Brazzaville : CNIAF/MEFE.
- Contu S., 2012. *Dialium latifolium*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2012*: e.T19892460A20066610, https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2012.RLTS.T19892460A20066610.en, (21/06/2021).
- Dauby G., Simo-Droissart M. & Tack W., 2021. *Dialium excelsum*. *The IUCN Red List of Threatened Species (2021)*: e.T33466A137509491, https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T33466A137509491.en, (21/06/2021).
- De La Mensbrugge G., 1966. *La germination et les plantules des essences arborées de la forêt dense humide de la Côte d'Ivoire*. Nogent-sur-Marne, France : CTFT.
- Doucet J.-L., 2003. *L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Durrieu De Madron L. & Forni E., 1997. Aménagement forestier dans l'Est du Cameroun. *Bois For. Trop.*, **254**, 39-50.
- Ezeja M., Omeh Y., Ezeigbo L. & Ekechukwu A., 2011. Evaluation of the analgesic activity of the methanolic stem bark extract of *Dialium guineense* (Wild). *Ann. Med. Health Sci. Res.*, **1**(1), 55-62.
- Fayolle A. et al., 2013. Réviser les tarifs de cubage pour mieux gérer les forêts du Cameroun. *Bois For. Trop.*, **317**(3), 35-49, doi.org/10.19182/bft2013.317.a20521
- FRM (Forêt Ressource Management), 2018. *Vision stratégique et industrialisation de la filière bois dans les 6 pays du bassin du Congo, horizon 2030. Rapport stratégique régional*. Montpellier, France : FRM.
- Fusée Aublet J.B.C., 1775. *Histoire des plantes de la Guinée Française*. Vol. 3 T. 5. Paris : Pierre-François Didot.
- Gérard J. et al., 2011. *Tropix 7: the main technological characteristics of 245 tropical wood species*. Montpellier, France : CIRAD, dx.doi.org/10.5281/zenodo.44995
- Gérard J., Guibal D., Paradis S. & Cerre J.-C., 2016. *Atlas des bois tropicaux : caractéristiques technologiques et utilisations*. Versailles, France : Éditions Qua.
- Gereau R.E. et al., 2020. *Dialium holtzii*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2020*: e.T34633A2853590, https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T34633A2853590.en, (21/06/2021).
- GBIF, 2020. *Dialium L.*, https://www.gbif.org/fr/species/2970932, (22/06/2021).
- Gnansounou S.M. et al., 2018. *Dialium guineense* Willd. *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. Ex Benth. and *Tamarindus indica* L.: review of known and synergetic bioactive compounds. *J. Med. Plants Stud.*, **6**(3), 103-111.
- Gorel A.P., Fayolle A. & Doucet J.L., 2015. Écologie et gestion des espèces multi-usages du genre *Erythrophleum* (Fabaceae-Caesalpinioideae) en Afrique (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **19**(4), 415-429.
- Harms H.A.T., 1915. Leguminosae africanae. VIII. *Bot. Jahrb. Systematik Pflanzengeschichte Pflanzengeographie*, **53**, 467.
- Harris D.J., 2002. The vascular plants of the Dzanga-Sangha reserve, Central African Republic. *Scr. Bot. Belgica*, **23**, 274.
- Haurez B., 2015. *Rôle du gorille des plaines de l'ouest (Gorilla gorilla gorilla) dans la régénération des forêts denses humides et interaction avec l'exploitation sélective de bois d'œuvre*. Thèse de doctorat : Gembloux Agro-Bio Tech - Université de Liège (Belgique).
- Hutchinson J., 1964. *The genera of flowering plants. Dicotyledones, vol. 1*. Oxford: Clarendon Press.
- Hutchinson J. & Dalziel J.M., 1958. *Flora of west tropical Africa: vol. 1 part 2*. London: Crown Agents for Oversea Governments, 444-478.
- Idani G., 1986. Seed dispersal by pygmy chimpanzees (*Pan paniscus*). A preliminary report. *Primates*, **27**, 441-447.
- Ijowa K.I. & Ajiwe V., 2017. Phytochemical screening of *Dialium indum* leaf extract (velvet tamarind). *Int. J. Phytopharmacy*, **7**(1), 6-13.
- IUCN, 2019. *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2019-2*, www.iucnredlist.org, (15/06/2021).
- Kajita T. et al., 2001. rbcL and legume phylogeny, with particular reference to Phaseoleae, Millettiae, and allies. *Syst. Bot.*, **26**(3), 515-536, doi.org/10.1043/0363-6445-26.3.515
- Karsenty A. & Gourlet-Fleury S., 2006. Assessing sustainability of logging practices in the Congo Basin's managed forests: the issue of commercial species recovery. *Ecol. Soc.*, **11**(1), 26, doi.org/10.5751/ES-01668-110126
- Kottek M. et al., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, **15**(3), 259-263, doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130
- Koyo J.P., 1982. Les forêts congolaises d'aujourd'hui et celles de demain. *Bois For. Trop.*, **196**, 17-23.
- Lasekan O. & See N.S., 2015. Key volatile aroma compounds of three black velvet tamarind (*Dialium*) fruit species. *Food Chem.*, **168**, 561-565, doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.112
- Lemmens R.H.M.J., Louppe D. & Oteng-Amoako A.A., eds, 2012. *Bois d'oeuvre 2*. Wageningen, Pays-Bas : PROTA.
- Ligot G. et al., 2018. Réviser les tarifs de cubage pour prendre en compte l'évolution de la ressource au Cameroun. *Bois For. Trop.*, **338**, 57-71, doi.org/10.19182/bft2018.338.a31677

- Linnaeus C., 1767. *Systema naturae*. 12th ed. Holmiae (Stockholm): Laurentius Salvius.
- Lokonon B.E. et al., 2013. Structural and ethnobotanical characterization of velvet tamarind (*Dialium guineense* Willd), a multipurpose tree species. *Agron. Afr.*, **25**(2), 121-131.
- Lovett J. & Clarke G.P., 1998. *Dialium orientale*. *The IUCN Red List of Threatened Species 1998*: e.T33467A9780615, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T33467A9780615.en>, (08/04/2021).
- LPWG, 2017. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny: the Legume Phylogeny Working Group (LPWG). *Taxon*, **66**, 44-77, doi.org/10.12705/661.3
- Macdonald I. & Omoruyi O., 2003. Effect of seed pre-treatment on germination of two surface types of *Dialium guineense*. *Seed Technol.*, **25**(1), 41-44.
- Makemba R.N. et al., 2019. *Cylicodiscus gabunensis* Harms : une espèce prisée dans le commerce international (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **23**(3), 188-202, doi.org/10.25518/1780-4507.18006
- Manya M.H. et al., 2020. Antimalarial herbal remedies of Bukavu and Uvira areas in DR Congo: an ethnobotanical survey. *J. Ethnopharmacol.*, **249**, 112422, doi.org/10.1016/j.jep.2019.112422
- Martin P. & Vernay M., 2016. *Guide d'utilisation des bois africains éco-certifiés en Europe*. Atib.
- Members of the IUCN SSC Madagascar Plant Specialist Group & Missouri Botanical Garden, 2017. *Dialium unifoliolatum*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2017*: e.T65523583A66159480, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T65523583A66159480.en>, (16/06/2021).
- Mensah J.K., 2012. *Dialium pachyphyllum* Harms. Wageningen, Pays-Bas: PROTA4U, <http://www.prota4u.org/search.asp>, (15/06/2021).
- Meunier Q., Doucet J.-L. & Moubogou C., 2015. *Arbres utiles du Gabon*. Gembloux, Belgique: Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Ministère des Eaux et Forêts/République du Cameroun, 2001. *Arrêté n°0222/A/MINEF, 2001 fixant les procédures d'élaboration, d'approbation, de suivi et de contrôle de la mise en œuvre des plans d'aménagement des forêts de production du domaine forestier permanent*. Yaoundé : Ministère des Eaux et Forêts.
- Ministère des Eaux et Forêts, 2006. *Arrêté ministériel n°034/CAB/Min/ECN-EF/2006 du 05 octobre 2006 révisé le 03/03/2015 portant composition, organisation et fonctionnement des conseils consultatifs provinciaux des forêts*. Kinshasa : Ministère des Eaux et Forêts.
- Ministère des Forêts et de la Faune, 2005. *Le cadre juridique des forêts et de l'environnement au Cameroun - Recueil de texte*. RIDACC.
- Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche, Chargé de l'Environnement, 2009. *Normes nationales d'élaboration des plans d'aménagement*. Bangui : Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche, Chargé de l'Environnement.
- Moronkola D., Kunle O., Olaoluwa O. & Ogunke C., 2017. Chemical compositions of *Dialium guineense* Willd. Leaf, stem-bark and fruit essential oils. *J. Complementary Altern. Med. Res.*, **3**(4), 1-8, doi.org/10.9734/jocamr/2017/35129
- Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020a. *Plan d'aménagement. Unité forestière d'aménagement n°10.026. Région de l'Est*. Douala, Cameroun.
- Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020b. *Plan d'aménagement. Unité forestière d'aménagement n°10.051. Région de l'Est*. Douala, Cameroun.
- Nature + asbl & Alpicam-Grumcam, 2020c. *Plan d'aménagement. Unité forestière d'aménagement n°10.053. Région de l'Est*. Douala, Cameroun.
- Nature + asbl & Olam Gabon, 2014a. *Plan d'aménagement. Concession forestière Mouniandji*. Walhain Saint-Paul, Belgique.
- Nature + asbl & Olam Gabon, 2014b. *Plan d'aménagement. Concession forestière Ngouadi*. Walhain Saint-Paul, Belgique.
- Nature + asbl & Pallisco, 2015. *Plan d'aménagement. Unité forestière d'aménagement n°10.047b. Région de l'Est*. Douala, Cameroun.
- Normand D. & Paquis J., 1976. *Manuel d'identification des bois commerciaux - tome 2 : Afrique guinéo-congolaise*. Nogent-sur-Marne, France : CTFT, <http://agritrop.cirad.fr/322997/>, (15/06/2021).
- Odukoya O.A. et al., 1996. Molluscicidal triterpenoid glycosides of *Dialium guineense*. *J. Nat. Prod.*, **3864**(96), 632-634, doi.org/10.1021/np9604137
- Ogu G.I., Ezeadila J. & Ehiobu J.M., 2013. Antioxidant and antimicrobial activities of *Dialium guineense* (Willd) leaf extract. *Pharmacy Pharmacol. Res.*, **1**(1), 1-7.
- Oliver D., 1871. *F. Flora of tropical Africa. Vol. II. Leguminosae to Ficoideae*. Ashford, UK: L. Reeve & Co.
- ONADEF (Office National de Développement des Forêts), 1992. *Norme d'études d'arbres*. Yaoundé : Ministère de l'Environnement et des Forêts.
- Osman M.F., Hassan N.M., Khatib A. & Tolos S.M., 2018. Antioxidant activities of *Dialium indum* L. fruit and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) of the active fractions. *Antioxidants*, **7**(11), doi.org/10.3390/antiox7110154
- Osugawu G.G.E. & Eme C.F., 2013. The phytochemical composition and antimicrobial activity of *Dialium guineense*, *Vitex doniana* and *Dennettia tripetala* leaves. *Asian J. Nat. Appl. Sci.*, **2**(3), 69-81.
- Pendje G., 1994. *Stratégies de régénération de neuf essences commerciales de forêt tropicale (Mayombe, Zaïre)*. Thèse de doctorat : Université Pierre et Marie Curie, Paris (France).
- Picard N. & Gourlet-Fleury S., 2011. *Optimisation des hypothèses et paramètres d'aménagement. Projet*

- d'aménagement des petits permis forestiers gabonais (PAPFFG)*. Rapport technique de mission, avril-juin 2011, RT 1106 NP&SGF, CIRAD, Libreville, Gabon.
- Présidence de la République/Gabon, 2004. *Décret n°689/PR/MEFEPEPN du 24 août 2004 définissant les normes techniques d'aménagement et de gestion durable des forêts domaniales productives enregistrées*. Libreville : Présidence de la République.
- Precious Woods & Terea, 2015a. *Plan d'aménagement 2000 – 2024. Version révisée 2015. UFA 1 Bambidie*. Libreville, Gabon.
- Precious Woods & Terea, 2015b. *Plan d'aménagement 2000 – 2024 Version révisée 2015. UFA 2Okondja*. Libreville, Gabon.
- Precious Woods & Terea, 2015c. *Plan d'aménagement 2000 – 2024 Version révisée 2015. UFA 3 Léléana*. Libreville, Gabon.
- Ramanantsialonina R.N., 2019. *Dialium occidentale*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T128114017A128115062*, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T128114017A128115062.en>, (16/06/2021).
- Raponda-Walker & Sillans R., 1961. *Les plantes utiles du Gabon*. Paris : Éditions Paul Lechevalier.
- Réjou-Méchain M. et al., 2011. Detecting large-scale diversity patterns in tropical trees: can we trust commercial forest inventories? *For. Ecol. Manage.*, **261**(2), 187-194, doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.003
- Reborredo F., 2013. Socio-economic, environmental, and governance impacts of illegal logging. *Environ. Syst. Decis.*, **33**(2), 295-304, doi.org/10.1007/s10669-013-9444-7
- Rojó J.P., 1982. *Studies in the genus Dialium (Cassieae-Caesalpinioideae)*. Phd thesis: University of Oxford Linacre (United Kingdom).
- Saïdi I., 2019. *Caractérisation et valorisation d'une plante de la famille des Fabaceae : Gleditsia triacanthos de la région de Sidi Bel Abbès : Extraction des substances bioactives*. Thèse de doctorat : Université El Djillali Sidi Bel Abbès (Algérie).
- SBL (Société des Bois de Lastoursville), 2003. *Plan d'aménagement forestier de la concession forestière sous aménagement durable SBL/TRB*. Lastoursville, Gabon : SBL.
- Steyaert R.L., 1951. Contribution à l'étude du genre *Dialium*. *Bull. Soc. R. Bot. Belg./ Bull. Koninklijke Belg. Bot. Vereniging*, **1**, 29-45, <https://www.jstor.org/stable/20792116>, (16/06/2021).
- Steyaert R., 1952. *Caesalpinaceae V. - Cassieae*. In : Boutique R., éd. *Flore du Congo Belge et du Ruanda-Urundi, Spermatophytes*. Vol. 3. Bruxelles : INEAC, 495-545.
- Steyaert R.L., 1953. *Étude sur les rapports entre les genres Uittienia, Dansera et Dialium (Legum.-Caesalp.)*. Vol. 2. Part 2. Bogor, Indonesia: Herbarium Bogoriense, Kebun Raya Bogor, 351-355.
- Szczurek A., Fierro V., Medjahdi G. & Celzard A., 2019. Carbon aerogels prepared by autocondensation of flavonoid tannin. *Carbon Resour. Convers.*, **2**(1), 72-84, doi.org/10.1016/j.crcon.2019.02.001
- Takasaki H., 1983. Seed dispersal by chimpanzees: a preliminary note. *Afr. Study Monogr.*, **3**, 105-108.
- Taubert P., 1892. Leguminosae. In: Engler A. & Prantl K., eds. *Die natürlichen Pflanzenfamilien*. III. 3. Leipzig, Deutschland: W. Engelmann, 70-388.
- Terborgh J. et al., 2008. Tree recruitment in an empty forest. *Ecology*, **89**(6), 1757-1768, doi.org/10.1890/07-0479.1
- Todd-Bockarie A.H. & Duryea M.L., 1993. Seed pretreatment methods to improve germination of the multipurpose West African forest species *Dialium guineense*. *For. Ecol. Manage.*, **57**(1-4), 257-273.
- Trease G.E. & Evans W.C., 2002. *Pharmacognosy*. 15th ed. London: Saunders.
- Vantomme P., 1991. The timber export potential from the Brazilian amazon. *Bois For. Trop.*, **22**, 69-74.
- WIJMA S.A., 2011. *Plan d'aménagement durable UFA 09 021*. Douala, Cameroun : FORM Ecology Consultants SARL.
- WIJMA Cameroun S.A. & Nature + asbl, 2016. *Plan d'aménagement. Unité forestière d'aménagement n°00.003. Région : Centre, Sud et Littoral*. Douala, Cameroun : FORM Ecology Consultants SARL.
- White F., 1979. The Guineo-Congolian region and its relationship to other phytochoria. *Bull. Jard. Bot. Nat. Belg.*, **49**, 11-55.
- White F., 1986. *La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique Unesco/AETFAT/UNSO*. Paris : ORSTOM & UNESCO.
- White F., 1993. The AETFAT chorological classification of Africa: history, methods and applications. *Bull. Nat. Jard. Bot. Nat. Belg.*, **62**, 225-281.
- White L. & Abernethy K.A., 1996. *Guide de la végétation de la réserve de la Lopé, Gabon*. Libreville : Multipress-Gabon.
- Wild H. & Exell A.W., 2007. *Flora Zambesiaca – Mozambique, Federation of Rhodesia and Nyasaland, Bechuanaland Protectorate*. London: Kew, 117-118.
- Willdenow C.L., 1796. *Archiv für die Botanik*. Leipzig, Deutschland: Schäferischen Buchhandlung.
- World Conservation Monitoring Centre, 1998. *Dialium lopense*. *The IUCN Red List of Threatened Species 1998: e.T37495A10053709*, <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T37495A10053709.en>, (21/06/2021).
- Yetein M.H. et al., 2013. Ethnobotanical study of medicinal plants used for the treatment of malaria in plateau of Allada, Benin (West Africa). *J. Ethnopharmacol.*, **146**(1), 154-163, doi.org/10.1016/j.jep.2012.12.022.
- Zimmerman E., Herenden P.S., Lewis G.P. & Bruneau A., 2017. Floral evolution and phylogeny of the Dialioideae, a diverse subfamily of tropical legumes 1. *Am. J. Bot.*, **104**(7), 1019-1041, doi.org/10.3732/ajb.1600436.

(126 réf.)

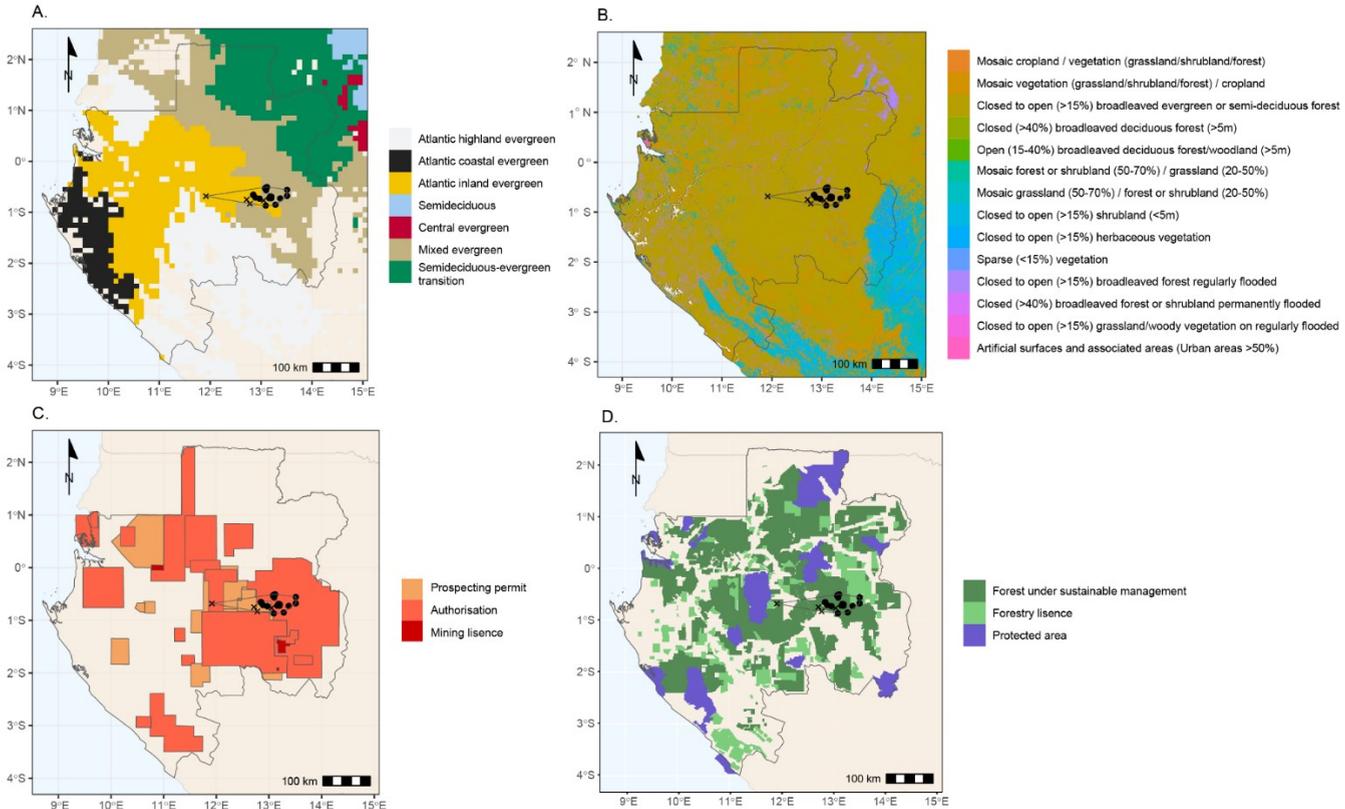
Annexe 2. Major organs, other than the trunk and leaves, observed (x) on each specimen. Map = identification number used for plotting trees on the map.

Voucher	Map	Branches	Panicles	Flowers	Fruits
<i>JL. Doucet & G. Bibang 2</i>	13				x
<i>JL. Doucet & G. Bibang 3</i>	14				
<i>JL. Doucet & G. Bibang 4</i>	15				x
<i>JL. Doucet & G. Bibang 8</i>	16				
<i>JL. Doucet & G. Bibang 9</i>	17				
<i>JL. Doucet & G. Bibang 10</i>	18				x
<i>JL. Doucet & G. Bibang 11</i>	19				x
<i>JL. Doucet & G. Bibang 12</i>	20				
<i>R. Doucet 5</i>	25				x
<i>R. Doucet 9</i>	26				x
<i>R. Doucet 12</i>	27				x
<i>R. Doucet 14</i>	28				x
<i>R. Doucet 15</i>	29				
<i>R. Doucet 16</i>	1	x	x	x	
<i>R. Doucet 17</i>	2	x	x	x	
<i>R. Doucet 18</i>	3	x	x	x	
<i>R. Doucet 21</i>	4	x	x		
<i>R. Doucet 22</i>	5	x	x		
<i>R. Doucet 23</i>	6	x	x	x	
<i>R. Doucet 24</i>	7	x	x	x	
<i>R. Doucet 26</i>	8	x	x	x	
<i>R. Doucet 27</i>	9	x	x		
<i>R. Doucet 28</i>	10*	x	x	x	
<i>R. Doucet 30</i>	11	x	x	x	
<i>R. Doucet 33</i>	12	x	x	x	
<i>R. Doucet LO1</i>	21				
<i>R. Doucet LO2</i>	22				
<i>R. Doucet LO4</i>	23				
<i>R. Doucet LO5</i>	24				

Annexe 3. List of specimens from BR and WAG re-identified as *Dialium bambidiense* to estimate species distribution.

GABON – **Ogooué-Lolo** • Bamtanta; 18 Apr. 1932; Le Testu 7484; BR [BR0000013976309] • C.E.B. chantier. Tall forest. Near Bambidie; 13 Sept. 1996; McPherson 16593; WAG [WAG.1637809] • Deforestation Eurotrag, +/- 20 km N. of Lastourville; 16 Nov. 1983; Louis et al. 796; WAG [WAG.1637891] • Makande surroundings; 11 Feb. 1999; Breteler 15002; BR [BR0000016564497].

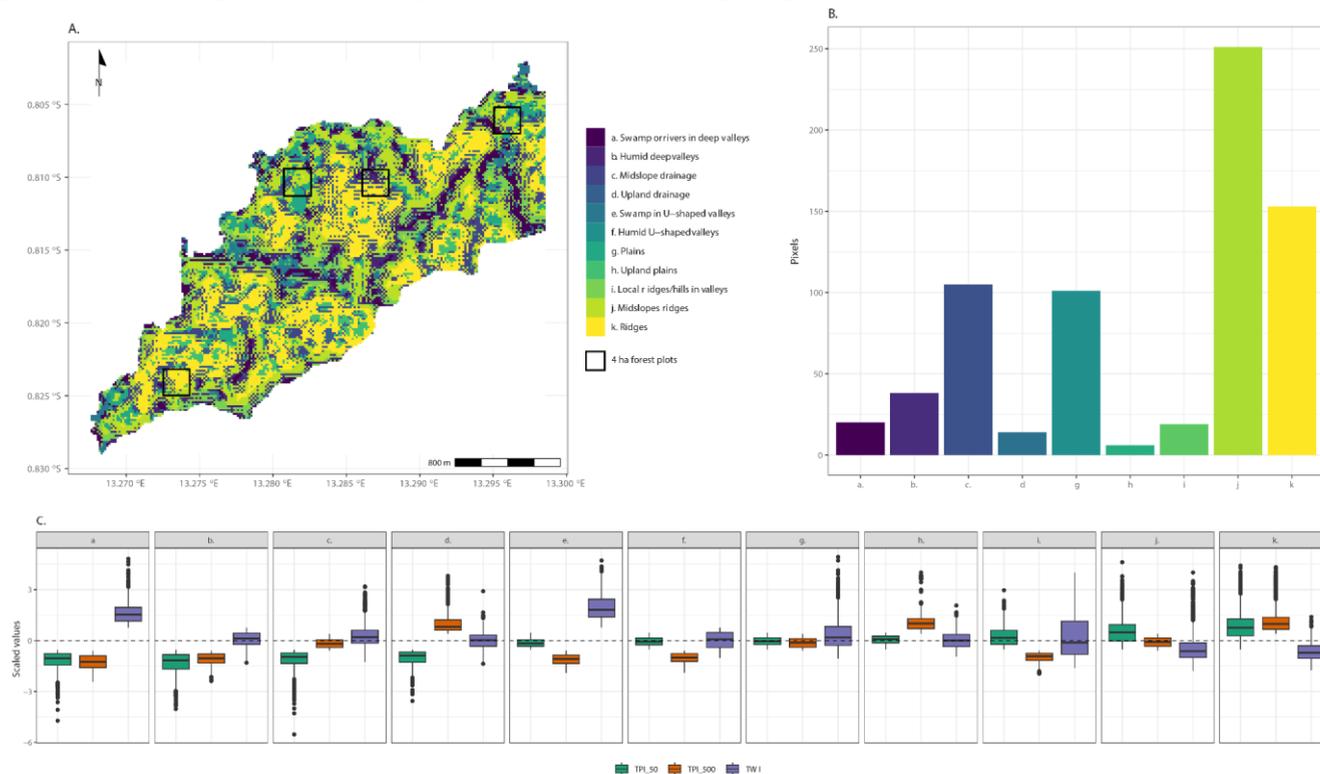
Annexe 4. Maps produced for IUCN conservation status assessment. A. Forest typology from (Réjou-Méchain et al. 2021). B. Land cover (ESA and UCLouvain 2010). C. Mining sector 2007 in Gabon (Ministère des Eaux et Forêts/World Resources Institute). D. Other land attribution in Gabon (Ministère des Eaux et Forêts/World Resources Institute).



Annexe 5. List of herbarium specimens used for other *Dialium* species identification within forest monitoring plots. h_d = height of diameter measurement (m); d = diameter (cm); tr_h = trunk height (m), t_h = tree height (m).

herb_ref	herba	date	identification	status	h_d	d	tr_h	t_h
<i>R. Doucet 19</i>	BR	06/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	canopy	1.8	102	20	30
<i>R. Doucet 20</i>	BR	07/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	undergrowth	1.3	37	16	25
<i>R. Doucet 25</i>	BR	17/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	canopy	2.0	67	20	35
<i>R. Doucet 29</i>	BR	19/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	canopy	1.3	57	15	39
<i>R. Doucet 31</i>	BR	20/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	canopy	3.4	72	19	36
<i>R. Doucet 32</i>	BR	21/10/22	<i>Dialium pachyphyllum</i>	undergrowth	1.3	37	13	25
<i>R. Doucet 34</i>	BR	28/10/22	<i>Dialium polyanthum</i>	canopy	1.7	58	11	21
<i>JL. Doucet & G. Bibang 6</i>	BR	30/03/21	<i>Dialium lopensense</i>	dominant	1.8	80	20	35
<i>JL. Doucet & G. Bibang 7</i>	BR	30/03/21	<i>Dialium lopensense</i>	canopy	2.0	75	20	30
<i>R. Doucet LO3</i>	BR	15/07/19	<i>Dialium lopensense</i>	canopy	2.7	76	17	40
<i>R. Doucet 7</i>	BR	17/06/21	<i>Dialium lopensense</i>	canopy	2.0	82	15	31

Annexe 6. Topographic habitat classification. A. map of topographic habitats around DYNAFAC forest plots; B. number of pixels attributes to each habitat within the 16 ha (4 plots of 4 ha) of monitoring forest. C. index standard values for each habitat: TPI_50 = Topographic Position Index using 50 pixels radius, TPI_500 = Topographic Position Index using 500 pixels radius, TWI = Topographic Wetness Index. a. Swamp or rivers in deep valleys, b. Humid deep valleys, c. Midslope drainage, d. Upland drainage, e. Swamp in U-shaped valleys, f. Humid U-shaped valleys, g. Plains, h. Upland plains, i. Local ridges/hills in valleys, j. Midslope ridges/hill, k. Ridges.



Annexe 7. Odds ratio and chi-square test significance.

Annexe 7.1. Odds ratio using plots pixels presence/absence of *D. bambidiense*. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to $0.1 \geq p > 0.5$ and * to $0.5 \geq p > 0.1$.

	Humid deep valley	Midslope drainage	Midslope ridges, small hills in plains	Plains	Ridges
Humid deep valley	1	1.45 ^{ns}	0.45 ^{ns}	1.31 ^{ns}	0.62 ^{ns}
Midslope drainage	-	1	0.31 [°]	0.9 ^{ns}	0.42 ^{ns}
Midslope ridges, small hills in plains	-	-	1	2.89 [°]	1.36 ^{ns}
Plains	-	-	-	1	0.47 ^{ns}
Ridges	-	-	-	-	1

Annexe 7.2. Odds ratio using plots pixels presence/absence of *D. pachyphyllum*. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to 0.1 >= p > 0.5 and * to 0.5 >= p > 0.1.

	Humid deep valley	Local Ridges in Valleys	Midslope drainage	Midslope Ridges/ Small hills in plains	Plains	Ridges	Swamp or rivers in deep valleys	Upland Drainage	Upland Plains
Humid deep valley	1	0.66 ^{ns}	1.28 ^{ns}	1.60 ^{ns}	1.00 ^{ns}	1.60 ^{ns}	0.21 ^{ns}	2.41 ^{ns}	0.70 ^{ns}
Local Ridges in Valleys	-	1	1.93 ^{ns}	2.39 ^{ns}	1.50 ^{ns}	2.40 ^{ns}	0.31 ^{ns}	3.61 ^{ns}	1.05 ^{ns}
Midslope drainage	-	-	1	1.24 ^{ns}	0.78 ^{ns}	1.24 ^{ns}	0.16°	1.87 ^{ns}	0.54 ^{ns}
Midslope Ridges/ Small hills in plains	-	-	-	1	0.62 ^{ns}	1.00 ^{ns}	0.13*	1.51 ^{ns}	0.44 ^{ns}
Plains	-	-	-	-	1	1.59 ^{ns}	0.21 ^{ns}	2.40 ^{ns}	0.70 ^{ns}
Ridges	-	-	-	-	-	1	0.13*	1.51 ^{ns}	0.44 ^{ns}
Swamp or rivers in deep valleys	-	-	-	-	-	-	1	11.4*	3.33 ^{ns}
Upland Drainage	-	-	-	-	-	-	-	1	0.29 ^{ns}
Upland Plains	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Annexe 7.3. Odds ratio using plots pixels presence/absence of *D. polyanthum*. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to $0.1 > p > 0.5$ and * to $0.5 > p > 0.1$.

	Humid deep valley	Local Ridges in Valleys	Midslope drainage	Midslope Ridges/ Small hills in plains	Plains	Ridges	Swamp or rivers in deep valleys	Upland Drainage	Upland Plains
Humid deep valley	1	2.00 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.81 ^{ns}	1.00 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.63 ^{ns}	1.81 ^{ns}	4.22 ^{ns}
Local Ridges in Valleys	-	1	0.24 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.50 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.90 ^{ns}	2.11 ^{ns}
Midslope drainage	-	-	1	1.67 ^{ns}	2.08 ^{ns}	1.37 ^{ns}	1.31 ^{ns}	3.75 ^{ns}	8.75°
Midslope Ridges/ Small hills in plains	-	-	-	1	1.24 ^{ns}	0.82 ^{ns}	0.78 ^{ns}	2.24 ^{ns}	5.22 ^{ns}
Plains	-	-	-	-	1	0.66 ^{ns}	0.63 ^{ns}	1.80 ^{ns}	4.21 ^{ns}
Ridges	-	-	-	-	-	1	0.95 ^{ns}	2.73 ^{ns}	6.37 ^{ns}
Swamp or rivers in deep valleys	-	-	-	-	-	-	1	2.86 ^{ns}	6.66 ^{ns}
Upland Drainage	-	-	-	-	-	-	-	1	2.33 ^{ns}
Upland Plains	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Annexe 7.4. Odds ratio comparing the proportion of *D. bambidiense* and *D. pachyphyllum* in relation to habitats. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to $0.1 \geq p > 0.5$ and * to $0.5 \geq p > 0.1$.

	Humid deep valley	Midslope drainage	Midslope ridges, small hills in plains	Plains	Ridges
Humid deep valley	1	1.13 ^{ns}	1.25 ^{ns}	1.31 ^{ns}	0.39 ^{ns}
Midslope drainage	-	1	0.25*	1.16 ^{ns}	0.34 ^{ns}
Midslope ridges, small hills in plains	-	-	1	4.62*	1.36 ^{ns}
Plains	-	-	-	1	0.29°
Ridges	-	-	-	-	1

Annexe 7.5. Odds ratio comparing the proportion of *D. bambidiense* and *D. polyanthum* in relation to habitats. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to $0.1 \geq p > 0.5$ and * to $0.5 \geq p > 0.1$.

	Humid deep valley	Midslope drainage	Midslope ridges, small hills in plains	Plains	Ridges
Humid deep valley	1	3.00 ^{ns}	0.56 ^{ns}	1.31 ^{ns}	0.94 ^{ns}
Midslope drainage	-	1	0.19°	0.44 ^{ns}	0.31 ^{ns}
Midslope ridges, small hills in plains	-	-	1	2.33 ^{ns}	1.66 ^{ns}
Plains	-	-	-	1	1.40 ^{ns}
Ridges	-	-	-	-	1

Annexe 7.6. Odds ratio comparing the proportion of *D. polyanthum* and *D. pachyphyllum* in relation to habitats. The reference habitats for the odds are in rows and the comparison habitats are in columns. In superscript there is an indication of the significance of the chi-square test of the comparison; ^{ns} corresponds to “not significant”, ° to $0.1 > p > 0.5$ and * to $0.5 > p > 0.1$.

	Humid deep valley	Local Ridges in Valleys	Midslope drainage	Midslope Ridges/ Small hills in plains	Plains	Ridges	Swamp or rivers in deep valleys	Upland Drainage	Upland Plains
Humid deep valley	1	3.00 ^{ns}	0.38 ^{ns}	0.5 ^{ns}	1.00 ^{ns}	0.41 ^{ns}	3.00 ^{ns}	0.75 ^{ns}	6.00 ^{ns}
Local Ridges in Valleys	-	1	0.13 [°]	0.17 [°]	0.33 ^{ns}	0.14 [°]	1.00 ^{ns}	0.25 ^{ns}	2.00 ^{ns}
Midslope drainage	-	-	1	1.34 ^{ns}	2.66 ^{ns}	1.1 ^{ns}	8.00 ^{ns}	2.00 ^{ns}	16.0 [°]
Midslope Ridges/ Small hills in plains	-	-	-	1	1.98 ^{ns}	0.81 ^{ns}	5.94 ^{ns}	1.48 ^{ns}	11.9 [°]
Plains	-	-	-	-	1	0.41 ^{ns}	3.00 ^{ns}	0.75 ^{ns}	6.00 ^{ns}
Ridges	-	-	-	-	-	1	7.25 ^{ns}	1.81 ^{ns}	14.5 [°]
Swamp or rivers in deep valleys	-	-	-	-	-	-	1	0.25 ^{ns}	2.00 ^{ns}
Upland Drainage	-	-	-	-	-	-	-	1	8.00 ^{ns}
Upland Plains	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Annexe 8. Postprint de la Publication 2

Wood description and timber use investigation of *Pachyelasma tessmannii* (Harms) Harms

Doucet Robin – Forest is life, TERRA Teaching and Research Centre, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, B-5030 Gembloux, Belgium

Doucet Jean-Louis – Forest is life, TERRA Teaching and Research Centre, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, B-5030 Gembloux, Belgium

Lejeune Philippe – Forest is life, TERRA Teaching and Research Centre, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, B-5030 Gembloux, Belgium

Verheyen Cécile – Centre Wallon de Recherche Agronomique (CRA-W), B-5030, Gembloux, Belgium

Tom De Mil – Forest is life, TERRA Teaching and Research Centre, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, B-5030 Gembloux, Belgium

Patrick Martin – Expertise Bois SARL (EXB), 258 Chemin de la Fontaine Martin 33290 Le Pian Médoc, France

Lagoute Paul - Pallisco SARL, Avenue des Cocotiers 478, BP 394 Douala, Cameroon

Jourez Benoit – Centre Wallon de Recherche Agronomique (CRA-W), B-5030, Gembloux, Belgium

Abstract

In Central Africa more than 75% of the total log production is focussed on only four timber species, whose populations are progressively being depleted. Reducing the impact on those flagship species by diversifying the exploitation could lead to better forest management in the long term. *Pachyelasma tessmannii* is a species whose trees are among the largest in the forests of Central Africa. Yet the properties of its wood are poorly documented. The aim of this study is to evaluate the possibility of using this species with a view to diversifying forest production in Central Africa. Its physical and mechanical properties, its natural durability, and their quantified radial variation were investigated. By using Hierarchical Clustering on Principal Component (HCPC), heartwood was classified among 98 other Central African timber species. *P. tessmannii* has a wavy grain and a coarse texture with a wide well discernible sapwood. The wood is “heavy” with disadvantageous dimensional stability parameters. All mechanical properties are “medium”, except for “low” impact bending strength. Heartwood is very durable against white and brown rot. All properties were significantly influenced by radial variation, except for axial compression strength. According to the HCPC, *P. tessmannii* should be suitable for stairs (inside/outside), flooring, decking, veneer (back and face of plywood), sliced veneer, furniture (inside/outside), exterior panelling, cabinetry,

joinery (inside/outside). The results obtained concerning the radial variation of basic density could suggest that the species is light-demanding. Considering that the sustainable exploitation of light-demanding species is often confronted with the problem of their lack of regeneration in closed-canopy rainforests, further studies are needed before promoting this species on international markets.

Declaration

Funding: The research was supported by the *Identification d'essences à haut potentiel de valorisation* (EHPval) project, funded by the *Programme de promotion de l'exploitation certifiée des forêts* (PPECF);

Conflict of interest: Authors declare that they have no competing financial interests;

Ethic approval: Not applicable;

Consent to participate: Not applicable;

Consent to publish: Not applicable;

Database and code availability: Wood physical, mechanical and durability data are available on request to authors. Database and code used for the HCPC analysis are available online at: <https://github.com/DoucetRobin/African-wood-HCPC.git>

Keywords: *P. tessmannii*, wood, natural durability, mechanical properties, physical properties, uses

Acknowledgements

We are grateful to Pallisco-CIFM and Pasquet Menuiseries for sending the vegetal material. We would also like to thank Lhacen Hadiy, Yannick Delzant, Cécile Lesire from GEPROFOR asbl and Anne Bauvin, Cécile Verheyen, Jean-Marc Henin, Caroline Pollet from the CRA-W.

Introduction

For several years, the future of tropical forests has become a critical issue (Lamb et al. 2005; Alroy 2017; Mitchard 2018), highlighting the need for sustainable management of these ecosystems (Karsenty et al. 2008; FAO 2011). The Congo Basin hosts the second largest continuous forest block in the world, after the Amazon Basin, with an area close to 170 million hectares. In Central Africa, 28 % of that area is allocated to timber production (FRM, 2018) and generally logging is the main source of direct or indirect employment (Bayol et al. 2012). To sustainably manage their forests, Central African countries have adapted their laws and encouraged forest companies to produce and respect a sustainable management plan. Among other things, the aim is to combine production and forest resource recovery after a cutting cycle (25 years on average).

Despite these measures, a progressive impoverishment of some flagship timber species (*Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague, *Triplochiton*

scleroxylon K. Schum., *Lophira alata* Banks ex C.F. Gaertn.) is observed (Karsenty and Gourlet-Fleury 2006b; Biwolé 2015). In Africa, the number of tree species has been estimated to be around 4600 (Slik et al. 2015). However only four species (*Aucoumea klaineana* Roxb. ex Colebr., *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague, *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. and *Erythrophleum suaveolens* (Guill. & Perr.) Brenan) account for more than 75 % of the total log production in the Congo Basin (BAD 2019). Because most of them are light-demanding, their regeneration is generally absent in the forest understory and long-term recovery rates of their populations are low (Morin-Rivat et al. 2017). Diversifying timber production could reduce the impact on logging flagship species (Karsenty and Gourlet-Fleury 2006b). As knowledge of wood properties is the main factor for accepting lesser-known timber species on international markets (Chaowana 2013; Boampong et al. 2015), those properties need to be investigated in a wide range of understudied species.

Pachyelasma tessmannii (Harms) Harms (commercial name: Eyek or Mekhogo) is a tree from the *Fabaceae* family, *Caesalpinioideae* sub-family. Although among the biggest trees of the African rainforest, only low volumes were exported from Central Africa: 5 and 1 m³ of sawing, from Cameroun respectively in 2005 and 2006 (ATIBT 2006, 2007b). Those very low exportation rates could be due to a lack of knowledge about this species. Indeed only few data such as density or heartwood/sapwood ratio and observations are documented (Lemmens et al. 2012). The aims of this study are to (i) describe physical, mechanical and natural durability properties of *P. Tessmannii* wood, (ii) quantify their radial variation, (iii) compare observed properties with those of better-known species in Central Africa in order to estimate main end uses and (iv) investigate the feasibility of a sustainable production considering ecological features of the species.

Material and methods

Study species and study site

P. tessmannii can reach a height of 60 m and diameter of 2.5 m with a straight, cylindrical bole, sometimes deformed, with well-developed plank-buttresses. Its crown spreads like an umbrella. Leaves are 35 to 38.5 cm long. Its fruits are 4 angled pods that can reach 15-37 cm length, 2-2.5cm width and 3.5-4 cm thick (CJBG 2018). It occurs in secondary evergreen rainforest from south Niger to Central African Republic and from Gabon to Democratic Republic of Congo (Schmelzer and Gurib-Fakim 2008).

Following national regulations, minimum cutting diameters range from 50 cm in Cameroon to 70 cm in Gabon. Studied trees were collected in the Forest Management Unit (FMU) 10-044 granted to Pallisco, an FSC-certified logging company located in east Cameroon. The forest is moist and semi-deciduous (Fayolle et al. 2014). The climate is equatorial with an average temperature of

23.2°C and an average annual rainfall of 1629 mm. The density of *P. tessmannii* trees (dbh, diameter at breast height > 20 cm) is 0.156 per ha. The density of harvestable trees following regulations of Cameroon is 0.132 per ha. Figure 1 gives the density of trees distribution by diameter classes in the study site (Nature + asbl & Pallisco 2015).

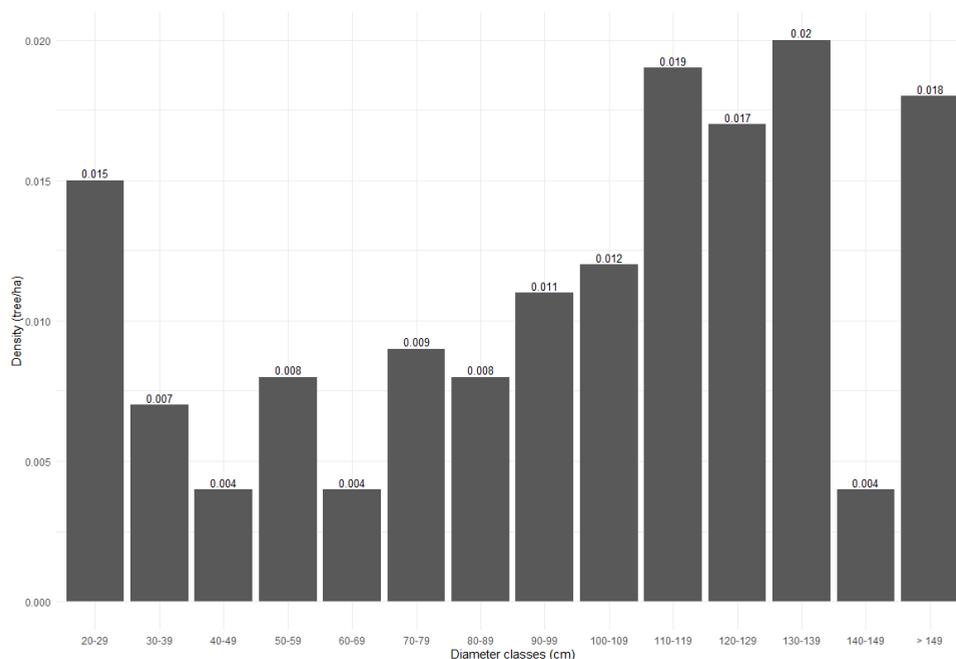


Fig.1. Tree density by diameter class among the study site, highlighting lower densities in lower diameter classes.

General description and preparation of samples

Four trees were harvested. Straightness and defects of the logs were determined. First boles were quarter sawn and the central planks of 10 cm thickness were collected on each tree (Table 1). To avoid deformation, they were slowly air-dried. Planks were divided into 5 equidistant segments, where sapwood thickness was recorded on each side of the planks. Colour, grain and texture were also determined for both sapwood and heartwood on the transversal plan. Finally, the transversal plane was sanded up to 1200 grit to visualize macroscopic anatomical traits. After natural air-drying, planks were cut into 11-16 battens for Part A, 4-6 battens for Part B (Figure 2), depending on planks' minimum width. These battens were finally cut into test samples following the process explained in Figure 2. Defect-free samples were selected according to the ISO 3129 standard (ISO 2012) for physical and mechanical tests. Their dimensions are given in Table 2.

Table 2: Dimension of *P. tessmannii* planks, in centimetres

Id plank	Length	Thickness	Maximum width	Minimum width
E1	318	10	114	111
E2	329	10	122	119
E3	326	10	79	72
E4	317	10	145	128

To study the influence of radial position on the wood properties, each sample was classified into one of the following wood parts :

- (i) Juvenile wood: samples within 10 cm from the pith and containing at least the 10 first years of the tree (Zobel and Sprague 1998; Ishiguri et al. 2007);
- (ii) Heartwood: samples containing heartwood out of juvenile wood;
- (iii) Sapwood: samples containing only sapwood.

Since no study has yet been carried out on the wood moisture content (MC) behaviour of *P. tessmannii* under different environmental conditions, selected samples were stored at a standard atmosphere of 20 +/- 2°C and 65 +/- 5% air relative humidity in order to reach an MC of 12% (ISO 2012). MC was regularly calculated on independent samples using the following equation: $MC = (m_h - m_a) / m_a * 100$ where m_h = humid sample mass (g), m_a = anhydrous sample mass after drying at 103°C (g).

Wood properties

Wood properties, calculations for their determination and standards used are summarized in Table 2.

FSP calculation consisted in oven-drying samples of 5 different MC rankings from 0% to 60%. For each MC, the sample surface was calculated as the product of tangential and radial dimensions. The FSP, considered as the MC at which shrinkage begins during drying, was extrapolated using the linear regression modelled on the surface shrinkage induced by MC variation of the sample (Kollmann and Coté 1968; Bossu et al. 2016).

All strength properties were determined using an Instron-5582 machine, with the exception of the impact bending strength, which was determined with an Amsler machine. Due to lack of knowledge about *P. tessmannii* drying, some tests were not carried out at a 12% MC (Table 3). Once the MC is lower than the FSP, mechanical properties increase with decreasing MC (Kollmann and Coté 1968; Gerhards 1982; Kretschmann and Green 1996), therefore obtained values are probably underestimating values at 12% MC.

Natural durability was considered as the resistance of wood against attack of basidiomycete fungi. In this study, a white-rot fungus, *Trametes versicolor* (L.)

Lloyd (CTB 863 strain), and a brown-rot fungus, *Coniophora puteana* (Schumach.) P. Karst. (BAM Ebw. 15 strain), were used.

Wood impregnation was assessed with regard to CEN/TR 14734: 2004 (CEN 2004). Impregnation classes were determined by measuring mean lateral penetration, minimal lateral penetration and minimal axial penetration of a copper sulphate solution in the wood after an impregnation cycle in a sealed chamber.

Data analyses

Analysis of variance (ANOVA) was performed to study the role of the radial position in wood properties. To verify normality and homoscedasticity, the Ryan-Joiner and the Levene tests were used respectively. If means were unequal then they were compared by using the t-test post-HOC test at a 95% confidence level. If homoscedasticity was not verified, the non-parametric test of Kruskal-Wallis was used and medians were structured by using Wilcoxon-Mann-Whitney test at a level of confidence of 95%.

The means of mechanical properties (E , σ_f , σ_c , and N) and physical properties (ρ_{12} , %V, β_{linR} , β_{linT} , $\beta_{linT} / \beta_{linR}$ and FSP) of *P. tessmannii* heartwood were compared with those of other African timber obtained from the CIRAD (2015) database. All values mentioned in this database, except for FSP, were determined according to the same standards used in this study (personal communication). As this database presents properties at 12% MC, our measurements that were not performed at 12%, were converted using the equation from USDA (2010): $P = P_{12} * (P_{12} / P_g)^{((12 - M) / M_p - 12)}$, where P is the property at M moisture content (%), P_{12} is the same property at 12% MC, P_g is the property for green wood and M_p here corresponds to the FSP. To identify the species with similar properties, a Principal Component Analysis (PCA) and a Hierarchical Clustering on Principal Components (HCPC) were carried out. This unsupervised method makes it possible to reduce the number of variables to few non-correlated variables, named Principal Components (PCs) which efficiently summarize the information (Lever et al. 2017). However, this statement is only verified if the number of selected components is optimal. Indeed, the cumulative variance explained by selected PCs should represent most of the dataset variability, while avoiding selecting too many components that could induce statistical noise. Then, Euclidean distance between species was calculated on selected PCs scores to create the dissimilarity matrix used to cluster species with the Unweighted Pair Group Method with Arithmetic mean (UPGMA) aggregation method.

All analyses and graphics were processed with Rstudio software 1.2.5001 (Rstudio team 2020) with the following packages: *FactoMineR* (Lê et al. 2008a), *ggplot2* (Whickham 2016) and *Tidyverse* (Wickham et al. 2019).

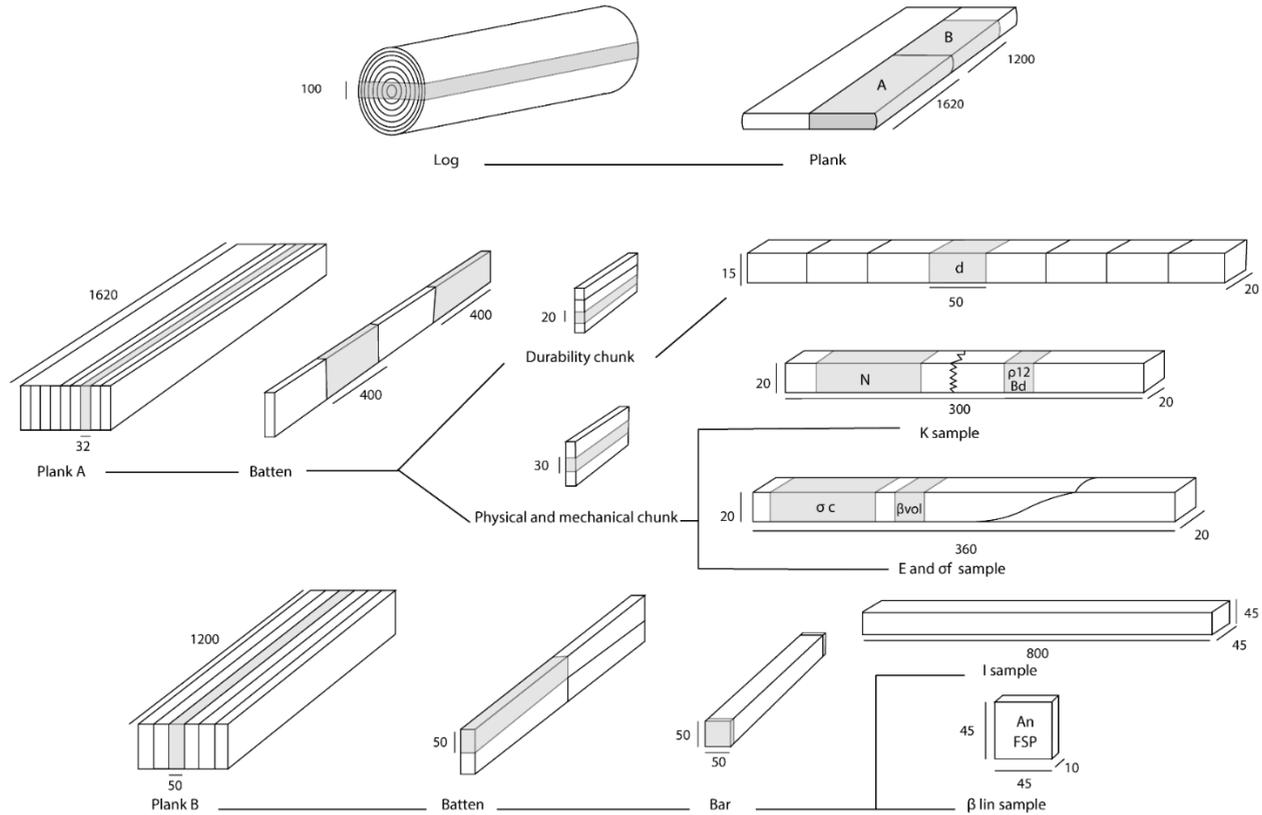


Fig.2 Cutting process, dimensions in mm; natural durability (d); dynamic bending strength (K); density at 12% MC (ρ_{12}); basic density (Bd); Monnin hardness (N); total volumetric shrinkage (β_{vol}); Young's modulus (E); static bending strength (σ_f); axial compression strength (σ_c); impregnation (I); total linear radial/tangential shrinkage (β_{lin}); anisotropy (An); fiber saturation point (FSP).

Table 2: Calculation methods of wood properties. m_{12} = mass 12% MC (kg), V_{12} = volume 12% MC (m^3), y in = y axis interception of lm = linear model, MC = moisture content, S = sample surface (m^2), ma = anhydrous mass (kg), V_s = volume above FSP (m^3), V_a = anhydrous volume (m^3), L_s = linear length above FSP (m), La = anhydrous length (m), P = maximum load before breaking (N), l = distance between two support points (m), t = distance between two loading points (m), m = distance between the two arrow measuring points (m), a = sample height (cm), b = sample width (cm), f = Arrow induced by the load (m), W = breaking unitary work (kgm), p = cylinder print width on sample (mm), m_0 = dry mass before fungus exposition (g), m_{16} = dry mass after 16 weeks of fungus exposition; Units; Standards used for their determination; Dimensions of samples: height (H), width (W) and length (L) and number of selected samples: sapwood (Ns), heartwood (Nh) and juvenile wood (Nj).

Properties	Symbols	Calculations	Units	Standards / References used	H	W	L	N _s	N _h	N _j
Wood density at 12 % MC	ρ_{12}	$\rho_{12} = m_{12}/V_{12}$	kg/m^3	NF B51-005 (AFNOR 1985a)	2 0	2 0	2 0	2 4	5 9	2 4
Fibre Saturation Point	FSP	y in lm (MC~S)	%	(Kollmann and Coté 1968; Bossu et al. 2016)	4 5	4 5	1 0	8 4	2 4	8 8
Basic density	Bd	$Bd = ma/V_s$	kg/m^3	NF B51-005 (AFNOR 1985a)	2 0	2 0	2 0	2 4	5 9	2 4
Volumetric shrinkage from saturated samples to oven dry	β_{vol}	$\beta_{vol} = (V_s - V_a)/V_s * 100$	%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	2 0	2 0	2 0	2 4	5 9	2 4
Volumetric coefficient	%V	$\%V = \beta_{vol} / FSP$	%/%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	-	-	-	-	-	-
Linear shrinkage from saturated samples to oven dry	β_{linT} and β_{linR}	$\beta_{lin} = (L_s - La)/L_s * 100$	%	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	4 5	4 5	1 0	2 4	7 6	2 7
Anisotropy	AN	$AN = \beta_{linT} / \beta_{linR}$	no units	NF B51-006 (AFNOR 1985b)	4 5	4 5	1 0	2 4	7 6	2 7
Young`s modulus	E	$E = 3P(l-t) m^2/8ba^3f$	Mpa	NF B51-016 (AFNOR 1987a)	2 0	2 0	3 60	2 4	6 2	2 4
Static bending strength	σ_f	$\sigma_f = 3Pl/2ba^2$	Mpa	NF B51-008 (AFNOR 1987b)	2 0	2 0	3 60	2 4	6 2	2 4
Dynamic bending strength	K	$K = W/ab$	kg/cm^2	NBN 225 (IBN 1956)	2 0	2 0	3 00	2 4	5 9	2 4
Axial compression strength	σ_c	$\sigma_c = P/ab$	Mpa	NF B51-007 (AFNOR 1985c)	2 0	2 0	6 0	2 4	6 2	2 4
Monnin hardness	N	$N = (15 - (\sqrt{900 - p^2})/2)$	no units	NF B51-013 (AFNOR 1985d)	2 0	2 0	6 0	2 4	5 9	2 4
Natural durability	d	$d = (m_0 - m_{16})/m_0$	%	CEN/TS 15083-1 (CEN 2005)	1 5	2 5	5 0	1 6	3 2	3 2
Impregnation	I	/	classes	CEN/TR 14734 (CEN 2004)	4 5	4 5	8 00	1 2	1 5	- -

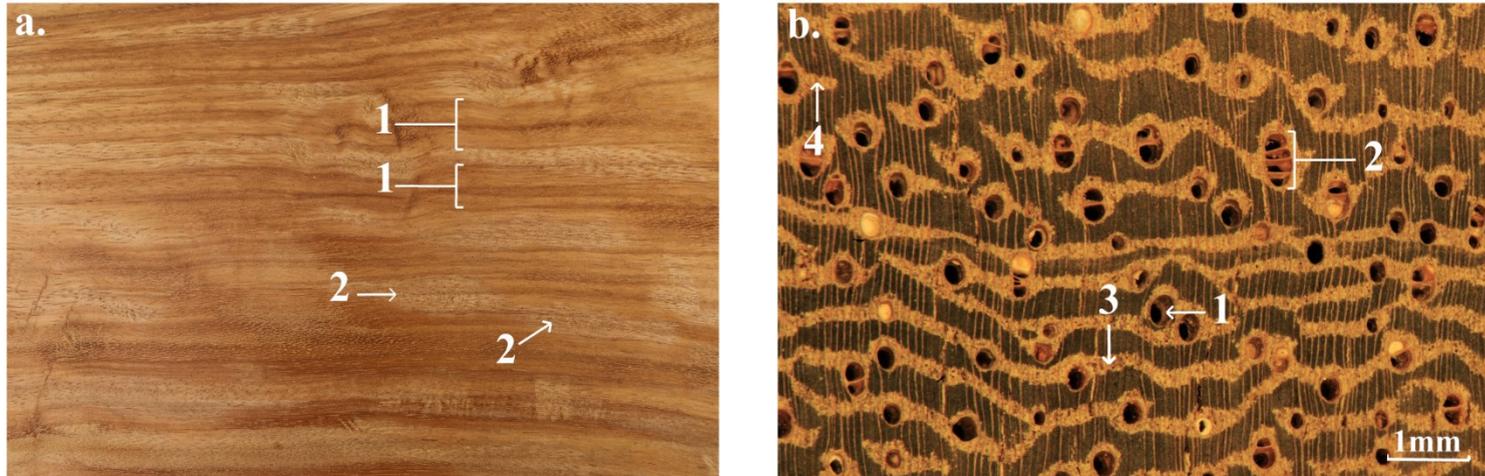


Fig.3 *P. tessmannii* wood aspect a) on quartersawn lumber showing large interlocked grain (a.1) and flamed aspect (a.2) due to the wavy grain in the tangential plane; b) on the cross-section showing large vessels (b.1), diffusely distributed either isolated or grouped in groups of 2-3, up to 4 (b.2), an abundant axial confluent parenchyma (b.3) or winged-aliform (b.4)

Results

All results concerning physical properties, mechanical properties and natural durability of *P. tessmannii* are summarized in Electronic Supplementary Material.

Log description, visual aspect and macroscopic anatomy

Planks had three main defects: heart shakes (3/4), ring shakes (2/4) and cup shake (2/4). These defects hamper peeling transformation (Fays 2008). No evidences of insects or fungus attacks were observed. The sapwood is 9.8 +/- 3.2 cm wide, it is white and well discernible from the heartwood. The heartwood varies from light pink or brown pink to red brown (Fig.3-a)). The wood has interlocked-grain and flamed figure patterns on quarter sawn due to a wavy grain on the tangential section (Fig.3-a)). On the one hand, this kind of grain angle variation produces beautiful and particularly attractive figures on wood (Harris 1989; Hillaby 2000; Fays 2008). On the other hand, it could negatively impact mechanical properties (Weddell 1961; Marsoem and Kikata 1987; Hernández and Almeida 2003) by decreasing mean value of resistance and increasing variability (Hernández 2007). Those kinds of various grain angle finally induce surfacing difficulties and complicate planning and sanding operation during wood manufacturing. The wood texture is coarse due to wide vessels, diffusely distributed, either isolated or grouped in groups of 2-3, up to 4 (Fig.3-b). Axial parenchyma is abundant either confluent, aliform or winged-aliform

Physical properties

Median density (12% MC) is significantly different ($\chi^2=10.984$; p-val < 0.01) between radial position: 768 +/- 101 kg/m³ (n=23), 820 +/- 51 kg/m³ (n=47) and 842 +/- 62 kg/m³ (n= 22), for juvenile wood, heartwood and sapwood, respectively (Fig.). The significant data dispersal in juvenile wood (Fig.) may be due to the definition we adopted, i.e. wood within 10 cm from the pith. As a consequence, samples may have included real juvenile wood and heartwood. Juvenile wood can be classified as “semi-heavy”, sapwood and heartwood can both be classified as “heavy” (Sallenave 1955). The observed ρ_{12} difference between mature (both sapwood and heartwood) and juvenile wood is particularly significant (Gartner et al. 1997; Bhat et al. 2001)

Basic density median follows the same pattern as ρ_{12} with significant variation along radial position ($\chi^2=25.43$; p-val < 0.001): 630 +/- 68 kg/m³ (n=22), 679 +/- 43 kg/m³ (n=58), 709 +/- 46 kg/m³ (n=24), for juvenile wood, heartwood and sapwood, respectively.

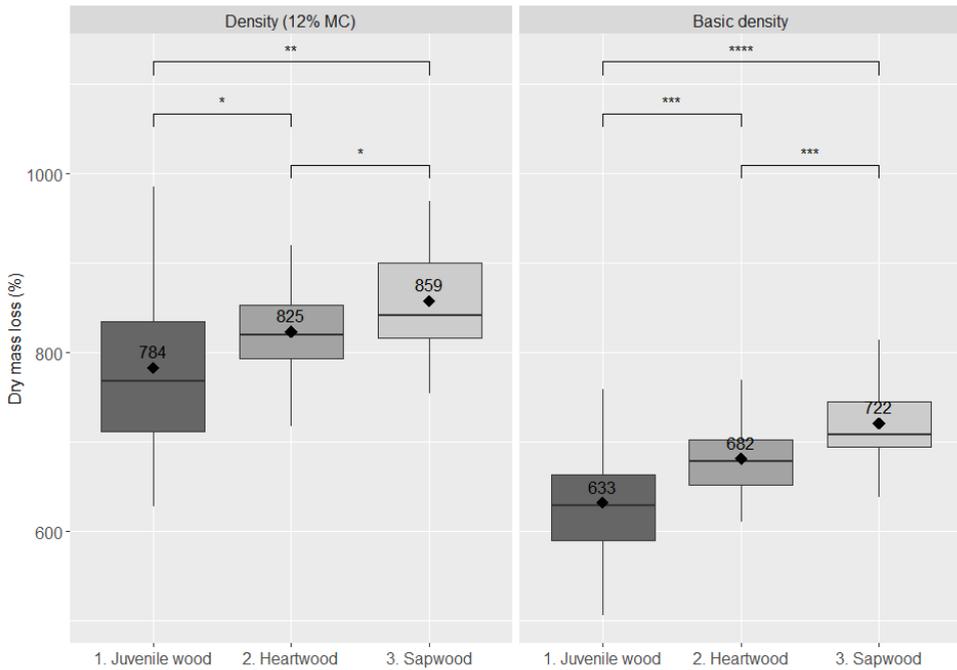


Fig. 4 Increase in density at 12% MC and basic density from juvenile wood to sapwood of *P. tessmannii*; *, **, *** and **** correspond to p-value ≤ 0.05 , $p \leq 0.01$, $p \leq 0.001$ and $p < 0.0001$ respectively for Mann-Whitney test

Radial and tangential shrinkage are significantly influenced by radial position ($\chi^2=29.75$; p-val < 0.001 and $\chi^2=20.14$; p-val < 0.001 , respectively). Radial shrinkages for juvenile wood, heartwood and sapwood are respectively $4.93 \pm 0.62\%$ (n=18); $4.20 \pm 0.64\%$ (n=60) and $3.75 \pm 0.29\%$ (n=21). Radial shrinkage of juvenile wood and heartwood can be considered as “medium” and sapwood as “low” (Gérard et al. 2017). Tangential shrinkages are respectively $10.41 \pm 0.24\%$ (n=14); $9.21 \pm 1.24\%$ (n=55) and $9.03 \pm 1.02\%$ (n=25) (Fig.) which correspond to a high tangential shrinkage for juvenile wood and medium shrinkage for both heartwood and sapwood (Gérard et al. 2017).

Volumetric shrinkage median is significantly influenced by radial position ($\chi^2=18.97$; p-val < 0.001): $15.66 \pm 1.83\%$ (n=23), $13.75 \pm 2.08\%$ (n=56) and $12.41 \pm 0.90\%$ (n=19), for juvenile wood, heartwood and sapwood, respectively (Fig.). Volumetric shrinkage of juvenile wood is classified as “high” and it is “medium” for sapwood and heartwood (Sallenave 1955).

The mean anisotropy of shrinkage, which indicates the risk of deformation during drying (Spear and Walker 2006), is significantly different between radial positions ($F=3.41$; p-val = 0.036): 2.10 ± 0.25 (n=18), 2.20 ± 0.36 (n=60) and 2.30 ± 0.25 (n=21) for juvenile wood, heartwood and sapwood, respectively (Fig.).

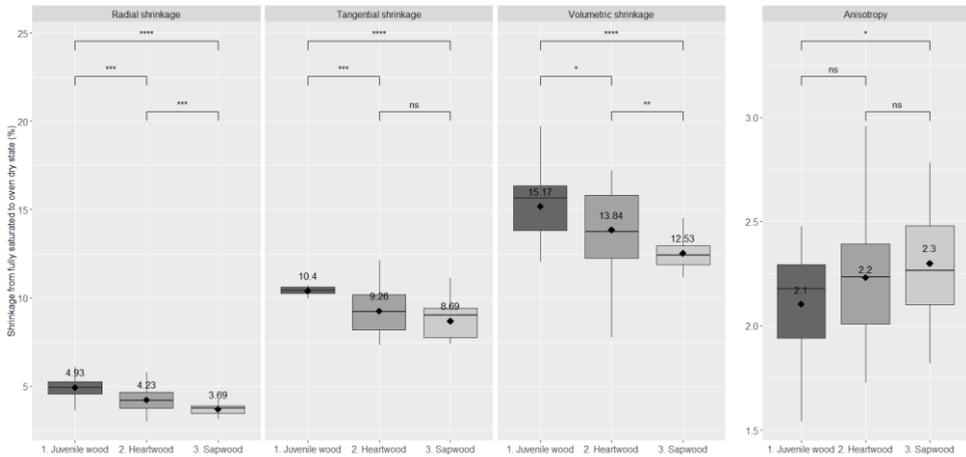


Fig. 5 Variation in linear, volumetric shrinkage and anisotropy (no units) across the stem of *P. tessmannii*; ns, *, **, *** and **** correspond to p-value > 0.5, $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.001$ and $p \leq 0.0001$ for Mann-Whitney test (β_{linR} , β_{linT} and β_{vol}) and t-test (An), respectively.

FSP can be classified as medium (Gérard et al. 2017) for all compartments even if its mean differs significantly ($F=6.49$; $p\text{-val}=0.004$) with radial variation (Fig.), $27.2 \pm 0.8\%$ ($n=7$), $25.7 \pm 1.5\%$ ($n=23$) and $24.9 \pm 1.1\%$ ($n=8$) for juvenile wood, heartwood and sapwood ($n=8$), respectively. All wood partshave a medium value of V_s : $0.55\%/%$ for juvenile wood, $0.53\%/%$ for heartwood and $0.50\%/%$ for sapwood (Sallenave 1955).

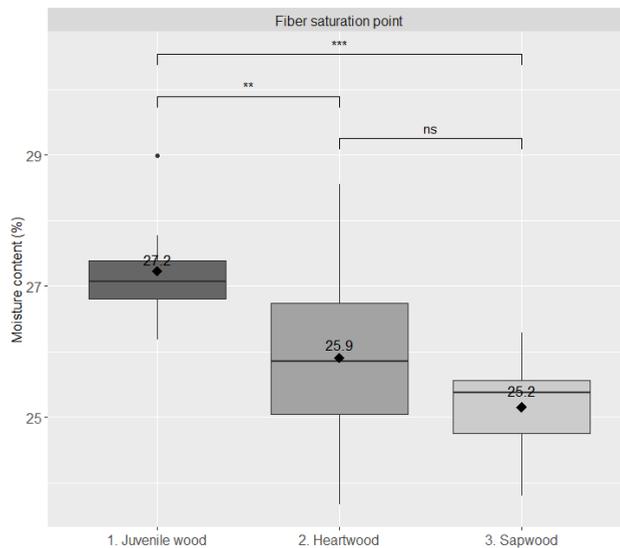


Fig. 6 Difference in fibre saturation point between juvenile wood, heartwood and sapwood of *P. tessmannii*; ns, ** and *** correspond to p-value > 0.05, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.001$ respectively for t-test.

Mechanical properties

All mechanical properties results are summarized in Table. E mean is significantly different between wood parts but all remain classified as “medium” (Gérard et al. 2017). Values obtained for heartwood and juvenile wood (17005 +/- 3728 Mpa and 16941 +/- 2330 Mpa, respectively) were significantly higher than those of sapwood (14326 +/- 2792 Mpa) (Table 3). σ_f is significantly lower in juvenile wood (56 +/- 12 Mpa) than heartwood and sapwood (79 +/- 19 Mpa and 74 +/- 21 Mpa, respectively). They are respectively “medium” and “weak” (Gérard et al. 2017). The K median is also significantly weaker for juvenile wood (0.13 +/- 0.05 kg/cm²) than heartwood (0.29 +/- 0.17 kg/cm²) and sapwood, (0.28 +/- 0.08 kg/cm²). According to Sallenave (1955), all wood parts can be considered as “low” impact strength. Compressive strength does not significantly differ among radial positions: 55 +/- 6 Mpa, 55 +/- 7 Mpa and 52 +/- 7 Mpa for juvenile wood, heartwood and sapwood, respectively. All values can be considered as “medium” (Gérard et al. 2017). N is significantly different between the tree radial positions (F= 11.84; p-val < 0.001). Juvenile wood (3.7 +/- 0.8) is less hard than heartwood (4.3 +/- 0.7) which is less hard than sapwood (4.8 +/- 1). All wood parts are considered as “mid-hard” (Gérard et al. 2017)

Natural durability and impregnation

For both white and brown rot, a significant variation among sample radial position is observed (F = 6,134; p-val = 0.003 and F = 13,19; p-val < 0.001 respectively for *T. versicolor* and *C. puteana*). Considering two strains, the median dry mass loss (MDL) of heartwood (4.80 +/- 3.17 % and 0.57 +/- 1.23 % for *T. versicolor* and *C. puteana*, respectively) is significantly lower than for the two other radial positions (Fig.). As median is the parameter used to assess natural durability class, heartwood can be considered as very durable (CEN 2005). However, nearly half of samples could be classified as “durable” for *T. versicolor* and this ranking should be used carefully. Against *T. versicolor*, MDL of sapwood (16.06 +/- 3.84%) is significantly higher than MDL of juvenile wood (12.15 +/- 3.82%). They are respectively slightly and moderately durable. Against *C. puteana*, MDL of sapwood (3.72 +/- 1.54%) was not significantly different from MDL of juvenile wood (2.06 +/- 4.64%) and both are very durable. To confirm fungi virulence, beech samples were also tested. For those, MDL against *T. versicolor* and *C. puteana* was 30.17 % and 40.37%.

Concerning wood impregnation, all samples of heartwood are classified as slightly to non-impregnable. The penetration of copper sulphate followed the interlocked grain on the surface but never covered the complete width of the specimen. Concerning sapwood, 42% of samples are considered as impregnable, 50% as moderately impregnable and 8% as slightly to non-impregnable. The copper solution also followed the interlocked grain and mainly covered the whole specimen's section.

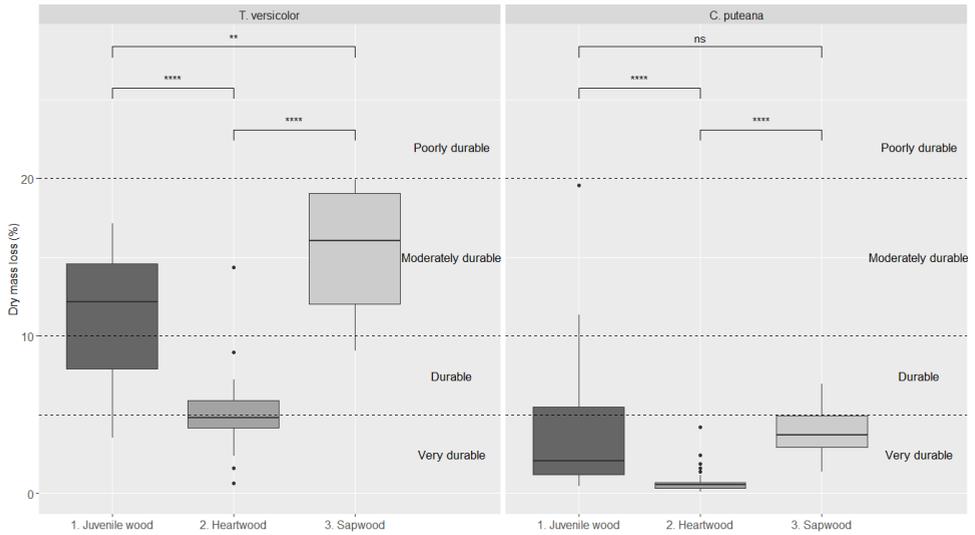


Fig.7 Natural durability classes assessment according to CEN (2005) for *P. tessmannii* juvenile wood, heartwood and sapwood.

Heartwood physical-mechanical classification

The cumulative percentage of total explained variance reaches 95.66% with the four first components (Figure 8). The quality of variable representation on a PC is expressed as the squared cosine calculated between the variable and its projection on the PC in the multi-vector space created by the PCA. The first component is highly correlated with the ρ_{12} , E, N, σ_c , σ_f , and %V. The second one is correlated with stability parameters (FSP, β_{linR} and β_{linT}). AN is highly correlated and β_{linR} moderately correlated to the third one. Finally, FSP and %V are moderately correlated to the fourth component. Given the high cumulative variance explained by those four components and the weak representation quality of variables on PCs from the fifth component (minimal squared cosine < 0.1), only the four first components were kept for the hierarchical clustering.

The HCPC classifies *P. tessmannii* heartwood in the group composed of *Piptadeniastrum africanum* (Hook.f.) Brenan, *Scottellia klaineana* Pierre and *Pterygota* genus (*Pterygota bequaertii* De Wild and *Pterygota macrocarpa* K. Schum) (Figure 9). Their pilot names are, respectively, Dabema, Akossika and Koto (ATIBT 2016). According to Figure 8, those species appear to be similar based on the following properties: %V, β_{linR} , β_{linT} , An, FSP and σ_c . However, *P. tessmannii* has a higher ρ_{12} , E, N and a lower σ_f than those three other species. This classification also emphasizes the difference between *P. tessmannii* wood and that of the 4 main flagship species in Central Africa.

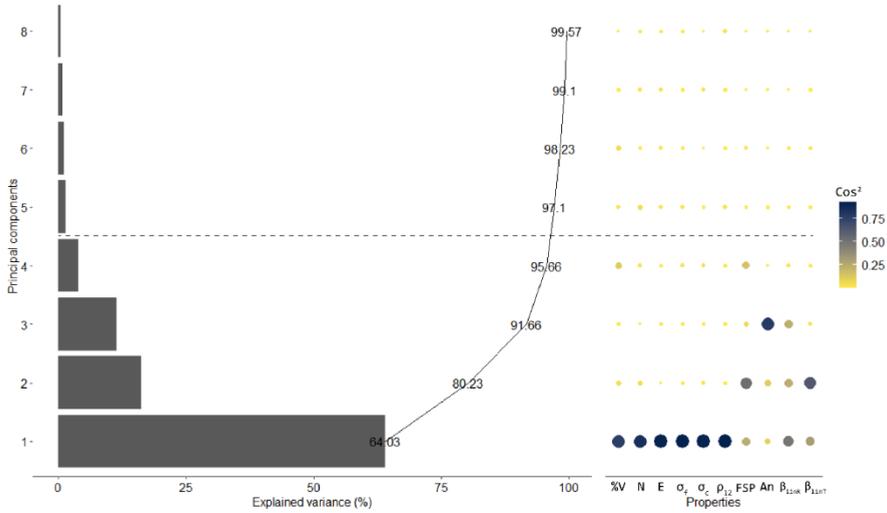


Fig. 8 On the left, bar plot of the percentage of the total variance explained by each component and the cumulative variance curve, on the right, the dot plot presents the quality of variable representation by the PCs, expressed as squared cosine. The dotted line corresponds to the limit number of components selected for the hierarchical clustering.

Table 3: Mechanical properties tested; mean MC; Mean values, median in case of Kruskal-Wallis analysis (\pm standard deviation) for each compartment and t-test/Wilcoxon test grouping; Analysis; significance and mean value converted at 12% MC of Heartwood used in the HCPC analysis.

Property	MC	Juvenile wood	Heartwood	Sapwood	Analysis	Significance	Heartwood (12% MC)
E (Mpa)	12	16,941^a \pm 2,382 (22)	17,005^a \pm 3,698 (61)	14,326^b \pm 2,792 (24)	Anova	F = 6.134; p-val = 0.003	17,005
σ_f (Mpa)	15.3	56^b \pm 12 (22)	79^a \pm 19 (62)	74^a \pm 21 (24)	Anova	F = 13.19; p-val < 0.001	89
K (kgm/cm ²)	13.2	0.13^b \pm 0.05 (21)	0.20^a \pm 0.08 (59)	0.27^a \pm 0.16 (21)	Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 28.73$; p-val < 0.001	-
σ_c (Mpa)	12	55^a \pm 6 (24)	55^a \pm 7 (59)	52^a \pm 7 (24)	Anova	F = 1.62; p-val = 0.204	55
N	14.6	3.7^c \pm 0.8 (24)	4.3^b \pm 0.7 (62)	4.8^a \pm 1.0 (24)	Anova	F = 11.84; p-val < 0.001	4.9

Table 4: Main end uses (Gérard et al. 2017) for the 3 closest species of *P. tessmannii* identified by the HCPC.

Species	Main end uses
<i>Piptadenastrum africanum</i> (Hook.f.) Brenan	Heavy carpentry; stairs (inside); veneer; vehicle or containing flooring; glued laminated; built-in furniture or mobile item; house framing; industrial or heavy flooring; exterior panelling.
<i>Scottellia klaineana</i> Pierre	Turned goods; framing; cabinetry (high-end furniture); stairs (inside); veneer; panelling; interior joinery; built-in furniture and mobile item; moulding; flooring; sliced veneer; marquetry.
<i>Pterygota</i> spp.	Framing; boxes and crates; veneer; panelling glued laminated; interior joinery; built-in furniture or mobile item; moulding; house framing; fibre or particleboards; sliced veneer; seats; marquetry.

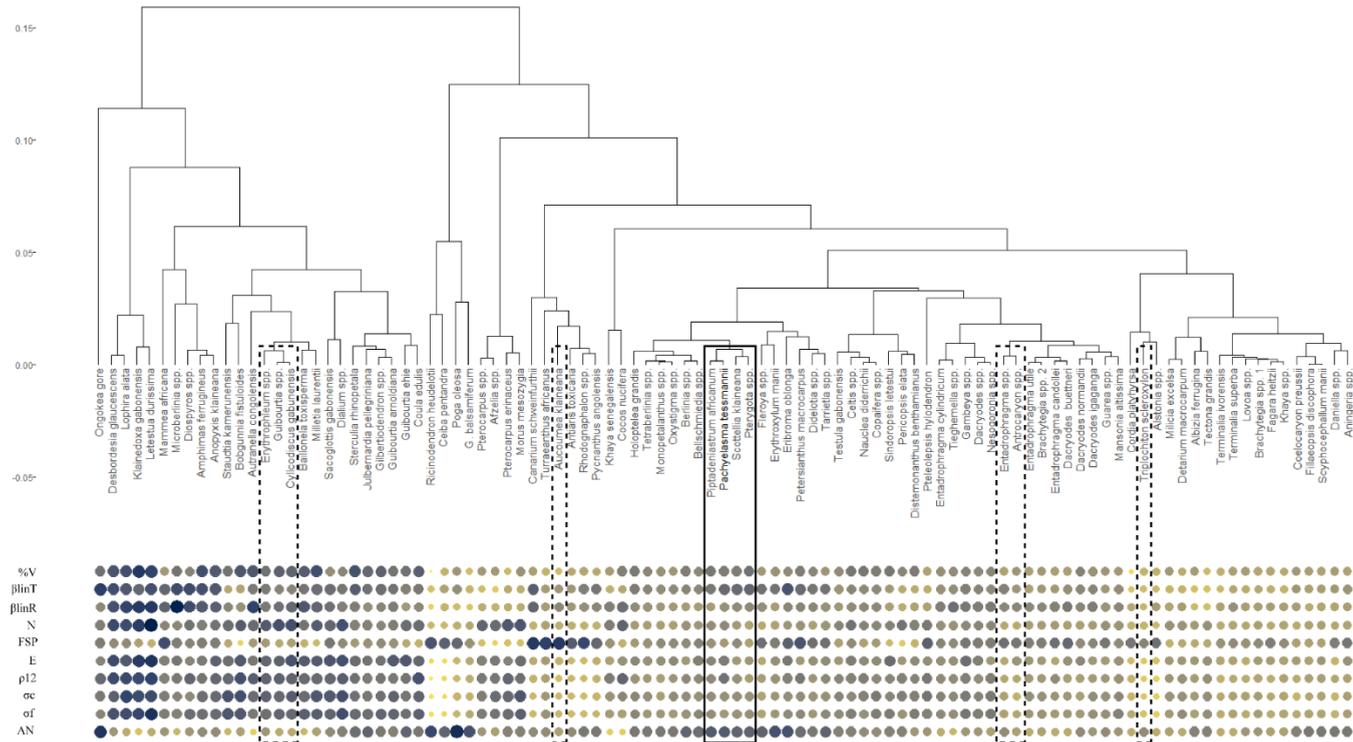


Fig. 9 On top, hierarchical classification by using the “UPGMA” aggregation method on “Euclidean” distance based on the 4 main PCs from the PCA (which represents 95.66% of variance). At the bottom, the dot plot presents all standardized physical and mechanical properties corresponding to each species. For each property, the smallest dots correspond to the lowest value observed in the database and the biggest one to the highest value. The branch containing the 3 closest species to *P. tessmannii*’s wood is fully circled. At the same cutting height in the classification, groups containing the 4 main flagship species in Central Africa (*A. klaineana*, *E. cylindricum*, *T. scleroxylon* and *E. suaveolens*) are dotted circled.

Discussion

Physical properties

P. tessmannii presents a significant increase in ρ_{12} and Bd from the pith to the bark (Fig.). Dimensional stability parameters also vary with the radial gradient. Indeed, all shrinkage and FSP significantly decrease from juvenile wood to sapwood (Fig.). The anisotropy is not significantly different between heartwood and sapwood but seems to rise from juvenile wood to sapwood. The %V is not significantly different between wood parts but there also is a decreasing trend from juvenile wood to sapwood. In this case, all stability properties seem to be correlated to the Bd as reported by some authors (Kollmann and Coté 1968; Mantanis et al. 1994; Kord et al. 2010). More recent studies highlight that those publications are based on temperate hardwood and softwood and do not match with the tropical wood anatomy complexity (de Almeida et al. 2017). Multi-species studies on tropical wood even present a poor relation between density and shrinkage (de Almeida et al. 2017; Deklerck et al. 2019). According to Schulgasser and Witztum (2015), shrinkage is mainly explained by wood microstructure. As microstructure of wood is affected by cambial maturity (Lichtenegger et al. 1999; Evans et al. 2000), it could explain the variation in physical properties between juvenile wood and mature wood. Deklerck et al. (2019) also show that vessels lumen area per mm² affect swelling more than wood density. Rungwattana and Hietz (2018) show significant increase in vessel fraction from pith to bark (independent of cambial maturity) for 5 tropical species. Considering these results, the furthest sapwood distance could explain the difference in dimensional properties observed among mature wood. Regardless of the radial variation of shrinkages, the wide vessels (Fig.3-b) and their density (5 per mm² according to Normand and Paquis (1976) could explain high shrinkage in all wood parts for *P. tessmannii*.

Dimensional parameters provide information on lumber behaviour with MC variation. For *P. tessmannii*, juvenile wood will shrink/swell more than other wood parts but with a lower risk of deformations during drying due to an inferior AN. Sapwood will present the opposite behaviour: less shrinkage/swelling and a higher risk of deformation. FSP decreasing from juvenile wood to sapwood means that juvenile wood will start shrinking before other wood parts during drying. This can lead either to a high risk of checking or splitting for large wood pieces made up of two or three wood parts. It is therefore advised to saw narrow lumber during sawing process. %V expresses the lumber volumetric variation due to a variation of 1% MC. Juvenile wood will react more to MC variation than heartwood and sapwood.

Considering all wood parts, *P. tessmannii* shows disadvantageous dimensional parameters. Its high anisotropy and its interlocked grain strongly increase the risk of warping during wood drying (Dalois 1993). This wood deformations either leads to losses in planing operations or prevents lumber use (Fays 2008). As this risk is mainly linked to plain sawn lumber, quarter sawing which reduces the ratio of tangential and radial dimensions must be promoted (Dalois 1990).

Mechanical properties

Despite a quite high density, the mechanical properties are medium overall (Figure 9) and go against the widely accepted statement about the interspecific relation between wood strength and density (Kollmann and Coté 1968; Zhang 1997; Ocloo and Laing 2003; Keller 2009; Sholadoye et al. 2016). The grain deviation pattern (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) could explain this. As mechanical properties are tested parallel to wood rings, the wavy grain directly affects wood strength (Tsehaye and Walker 1995; Brémaud et al. 2011b). According to Kollmann and Coté (1968), a grain deviation between 15° and 20°, as observed on all samples, could lead to a decrease of 20 to 35% in bending strength and 10 to 20% in compressive strength. Impact bending strength is particularly influenced by sloping grain. Wilson et al. (cited in Harris, 1989) suggest a slope lower than 2° for impact uses.

Considering that all wood parts present the same grain deviation pattern, mechanical strength is generally higher for mature wood (Table). However, E is significantly lower for sapwood and σ_c does not significantly vary with the radial gradient. E variation could be explained by a higher extractives content in juvenile wood and heartwood that positively affects the Young's modulus (Brémaud et al. 2011a).

Use classes

White rot was the most decaying fungus. As a precaution, natural durability against this strain can be used to assess *P. tessmannii* use classes. According to the NF EN 335 standard and the EN 460 standard, natural durability of juvenile wood covers use class 3 (outdoors, MC sometimes > 20%, quick drying after moisture exposure), the natural durability of heartwood covers use class 4 (outdoors, MC always > 20 %, direct contact with the soil or water without any treatments), and that of sapwood covers the 2 first working classes (interior with no humidification or sheltered with occasional humidification). As sapwood soaking with decay preservative agent can be considered, it could be used until use class 4 with an appropriate treatment. This use class assessment is only valid for situations where no other wood pests occur. Lemmens *et al.* (2012) mentioned a good resistance of *P. tessmannii* heartwood against termite and marine borers, but it can be attacked by pinhole borers. However, observations are not sufficient and further scientific work is needed to assess its natural durability against those pests before any use in areas where these pests occur. Moreover, every situation is different and this grading might be adapted.

Potential uses of heartwood

Potential heartwood uses can be proposed by crossing the actual uses of the identified three closest species (Table 4) and other *P. tessmannii* properties not included in the HCPC analysis. The coarse grain mainly does not allow mouldings (Martin and Vernay 2016). Low impact bending strength combined with a high

density prevents use for vehicle or container flooring, boxes and crates, mobile items, seats, industrial or heavy flooring and carpentry. With a weak density-strength ratio, framing cannot be done. Unlike the three other species, *P. tessmannii* heartwood could be used until working class 4 and allow exterior uses as decking or exterior stairs. Hence, *P. tessmannii* is potentially suitable, according to the HCPC analysis and all properties studied, for the following end uses: stairs (inside/outside), flooring, decking, veneer (back and face of plywood), sliced veneer, furniture (inside/outside), exterior panelling, cabinetry, joinery (inside/outside) and turned goods.

This list can be compared to the one proposed by Lemmens *et al.* (2012): heavy construction, boat building, vehicle bodies, furniture and cabinet work, joinery, sporting goods and implements, interior trim, toys, turnery and very thin veneer. Considering medium to low mechanical properties (Table) observed and the weak density/mechanical strength ratio, heavy construction, boat building, vehicle bodies and sporting goods are not recommended. Interior trim is not recommended as discussed before. Interestingly only toys, turned goods and veneer (already in the HCPC potential use list) seems to meet *P. tessmannii* wood properties. This huge difference emphasizes the need to study wood properties before assessing uses. The wavy grain pattern observed on the 4 studied trees (Fig.3-a), which probably strongly decreases mechanical strength, could be the cause of this difference observed between the HCPC list and the one proposed by Lemmens *et al.* (2012).

The difference observed within *P. tessmannii* and the four main flagship species shows that the species studied will not be appropriate to substitute them in the tropical wood market. However, it could be added to diversify it.

Ecological traits and management

Radial variation of wood density is known to be correlated to many morphological and ecological traits of trees (King *et al.* 2006; Iida *et al.* 2012; Plourde *et al.* 2015). The increase in basic density from the pith to the bark is often attributed to pioneer and light-demanding species (Wiemann and Williamson 1988, 1989; Woodcock and Shier 2002, 2003). Considering the high diameter this species can reach (Fig.), it is probably a long-lived pioneer species. Such species often have a lack of regeneration in undisturbed mature forests (Pena-Claros *et al.*, 2008). Figure 1, showing lower tree proportion in lower diameter classes, probably confirms this lack of regeneration. As a consequence, if this lack of regeneration is confirmed in other logging concessions, silvicultural methods such as logging gap enrichment (Doucet *et al.* 2009) or enrichment planting (Doucet *et al.*, 2016; Martínez-Garza, Bongers and Poorter, 2013) should be investigated. If successful, those techniques should be systematically implemented in case of exploitation of *P. tessmannii* in the selective logging context. As light-demanding species are more competitive in high light situations, this species might be suitable for planting and reforestation operations.

Conclusion

P. tessmannii wood has some interesting properties (beautiful grain patterns, medium shrinkages and FSP, good heartwood durability, impregnable sapwood) but also some drawbacks (high radial variation in physical properties, high anisotropy, and weak strength/density ratio). All properties, except for axial compression strength, were significantly more advantageous in mature wood (heartwood and sapwood) than juvenile wood. This assumption suggests to ensure removing juvenile wood during the sawing process. The HCPC analysis showed the heartwood is quite similar to *Piptadenastrum africanum*, *Scottellia klaineana* and *Pterygota spp.* By crossing end uses of those more marketed species and the other wood properties studied, not taken into account in the HCPC, *P. tessmannii* could meet the following end uses: stairs (inside/outside), flooring, decking, veneer (back and face of plywood), sliced veneer, furniture (inside/outside), exterior panelling, cabinetry, joinery (inside/outside) and turned goods. However, it would be necessary to study more practical properties, such as stability test, drying yields, and gluing to confirm the end uses proposed.

The results obtained concerning the radial variation of basic density suggest that the species is light-demanding. A large-scale logging could threaten population in mature forest where natural regeneration of these species is often low. The stem distribution we obtained confirms that large trees of this species are more abundant than small ones. Prior to large-scale logging of *P. tessmannii*, further investigations are needed to clarify species ecology and the possibility to enhance its regeneration with appropriate silviculture.

Bibliography

AFNOR (1985a) NF B51-005: *Bois. Détermination de la masse volumique* (“Wood. Density determination”). Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR (1985b) NF B51-006: *Bois. Détermination du retrait* (“Wood. Shrinkage determination”). Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR (1987a) NF B51-016 : *Bois. Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défauts* (“Wood. Young modulus determination on defect-free samples”). Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR (1987b) NF B51-008 : *Bois. Essai de flexion statique* (“Wood. Static bending strength determination”). Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR (1985c) NF B51-007 : *Bois. Essai de compression axiale* (“Wood. Axial compression strength determination”). Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR (1985d) NF B 51-013 : *Bois. Détermination de la dureté de Monnin* (“Wood. Monnin hardness determination”). Association Française de Normalisation, Paris

Alroy J (2017) Effects of habitat disturbance on tropical forest biodiversity. *Proc Natl Acad Sci USA* 114:6056–6061.

ATIBT (2006) *La lettre de l'ATIBT n°24: Statistiques 2005* (“ATIBT letter n°24: 2005 statistics”). Association Technique Internationale de Bois Tropicaux, Paris

ATIBT (2007) *La lettre de l'ATIBT n°26: Statistiques 2006* (“ATIBT letter n°26: 2006 statistics”). Association Technique Internationale de Bois Tropicaux, Paris

ATIBT (2016) Nomenclature générale des bois tropicaux (“Tropical timber nomenclature”). ATIBT, Association Technique Internationale de Bois Tropicaux, Nogent-sur-Marne

BAD (2019) Développement intégré et durable de la filière bois dans le Bassin du Congo: Opportunités, défis et recommandations opérationnelles (“Tropical timber market sustainable development in the Congo Basin: Opportunities, challenges and operational recommendations”). Banque Africaine de Développement

<https://www.afdb.org/fr/documents/document/rapport-strategique-regional-developpement-integre-et-durable-de-la-filiere-bois-dans-le-bassin-du-congo-109428>

Bayol N, Demarquez B, De Wasseige C, Eba'a Atyi R, Fisher J.F, Nasi R, Pasquier A, Rossi X, Steil M, Vivien C (2012). In: De Wasseige Carlos (ed), De Marcken Paya (ed.), Bayol Nicolas (ed.), Hiol Hiol François (ed.), Mayaux Philippe (ed.), Desclée B. (ed.), Billand Alain (ed.), Nasi Robert (ed.). *The forests of the Congo Basin: State of the forest 2010*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, p. 43-62.

Bhat KM, Priya PB, Rugmini P (2001) Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Sci Technol* 34:517–532.

Biwolé AB (2015) *Origine et dynamique des populations d'arbres des forêts denses humides d'Afrique Centrale, le cas de Lophira alata Banks ex Gaertn C.F. (Ochnaceae)* (“Central Africa rainforest trees origin and population dynamic, the case of Lophira alata Bank ex Gaertn C.F. (Ochnaceae)”). PhD Thesis, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio tech, Belgium

Boampong E, Effah B, Antwi K, et al (2015) Factors influencing the choice of timber for furniture and joinery production in Ghana. *Eur J Eng Technol* 3:48–59.

Bossu J, Beauchêne J, Estevez Y, et al (2016) New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: The case of a fast-growing tropical species *Bagassa guianensis* aubl. *PLoS One* 11:150777.

Brémaud I, Amusant N, Minato K, et al (2011a) Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Sci Technol* 45:461–472.

Brémaud I, Gril J, Thibaut B (2011b) Anisotropy of wood vibrational properties: Dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Sci. Technol.* 45:735–754.

CEN (2004) CEN/TR 14734:2004: Durability of wood and wood-based products - Determination of treatability of timber species to be impregnated with wood preservatives - Laboratory method. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

CEN (2005) CEN 15083-1 : Durability of wood and wood-based products – Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods – Part1 : Basidiomycetes. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

Chaowana P (2013) Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites. *J Mater Sci Res 2*.

CIRAD (2015) *Les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales et tempérées. Tropix v 7.5.1* (“The main technological characteristics of 245 tropical and temperate forest species. Tropix v 7.5.1”). Software. Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement

CJBG (2018) *Base de données des plantes d’Afrique* (“African plants database”). Conservatoire et Jardin Botanique de la ville de Genève <http://www.villege.ch/musinfo/bd/cjb/africa/details.php?langue=fr&id=69634>. Accessed 13 May 2020

Dalois C (1990) *Manuel de sciage et d’affûtage* (“Sawing and sharpening guide”). Quae, Versailles

Dalois C (1993) *Le sciage sur quartier des bois tropicaux modèle de scierie* (“Quarter-sawing a model for tropical sawmill”). *Bois Forests des Trop* 237:61–67.

de Almeida TH, de Almeida DH, De Araujo VA, et al (2017) Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods. *BioResources* 12:6579–6590.

Deklerck V, De Mil T, Kondjo P, et al (2019) Sleeping beauties in materials science: Unlocking the value of xylarium specimens in the search for timbers of the future. *Holzforschung* 73:889–897.

Doucet JL, Daïnou K, Ligot G, et al (2016) Enrichment of Central African logged forests with high-value tree species: testing a new approach to regenerating degraded forests. *Int J Biodivers Sci Ecosyst Serv Manag* 12:83–95.

Doucet JL, Kouadio YL, Monticelli D, Lejeune P (2009) Enrichment of logging gaps with moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) in a Central African rain forest. *For Ecol Manage* 258:2407–2415.

Evans R, Stringer S, Kibblewhite RP (2000) Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita J* 53:450–457

FAO (2011) The State of Forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia. Food and Agriculture Organization <http://www.fao.org/3/i2247e/i2247e00.pdf>.

Fayolle A, Picard N, Doucet JL, et al (2014) A new insight in the structure, composition and functioning of central African moist forests. *For Ecol Manage* 329:195–205

Fays R (2008) *Des forêts... Des bois...* (“Some forest... Some wood...”). Fays R

FRM (2018) *Vision stratégique et industrialisation de la filière bois dans les 6 pays du Bassin du Congo, Horizon 2030* (“Strategic vision and industrialization of the timber sector in the 6 Congo Basin countries, Horizon 2030”). Forest Resources Management, Montpellier

Gartner BL, Milota MR, Hua L (1997) Variation in the anatomy and specific gravity of wood within and between trees of red alder (*Alnus rubra* Bong.). *Wood Fiber Sci* 29:10–20

Gérard J, Guibal D, Paradis S, Cerre J-C (2017) *Tropical Timber Atlas*. Quae, Versailles

Gerhards CC (1982) Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. *Wood Fiber Sci* 14:4–36

Harris JM (1989) *Spiral Grain and Wave phenomena in Wood Formation*, Springer-V. Berlin

Hernández RE (2007) Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Sci Technol* 41:249–265.

Hernández RE, Almeida G (2003) Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods. *Wood Fiber Sci* 35:154–166

Hillaby A (2000) The visual context of wood. *Gt. Vancouver Woodturners Guild News* 1. 1:1–6

IBN (1956) NBN 225 : Bois. Méthodes d'essai de qualification (“Wood. Qualification test method”). Institut Belge de Normalisation, Bruxelles

Iida Y, Poorter L, Sterck FJ, et al (2012) Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. *Funct Ecol* 26:274–282.

Ishiguri F, Eizawa J, Saito Y, et al (2007) Variation in the wood properties of *Paraserianthes falcataria* planted in Indonesia. *IAWA J* 28:339–348.

ISO (2012) *Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens (ISO Standard No. 3129)*. International Organization for Standardization

Karsenty A, Drigo IG, Piketty MG, Singer B (2008) Regulating industrial forest concessions in Central Africa and South America. *For Ecol Manage* 256:1498–1508.

Karsenty A, Gourlet-Fleury S (2006) Assessing Sustainability of Logging Practices in the Congo Basin's Managed Forests: the Issue of Commercial Species Recovery. *Ecol Soc* 11:13.

Keller R (2009) Des caractéristiques nouvelles pour l'étude des propriétés mécaniques des bois : les composantes de la densité ("New characteristics for the study of the mechanical properties of wood: density components"). *Ann des Sci For* 25:237–249.

King DA, Davies SJ, Tan S, Noor NSM (2006) The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees. *J Ecol* 94:670–680.

Kollmann FFP, Coté WAJ (1968) *Principles of Wood Science and Technology*, Springer-V. Berlin

Kord B, Kialashaki A, Kord B (2010) The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish J Agric For* 34:121–126.

Kretschmann DE, Green DW (1996) Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. *Wood fiber Sci* 28:320–337

Lamb D, Erskine PD, Parrotta JA (2005) Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* 310:1628–1632

Lê S, Josse J, Husson F (2008) FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw* 25:1–18.

Lemmens RHMJ, Roeland HMJ, Louppe D, Oteng-Amoako A, Corbière H (2012) Plant resources of tropical Africa. *Prota* 7(2): timbers 2. PROTA, Wageningen

Lever J, Krzywinski M, Altman N (2017) Points of Significance: Principal component analysis. *Nat. Methods* 14:641–642

Lichtenegger H, Reiterer A, Stanzl-Tschegg SE, Fratzl P (1999) Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization. *J Struct Biol.* 128(3):257-269

Mantanis GI, Young RA, Rowell RM (1994) Swelling of wood Part 1. Swelling in water. Springer-V, Belrin

Marsoem N, Kikata Y (1987) The effect of interlocked grain on the mechanical properties of white meranti. *Bull Nagoya Univ* 9:51–57

Martin P, Vernay M (2016) *Guide d'utilisation des bois africains éco-certifiés en Europe* ("Guide to the use of eco-certified African woods in Europe"). ATIBT, Paris

Martínez-Garza C, Bongers F, Poorter L (2013) Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures? *For Ecol Manage* 303:35–45

Mitchard ETA (2018) The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* 559:527–534

Morin-Rivat J, Fayolle A, Favier C, et al (2017) Present-day central African forest is a legacy of the 19th century human history. *Elife* 6

Nature + asbl (2015) *Plan d'aménagement : unité forestière d'aménagement N° 10-47, Région de l'Est* (“Management plan: forest management unit n°10-47, Est region”)

Normand D, Paquis J (1976) *Manuel d'identification des bois commerciaux* (“Guide for commercial timber identification”). Centre Technique Forestier Tropical (CTFT), Nogent-sur-Marne

Ocloo J, Laing E (2003) Correlation of relative density and strength properties with anatomical properties of the wood of Ghanaian *Celtis* species. *Discov Innov* 15:186–196

Peña-Claros M, Peters EM, Justiniano MJ, et al (2008) Regeneration of commercial tree species following silvicultural treatments in a moist tropical forest. *For Ecol Manage* 255:1283–1293
Plourde BT, Boukili VK, Chazdon RL (2015) Radial changes in wood specific gravity of tropical trees: Inter- and intraspecific variation during secondary succession. *Funct Ecol* 29:111–120.

Rungwattana K, Hietz P (2018) Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics. *Funct Ecol* 32:260–272.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA

Sallenave P (1955) *Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française* (“Physical and mechanical properties of French union tropical timber species”). Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) Nogent-sur-Marne

Schmelzer GH, Gurib-Fakim A (2008) Medicinal plants 1. PROTA, Wageningen

Schulgasser K, Witztum A (2015) How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. *Wood Sci Technol* 49:389–401.

Sholadoye IO, Abubakar I, Annafi QB, Ejeh SP (2016) Evaluation of Some Wood Properties of Nigeria Timber Using Four-Point Bending Test. *Adv Multidiscip Res J* 2:133–144

Slik JWF, Arroyo-Rodríguez V, Aiba SI, et al (2015) An estimate of the number of tropical tree species. *Proc Natl Acad Sci USA* 112:7472–7477.

Spear M, Walker JCF (2006) Dimensional instability in timber. In: J.C.F. Walker (ed) *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, Springer. Dordrecht, pp 95–120

Tsehaye A, Walker JCF (1995) Spiral grain in Canterbury Pinus radiata: within- and between-tree variations and effect on mechanical properties. *New Zeal J For Sci* 25:358–366

USDA (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI :United State Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory
Weddell E (1961) Influence of interlocked grain on the bending strength of timber, with particular reference to utile and greenheart. *J Inst Wood Sci* 7:56–72

Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York
Wickham H, Averick M, Bryan J, et al (2019) Welcome to the Tidyverse. *J Open Source Softw* 4:1686.

Wiemann M, Williamson G (1988) Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers. *Wood fiber Sci* 20:344–349

Wiemann M, Williamson G (1989) Radial gradients in the specific gravity of wood in some tropical and temperate trees. *For Sci* 35:197–210.

Annexe 9. Paramètres descriptifs des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle des 7 espèces étudiées. Prop= propriété étudiée ; p = paramètre descriptif ; ρ_{12} = masse volumique à 12% d'humidité ; Bd = Infradensité; PSF = Point de Saturation de la fibre; β_{vol} = Retrait volumique total; β_{linT} = Retrait tangentiel total ; β_{linR} = Retrait radial total; AN = Anisotropie; %V = Coefficient de rétractabilité; E = Module d'élasticité; σ_f = Contrainte de rupture en flexion statique; K = Contrainte de rupture en flexion dynamique; σ_c = Contrainte de rupture en flexion dynamique; d_T.v. = Durabilité naturelle vis-à-vis de *Trametes versicolor*; d_C.p. = Durabilité naturelle vis-à-vis de *Coniophora puteana*; d_S.h. = Durabilité naturelle vis-à-vis de *Stereum hirsutum*.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum manni</i>
ρ_{12} (kg/m ³)	μ	896	864	928	1006	814	997	-
	m	897	862	931	996	812	1011	-
	σ	29	45	23	46	67	43	-
	min	830	810	875	904	642	894	-
	max	941	932	980	1122	953	1079	-
	n	36	10	75	62	81	55	-
Bd (kg/m ³)	μ	739	708	767	821	672	839	-
	m	738	711	765	817	670	845	-
	σ	20	38	16	29	52	38	-
	min	700	658	735	763	544	760	-
	max	778	761	808	886	786	910	-
	n	36	10	71	60	81	56	-

Annexe 9. Suite.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum manni</i>
PSF (%)	μ	24,0	25,8	23,5	25,3	26,2	20,3	-
	m	24,0	25,7	23,4	25,3	26,2	20,3	-
	σ	0,9	0,8	1,3	0,9	1,3	0,3	-
	min	22,6	25,0	20,9	23,0	23,7	19,7	-
	max	25,6	26,8	26,0	27,0	29,0	20,9	-
	n	16	6	31	40	31	32	-
β vol (%)	μ	15,1	14,9	14,3	16,1	14,2	14,1	-
	m	15,2	14,8	14,6	16,3	14,1	14,2	-
	σ	0,9	0,7	1,4	1	2,1	0,8	-
	min	12,8	14,1	11,2	14,2	7,76	12,9	-
	max	16,7	16,3	17,2	18	19,7	16,3	-
	n	37	10	75	57	79	51	-
β linT (%)	μ	9,6	10,3	9,9	10,4	9,5	8,5	-
	m	9,5	10,4	9,9	10,2	9,6	8,4	-
	σ	0,5	0,4	0,6	0,7	1,2	0,6	-
	min	8,8	9,5	8,4	8,5	7,3	7,1	-
	max	10,7	11	11,4	11,9	12,5	9,8	-
	n	47	16	95	104	77	69	-

Annexe 9. Suite.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum mannii</i>
βlinR (%)	μ	5,0	5,6	4,7	6,1	4,4	4,6	-
	m	5,2	5,5	4,6	6,0	4,4	4,6	-
	σ	0,8	0,3	0,7	0,8	0,7	0,3	-
	min	3,8	5,1	2,9	4,7	3,0	3,9	-
	max	6,4	6,1	6,7	7,6	6,1	5,4	-
	n	47	16	99	104	78	69	-
AN	μ	1,95	1,85	2,06	1,69	2,19	1,83	-
	m	1,95	1,85	2,03	1,70	2,22	1,85	-
	σ	0,27	0,09	0,30	0,19	0,26	0,12	-
	min	1,56	1,71	1,32	1,29	1,54	1,56	-
	max	2,46	2,03	2,88	2,15	2,86	2,16	-
	n	47	16	97	101	76	68	-
%V (%/%)	μ	0,63	0,57	0,61	0,64	0,54	0,69	-
	m	0,63	0,57	0,62	0,64	0,54	0,70	-
	σ	0,04	0,03	0,06	0,04	0,08	0,04	-
	min	0,53	0,55	0,48	0,56	0,30	0,63	-
	max	0,69	0,63	0,73	0,71	0,75	0,80	-
	n	37	10	75	57	79	51	-

Annexe 9. Suite.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum mannii</i>
E (Mpa)	μ	24.835	21.400	22.896	22.155	16.781	24.147	10.225
	m	24.143	21.306	22.803	22.775	16.451	23.913	10.217
	σ	2.881	1.552	2.866	3.227	3.155	2.658	2.509
	min	19.211	18.921	15.104	13.942	10.974	17.007	4.618
	max	31.570	24.219	29.070	30.557	24.608	29.551	14.810
	n	34	10	75	55	81	56	59
σf (MPa)	μ	168	150	173	138	78	144	87
	m	171	145	174	137	78	144	93
	σ	20	14	23	28	22	26	22
	min	121	135	125	87	32	87	34
	max	198	176	213	205	130	193	128
	n	35	10	74	60	86	56	59
K (kg/cm ²)	μ	1,32	1,26	1,27	0,71	0,19	0,57	0,30
	m	1,27	1,28	1,30	0,66	0,17	0,61	0,35
	σ	0,38	0,24	0,39	0,27	0,09	0,21	0,11
	min	0,42	0,84	0,39	0,25	0,05	0,14	0,07
	max	2,09	1,63	2,15	1,42	0,49	1,00	0,47
	n	37	10	62	56	60	55	29

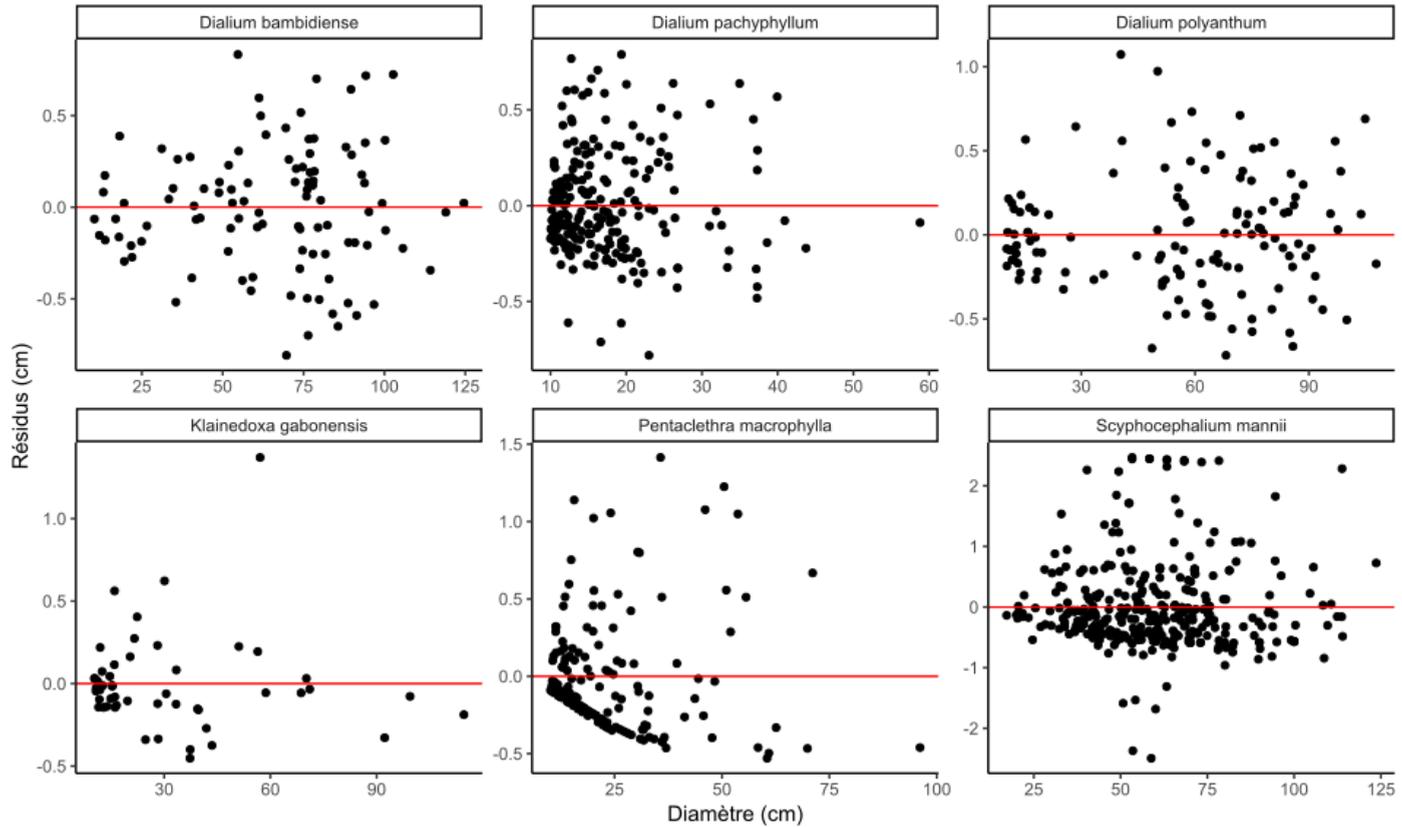
Annexe 9. Suite.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum mannii</i>
σ _c (MPa)	μ	81	81	83	83	57	90	-
	m	80	80	83	85	58	92	-
	σ	5	5	5	9	7	7	-
	min	70	74	71	63	45	70	-
	max	92	87	93	103	72	103	-
	n	37	10	73	61	84	50	-
d _{T.v.} (%)	μ	10,4	6,5	4,8	6,1	8,2	0,5	-
	m	10,8	4,8	4,2	4,4	6,3	0,3	-
	σ	6,6	3,4	3,1	4,1	4,6	0,7	-
	min	0,6	2,7	0,8	0,8	0,6	0	-
	max	26,0	13,9	14,6	15,9	17,9	2,9	-
	n	90	19	120	120	64	55	-
d _{C.P.} (%)	μ	2,1	0	0,1	0,6	1,35	0	-
	m	0	0	0	0,5	0,7	0	-
	σ	3,3	0	0,1	0,4	1,4	0	-
	min	0	0	0	0	0,1	0	-
	max	12,3	0	0,7	1,8	5,3	0	-
	n	81	16	108	100	56	62	-

Annexe 9. Suite.

prop	p	<i>Dialium bambidiense</i>	<i>Dialium lopense</i>	<i>Dialium polyanthum</i>	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	<i>Pachyelasma tessmannii</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	<i>Scyphocephalum manni</i>
	μ	2,0	1,0	1,3	2,9	-	-	-
	m	1,4	0,9	1,3	3,2	-	-	-
d_S.h.	σ	1,6	0,5	0,8	2,3	-	-	-
(%)	min	0	0,2	0	0	-	-	-
	max	6,0	2,2	3,4	8,9	-	-	-
	n	89	17	135	125	-	-	-

Annexe 10. Résidus des modèles de croissance sélectionnés pour les 6 espèces étudiées



Annexe 11. Volumes produits et évolution de la proportion de la qualité des arbres en fonction de différents paramètres sylvicoles. α est le coefficient d'exploitation (%), DMA est le Diamètre Minimum d'Aménagement sélectionné (cm), R_1 est le taux de reconstitution de la première rotation (%), V_1 est le volume prélevé lors de la première exploitation (m^3/ha), R_4 est le taux de reconstitution sur 4 rotations (%), V_a , V_b et V_c sont les volumes moyens collectés ($m^3/ha.rotation$), A, B, C et D sont les proportions de la qualité dans l'ensemble de la population au bout des 4 rotations forestières (%).

Annexe 10.1. *Klainedoxa gabonensis*

α	DMA	R_1	V_1	R_4	V_a	V_b	V_c	A	B	C	D
0	70	123	0	148	0	0	0	59	28	6	7
0	80	135	0	191	0	0	0	59	28	6	7
0	90	144	0	248	0	0	0	59	28	6	7
0	100	155	0	331	0	0	0	59	28	6	7
0	110	139	0	351	0	0	0	59	28	6	7
0	120	166	0	489	0	0	0	59	28	6	7
5	70	119	0,06	134	0,08	0	0	57	29	7	8
5	80	131	0,04	174	0,06	0	0	57	29	7	7
5	90	141	0,03	230	0,05	0	0	58	28	6	7
5	100	151	0,02	310	0,03	0	0	58	28	6	7
5	110	135	0,01	331	0,02	0	0	58	28	6	7
5	120	162	0	466	0,01	0	0	58	28	6	7
10	70	115	0,12	121	0,14	0	0	55	30	7	8
10	80	127	0,08	160	0,12	0	0	56	29	7	8
10	90	137	0,06	213	0,09	0	0	57	29	7	8
10	100	147	0,03	290	0,06	0	0	58	28	7	7
10	110	131	0,02	312	0,04	0	0	58	28	6	7
10	120	158	0,01	444	0,02	0	0	58	28	6	7
15	70	111	0,18	110	0,2	0	0	54	31	7	8
15	80	123	0,13	146	0,16	0	0	55	30	7	8
15	90	133	0,08	197	0,12	0	0	57	29	7	8
15	100	143	0,05	272	0,08	0	0	58	28	7	7
15	110	128	0,03	295	0,05	0	0	58	28	6	7
15	120	155	0,01	423	0,03	0	0	58	28	6	7
20	70	107	0,23	100	0,25	0	0	52	32	7	8
20	80	119	0,17	134	0,21	0	0	54	31	7	8
20	90	129	0,11	183	0,16	0	0	56	29	7	8
20	100	139	0,07	255	0,11	0	0	57	29	7	8

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
20	110	124	0,04	279	0,07	0	0	58	28	6	7
20	120	151	0,02	404	0,04	0	0	58	28	6	7
25	70	103	0,29	91	0,29	0	0	50	33	8	9
25	80	115	0,21	124	0,24	0	0	53	31	7	8
25	90	125	0,14	170	0,18	0	0	55	30	7	8
25	100	135	0,08	239	0,13	0	0	57	29	7	8
25	110	120	0,05	264	0,08	0	0	58	28	7	7
25	120	147	0,02	386	0,04	0	0	58	28	6	7
30	70	99	0,35	82	0,32	0	0	49	34	8	9
30	80	111	0,25	114	0,27	0	0	52	32	7	8
30	90	121	0,17	158	0,21	0	0	55	30	7	8
30	100	131	0,1	225	0,15	0	0	57	29	7	8
30	110	116	0,06	251	0,09	0	0	58	28	7	7
30	120	144	0,03	369	0,05	0	0	58	28	6	7
35	70	95	0,41	75	0,33	0,02	0	47	35	8	9
35	80	107	0,3	105	0,29	0,01	0	51	33	7	9
35	90	117	0,2	148	0,23	0	0	54	31	7	8
35	100	128	0,12	212	0,16	0	0	56	29	7	8
35	110	112	0,07	238	0,1	0	0	57	29	7	7
35	120	140	0,03	352	0,06	0	0	58	28	6	7
40	70	91	0,47	69	0,33	0,05	0	47	35	8	10
40	80	103	0,34	97	0,29	0,03	0	51	32	8	9
40	90	113	0,23	138	0,24	0,02	0	54	31	7	8
40	100	124	0,13	200	0,17	0,01	0	56	29	7	8
40	110	108	0,08	226	0,11	0	0	57	29	7	8
40	120	136	0,04	337	0,06	0	0	58	28	6	7
45	70	87	0,53	63	0,33	0,08	0	48	33	9	10
45	80	99	0,38	90	0,29	0,06	0	52	32	8	9
45	90	109	0,25	129	0,24	0,04	0	54	30	7	8
45	100	120	0,15	189	0,17	0,02	0	56	29	7	8
45	110	104	0,1	216	0,11	0,01	0	57	29	7	8
45	120	133	0,04	324	0,06	0	0	58	28	6	7
50	70	83	0,58	58	0,33	0,11	0	49	32	9	10
50	80	96	0,42	84	0,3	0,08	0	52	31	8	9
50	90	105	0,28	122	0,24	0,05	0	55	30	7	8
50	100	116	0,17	179	0,17	0,03	0	56	29	7	8

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
50	110	101	0,11	206	0,11	0,02	0	57	28	7	8
50	120	129	0,05	311	0,06	0,01	0	58	28	6	7
55	70	79	0,64	54	0,33	0,13	0	50	30	9	10
55	80	92	0,47	79	0,3	0,1	0	53	30	8	9
55	90	101	0,31	115	0,24	0,07	0	55	29	7	8
55	100	112	0,19	170	0,18	0,05	0	57	29	7	8
55	110	97	0,12	197	0,11	0,03	0	58	28	7	8
55	120	125	0,05	300	0,06	0,01	0	58	28	6	7
60	70	75	0,7	50	0,33	0,14	0	51	29	9	11
60	80	88	0,51	74	0,3	0,12	0	54	29	8	9
60	90	97	0,34	108	0,24	0,09	0	56	29	7	8
60	100	108	0,2	162	0,18	0,06	0	57	28	7	8
60	110	93	0,13	189	0,11	0,03	0	58	28	7	8
60	120	121	0,05	289	0,06	0,02	0	58	28	7	7
65	70	71	0,76	47	0,33	0,15	0,004	52	27	10	11
65	80	84	0,55	69	0,3	0,13	0	54	28	8	9
65	90	93	0,37	102	0,24	0,1	0	56	28	7	8
65	100	104	0,22	154	0,18	0,07	0	57	28	7	8
65	110	89	0,14	181	0,11	0,04	0	58	28	7	8
65	120	118	0,06	278	0,06	0,02	0	58	28	7	7
70	70	67	0,82	44	0,33	0,16	0,017	53	27	9	11
70	80	80	0,59	65	0,3	0,14	0,008	55	27	8	10
70	90	90	0,4	97	0,24	0,11	0,001	56	28	7	9
70	100	100	0,24	147	0,18	0,08	0	57	28	7	8
70	110	85	0,15	174	0,11	0,05	0	58	28	7	8
70	120	114	0,06	269	0,06	0,03	0	58	28	7	7
75	70	63	0,88	41	0,33	0,16	0,03	54	26	8	11
75	80	76	0,64	62	0,3	0,14	0,02	56	27	8	10
75	90	86	0,42	92	0,24	0,11	0,011	57	27	7	9
75	100	96	0,25	140	0,18	0,08	0,004	58	27	7	8
75	110	81	0,16	167	0,11	0,05	0,001	58	28	7	8
75	120	110	0,07	259	0,06	0,03	0	58	28	7	7
80	70	59	0,94	40	0,33	0,16	0,035	55	27	7	11
80	80	72	0,68	59	0,3	0,14	0,03	56	27	7	10
80	90	82	0,45	88	0,24	0,11	0,021	57	27	7	9
80	100	93	0,27	134	0,18	0,08	0,012	58	28	7	8

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
80	110	78	0,17	161	0,11	0,05	0,007	58	28	7	8
80	120	107	0,07	251	0,06	0,03	0,003	58	28	6	7
85	70	55	0,99	40	0,33	0,16	0,036	56	26	6	12
85	80	68	0,72	59	0,3	0,14	0,031	57	27	6	10
85	90	78	0,48	86	0,24	0,11	0,025	58	27	6	9
85	100	89	0,29	130	0,18	0,08	0,018	58	28	6	8
85	110	74	0,18	155	0,11	0,05	0,012	58	28	6	8
85	120	103	0,08	243	0,06	0,03	0,006	58	28	6	7
90	70	51	1,05	40	0,33	0,16	0,036	56	26	6	12
90	80	64	0,76	59	0,3	0,14	0,032	57	27	6	10
90	90	74	0,51	86	0,24	0,11	0,026	58	27	6	9
90	100	85	0,3	130	0,18	0,08	0,019	58	28	6	8
90	110	70	0,19	155	0,11	0,05	0,012	58	28	6	8
90	120	99	0,08	241	0,06	0,03	0,007	58	28	6	7
95	70	49	1,08	39	0,33	0,16	0,037	56	27	6	12
95	80	62	0,79	59	0,3	0,14	0,032	57	27	6	10
95	90	72	0,52	86	0,24	0,11	0,026	58	27	6	9
95	100	83	0,31	130	0,18	0,08	0,019	58	28	6	8
95	110	68	0,2	155	0,11	0,05	0,012	58	28	6	8
95	120	97	0,08	241	0,06	0,03	0,007	58	28	6	7
100	70	49	1,08	39	0,33	0,16	0,037	56	27	6	12
100	80	62	0,79	59	0,3	0,14	0,032	57	27	6	10
100	90	72	0,52	86	0,24	0,11	0,026	58	27	6	9
100	100	83	0,31	130	0,18	0,08	0,019	58	28	6	8
100	110	68	0,2	155	0,11	0,05	0,012	58	28	6	8
100	120	97	0,08	241	0,06	0,03	0,007	58	28	6	7

Annexe 9.6. *Scyphocephalum mannii*

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
5	60	129	2,11	121	3,49	0	0	9	38	24	30
5	70	169	1,45	197	3,09	0	0	11	37	23	29
5	80	241	0,83	397	2,68	0	0	13	36	22	28
5	90	335	0,42	858	2,18	0	0	15	36	22	27
5	100	434	0,2	1839	1,65	0	0	16	35	22	27
5	110	459	0,1	3300	1,15	0	0	17	35	21	27
5	120	412	0,06	4892	0,72	0	0	17	35	21	27
10	60	124	4,21	103	3,36	3,01	0	3	38	26	33
10	70	164	2,89	172	3,52	2,07	0	6	38	25	31
10	80	236	1,66	356	3,7	1,13	0	9	38	24	30
10	90	330	0,85	789	3,64	0,35	0	12	37	23	28
10	100	429	0,41	1726	3,09	0	0	15	36	22	28
10	110	455	0,21	3155	2,21	0	0	16	35	22	27
10	120	409	0,11	4750	1,41	0	0	17	35	21	27
15	60	119	6,32	87	3,14	5,8	0	3	31	29	37
15	70	159	4,34	150	3,34	4,63	0	6	34	27	34
15	80	232	2,49	320	3,56	3,43	0	9	35	25	31
15	90	326	1,27	727	3,52	2,27	0	12	36	23	29
15	100	425	0,61	1623	3,18	1,3	0	14	36	22	28
15	110	452	0,31	3016	2,6	0,6	0	16	35	22	27
15	120	406	0,17	4608	1,88	0,18	0	17	35	21	27
20	60	114	8,42	74	3,05	7,88	0	4	23	33	41
20	70	155	5,78	130	3,29	6,65	0	6	28	29	36
20	80	227	3,32	288	3,53	5,36	0	9	32	26	33
20	90	321	1,69	671	3,51	3,98	0	12	34	24	30
20	100	421	0,81	1531	3,18	2,68	0	14	35	23	28
20	110	448	0,42	2894	2,6	1,61	0	16	35	22	27
20	120	403	0,22	4484	1,88	0,83	0	17	35	21	27
25	60	110	10,53	62	3,05	7,54	2,002	4	14	36	46
25	70	150	7,23	113	3,29	7,72	0,482	7	22	31	39
25	80	222	4,15	258	3,53	6,95	0	10	28	27	34
25	90	317	2,12	619	3,51	5,48	0	12	32	25	31
25	100	416	1,02	1443	3,18	3,94	0	14	34	23	29
25	110	444	0,52	2775	2,6	2,56	0	16	34	22	28
25	120	400	0,28	4361	1,88	1,47	0	17	34	22	27

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
30	60	105	12,63	52	3,05	6,98	3,982	5	11	34	51
30	70	145	8,67	98	3,29	7,19	2,432	7	16	34	43
30	80	217	4,98	231	3,53	7,55	0,747	10	25	29	36
30	90	312	2,54	569	3,51	6,76	0	13	30	25	32
30	100	412	1,22	1357	3,18	5,08	0	15	32	23	29
30	110	440	0,62	2658	2,6	3,45	0	16	34	22	28
30	120	397	0,34	4239	1,88	2,08	0	17	34	22	27
35	60	100	14,74	43	3,05	6,55	5,525	5	11	26	57
35	70	140	10,12	85	3,29	6,89	3,976	8	16	29	46
35	80	213	5,81	207	3,53	7,22	2,328	11	21	30	38
35	90	307	2,96	523	3,51	7,11	0,811	13	28	26	33
35	100	407	1,42	1273	3,18	6,09	0	15	31	24	30
35	110	436	0,73	2542	2,6	4,28	0	16	33	22	28
35	120	394	0,39	4118	1,88	2,66	0	17	34	22	27
40	60	95	16,85	42	3,05	6,34	5,211	6	12	18	64
40	70	136	11,57	73	3,29	6,64	5,211	9	17	24	50
40	80	208	6,64	186	3,53	7,06	3,645	11	22	27	40
40	90	303	3,39	482	3,51	6,95	2,074	13	26	26	34
40	100	403	1,62	1196	3,18	6,26	0,795	15	30	24	30
40	110	432	0,83	2427	2,6	5,04	0	16	33	23	28
40	120	391	0,45	3998	1,88	3,22	0	17	34	22	27
45	60	91	18,95	42	3,05	6,18	4,81	7	13	10	70
45	70	131	13,01	73	3,29	6,54	4,949	9	19	18	54
45	80	203	7,47	167	3,53	6,95	4,722	12	23	23	42
45	90	298	3,81	445	3,51	6,87	3,19	14	27	24	35
45	100	399	1,83	1128	3,18	6,22	1,776	15	30	24	31
45	110	428	0,93	2325	2,6	5,06	0,723	17	32	23	29
45	120	388	0,5	3880	1,88	3,64	0,118	17	34	22	27
50	60	86	21,06	42	3,05	6,02	4,584	7	13	9	71
50	70	126	14,46	73	3,29	6,45	4,651	10	20	13	57
50	80	199	8,3	162	3,53	6,9	4,818	12	24	20	44
50	90	293	4,23	410	3,51	6,85	4,134	14	28	22	36
50	100	394	2,03	1064	3,18	6,2	2,684	16	30	23	31
50	110	424	1,04	2233	2,6	5,07	1,467	17	32	22	29
50	120	385	0,56	3776	1,88	3,67	0,621	17	34	22	27
55	60	81	23,16	42	3,05	5,95	4,282	7	13	9	71

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
55	70	121	15,9	73	3,29	6,41	4,442	10	20	13	57
55	80	194	9,13	162	3,53	6,89	4,588	13	25	16	46
55	90	289	4,66	395	3,51	6,84	4,46	15	28	20	37
55	100	390	2,23	1003	3,18	6,2	3,498	16	31	22	32
55	110	420	1,14	2143	2,6	5,07	2,174	17	33	22	29
55	120	381	0,62	3675	1,88	3,67	1,143	17	34	22	28
60	60	76	25,27	42	3,05	5,95	4,089	7	13	9	72
60	70	117	17,35	73	3,29	6,41	4,198	10	20	12	58
60	80	189	9,96	162	3,53	6,89	4,437	13	25	16	46
60	90	284	5,08	395	3,51	6,84	4,331	15	29	18	38
60	100	385	2,44	972	3,18	6,2	3,872	16	31	20	32
60	110	417	1,25	2053	2,6	5,07	2,825	17	33	21	29
60	120	378	0,67	3574	1,88	3,67	1,645	17	34	21	28
65	60	72	27,37	42	3,05	5,95	3,927	7	13	8	72
65	70	112	18,79	73	3,29	6,41	4,095	10	20	12	58
65	80	184	10,79	162	3,53	6,89	4,303	13	25	16	46
65	90	280	5,51	395	3,51	6,84	4,257	15	29	18	38
65	100	381	2,64	972	3,18	6,2	3,831	16	32	20	32
65	110	413	1,35	2015	2,6	5,07	3,102	17	33	21	29
65	120	375	0,73	3473	1,88	3,67	2,119	17	34	21	28
70	60	67	29,48	42	3,05	5,95	3,765	7	13	8	72
70	70	107	20,24	72	3,29	6,41	4,001	10	20	12	58
70	80	180	11,62	162	3,53	6,89	4,26	13	25	16	46
70	90	275	5,93	395	3,51	6,84	4,216	15	29	18	38
70	100	377	2,84	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
70	110	409	1,45	2014	2,6	5,07	3,112	17	33	20	29
70	120	372	0,78	3452	1,88	3,67	2,252	17	34	21	28
75	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
75	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58
75	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
75	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
75	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
75	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
75	120	370	0,82	3452	1,88	3,67	2,256	17	34	21	28
80	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
80	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
80	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
80	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
80	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
80	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
80	120	370	0,82	3452	1,88	3,67	2,256	17	34	21	28
85	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
85	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58
85	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
85	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
85	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
85	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
85	120	370	0,82	3452	1,88	3,67	2,256	17	34	21	28
90	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
90	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58
90	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
90	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
90	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
90	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
90	120	370	0,82	3452	1,88	3,67	2,256	17	34	21	28
95	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
95	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58
95	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
95	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
95	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
95	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
95	120	370	0,82	3452	1,88	3,67	2,256	17	34	21	28
100	60	64	30,91	42	3,05	5,95	3,655	7	13	8	72
100	70	104	21,22	72	3,29	6,41	3,937	10	20	12	58
100	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46
100	90	272	6,22	395	3,51	6,84	4,206	15	29	18	38
100	100	374	2,98	971	3,18	6,2	3,812	16	32	19	33
100	110	406	1,52	2014	2,6	5,07	3,114	17	33	20	29
80	80	176	12,18	161	3,53	6,89	4,231	13	25	16	46

Annexe 9.4. *Pentaclethra macrophylla*

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
0	50	111	0	101	0	0	0	1	20	57	22
0	60	116	0	108	0	0	0	1	20	57	22
0	70	125	0	121	0	0	0	1	20	57	22
0	80	145	0	155	0	0	0	1	20	57	22
0	90	173	0	212	0	0	0	1	20	57	22
0	100	187	0	275	0	0	0	1	20	57	22
0	110	238	0	434	0	0	0	1	20	57	22
0	120	348	0	830	0	0	0	1	20	57	22
5	50	107	0,56	88	0,04	0,66	0	0	13	62	24
5	60	112	0,52	96	0,04	0,63	0	0	15	61	24
5	70	121	0,45	109	0,04	0,58	0	0	16	61	23
5	80	141	0,37	141	0,04	0,53	0	1	17	60	23
5	90	169	0,27	196	0,04	0,46	0	1	18	59	23
5	100	183	0,2	258	0,04	0,39	0	1	18	58	22
5	110	234	0,11	413	0,04	0,3	0	1	19	58	22
5	120	345	0,05	801	0,03	0,21	0	1	20	57	22
10	50	103	1,13	77	0,04	0,87	0,304	0	6	68	26
10	60	108	1,04	84	0,04	0,89	0,223	0	8	66	26
10	70	116	0,91	97	0,04	0,89	0,148	0	10	64	25
10	80	137	0,73	127	0,04	0,9	0,069	1	13	63	24
10	90	165	0,54	180	0,04	0,88	0	1	15	61	24
10	100	179	0,39	240	0,04	0,76	0	1	17	60	23
10	110	230	0,23	392	0,04	0,61	0	1	18	59	23
10	120	342	0,1	773	0,03	0,43	0	1	19	58	22
15	50	99	1,69	67	0,04	0,81	0,902	0	5	65	29
15	60	104	1,55	74	0,04	0,84	0,785	0	8	64	28
15	70	112	1,36	87	0,04	0,86	0,664	0	10	63	26
15	80	133	1,1	116	0,04	0,89	0,529	1	12	62	25
15	90	161	0,81	166	0,04	0,89	0,383	1	14	61	24
15	100	175	0,59	224	0,04	0,85	0,248	1	16	60	24
15	110	227	0,34	371	0,04	0,77	0,114	1	17	59	23
15	120	339	0,15	743	0,03	0,63	0,019	1	19	58	22
20	50	95	2,26	58	0,04	0,78	1,407	0	6	62	32
20	60	99	2,07	66	0,04	0,82	1,272	0	8	62	30
20	70	108	1,82	78	0,04	0,84	1,126	1	10	61	28

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
20	80	129	1,46	106	0,04	0,88	0,964	1	12	61	26
20	90	157	1,08	154	0,04	0,89	0,779	1	14	60	25
20	100	171	0,78	211	0,04	0,85	0,592	1	16	59	24
20	110	223	0,45	354	0,04	0,78	0,389	1	17	59	23
20	120	336	0,2	718	0,03	0,65	0,205	1	18	58	23
25	50	90	2,82	50	0,04	0,77	1,803	0	6	59	35
25	60	95	2,59	58	0,04	0,81	1,669	0	8	59	32
25	70	104	2,27	71	0,04	0,84	1,516	1	11	59	30
25	80	124	1,83	97	0,04	0,88	1,346	1	13	59	28
25	90	153	1,35	143	0,04	0,88	1,139	1	14	59	26
25	100	168	0,98	199	0,04	0,85	0,916	1	16	59	24
25	110	219	0,57	338	0,04	0,78	0,66	1	17	58	23
25	120	333	0,25	694	0,03	0,65	0,41	1	19	58	23
30	50	86	3,38	44	0,04	0,77	2,111	0	7	55	38
30	60	91	3,11	52	0,04	0,81	1,989	0	9	56	34
30	70	100	2,73	64	0,04	0,84	1,842	1	11	57	31
30	80	120	2,2	89	0,04	0,88	1,676	1	13	58	29
30	90	149	1,62	133	0,04	0,88	1,461	1	15	58	27
30	100	164	1,18	187	0,04	0,85	1,211	1	16	58	25
30	110	216	0,68	323	0,04	0,78	0,913	1	18	58	24
30	120	330	0,3	672	0,03	0,65	0,607	1	19	58	23
35	50	82	3,95	38	0,04	0,77	2,341	0	7	50	42
35	60	87	3,63	46	0,04	0,81	2,239	0	10	53	37
35	70	96	3,18	57	0,04	0,84	2,107	1	12	54	33
35	80	116	2,56	82	0,04	0,88	1,957	1	14	56	30
35	90	145	1,89	124	0,04	0,88	1,744	1	15	57	27
35	100	160	1,37	177	0,04	0,85	1,478	1	17	57	25
35	110	212	0,79	308	0,04	0,78	1,149	1	18	57	24
35	120	326	0,36	650	0,03	0,65	0,794	1	19	57	23
40	50	78	4,51	32	0,04	0,77	2,495	0	8	46	46
40	60	83	4,14	40	0,04	0,81	2,423	1	10	49	40
40	70	92	3,64	51	0,04	0,84	2,316	1	13	52	35
40	80	112	2,93	75	0,04	0,88	2,19	1	14	54	31
40	90	141	2,16	115	0,04	0,88	1,99	1	16	56	28
40	100	156	1,57	166	0,04	0,85	1,718	1	17	56	26
40	110	208	0,91	294	0,04	0,78	1,368	1	18	57	24

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
40	120	323	0,41	628	0,03	0,65	0,973	1	19	57	23
45	50	74	5,08	29	0,04	0,77	2,52	0	9	40	51
45	60	79	4,66	35	0,04	0,81	2,541	1	11	46	43
45	70	88	4,09	46	0,04	0,84	2,47	1	13	49	37
45	80	108	3,3	68	0,04	0,88	2,378	1	15	52	32
45	90	137	2,43	107	0,04	0,88	2,2	1	16	54	29
45	100	152	1,77	156	0,04	0,85	1,932	1	17	56	26
45	110	205	1,02	281	0,04	0,78	1,569	1	18	56	24
45	120	320	0,46	608	0,03	0,65	1,143	1	19	57	23
50	50	69	5,64	29	0,04	0,77	2,444	0	10	34	56
50	60	74	5,18	34	0,04	0,81	2,508	1	12	42	46
50	70	83	4,55	43	0,04	0,84	2,537	1	14	47	39
50	80	104	3,66	62	0,04	0,88	2,523	1	15	51	33
50	90	133	2,7	99	0,04	0,88	2,376	1	16	53	30
50	100	148	1,96	147	0,04	0,85	2,121	1	18	55	27
50	110	201	1,13	268	0,04	0,78	1,755	1	18	56	25
50	120	317	0,51	587	0,03	0,65	1,304	1	19	57	23
55	50	65	6,2	28	0,04	0,77	2,382	0	10	33	57
55	60	70	5,7	34	0,04	0,81	2,457	1	12	39	47
55	70	79	5	42	0,04	0,84	2,501	1	15	44	40
55	80	100	4,03	60	0,04	0,88	2,558	1	16	49	35
55	90	129	2,97	92	0,04	0,88	2,518	1	17	52	30
55	100	144	2,16	138	0,04	0,85	2,284	1	18	54	27
55	110	197	1,25	255	0,04	0,78	1,924	1	19	56	25
55	120	314	0,56	568	0,03	0,65	1,457	1	19	56	23
60	50	61	6,77	28	0,04	0,77	2,322	1	10	31	58
60	60	66	6,22	34	0,04	0,81	2,411	1	13	39	48
60	70	75	5,45	42	0,04	0,84	2,471	1	15	44	41
60	80	96	4,39	60	0,04	0,88	2,54	1	16	48	35
60	90	125	3,24	91	0,04	0,88	2,534	1	17	51	31
60	100	140	2,35	131	0,04	0,85	2,412	1	18	53	28
60	110	194	1,36	243	0,04	0,78	2,078	1	19	55	25
60	120	311	0,61	548	0,03	0,65	1,601	1	19	56	24
65	50	57	7,33	28	0,04	0,77	2,286	1	10	31	59
65	60	62	6,74	33	0,04	0,81	2,38	1	13	38	49
65	70	71	5,91	42	0,04	0,84	2,445	1	15	43	41

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
65	80	92	4,76	59	0,04	0,88	2,522	1	16	47	36
65	90	121	3,51	90	0,04	0,88	2,53	1	17	50	31
65	100	136	2,55	130	0,04	0,85	2,426	1	18	53	28
65	110	190	1,47	234	0,04	0,78	2,191	1	19	55	25
65	120	308	0,66	529	0,03	0,65	1,738	1	19	56	24
70	50	53	7,9	28	0,04	0,77	2,249	1	10	30	59
70	60	58	7,25	33	0,04	0,81	2,352	1	13	38	49
70	70	67	6,36	42	0,04	0,84	2,427	1	15	43	41
70	80	88	5,13	59	0,04	0,88	2,512	1	16	47	36
70	90	117	3,78	90	0,04	0,88	2,526	1	18	50	31
70	100	132	2,75	130	0,04	0,85	2,43	1	18	53	28
70	110	186	1,59	234	0,04	0,78	2,214	1	19	54	26
70	120	305	0,71	518	0,03	0,65	1,834	1	19	56	24
75	50	48	8,46	28	0,04	0,77	2,213	1	10	30	60
75	60	54	7,77	33	0,04	0,81	2,324	1	13	37	49
75	70	63	6,82	42	0,04	0,84	2,408	1	15	43	42
75	80	84	5,49	59	0,04	0,88	2,503	1	16	47	36
75	90	113	4,05	90	0,04	0,88	2,523	1	18	50	31
75	100	128	2,94	130	0,04	0,85	2,431	1	18	53	28
75	110	183	1,7	234	0,04	0,78	2,221	1	19	54	26
75	120	302	0,76	518	0,03	0,65	1,856	1	20	56	24
80	50	46	8,8	28	0,04	0,77	2,191	1	10	29	60
80	60	51	8,08	33	0,04	0,81	2,307	1	13	37	49
80	70	60	7,09	41	0,04	0,84	2,397	1	15	43	42
80	80	81	5,71	59	0,04	0,88	2,497	1	16	47	36
80	90	110	4,21	90	0,04	0,88	2,521	1	18	50	31
80	100	126	3,06	130	0,04	0,85	2,432	1	18	52	28
80	110	181	1,77	234	0,04	0,78	2,223	1	19	54	26
80	120	300	0,79	518	0,03	0,65	1,859	1	20	56	24
85	50	46	8,8	28	0,04	0,77	2,191	1	10	29	60
85	60	51	8,08	33	0,04	0,81	2,307	1	13	37	49
85	70	60	7,09	41	0,04	0,84	2,397	1	15	43	42
85	80	81	5,71	59	0,04	0,88	2,497	1	16	47	36
85	90	110	4,21	90	0,04	0,88	2,521	1	18	50	31
85	100	126	3,06	130	0,04	0,85	2,432	1	18	52	28
85	110	181	1,77	234	0,04	0,78	2,223	1	19	54	26

α	DMA	R ₁	V ₁	R ₄	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
85	120	300	0,79	518	0,03	0,65	1,859	1	20	56	24
90	50	46	8,8	28	0,04	0,77	2,191	1	10	29	60
90	60	51	8,08	33	0,04	0,81	2,307	1	13	37	49
90	70	60	7,09	41	0,04	0,84	2,397	1	15	43	42
90	80	81	5,71	59	0,04	0,88	2,497	1	16	47	36
90	90	110	4,21	90	0,04	0,88	2,521	1	18	50	31
90	100	126	3,06	130	0,04	0,85	2,432	1	18	52	28
90	110	181	1,77	234	0,04	0,78	2,223	1	19	54	26
90	120	300	0,79	518	0,03	0,65	1,859	1	20	56	24
95	50	46	8,8	28	0,04	0,77	2,191	1	10	29	60
95	60	51	8,08	33	0,04	0,81	2,307	1	13	37	49
95	70	60	7,09	41	0,04	0,84	2,397	1	15	43	42
95	80	81	5,71	59	0,04	0,88	2,497	1	16	47	36
95	90	110	4,21	90	0,04	0,88	2,521	1	18	50	31
95	100	126	3,06	130	0,04	0,85	2,432	1	18	52	28
95	110	181	1,77	234	0,04	0,78	2,223	1	19	54	26
95	120	300	0,79	518	0,03	0,65	1,859	1	20	56	24
100	50	46	8,8	28	0,04	0,77	2,191	1	10	29	60
100	60	51	8,08	33	0,04	0,81	2,307	1	13	37	49
100	70	60	7,09	41	0,04	0,84	2,397	1	15	43	42
100	80	81	5,71	59	0,04	0,88	2,497	1	16	47	36
100	90	110	4,21	90	0,04	0,88	2,521	1	18	50	31
100	100	126	3,06	130	0,04	0,85	2,432	1	18	52	28
100	110	181	1,77	234	0,04	0,78	2,223	1	19	54	26
100	120	300	0,79	518	0,03	0,65	1,859	1	20	56	24

Annexe 9.5. *Pachyelasma tessmannii*

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
0	50	67	0	86	0	0	0	21	23	49	7
0	60	66	0	76	0	0	0	21	23	49	7
0	70	62	0	67	0	0	0	21	23	49	7
0	80	66	0	65	0	0	0	21	23	49	7
0	90	66	0	65	0	0	0	21	23	49	7
0	100	67	0	65	0	0	0	21	23	49	7
0	110	67	0	65	0	0	0	21	23	49	7
0	120	70	0	67	0	0	0	21	23	49	7
0	130	68	0	67	0	0	0	21	23	49	7
0	140	68	0	67	0	0	0	21	23	49	7
5	50	64	0,09	83	0,051	0	0	10	26	56	8
5	60	64	0,09	73	0,05	0	0	11	26	55	8
5	70	59	0,09	65	0,05	0	0	12	26	55	8
5	80	63	0,09	63	0,048	0	0	13	25	54	8
5	90	63	0,08	62	0,047	0	0	14	25	53	8
5	100	64	0,08	63	0,044	0	0	15	25	53	8
5	110	64	0,07	63	0,041	0	0	16	24	52	7
5	120	67	0,06	65	0,034	0	0	18	24	51	7
5	130	66	0,04	66	0,027	0	0	19	24	50	7
5	140	66	0,03	66	0,015	0	0	20	23	49	7
10	50	61	0,18	80	0,078	0,017	0	5	23	63	9
10	60	61	0,18	71	0,077	0,017	0	6	23	62	9
10	70	56	0,18	62	0,076	0,018	0	7	23	61	9
10	80	60	0,17	60	0,075	0,016	0	9	23	60	9
10	90	60	0,17	60	0,074	0,015	0	10	23	58	8
10	100	61	0,16	61	0,072	0,012	0	11	24	57	8
10	110	61	0,14	61	0,068	0,009	0	13	24	55	8
10	120	65	0,12	63	0,062	0,004	0	15	24	53	8
10	130	64	0,09	64	0,051	0	0	17	24	51	7
10	140	65	0,05	66	0,03	0	0	20	23	50	7
15	50	58	0,27	78	0,087	0,049	0	4	13	72	10
15	60	58	0,27	68	0,087	0,048	0	5	15	70	10
15	70	53	0,26	60	0,086	0,047	0,0008	7	16	68	10
15	80	57	0,26	58	0,085	0,046	0	8	17	66	9
15	90	57	0,25	57	0,084	0,043	0	9	18	63	9

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
15	100	58	0,23	58	0,082	0,039	0	11	19	61	9
15	110	58	0,21	59	0,079	0,033	0	13	21	58	8
15	120	62	0,17	62	0,073	0,022	0	15	22	55	8
15	130	61	0,13	63	0,063	0,012	0	17	23	52	7
15	140	63	0,08	65	0,043	0,002	0	19	23	50	7
20	50	55	0,36	75	0,094	0,063	0,0155	3	11	74	12
20	60	55	0,36	66	0,094	0,061	0,0161	5	13	71	11
20	70	50	0,35	58	0,093	0,06	0,0167	6	15	69	11
20	80	54	0,34	56	0,093	0,059	0,0148	7	16	67	10
20	90	54	0,33	55	0,091	0,058	0,0126	9	17	65	10
20	100	55	0,31	56	0,089	0,055	0,009	11	18	62	9
20	110	56	0,28	57	0,086	0,051	0,0054	13	19	60	9
20	120	60	0,23	60	0,08	0,043	0,0002	15	20	57	8
20	130	59	0,18	62	0,069	0,028	0	17	22	53	8
20	140	62	0,1	65	0,047	0,011	0	19	23	51	7
25	50	52	0,45	73	0,096	0,077	0,0349	3	9	74	14
25	60	52	0,45	65	0,095	0,075	0,0346	5	11	71	13
25	70	47	0,44	56	0,095	0,074	0,0346	6	13	69	12
25	80	51	0,43	54	0,094	0,073	0,0322	8	14	67	11
25	90	51	0,42	53	0,093	0,072	0,0294	9	15	65	11
25	100	52	0,39	54	0,091	0,069	0,0249	11	17	62	10
25	110	53	0,36	55	0,087	0,065	0,0191	13	18	60	9
25	120	57	0,29	58	0,081	0,058	0,0095	15	19	57	8
25	130	57	0,22	61	0,07	0,047	0,001	17	21	54	8
25	140	60	0,13	64	0,048	0,024	0	19	22	51	7
30	50	49	0,54	71	0,096	0,085	0,0583	4	8	72	15
30	60	49	0,53	63	0,095	0,084	0,0569	5	11	70	14
30	70	45	0,53	55	0,095	0,083	0,0565	7	12	68	13
30	80	48	0,51	52	0,094	0,082	0,0531	8	14	66	12
30	90	48	0,5	51	0,093	0,081	0,0496	10	15	64	11
30	100	49	0,47	52	0,091	0,079	0,0435	12	16	61	11
30	110	50	0,43	54	0,087	0,075	0,0358	14	17	59	10
30	120	55	0,35	57	0,081	0,07	0,022	16	19	57	9
30	130	55	0,27	60	0,07	0,059	0,0087	18	20	54	8
30	140	59	0,15	64	0,048	0,036	0	20	22	51	7
35	50	46	0,63	69	0,096	0,092	0,0792	4	8	70	18

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
35	60	46	0,62	62	0,095	0,091	0,0772	6	10	68	16
35	70	42	0,62	53	0,095	0,09	0,0764	8	12	66	15
35	80	45	0,6	51	0,094	0,09	0,0727	9	13	64	13
35	90	45	0,58	50	0,093	0,088	0,0688	11	15	62	12
35	100	46	0,55	50	0,091	0,086	0,0621	13	16	60	11
35	110	47	0,5	52	0,087	0,083	0,0535	14	17	58	10
35	120	52	0,41	56	0,081	0,076	0,0379	16	19	56	9
35	130	53	0,31	59	0,07	0,066	0,0214	18	20	54	8
35	140	57	0,18	63	0,048	0,045	0,0043	20	22	51	7
40	50	43	0,72	67	0,096	0,099	0,0971	5	7	68	20
40	60	43	0,71	60	0,095	0,099	0,0947	7	9	66	18
40	70	39	0,71	52	0,095	0,098	0,0934	8	11	65	16
40	80	42	0,69	49	0,094	0,097	0,0896	10	12	63	15
40	90	42	0,66	48	0,093	0,096	0,0855	12	14	61	13
40	100	43	0,62	49	0,091	0,093	0,0784	13	16	59	12
40	110	44	0,57	51	0,087	0,09	0,0691	15	17	57	11
40	120	49	0,47	55	0,081	0,083	0,0523	17	19	56	9
40	130	50	0,36	59	0,07	0,072	0,0335	18	20	53	8
40	140	56	0,2	63	0,048	0,049	0,012	20	22	51	7
45	50	40	0,81	65	0,096	0,105	0,1136	5	6	66	23
45	60	40	0,8	59	0,095	0,104	0,111	8	8	64	20
45	70	36	0,79	51	0,095	0,104	0,1095	9	10	63	18
45	80	39	0,77	48	0,094	0,103	0,1056	11	12	61	16
45	90	39	0,75	47	0,093	0,102	0,1014	12	14	60	14
45	100	40	0,7	47	0,091	0,099	0,0941	14	15	58	12
45	110	41	0,64	50	0,087	0,096	0,0843	16	17	57	11
45	120	47	0,52	54	0,081	0,089	0,0666	17	19	55	9
45	130	48	0,4	58	0,07	0,077	0,0458	18	20	53	8
45	140	54	0,23	62	0,048	0,053	0,0203	20	22	51	7
50	50	37	0,9	63	0,096	0,105	0,1333	6	7	61	26
50	60	37	0,89	57	0,095	0,104	0,1308	8	9	60	22
50	70	33	0,88	49	0,095	0,104	0,1292	10	11	60	20
50	80	37	0,86	46	0,094	0,103	0,1256	12	13	58	17
50	90	36	0,83	45	0,093	0,102	0,1213	13	14	57	15
50	100	37	0,78	46	0,091	0,099	0,114	15	16	56	13
50	110	38	0,71	49	0,087	0,096	0,1038	16	18	55	11

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
50	120	44	0,58	53	0,081	0,089	0,0853	17	19	54	10
50	130	46	0,45	57	0,07	0,077	0,0623	19	21	52	8
50	140	52	0,25	62	0,048	0,053	0,0317	20	22	51	7
55	50	34	0,99	61	0,096	0,105	0,1506	7	8	55	30
55	60	34	0,98	55	0,095	0,104	0,1483	9	10	56	24
55	70	30	0,97	48	0,095	0,104	0,1467	11	12	56	21
55	80	34	0,94	45	0,094	0,103	0,1433	13	14	55	18
55	90	33	0,91	44	0,093	0,102	0,1392	14	15	55	16
55	100	34	0,86	45	0,091	0,099	0,1319	15	17	54	14
55	110	36	0,78	48	0,087	0,096	0,1216	17	18	53	12
55	120	42	0,64	52	0,081	0,089	0,1026	18	20	53	10
55	130	44	0,49	57	0,07	0,077	0,078	19	21	52	9
55	140	51	0,28	61	0,048	0,053	0,0427	20	22	50	8
60	50	31	1,08	61	0,096	0,105	0,1647	8	9	51	33
60	60	32	1,07	56	0,095	0,104	0,1623	10	11	53	26
60	70	28	1,06	49	0,095	0,104	0,1605	12	13	53	23
60	80	31	1,03	46	0,094	0,103	0,1575	13	15	53	19
60	90	30	1	44	0,093	0,102	0,1538	15	16	53	17
60	100	31	0,94	44	0,091	0,099	0,1482	16	18	52	14
60	110	33	0,85	47	0,087	0,096	0,1379	17	19	52	12
60	120	39	0,7	52	0,081	0,089	0,1187	18	20	52	10
60	130	42	0,54	56	0,07	0,077	0,0928	19	21	51	9
60	140	49	0,3	61	0,048	0,053	0,0534	20	22	50	8
65	50	28	1,17	61	0,096	0,105	0,1756	8	9	48	34
65	60	29	1,16	57	0,095	0,104	0,1732	11	12	50	27
65	70	25	1,15	50	0,095	0,104	0,1714	12	13	51	24
65	80	28	1,12	47	0,094	0,103	0,1687	14	15	51	20
65	90	27	1,08	44	0,093	0,102	0,1677	15	17	50	18
65	100	28	1,01	44	0,091	0,099	0,1615	17	18	50	15
65	110	30	0,93	46	0,087	0,096	0,1527	18	19	50	13
65	120	36	0,76	51	0,081	0,089	0,1337	19	20	51	10
65	130	39	0,58	56	0,07	0,077	0,1068	20	21	50	9
65	140	48	0,33	61	0,048	0,053	0,0637	20	22	50	8
70	50	25	1,26	61	0,096	0,105	0,1874	9	10	43	38
70	60	26	1,25	57	0,095	0,104	0,1852	11	12	47	30
70	70	22	1,23	51	0,095	0,104	0,1834	13	14	48	25

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
70	80	25	1,2	47	0,094	0,103	0,181	14	16	49	21
70	90	24	1,16	46	0,093	0,102	0,1779	16	17	49	18
70	100	25	1,09	45	0,091	0,099	0,1722	17	19	49	15
70	110	27	1	47	0,087	0,096	0,1652	18	20	49	13
70	120	34	0,81	50	0,081	0,089	0,1475	19	21	50	11
70	130	37	0,63	56	0,07	0,077	0,1201	20	22	50	9
70	140	46	0,36	61	0,048	0,053	0,0738	20	22	50	8
75	50	22	1,35	64	0,096	0,105	0,1873	8	9	47	35
75	60	23	1,34	57	0,095	0,104	0,1959	12	13	43	32
75	70	19	1,32	52	0,095	0,104	0,1836	13	14	49	24
75	80	22	1,29	48	0,094	0,103	0,192	15	17	46	22
75	90	21	1,25	46	0,093	0,102	0,1891	16	18	47	19
75	100	22	1,17	46	0,091	0,099	0,1836	18	19	48	16
75	110	24	1,07	48	0,087	0,096	0,1751	19	20	48	13
75	120	31	0,87	50	0,081	0,089	0,1602	19	21	49	11
75	130	35	0,67	55	0,07	0,077	0,1326	20	22	49	9
75	140	45	0,38	60	0,048	0,053	0,0835	21	22	49	8
80	50	19	1,44	63	0,096	0,105	0,2001	9	10	41	39
80	60	20	1,42	58	0,095	0,104	0,1983	12	13	44	31
80	70	16	1,41	52	0,095	0,104	0,1965	14	15	45	26
80	80	19	1,37	49	0,094	0,103	0,1946	15	16	47	22
80	90	18	1,33	48	0,093	0,102	0,1915	16	18	47	19
80	100	19	1,25	47	0,091	0,099	0,186	17	19	48	15
80	110	21	1,14	49	0,087	0,096	0,1773	18	20	49	13
80	120	29	0,93	51	0,081	0,089	0,1694	20	21	48	11
80	130	33	0,71	55	0,07	0,077	0,1444	20	22	49	9
80	140	43	0,41	60	0,048	0,053	0,093	21	23	49	8
85	50	16	1,53	64	0,096	0,105	0,2105	10	11	35	43
85	60	17	1,51	58	0,095	0,104	0,209	13	14	40	34
85	70	13	1,5	53	0,095	0,104	0,2072	14	16	42	28
85	80	16	1,46	49	0,094	0,103	0,2054	16	17	44	23
85	90	15	1,41	48	0,093	0,102	0,2025	17	19	45	19
85	100	16	1,33	48	0,091	0,099	0,1972	18	20	46	16
85	110	18	1,21	50	0,087	0,096	0,1887	19	21	47	13
85	120	26	0,99	52	0,081	0,089	0,173	20	21	48	11
85	130	31	0,76	56	0,07	0,077	0,1477	20	22	49	9

α	DMA	R ₁	V ₁	R _{moy}	V _a	V _b	V _c	A	B	C	D
85	140	42	0,43	60	0,048	0,053	0,1021	21	23	49	8
90	50	13	1,62	65	0,096	0,105	0,2193	11	12	30	47
90	60	14	1,6	59	0,095	0,104	0,2179	14	15	35	36
90	70	11	1,59	55	0,095	0,104	0,2162	15	17	38	30
90	80	13	1,54	51	0,094	0,103	0,2146	17	18	41	24
90	90	12	1,49	50	0,093	0,102	0,2118	18	19	43	20
90	100	13	1,4	50	0,091	0,099	0,2067	19	20	45	16
90	110	16	1,28	51	0,087	0,096	0,1984	19	21	46	14
90	120	24	1,05	52	0,081	0,089	0,1833	20	22	47	11
90	130	28	0,8	56	0,07	0,077	0,1582	20	22	48	9
90	140	40	0,46	60	0,048	0,053	0,107	21	23	49	8
95	50	13	1,62	65	0,096	0,105	0,2193	11	12	30	47
95	60	14	1,6	59	0,095	0,104	0,2179	14	15	35	36
95	70	11	1,59	55	0,095	0,104	0,2162	15	17	38	30
95	80	13	1,54	51	0,094	0,103	0,2146	17	18	41	24
95	90	12	1,49	50	0,093	0,102	0,2118	18	19	43	20
95	100	13	1,4	50	0,091	0,099	0,2067	19	20	45	16
95	110	16	1,28	51	0,087	0,096	0,1984	19	21	46	14
95	120	24	1,05	52	0,081	0,089	0,1833	20	22	47	11
95	130	28	0,8	56	0,07	0,077	0,1582	20	22	48	9
95	140	40	0,46	60	0,048	0,053	0,107	21	23	49	8
100	50	13	1,62	65	0,096	0,105	0,2193	11	12	30	47
100	60	14	1,6	59	0,095	0,104	0,2179	14	15	35	36
100	70	11	1,59	55	0,095	0,104	0,2162	15	17	38	30
100	80	13	1,54	51	0,094	0,103	0,2146	17	18	41	24
100	90	12	1,49	50	0,093	0,102	0,2118	18	19	43	20
100	100	13	1,4	50	0,091	0,099	0,2067	19	20	45	16
100	110	16	1,28	51	0,087	0,096	0,1984	19	21	46	14
100	120	24	1,05	52	0,081	0,089	0,1833	20	22	47	11
100	130	28	0,8	56	0,07	0,077	0,1582	20	22	48	9
100	140	40	0,46	60	0,048	0,053	0,107	21	23	49	8