

Etude des propriétés physiques, technologiques et de durabilité naturelle du bois de PACHYELASMA TESSMANII (HARMS) HARMS et de PENTACLETHRA MACROPHYLLA BENTH

Auteur : Doucet, Robin

Promoteur(s) : Jourez, Benoît

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5150>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

**ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES,
TECHNOLOGIQUES ET DE DURABILITÉ
NATURELLE DU BOIS DE *PACHYELASMA
TESSMANII* (HARMS) HARMS ET DE
PENTACLETHRA MACROPHYLLA BENTH.**

DOUCET ROBIN

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: BENOIT JOUREZ

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.
Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le promoteur membre du personnel enseignant de GxABT

**ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES,
TECHNOLOGIQUES ET DE DURABILITÉ
NATURELLE DU BOIS DE *PACHYELASMA
TESSMANII* (HARMS) HARMS ET DE
PENTACLETHRA MACROPHYLLA BENTH.**

DOUCET ROBIN

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: BENOIT JOUREZ

Résumé

A l'heure où la Terre connaît une érosion de sa diversité biologique sans précédent, les écosystèmes forestiers d'Afrique Centrale sont menacés. Ces écosystèmes représentent le deuxième plus grand massif forestier continu de la planète et sont de grands pourvoyeurs de services écosystémiques. Dans la lutte contre la déforestation, les exploitants forestiers, dont les concessions couvrent près de 50 millions d'hectares, sont des acteurs incontournables. Cependant, l'avenir de ces dernières est incertain car l'exploitation sélective du bois d'oeuvre se traduit par une pression importante sur un nombre réduit d'espèces dont la reconstitution à long terme ne semble pas garantie. La diversification des essences exploitées apparaît comme une solution à ce problème. Avant de proposer de nouvelles essences, il est nécessaire d'étudier leurs propriétés afin de leur attribuer des usages auxquels les acheteurs potentiels pourront se rattacher. La présente étude se place dans cette perspective en se focalisant sur deux essences présentes dans les concessions forestières du sud-est du Cameroun : l'Eyek (*Pachyelasma tessmanii* (Harms) Harms) et le Mubala (*Pentachlethra macrophylla* Benth.) Cinq propriétés physiques, cinq propriétés mécaniques et la durabilité naturelle vis-à-vis de deux champignons lignivores ont été déterminées. Il en ressort que l'Eyek est une essence qui peut être valorisée dans l'aménagement tant intérieur qu'extérieur alors que le Mubala sera préféré pour le gros ouvrage industriel et notamment la traverse de chemin de fer. Les possibilités de valoriser l'Eyek sur le long terme paraissent toutefois réduites car l'essence est présente à faible densité et sa structure de population n'est pas très favorable. Par contre, le Mubala offre de meilleures perspectives car l'essence est abondante et semble se régénérer sans difficultés. Il convient toutefois de valider la possibilité de valoriser cette espèce compte tenu de ses dimensions et de sa conformation.

Mots clés : bois, exploitation, propriétés technologiques, durabilité, emploi, reconstitution, régénération.

Abstract

Currently the Earth is experiencing an unprecedented erosion of biodiversity which threatens Central Africa's rainforests. These forests represent the second largest continuous forest massif on Earth and provide many ecosystem services. In the fight against deforestation, logging companies, whose concessions cover nearly 50 million hectares, are key players. However, their persistence is uncertain because selective logging results in focusing pressure on a reduced number of species whose long-term recovery does not seem guaranteed. The diversification of logged species appears to be a solution to this issue. Before promoting new species, it is necessary: (i) to study their properties in order to attribute to them wood uses familiar to users, (ii) to evaluate the availability of the resource and its regeneration capacities. This study takes place in this perspective by focusing on two species present in the forest concessions of southeastern Cameroon: Eyek (*Pachyelasma tessmanii* (Harms) Harms) and Mubala (*Pentachlethra macrophylla* Benth.). Five physical properties, five mechanical properties and the natural durability against two wood-decomposing fungi were determined. It turned out that the Eyek is a species that can be used in both interior and exterior design, while the Mubala will be preferred for industrial structure, particularly the railway crossing. However, the long-term Eyek's availability seems limited because of low densities and a population structure which is not favourable. On the other hand, Mubala offers better prospects because of its abundance and its good regeneration. However it is necessary to take into account its dimensions and its conformation.

Keywords: timber, wood, logging, mechanical properties, durability, uses, sustainability, recovery, regeneration.

Remerciements

La réalisation de ce travail qui clôture ces 5 années d'études n'aurait pu être menée à bien sans l'aide de nombreuses personnes auxquelles je souhaite adresser mes remerciements.

Tout d'abord j'aimerais remercier mon promoteur, Monsieur Benoit JOUREZ sans qui ce travail n'aurait jamais pu être accompli. Vous m'avez accompagné durant l'ensemble du projet, de la réception des plateaux à la réalisation des tests, en passant par la découpe à l'atelier et la dégustation de frites bien méritées. Vous avez su m'orienter dans mes recherches et m'encourager dans les moments où tout ne se passait pas comme prévu. Votre encadrement m'a été très précieux.

J'aimerais également remercier la deuxième personne sans qui ce projet n'aurait pas eu lieu, mon père, le Professeur Jean-Louis DOUCET. Tu as toujours été là pour m'aider à avancer en me trouvant les financements, les références et les contacts dont j'avais besoin pour mener à bien ce travail. Même quand tu me disais de me débrouiller seul, tu gardais toujours un œil attentif et tu agissais dans l'ombre pour trouver les solutions à mes problèmes. Je le sais c'est Maman qui me le dis quand tu as le dos tourné. Et je voulais également te remercier pour le travail de relecture qui m'a été d'un grand secours lors de ma rédaction.

Je remercie Monsieur Paul LAGOUTE pour avoir apporté son soutien à ce projet en s'occupant de l'organisation de l'exploitation et de la découpe du matériel végétal alors que je n'étais pas présent. Je remercie également le personnel de Pallisco-CIFM qui a mis en œuvre ces opérations. Je remercie aussi le groupe Pasquet Menuiseries qui s'est occupé du transport du matériel du Cameroun jusqu'au Port du Havre. Messieurs Douaud et Rougeron ont apporté tout leur soutien à ce projet, je les en remercie.

Je tiens également à remercier le personnel du Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole pour m'avoir accueilli au sein de leur établissement et tout particulièrement le Laboratoire de Technologie du Bois. Je remercie personnellement Lahcen HADIY et Yannick DELZANT qui m'ont aidé tout au long du travail tant lors de la découpe des échantillons que pour la réalisation des tests, le tout dans une bonne humeur rendant la tâche plus agréable au quotidien. Je remercie également Cécile VERHEYEN qui s'est occupée de la réalisation du test de durabilité naturelle et du superbe rapportage de celui-ci. Je remercie aussi Anne BAUVIN pour son aide lors des essais mécaniques. J'adresse également mes remerciements à Jean-Marc HENIN pour les relectures et conseils lors de la rédaction ainsi qu'à Caroline POLLET pour ses conseils lors de la rédaction également. Je remercie aussi Cécile LESIRE qui s'est occupée du test d'imprégnabilité qui n'a malheureusement pas pu être réalisé, mais ce n'est que partie remise. Finalement je remercie Béatrice PIRARD et Chantal PALANGE qui m'ont donné du cœur à l'ouvrage en préparant un délicieux café tous les matins.

Je remercie Jaques HEBERT, Arnaud MONTY, Yves BROSTAUX et Patrick MARTIN qui auront pris le temps de lire ce mémoire et de m'évaluer par la suite.

Je remercie aussi toute ma famille pour m'avoir encouragé pendant ces 7 mois. Je remercie ma Maman pour ces bons plats et petites attentions les week-ends. Je remercie aussi ma sœur parce qu'elle me l'a demandé et qu'elle fait parfois de bonnes blagues.

Je remercie aussi mon amoureuse Marjorie LEFRERE pour me supporter depuis presque 5 ans. Tu me donnes toujours l'envie de faire mieux et de me surpasser pour te rendre fière de moi. Tu rends mon quotidien toujours plus beau et tu m'aides bien plus à avancer que ce que tu peux imaginer.

Je ne saurais finir ces remerciements sans m'adresser à tous mes camarades qui ont rendu inoubliables ces cinq, trop courtes, années d'études. Je remercie tout particulièrement Samuel HETTE, Augustin THERASSE et Sevan ROZET pour les nombreux temps de midi pain-fromage-charcut'.

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1.	Contexte	1
1.1.1.	La 6ème grande extinction, origine et conséquences sur les écosystèmes	1
1.1.2.	Importance des forêts du Bassin du Congo	1
1.1.3.	Quelles sont les pressions exercées sur les écosystèmes forestiers d’Afrique centrale ?	2
1.1.4.	Rôle des concessions forestières certifiées dans le maintien des écosystèmes	3
1.1.5.	La pérennité des concessions forestières menacée ?	4
1.1.6.	La valorisation des essences forestières secondaire, une solution ?	5
1.2.	Objectifs	6
2.	Matériel et méthode	7
2.1.	Description des modèles biologiques	7
2.1.1.	<i>Pachyelasma tessmanii</i> (Harms) Harms	7
2.1.2.	<i>Pentaclethra macrophylla</i> Benth.	8
2.2.	Site de prélèvement des individus	9
2.3.	Récolte sur le terrain, préparation des plateaux et transport	10
3.	Méthodes	13
3.1.	Choix des essais à réaliser	13
3.2.	Utilisation des normes	13
3.3.	Détermination du nombre d’éprouvettes par essais	14
3.4.	Façonnage des éprouvettes	15
3.4.1.	Découpe du plateau A et sélection des échantillons	16
3.4.2.	Découpe du plateau B et sélection des échantillons	18
3.4.3.	Tableau récapitulatif des découpes	18
3.5.	Conditionnement des éprouvettes	19
3.6.	Essais physiques	20
3.6.1.	Humidité	20
3.6.2.	Masse volumique	20
3.6.3.	Retrait volumique total	20
3.6.4.	Retraits linéaires	21
3.6.5.	Point de saturation de la fibre	21
3.6.6.	Coefficient de retrait volumique	22
3.7.	Essais mécaniques	23
3.7.1.	Module d’élasticité	23
3.7.2.	Contrainte de rupture en flexion statique	25
3.7.3.	Contrainte de rupture en compression parallèle aux fibres	26

3.7.4.	Dureté de Monnin	27
3.7.5.	Rupture en flexion dynamique	28
3.8.	Essai de durabilité naturelle : résistance aux champignons lignivores	29
3.8.1.	Préparation du milieu	29
3.8.2.	Déroulement du test	29
3.9.	Analyses statistiques	30
3.9.1.	Statistiques descriptives	30
3.9.2.	Régressions linéaires	30
3.9.3.	Analyse de la variance	30
3.10.	Expression des résultats	31
3.10.1.	Comparaison des résultats avec des essences connues	31
3.10.2.	Humidité lors des tests de propriétés mécaniques	31
4.	Résultats	32
4.1.	Aspect visuel et description de la grume	32
4.1.1.	EyeK	32
4.1.2.	Mubala	33
4.2.	Propriétés Physiques	34
4.2.1.	Masse volumique à 12% d'humidité	34
4.2.2.	Retrait volumique total	34
4.2.3.	Retrait radial	35
4.2.4.	Retrait tangentiel	35
4.2.5.	Anisotropie du retrait	36
4.2.6.	Point de saturation de la fibre	37
4.2.7.	Coefficient de rétractabilité volumique	39
4.3.	Propriétés mécaniques	39
4.3.1.	Module d'élasticité en flexion statique	39
4.3.2.	Module de rupture en flexion statique	40
4.3.3.	Résistance unitaire en flexion dynamique	40
4.3.4.	Compression axiale	41
4.3.5.	Dureté de Monnin	42
4.4.	Durabilité naturelle	43
4.4.1.	<i>Coriolus versicolor</i> (Yun Zhi)	43
4.4.2.	<i>Coniophora puteana</i> (Schum ex Fr) Karst.	43
5.	Discussion	44
5.1.	Aspect visuel	44
5.2.	Propriétés de la grume	44

5.2.1.	Largeur de l'aubier-----	44
5.2.2.	Conformation de la grume-----	45
5.2.3.	Roulure et fentes de cœur-----	45
5.2.4.	Les trous de « vers »-----	46
5.3.	Propriétés physiques -----	46
5.3.1.	Masse volumique-----	46
5.3.2.	Stabilité dimensionnelle -----	46
5.4.	Propriétés mécaniques-----	50
5.4.1.	Module d'élasticité en flexion statique -----	50
5.4.2.	Module de rupture en flexion statique -----	50
5.5.	Résistance unitaire en flexion dynamique -----	51
5.5.1.	Compression axiale-----	51
5.5.2.	Dureté de Monnin-----	51
5.6.	Durabilité naturelle-----	52
5.6.1.	<i>Coriolus versicolor</i> (Yun Zhi) -----	52
5.6.2.	<i>Coniophora puteana</i> (Schum ex Fr) Karst. -----	52
5.6.3.	Classes d'emplois -----	53
5.7.	Synthèse par essence-----	55
5.7.1.	EyeK-----	55
5.7.2.	Mubala -----	57
5.8.	Recommandations-----	59
6.	Conclusion -----	61
7.	Bibliographie -----	62
8.	Annexes-----	68
8.1.	Annexe 1 : Fiche d'encodage des caractéristiques des plateaux -----	68
8.2.	-----	68
8.3.	Annexe 2 : Schéma de traçabilité des éprouvettes de l'EyeK numéro 1 -----	70
8.4.	Annexe 3 : Tableau des p-valeurs des tests préliminaires aux ANOVAs -----	71

1. Introduction

1.1. Contexte

1.1.1. La 6ème grande extinction, origine et conséquences sur les écosystèmes

Depuis le début de la vie sur notre planète, la Terre a connu de nombreuses phases d'extinction dont 5 périodes d'extinctions massives. Ces périodes sont caractérisées par une perte de minimum 75% de la biodiversité planétaire sur une échelle de temps géologique réduite (Barnosky et al., 2011). Cette perte pouvant même atteindre 96% des espèces et 56% des genres présents, comme lors de celle de la fin de l'Ordovicien (Harper et al., 2014). Actuellement, notre planète connaît sa 6^{ème} grande extinction (Chapin et al., 2000; Pereira et al., 2010; Barnosky et al., 2011). Le monde scientifique s'accorde pour dire que le taux d'extinction actuel est de 100 à 1000 fois supérieure à la moyenne et peut continuer d'augmenter si aucune mesure de correction n'est prise. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ce taux si élevé est une conséquence directe de l'activité humaine, il résulte notamment de la fragmentation des habitats naturels, du changement d'occupation du sol, de la compétition pour les ressources, de l'introduction d'espèces invasives, de la dissémination de pathogènes, la pollution de l'environnement et de l'induction d'un changement climatique (Leakey et al., 1996; Dirzo et al., 2003). Ces phénomènes d'extinction sont toujours suivis d'une grande diversification des taxons restant qui recolonisent les niches écologiques laissées vides par les espèces disparues (Erwin et al., 2001). Cependant, le temps nécessaire à une spéciation peut atteindre 2 millions d'années (Avisé et al., 1998), soit une échelle de temps hors de portée de l'action humaine.

L'altération de la diversité biologique engendre une diminution de la résilience des écosystèmes (Fischer et al., 2006). Les écosystèmes devenant moins résilients, ils sont alors plus susceptibles de passer d'un état stable à un autre état sous l'impulsion d'une pression extérieure (Beisner et al., 2003). Ce changement d'état aura pour conséquence de modifier la capacité de ces écosystèmes à fournir des services, ce qui pourra avoir des effets non négligeables sur le bien-être humain. (Chapin et al., 2000). En effet, les écosystèmes sont pourvoyeurs de « services écosystémiques » qui participent directement à ce bien-être (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ils se répartissent dans 4 groupes principaux :

Si la biodiversité mondiale continue à régresser, la plupart de ces services sont voués à changer irrémédiablement voir même à disparaître, menant l'humanité tout entière vers un avenir incertain. Afin de conserver ce patrimoine, il faut établir des priorités de conservation. Les écosystèmes forestiers étant généralement achalandés d'une grande diversité spécifique (Louppe et al., 2015) et pourvoyeur de nombreux et importants services écosytémiques (Edwards, Tobias, et al., 2014), il est impératif de les maintenir et de les protéger. A ce titre, les forêts denses humides tropicales jouent un rôle fondamental. Ce sont les écosystèmes terrestres les plus diversifiés et stockent des quantités considérables de carbone(Sullivan et al., 2017).

1.1.2. Importance des forêts du Bassin du Congo

Les forêt du bassin du Congo constituent le deuxième plus grand massif forestier continu du monde (Tchatchou et al., 2015) avec une superficie de près de 180 millions d'hectares (Louppe et al., 2015). Elles s'étendent principalement sur les 6 pays suivants : Gabon, Cameroun, Congo, République Démocratique du Congo, République centrafricaine et Guinée Equatoriale. Ces forêts sont soumises à un climat de type A selon la typologie Köppen-Geiger, cela implique des conditions de température moyenne par mois supérieure à 18°C, une saison sèche peu importante et des précipitations annuelles supérieures à l'évaporation (Kottek et al., 2006). Ces conditions climatiques associées aux diverses conditions édaphiques particulières permettent le

développement de différents types de forêts et expliquent que celles-ci soient le berceau d'une formidable diversité biologique (Fayolle et al., 2012, 2014). En effet, elles abriteraient plus de 20.000 espèces de végétaux dont 8000 espèces de végétaux supérieurs avec un taux d'endémicité de 80% (White, 1983). Elles sont également fortement impliquées dans la régulation du cycle de carbone. On estime qu'elles peuvent stocker jusque 200t de carbones par hectare (Lewis et al., 2009). Outre ce service de régulation, ces forêts offrent des moyens de subsistance à 60 millions de personnes qui y vivent ou vivent à proximité (De Wasseige et al., 2013) et permettent d'alimenter 40 millions de personnes répartis dans les centres urbains limitrophes (Nasi et al., 2011). Cependant, leur surfaces et les services qu'elles rendent sont en constante diminution (De Wasseige et al., 2013).

1.1.3. Quelles sont les pressions exercées sur les écosystèmes forestiers d'Afrique centrale ?

La forêt peut subir deux types de modification : la dégradation et la déforestation. La dégradation étant une notion assez subjective et difficilement quantifiable, elle est assez peu documentée dans le monde scientifique en comparaison à la déforestation qui, elle, est un phénomène binaire et quantifiable facilement au moyens de télédétection (Putz et al., 2010). La différenciation de ces deux notions intimement liées est cependant indispensable. Selon Organisation International des Bois Tropicaux (OIBT), la dégradation des forêts se réfère à la réduction de la capacité d'une forêt à produire des biens et des services (ITTO, 2002). Une forêt dégradée est donc une forêt ayant perdu la structure, la fonction, la composition des essences et/ou la productivité normalement associées à la forêt naturelle (ITTO, 2002). La déforestation quant à elle implique la perte, à long terme ou permanente, du couvert forestier et la conversion des terres à une autre utilisation (FAO, 2015).

Les principaux '*drivers*' de la dégradation des écosystèmes forestiers en Afrique centrale sont l'exploitation de bois de chauffe (Joseph et al., 2012; Kissinger et al., 2012), l'exploitation de bois d'œuvre (Doumenge et al., 2001; Joseph et al., 2012; Kissinger et al., 2012) et la chasse commerciale généralisée (Doumenge et al., 2001). Le bois de chauffage étant destiné à une utilisation domestique (Chidumayo et al., 2013), la pression exercée sur les forêts pour sa production s'amplifie au rythme de l'accroissement de population enregistré ces dernières années en Afrique. Cette problématique étant principalement inféodée aux forêts périurbaines de très grandes villes comme Kinshasa (Bisiaux et al., 2009; De Wasseige et al., 2013), elle ne s'étend pas à l'ensemble du massif forestier du Bassin du Congo et ne sera pas plus développée dans le cadre de ce travail. La dégradation forestière par pression de chasse et exploitation forestière sont quant à elles généralisables une grande partie du massif. L'impact direct de l'exploitation forestière sur le couvert forestier est indiscutable mais peut être limité et contrôlé facilement comme il sera expliqué dans la section suivante. La pression de chasse est généralement une conséquence indirecte de l'implantation de concessions forestières. En effet, en créant des pôles de développements urbain à l'intérieur des massifs et en ouvrant des routes dans ces derniers, l'accès à la ressource animale se voit grandement facilité (Mathot et al., 2006; Laporte et al., 2007).

Le principal moteur de déforestation en Afrique centrale est l'extension de l'agriculture liée à la croissance démographique (Joseph et al., 2012). Il est cependant nécessaire d'apporter certaines précisions. L'agriculture abattis sur brulis est une méthode d'agroforesterie traditionnelle qui ne conduit à une déforestation qu'au-delà d'un seuil estimé de 30 à 40 hab/km² (De Wachter, 1997). C'est l'augmentation de la population qui va obliger les populations à réduire les temps de jachère, entraînant ainsi une diminution de fertilité des sols et donc le défrichage de nouvelles parcelles au détriment de la surface forestière. On peut donc affirmer que l'augmentation de population est la cause sous-jacente de la déforestation pour l'agriculture et donc la cause principale de déforestation en Afrique centrale. Par ailleurs, le continent Africain renferme 30% des ressources mondiale de minerais dont 60% se trouverait dans les forêts du bassin du Congo (Edwards et al., 2014). En plus de la déforestation, l'activité minière peut causer des dégradations et pollution

importantes du réseau hydrologique suite à des techniques inappropriées (De Wasseige et al., 2015). Cependant son impact sur le couvert forestier reste limité en comparaison à la première cause.

1.1.4. Rôle des concessions forestières certifiées dans le maintien des écosystèmes

En Afrique centrale, 44 millions d'hectares de forêt sont placés en zone de protection (Nasi et al., 2012). Les forêts de production exploitées par des concessions forestières représentent quant à elle près de 60 millions d'hectares (Nasi et al., 2012) avec en moyenne 250.000 hectares à gérer par concession. (Laporte et al., 2007; De Wasseige et al., 2013). Ces chiffres montrent la responsabilité des sociétés d'exploitation dans ce combat contre la perte de biodiversité. En effet, maintenir une activité économique de production de bois d'œuvre sur une aire géographique étendue permet notamment de la préserver de tout changement d'affectation du sol, empêchant ainsi tout phénomène de déforestation. Cependant, il est impératif d'exploiter ces espaces de manière durable afin d'éviter toute dégradation de l'écosystème forestier. C'est pourquoi les pays d'Afrique centrale ont adopté une législation forestière où la conservation des forêts est un point central (Doumbe-Bille, 2004). Afin de pouvoir exploiter, les concessions forestières doivent établir un plan d'aménagement. Celui-ci définit, dans des conditions fixées par décret, les règles de gestion de l'unité forestière d'aménagement (UFA) qui leur est attribuée. Pour ce faire, la concession doit préalablement réaliser un inventaire d'aménagement afin d'estimer les ressources présentes. Ensuite, des diamètres minimums d'aménagement sont attribués à chaque essence, ceux-ci ne pouvant pas être inférieurs aux diamètres minimums d'exploitation légaux. Le but étant d'assurer une reconstitution suffisante de la ressource pour la rotation suivante. Ceci n'est évidemment qu'un exemple simple ne reflétant pas toute la complexité d'un aménagement forestier. Malgré ce souhait de mettre en avant la conservation des forêts par les états d'Afrique centrale, en 2015 seulement 38% des concessions sont aménagées (De Wasseige et al., 2015). Cependant, certaines sociétés souhaitent aller plus loin qu'un simple aménagement de leur concession et agissent pour obtenir le label de qualité : « Forest Stewardship Council » ou PEFC « Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes ».

Un peu moins de 5 millions d'hectares de ces forêts exploitées sont certifiées FSC (FSC, 2018). Ce label permet une reconnaissance internationale d'une gestion durable de l'écosystème forestier afin de maintenir la biodiversité et l'ensemble des biens et services produits par ce dernier (FSC, 2012). Les actions entreprises par les concessionnaires, en vue d'empêcher la dégradation des écosystèmes forestiers, sont la traduction des 10 principes FSC en différents indicateurs pour le Bassin du Congo. Cela passe par la pratique de l'exploitation sélective du bois d'œuvre, ce qui correspond à prélever entre 0.5 et 2 arbres par ha de forêt, soit 5 à 15 m³ (Doucet, 2003; Fargeot et al., 2004). Ce faible prélèvement a pour conséquence une altération du couvert forestier limitée à 10% après exploitation (White, 1992; Doucet, 2003). Cette perturbation du paysage forestier étant également limitée dans le temps car le temps de recouvrement de la canopée est en moyenne de 20 ans (Kleinschroth et al., 2015), l'exploitation sélective semble peu affecter le paysage forestier et sa structure verticale. De plus, l'exploitation est réalisée selon les principes de l'Exploitation Forestière à Faible Impact (EFIR). Combinée à l'exploitation sélective, cette dernière permet de réduire l'impact de l'exploitation, par rapport à une exploitation dite « conventionnelle », sur les stocks de carbone (Medjibe et al., 2011), la richesse spécifique des arbres (Medjibe et al., 2011), l'altération des sols et les dégâts causés au peuplement encore sur pied (Putz et al., 2008). La labellisation FSC impose également de mettre en place des mesures de contrôle anti-braconnage et des séries de protection de biodiversité afin d'enrayer la chasse commerciale tout en autorisant la chasse de subsistance (FSC, 2012). D'après Clark et al. (2009), en l'absence de braconnage, les densités de certains grands mammifères ne seraient pas impactées ou le seraient positivement par l'exploitation sélectives des forêts qui crée des ouvertures dans la canopée et favorise une dynamique paysagère importante. L'abondance moyenne en forêt exploitée serait significativement supérieure aux forêts non-exploitées pour l'éléphant (*Loxodonta cyclotis* (Matschie 1900)), le gorille (*Gorilla gorilla gorilla* (Savage 1847)) et les céphalophes de taille moyenne (*Cephalophus spp.*). Pour les autres espèces investiguées, aucune différence significative entre les deux types de forêts n'a été constatée. Cette affirmation

a ensuite été appuyée par Haurez et al. (2016) qui montre que les densités de gorilles ne sont pas impactées par le passage de l'exploitation. Cependant, toutes les espèces ne vont pas réagir de la même façon aux perturbations. Certaines espèces ayant des niches écologiques plus spécifiques ou étant plus territoriales ont besoin de milieux peu perturbés. C'est pourquoi les concessions forestières doivent agir de concert avec les agents de conservations et les réserves en place pour préserver les forêts de la dégradation (Clark et al., 2009; Haurez et al., 2016).

En conclusion, une concession forestière certifiée FSC permet de fixer l'occupation du sol sur une durée d'au moins une rotation (+/- 30 ans) pour, en moyenne, 250.000 hectares de forêts. En fixant l'occupation du sol elle empêche toute déforestation de la zone occupée. De plus, elles agissent contre la dégradation de ces forêts en limitant les impacts sur le couvert forestier, le sol, les peuplements sur pied et la faune.

1.1.5. La pérennité des concessions forestières menacée ?

Comme expliqué précédemment, l'exploitation du bois d'œuvre est extrêmement sélective en Afrique centrale. En effet, la Figure 1 montre la production annuelle, en m³, de diverses essences pour 2008 et 2014 dans le Bassin du Congo. Les trois essences les plus exploitées représentent à elles seules 54% de la production² totale.

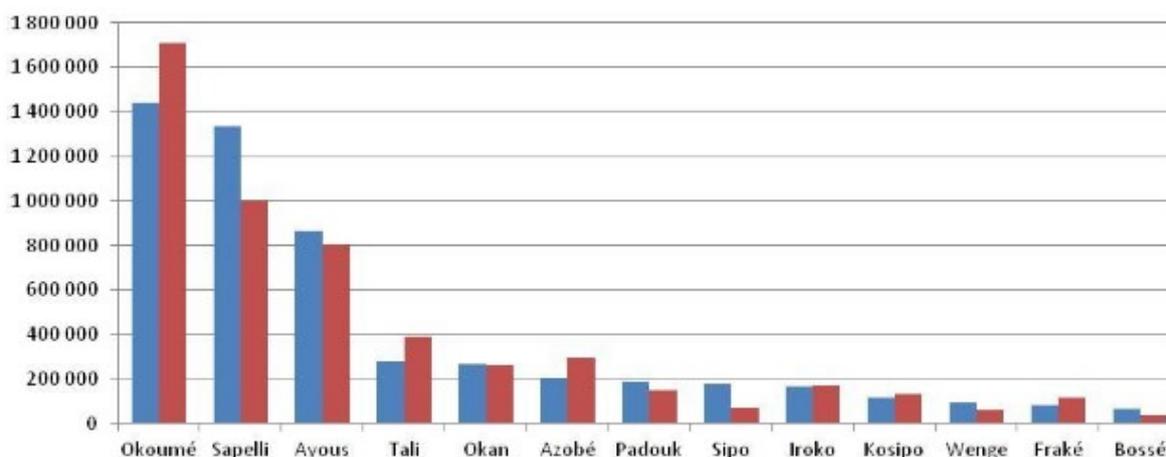


Figure 1 : Productions annuelles évaluée par essence en 2008 (bleu) et 2014 (rouge) sur la Bassin du Congo (m³/an) - Source: Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale (OFAC)

En plus de la pression de l'exploitation exercée sur ces essences, certaines font faces à un manque de régénération. La régénération d'une essence est fonction de son tempérament, celui-ci correspondant aux besoins en lumière d'une essence en fonction de son stade de développement. Dans les forêts sans perturbations récentes, les essences héliophiles pionnières ont généralement des structures de population en cloche. La reconstitution des stocks de ces essences héliophiles risque donc de diminuer, de rotation en rotation, jusqu'à épuisement quasi complet de la ressource. Ce tempérament héliophile pionnier est retrouvé chez de nombreuses essences commerciales, par exemple: l'Okoumé (Doucet, 2003), l'Ayous (Morin-rivat, 2018), le Tali (Morin-rivat, 2018), l'Okan (Doucet, 2003), l'Iroko (Doucet, 2003), le Fraké (Morin-rivat, 2018) et le Wengué (Meunier et al., 2015). Selon la Figure 1, plus de 50% de la production d'Afrique centrale est donc vouée à disparaître à long terme ce qui compromet la viabilité des concessions forestières. De plus, la pression exercée sur ces quelques essences commerciales est telle que, même si la régénération de certaines essences est bonne à long terme, comme pour le Sapelli, la modélisation de l'évolution de ses stocks (Figure 2) montre une diminution de la ressource à long terme (Karsenty et al., 2006)

²Cité par : https://www.observatoire-comifac.net/africa/forest_management

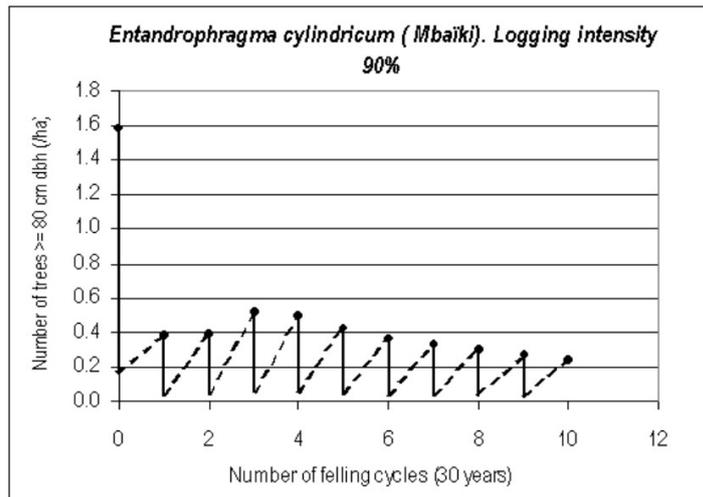


Figure 2 : Modélisation de l'évolution des stocks de *Entandrophragma cylindricum*(Sapelli)-
Source : Karsenty et Gourlet-Fleury (2006)

1.1.6. La valorisation des essences forestières secondaire, une solution ?

Pour réduire la pression exercée sur des essences dont la régénération est faible, tout en assurant la pérennité des concessions forestières certifiées, la diversification des essences exploitées peut être une solution (Karsenty et al., 2006). De plus, la promotion de ces essences dites « secondaires » est une des traductions des principes FSC (FSC, 2012). Dès lors, afin de promouvoir de nouvelles essences, les entreprises doivent démontrer et informer les marchés locaux ou d'exportation des usages potentiels de celles-ci. Cependant, avant de parler d'utilisation ou de valorisation du bois, il faut d'abord sélectionner ces essences qui vont soulager les espèces commerciales habituelles. Les entreprises certifiées doivent donc avancer dans cette direction et à cette fin, il est nécessaire de produire l'information utile. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de fin d'études.

Afin d'assurer que cette nouvelle ressource ne s'épuise pas, il faut sélectionner des essences dont la fréquence sur le terrain est importante, dont les taux de régénération sont élevés et qui par ailleurs, présentent une bonne conformation du fut,... Une démarche de recherche et d'identification de ces essences sur le terrain doit idéalement être opérée avant d'entreprendre des recherches sur la valorisation.

La valorisation d'une essence correspond à l'attribution d'une valeur économique à l'arbre ou à une partie de l'arbre. Cette valorisation peut autant concerner le bois que les écorces, les fruits ou encore les fleurs. Néanmoins, dans le cas d'une concession forestière, il est proposé de s'intéresser à la valorisation du matériau bois, du moins dans un premier temps.

La valorisation du bois passe par la description de ses propriétés afin de déterminer les usages dans lesquels il pourrait convenir. Il existe divers propriétés telles que : les propriétés visuelles, physiques, acoustiques, mécaniques, de réaction au séchage, d'usinabilité,...(Gérard et al., 2011). La compilation de ces propriétés permet de définir des emplois potentiels pour le bois et donc de lui attribuer une valeur. C'est pourquoi avant d'exploiter une essence il faut préalablement étudier ses propriétés. C'est précisément l'étude de ces propriétés qui font l'objet principal de ce travail de fin d'étude.

1.2. Objectifs

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt de valoriser le bois de deux espèces ligneuses actuellement non commercialisées en fonction des propriétés du bois et de la disponibilité de la ressource.

Les deux espèces sont *Pachyelasma tessmanii* (Harms) Harms (Eyek) et de *Pentachlethra macrophylla* Benth. (Mubala). Le choix de ces essences a été opéré en collaboration avec le Professeur Jean-Louis Doucet³, Monsieur Paul Lagoute⁴ et Monsieur Patrick Martin⁵. L'expérience de terrain de Messieurs Doucet et Lagoute ont permis de dresser une liste d'essences potentiellement intéressantes au vu de leur fréquence sur le terrain et de leurs dimensions (diamètre, volume). L'expertise de Monsieur Martin, qui participe à l'axe de valorisation des essences secondaires de l'ATIBT, a permis de valider le choix de ces deux essences. En effet, elles n'ont jamais été étudiées par l'ATIBT et les références bibliographiques concernant leurs propriétés sont infimes. Les méthodes de détermination de ces propriétés ne sont généralement pas mentionnées ce qui peut remettre en question leur véracité. Les différentes propriétés étudiées sont: l'aspect visuel et les propriétés des grumes (i), les propriétés physiques (ii), les propriétés mécaniques (iii) et la durabilité naturelle (iiiv).

- i. Les propriétés de la grume et les critères de l'aspect du bois qui seront décrits sont, notamment : la conformation de la grume, ses défauts, la couleur du duramen, la couleur de l'aubier, la largeur de l'aubier, le grain, les caractéristiques macroscopiques observables sur la face transversale du bois.
- ii. Les différentes propriétés physiques étudiées seront : la masse volumique, le retrait volumique total, les retraits linéaires totaux tangentiel et radial ainsi que le point de saturation de la fibre et le coefficient de retrait volumique.
- iii. Les propriétés mécaniques étudiées sont : le module d'élasticité en flexion statique exercée tangentiellement aux cernes, le module de rupture en flexion statique exercée tangentiellement aux cernes, la résistance unitaire en flexion dynamique exercée tangentiellement aux cernes, la contrainte de rupture en compression axiale et la dureté de Monnin.
- iv. La durabilité naturelle sera étudiée sur base de la résistance du bois au contact de trois champignons basidiomycètes lignivores : *Coriolus versicolor* (Yun Zhi), *Coniophora puteana* (Schum ex Fr) Karst. et *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murril

En fonction des résultats obtenus, différents usages seront proposés. La disponibilité de la ressource et ses capacités de renouvellement (régénération et reconstitution) seront finalement discutées dans le contexte de la société Pallisco qui a appuyé cette étude.

³ Professeur de foresterie tropicale à la faculté Gembloux Agro-Bio tech de l'université de Liège

⁴ Directeur du site de Pallisco-Cifm à Mindourou, Cameroun

⁵ Directeur technique de l'Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT)

2. Matériel et méthode

2.1. Description des modèles biologiques

2.1.1. Pachyelasma tessmannii (Harms) Harms

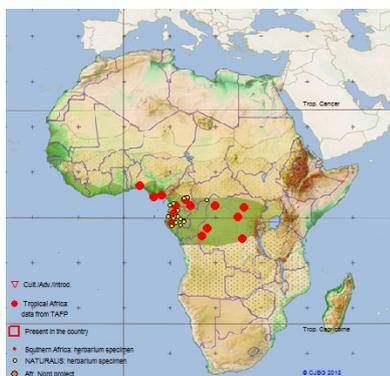


Figure 3 : Carte de répartition de l'Eyek - Source : <http://www.ville-ge.ch/cjb>

Nomenclature, répartition et écologie

Pachyelasma tessmannii (Harms) Harms est un arbre de la famille des *Fabaceae* et de la sous-famille des *Caesalpinioideae*. Il est le seul représentant de son genre, proche génétiquement du genre *Erythrophleum* dont plusieurs espèces sont reprises sous le nom commercial de « Tali ». Son nom pilote est l'Eyek mais il est également appelé, Mekhogo au Congo et au Gabon ou encore Faux-Tali au Cameroun (ATIBT, 2016). L'Eyek n'est que très peu documenté dans la littérature scientifique et les informations le concernant portent sur des aspects médicaux ou les molécules particulières qu'il renferme. Sa répartition s'étend du Sud du Niger jusqu'en Centrafrique et descend vers le sud jusqu'au Gabon et en République Démocratique du Congo (Figure 3). Il est inféodé aux forêts denses humides d'Afrique centrale mais son tempérament n'est pas encore connu.

Description botanique sommaire

Cet arbre peut atteindre 60m de haut avec un fut cylindrique dans sa portion haute pouvant mesurer jusque 250cm de diamètres (Figure 5). Sa base peut être dotée de contreforts développés. Cette taille imposante fait de lui un des arbres les plus grands d'Afrique centrale, la Figure 6 atteste du gigantisme de certains individus. Il possède une écorce grisâtre et rugueuse, des feuilles alternes composées bipennées à 2-5 paires de pennes opposées et des fruits de type gousse linéaire oblongue plate de 15 à 35 cm (Meunier et al., 2015) (Figure 4).

Utilisation des Produits Forestiers Non Ligneux (PFNLs)

Au Cameroun, les fruits sont pilés et administrés en lavement à des fins anti-diarrhéiques et abortives. Au Gabon et en République démocratique du Congo, les fruits et écorces servent comme l'un des plus puissants poisons de pêche (Schmelzer et al., 2008). Récemment, Ken-ichi Nihei et al. (2005) ont réussi à isoler quatre saponines triterpènes des écorces de racines. Ces saponines ont toutes révélé des propriétés molluscicides.



Figure 4 : Dessin reprenant les caractéristiques botaniques de l'Eyek - Source : <http://tropical.theferns.info>

Propriétés du bois

Seules quelques propriétés du bois ont été étudiées. A 12%, sa densité serait de 810-900 kg/m³. Le bois affiche un contrefil marqué ou un fil ondé avec un aubier de 10cm. Son contrefil rendrait difficile le rabotage du bois. Le retrait du bois étant important, il est conseillé de scier le bois sur quartier afin d'éviter toute déformation. Son bois serait également résistant aux agents extérieurs et l'aubier modérément résistant à l'imprégnation. Selon (Schmelzer et al., 2008), le bois conviendrait pour le gros œuvre, la construction navale, la carrosserie, les meubles et l'ébénisterie, la menuiserie, les articles de sport et les instruments, les boiseries intérieures, les jouets, les articles de fantaisie et le tournage. Il serait particulièrement adapté au placage très fin.



Figure 5 : Contreforts d'Eyek

2.1.2. *Pentaclethra macrophylla* Benth.

Nomenclature, répartition et écologie

Pentaclethra macrophylla Benth. est un arbre de la famille de *Fabaceae* et de la sous-famille des *Mimosoideae*. Son nom pilote est Mubala mais il est également appelé Owala en Côte d'Ivoire, Essiri au Congo (ATIBT, 2016) ou encore African oil bean en anglais (Vossen et al., 2007). Sa répartition s'étend en Afrique Centrale et en Afrique de l'Ouest, depuis le Sénégal jusqu'au sud-est de Soudan et en Angola, ainsi que dans les îles de Sao Tomé-et-Principes (Vossen et al., 2007), voir Figure 6. Il n'est pas beaucoup utilisé pour son bois d'œuvre mais possède une multitude d'autres usages. En terme d'écologie, c'est un arbre dit semi-héliophile à cryptopionnier, ce qui signifie qu'il se développe aisément dans des zones fortement éclairées au stade juvénile et tolère l'ombrage à maturité. Il est très répandu des forêts secondaires sempervirentes, semi-caducifoliées et dans les jachères forestières (Meunier et al., 2015). Il est aussi conservé en bordure de jardins de case et des fermes dans les zones ouvertes (Vossen et al., 2007).

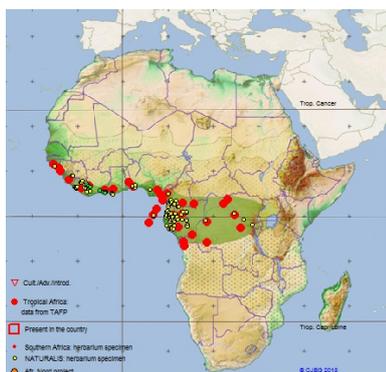


Figure 6 : Carte de répartition du Mubala - Source : <http://www.ville-ge.ch/cjb>

Description botanique sommaire

Le Mubala est un arbre atteignant 30m de haut et 1m de diamètre, parfois avec des contreforts irréguliers atteignant jusqu'à 3m de haut (Figure 8). Il possède un tronc irrégulier et souvent bosselé. Son écorce grisâtre à brun rougeâtre est mince. Ses feuilles sont composées bipennées avec 9 à 16 pennes, lesquelles portent chacune 13 à 20 paires de foliolules (Figure 7). Les fruits sont des grandes gousses ligneuses atteignant des dimensions de 50 cm x 10 cm x 2cm renfermant 5-8 graines (Meunier et al., 2015). A maturité, les graines sont éjectées de la gousse par dessiccation.

Utilisation des Produits Forestiers Non Ligneux (PFNLs)

La partie de l'arbre la plus utilisée est la graine. Celle-ci peut être consommée bouillie ou rôtie. On peut également en extraire de l'huile de cette dernière pour agrémenter des plats, des sauces. Elles sont également utilisées en médecine traditionnelle en usage externe pour soigner des blessures. Les extraits de feuilles et d'écorce sont quant à eux utilisés pour leurs propriétés anti-inflammatoires et anthelminthiques. Les cosses sèches sont utilisées comme combustible pour la cuisine (Vossen et al., 2007; Meunier et al., 2015). Au vu de ses nombreuses propriétés et de son usage très courant par les populations locales, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux molécules présentes dans ces arbres. La littérature présente notamment des articles concernant : les propriétés antidiarrhéiques des extraits de ces feuilles (Akah et al., 1999), le processus de fermentation des graines (Obeta, 1983; Achinewhu, 1986; Njoku et al., 1989), l'évaluation des valeurs nutritives des graines (Alinnor et al., 2011). Les recherches concernant les graines de cette essence sont très avancées et les sujets les concernant sont très nombreux dans la littérature scientifique.

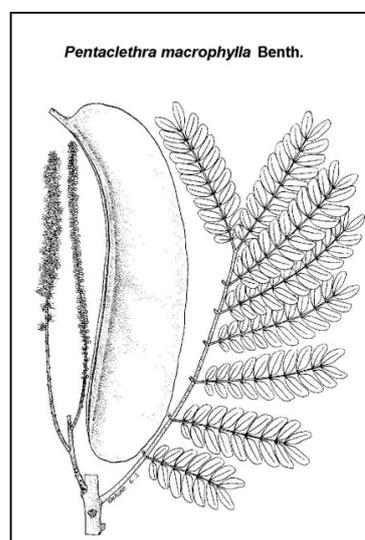


Figure 7 Schéma botanique du Mubala. Source: <http://www.ethnopharmacologia.org>



Figure 8: Aperçu d'un fût de Mubala

Propriétés du bois

Le bois du Mubala est brun rougeâtre avec un aubier blanchâtre-gris. Il possède un grain grossier et un contrefil assez marqué. Sa densité est de l'ordre de 950 kg/m³ (Gérard et al., 2016). Il possède un retrait volumique important que serait compris entre 11 et 16.5% (Vossen et al., 2007) et un coefficient de retrait volumique de 0.46%. Ses retraits tangentiel et radial seraient respectivement de 9.9% et 5.4% avec un ratio d'anisotropie de 1.8. Le point de saturation de la fibre vaudrait 25%. Mesurés à 12% d'humidité d'équilibre, le module de rupture serait de 122 Mpa, le module d'élasticité de 19.160 Mpa, la compression axiale de 78 Mpa et la dureté de Monnin de 8.8 (Gérard et al., 2016). Ce bois est utilisé localement comme bois de chauffe. Il est parfois utilisé pour la menuiserie et conviendrait également pour la fabrication de poteaux et de traverses de chemin de fer (Vossen et al., 2007).

2.2. Site de prélèvement des individus

Le matériel végétal d'Eyek et de Mubala a été récolté dans la région de l'Est du Cameroun au sein de la société forestière Pallisco, dans l'unité forestière d'aménagement (UFA) 10-044 assiette de coupe (AC) numéro 2 (Figure 9). Le climat dans cette zone géographique est de type Am selon la typologie Koppen-Geiger. Les températures moyennes sont de l'ordre de 23,2°C avec des précipitations moyennes annuelles de 1629mm⁶.

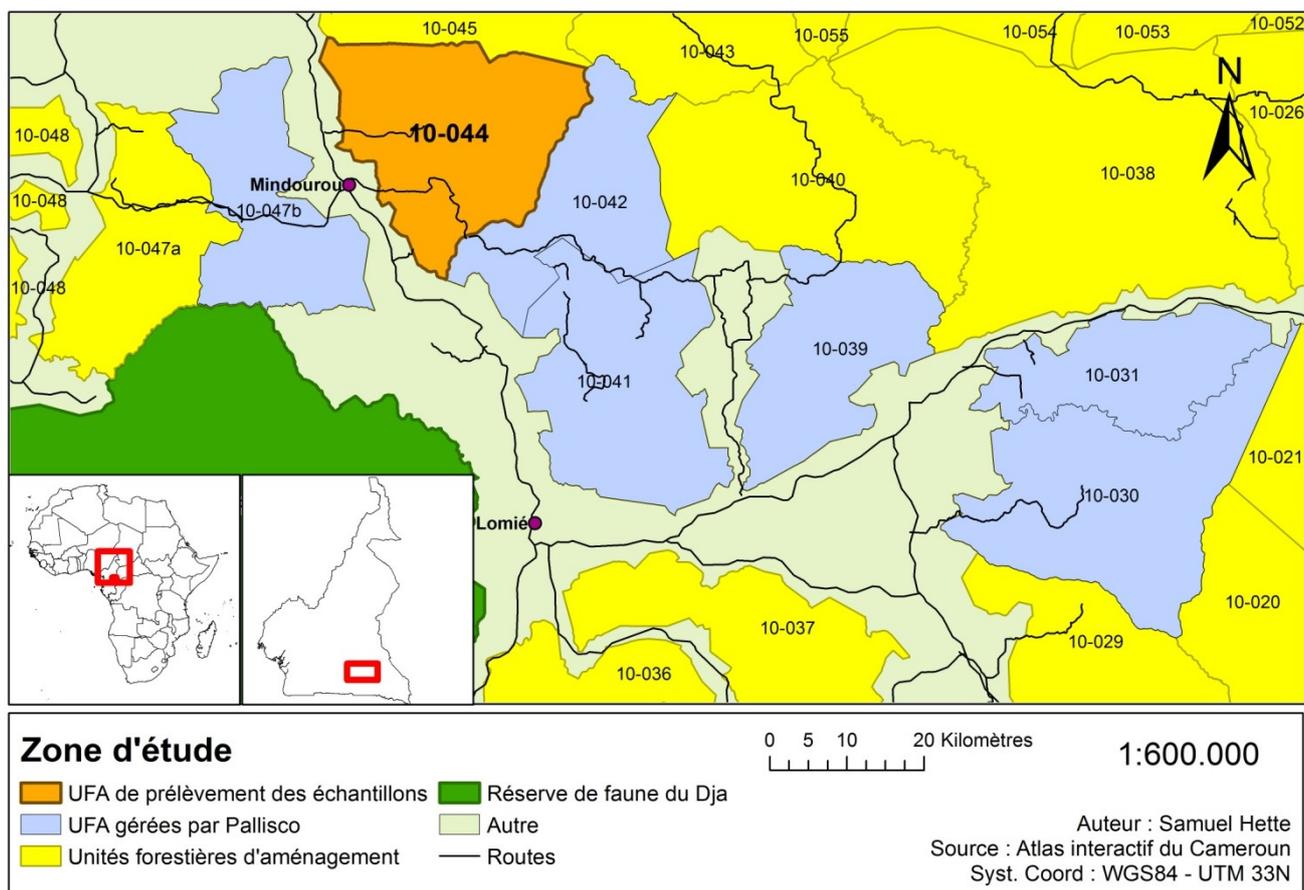


Figure 9 : Zone d'étude

⁶ Selon : <https://fr.climate-data.org/location/897208/>

2.3. Récolte sur le terrain, préparation des plateaux et transport

C'est l'entreprise Pallisco qui a pris en charge la sélection et l'abattage des arbres, ainsi que leur acheminement sur le parc à grumes de l'entreprise CIFM. Les critères de sélection des individus étaient la rectitude du fût et l'absence de défauts visibles. Pour chacune des deux essences, 4 arbres ont été prélevés. Les Mubala ont préférentiellement été prélevés lors de l'ouverture des axes routiers. Les Eyek ont été prélevés au sein du massif forestier. L'abattage des arbres a été réalisé selon les normes d'exploitation forestière à faible impact (Dirou, 2017). La coupe a eu lieu à une hauteur variable en fonction de la présence d'éventuels empâtements ou contreforts. Dans le cas présent, la hauteur moyenne d'abattage était de 1,3 m. Une fois les arbres abattus, la base des fûts a été tronçonnée pour éliminer les arrachements dus à l'abattage. Ensuite, un billon de 5 m a été tronçonné à la base de ce fût (Figure 10). Une fois ces deux coupes effectuées, les 8 billons de 5 m de long ont été marqués au marteau et à la peinture par l'équipe d'abattage sur les deux faces. Lorsqu'elles se trouvaient en forêt, les grumes ont été débusquées puis les 8 grumes ont ensuite été débardées vers le parc à grumes de Pallisco.

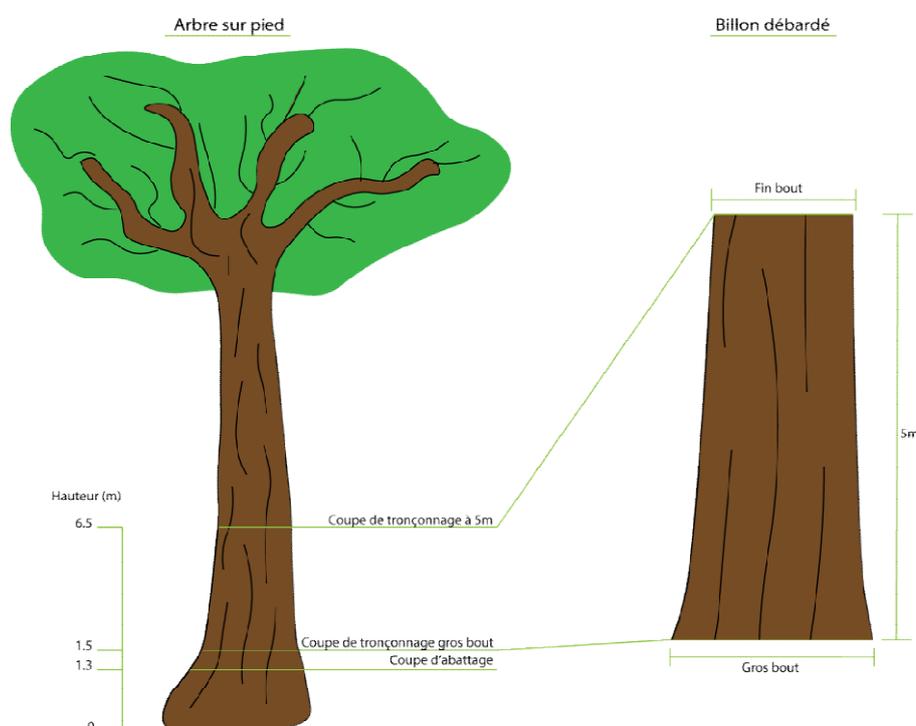


Figure 10 : Schéma des coupes d'abattage et de tronçonnage

En Octobre 2017, les 8 billons ont été préparés pour la découpe sur le parc à grume de la scierie CIFM. La préparation a consisté à tronçonner une longueur de 3 m (Figure 11) de manière à éliminer les défauts du bois visibles sur les sections transversales et en surface de ceux-ci. Ceci implique que les plateaux ne proviennent pas toujours de la même position dans l'arbre. Ils proviennent néanmoins toujours de la zone comprise entre 1.5 m et 6.5 m de hauteur, soit la base du tronc.

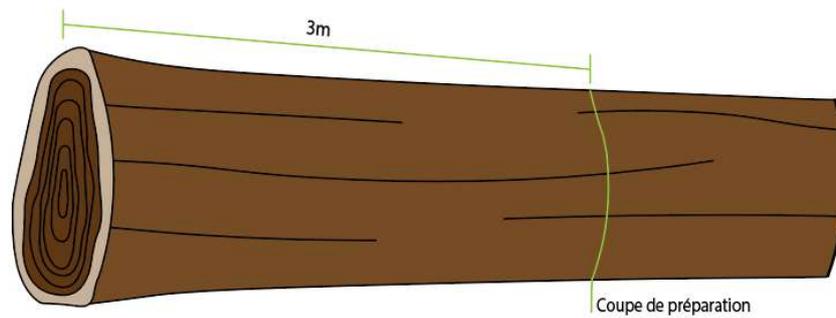


Figure 11 : Schéma de la coupe de préparation

Une fois la préparation effectuée, les 8 billons ont été amenés sur la première ligne de production de la scierie CIFM. Pour chaque billon, un plateau de cœur de 10 cm d'épaisseur a été scié. Dans la mesure du possible, les faces des plateaux ont été orientées perpendiculairement au plus grand diamètre passant par la moelle afin de minimiser la présence éventuelle de bois de réaction (Figure 12). Une fois l'orientation des plateaux déterminée, les billons ont été déposés sur le charriot de la scie à grume. L'opérateur s'est alors assuré de centrer la moelle visible sur les deux extrémités des billons dans les plateaux.

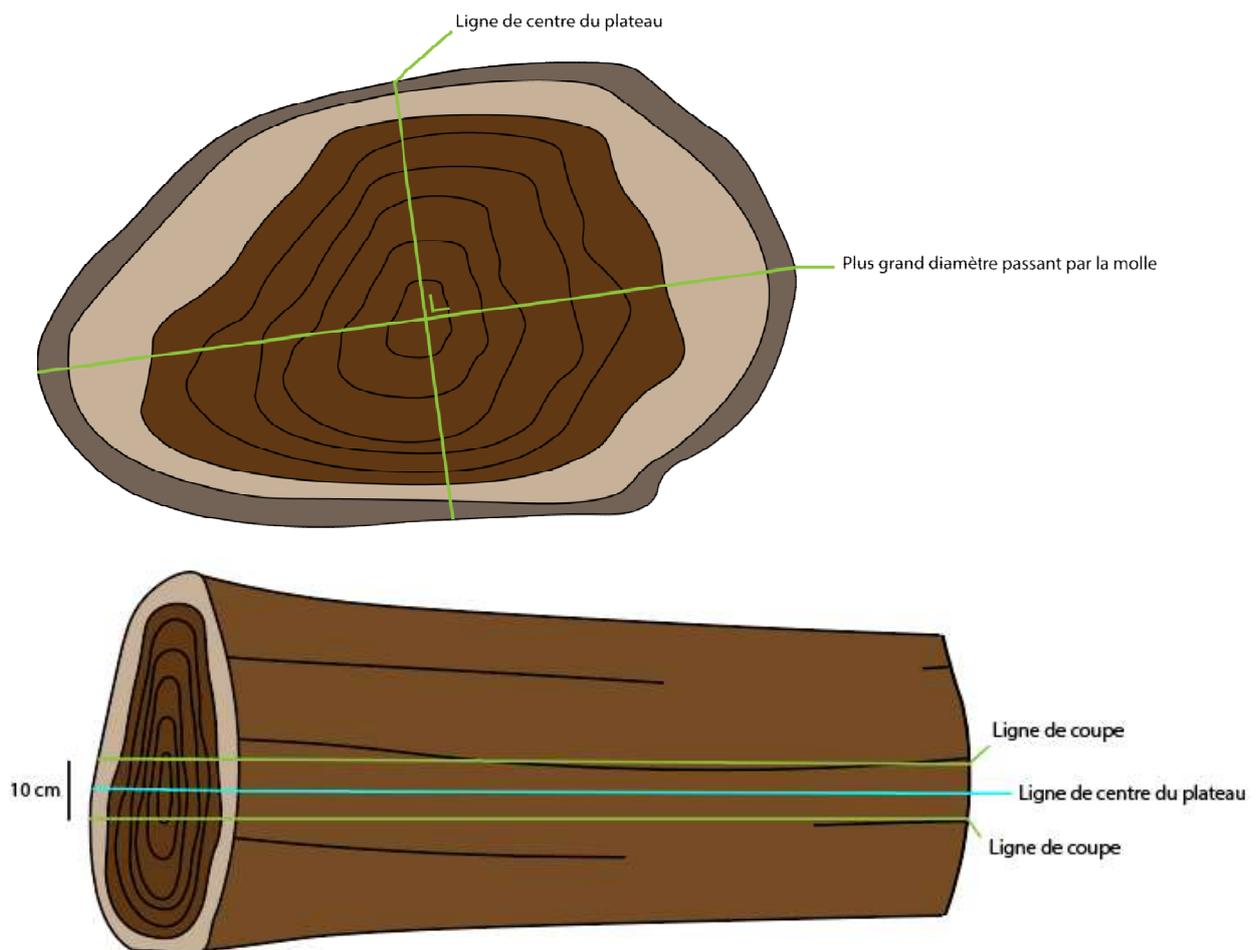


Figure 12 : Matérialisation de la ligne centrale du plateau (en haut) et de la découpe (en bas)

La dimension finale des plateaux est présentée dans le Tableau 1. Les arbres sont identifiés par la première lettre de leur nom commercial suivi d'un numéro correspondant à l'ordre chronologique d'abattage . Les trois grumes d'Eyeck qui possédaient un diamètre moyen supérieur à 100 cm ont été délignées en deux parties. Ce délignage a été effectué suivant la droite reliant la moelle visible sur les deux sections transversales des plateaux. A chaque découpe le numéro d'identification des arbres a été retranscrit sur une face et une tranche du plateau afin d'assurer la traçabilité du matériel. En ce qui concerne les trois plateaux de plus de 1m de large, outre les informations précitées, les lettres « A » ou « B » ont été retranscrites sur chaque demi-plateau afin de les différencier (Figure 13).

Tableau 1: Dimensions des 4 plateaux de Mubala et des 4 plateaux d'Eyeck

Plateau	l (cm)	H (cm)	L gros bout (cm)	L fin bout (cm)
M1	335	10	83	80,5
M2	340	10	77	73
M3	330	10	79	72
M4	326	10	87	80,5
E1	318	10	114	111
E2	329	10	122	119
E3	326	10	79	72
E4	317	10	145	128

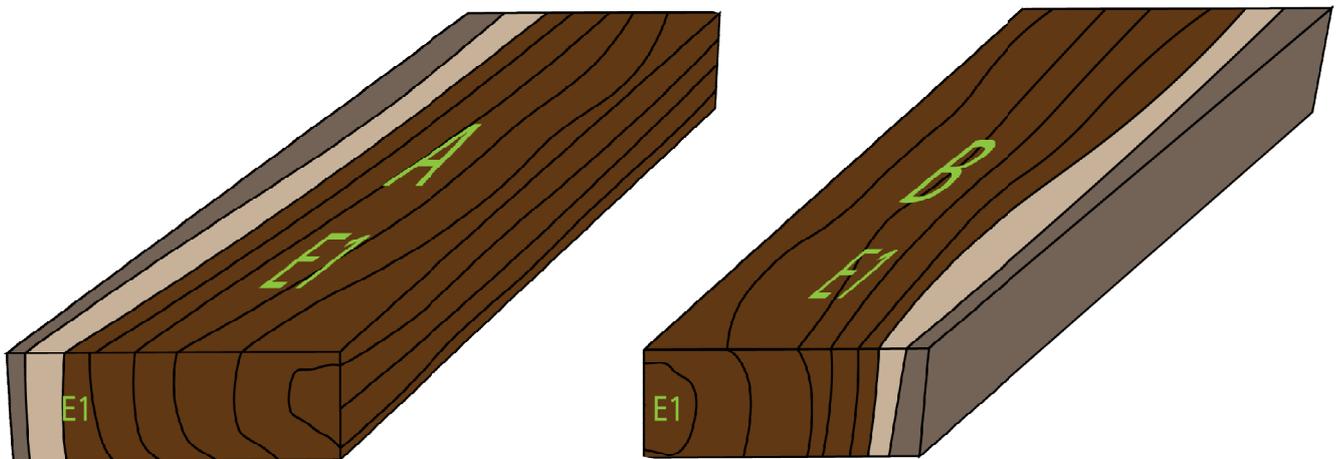


Figure 13 : Schéma de deux demi-plateaux d'Eyeck avec le marquage de traçabilité

Finalement, le matériel correspond à 4 plateaux de cœur de Mubala, 1 plateau d'Eyeck et 6 demi-plateaux d'Eyeck. Ces 11 pièces de bois ont ensuite été empilées pour former deux colis prêts à être exportés vers la Belgique. Des lattes de bois de section 2 x 2 cm ont été intercalées entre chaque pièce afin de permettre aux colis d'être ventilés et de sécher plus facilement en attendant le transport. Ils ont été cerclés et mis dans un conteneur avant expédition vers le port du Havre, à destination du groupe Pasquet Menuiserie. C'est donc l'administration de ce groupe qui s'est occupée du bon déroulement des opérations de transport maritime. Une fois le conteneur arrivé au Port du Havre, les bois ont été déchargés et transportés par camion jusqu'à Gembloux, au Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole (DEMNA). Le Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) a réceptionné les échantillons et les a entreposés dans l'atelier du DEMNA.

3. Méthodes

3.1. Choix des essais à réaliser

Ce choix a été opéré en se basant sur la littérature et les infrastructures présentes au Laboratoire de Technologie du Bois. La caractéristique la plus intéressante d'un bois tropical est sans nul doute sa durabilité naturelle. Cette durabilité naturelle peut être estimée sur base de la résistance qu'offre le duramen du bois aux attaques d'agents biologiques de dégradation du bois (champignons basidiomycètes, insectes et térébrants marins). Le Laboratoire de Technologie du Bois réalise des tests de détermination de la durabilité naturelle face aux champignons lignivores basidiomycètes. Il a été décidé de tester trois souches de champignons : le *Coniophora puteana* (Schum ex Fr) Karst., *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murril, *Coriolus versicolor* (Yun Zhi). Les deux premières souches appartiennent aux pourritures cubiques, elles s'attaquent principalement à la cellulose présente dans le bois. La dernière appartient aux pourritures fibreuses qui sont capables d'hydrolyser la lignine et la cellulose. Dans les deux cas, ces pourritures altèrent la structure du bois dégradant ainsi ses propriétés mécaniques.

L'Eyeck est très peu présent dans la littérature, les publications scientifiques concernant ses propriétés physiques et mécaniques sont quasi inexistantes. Certaines caractéristiques du bois du Mubala sont disponibles dans les ouvrages de Vossen et al. (2007) et Gérard et al. (2016) mais les méthodes de calcul de ces propriétés ne sont pas disponibles. Afin de pallier ce manque et de caractériser au mieux ces bois, des essais normalisés portant sur les propriétés physiques suivantes ont été réalisés : masse volumique, retrait volumique, retraits linéaires, point de saturation de la fibre et coefficient de retrait volumique. Par ailleurs, les propriétés mécaniques ont été mesurées afin de définir à quelle utilisation chaque essence pourra être affectée. Afin de déterminer les propriétés les plus pertinentes à étudier dans la période réduite qu'offre un travail de fin d'étude, il a été décidé de se baser sur l'*Atlas des bois tropicaux : Caractéristiques technologiques et utilisations* (Gérard et al., 2016). Cet ouvrage apparaît comme une compilation des informations connues sur les bois tropicaux. Les auteurs ont décidé de mettre en avant certaines caractéristiques telles que la dureté de Monnin, le module d'élasticité, la contrainte de rupture en flexion statique et la contrainte de rupture en compression axiale. Dans le cadre de ce TFE, ces 4 essais ont également été sélectionnés. En plus de ces derniers, il a été décidé de réaliser des essais de rupture en flexion dynamique, qui apportent une information concernant la résistance au choc du bois.

3.2. Utilisation des normes

Les diverses propriétés mesurées doivent pouvoir être comparées avec celles d'autres essences connues. C'est pourquoi il est nécessaire de travailler en conformité avec les normes en vigueur. Le choix des normes a été effectué en prenant en compte de leur étendue. C'est pourquoi les normes européennes et ISO ont été favorisées pour l'échantillonnage et le conditionnement du matériel végétal. Par ailleurs, c'est la norme la plus récente qui a été sélectionnée pour chaque essai. C'est pourquoi plusieurs normes NF ont été utilisées dans ce travail. De plus, ce sont ces normes qui ont également été utilisées par Gérard et al. (2016). Le Tableau 2 présente les normes ou documents de référence qui ont été utilisés pour chaque test.

Tableau 2: Récapitulatif des normes/documents de références utilisées pour déterminer les propriétés du bois.
 NF = Norme Française ; CEN = Comité Européen de Normalisation ; NBN : Bureau Belge de Normalisation

Propriété testée	Norme / Document de référence
Masse volumique	NF B51-005 : Bois - Détermination de la masse volumique (AFNOR, 1985a)
Retrait volumique	NF B51-006 : Bois – Détermination du retrait (AFNOR, 1985b)
Retrait linéaires	NF B51-006 : Bois – Détermination du retrait (AFNOR, 1985b)
Point de saturation de la fibre	Basé sur la méthodologie de l'article "Point de saturation de fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie" (Derbal et al., 2015)
Coefficient de retrait volumique	NF B51-006 : Bois – Détermination du retrait (AFNOR, 1985b)
Module d'élasticité	NF B51-016 : Bois – Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défauts (AFNOR, 1987a)
Contrainte de rupture en flexion statique	NF B51-008 : Bois – Essai de flexion statique (AFNOR, 1987b)
Contrainte de rupture en flexion dynamique	NBN 225 : Bois – Méthodes d'essai de qualification (IBN, 1956)
Contrainte de rupture en compression axiale	NF B51-007 : Bois – Essai de compression axiale (AFNOR, 1985c)
Dureté de Monnin	NF B 51-013 : Bois – Détermination de la dureté de Monnin (AFNOR, 1985d)
Résistance basidiomycètes : <i>Coniophora puteana</i> , <i>Coriolus versicolor</i> , <i>Gloeophyllum sp.</i>	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, 2005)

3.3. Détermination du nombre d'éprouvettes par essais

Le nombre minimum d'éprouvettes à préparer pour chaque essai a été déterminé conformément à la norme ISO 3129 : Bois – Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques de petites éprouvettes de bois net (ISO, 2012). Cette norme permet de définir le nombre minimum d'éprouvettes à tester en prenant en compte la variabilité de chaque propriété. Les quantités d'éprouvettes définies dans le tableau suivant permettraient de déterminer les différentes propriétés du bois avec un niveau de confiance de 0,95 (Tableau 3).

Tableau 3 : Nombre d'éprouvettes nécessaires à chaque essai

Propriété testée	Nombre d'éprouvettes minimal par essence
Masse volumique	15
Retrait volumique	39
Retraits linéaires	120
Module d'élasticité	61
Contrainte de rupture en flexion statique	35
Contrainte de rupture en compression axiale	26
Dureté de Monnin	44

Il est important de préciser que ce sont des quantités minimales. Lors des essais certaines éprouvettes sont utilisées pour déterminer plusieurs propriétés, notamment dans le cas du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en flexion statique. Cette norme s'applique seulement à la plupart des essais mécaniques et à certaines propriétés physiques. Les propriétés telles que la résistance unitaire à la flexion dynamique, le point de saturation de la fibre et la résistance aux champignons basidiomycètes ne sont donc pas concernées. La norme CEN 15083-1 concernant la détermination de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons basidiomycètes précise que le nombre minimal d'éprouvettes pour caractériser une essence est de 30.

Le Tableau 4 présente le nombre d'éprouvettes réellement testées. Les plateaux d'EyeK étant de dimensions supérieures à ceux de Mubala, il a été possible de prélever plus d'éprouvettes dans ceux-ci. C'est pourquoi le nombre d'éprouvettes d'EyeK est systématiquement supérieur ou égal à celui du Mubala.

Tableau 4 : Récapitulatif des propriétés testées et du nombre d'échantillons utilisés

Propriété testées	Nombre d' éprouvettes	
	Mubala	EyeK
Masse volumique	66	108
Retrait volumique	66	108
Retraits linéaires	130	140
Point de saturation de la fibre	40	40
Module d'élasticité	68	110
Contrainte de rupture en flexion statique	68	110
Contrainte de rupture en flexion dynamique	66	108
Contrainte de rupture en compression axiale	68	110
Dureté de Monnin	66	108
Résistance basidiomycètes : <i>Coniophora puteana</i> , <i>Coriolus versicolor</i> , <i>Gloeophyllum trabeum</i>	64 par souche de champignon	80 par souche de champignon

3.4. Façonnage des éprouvettes

Une fiche d'encodage (Annexe 1) a été conçue afin de récolter les caractéristiques de chaque plateau : la largeur en 6 points équidistants, l'épaisseur d'aubier de part et d'autre du plateau aux mêmes 6 points et la présence de défauts (trous de vers, déviations de fil, fente de cœur, roulure,...). Une fois les mesures réalisées, un échantillon de la section transversale du plateau a été prélevé en tronçonnant du côté de la largeur la plus fine. Cet échantillon a été réservé pour la description macroscopique des bois. Ensuite, les plateaux encore entiers ont été délimités de manière à obtenir deux demi-plateaux. Le trait de scie a été matérialisé comme la ligne reliant la moelle apparente sur les deux faces du plateau à l'aide d'un élastique tendu. Une des moitiés de chaque plateau a été tronçonnée en deux de manière à obtenir un quart de plateau de 162 cm avec le moins de défauts et un deuxième d'une longueur approximative de 120 cm et de qualité plus variable. Le premier quart de plateau numéroté A est réservé pour confectionner les éprouvettes de section carrée de 20 x 20 mm pour les tests physico-mécaniques et de section rectangulaire de 10 x 25 mm pour la durabilité. L'autre partie, numérotée B, est utilisée pour réaliser les éprouvettes de section carrée de 45 x 45 mm destinées aux tests de retrait linéaires et de détermination du point de saturation de la fibre (Figure 14).

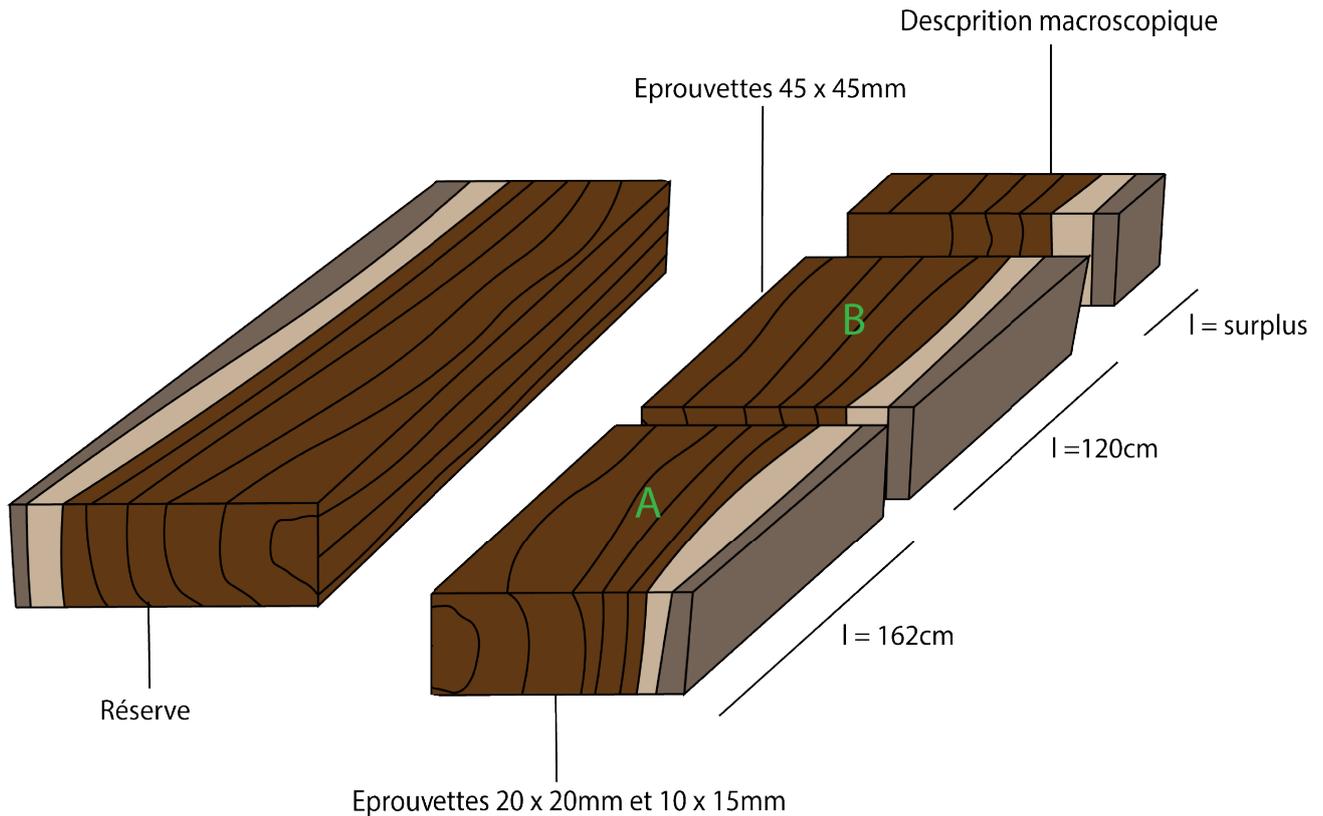


Figure 14 : Schéma de découpe des plateaux

3.4.1. Découpe du plateau A et sélection des échantillons

Le plateau A a été délimité en lamelles de 32 x 100 x 1620 mm. Ces dernières ont ensuite été recoupées en 4 tronçons de 400 mm de longueur. Les échantillons de bois ont été stockés à ces dimensions pour accélérer leur séchage. Un suivi d'humidité a alors été mis en place pour estimer le temps de séchage des bois. Une fois que les lots atteignent 34 et 27% en moyenne pour l'Eyeke et le Mubala, le tronçon de chaque lamelle possédant le plus de défauts (pente de fil, nœuds) a été réservé pour l'essai de durabilité naturelle. Parmi ceux-ci, 5 tronçons provenant de 5 lamelles différentes ont été sélectionnés pour chaque arbre d'Eyeke. La même sélection est opérée pour 4 tronçons chaque arbre de Mubala. Ils sont ensuite délimités en 4 barreaux de 20 x 32 x 400 mm. Les barreaux ont été amenés à leur section définitive de 15 x 25 mm par une succession de passages à la raboteuse. Chaque barreau a finalement été coupé en 7 échantillons potentiels de 15 x 25 x 50 mm, donnant ainsi 28 échantillons par tronçon (Figure 15). Parmi ces 28 échantillons, 6 échantillons ont été sélectionnés pour chacune des souches de *Coniophora* et de *Coriolus*, 4 ont été sélectionnés pour *Gloephyllum* et 5 ont été prélevés pour déterminer la masse sèche initiale.

Les trois autres tronçons restant de chaque lamelle ont été délimités en trois barreaux de 30 x 32 x 400 mm. Ensuite, chaque barreau a été raboté aux dimensions de 20 x 20 x 400 mm (Figure 15). Les échantillons ont ensuite été triés de manière à en sélectionner 2 pour les tests de module d'élasticité (MOE) et 2 pour les tests de flexion dynamique (Choc) par lamelle. Les critères des sélections étaient: rectitude du fil, absence de défauts, absence de nœuds et débit sur quartier. Une fois sélectionnées, les échantillons ont été mis à longueur : 360 mm pour le MOE et 300 mm pour le choc.

Durant l'ensemble du processus un schéma strict de découpe a été établi afin de garantir la traçabilité des échantillons. Il permet par la suite d'identifier l'origine chaque échantillon au sein du matériel végétal. Le schéma du processus de découpe est présenté à l'Annexe 2.

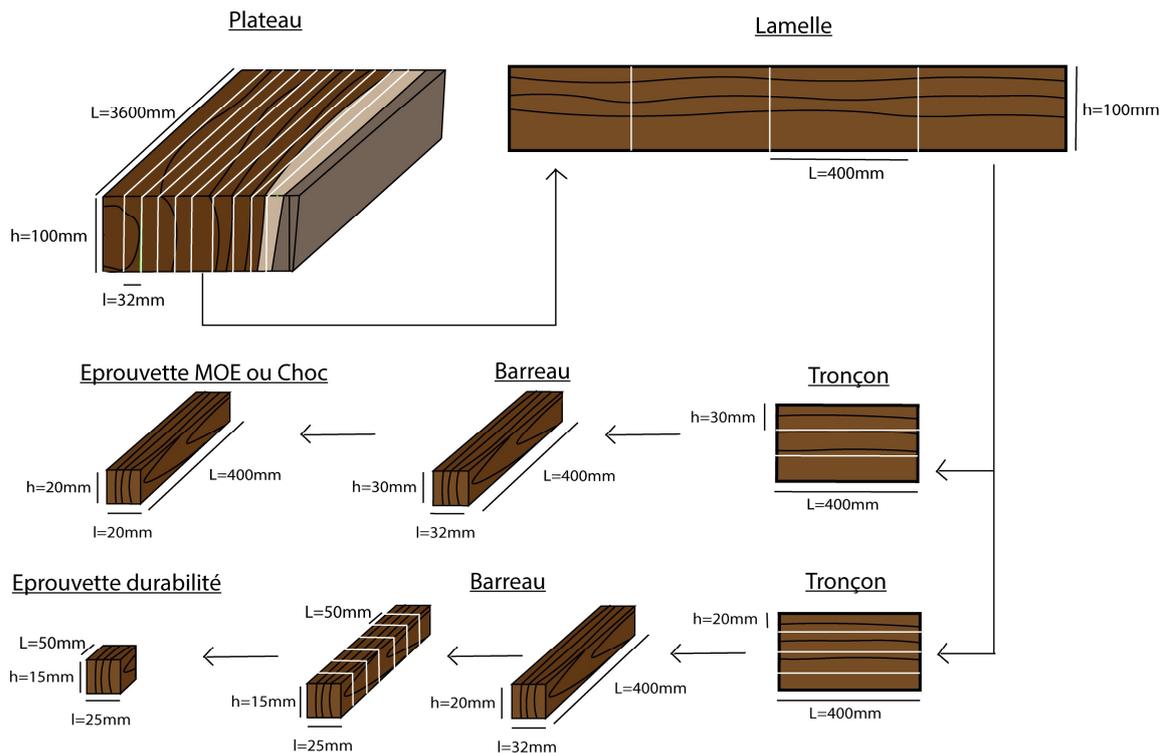


Figure 15 : Schéma découpe des plateaux A pour le façonnage des éprouvettes destinées aux essais physico-mécanique et de durabilité naturelle

Les éprouvettes prévues pour les tests de contrainte de rupture en flexion statique, de compression axiale, de dureté, de masse volumique et de retrait volumiques ont été découpées dans les éprouvettes de module d'élasticité ou de choc après essai. Le test du module d'élasticité étant non destructif, les éprouvettes testées ont été réutilisées pour réaliser le test de contrainte de rupture en flexion statique. Une fois l'éprouvette brisée par celui-ci, les éprouvettes de compression axiales sont découpées dans les parties intactes. Les éprouvettes de dureté de Monnin et de masse volumique ont été découpées dans les éprouvettes brisées par le test de flexion dynamique. Pour finir, les échantillons de masse volumique sont réutilisés pour le retrait volumique (Figure 16).

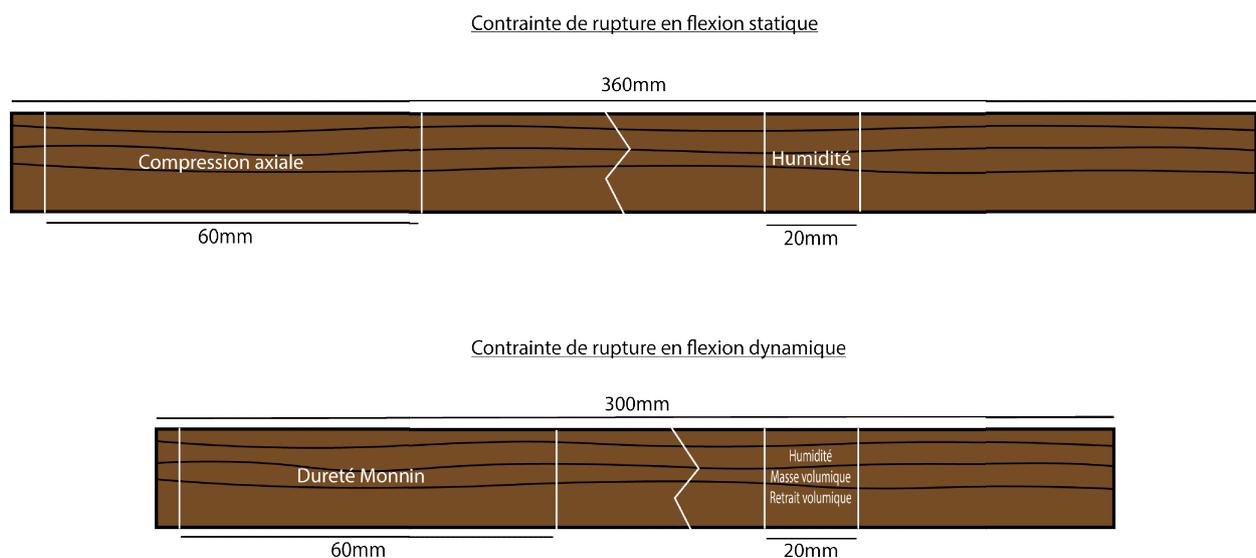


Figure 16 : Schéma de découpe des éprouvettes de contrainte de rupture statique et dynamique après essai

3.4.2. Découpe du plateau B et sélection des échantillons

Le plateau B est réservé pour des échantillons de sections plus importantes. Il est délégué en lamelles de 50 x 100 x 1200 mm. Ensuite, ces lamelles sont recoupées dans leur longueur et leur hauteur pour obtenir 4 barreaux de 50 x 50 x 600 mm. Ces barreaux sont alors rabotés aux dimensions de 45 x 45 x 600 mm. A ce stade, une sélection est opérée pour retenir un maximum de barreaux sur quartier. Les barreaux sélectionnés sont coupés aux deux extrémités pour obtenir deux éprouvettes de 45 x 45 x 10 mm (Figure 17).

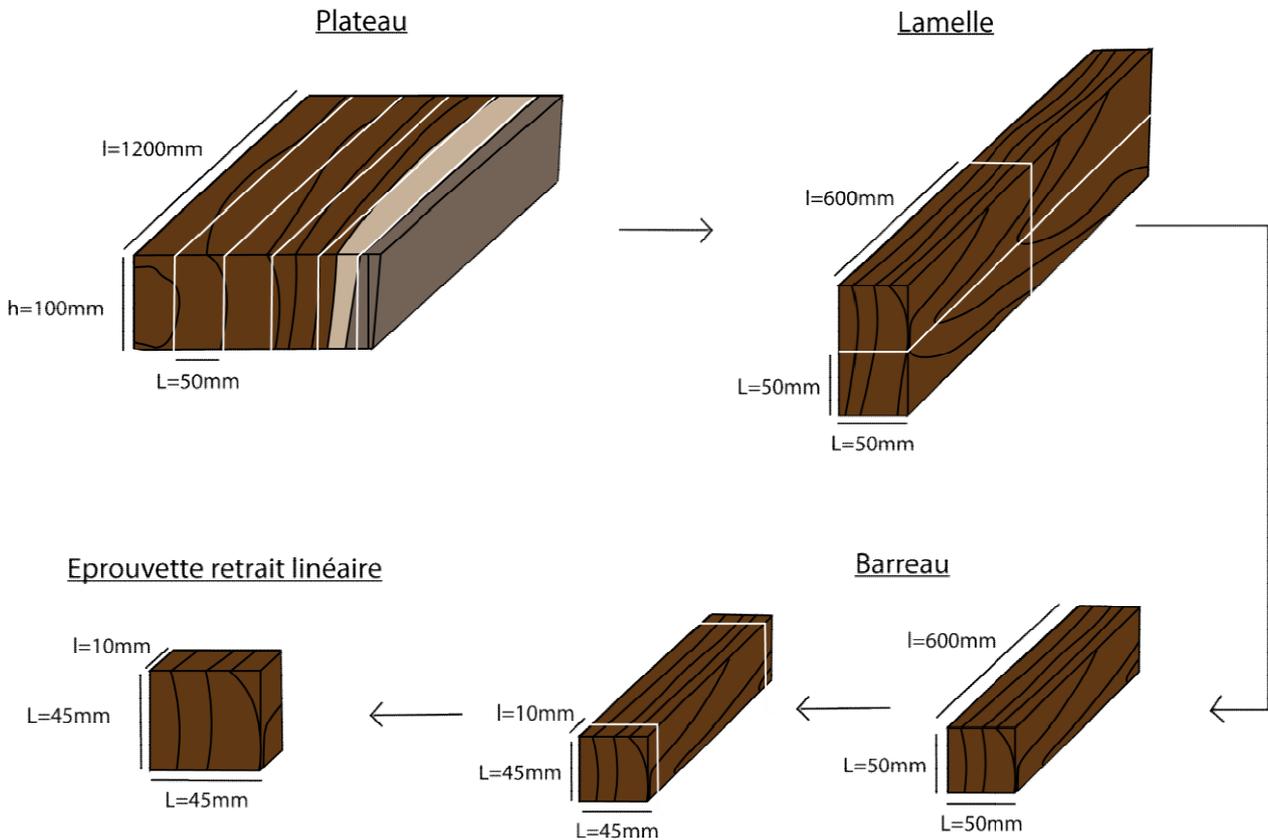


Figure 17 : Schéma de découpe du plateau B

3.4.3. Tableau récapitulatif des découpes

Le Tableau 5 reprend pour chaque test le nombre d'échantillons découpés ainsi que leurs dimensions et leurs origines. La largeur représentant toujours la dimension radiale de l'éprouvette, la hauteur la dimension tangentielle et la longueur la dimension axiale.

Tableau 5 : Récapitulatif du nombre d'éprouvette, de leur dimensions et de leur provenance pour chaque test

Propriété testée	Nombre d'éprouvettes		H (m m)	L (m m)	l (m m)	Origine
	Mubala	Eyek				
Masse volumique	66	108	20	20	20	Découpe éprouvette flexion dynamique
Retrait volumique	66	108	20	20	20	Même éprouvette que masse volumique
Retrait linéaires	130	140	45	45	10	Découpe plateau B
Point de saturation de la fibre	40	40	45	45	10	Découpe plateau B
Module d'élasticité	68	110	20	20	360	Découpe plateau A
Contrainte de rupture en flexion statique	68	110	20	20	360	Eprouvette flexion dynamique
Contrainte de rupture en flexion dynamique	66	108	20	20	300	Découpe plateau A
Contrainte de rupture en compression axiale	68	110	20	20	60	Découpe éprouvette flexion statique
Dureté de Monnin	66	108	20	20	60	Découpe éprouvette flexion dynamique
Durabilité naturelle : <i>Coniophora puteana</i> , <i>Coriolus versicolor</i> , <i>Gloeophyllum sp.</i>	64/ souche de champign on	80 / souche de champign on	15	25	50	Découpe plateau A

3.5. Conditionnement des éprouvettes

Afin de comparer les résultats obtenus avec la littérature, les essais mécaniques doivent tous être effectués à une humidité d'équilibre du bois de 12%. En effet, la teneur en humidité du bois influence ses performances mécaniques (Kollmann et al., 1968). A titre d'exemple, la norme NF B51-007 précise qu'une variation de 1% d'humidité du bois peut faire varier de 4% la valeur de la contrainte de rupture en compression axiale. La résistance du bois aux contraintes mécaniques augmente avec la diminution de son humidité d'équilibre. Connaître l'humidité au moment du test est donc primordiale. Le taux hygroscopique du bois dépend de l'humidité relative de l'air et de sa température. Pour obtenir une humidité d'équilibre de 12%, la combinaison d'humidité de l'air et de température préconisée par la norme ISO 3129 est 65% H pour 20°C. Cependant d'autres combinaisons sont calculables à l'aide du diagramme d'équilibre hygroscopique des bois (Figure 18).

Figure 18 : Courbe d'équilibre hygroscopique du bois - Source: <http://philippe.berger2.free.fr>

3.6. Essais physiques

3.6.1. Humidité

L'humidité du bois est déterminée selon la norme NF B51-004 « Bois – Détermination de l'humidité » (AFNOR, 1985e). La masse de l'échantillon humide (mh) est prise au moment où l'humidité doit être connue. Ensuite, l'échantillon est séché dans une étuve ventilée conditionnée à 103 °C jusqu'à ce que la variation de la masse de l'échantillon entre deux pesées soit inférieure à 1%. L'échantillon est alors à l'état anhydre et sa masse (ma) est alors mesurée.

L'humidité (H), en pourcent, est alors calculée comme suit :

$$H = \frac{(mh - ma)}{ma} * 100$$

3.6.2. Masse volumique

Le calcul de la masse volumique à 12% d'humidité du bois est effectué selon la norme NF B51-005 (AFNOR, 1985a). Les échantillons de 20 x 20 x 20 mm sont placés dans une chambre conditionnée à 20°C et 65% d'humidité afin qu'ils se stabilisent à une humidité d'équilibre de 12%. La masse (m) des échantillons à 12% est déterminée à l'aide d'une balance de précision et le volume (V) calculé sur base d'une pesée hydrostatique. Pour finir, l'humidité des échantillons est calculée en regard du point précédent.

La masse volumique (ρ) à 12% d'humidité, exprimée en kg/m³, est alors calculée selon la formule suivante :

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}}$$

Si la masse et le volume ont été mesurés à une humidité d'équilibre différente de 12%, la formule de correction suivante est appliquée pour obtenir la masse volumique à 12% :

$$\rho_{12\%} = \rho_H * \left(\frac{112}{100 + H} \right) * \left(\frac{100 - Cr * (H_s - H)}{100 - Cr * (H_s - 12)} \right)$$

Où

ρ_H est la masse volumique à l'humidité H au moment de la mesure, exprimée en kg/m³ ;

H est l'humidité, exprimée en pourcent (%), au moment de la mesure ;

H_s est l'humidité, exprimée en pourcent (%), correspondante au point de saturation de la fibre ;

Cr est le coefficient de retrait volumique (calculé au point 3.6.6.), exprimé en pourcent(%), correspondant à la variation de volume induite par une variation de 1% d'humidité d'équilibre du bois.

3.6.3. Retrait volumique total

La caractérisation de cet indice est opérée selon la norme NF B51-006 (AFNOR, 1985b). Il correspond à la perte de volume, en pourcent, entre l'état saturé et l'état anhydre d'un échantillon de 20 x 20 x 20 mm. Pour ce faire, les éprouvettes de masse volumique sont réhydratées en les plaçant dans de l'eau déminéralisée pendant 1 semaine. Une fois à l'état saturé, le volume (V_s) des échantillons est déterminé par pesée hydrostatique. Ensuite, les échantillons sont séchés dans une étuve ventilée à 103°C jusqu'à masse constante

(variation de masse inférieure à 1% entre deux mesures espacées de 4h. Pour finir le volume de l'échantillon est déterminé à l'état anhydre (V_a).

Le retrait volumique total (R_v), exprimé en pourcent (%), est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$R_v = \frac{(V_s - V_a)}{V_s} * 100$$

3.6.4. Retraits linéaires

Le calcul des retraits linéaires radial et tangentiel est opéré suivant la norme NF B51-006 (AFNOR, 1985b). Les éprouvettes étant de faible dimension, il est nécessaire de les réhydrater pour prévenir tout risque de séchage en deçà du PSF. Pour ce faire, les échantillons sont immergés dans des bacs d'eau déminéralisée pendant trois jours. Trois jours étant la durée nécessaire pour obtenir des taux d'humidité de 56% et 38% respectivement pour l'EyeK et le Mubala. Le point de saturation de la fibre étant généralement égal à 30%, l'hypothèse est faite que les échantillons sont saturés. Avant de prendre les premières mesures, deux lignes sont tracées au centre de l'échantillon, une dans le sens radial et une dans le sens tangentiel. Ces lignes repères permettent de réitérer les mesures aux mêmes endroits. Les dimensions radiale (R_s) et tangentielle (T_s) sont alors prises au centre de chaque échantillon à l'aide d'un instrument de mesure précis au millième près. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air libre, puis en chambre contrôlée et finalement en étuve ventilée à 103°C pour les ramener à un état anhydre. C'est à l'état anhydre que les dimensions radial (R_a) et tangentiel (T_a) sont recalculées pour déterminer le retrait linéaire radial (R_r), le retrait linéaire tangentiel (R_t) et le ratio R_t/R_r .

Les retraits linéaires, exprimés en pourcent (%), sont calculés selon la formule suivante :

$$R_r = \frac{(R_s - R_a)}{R_s} * 100 \quad R_t = \frac{(T_s - T_a)}{T_s} * 100$$

L'examen des 140 et 130 échantillons, respectivement d'EyeK et de Mubala, a montré que certains d'entre eux n'étaient pas sur quartier. Une différence a alors été faite entre les échantillons parfaitement sur quartier (Q), les échantillons sur faible faux quartier (FFQ) et les échantillons sur faux quartiers (FQ). Les échantillons sur faible faux quartier ont été définis comme les échantillons n'étant pas parfaitement sur quartier mais dont les dimensions radiale et tangentielles sont identifiables. Les échantillons sur faux quartiers sont des échantillons dont les dimensions radiale et tangentielle ne peuvent être distinguées. Elles ont alors été définies par l'opérateur et notées pour éviter de les intervertir à la prochaine mesure. Cette mesure de précaution a été effectuée pour vérifier l'influence de la qualité de l'échantillon sur le retrait radial.

3.6.5. Point de saturation de la fibre

Le calcul du point de saturation de la fibre est effectué sur un sous-échantillonnage des éprouvettes de retraits linéaires. Pour chaque arbre, 10 éprouvettes de retrait ont été sélectionnées. Les lignes repères tracées pour le test de retrait linéaire sont réutilisées pour assurer la reproductibilité des mesures. Une fois les dimensions radiale et tangentielle relevées à l'état saturé, les éprouvettes sont maintenues en chambre climatique sous trois modalités de température et d'humidité différentes. La première combinaison est 20°C pour 85%RH ce qui correspond à une humidité d'équilibre du bois de 18%. Une fois que la masse des échantillons semble stabilisée, l'hypothèse est faite que les bois sont en équilibre avec les conditions de la chambre climatique. Les dimensions radiale et tangentielle sont alors remesurées et la surface de l'échantillon est calculée comme étant le produit des deux mesures. Pour vérifier l'humidité, 20 éprouvettes par essence de retrait linéaire sont testées comme expliqué au point 6.1. Une fois à l'état anhydre, l'échantillon est repesé pour obtenir l'humidité des éprouvettes de PSF et ses dimensions sont prises pour le calcul du retrait volumique. L'opération est ensuite

répétée pour des humidités d'équilibre du bois de 15% (20°C et 75% H) et 12% (20°C et 65%H). Pour chaque modalité d'humidité d'équilibre, la perte surfacique par rapport à l'état saturé est calculée pour chaque échantillon.

$$Psh = ss - sh$$

Où :

Psh est la perte surfacique par rapport à l'état saturé, exprimée en mm², pour l'humidité h d'équilibre du bois ;

sh est la surface de l'échantillon, exprimée en mm², à l'humidité h ;

ss est la surface de l'échantillon, exprimée en mm², à l'état saturé.

Ensuite, la moyenne de perte surfacique par modalité d'humidité est calculée pour chaque essence. Pour finir, la fonction obtenue par régression linéaire de l'humidité en fonction de la perte surfacique permet, par extrapolation, d'observer la valeur d'humidité pour laquelle le retrait surfacique est nul, c'est-à-dire le point de saturation de la fibre, exprimé en pourcent.

3.6.6. Coefficient de retrait volumique

Le coefficient de retrait volumique (Cr), exprimé en pourcent (%), correspond à la variation de volume induite par une variation de 1% d'humidité d'équilibre du bois, en dessous du point de saturation de la fibre (Psf). Il est calculé selon la formule suivante :

$$Cr = \frac{Rv}{Psf}$$

Où :

Psf est les point de saturation de la fibre, exprimé en pourcent (%) ;

Rv est le retrait volumique total, exprimé en pourcent (%).

3.7. Essais mécaniques

Les essais mécaniques tels que le module d'élasticité, la contrainte de rupture en flexion statique, la contrainte de rupture en compression axiale et la dureté Monnin ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essais « Instron 5582 » (Figure 19). Le test de rupture en flexion dynamique est, quant à lui, effectué au moyen d'un mouton pendule Amsler (Figure 20). Au moment de réaliser les tests, les éprouvettes sont pesées, mesurées et juste après l'essai, un échantillon est prélevé afin d'être déshydraté pour déterminer l'humidité de l'éprouvette au moment du test.



Figure 20: Machine d'essais Instron 5582



Figure 19: Mouton pendule Amsler

3.7.1. Module d'élasticité

Le module d'élasticité, encore appelé module de Young, correspond à la constante qui relie la contrainte de compression et la déformation induite par une charge sur une pièce de bois dans le domaine plastique. Cette valeur est calculée en suivant les indications de la norme NF B51-016 (AFNOR, 1987a).

L'éprouvette de 20 x 20 x 360 mm est placée sur un banc de flexion. Une fois l'éprouvette placée, celle-ci est soumise à trois cycles de chargement/déchargement, la charge étant appliquée tangentielle aux cernes en deux points distants de 160 mm (Figure 21). Un cycle consiste à charger l'éprouvette, à vitesse constante, pour arriver à une pression P1 de 600 N, en 30+/-10 secondes. Ensuite, l'éprouvette est déchargée pour arriver à une pression P2 de 200 N. A P2, la flèche f1 est mesurée. Pour finir, l'éprouvette est rechargée pour atteindre 600 N et la flèche f2 est mesurée. L'humidité des éprouvettes lors du test est déterminée après la rupture de l'éprouvette lors du test de contrainte de rupture en flexion statique. L'humidité de l'éprouvette est alors connue et une comparaison des masses avant chaque essai permet de donner l'humidité au moment du test de module d'élasticité.

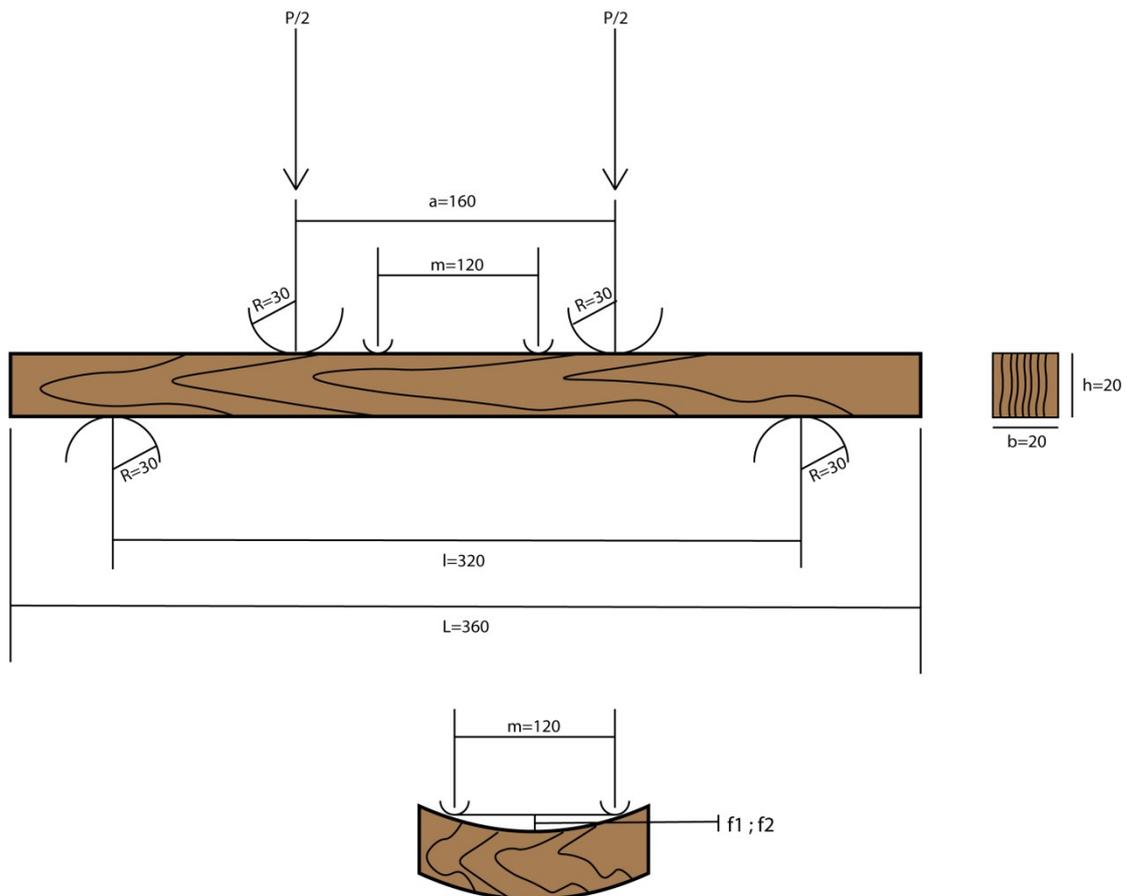


Figure 21: Schéma du dispositif de calcul de flèche

Le module d'élasticité en flexion tangentielle aux cernes du bois (E_{LH}), exprimé en Mégapascals (MPa), est calculé pour chaque éprouvette à l'aide de la formule suivante :

$$E_{LH} = \frac{3 P (l - a) m^2}{8 b h^3 f}$$

Où :

- P est la charge totale de flexion en newtons (N), égale à la moyenne entre les charges maximales P1 et minimales P2 appliquées au cours des 3 cycles ;
- l est la distance, exprimée en millimètres (mm), entre les axes des appuis cylindriques ;
- a est la distance, exprimée en millimètres (mm), entre les axes des têtes de chargement ;
- m est la distance, exprimée en millimètres (mm), entre les axes des cylindres du support de l'instrument de mesure de la flèche ;
- b est la largeur, exprimée en millimètres (mm), de l'éprouvette ;
- h est la hauteur, exprimée en millimètres (mm), de l'éprouvette ;
- f est la flèche, exprimée en millimètres (mm), de l'éprouvette dans la zone de flexion pure égale à la moyenne des différences entre les flèches maximale f1 et f2 relevées au cours des trois cycles.

3.7.2. Contrainte de rupture en flexion statique

La contrainte de rupture en compression tangentielle aux cernes est la valeur de pression obtenue lorsque l'éprouvette cède sous un effort de flexion progressivement croissant. Cette valeur est calculée selon la norme NF B51-008 (AFNOR, 1987b).

L'éprouvette est placée sur le banc de flexion de manière à ce que la charge soit appliquée parallèlement aux cernes du bois. Une fois l'éprouvette placée, une charge (P) lui est appliquée en deux points distants de 160 mm (Figure 22). La valeur de cette charge augmente de manière constante jusqu'à rupture de l'éprouvette. La vitesse de chargement est adaptée afin que la durée de l'essai soit comprise entre 1,5 et 2 minutes. Après la rupture de l'éprouvette, un morceau de 20 x 20 x 20 mm est prélevé afin de déterminer l'humidité au moment du test.

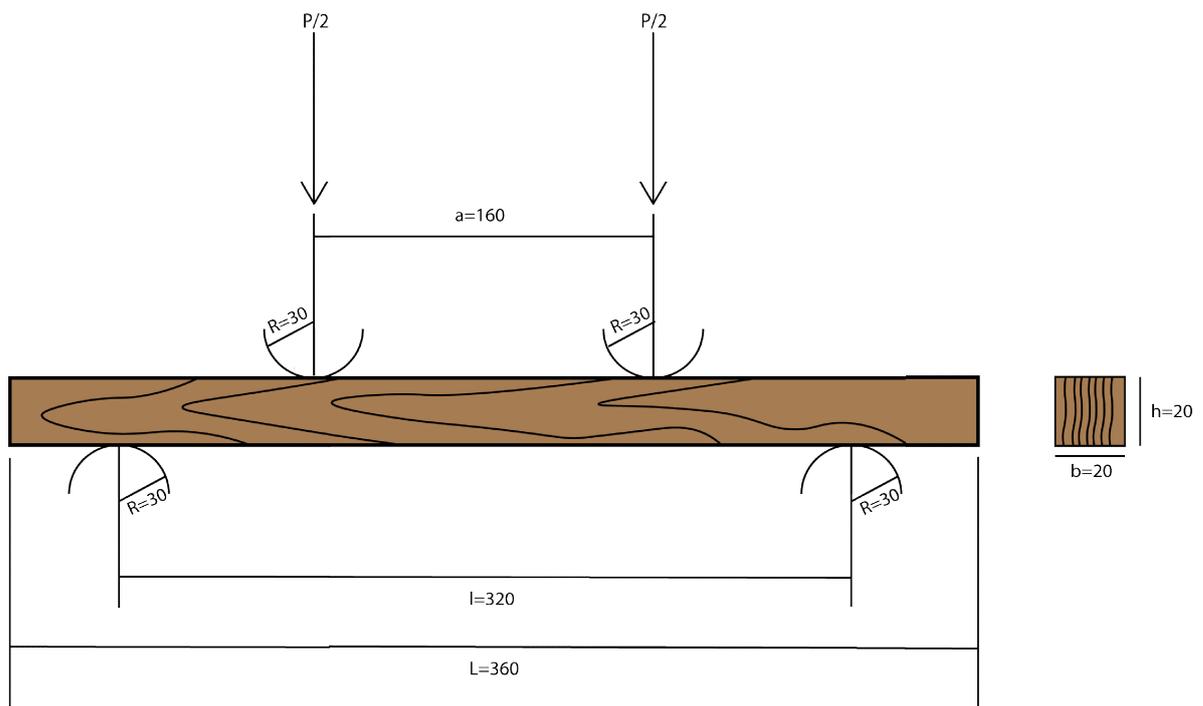


Figure 22 : Schéma du dispositif d'essais de contrainte de rupture en flexion

Une fois la charge appliquée à la rupture connue, la contrainte de rupture en flexion statique (σ_{FH}) de l'éprouvette à l'humidité H, exprimée en mégapascal (Mp) est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_{FH} = \frac{3P(l - a)}{2bh^2}$$

Où :

- P est la charge totale appliquée à la rupture en flexion, en newtons (N) ;
- l est la distance, en millimètres (mm), entre les axes des appuis cylindriques ;
- a est la distance, en millimètres (mm), entre les axes des têtes de chargement ;
- b est la largeur, en millimètres (mm), de l'éprouvette ;
- h est la hauteur, en millimètres (mm), de l'éprouvette.

3.7.3. Contrainte de rupture en compression parallèle aux fibres

La contrainte de rupture en compression parallèle aux fibres est la valeur de pression obtenue lorsque l'éprouvette cède sous un effort de compression progressivement croissant. Cette valeur est calculée selon la norme NF B51-007 (AFNOR, 1985c).

L'éprouvette de 60 x 20 x 20 mm est placée dans un dispositif d'application d'effort uniaxial composé de deux plateaux dont un est muni d'une rotule (Figure 23). L'éprouvette est installée verticalement afin d'appliquer la charge parallèlement aux fibres. Ensuite, un effort croissant et continu est appliqué jusqu'à rupture de l'éprouvette. La vitesse d'application de la charge est adaptée pour chaque essence de manière à ce que la durée de l'essai soit comprise entre 1,5 et 2 minutes. Finalement, l'humidité d'équilibre est calculée sur toute l'éprouvette en fonction de la masse prise avant le test.

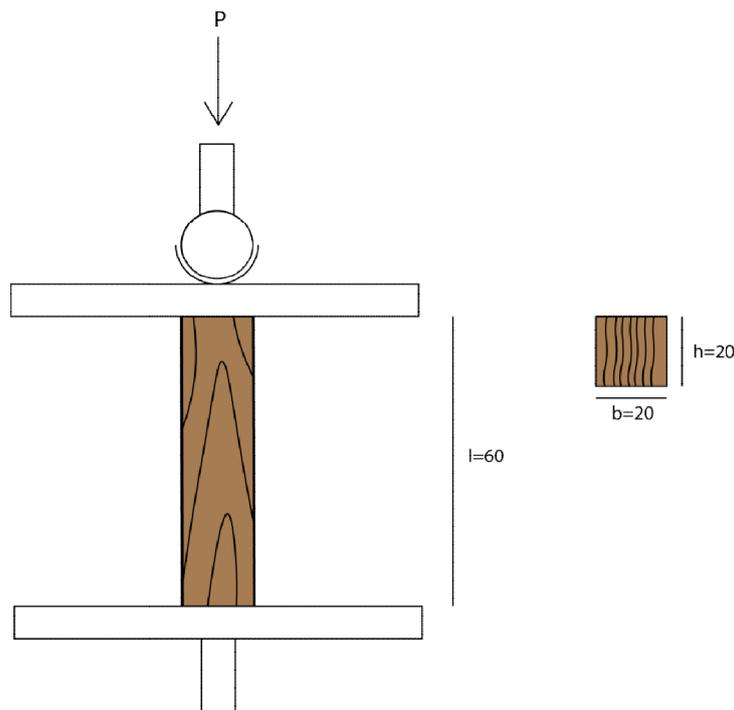


Figure 23 : Schéma du dispositif d'essais en compression axiale

La contrainte de rupture (C_H) en compression axiale, exprimée en mégapascals (Mp), est calculée pour chaque éprouvette à l'humidité H selon la formule suivante :

$$C_H = \frac{P}{bh}$$

Où :

P est la charge maximale en newtons ;

b et h sont les dimensions, en millimètre de la section transversale de l'éprouvette.

3.7.4. Dureté de Monnin

La dureté de Monnin, encore appelée dureté Chalais-Meudon, indique la résistance à la pénétration d'un cylindre de rayon connu chargé avec un poids donné sur la face radiale d'un bois. Cette valeur est calculée selon la norme NF B51-013.

L'éprouvette de 60 x 20 x 20 mm est placée sur un plateau en acier de manière à ce que le centre du cylindre soit axé sur le milieu de l'éprouvette et puisse exercer une pression verticale, parallèle aux cernes de l'échantillon (Figure 15). Une fois l'éprouvette installée, un papier carbone est interposé entre le cylindre et le bois de manière à marquer l'empreinte sur l'éprouvette. Le cylindre est chargé jusque 1960N. Ensuite, l'empreinte faite sur l'éprouvette est marquée de trois traits équidistants et perpendiculaires à celle-ci. Pour finir, la largeur d'empreinte est relevée au niveau de ces trois lignes à la loupe micrométrique. C'est ensuite la largeur moyenne d'empreinte qui sera utilisée pour le calcul de dureté. L'humidité de l'éprouvette est calculée sur son entièreté à l'aide de la masse prise avant le test.

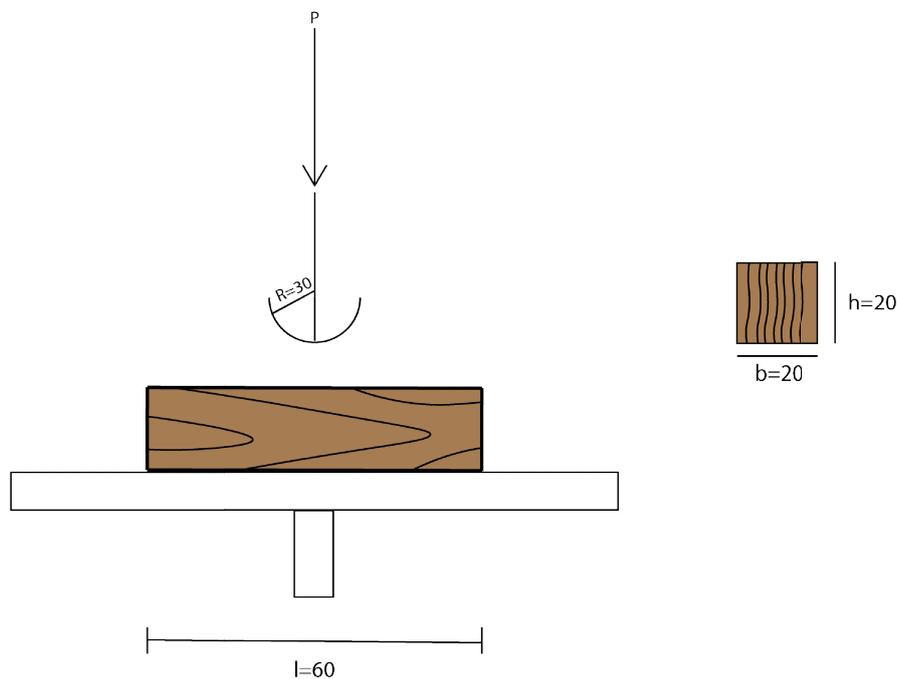


Figure 24 Schéma du dispositif d'essais de caractérisation de la dureté Monnin

La flèche de pénétration (t), en millimètres (mm), de chaque éprouvette est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :

$$t = 15 - \frac{1}{2}\sqrt{900 - a^2}$$

Où :

a est la largeur moyenne d'empreinte, en millimètres (mm).

Pour finir, la dureté de Monnin (N), nombre sans unité, est égale à l'inverse de la flèche de pénétration.

$$N = \frac{1}{t}$$

3.7.5. Rupture en flexion dynamique

Le test de rupture en flexion dynamique, ou encore test de choc, consiste à rompre l'éprouvette en flexion par un choc s'exerçant tangentiellement dans le but de déterminer le travail de rupture unitaire. Ce test a été opéré selon la norme NBN 225 (IBN, 1956).

L'éprouvette de 20 x 20 x 300 mm est placée sur un mouton pendule ayant au moins une hauteur de chute de 1m et un travail disponible de 10 Kgm. Le déclenchement de la chute du pendule est ensuite réalisé de manière à ne produire aucun mouvement latéral de ce dernier. Le choc est appliqué parallèlement aux cernes (Figure 25). Une fois l'éprouvette cassée, le travail de rupture est identifié à 0.1 Kgm près. Une fois le test réalisé, un échantillon de 20 x 20 x 20 mm est prélevé près de la zone de rupture pour déterminer l'humidité de l'échantillon.

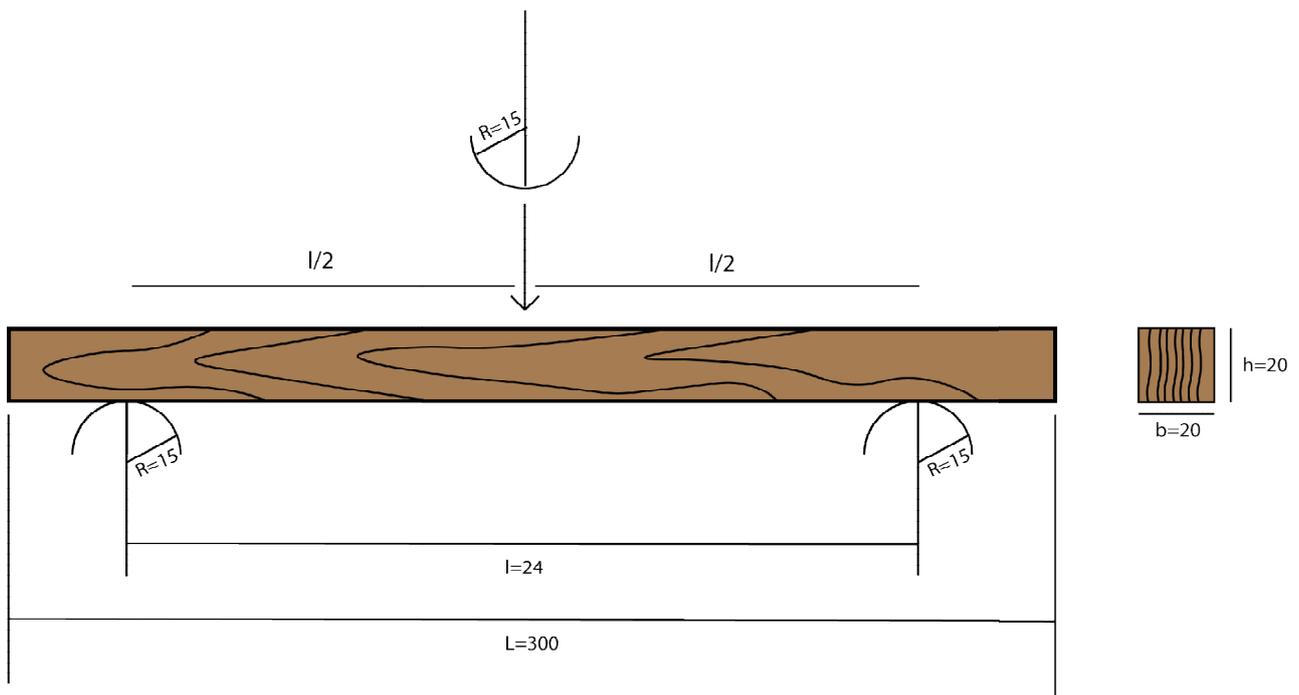


Figure 25 Dispositif d'essais en flexion dynamique

Le coefficient de résilience, encore appelé travail unitaire, à l'humidité d'équilibre lors du test (K_h), exprimé en kg/cm^2 , est exprimé pour chaque éprouvette selon la formule suivante (Sallenave, 1955) :

$$K_h = \frac{Wh}{bh \frac{10}{6}}$$

Où :

Wh est le travail de rupture, exprimé en kgm , relevé sur le mouton-pendule lors du test ;

b est la largeur, en centimètres (cm), de l'éprouvette ;

h est la hauteur, en centimètres (cm), de l'éprouvette.

3.8. Essai de durabilité naturelle : résistance aux champignons lignivores

La résistance aux champignons basidiomycètes sur bois sec est déterminée en regard à la norme CEN/TS 15083-1 :2005. Cette résistance est calculée sur base de la perte de masse sèche d'un échantillon pendant une période donnée suite à son introduction dans un milieu de culture inoculé par le champignon étudié. Dans le cadre de ce travail, 3 souches de champignons sont testées : *Coriolus versicolor*, *Coniophora puteana* et *Gloeophyllum trabeum*. Chaque souche de champignon est testée avec un échantillon de 80 éprouvettes par essence, soit 20 par arbre. Le test ayant une durée d'application de 16 semaines, les résultats ne seront pas disponibles dans l'espace de temps du mémoire. C'est pourquoi, il a été décidé de sélectionner des éprouvettes supplémentaire pour les deux souches les plus communes (*Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana*), et de déterminer leur résistance au bout de 12 semaines. Quarante éprouvettes par souche et par essence ont donc également été mises en milieu de culture dans ce but.

3.8.1. Préparation du milieu

Le milieu de culture est un mélange de 40g de poudre d'extrait de malt et 20g d'agar pour 1000ml d'eau. Une fois le mélange réalisé, il est coulé dans des boîtes de Kolle, à raison de 400ml par boîte. Les extrémités sont bouchées à l'aide d'une bourre d'ouate puis les boîtes sont passées à l'autoclave à 121°C pendant 20 minutes pour assurer la stérilité du milieu. Les boîtes sont ensuite mises à l'horizontale dans la chambre de culture pour répartir le milieu et créer une surface plane. Une fois que les boîtes sont en équilibre avec les conditions de milieu de la chambre de culture (22+/-2°C et 70+/-5% d'humidité relative), les différentes souches y sont inoculée en condition stérile.

3.8.2. Déroulement du test

Afin de déterminer la perte de masse sèche des échantillons après 16 semaines de contact avec le champignon, la masse sèche initiale des échantillons est estimée. Pour ce faire, 100 éprouvettes de vérification (e2), de même dimension que les éprouvettes de test (e1), sont placées dans les mêmes conditions avant le test. Une fois la masse stabilisée, soit une variation inférieure à 0.01g entre deux mesures espacées de 24h, la masse (m1) de l'ensemble des échantillons e1 et e2 est déterminée. Les éprouvettes e2 sont ensuite utilisée pour calculer l'humidité moyenne d'équilibre des éprouvettes (MC). Les éprouvettes e1 et e2 se trouvant dans les mêmes conditions, l'hypothèse que l'humidité moyenne des éprouvettes e2 équivaut à l'humidité des éprouvettes e1 est acceptée.

La masse sèche de chaque éprouvette de test (mi), exprimée en grammes, est alors calculée à l'aide de la formule suivante :

$$m_i = m_1 * \frac{100}{100 + MC}$$

Où :

m1 est la masse humide, exprimée en grammes (g), de l'éprouvette avant sa mise en culture ;

MC est l'humidité d'équilibre moyenne, exprimée en pourcent (%), calculée à l'aide des éprouvettes e2.

Une fois ce calcul réalisé, les éprouvettes sont introduites dans les boîtes de Külle en condition stérile. Les boîtes sont alors entreposées dans la chambre de culture pendant 16 semaines. Les éprouvettes sont ensuite sorties des boîtes et nettoyées de tout mycélium y adhérant. Elles sont pesées pour déterminer leur masse humide après le test (m2). La masse anhydre (m3) est déterminée après avoir placé les éprouvettes dans une étuve ventilée à 103°C jusqu'à masse constante. Le pourcentage d'humidité des bois de fin de test (H), exprimé en pourcent, est alors calculé selon la formule suivante :

$$H = \frac{(m_2 - m_3)}{m_3} * 100$$

Le pourcentage de perte de masse (%m), exprimé en pourcent (%), est calculé pour chaque éprouvette à l'aide de l'équation suivante :

$$\%m = \frac{(m_i - m_3)}{m_i} * 100$$

3.9. Analyses statistiques

3.9.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des différents tests réalisés seront effectuées à l'aide du logiciel Minitab©. Afin de représenter au mieux les valeurs moyennes des tests pour chaque essence, les données extrêmes et aberrantes sont éliminées du jeu de données. Pour chaque test, les statistiques suivantes sont présentées : la moyenne, le coefficient de variation, et le nombre d'échantillons qui ont réellement été analysés. Ces statistiques seront également présentées pour les populations formées par le facteur fixe « position radiale », décrit au point 3.9.3.

3.9.2. Régressions linéaires

Afin de déterminer le point de saturation de la fibre des deux essences, deux régressions linéaires de l'humidité en fonction du retrait surfacique seront établies. Ces régressions seront calculées à l'aide du logiciel Minitab©.

3.9.3. Analyse de la variance

Toujours à l'aide du programme Minitab©, une analyse de la variance en fonction de la position radiale de l'échantillon dans le plateau sera effectuée, dans la mesure du possible, pour chaque essai. Le facteur fixe « position radiale » comporte 3 modalités : Aubier (i), Bois de cœur (ii) et Duramen (iii).

- (i) Aubier : pour les deux essences l'aubier est bien différenciable. Les éprouvettes composées à 100% d'aubier sont classées dans cette catégorie ;
- (ii) Bois de cœur : le bois de cœur est considéré ici comme la partie centrale du plateau. Il a été décidé que, pour l'Eyeck, les 3 positions radiales les plus proches de la moelle sont considérées comme bois de cœur et que, pour le Mubala, ce sont les 2 positions radiales les plus proches ;
- (iii) Duramen : cette catégorie comporte le reste des éprouvettes qui n'ont pas encore été classées dans les catégories mentionnées plus haut.

Les conditions d'application de l'ANOVA sont la normalité des populations et l'homoscédasticité. Afin de vérifier si ces conditions sont remplies, ce sont les tests de Ryan-Joiner et de Levene qui sont respectivement utilisés. Si elles sont rencontrées et si l'interprétation de l'ANOVA permet de détecter une inégalité des moyennes, une structuration de celles-ci sera opérée avec le test post-HOC de Tukey. Afin d'alléger l'exposé des résultats, les p-valeurs des tests relatifs aux conditions d'application d'une ANOVA sont présentés dans l'annexe 3.

Dans le cas où l'égalité des variances n'est pas respectée pour une des analyses, une transformation de variable à l'aide du logarithme népérien sera tentée. Si, à l'issue de cette transformation, l'égalité des

variances n'est toujours pas respectée, le test non paramétrique de Kruskal-wallis sera employé. Dans ce cas, la médiane des distributions sera également présentée dans le tableau de résultats. Si une inégalité des médianes est mise en évidence, les médianes sont structurées à l'aide du test de Mann-Whitney au niveau de confiance 95%.

La catégorisation de la durabilité naturelle des bois est effectuée à l'aide de la médiane et non pas de la moyenne par essence. Afin d'analyser la variabilité de la médiane en fonction de la position radiale le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé. La structuration des médianes, dans les cas d'une inégalité de celles-ci, est opérée avec le test de Mann-Whitney au niveau de confiance de 95%.

3.10. Expression des résultats

3.10.1. Comparaison des résultats avec des essences connues

Afin de mettre en évidence les propriétés des essences étudiées, il est nécessaire d'établir une base de comparaison. C'est pourquoi les statistiques descriptives seront accompagnées de celles d'une essence tempérée et d'une essence tropicale. Le Chêne (*Quercus spp.*) étant une essence feuillue tempérée souvent utilisée, tant en extérieur qu'en intérieur, il est opportun de l'utiliser comme référence. L'essence tropicale doit être comparable aux deux essences étudiées et doit donc présenter des caractéristiques similaires. La densité étant un facteur qui explique une grande part de la variabilité des propriétés mécaniques (Keller, 1968), on peut supposer qu'à densité équivalente deux bois posséderont des caractéristiques comparables. Le Tali (*Erythrophleum spp.*) possédant une densité comprise entre celle des deux essences et étant la 4^{ème} essence la plus exploitée dans le bassin du Congo (De Wasseige et al., 2010), il servira de base de comparaison tropicale. Les données de comparaison proviennent des fiches techniques TROPIX (Gérard et al., 2011). Deux raisons justifient ce choix : les fiches présentent la dispersion des valeurs moyenne et elles sont la base de rédaction de *L'atlas des bois tropicaux*. Cependant, toutes les caractéristiques étudiées ne figurant pas dans les fiches, les autres sources bibliographiques seront précisées en bas de page.

Les résultats obtenus pour l'Eyeck et le Mubala, ainsi que les valeurs du Tali et du Chêne seront catégorisés. L'ouvrage *Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française* de Sallenave (1955) permet de classer toutes les valeurs de propriétés physiques et mécaniques à l'exception de l'anisotropie qui sera classée selon Noack et al. (1973). La catégorisation des valeurs de durabilité naturelle se fera sur base de la norme CEN/TS 15083-1 (CEN, 2005). Les fiches de (Gérard et al., 2011) ne mentionnant pas la souche testée lors du test de résistance aux champignons basidiomycètes lignivore, aucune donnée de comparaison n'est présentée pour ce test.

3.10.2. Humidité lors des tests de propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques varient avec l'humidité d'équilibre du bois (Sallenave, 1955; Kollmann et al., 1968), connaître celle-ci au moment des tests est primordial. Les valeurs des caractéristiques mécaniques du bois étant généralement présentées à 12% d'humidité, la plupart des normes d'essais des propriétés mécaniques possèdent des méthodes de correction pour ajuster les valeurs obtenues à des humidités différentes de 12%. Le temps nécessaire au séchage des échantillons à tester étant très long, certains test ont eu lieu à des humidités d'équilibre légèrement supérieure à 12%, auquel cas ces méthodes de correction ont été employées. Tous les tests ne possédant pas de telles méthodes, certains seront présentés avec une valeur d'humidité différente. Sachant que les propriétés mécaniques des bois croissent avec la diminution de leur humidité (Kollmann et al., 1968), toutes les valeurs présentées à un seuil différent de 12% seront des valeurs inférieures à la valeur réelle à 12%.

4. Résultats

4.1. Aspect visuel et description de la grume

4.1.1. Eyek

- Grume : Bien droite présentant parfois des roulures ou fentes de cœur.
- Aubier : Blanc bien distinct avec une largeur moyenne de 9,8 cm.
- Duramen : Parfois rose clair sinon brun rosé à brun rougeâtre (Figure 26 et 27).
- Texture : Gros grain.
- Fil : Contrefil, fil ondé.
- Aspect macroscopique de la section transversale :
 - Porosité diffuse ;
 - Vaisseaux de grandes dimensions visibles à l'œil nu (5 par mm² selon Normand and Paquis (1976)), isolés ou groupés généralement par 2 ou 3 ;
 - Parenchyme axial en bande, aliforme et confluent (Figure 28).

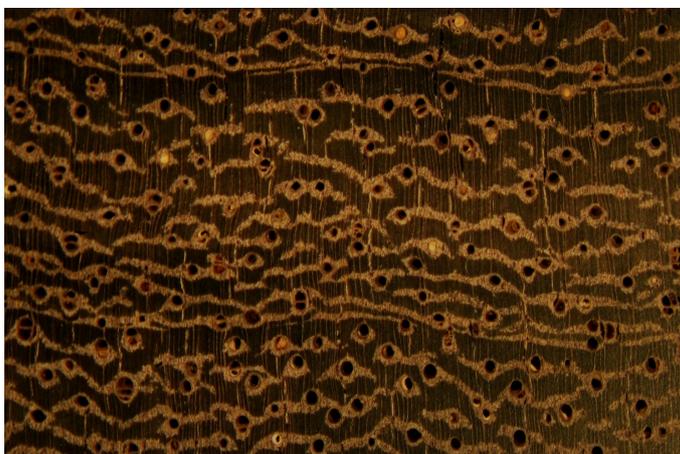


Figure 28: Aspect de la section transversale du bois d'Eyek



Figure 27: Aspect du bois d'Eyek sur quartier



Figure 26: Aspect du bois d'Eyek sur dosse

4.1.2. Mubala

- Grume : Grume assez tortueuse présentant parfois des galeries d'insectes, des fentes de cœur de la déviation de fil et des nœuds.
- Aubier : Blanc grisâtre différenciable, d'une largeur moyenne de 4,9 cm.
- Duramen : Brun foncé à brun orangé (Figure 29 et 30).
- Fil : Contrefil marqué et de faible largeur.
- Grain : Gros grain.
- Aspect macroscopique de la section transversale :
 - Porosité diffuse ;
 - Vaisseaux de grandes dimensions visibles à l'œil nu, 3à5 par mm² selon Normand and Paquis (1976) généralement isolés, parfois groupés par 2-3 ;
 - Parenchyme en manchon ou en losange autour des vaisseaux (Figure 31).



Figure 31: Aspect de la section transversale du bois de Mubala



Figure 30: Aspect du bois de Mubala sur quartier



Figure 29: Aspect du bois de Mubala sur dosse

4.2. Propriétés Physiques

4.2.1. Masse volumique à 12% d'humidité

Le Tableau 6 indique que la masse volumique du Mubala est proche 1000kg/m³ et celle de l'Eyeck de 830kg/m³. Le Mubala est classé comme bois très lourd et l'Eyeck comme bois lourd, au même titre que le Tali. Le Chêne est considéré comme bois mi-lourd.

Tableau 6: Paramètres descriptifs de la masse volumique du Mubala, de L'Eyeck, du Chêne et du Tali

	Mubala	Eyeck	Chêne	Tali
Moyenne (kg/m ³)	997	827	740	910
Coefficient de variation (%)	4,79	7,74	6,76	8,79
Nombre d'éprouvettes	64	101	-	-

Il existe une différence hautement significative de la masse volumique en fonction de la position radiale dans le bois du Mubala (test de Kruskal Wallis, $H = 11,42$; $p = 0,003$) (Tableau 7). La masse volumique du bois de cœur est significativement plus faible que celle du duramen. De même pour l'Eyeck, il existe une différence très hautement significative (ANOVA, $F = 8,32$; $p < 0,001$), le bois de cœur étant différent des deux autres positions radiales et est classé comme bois mi-lourd (Tableau 7).

Tableau 7 : Résultats de l'analyse de la variance de la masse volumique en fonction de la position radiale des échantillons

	Mubala			Eyeck		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne	977,1	1008,4	949,8	866	830,41	787,5
Médiane	962,1	1013,9	939,5	852,8	824,37	767,3
Coefficient de variation (%)	6,05	2,67	6	6,93	6,24	9,97
Nombre d'éprouvettes	8	38	16	16	63	22
Groupe Mann-Whitney/Tukey	ab	a	b	a	a	b

4.2.2. Retrait volumique total

Les retraits volumiques sont considérés comme moyens pour les 4 essences étudiées (Tableau 8).

Tableau 8: Paramètres descriptifs des retraits volumiques totaux du Mubala, de L'Eyeck, du Chêne et du Tali

	Mubala	Eyeck	Chêne	Tali
Moyenne (%)	14,16	13,85	13,64	14,82
Coefficient de variation (%)	5,61	15,04	11,36	21,05
Nombre d'éprouvettes	58	99	-	-

Bien que peu d'individus aient été examinés, le coefficient de variation est très faible pour le Mubala par rapport aux autres essences. L'Eyeck ainsi que le Tali possèdent des coefficients de variation plus élevés. Le retrait volumique ne varie pas en fonction de la position radiale de l'échantillon pour le Mubala (ANOVA, $F = 2,17$; $p = 0,124$), à l'inverse de l'Eyeck qui présente une différence très hautement significative entre les trois positions radiales (ANOVA, $F = 11,26$; $p < 0,001$). Le bois mature d'aubier et de duramen reste cependant dans la classe de retrait moyen alors que le bois de cœur est considéré comme ayant un retrait fort (Tableau 9).

Tableau 9: Résultats de l'analyse de la variance du retrait volumique liée à la position radiale des échantillons

	Mubala			Eyek		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne (%)	14,59	13,96	14,47	12,27	13,76	15,18
Coefficient de variation (%)	3,96	5,7	5,11	10,51	14,83	12,08
Nombre d'éprouvettes	7	37	14	16	60	23
Groupes Tukey	a	a	a	c	b	a

4.2.3. Retrait radial

Le retrait radial varie significativement en fonction de la qualité de l'échantillon pour le Mubala (ANOVA, $F = 71,64$; $p < 0,001$), les trois qualités d'échantillons diffèrent entre elles. La qualité des échantillons influence aussi les résultats pour l'Eyek (Test de Kruskal-Wallis , $H = 9,53$; $p = 0,009$), les échantillons sur quartier étant différents des échantillons sur faux quartier. Les échantillons sur faible faux quartier ne sont différents d'aucune des deux autres positions radiales (Tableau 10). Au vu de ces résultats, la moyenne de chaque essence sera représentée uniquement par les échantillons parfaitement sur quartier

Tableau 10: Résultats de l'analyse de la variance du retrait radial total en fonction du facteur de qualité de l'échantillon

	Mubala			Eyek		
	Q	FFQ	FQ	Q	FFQ	FQ
Moyenne (%)	4,63	5,03	5,81	4,24	4,57	5,71
Médiane (%)	4,64	5,09	6,00	4,11	4,67	5,37
Coefficient de variation (%)	7,41	7,57	9,28	16,38	19,4	27,12
Nombre d'éprouvettes	82	27	16	99	22	5
Groupe Tukey/ Mann-Whitney	a	b	c	b	ab	a

Après élimination des données biaisées, les 4 essences présentent un retrait radial moyen (Tableau 11). La variabilité de la propriété en question semble supérieure pour l'Eyek et le Tali que pour les deux autres essences. Le nombre d'éprouvettes composées uniquement d'aubier étant insuffisant, l'influence de la position radiale sur cette propriété n'a pas pu être testée.

Tableau 11: Paramètres descriptifs du retrait radial total du Mubala, de L'Eyek, du Chêne et du Tali

	Mubala	Eyek	Chêne	Tali
Moyenne (%)	4,63	4,24	4,50	5,10
Coefficient de variation (%)	7,41	16,38	11,11	27,45
Nombre d'éprouvettes	82	99	-	-

4.2.4. Retrait tangentiel

Le bois de Mubala présente une différence très hautement significative de retrait tangentiel total en fonction de la qualité de l'échantillon (ANOVA, $F = 23,75$; $p < 0,001$). Les échantillons sur quartier ont en moyenne un retrait supérieur aux deux autres positions (Tableau 12). Par contre, il n'y a aucune différence pour l'Eyek (Test de Krsukal Wallis, $H = 3,78$; $p=0,151$). Au vu du résultat obtenu pour le Mubala, le principe de précaution impose de n'utiliser que les échantillons parfaitement sur quartier pour présenter les moyennes par essence.

Tableau 12: Résultats de l'analyse de la variance du retrait tangentiel total en fonction du facteur de qualité de l'échantillon

	Mubala			Eyek		
	Q	FFQ	FQ	Q	FFQ	FQ
Moyenne (%)	8,47	7,84	7,45	9,29	9,71	8,60
Médiane (%)	8,90	8,35	8,05	9,29	9,69	8,47
Coefficient de variation (%)	6,88	7,19	12,6	13,19	19,08	7,15
Nombre d'éprouvettes	82	27	17	98	22	5
Groupe Tukey/Mann-Whitney	a	b	b	a	a	a

Les 4 essences possèdent donc un retrait tangentiel moyen (Tableau 13). Une fois de plus, les coefficients de variations sont supérieurs pour l'Eyek et le Tali. Comme pour le point précédent, l'analyse en fonction de la position radiale ne peut être réalisée.

Tableau 13: Paramètres descriptifs du retrait tangentiel total du Mubala, de L'Eyek, du Chêne et du Tali

Retrait tangentiel (%)	Mubala	Eyek	Chêne	Tali
Moyenne	8,47	9,29	9,70	8,40
Coefficient de variation (%)	6,88	13,19	9,28	14,29
Nombre d'éprouvettes	82	98	-	-

4.2.5. Anisotropie du retrait

Les valeurs de coefficient d'anisotropie comprises entre 1,6 et 2 sont considérées comme normales. Une valeur plus élevée rend compte d'un comportement défavorable à la stabilité; à l'inverse, une valeur inférieure est signe d'une stabilité plutôt favorable. Le Mubala et le Tali possèdent donc un ratio normal et l'Eyek un ratio défavorable, au même titre que le Chêne (Tableau 14).

Tableau 14: Valeur du ratio d'anisotropie pour le Mubala, l'Eyek, le Chêne et le Tali

Coefficient d'anisotropie	Mubala	Eyek	Chêne	Tali
Ratio	1,83	2,19	2,20	1,60

4.2.6. Point de saturation de la fibre

Eyek

La Figure 32 présente l'évolution de l'humidité d'équilibre moyenne en fonction du retrait surfacique moyen pour les trois modalités d'humidité d'équilibre testées.

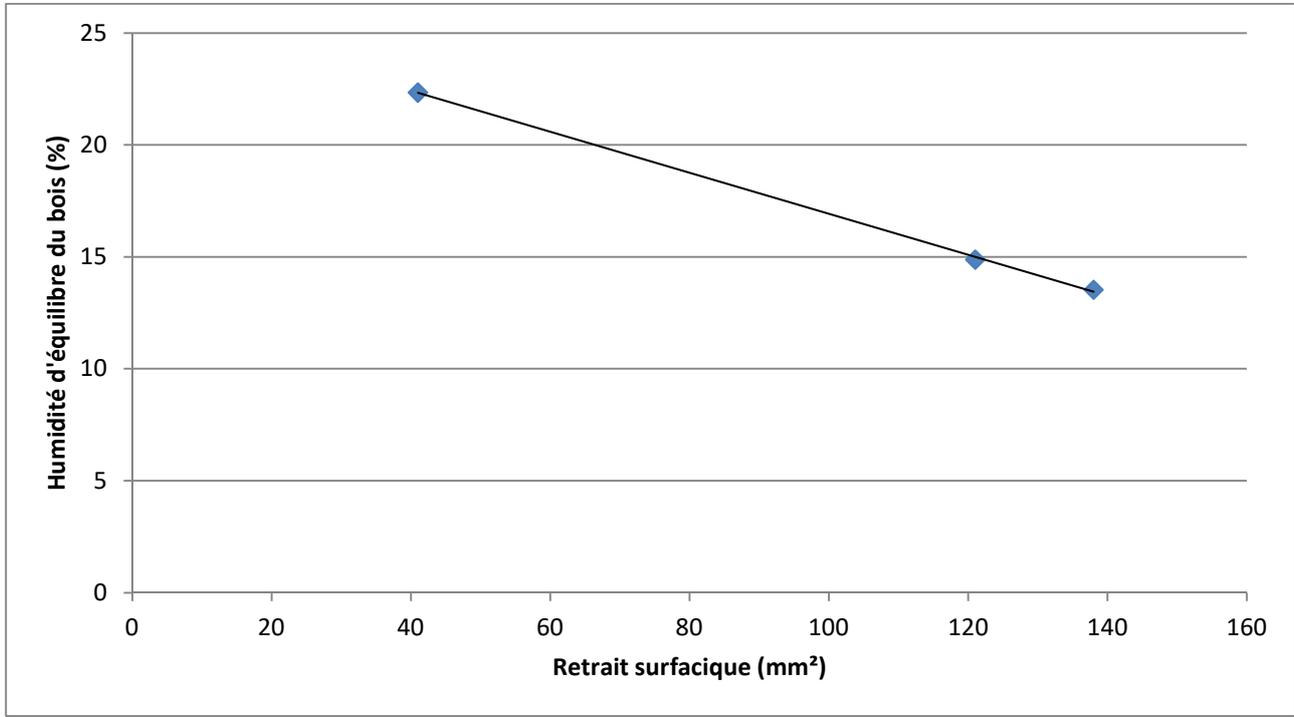


Figure 32: Evolution de l'humidité d'équilibre en fonction du retrait surfacique de l'Eyek

À l'aide de ces données, une régression linéaire de l'humidité d'équilibre du bois en fonction de la perte surfacique moyenne des échantillons a été calculée :

$$He = 26.085 - 0.9158 * Ps \quad (R^2 = 99,95 \% ; p - \text{valeur du terme constant} = 0,001)$$

Où

He est l'humidité d'équilibre du bois, exprimée en pourcent ;

Ps est la perte surfacique de l'échantillon par rapport à l'état saturé, exprimé en mm².

Le point de saturation de la fibre est l'humidité d'équilibre à laquelle le retrait du bois commence. Il est également défini dans ce cas ci comme étant le point où la perte surfacique est nulle, soit l'ordonnée à l'origine. Il vaut dès lors 26,1 % d'humidité d'équilibre du bois, valeur arrondie, pour l'Eyek. Cette valeur est considérée comme normale.

Mubala

La Figure 33 présente la l'évolution de l'humidité d'équilibre moyenne en fonction du retrait surfacique moyen pour les trois modalités d'humidité d'équilibre testées.

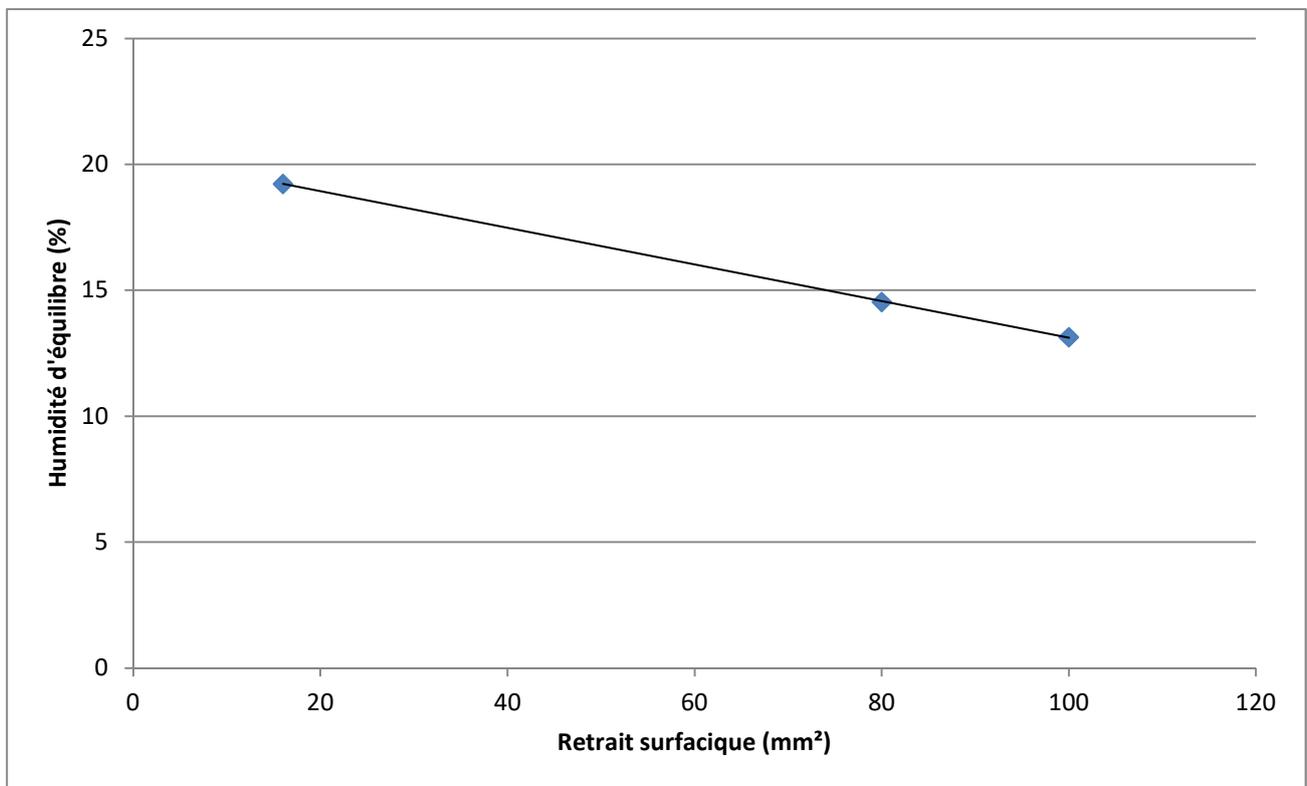


Figure 33: Evolution de l'humidité d'équilibre en fonction du retrait surfacique du Mubala

Comme pour l'Eyeck, une régression linéaire de l'humidité d'équilibre du bois en fonction de la perte surfacique moyenne des échantillons a été calculée. L'équation de la droite obtenue avec cette régression est la suivante :

$$He = 20.386 - 0.0727 * Ps \quad (R^2 = 99,99\% ; p - \text{valeur du terme constant} = 0,001)$$

Où

He est l'humidité d'équilibre du bois, exprimée en pourcent ;

Ps est la perte surfacique de l'échantillon par rapport à l'état saturé, exprimé en mm²

La valeur arrondie du point de saturation de la fibre du Mubala est donc 20,4% d'humidité d'équilibre du bois. Cette valeur est considérée comme basse.

4.2.7. Coefficient de rétractabilité volumique

Le Mubala possède un coefficient de rétractabilité volumique élevé qui le qualifie de bois « très nerveux ». Les trois autres essences possèdent des valeurs moyennes qualifiant le bois de « moyennement nerveux » (Tableau 15).

Tableau 15: Coefficient de rétractabilité du Mubala, de l'EyeK, du Chêne et du Tali

	Mubala	EyeK	Chêne	Tali
Coefficient de rétractabilité volumétrique	0,69	0,53	0,44	0,57

4.3. Propriétés mécaniques

4.3.1. Module d'élasticité en flexion statique

Le Mubala et le Tali possèdent une valeur de module d'élasticité élevée. L'EyeK et le Chêne possèdent une valeur moyenne (Tableau 16). Une fois de plus, le coefficient de variation du Mubala est inférieur aux autres, indiquant une faible dispersion des valeurs.

Tableau 16: Paramètres descriptifs du module d'élasticité en flexion tangentielle aux cernes du Mubala, de L'EyeK, du Chêne et du Tali

	Mubala	EyeK	Chêne	Tali
Moyenne (Mpa)	24058	16304	13300	19490
Coefficient de variation (%)	10,35	20,43	13,16	16,54
Humidité (%)	12	12	12	12
Nombre d'éprouvettes	65	106	-	-

Pour l'EyeK différentes positions radiales influencent significativement les résultats (ANOVA, $F = 5,94$, $p = 0,004$). Le module d'élasticité moyen du bois d'aubier est significativement inférieur aux deux autres positions (Tableau 17). Dans le cas du Mubala il n'y a aucune différence significative entre les positions radiales (ANOVA, $F = 1,42$; $P = 0,251$).

Tableau 17: Statistiques descriptives du module d'élasticité en fonction de la position radiale de l'échantillon et le groupement selon le test post-HOC de Tukey pour le Mubala et l'EyeK

	Mubala			EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne (Mpa)	23091	24408	23438	14170	16612	17314
Coefficient de variation (%)	10,27	9,82	11,76	20,15	20,33	16,64
Nombre d'éprouvettes	7	44	14	20	63	23
Groupe Tukey	a	a	a	b	a	a

4.3.2. Module de rupture en flexion statique

La méthode de correction de l'humidité des MOR n'a pas pu être appliquée. Les résultats sont donc présentés à l'humidité moyenne au moment du test (Tableau 18).

Tableau 18: Paramètres descriptifs du module de rupture en flexion tangentielle aux cernes du Mubala, de L'Eyeck, du Chêne et du Tali

	Mubala	Eyeck	Chêne	Tali
Moyenne (Mpa)	140	73	105	128
Coefficient de variation (%)	18,67	27,70	14,29	14,84
Humidité (%)	15,5	15,3	12	12
Nombre d'éprouvettes	67	110	-	-

L'Eyeck possède une faible résistance accompagnée d'un coefficient de variation important. Le chêne est placé dans la classe moyenne. Le Tali se trouve proche de la limite inférieure de la classe de résistance forte fixée à 125 Mpa. Le Mubala, quant à lui, présente une très bonne résistance à la flexion avec une moyenne de 140 Mpa. L'Eyeck montre une différence très hautement significative entre les moyennes des positions radiales (ANOVA, $F = 9.67$; $p < 0,001$). Le bois de cœur est classé comme peu résistant et est en moyenne moins résistant que les deux autres positions. Pour le Mubala, l'analyse met en évidence une différence très significative entre les positions radiales (ANOVA, $F = 8,75$; $p < 0,001$). Le bois de cœur possède un module de rupture moyen inférieur au duramen mature et est classé comme étant moyennement résistant. L'aubier n'est significativement différent d'aucune des deux autres positions.

Tableau 19: Statistiques descriptives du module de rupture en flexion tangentielle aux cernes en fonction de la position radiale de l'échantillon et le groupement selon le test post-HOC de Tukey pour le Mubala et l'Eyeck

	Mubala			Eyeck		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne (Mpa)	132,82	148,48	119,79	73,29	78,63	58,85
Coefficient de variation (%)	17,57	14,46	24,29	30,48	23,78	27,23
Nombre d'éprouvettes	8	44	15	20	66	24
Groupe Tukey	ab	a	b	a	a	b

4.3.3. Résistance unitaire en flexion dynamique

Ce test ne possède pas de mesures de correction de l'humidité, les résultats sont présentés à une humidité légèrement supérieure à 12% (Tableau 20). Cette propriété ne faisant l'objet que de très peu de publications, les données présentées ne possèdent pas de coefficient de variation et leur humidité d'équilibre au moment du test est supposée à 12%.

Tableau 20: Paramètres descriptifs du travail unitaire en flexion dynamique du Mubala, de L'EyeK, du Chêne et du Tali

	Mubala	EyeK	Chêne	Tali
Moyenne (kg/cm ²)	0,58	0,24	0,63 ⁷	0,54 ⁸
Coefficient de variation (%)	35,59	53,92	-	-
Humidité (%)	12,9	13	12	12
Nombre d'éprouvettes	65	101	-	-

L'EyeK possède une faible valeur de résistance au choc ainsi qu'un coefficient de variation très élevé. Le Mubala présente une valeur moyenne, au même titre que le Tali et le Chêne. Pour l'EyeK, les positions radiales influencent très significativement les résultats (ANOVA, $F = 14,75$, $p < 0,001$). Le bois de cœur est moins résistant que l'aubier et le duramen (Tableau 21). Pour le Mubala il y a aussi une différence hautement significative (test de Kruskal-Wallis, $H = 9,54$; $p = 0,008$). Le bois de duramen mature est significativement plus résistant que le bois de cœur qui est classé dans la catégorie de faible résistance.

Tableau 21: Statistiques descriptives du travail unitaire en flexion dynamique en fonction de la position radiale de l'échantillon et le groupement selon le test non-paramétrique de Mann-Whitney pour le Mubala et le test post-HOC pour l'EyeK

	Mubala			EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne (kg/cm ²)	0,6365	0,6437	0,4063	0,2873	0,2594	0,1483
Médiane (kg/cm ²)	0,6531	0,6563	0,3289	0,3025	0,2035	0,1446
Coefficient de variation (%)	25,3	23,76	62,81	27,58	53,4	51,36
Nombre d'éprouvettes	8	41	16	16	61	24
Groupe Mann-Whitney/Tukey	ab	a	b	a	a	b

4.3.4. Compression axiale

Le classement de cette valeur dépend de la densité du bois. Les valeurs de contrainte de rupture sont donc classées par ordre de grandeur pour chaque classe de densité. Le Mubala, bois très lourd, est catégorisé comme ayant une contrainte de rupture supérieure. L'EyeK et le Tali, bois lourds, sont dans les classes respectives de moyenne et supérieure. Le Chêne en tant que bois mi-lourd, appartient à la catégorie supérieure (Tableau 22).

Tableau 22: Paramètres descriptifs de la contrainte de rupture en compression axiale (Mpa) du Mubala, de L'EyeK, du Chêne et du Tali

Contrainte de rupture en compression axiale (Mpa)	Mubala	EyeK	Chêne	Tali
Moyenne (Mpa)	87	55	58	79
Coefficient de variation (%)	9,14	13,00	12,07	13,92
Humidité (%)	12	12	12	12
Nombre d'éprouvettes	65	107	-	-

L'EyeK ne présente aucune différence significative entre les moyennes de contrainte de rupture des différentes positions radiales (ANOVA, $F = 1,28$; $P = 0,282$). Dans le cas du Mubala, il y a une différence hautement

⁷ Valeur présentée par FCBA (2008)

⁸ Valeur présentée par Sallenave (1955)

significative entre le bois d'aubier et le bois de duramen mature (ANOVA, $F = 5,46$; $p = 0,007$). Le bois d'aubier arrive à l'extrême limite entre la classe supérieure et la classe moyenne, cette différence est donc importante (Tableau 23).

Tableau 23: Statistiques descriptives de la contrainte de rupture en compression axiale en fonction de la position radiale de l'échantillon et le groupement selon le test post-HOC de Tukey pour le Mubala et l'EyeK

	Mubala			EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne (Mpa)	78,57	88,38	85,58	52,27	55,089	55,26
Coefficient de variation (%)	12,18	7,42	10,01	14,48	13,02	11,6
Nombre d'éprouvettes	7	42	16	19	64	24
Groupe Tukey	b	a	ab	a	a	a

4.3.5. Dureté de Monnin

La norme de donnant pas de mesures de correction d'humidité pour cette propriété, les valeurs seront présentées à une humidité d'équilibre légèrement supérieure à 12%.

Tableau 24 : Paramètres descriptifs de la dureté de Monnin du Mubala, de L'EyeK, du Chêne et du Tali

Dureté de Monnin	Mubala	EyeK	Chêne	Tali
Moyenne	8,98	4,26	4,2	9,2
Coefficient de variation (%)	19,02	20,10	19,05	29,35
Humidité (%)	14,6	14,6	12	12
Nombre d'éprouvettes	68	110	-	-

Le Mubala et le Tali sont considérés comme étant respectivement dur et très dur. L'EyeK et le Chêne sont des bois dit mi-durs (Tableau 24). L'EyeK présente une différence très hautement significative entre ses positions radiales (ANOVA, $F = 18,67$; $p < 0,001$). En effet, les moyennes de dureté de chaque position sont significativement différentes entre elles, toutes restent cependant toute classées comme mi-dur (Tableau 25). Pour le Mubala, il existe également une différence hautement significative entre les positions radiales (ANOVA, $F = 6,04$; $p = 0,004$). En fait, seul le duramen et le bois de cœur sont significativement différents (Tableau 25). Le duramen est classé dans la catégorie des bois très durs.

Tableau 25: Statistiques descriptives de la dureté de Monnin en fonction de la position radiale de l'échantillon et le groupement selon le test post-HOC de Tukey pour le Mubala et l'EyeK

	Mubala			EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Moyenne	8,412	9,463	7,929	5,068	4,2198	3,7
Coefficient de variation (%)	24,39	13,32	26,66	16,36	16,54	21,51
Nombre d'éprouvettes	8	44	16	20	66	24
Groupe Tukey	ab	a	b	a	b	c

4.4. Durabilité naturelle

4.4.1. *Coriolus versicolor* (Yun Zhi)

Les deux essences présentent une très bonne durabilité vis-à-vis du champignon et sont catégorisé dans la classe 1 de résistance (Tableau 26).

Tableau 26: Perte de masse médiane et nombre d'éprouvettes testées lors du test de durabilité naturelle vis-à-vis de *Coriolus versicolor* pour le Mubala et l'EyeK

	Mubala	EyeK
Médiane (%)	0,3	4,6
Nombre d'éprouvettes	32	39

Pour l'EyeK, la résistance est significativement différente en fonction de la position radiale de l'éprouvette (test de Kruskal-Wallis, $H = 22,35$; $p < 0,001$). L'aubier et le bois de cœur possède une résistance significativement inférieure au champignon et sont classés dans les bois durables. Le duramen mature reste dans la catégorie de bois très durable (Tableau 27).

Tableau 27: Pertes de masse médiane, nombre d'éprouvettes testés et groupement selon le test Mann-Whiney pour les trois positions radiales de l'EyeK pour la souche *Coriolus versicolor*

	EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Médiane (%)	7,32	2,41	7,03
Nombre d'éprouvettes	7	20	12
Groupe Mann-Whitney	a	b	a

4.4.2. *Coniophora puteana* (Schum ex Fr) Karst.

Les deux essences présentent une très bonne durabilité vis-à-vis du champignon et sont catégorisées dans la classe 1 de résistance (Tableau 28).

Tableau 28: Perte de masse médiane et nombre d'éprouvettes testées lors du test de durabilité naturelle vis-à-vis de *Coniophora puteana* pour le Mubala et l'EyeK.

	Mubala	EyeK
Médiane (%)	0,00	0,48
Nombre d'éprouvettes	32	40

Pour l'EyeK, il y a ici aussi une différence très hautement significative entre les positions (test de Kruskal-Wallis, $H = 16,58$; $p < 0,001$). Les trois positions possèdent une médiane significativement différente les unes des autres mais restent toutes dans la classe des bois très durable vis-à-vis de ce champignon (Tableau 29).

Tableau 29: Pertes de masse médiane, nombre d'éprouvettes testés et groupement selon le test Mann-Whiney pour les trois positions radiales de l'EyeK pour la souche *Coniophora puteana*

	EyeK		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Médiane (%)	3,228	0,355	0,921
Nombre d'éprouvettes	7	20	12
Groupe Mann-Whitney	a	c	b

5. Discussion

La discussion porte sur les conséquences que peuvent avoir les diverses propriétés du bois sur les mesures d'exploitation, de transformation et d'utilisation. Dans un premier temps, chaque propriété est discutée indépendamment des autres. Dans un deuxième temps, les utilisations seront définies pour chaque essence ainsi que la faisabilité de leur valorisation. Pour finir, une fiche récapitulative sera présentée pour les deux essences.

5.1. Aspect visuel

L'aspect visuel du bois est une notion subjective, en discuter n'est donc guère aisé. Les deux essences présentent un contrefil. Ce contrefil engendre des difficultés de rabotage et de finition mais donne un aspect dit « rubané » généralement très apprécié (Fays, 2008). L'Eyeck peut également présenter du bois ondulé ou moiré. Ce type de bois diminue les propriétés mécaniques mais présente des motifs valorisables en ébénisterie. Les deux essences présentent un grain grossier, empêchant leur valorisation dans le moulage (Gérard et al., 2016).

5.2. Propriétés de la grume

5.2.1. Largeur de l'aubier

Ce facteur est limitant dans la valorisation des essences car l'aubier est généralement éliminé lors du débit en scierie. Deux raisons le justifient : l'esthétique et la durabilité naturelle considérée comme étant faible. Une essence présentant un large aubier présente une perte volumique importante lors du sciage. Sachant que les rendements des scieries en région tropicale, de la grume au bois scié, sont de l'ordre de 35% (Angelsen et al., 2010), il est important de prendre cette variable en considération pour la valorisation d'une essence. Le Mubala possède une largeur moyenne d'aubier peu contraignante puisqu'elle atteint en moyenne 4,9 cm. La largeur moyenne du bois d'aubier de l'Eyeck est par contre de 9,8cm, ce qui occupe une part importante de la grume de cette essence. Le diamètre moyen de bois de cœur éliminé lors du débit, étant compris entre 20 et 35cm⁹, une modélisation du pourcentage du volume utilisable sur le volume total de la grume (assimilé à un cylindre) a été calculée pour l'Eyeck en prenant le parti d'éliminer tout l'aubier (Figure 34). La valeur de 25 cm de diamètre de bois de cœur a été sélectionnée car les 3 éprouvettes considérées comme bois de cœur se situent à moins 12.5 cm de distance à la moelle, soit 25 cm de diamètre.

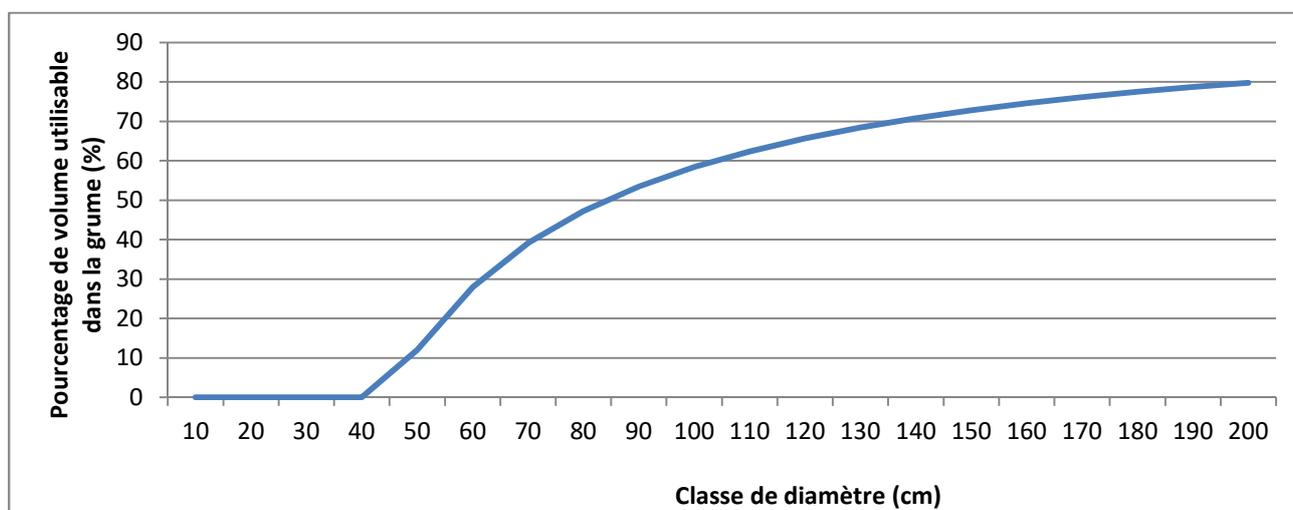


Figure 34: Evolution du pourcentage de volume utilisable en fonction de la classe de diamètre de la grume d'Eyeck (Ø bois de cœur = 25 cm).

⁹ Valeur mentionnée par Monsieur Frédéric Viroux, Responsable de la Scierie CIFM.

L'Eyeck atteint 70% de volume utilisable vers 140cm de diamètre. En dessous de cette valeur, il semble raisonnable de se poser la question quant à la pertinence d'abattre l'arbre. Cependant, l'aubier de l'Eyeck montre globalement des propriétés équivalentes au duramen mature et même supérieures dans certains cas. En faisant l'hypothèse qu'une partie d'aubier peut être acceptée dans les débits, il est possible d'augmenter ce volume utilisable. Lors de la commande client, celui-ci peut accepter un certain pourcentage d'aubier dans ses lots¹⁰. En admettant que 3 cm de largeur d'aubier peuvent être maintenus lors du débit, une nouvelle modélisation du pourcentage de volume utilisable par rapport au volume de la grume, ainsi que l'évolution du pourcentage d'aubier présent dans le volume utilisable a été réalisée (Figure 35).

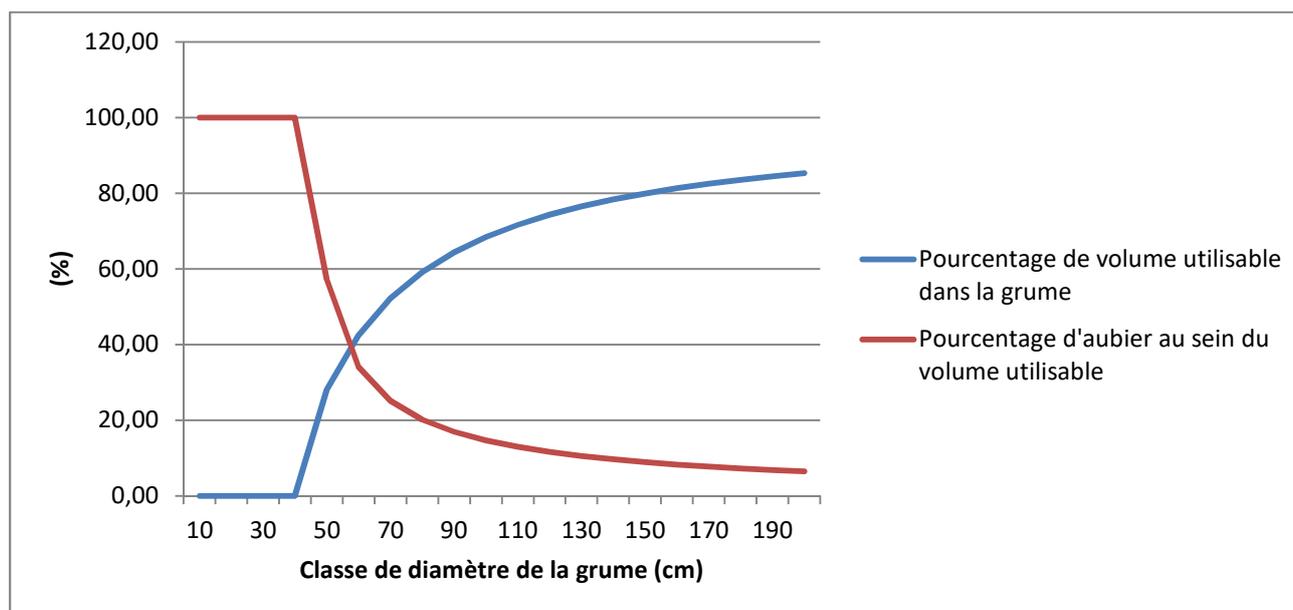


Figure 35: Evolution du pourcentage de volume utilisable dans la grume et du pourcentage d'aubier au sein du volume utilisable en fonction de la classe de diamètre de l'Eyeck (Ø bois de cœur = 25 cm).

Dans ce cas-ci, la classe de diamètre pour laquelle une grume atteint 70% de volume utilisable est 110 cm, soit un gain de 30 cm sur le diamètre (donc 3 classes lors des inventaires d'exploitation). Pour cette valeur, le pourcentage d'aubier n'est que de 13% sur le volume total utilisable, valeur que pourrait accepter le client en fonction de l'utilisation qu'il veut en faire.

5.2.2. Conformation de la grume

La conformation de la grume permet de définir la longueur des sciages disponibles et le rendement au sciage. Le Mubala possède un fût sinueux donnant des grumes courbes. Ce défaut engendre des rendements faibles en débits d'avivés si la grume est mal préparée et décline la grume pour le déroulage ou le tranchage (Fays, 2008). Pour augmenter les rendements de débits d'avivés il sera préférable de valoriser la grume en sciages de faible longueur pour éliminer la flèche induite par les courbures et éviter la fibre tranchée. A l'opposé, l'Eyeck présente des fûts assez rectilignes permettant des débits de plus grande longueur.

5.2.3. Roulure et fentes de cœur

Les roulures sont retrouvées chez la plupart des essences dont l'Eyeck et le Mubala. Les grumes d'Eyeck seront cependant plus sensibles à la roulure car celles-ci sont plus fréquentes dans les arbres âgés et au fût apparemment sans défauts (Fays, 2008). Ce défaut réduit le volume de sciages avivés et décline les grumes

¹⁰ Monsieur Frédéric Viroux, Responsable de la Scirie CIFM.

au tranchage et au déroulage (Fays, 2008). Les fentes proviennent de la libération des tensions internes de l'arbre et provoquent le déclassement des grumes pour le déroulage (Fays, 2008). Ce phénomène étant naturellement présent chez toutes les essences, les deux essences sont donc sensibles à ce défaut.

5.2.4. Les trous de « vers »

Les trous de vers, appelé mulots pour des larves de Cérambycidés ou de Bostrychidés (Fays, 2008), sont des galeries creusées par le passage de la larve dans l'arbre quant il est encore sur pied. Une fois l'arbre abattu, la larve meurt et n'entraîne donc aucun risque de contamination. Ces galeries pouvant atteindre 1cm de diamètre entraîne généralement un rejet de la pièce de bois sciées (Fays, 2008). Certaines y sont plus sensibles que d'autres. Le Mubala ayant des mulots sur les 4 grumes étudiées, il paraît sensible à ce type d'altération. Par contre, cette altération n'a pas été observée chez l'Eyeck.

5.3. Propriétés physiques

5.3.1. Masse volumique

Dans le cas du Mubala, la comparaison entre la masse volumique calculée à 12% et celle présentée par Gérard et al. (2016) montre une sous-estimation de la valeur dans la littérature. En effet il y a une différence de 500kg/m³, cette valeur ne change pas l'attribution de la classe de bois très lourd mais correspond à une différence de 10%. Les arbres ayant été prélevés dans une zone géographique limitée, cette différence peut être due à l'origine des bois investigués et leurs conditions de croissance. La masse volumique de l'Eyeck correspond à l'intervalle mentionné par (Schmelzer et al., 2008).

Le Mubala et l'Eyeck étant considérés respectivement comme très lourd et lourd laissent présager des caractéristiques mécaniques avantageuses (Keller, 1968; Kollmann et al., 1968). Néanmoins, une densité élevée peut limiter l'utilisation du bois. Certaines utilisations privilégient le rapport *résistance mécanique/masse volumique*. C'est le cas notamment des structures légères, des brises soleil et des escaliers d'intérieur (Martin et al., 2016). L'Eyeck ayant des performances mécaniques moyennes pour un bois lourd ne sera donc pas utilisé dans ce type d'ouvrage. D'autres favorisent un poids léger sans pour autant demander de performances mécaniques élevées. C'est le cas notamment des bardages, volets, fenêtres, portes massives et des portails. En effet le poids de l'ouvrage influence fortement la sollicitation des organes de fixation et de rotation (Martin et al., 2016) déclassant ainsi les bois de masse volumique trop importante. Le Mubala ne sera donc utilisé dans aucun de ces cas. Les bois lourds et très lourd sont également déconseillés pour la construction de pont de bateaux et l'aménagement intérieur de ces derniers. Le Mubala et l'Eyeck sont proscrits de ces deux utilisations.

L'analyse de la variance met en évidence que le bois de cœur de l'Eyeck est moins dense que le reste de son bois. Afin de garder des propriétés mécaniques homogènes, il serait opportun de s'assurer de l'élimination du bois de cœur lors du débit pour obtenir des pièces de bois aux propriétés homogènes. Cette recommandation se vérifie lors de la suite de la discussion.

5.3.2. Stabilité dimensionnelle

Retrait volumique total

Selon Schmelzer et al. (2008), l'Eyeck possède un retrait du bois important. Les auteurs ne présentant pas de valeur précise, il est raisonnable de penser qu'aucune étude n'a été menée et que ces affirmations sont basées sur des constatations. Dans notre étude son retrait volumique est considéré comme moyen. Pour le Mubala, la valeur calculée correspond à l'intervalle de retrait mentionné par Vossen et al. (2007), soit un retrait moyen

Le retrait volumique permet de caractériser le changement de volume du bois suite à des variations hygrosopiques en-deçà du point de saturation de la fibre. Plus elle est grande, plus les avivés/sciages risquent de perdre en volume au séchage. Aucune des deux essences ne semble présenter de valeur à risque. Néanmoins, il est primordial de laisser les sciages atteindre l'équilibre hygrosopique lié aux conditions de mise en œuvre avant de les travailler et de les utiliser (Spear et al., 2006; Leboucher, 2014). En extérieur, l'humidité du bois varie entre 13% en été et 19% en hiver, il est alors conseillé de mettre en œuvre le bois entre 15 et 16% afin de limiter les variations de volume. En intérieur, l'humidité varie de 12-13% en été à 7% en hiver, l'humidité idéale de mise en œuvre est donc de 10% (Leboucher, 2014).

Pour cette propriété, le Mubala montre des valeurs moyennes de retrait volumique total constantes dans l'ensemble de son bois. Les sciages pourraient comporter de l'aubier ou du bois de cœur en limitant les risques de déformations dues à une hétérogénéité du retrait au sein des sciages.

L'Eyeck possède une hétérogénéité du retrait en fonction de la position radiale du débit. Le bois de cœur possède un retrait fort, il faut donc prendre des précautions lors du débit pour fournir des sciages exempts de ce dernier. Cette analyse renforce l'idée que le bois de cœur possède des propriétés différentes du bois plus mature (Medzegue et al., 2007). Cette différence est confirmée par Kollmann et al. (1968) et Winandy (1994). L'aubier montre ici une valeur de retrait inférieure à celle du duramen. Cette différence de retrait entre les deux pourrait créer des contraintes dans les pièces composées d'aubier et de duramen.

Cependant, le retrait volumique total seul ne permet pas de définir la stabilité du bois.

Anisotropie du retrait

L'étude séparée du retrait tangentiel et du retrait radial n'apporte que peu d'informations. C'est pourquoi c'est le coefficient de retrait tangentiel sur le retrait radial qui mérite d'être développé. Gérard et al. (2016) donnent la même valeur du quotient d'anisotropie pour le Mubala que cette étude. Il est donc raisonnable de penser que ce ratio est bien représentatif du bois de Mubala. La littérature, à notre connaissance, ne mentionne aucune valeur pour l'Eyeck.

Ce ratio définit l'intensité de la déformation d'une pièce de bois suite à une variation de son humidité d'équilibre. Son interprétation met en évidence le comportement au séchage (Spear et al., 2006). Plus le ratio est élevé, plus les déformations durant le séchage seront marquées (Figure 1). En effet, le séchage du bois n'étant pas uniforme dans la pièce (le centre sèche moins vite que les extrémités), il va créer des contraintes internes qui, en s'ajoutant à l'anisotropie du retrait, vont contribuer à la déformation du bois (Moutee, 2006). Des déformations au séchage importantes entraînent un travail de rabotage et d'équarrissage élevé et une perte de volume notable sur le bois sec pouvant parfois déclasser les sciages (Fays, 2008). De plus, les deux bois étudiés possédant du contrefil, les risques de gauchissement (Figure 36) des débits sur dosse sont importants (Dalois, 1993). Cette déformation rend difficile la valorisation du bois et empêche la commercialisation du sciage (Fays, 2008). Les débits où la section présente une dimension radiale supérieure à la dimension tangentielle, autrement dit les débits sur quartier, ont moins tendance à se déformer (Spear et al., 2006) (Figure 36). C'est pourquoi Dalois (1993) propose de réaliser le débit « Moreau » dans les scieries tropicales (Figure 37). Cependant ce type de débit demande une infrastructure permettant un retournement du bois pour le scier. Ces infrastructures plus lourdes sont peu présentes en Afrique, c'est pourquoi le sciage sur dosse reste le plus utilisé (Fays, 2008).

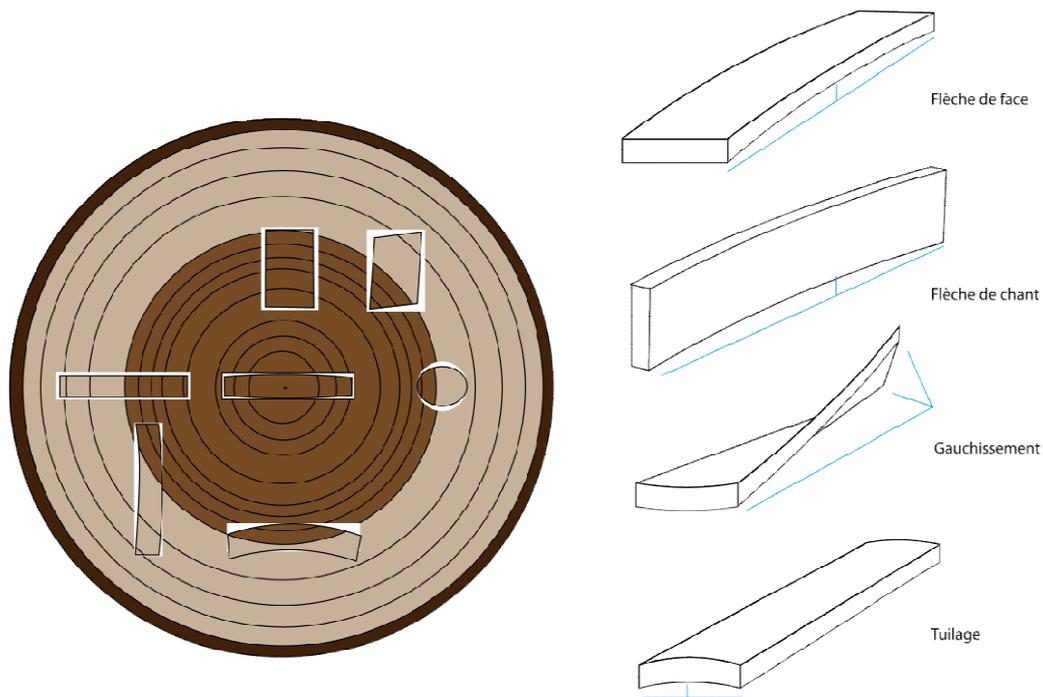


Figure 36: Illustration des déformations induites par l'anisotropie du bois

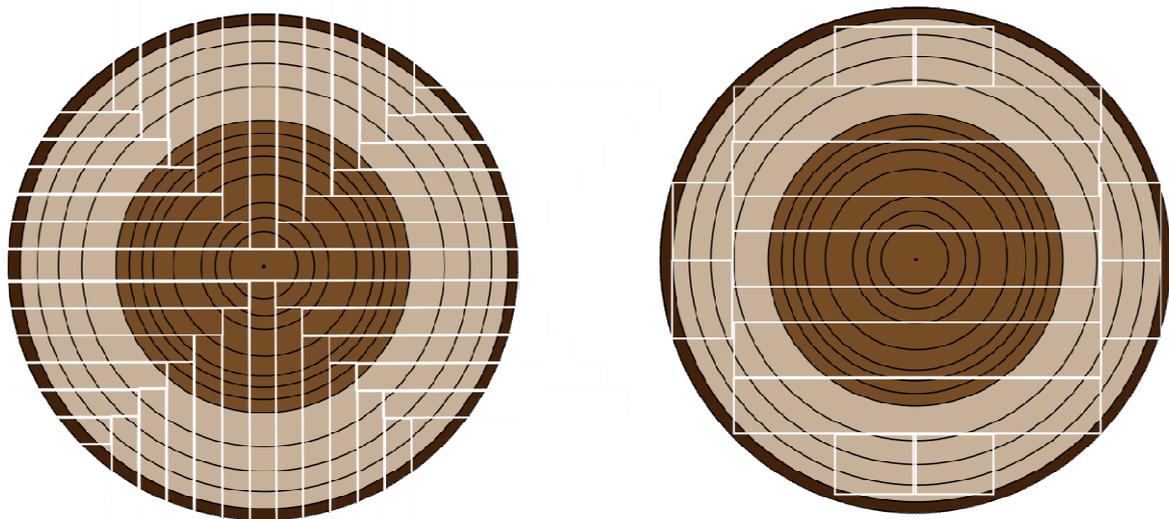


Figure 37: Illustration du débit "Moreau" (à gauche) et du débit « sur dosse » (à droite)

L'Eyek possédant un ratio élevé est sensible à la déformation. Cette tendance à la déformation est d'ailleurs apparue de façon très manifeste après le séchage des bois dans notre étude. Si le débit sur dosse est utilisé pour cette essence, il faut s'attendre à déclasser une partie des sciages et avivés après séchage. Afin de réduire ce risque de déformation, il convient de laisser ressuyer le bois quelques mois avant de lui soumettre un programme de séchage adapté (Sales, 1979; Gerard et al., 1998). Selon Gerard et al. (1998), les débits de faibles sections sont plus sensibles à la déformation. Une seconde solution serait alors de débiter les avivés de grosses sections sur dosse ou sur faux quartier et les sciages/avivés de plus faible section sur quartier.

Le Mubala présente une valeur moyenne d'anisotropie, le débit sur dosse semble donc moins problématique pour cette essence.

Outre la déformation au séchage, les bois possédant un faible ratio sont généralement mieux adaptés aux utilisations qui requièrent une bonne stabilité dimensionnelle (Passarini, 2016). Néanmoins, l'étude isolée de ce facteur ne permet pas de l'affirmer.

Point de saturation de la fibre et coefficient de rétractabilité

Le point de saturation de la fibre et le coefficient de rétractabilité sont deux propriétés qui n'ont pas encore été étudiées pour l'Eyeck, aucune valeur n'est donc disponible. Le point de saturation de la fibre du Mubala présenté par Gérard et al. (2016) est supérieur de 5% à celui calculé lors de cette étude. À retrait volumique total équivalent, il en résulte que le coefficient de retrait volumique est également différent. Gérard et al. (2016) classent le Mubala dans les bois moyennement nerveux. Les résultats de cette étude qualifient le bois comme étant très nerveux.

La valeur du point de saturation de la fibre permet de connaître l'humidité de départ des déformations au séchage. Elle permet également de calculer le coefficient de rétractabilité volumique. Ce coefficient permet de déterminer l'intensité du retrait du bois suite à une variation de 1% de son humidité d'équilibre. Cette indication est utile pour déterminer la stabilité du bois en œuvre (Spear et al., 2006). En effet, si le bois présente un coefficient de rétractabilité volumétrique élevé, une faible variation des conditions de mise en œuvre peut induire des retraits pouvant mettre en péril la stabilité de l'ouvrage. Le Mubala semble à priori sensible aux variations hygroscopiques alors que l'Eyeck ne le serait que moyennement.

Stabilité en service

La compilation des propriétés discutées ci-haut permet de donner une première estimation de la stabilité des essences une fois mise en œuvre. Que ce soit en extérieur ou en intérieur, les conditions de mise œuvre varient au cours de l'année induisant des variations d'humidité du bois. Le Mubala, qualifié de très nerveux dans cette étude, va fortement réagir à ces variations et changer de volume. Néanmoins, son anisotropie étant moyenne, les pièces sont moins enclines à se déformer. L'Eyeck étant moyennement nerveux réagira moins aux variations des conditions ambiantes mais les pièces se déformeront plus amplement. Le chêne étant apte à des utilisations nécessitant une bonne stabilité telle que le placage tranché ou la tableterie (Gérard et al., 2011), il est raisonnable de penser que l'anisotropie affecte moins la stabilité en service du bois que le coefficient de retrait volumique. L'Eyeck ayant une nervosité moyenne semble mieux convenir que le Mubala à des emplois demandant une bonne stabilité. Le Mubala n'est donc pas adapté aux emplois suivants : les bardages et revêtements extérieurs, les panneaux brises vent et pergolas, les fenêtres et portes soumises à des différences importantes de conditions entre les deux faces, les brises soleil, le lambris et l'ébénisterie (Martin et al., 2016).

Cependant, avant de conclure quant à la stabilité d'une essence, il faut également connaître son temps de réaction aux conditions ambiantes. En effet, un bois qui réagit lentement sera nécessairement plus stable, à propriétés équivalente, qu'un bois qui y réagit vite (Spear et al., 2006). Si le Mubala présente une faible vitesse de réaction aux changements des conditions d'application, la liste d'emplois énoncée auparavant devra être revue.

5.4. Propriétés mécaniques

5.4.1. Module d'élasticité en flexion statique

Selon Gérard et al. (2016) la valeur du module d'élasticité du Mubala est de 19.160 Mpa. La classe moyenne étant plafonnée à 18.500 Mpa, ils le classent dans le bas de la classe supérieure. La valeur calculée lors de ce travail est de 24.058 Mpa, soit une des valeurs les plus élevée pour les bois africains (Gérard et al., 2011). Cette différence de près de 5000 Mpa peut fortement influencer l'utilisation du bois. Aucune valeur n'a été trouvée dans la littérature pour l'Eyeck.

Cette propriété permet d'identifier la tendance à la flexion du bois suite à l'application d'une pression tangentielle aux cernes. Ce type de sollicitation est retrouvé notamment en parquet, terrasse, plancher industriel, charpente lourde, fond de véhicules, ponts,... (Martin et al., 2016).

Avec cette valeur élevée, le Mubala peut être employé pour des utilisations industrielles demandant des bois très rigides à l'épreuve du fléchissement. Les utilisations en aménagement intérieur comme le parquet ou les lames de terrasse sont également des utilisations possibles. L'Eyeck étant classé dans la catégorie moyenne de module d'élasticité, les utilisations industrielles citées précédemment ne sont pas envisageables. Cependant, une trop grande rigidité peut également limiter les utilisations. C'est le cas pour les panneaux brise-vent, les pergolas (Martin et al., 2016) et tout emploi nécessitant un cintrage du bois. Les deux essences sont trop rigides pour ces applications.

Il est étonnant de constater que l'aubier d'Eyeck possède un module d'élasticité inférieur au duramen et au bois de cœur. En effet, le bois de l'aubier étant du bois mature, sa structure devrait être identique au duramen mature tout comme ses propriétés mécaniques (Kollmann et al., 1968). Néanmoins, la valeur du module d'élasticité de l'aubier ne le décline pas car elle reste moyenne. Autre constatation, contrairement aux affirmations de Kollmann et al. (1968) et de Zobel et al. (1998), le bois de cœur possède un module d'élasticité semblable au duramen mature pour les deux essences. Tout le bois du Mubala semble pouvoir être utilisé au même titre en contrainte de flexion statique.

5.4.2. Module de rupture en flexion statique

Pour le Mubala, nous obtenons une différence de 13 % par rapport à la valeur observée par Gérard et al. (2016) qui le classent comme bois de résistance moyenne à la flexion. La présente étude le classe dans la catégorie supérieure. Aucune valeur de comparaison n'est disponible pour l'Eyeck.

Cette propriété correspond à la pression maximale en flexion tangentielle aux cernes que peut subir le bois. Cette sollicitation du bois est retrouvée dans le même type d'utilisations que celles mentionnées au point précédent. La limite inférieure de la classe moyenne étant de 75, l'Eyeck possède une faible résistance à la flexion statique. Cependant, comme le test a été réalisé à 15.3% d'humidité, on peut supposer que sa valeur ramenée à 12% serait supérieure à 75 Mpa et donc le classerait dans le bas de la catégorie de résistance moyenne. C'est une valeur plutôt faible par rapport à sa masse volumique. Sa résistance reste cependant suffisante pour le parquet, ou les lames de terrasse à conditions de réduire l'écart entre les lambourdes pour limiter l'effort en flexion en le ramenant en effort de compression. Le Tali, avec un module de rupture en flexion statique inférieur au Mubala, est adapté à la plupart des utilisations avec sollicitation en flexion statique, tant en industrie que pour l'aménagement extérieur (Martin et al., 2016). Il est alors raisonnable de penser que c'est également le cas pour le Mubala

Dans les deux cas, le bois de cœur est moins résistant et doit donc être correctement purgé lors du débit. Le bois d'aubier est aussi résistant que le duramen et peut donc être utilisé au même titre que celui-ci pour ce type de sollicitation.

5.5. Résistance unitaire en flexion dynamique

La résistance unitaire en flexion dynamique est une propriété curieusement peu étudiée. La littérature ne fournit aucune valeur pour ces deux essences.

Cette propriété du bois rend compte de l'aptitude du bois à résister aux chocs et vibrations. Elle permet en outre de définir si un bois peut être utilisé pour un emploi mobile exposé aux chocs ou aux vibrations. Les emplois concernés par ce type de sollicitation sont les fonds de véhicules, les articles de sport, les traverses de chemin de fer (Sallenave, 1955), le bois de calage, les écrans acoustiques en milieux urbain, les travaux hydrauliques, les planchers industriels, et la charpente lourde (Martin et al., 2016). Au vu de la résistance faible et de la grande variabilité du bois d'Eyeck, celui-ci est exclu de toute utilisation soumise aux chocs ou vibrations.

La résistance du bois de cœur du Mubala étant dans une catégorie inférieure à l'aubier et au duramen, son élimination lors de la découpe en scierie est indispensable pour ce type de sollicitation. Le reste du bois de Mubala présente une résistance équivalente au bois de Chêne. Il pourra donc s'inscrire dans des emplois aux sollicitations en flexion dynamique similaires. Les utilisations potentielles pourraient être la traverse de chemin de fer, la fabrication de fonds de wagons, les planchers industriels, la charpente lourde et les fonds de véhicules. Les articles de sport ou les manches d'outils demandent une résistance plus élevée (Sallenave, 1955) et ne conviennent donc pas pour cette essence.

5.5.1. Compression axiale

Selon Gérard et al. (2016), le module de rupture en compression axiale du Mubala serait de 78 Mpa. Dans cette étude, elle équivaut à 87 Mpa. Cette propriété n'a vraisemblablement pas encore été étudiée pour l'Eyeck car aucune donnée n'est disponible.

Ce type de sollicitation est retrouvée dans la charpente, l'ossature ou encore le rehaussement de balcon ou de terrasse. On peut constater que l'Eyeck est le seul à être placé dans la classe moyenne. Au vu de sa densité, il devrait avoir une valeur plus élevée sachant que, de manière générale, et toutes espèces confondues, la résistance à la compression axiale croît avec la densité (Kollmann et al., 1968). On peut en conclure qu'il n'est probablement pas adapté à ce type d'emploi. Le Mubala présente une bonne résistance à la compression pour sa masse mettant en évidence son aptitude aux emplois cités.

Le Mubala présente une différence entre son aubier et son duramen. L'aubier bien qu'ayant une résistance moindre, reste tout de même très résistant en comparaison aux valeurs des autres essences. Néanmoins, il est préférable d'utiliser des matériaux aux propriétés homogènes, c'est pourquoi, dans le cas d'une utilisation avec des sollicitations en compression axiale, il serait préférable de purger l'aubier afin d'obtenir des sections homogènes en bois de duramen.

5.5.2. Dureté de Monnin

La dureté de Monnin du Mubala présentée par Gérard et al. (2016) est de 8.8, soit un bois dur. Dans cette étude, sa dureté est calculée à 8.98 pour 14,6% d'humidité. Il est raisonnable de penser qu'à 12% d'humidité le Mubala présente une dureté de Monnin supérieure à 9 étant donnée que la dureté croît avec la diminution de l'humidité d'équilibre (Kollmann et al., 1968). Aucune donnée n'est disponible pour l'Eyeck.

Cette propriété décrit la résistance d'un bois au poinçonnement, c'est-à-dire, l'enfoncement de la surface du bois sous l'effet d'une charge localisée (Martin et al., 2016). C'est à l'aide de cette propriété qu'on peut discuter, entre autres, de l'aptitude d'une essence à servir de parquet, de marche d'escalier (Picard et al., 2012), de mobilier, d'aménagement intérieur, de traverse de chemin de fer, de plancher industriel ou de fond de véhicules (Martin et al., 2016). Cela dit, la dureté de Monnin étant calculée avec application du cylindre sur la face radiale de l'échantillon, elle n'est valable que pour les planches ou débit sur quartier. L'Eyeck étant déjà très légèrement plus dur que le chêne, il est légitime de penser qu'il le serait un peu plus si le test avait été opéré à 12% d'humidité. L'Eyeck reste cependant classé comme le Chêne dans la catégorie des bois mi-durs. L'utilisation du chêne pour l'ameublement, le parquet, l'aménagement intérieur ou la marche d'escalier étant bien répandue, on peut supposer que la dureté des deux essences est suffisante. Les utilisations demandant une résistance supérieure ne sont pas accessibles à l'Eyeck. Le Tali étant apte aux utilisations industrielles, le Mubala doit l'être également.

Le bois de cœur de l'Eyeck possédant une valeur bien inférieure aux deux autres positions radiales, il serait préférable d'éviter son utilisation avec des sollicitations comme le poinçonnement. L'aubier de l'Eyeck affiche une dureté supérieure au duramen mature. Il peut donc être utilisé dans des emplois soumis au poinçonnement. Avec cette résistance l'aubier seul pourrait être utilisé pour faire du parquet, cependant la largeur de l'aubier ne permettrait pas de faire des planches sur quartier. L'aubier serait alors sur dosse et en proie au risque de gauchissement. La dureté n'étant pas significativement différente entre le duramen et l'aubier du Mubala, les deux pourraient être soumis à de fortes sollicitations en poinçonnement.

5.6. Durabilité naturelle

5.6.1. Coriolus versicolor (Yun Zhi)

Le Mubala présente une médiane de 0,3 de perte de masse. Cette médiane très faible atteste d'une très bonne résistance à la mise en contact de *Coriolus versicolor*. Le bois de Mubala est donc considéré comme étant très durable vis-à-vis de cette pourriture fibreuse capable d'hydrolyser la lignine. La médiane étant bien inférieure à 5% de perte de masse, il est raisonnable de penser qu'il restera dans cette catégorie après 16 semaines d'exposition.

L'Eyeck présente également une médiane inférieure à 5% de perte de masse pour l'ensemble de son bois. Cependant, l'analyse de la variance différencie le bois de duramen des deux autres. L'aubier et le bois de cœur sont classés dans la catégorie des bois « durable » et le duramen est « très durable ». La valeur pour le duramen mature étant assez basse il restera certainement cette classe de durabilité après 16 semaines d'exposition. Cette affirmation n'est peut être pas valide pour les deux autres positions radiales.

5.6.2. Coniophora puteana (Schum ex Fr) Karst.

Le Mubala présente une médiane de 0% de perte de masse. Son bois est donc très durable et le sera également après 16 semaines de mise en contact. Cette essence ne semble donc pas sensible aux pourritures cubiques qui dégradent principalement la cellulose.

Le même constat est fait pour l'Eyeck, avec 0,48% de perte de masse. Cependant l'analyse de la variance révèle une différence significative entre les trois positions radiales bien que toutes restent classées dans la catégorie « très durable ». Il ne faut cependant pas tirer de conclusion hâtive pour le bois d'aubier qui présente une médiane de 3,3%. Afin d'être sûr de la durabilité naturelle de l'aubier, il faut attendre les résultats du test d'exposition de 16 semaines.

5.6.3. Classes d'emplois

La Norme 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 » (AFNOR, 2007) décrit plusieurs classes d'emplois pour le bois (Tableau 30). Ces classes sont définies par une situation de service et chacune d'entre elles est soumise à différents agents de dégradation biologique (Tableau 29). La norme 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, 1994) permet de classer le bois dans ces différentes catégories d'emplois sur base de leur durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores. Les bois classés dans la catégorie « très durable » de durabilité naturelle couvrent les classes d'emplois jusque la classe 5. La durabilité naturelle du duramen des deux essences couvre donc les 5 classes de durabilité. L'aubier de l'Eyeck étant très large, il est intéressant de pouvoir conférer une classe d'emplois aux pièces de bois comportant de l'aubier et du duramen. Etant donné que la durabilité naturelle d'une pièce de bois comportant de l'aubier équivaut à la durabilité naturelle de celui-ci (AFNOR, 1994) les pièces mixtes aubier/duramen d'Eyeck sont classées comme « durable ». La durabilité naturelle vis-à-vis du bois mixte d'Eyeck couvre les 3 premières classes d'emplois. Elle est normalement suffisante pour couvrir la classe 4 mais un traitement de préservation peut être recommandé dans le cas où les éléments composent une pièce porteuse ou si les pièces sont difficiles à remplacer. Il faut également garder à l'esprit que cette affirmation est basée sur les résultats du test de 12 semaines d'exposition, il se peut que ce classement change après les 16 semaines préconisées par la norme.

Ce classement porte uniquement sur la durabilité naturelle face aux champignons lignivores. L'étude de la durabilité naturelle face aux autres agents de dégradation est nécessaire. En effet, si le Mubala révèle une durabilité naturelle faible face aux attaques de térébrants marins, sa durabilité naturelle ne couvrira potentiellement plus que le 4 premières classes. Il pourra cependant être utilisé en classe 5 si un traitement de préservation lui est appliqué. On ne parle plus alors de durabilité naturelle mais de durabilité conférée. Ceci vaut également pour les autres agents de dégradations biologiques.

Tableau 30: Définition des classes d'emplois selon la norme NF EN 335

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

5.7. Synthèse par essence

5.7.1. EyeK

Utilisations potentielles

Après compilation des données apportées par les différents tests, cette essence semble adaptée à :

- (i) La fabrication de panneaux et de carrelots :

Pour ce groupe d'utilisations, les emplois entrent dans les classes de 1 à 4. Si le panneau est destiné à être utilisé en classe d'emplois 4, l'aubier doit être éliminé. Le carrelot multi-plis est utilisé en menuiserie et ne demande pas de propriétés mécaniques trop importantes. La durabilité naturelle couvre les classes d'emplois entre 1 et 3 ce qui est suffisant pour ce type d'utilisation. Il faut cependant vérifier si l'essence réagit bien aux différentes colles. La fabrication de plis ou de face/contre-face de contreplaqué dépend de l'aptitude de l'essence au déroulage/tranchage et au collage. Le déroulage demande des bois tendres à mi-durs avec une bonne conformation de grumes et peu de défauts (Gerard et al., 1998), en ce sens, l'EyeK pourrait convenir à ce type d'utilisation. Le matériel végétal présentait cependant des fentes de cœur qui sont rédhibitoire pour ce type d'utilisation. Si cette voie de valorisation est empruntée, il est nécessaire d'acheminer rapidement les grumes dans les unités de transformation pour éviter le relâchement des tensions internes et l'apparition de fentes. Les propriétés mécaniques de l'aubier étant pour ainsi dire équivalentes (sauf pour le module d'élasticité) à celles du duramen, il pourrait être valorisé dans les plis non visibles des contreplaqués. Ceci limitera l'utilisation des contreplaqués aux trois premières classes d'emplois. Ce bois présente également des motifs moirés et rubanés qui sont des caractéristiques esthétiques intéressantes pour le bois tranché. Cependant, l'anisotropie de cette essence laisse présager un mauvais comportement au séchage. Le tranchage de cette essence peut être délicat et demander beaucoup de précaution lors du séchage.

- (i) La menuiserie extérieure :

Les menuiseries extérieures sont généralement reprises dans les classes d'emplois 3.1 et 3.2., couvertes par la durabilité naturelle de débits mixtes aubier-duramen d'EyeK. Elles regroupent les bardages, portes, fenêtres, claustras, brise-soleils et volets. Ces emplois demandent une certaine stabilité dimensionnelle qui peut être assumée par l'EyeK. Cependant, il est nécessaire de vérifier son temps de réponse à l'humidité pour pouvoir l'affirmer. Les claustras et brise-soleils sont préférentiellement réalisés avec des essences dont le poids propre ne risque pas de mettre en péril sa stabilité, avec son faible rapport *résistances mécaniques/densité* l'EyeK est écarté. Les portes, fenêtres et volets utilisent des organes de fixations et de rotation qui sont sollicités par le poids de l'ouvrage. L'EyeK étant un bois lourd, les ouvrages composés entièrement de ce bois, tels les volets ou les portes en bois massif, risquent de trop solliciter ces organes et déformer ces derniers. Il sera donc préférable de ne pas l'utiliser pour ces emplois. Les portes vitrées ou les fenêtres, composées de bois et d'une vitre, seront alors préférées. Aucune contre-indication n'existe pour le bardage qui est par conséquent une valorisation potentielle du bois.

- (ii) La menuiserie et l'aménagement intérieur :

Ce groupe d'utilisation correspond à la classe d'emplois 1. Les pièces mixtes d'aubier duramen peuvent donc être utilisées. Les emplois concernés sont notamment la fabrication de porte et d'huisserie, le parquet, le lambris, l'agencement et l'ameublement. Ces utilisations demandent une bonne usinabilité du bois et une bonne tenue aux clous et aux vis (Gérard et al., 2016). Il faut que le bois présente également une bonne aptitude à la finition. Pour ce faire, il doit être compatible avec les enduis et vernis courant. Le grain étant grossier, il faut également pouvoir appliquer un bouche porage ou un fond dur (Gerard et al., 1998). Ces

propriétés étant inconnues, il est impossible d'affirmer que l'Eyeck convient parfaitement à la menuiserie et l'aménagement intérieur mais il y semble enclin.

(iii) Aménagement extérieur – loisir :

Dans ce groupe d'utilisations, les emplois sont généralement repris dans la classe d'emplois 4. Il serait alors préférable d'utiliser uniquement du bois de duramen. Les valorisations concernées sont la fabrication de garde corps, de terrasse plain-pied, de plage de piscine, de portail et de panneaux brise vent. Le bois étant moyennement résistant à la rupture en flexion, il sera préférable de réduire l'écart entre les lambourdes qui soutiendront les lames de terrasse. Cela permettrait de réduire l'effort en flexion en le ramenant en effort de compression pour lequel l'Eyeck possède une meilleure résistance.

Faisabilité de la valorisation de l'essence

Le Diamètre Minimum légal d'Exploitation (DME) de l'Eyeck au Cameroun est de 50 cm (Nature + asbl, 2015). D'après l'inventaire d'aménagement des UFAs 10.041-42-44 regroupées (Pallisco, 2004), l'Eyeck présente une densité d'arbre au dessus du DME de 0,132 pieds/ha.

En plus d'une densité assez faible, l'essence présente une structure de population qui laisse présager unvieillessement de la population (Figure 38). En postulant que le diamètre minimum d'aménagement (DMA) corresponde au diamètre minimum de volume exploitable de 110 cm de diamètre calculé au point 5.2.1., on peut supposer qu'il serait au-delà du diamètre de fructification efficace (Ouédraogo et al., 2018). Toutefois, le taux de reconstitution serait probablement très faible. En effet, en considérant la formule de Durrieu De Madron et al. (1997) et des valeurs moyennes pour la croissance, la mortalité annuelle et les dégâts d'exploitation, soit respectivement 5 mm/an, 1 % et 7 %, on obtiendrait seulement 16 % de reconstitution au bout de la rotation fixée à 30 ans. L'exploitation durable de cette ressource semble donc compliquée à mettre en place d'autant plus que la densité au-dessus de 110 cm ne serait que de 0,08 pied par hectare. Dans le cas de Pallisco, il n'est donc probablement pas intéressant de miser sur cette espèce en vue d'une diversification de la production.

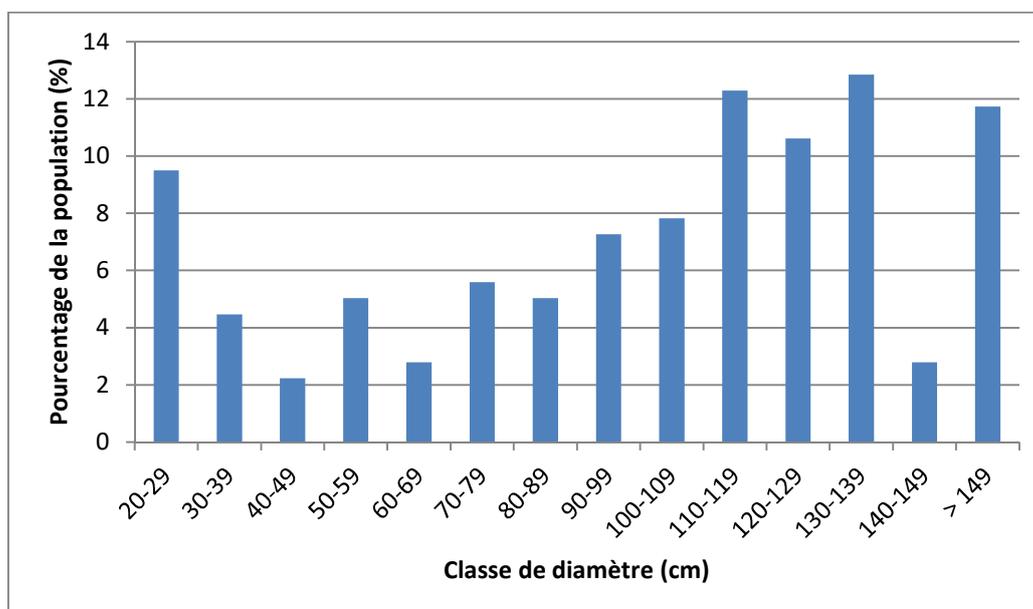


Figure 38: Structure de population de l'Eyeck

5.7.2. Mubala

Utilisations potentielles

La compilation des données discutées précédemment permet de proposer les utilisations suivantes :

(i) Menuiserie et aménagement intérieur :

Ce groupe d'emplois ne présente pas de nombreuses utilisations pour cette essence. Son bois très lourd est limitant dans des utilisations intérieures, c'est pourquoi seul le parquet et la fabrication de porte coupe-feu sont retenus. La stabilité du bois étant *a priori* moyenne, certaines précautions quant à la pose de parquet sont à observer. Les lames de parquet doivent préférablement être mises en œuvre en pose clouée sur lambourde (CAPEB et al., 2005). Pour ce type de pose, le NF DTU 51.1 « Pose des parquets à clouer » (AFNOR, 2010) précise que les lames doivent faire entre 60 et 70mm de largeur et la pose doit être effectuée quand les lambourdes et le parquet atteignent une humidité d'équilibre de +/-9%. Elle préconise également de laisser un jeu périphérique de l'ordre de 5 à 8mm qui sera recouvert par après par les plinthes. Ces précautions de mise en œuvre permettent de limiter les déformations du parquet suite aux variations hygroscopiques. Les portes coupe-feu requièrent des bois d'une densité importante, c'est pourquoi cette essence peut être recommandée. Il faudrait néanmoins tester ce type de porte à l'aide de la norme Belge NBN 713.020.

(ii) Aménagement extérieur-loisir :

Les utilisations retenues pour cette essence sont les escaliers et garde-corps, les terrasse plain-pied et plage de piscine, les terrasse en élévation et le mobilier extérieur ainsi que les aires de jeux. La durabilité naturelle du bois étant très bonne, elle couvre la classe d'emplois 4 dans laquelle se retrouve ce groupe d'utilisations. Néanmoins, l'entretien du bois est indispensable pour le maintien de son aspect esthétique en extérieur (Martin et al., 2016). En raison de sa densité, il est préférable d'utiliser le Mubala pour des équipements fixes et non pour le mobilier transportable. Il faut également mentionner que le Mubala étant un bois très dur, il présente des arrêtes de bois blessantes. Dans une utilisation de loisir, il est dès lors important de chanfreiner les pièces de bois mais également de préférer les assemblages par découpe du bois (tenon-mortaise ou queues droites par exemple) plutôt que visées et écrous (Martin et al., 2016).

(iii) Utilisation industrielle et travaux lourds :

Au vu des propriétés du bois, ce groupe d'utilisation semble être le plus adapté. En effet il demande des performances élevées tant sur le plan mécanique qu'en durabilité naturelle. Les utilisations potentielles sont les travaux hydrauliques en milieu immergé, les ouvrages au contact du sol et de l'eau douce, les écrans acoustiques en milieu urbain, les traverses et bois de calage, le plancher industriel, la charpente lourde et le fond de véhicules. Avant de conclure quant à l'aptitude du bois à servir pour les travaux hydrauliques en milieu immergé sans produits de préservation, il faut étudier sa résistance naturelle vis-à-vis des térébrants marins présents dans l'eau salée. Les ouvrages en contact du sol ou de l'eau douce telles les écluses et certains types de ponts, se retrouvent en classe d'emplois 4, ne posant donc pas de problèmes particuliers quant à l'utilisation du Mubala. Cependant, ce type d'ouvrage peut nécessiter des pièces de bois de longue portée. De par la sinuosité de son tronc, les longueurs des débits tirés de ses grumes sont limitées, ce qui peut empêcher son utilisation sur des ouvrages de grande dimension. Pour pallier à ce problème, l'aboutage et le lamellé collé peuvent être des solutions. Les écrans acoustiques en milieu urbain demandent une classe de résistance mécanique supérieure ou égale à « D30 ». Selon la norme NF EN 338 : Bois de structure – Classe de résistance (AFNOR, 2009), le bois de Mubala peut être classé « D60 » soit trois classes de résistance au-dessus de la classe demandée. Martin et al. (2016) précisent que ce type d'utilisation peut être soumis aux attaques de termites, il est donc nécessaire d'étudier la durabilité naturelle du bois aux attaques de celles-ci avant de mettre en œuvre le bois en zone termitée. La valorisation du bois de Mubala en traverse de chemin de

fer semble prometteuse. En effet ce type d'utilisation demande des débits de longueur de 2,6m pour les voies courantes et de 2,2m à 5m pour les aiguillages et zones de croisement (SNCF, 2008). Ces longueurs sont peu contraignantes et pourraient être obtenues lors du débit. De plus, les traverses de chemin de fer peuvent comporter des défauts si ceux-ci n'affectent leur résistance mécanique (Fays, 2008). Les efforts appliqués aux traverses étant essentiellement en compression et en vibrations, les défauts placés au centre des traverses tel les trous de vers pourraient être tolérés. Il faut cependant faire attention à ce que ces galeries ne deviennent pas des pièges à eau pouvant affecter la durabilité de la traverse. Les traverses en chêne qui sont habituellement utilisées en Europe sont, pour la plupart traitées à la créosote (SNCF, 2008). Ce type de traitement s'avère avoir un impact sur la santé humaine (Ladhari et al., 2008). C'est pourquoi il est intéressant de se pencher sur l'utilisation de bois tropicaux naturellement durables pouvant substituer à ces traverses traitées. L'azobé (*Lophira alata*) est une essence de premier choix mais dont la disponibilité ne cesse de régresser. La SNCF produisant à elle seule 520.000 traverses en bois par an (SNCF, 2008), il est alors raisonnable de penser que la demande en traverses existe et que le Mubala pourrait faire sa place. Cependant la norme EN 13145 précise que le bois doit répondre à une exigence de pénétration du traitement de classe 8, tout l'aubier doit être imprégné. Même si le bois est naturellement durable, son utilisation dépend de son adéquation avec la norme en vigueur. Il est donc nécessaire de vérifier l'imprégnabilité de l'aubier du Mubala pour cette utilisation. Les planchers industriels et fond de véhicules sont des utilisations également intéressantes.

Faisabilité de la valorisation de l'essence

L'inventaire d'aménagement des UFAs 10.041-42-44 regroupées montre que la densité de pieds au-dessus du diamètre minimum d'exploitation (50 cm) est de 1,906 pieds/ha (Pallisco, 2004), soit une densité importante.

La structure de population de l'espèce dans ces UFAs est également intéressante (Figure 39). La régénération de l'essence semble bonne, les tiges de faibles diamètres étant bien représentées. En supposant que le bois d'aubier est complètement éliminé lors du débit et que le bois de cœur est compris dans un diamètre de 20cm, le volume utilisable atteint 70% à un diamètre de 80cm. On peut supposer que ce diamètre est supérieur au diamètre de fructification efficace (Ouédraogo et al., 2018) et accepter cette valeur comme diamètre minimum d'aménagement. En considérant que des valeurs moyennes pour la croissance, la mortalité naturelle et les dégâts d'exploitation sont respectivement de 5mm/an, 1% et 7%, la formule de Durrieu De Madron et al. (1997) permet de calculer un taux de reconstitution de 46% pour une rotation de 30 ans. Ce taux étant relativement bas, le coefficient d'exploitation pourrait être limité à 45 %, ce qui permettrait d'atteindre un taux de reconstitution dépassant les 100 %. Cette limitation paraît réaliste vu les défauts de conformation affectant souvent cette essence. La mise en œuvre de ces différentes contraintes permettrait à Pallisco d'exploiter durablement une quarantaine de pieds par km². Toutefois, les arbres investigués lors de cette étude ayant maximum 83 cm de diamètre, il est nécessaire de vérifier si les arbres plus âgés ne présentent pas plus de défauts. Par ailleurs, les graines de cet arbre étant un Produit Forestier Non Ligneux (PFNL) apprécié des populations locales, son exploitation ne doit pas porter préjudice à leur droit de disposer de cette ressource. Dans la démarche FSC, les concessions forestières sont tenues d'identifier et cartographier avec les populations les terres et les ressources qu'elles utilisent afin de les maintenir. Lors de cette identification, le Mubala devra également être prévu dans les espèces ressources ciblées.

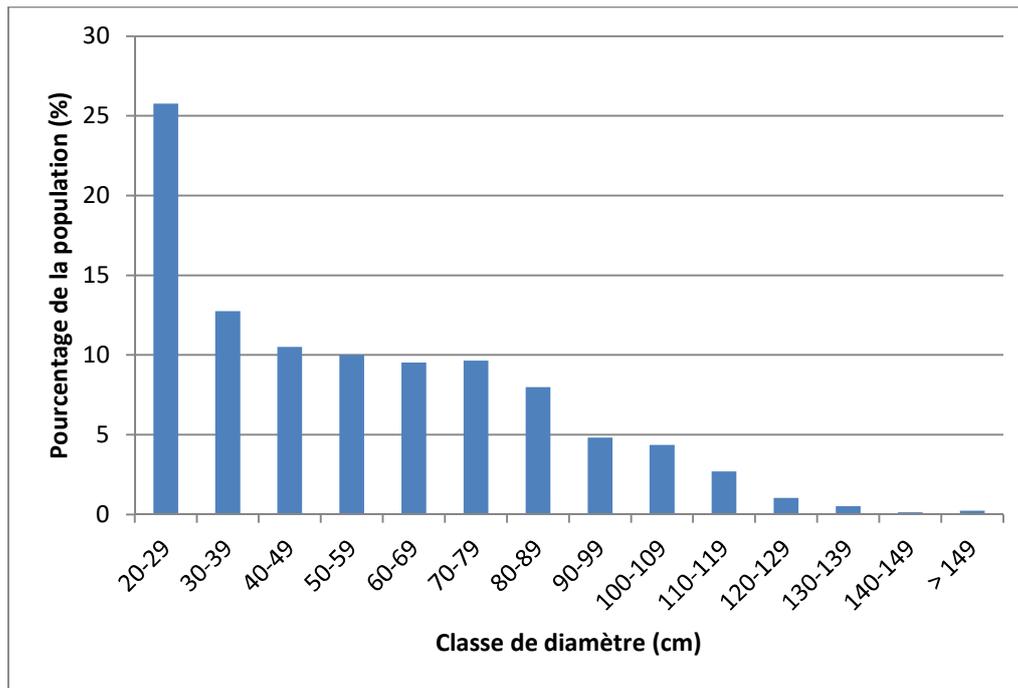


Figure 39: Structure de population du Mubala dans les UFAs 10.041-42-44

5.8. Recommandations

Afin de pouvoir rendre une liste définitive des utilisations potentielles de ces deux essences, il serait judicieux de porter attention aux points suivants :

- (i) Afin de quantifier la résistance du bois aux agents de dégradation biologique, l'étude isolée de la résistance aux champignons lignivores n'est pas suffisante. Pour ajuster les classes d'emplois couvertes par la durabilité naturelle du bois il faudrait également étudier la résistance aux coléoptères xylophages, aux termites et aux térébrants marins (AFNOR, 1994).
- (ii) Il serait opportun d'identifier la sensibilité aux variations hygroscopiques pour ces deux essences. En effet, la stabilité étant un critère limitant pour de nombreuses utilisations, elle a déclassé le Mubala pour beaucoup d'utilisations. Le calcul de cette propriété ne faisant pas l'objet d'une norme, la méthode utilisée par Gerard et al. (1998) est recommandée. Les résultats d'une telle étude permettront d'assurer la stabilité, ou pas, des deux essences.
- (iii) L'imprégnation des essences est un critère essentiel pour savoir si elles sont aptes à recevoir un traitement de préservation. Son étude permettra de conclure quant à la possibilité de donner une durabilité conférée à l'essence dans le cas où la durabilité naturelle ne serait pas suffisante. Une telle étude pourrait être conduite au LTB à Gembloux. En effet, des éprouvettes ont déjà été préparées pour ce test dans le but de le réaliser pour ce mémoire. Cependant le long temps de séchage de ces dernières n'a pas permis d'effectuer le test.
- (iv) La conformation des grumes de Mubala empêche le débit de pièces de grandes longueurs, ce qui peut limiter les rendements au sciage et l'utilisation de ce bois. Le lamellé-collé peut être une piste de solution pour pallier à cette contrainte. En effet, ce type de collage permet de réaliser des pièces de longue portée avec des débits de section identique mais de longueur variable. La découpe de la grume peut alors être optimisée et les rendements en volume au sciage sont plus importants (Bourreau, 2011). Il serait donc pertinent d'étudier l'efficacité des colles d'aboutage et d'encollage pour le Mubala.

- (v) L'EyeK étant destiné principalement à l'aménagement, il serait intéressant d'étudier son usinabilité, sa tenue aux visses et aux clous ainsi que sa réaction aux colles de menuiserie et d'aménagement.
- (vi) Les solutions techniques devront être vérifiées pour que la transformation des ces essences soit économiquement viable et que les rentabilités économiques, considérant les contraintes commerciales, soit assurées.
- (vii) Enfin, les paramètres démographiques (croissance, mortalité, recrutement) des essences devront être vérifiés afin de garantir une exploitation réellement durable.

6. Conclusion

Les deux essences possèdent toutes deux un potentiel de valorisation. L'Eyek semble être une essence qui servira principalement en aménagement intérieur ou extérieur alors que le Mubala serait plus adapté aux utilisations industrielles. L'application des recommandations formulées lors de la discussion permettra de confirmer les propositions d'utilisations et de soumettre des solutions concrètes quant à leur exploitation. Malgré ce potentiel, leur exploitation ne sera durable que si leur structure de population est favorable. En ce sens, seul le Mubala s'avère intéressant pour la société d'exploitation Pallisco. Toutefois, l'attribution d'une gamme d'utilisations et l'identification de structures de populations favorables ne sont que les premières étapes du chemin de la valorisation. La mise sur le marché d'une nouvelle essence demande un travail d'information de longue haleine. Ce travail, divisible en deux axes, doit porter, tant sur l'explication des avantages présentés par ces essences aux différents corps de métier, que sur la conscientisation des consommateurs sur l'importance des concessions certifiées dans le maintien des forêts denses humides. Trop peu de personnes réalisent aujourd'hui que l'achat d'un produit issu de l'exploitation durable des forêts du Bassin du Congo est un acte citoyen en faveur de ces dernières. L'éveil des consciences est essentiel et passe par le partage de l'information. Je m'adresse dès lors à vous chers lecteurs, comme vous l'avez certainement compris, les clefs de la conservation de ces forêts sont à votre portée, les saisissez-vous ?



7. Bibliographie

- Achinewhu S.C., 1986. The effect of fermentation on carbohydrate and fatty acid composition of African oil bean seed (*Pentaclethra macrophylla*). *Food Chem.* **19**(2), 105–116.
- AFNOR, 1985a. *NF B51-005: Bois. Détermination de la masse volumique*, Paris.
- AFNOR, 1985b. *NF B51-006: Bois. Détermination du retrait*, 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, 1985e. *NF B51-004: Bois. Détermination de l'humidité*, 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, 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*.
- AFNOR, 2009. *NF EN 338: Bois de structure. Classe de résistance*.
- AFNOR, 2010. *NF DTU 51.1: Pose des parquets à clouer*.
- Akah P.A., Aguwa C.N. & Agu R.U., 1999. Studies on the antidiarrhoeal properties of *Pentaclethra macrophylla* leaf extracts. *Phyther. Res.* **13**(4), 292–295.
- Alinnor I.J. & Oze R., 2011. Chemical Evaluation of the Nutritive Value of *Pentaclethra macrophylla* benth. (African oil bean) Seeds. *Pakistan J. Nutr.* **10**(4), 355–359.
- Angelsen A., Brockhaus M., Kanninen M., Sills E., Sunderlin W. & Wertz-Kanounnikoff S., 2010. Réaliser la REDD+ Options stratégiques et politiques nationales, 365.
- ATIBT, 2016. *Nomenclature générale des bois tropicaux*, Nogent-sur-Marne, 152.
- Avisé J.C., Walker D. & Johns G.C., 1998. Speciation durations and Pleistocene effects on vertebrate phylogeography. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **265**(1407), 1707–1712.
- Barnosky A.D., Matzke N., Tomiya S., Wogan G.O.U., Swartz B., Quental T.B., Marshall C., McGuire J.L., Lindsey E.L., Maguire K.C., Mersey B. & Ferrer E.A., 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* **471**(7336), 51–57.
- Beisner B., Haydon D. & Cuddington K., 2003. Alternative stable states in ecology. *Front. Ecol.* **1**(7), 376–382.
- Bisiaux F., Peltier R. & Muliele J.-C., 2009. Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, Mampu, en République démocratique du Congo. *BOIS FORETS DES Trop.* **301**(301), 21–32.
- Bourreau D., 2011. Etude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane Française.
- CAPEB, UFFEP, SFCA & APECF, 2005. Parquets Les bonnes pratiques de mise en oeuvre, 24.
- 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 – Part 1 : Basidiomycetes.

- Chapin F.S., Zavaleta E.S., Eviner V.T., Naylor R.L., Vitousek P.M., Reynolds H.L., Hooper D.U., Lavorel S., Sala O.E., Hobbie S.E., Mack M.C. & Diaz S., 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature* **405**(6783), 234–242.
- Chidumayo E.N. & Gumbo D.J., 2013. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. *Energy Sustain. Dev.* **17**(2), 86–94.
- Clark C.J., Poulsen J.R., Malonga R. & Elkan P.W., 2009. Logging concessions can extend the conservation estate for central African tropical forests. *Conserv. Biol.* **23**(5), 1281–1293.
- Dalois C., 1993. Le sciage sur quartier des bois tropicaux modèle de scierie. *Bois Forêts des Trop.* (237), 61–67.
- De Wachter P., 1997. Économie et impact de l'agriculture itinérante Badjoué [sud-Cameroun]. *Civilisations* **44**, 62–93.
- De Wasseige C., De Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux P., Desclée B., Nasi R., Billand A., Defourny P. & Eba'a R., 2010. *Les forêts du Bassin du Congo : état des forêts 2010*, 274.
- De Wasseige C., Flynn J. & Louppe D., 2013. *Les forêts du bassin du Congo : état des forêts 2013*, Weyrich.
- De Wasseige C., Tadoum M., Eba'a Atyi R. & Doumenge C., 2015. *Les forêts du Bassin du Congo - Forêts et changements climatiques*, 128.
- Derbal W., Zerizer A., Gérard J. & Guibal D., 2015. Point de saturation des fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie.
- Dirou S., 2017. LES PRATIQUES EFIR DES SOCIÉTÉS FSC DANS LE BASSIN DU CONGO
SYNTHÈSE Auteur : Sophie Dirou, 34.
- Dirzo R. & Raven P.H., 2003. Global State of Biodiversity and Loss. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **28**(1), 137–167.
- Doucet J.-L., 2003. L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon. *Thèse*.
- Doumbe-Bille S., 2004. Le droit forestier en Afrique centrale et occidentale: analyse comparée, 38.
- Doumenge C., Yuste J.-E.G., Gartlan S., Langrand O. & Ndinga A., 2001. Conservation de la biodiversité forestière en Afrique centrale atlantique: le réseau d'aires protégées est-il adéquat? *BOIS FORETS DES Trop.* **268**, 5–27.
- Durrieu De Madron L. & Forni E., 1997. Aménagement forestier dans l'Est du Cameroun.
- Edwards D.P., Sloan S., Weng L., Dirks P., Sayer J. & Laurance W.F., 2014. Mining and the African Environment. *Conserv. Lett.* **7**(3), 302–311.
- Edwards D.P., Tobias J.A., Sheil D., Meijaard E. & Laurance W.F., 2014. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests. *Trends Ecol. Evol.* **29**(9), 511–520.
- Erwin D.H. & Sepkoski J., 2001. Lessons from the past: Biotic recoveries from mass extinctions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **98**(10), 5399–5403.
- FAO, 2015. FRA 2015 Termes et Définitions, Rome, 37.
- Fargeot C., Forni E. & Nasi R., 2004. Réflexions sur l'aménagement des forêts de production dans le bassin du Congo. *BOIS FORETS DES Trop.* **281**(281), 19–34.

- Fayolle A., Engelbrecht B., Freycon V., Mortier F., Swaine M., Réjou-Méchain M., Doucet J.-L., Fauvet N., Cornu G. & Gourlet-Fleury S., 2012. Geological Substrates Shape Tree Species and Trait Distributions in African Moist Forests. *PLoS One* **7**(8), e42381.
- Fayolle A., Picard N., Doucet J.-L., Swaine M., Bayol N., Bénédet F. & Gourlet-Fleury S., 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...*, 1022.
- FCBA, 2008. *Le guide des essences de bois*, Paris.
- Fischer J., Lindenmayer D.B. & Manning A.D., 2006. Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes. *Front. Ecol. Environ.* **4**(2), 80–86.
- FSC, 2012. FSC Forest Stewardship Council standard for the Congo Basin.
- FSC, 2018. Facts & Figures.
- Gerard J., Edi Kouassi A., Daigremont C., Detienne P., Fouquet D. & Vernay M., 1998. *Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains.*, Montpellier, 185.
- Gérard J., Guibal D., Paradis S. & Cerre J.-C., 2016. *Atlas des bois tropicaux : caractéristiques technologiques et utilisations*, 1003.
- Gérard J., Guibal D., Paradis S., Vernay M., Beauchêne J., Brancheriau L. & Thibaut A., 2011. Tropix 7.
- Harper D.A.T., Hammarlund E.U. & Rasmussen C.M.Ø., 2014. End Ordovician extinctions: A coincidence of causes. *Gondwana Res.* **25**(4), 1294–1307.
- Haurez B., Tagg N., Petre C.-A., Vermeulen C. & Doucet J.-L., 2016. Short term impact of selective logging on a western lowland gorilla population. *For. Ecol. Manage.* **364**, 46–51.
- IBN, 1956. *NBN 225 : Bois. Méthodes d'essai de qualification*, Bruxelles.
- ISO, 2012. *ISO 3129 : Bois – Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques de petites éprouvettes de bois net.*
- ITTO, 2002. ITTO guidelines for the restoration , management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests, Organization, Yokahama, 84.
- Joseph S., Herold M., Sunderlin W.D., - A. & Kundu - S.N., 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries Recent citations. *Environ. Res. Lett.* (7), 12.
- 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), art26.
- Keller R., 1968. Des caractéristiques nouvelles pour l'étude des propriétés mécaniques des bois: les composantes de la densité. *Ann. For. Sci.* **25**(4), 237–249.
- Ken-ichi Nihei †, Bai-ping Ying †, Takanori Murakami ‡, Hiroko Matsuda ‡, Masaru Hashimoto ‡ and & Isao Kubo* †, 2005. Pachyelasides A–D, Novel Molluscicidal Triterpene Saponins from *Pachyelasma Tessmannii*.
- Kissinger G., Herold M. & De Sy V., 2012. Drivers of deforestation and forest degradation: A Synthesis Report for REDD+ Policymakers, Vancouver, Canada, 48.
- Kleinschroth F., Gourlet-Fleury S., Sist P., Mortier F. & Healey J.R., 2015. Legacy of logging roads in the

- Congo Basin: How persistent are the scars in forest cover? *Ecosphere* **6**(4), art64.
- Kollmann F.F.P. & Coté W.A.J., 1968. *Principles of Wood Science and Technology*, Berlin, 560.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. & Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift* **15**(3), 259–263.
- Ladhari N., En Salah F., Ben Amor A., Safi D., Elghack B., Youssef I., Benzarti A., Cherif C., Ben Jemaa A. & Gharbi R., 2008. Effets toxiques aigus lors d'une exposition collective à la créosote chez 57 dockers. *Arch. des Mal. Prof. l'Environnement* **69**(4), 623–630.
- Laporte N.T., Stabach J.A., Grosch R., Lin T.S. & Goetz S.J., 2007. Expansion of industrial logging in Central Africa. *Science* **316**(5830), 1451.
- Leakey R.E. & Lewin R., 1996. *The Sixth Extinction: Patterns of Life and the Future of Humankind*, Doubleday, 288.
- Leboucher B., 2014. Fabriquer en bois massif: anticiper les variations. *Le Bouvet* 21–33.
- Lewis S.L., Lopez-Gonzalez G., Sonké B., Affum-Baffoe K., Baker T.R., Ojo L.O., Phillips O.L., Reitsma J.M., White L., Comiskey J.A., K M.-N.D., Ewango C.E.N., Feldpausch T.R., Hamilton A.C., Gloor M., Hart T., Hladik A., Lloyd J., Lovett J.C., Makana J.-R., Malhi Y., Mbago F.M., Ndangalasi H.J., Peacock J., Peh K.S.-H., Sheil D., Sunderland T., Swaine M.D., Taplin J., Taylor D., Thomas S.C., Votere R. & Wöll H., 2009. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* **457**(7232), 1003–1006.
- Loupe D. & Mille G., 2015. *Mémento du forestier tropical*, Éditions Quae.
- Martin P. & Vernay M., 2016. *Guide d'utilisation des bois africains éco-certifiés en Europe*. ATIBT ed., 100.
- Mathot L. & Doucet J.-L., 2006. *Méthode d'inventaire faunique pour le zonage des concessions en forêt tropicale*, BOIS & FORETS DES TROPIQUES, Soc, 59-70.
- Medjibe V.P., Putz F.E., Starkey M.P., Ndouna A.A. & Memiaghe H.R., 2011. Impacts of selective logging on above-ground forest biomass in the Monts de Cristal in Gabon. *For. Ecol. Manage.* **262**(9), 1799–1806.
- Medzegue M.J., Grelier S., M'Batchi B., Nziengui M. & Stokes A., 2007. Radial growth and characterization of juvenile and adult wood in plantation grown okoumé (*Aucoumea klaineana* Pierre) from Gabon. *Ann. For. Sci.* **64**(8), 815–824.
- Meunier Q., Moubogou C. & Doucet J.-L., 2015. *Arbres Utiles du Gabon*, Gembloux, Belgique, 339.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being*, Washington, DC, 137.
- 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**(March), 2017–2019.
- Moutee M., 2006. Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage.
- Nasi R., Billand A. & van Vliet N., 2012. Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *For. Ecol. Manage.* **268**, 103–111.
- Nasi R., Taber A. & Van Vliet N., 2011. Empty forests, empty stomachs? Bushmeat and livelihoods in the Congo and Amazon Basins. *Int. For. Rev.* **13**(3), 355–368.
- Nature + asbl, 2015. Plan d'aménagement : unité forestière d'aménagement N° 10-47, Région de l'Est, 140.
- Njoku H.O. & Okemadu C.P., 1989. Biochemical changes during the natural fermentation of the african oil

- bean (*Pentaclethra macrophylla*) for the production of Ugba. *J. Sci. Food Agric.* **49**(4), 457–465.
- Noack D., Schwab E. & Bartz A., 1973. Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood. *Wood Sci. Technol.* **7**(3), 218–236.
- Normand D. & Paquis J., 1976. *Manuel d'identification des bois commer*, Nogent-sur-Marne, 335.
- Obeta J.A.N., 1983. A note on the micro-organisms associated with the fermentation of seeds of the African oil bean tree (*Pentaclethra macrophylla*). *J. Appl. Bacteriol.* **54**(3), 433–435.
- Ouédraogo D.-Y., Doucet J.-L., Daïnou K., Baya F., Biwolé A.B., Bourland N., Fétéké F., Gillet J.-F., Kouadio Y.L. & Fayolle A., 2018. The size at reproduction of canopy tree species in central Africa. *Biotropica* **50**(3), 465–476.
- Passarini L., 2016. Étude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres.
- Pereira H.M., Leadley P.W., Proença V., Alkemade R., Scharlemann J.P.W., Fernandez-Manjarrés J.F., Araújo M.B., Balvanera P., Biggs R., Cheung W.W.L., Chini L., Cooper H.D., Gilman E.L., Guénette S., Hurr G.C., Huntington H.P., Mace G.M., Oberdorff T., Revenga C., Rodrigues P., Scholes R.J., Sumaila U.R. & Walpole M., 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science* **330**(6010), 1496–501.
- Picard O., Charron S., Defays E., Frère H., Georges M., Lamy O. & Vandormael L., 2012. Bois - Guide pour le bon usage, Bruxelles.
- Putz F.E. & Redford K.H., 2010. The Importance of Defining 'Forest': Tropical Forest Degradation, Deforestation, Long-term Phase Shifts, and Further Transitions. *Biotropica* **42**(1), 10–20.
- Putz F.E., Sist P., Fredericksen T. & Dykstra D., 2008. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. *For. Ecol. Manage.* **256**(7), 1427–1433.
- Sales C., 1979. Le Séchage des Bois Tropicaux. *Bois forêts des Trop.*
- Sallenave P., 1955. Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française (No. 8), Publications du centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, 128.
- Schmelzer G.H. & Gurib-Fakim A., 2008. *Medicinal plants 1*, PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands.
- SNCF, 2008. Les conséquences socio-économiques d'une éventuelle interdiction de la créosote pour les chemins de fer français, Paris, 10.
- Spear M. & Walker J., 2006. Dimensional instability in timber. In: J.C.F. Walker ed. *Primary Wood Processing: Principles and Practice*. Doordrecht, 95–120.
- Sullivan M.J.P., Talbot J., Lewis S.L., Phillips O.L., Qie L., Begne S.K., Chave J., Cuni-Sanchez A., Hubau W., Lopez-Gonzalez G., Miles L., Monteagudo-Mendoza A., Sonké B., Sunderland T., Ter Steege H., White L.J.T., Affum-Baffoe K., Aiba S.I., De Almeida E.C., De Oliveira E.A., Alvarez-Loayza P., Dávila E.Á., Andrade A., Aragão L.E.O.C., Ashton P., Aymard G.A., Baker T.R., Balinga M., Banin L.F., Baraloto C., Bastin J.F., Berry N., Bogaert J., Bonal D., Bongers F., Brienen R., Camargo J.L.C., Cerón C., Moscoso V.C., Chezeaux E., Clark C.J., Pacheco Á.C., Comiskey J.A., Valverde F.C., Coronado E.N.H., Dargie G., Davies S.J., De Canniere C., Djuikouo M.N., Doucet J.L., Erwin T.L., Espejo J.S., Ewango C.E.N., Fauset S., Feldpausch T.R., Herrera R., Gilpin M., Gloor E., Hall J.S., Harris D.J., Hart T.B., Kartawinata K., Kho L.K., Kitayama K., Laurance S.G.W., Laurance W.F., Leal M.E., Lovejoy T., Lovett J.C., Lukasu F.M., Makana J.R., Malhi Y., Maracahipes L., Marimon B.S., Junior B.H.M., Marshall A.R., Morandi P.S., Mukendi J.T., Mukinzi J., Nilus R., Vargas P.N., Camacho N.C.P., Pardo G., Peña-Claros M., Pétronelli P., Pickavance G.C., Poulsen A.D., Poulsen J.R., Primack

R.B., Priyadi H., Quesada C.A., Reitsma J., Réjou-Méchain M., Restrepo Z., Rutishauser E., Salim K.A., Salomão R.P., Samsedin I., Sheil D., Sierra R., Silveira M., Slik J.W.F., Steel L., Taedoumg H., Tan S., Terborgh J.W., Thomas S.C., Toledo M., Umunay P.M., Gamarra L.V., Vieira I.C.G., Vos V.A., Wang O., Willcock S. & Zemagho L., 2017. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Sci. Rep.* 7(October 2016), 1–12.

Tchatchou B., Sonwa D.J., Ifo S. & Tiani A.M., 2015. *Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo: État des lieux, causes actuelles et perspectives*, Center for International Forestry Research (CIFOR).

Vossen H.A.M. van der, Mkamilo G.S. (Geoffrey S., Corbière H. & AGROOH., 2007. *Oléagineux*, Fondation PROTA.

White F., 1983. The Vegetation of Africa: A Descriptive Memoir to Accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO Vegetation Map of Africa. *Geogr. J.* **151**(1), 132.

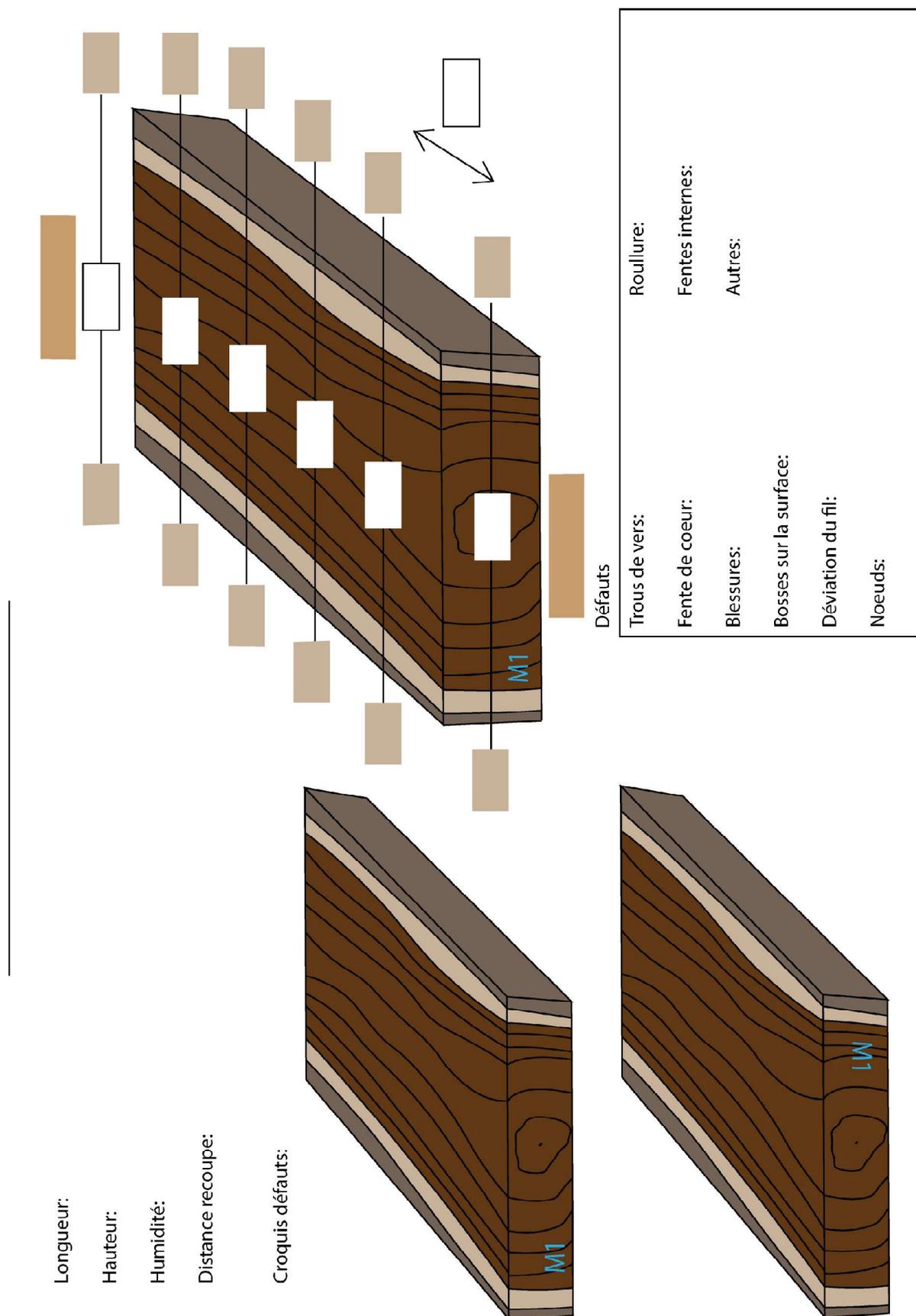
White L.J., 1992. Vegetation History And Logging Disturbance: Effects On Rain Forest In The Lope Reserve, Gabon.

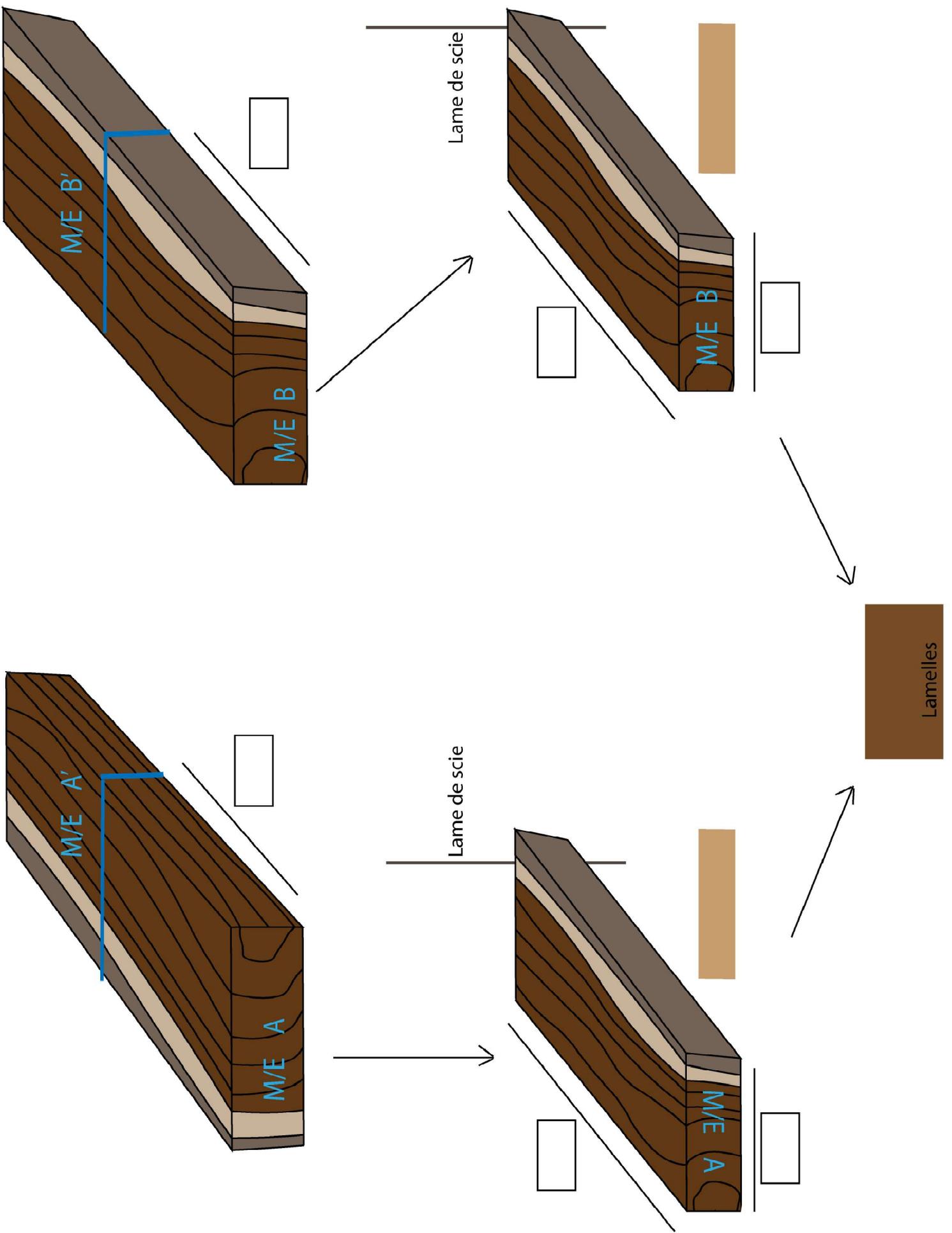
Winandy J.E., 1994. Wood properties. *In: Encyclopedia of Agricultural Science*. Academic Press, Orlando, 549–561.

Zobel B.J. & Sprague J.R., 1998. *Juvenile Wood in Forest Trees*, Springer Berlin Heidelberg, 304.

8. Annexes

8.1. Annexe 1 : Fiche d'encodage des caractéristiques des plateaux





8.2. Annexe 2 : Schéma de traçabilité des éprouvettes de l'EyeK numéro 1

Aubier	1A1	1B1	1C1	1D1
	1A2	1B2	1C2	1D2
	1A3	1B3	1C3	1D3
Aubier	2A1	2B1	2C1	2D1
	2A2	2B2	2C2	2D2
	2A3	2B3	2C3	2D3
	3A1	3B1	3C1	3D1
	3A2	3B2	3C2	3D2
	3A3	3B3	3C3	3D3
	4A1	4B1	4C1	4D1
	4A2	4B2	4C2	4D2
	4A3	4B3	4C3	4D3
	5A1	5B1	5C1	5D1
	5A2	5B2	5C2	5D2
	5A3	5B3	5C3	5D3
	6A1	6B1	6C1	6D1
	6A2	6B2	6C2	6D2
	6A3	6B3	6C3	6D3
	7A1	7B1	7C1	7D1
	7A2	7B2	7C2	7D2
	7A3	7B3	7C3	7D3
	8A1	8B1	8C1	8D1
	8A2	8B2	8C2	8D2
	8A3	8B3	8C3	8D3
	9A1	9B1	9C1	9D1
	9A2	9B2	9C2	9D2
	9A3	9B3	9C3	9D3
	10A1	10B1	10C1	10D1
	10A2	10B2	10C2	10D2
	10A3	10B3	10C3	10D3
	11A1	11B1	11C1	11D1
	11A2	11B2	11C2	11D2
	11A3	11B3	11C3	11D3
	12A1	12B1	12C1	12D1
	12A2	12B2	12C2	12D2
	12A3	12B3	12C3	12D3
	13A1	13B1	13C1	13D1
	13A2	13B2	13C2	13D2
	13A3	13B3	13C3	13D3
	14A1	14B1	14C1	14D1
	14A2	14B2	14C2	14D2
	14A3	14B3	14C3	14D3
	15A1	15B1	15C1	15D1
	15A2	15B2	15C2	15D2
	15A3	15B3	15C3	15D3
	16A1	16B1	16C1	16D1
	16A2	16B2	16C2	16D2
	16A3	16B3	16C3	16D3

	Flexion
	Choc
	Durabilité naturelle
	Non existantes

8.3. Annexe 3 : Tableau des p-valeurs des tests préliminaires aux ANOVAs

Les deux tests préliminaires à la réalisation d'une ANOVA sont les tests de normalité des populations et d'homogénéité des variances. Ce sont les test de Ryan and Joiner et de Levene sont les deux test qui ont été retenus pour vérifier ces propriétés. Les p-valeurs de ces tests sont reprises dans les tableaux suivants pour chaque propriétés ayant fait l'objet d'une ANOVA.

1. Masse volumique à 12% :

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Levene	0,122			0		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	>0,1	0,042	>0,1	>0,1	>0,1

2. Retrait volumique total :

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Levene	0,049			0,641		
Test de Ryan-Joiner	0,91	0,46	>0,1	>0,1	0,018	>0,1

3. Retrait radiale

	EYEK			MUBALA		
	Q	FFQ	FQ	Q	FFQ	FQ
Test de Levene	0,037			0,057		
Test de Ryan-Joiner	0,029	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1

4. Retrait tangentiel

	Eyek			MUBALA		
	Q	FFQ	FQ	Q	FFQ	FQ
Test de Leve,	0,01			0,051		
Test de Ryan-Joiner	0,03	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1

5. Module d'élasticité en flexion statique

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,414			0,454		
Test de Ryan-Joiner	0,042	>0,1	0,039	>0,1	>0,1	>0,1

6. Module de rupture en flexion statique

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,225			0,323		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1

7. Résistance unitaire en flexion dynamique

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,014			0,012		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	<0,01	0,019	0,087	>0,1	0,054

Ln (trav unitaire)

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,06			0,012		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	<0,01	0,019	0,087	>0,1	0,054

8. Contrainte de rupture en compression axiale

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,926			0,7		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	0,072

9. Dureté de Monnin

	EYEK			MUBALA		
	Aubier	Duramen	Bois de cœur	Aubier	Duramen	Bois de cœur
Test de Leven	0,743			0,101		
Test de Ryan-Joiner	>0,1	>0,1	0,019	>0,1	<0,01	0,037