

Potentiel du bois de bouleau (*Betula pendula* Roth & *B. pubescens* Enrh) produit en Région wallonne et en Europe - Application à l'entreprise belge Kewlox

Auteur : Pensis, Zoé

Promoteur(s) : Hebert, Jacques; Jourez, Benoît

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10876>

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.

POTENTIEL DU BOIS DE BOULEAU
(*BETULA PENDULA ROTH & B. PUBESCENS EHRH.*)
PRODUIT EN REGION WALLONNE ET EN EUROPE
APPLICATION A L'ENTREPRISE BELGE KEWLOX

PENSIS ZOE

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS : HEBERT JACQUES, JOUREZ BENOIT

© 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(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT

POTENTIEL DU BOIS DE BOULEAU
(*BETULA PENDULA ROTH & B. PUBESCENS EHRH.*)
PRODUIT EN REGION WALLONNE ET EN EUROPE
APPLICATION A L'ENTREPRISE BELGE KEWLOX

PENSIS ZOE

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS : HEBERT JACQUES, JOUREZ BENOIT

Remerciements

Ce travail qui clôture mes études à la faculté de Gembloux Agro Bio-Tech a pu être réalisé grâce à la participation de nombreuses personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, que je tiens à sincèrement remercier pour leur investissement et leurs temps. Pour commencer, je remercie grandement mes deux professeurs et co-promoteurs, Jacques Hébert et Benoit Jourez, qui m'ont conseillé, épaulé et motivé tout au long de la rédaction de ce mémoire. Un grand merci également à Héloïse Dubois, qui m'a communiqué un grand nombre d'informations, de documents très utiles et avec qui j'ai eu l'occasion d'avoir des échanges plus qu'intéressants.

Je remercie également la personne sans qui ce travail n'aurait pas pu aboutir, Mme Geneviève Le Clercq, directrice de l'entreprise Kewlox. Elle m'a accordé de son temps précieux, s'est toujours montrée disponible et m'a ouvert gracieusement les portes de son entreprise pour que j'y réalise mes expérimentations. Ces dernières ont pu être menées à bien grâce à la supervision de deux membres du personnel, dont Philippe, le chef de menuiserie, que je souhaite remercier tout autant.

Merci beaucoup aux membres du personnel du Laboratoire de Technologies du Bois de Gembloux, qui m'ont accueilli à bras ouverts et qui se sont occupés de me fournir du matériel de base pour la réalisation de mes expérimentations en usine.

Je tiens aussi à remercier le DNF et, particulièrement, Monsieur Pierre Couvreur, qui m'a donné accès à la base de données des ventes de bois publiques nécessaires à mon analyse.

Finalement, ce travail a pu être mené à bien grâce au soutien de mes proches, familles et amis, qui m'ont toujours soutenu malgré les doutes. Merci pour vos encouragements, vos relectures, conseils et surtout, merci d'avoir cru en moi.

Résumé

L'entreprise belge Kewlox, spécialisée dans l'ameublement design d'intérieur, confectionne à ce jour ses produits en bois brut uniquement à partir de hêtre. Cependant, l'avenir de ce dernier semble compromis. En effet, depuis plusieurs années, les forêts sont touchées par des problèmes sanitaires sévères de plus en plus nombreux. La forêt wallonne et ses essences commerciales ne font pas exception. Parmi celles-ci, le hêtre, 3^{ème} essence les plus représentées en Région wallonne avec 13 millions de m³ sur pied, est victime de dépérissements importants. A ces problèmes sanitaires s'ajoute la menace toujours grandissante du changement climatique qui n'épargnera pas cette essence, particulièrement sensible aux sécheresses estivales et aux canicules.

Le bouleau produit en Région wallonne est un candidat intéressant pour remplacer le bois de hêtre dans les produits de la marque Kewlox, si cela s'avère nécessaire. Leurs caractéristiques physico-mécaniques sont proches et le bouleau, bien que sa ressource actuelle soit plus faible que celle du hêtre, présente un potentiel d'avenir très intéressant dans le cadre des changements climatiques prédits. De plus, des essais d'usinabilité réalisés au sein de l'entreprise sur 57 barreaux de bois de bouleau ont démontré que les deux essences se travaillent et réagissent de façon identique lors des différentes étapes de transformation pour la réalisation de traverses de meubles de la marque. Toutes deux présentant un bois clair, l'esthétisme des produits finis diffère tout de même entre les deux essences. Le bois de bouleau est plus brillant et ses rayons ligneux ne sont pas visible à l'œil nu, donnant un aspect très homogène. Les taches médullaires représentent le défaut le plus souvent observé sur les produits finis. Cependant, elles n'entravent pas la qualité visuelle de ces derniers et ne représentent donc pas un problème majeur. La principale limite dans le remplacement du bois de hêtre par le bois de bouleau est la disponibilité future de ce dernier qui, bien que prometteuse par sa ressource actuelle grandissante, n'est actuellement qu'hypothèse.

Abstract

The Belgian company Kewlox, specialized in interior design furnishings, currently manufactures its raw wooden products only from beech wood. However, its future seems to be in jeopardy. In fact, for several years, forests have been affected by increasingly severe health problems. The Walloon forest and its commercial species are no exception. Among these, beech, the third most represented species in the Walloon Region with 13 million m³, is the victim of significant decline. Beside these health problems, there is the ever-growing threat of climate change, which will not spare this species particularly sensitive to summer droughts and heat waves.

Birch trees produced in the Walloon Region are a valuable candidate to replace beech wood in Kewlox portfolio, if necessary. Their physico-mechanical characteristics are similar and birch, although its current resource is lower than beech, has a very interesting potential in the context of expected climate changes. In addition, machinability tests carried out within the company on 57 birch wood bars have shown that the two species work and react the same way during the various processing stages. Both have a light wood, but the aesthetics of the finished products still differ between the two species. Birch wood is brighter and its woody rays are barely visible to the naked eye, giving a very homogeneous appearance. Pith flecks are the most common defect observed in finished products. However, they do not hamper the visual quality of the latter and therefore do not represent a major problem. The main limitation in replacing beech wood by birch wood is the future availability of the latter which, although promising by its current growing resource, is currently only a hypothesis.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. ELÉMENTS CONTEXTUELS.....	1
1.2. OBJECTIF	2
2. L'ENTREPRISE KEWLOX	3
2.1. HISTOIRE ET GÉNÉRALITÉS.....	3
2.2. CONCEPTS ET PHILOSOPHIE	3
2.2.1. USINAGE DES PIÈCES EN BOIS.....	5
2.3. BESOINS DE L'ENTREPRISE.....	6
2.3.1. LES ÉLÉMENTS EN BOIS	6
2.3.2. APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRE PREMIÈRE	8
2.3.3. REMPLACEMENT DU HÊTRE PAR LE BOULEAU : CRAINTES, QUESTIONNEMENT ET EXIGENCES DE L'ENTREPRISE.....	9
3. LE BOULEAU.....	10
3.1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE L'ESSENCE	10
3.1.1. APTITUDES ÉCOLOGIQUES.....	10
3.1.2. PHÉNOLOGIE	12
3.1.3. CROISSANCE ET PRODUCTIVITÉ	12
3.1.4. INTÉRÊT DES PEUPEMENTS ET AVANTAGES POUR LA BIODIVERSITÉ	13
3.2. PROPRIÉTÉS DU BOIS DE BOULEAU.....	13
3.2.1. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	13
3.2.2. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	17
3.2.3. DURABILITÉ.....	17
3.2.4. PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES ET ASPECTS VISUELS	18
3.2.5. COMPARAISON AVEC LES PROPRIÉTÉS DU HÊTRE	18
3.3. PRINCIPAUX USAGES	20
3.4. TRANSFORMATIONS	20
3.4.1. SCIAGE ET SÉCHAGE	21
3.4.2. STOCKAGE	23
3.4.3. RABOTAGE.....	23
3.4.4. PROFILAGE, FINITIONS ET TRAITEMENTS.	23

4.	RESSOURCES	24
4.1.	RESSOURCE ACTUELLE DU BOULEAU EN RÉGION WALLONNE	24
4.1.1.	IMPORTANCE SUR LE MARCHÉ BELGE	27
4.2.	RESSOURCE FORESTIÈRE MONDIALE	30
4.2.1.	IMPORTANCE SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN.....	31
4.3.	RESSOURCE FUTURE ATTENDUE	31
5.	ANALYSE DES VENTES DE BOIS.....	33
5.1.	LOGICIEL « PRIX DES BOIS ».....	33
5.2.	MÉTHODE D'ANALYSE DES VENTES POUR LE BOULEAU ET LE HÊTRE	34
5.3.	RÉSULTATS.....	34
6.	ESSAIS D'USINAGE AU SEIN DE LA MENUISERIE KEWLOX	39
6.1.	MATÉRIEL ET MÉTHODE	39
6.1.1.	MATÉRIEL.....	39
6.1.2.	MÉTHODE.....	42
6.2.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	46
6.2.1.	PRODUITS OBTENUS	46
6.2.2.	ANALYSE QUALITATIVE LORS DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE L'USINAGE _ APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ DE TRANSFORMATION PAR LES MENUISIERS	47
6.2.3.	RENDEMENT USINAGE.....	50
6.2.4.	DÉFAUTS ET ASPECT VISUEL DES PIÈCES USINÉES	52
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	57
8.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

1. Introduction

1.1. Eléments contextuels

La forêt wallonne occupe actuellement, et selon les données récoltées par l'Inventaire forestier wallon, 554 000 ha, soit 33% du territoire. La portion de surface productive est de 479 500 ha, dont 53% de celle-ci sont occupés par les peuplements feuillus (IPRF Wallonie, 2020).

Le hêtre fait partie des essences commerciales principales en Région wallonne. Les hêtraies pures représentent 9% de la zone boisée productive. L'essence est également présente dans les peuplements mélangés, principalement avec le chêne. Le hêtre (13 millions de m³ sur pied) est dès lors l'une des essences les plus représentées en Wallonie, derrière le chêne indigène (20,9 millions de m³) et l'épicéa (48,5 millions de m³) (IPRF Wallonie, 2020). Cependant, au vu des changements climatiques globaux et de son état sanitaire actuel, l'avenir du hêtre en Région wallonne pourrait être compromis.

Les modèles climatiques prédisent, entre autres, des précipitations estivales plus faibles et hivernales plus abondantes, creusant de la sorte le fossé entre des extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau (Landmann & al, 2008). Le hêtre est une essence sensible au manque d'eau et particulièrement aux sécheresses estivales accompagnées de périodes caniculaires, ce qui représente sa principale faiblesse face aux changements climatiques (Fichier écologique des essences, 2017). S'ajoute à cela le poids des effets cumulatifs avec d'autres aléas comme les précipitations importantes qui sensibilisent notamment les jeunes hêtres en empêchant leur bon enracinement (Landmann & al, 2008). Le GIEC prédit une augmentation croissante des températures moyennes annuelles d'ici la fin du 21^{ème} siècle, pouvant aller jusqu'à 3 ou 4 degrés supplémentaire en période estivale (Latte, 2017). Cette hausse de température accentuera l'impact lié à la sécheresse particulièrement néfaste au hêtre, comme énoncé plus haut.

A ces aléas climatiques s'ajoute le phénomène de dépérissement déjà établi au sein des forêts wallonnes. En Ardenne notamment, des signes de dépérissement ont été observés sur le hêtre depuis une dizaine d'années (Teng & Chandelier, 2018). Les phénomènes observés sont les suivants : dégarnissement de cime, présence de rameaux morts ou encore feuillage jaunâtre et de petite dimension. Des dégâts plus impressionnants tels que des bris de troncs sont également observés depuis 2017 dans certains cantonnements, résultant de l'activité *Fomes fomentarius*, champignons lignivores et pathogène de faiblesse. Le pathogène du genre *Phytophthora* joue également un rôle dans ce phénomène de dépérissement du hêtre, bien que celui-ci ne soit pas à ce jour précisément défini. Des études sont actuellement réalisées par le CRA-W, en collaboration avec Gembloux Agro Bio-Tech et l'Université catholique de Louvain, afin de déterminer les causes et conséquences de ces dépérissements. Il est toutefois raisonnable de penser que l'état sanitaire du hêtre pourrait se voir aggravé avec l'impact du changement climatique. Ce dernier fragilisant l'essence qui deviendra alors davantage sensible aux pathogènes, eux, ayant une capacité d'adaptabilité plus rapide face aux phénomènes climatiques prédits.

C'est dans ce contexte que la société belge Kewlox, spécialisée dans la fabrication de meubles de rangement design, souhaite identifier une essence de remplacement pour ses pièces en bois massif actuellement exclusivement façonnées en hêtre. L'avenir de ce dernier étant incertain, l'entreprise se veut proactive face aux aléas futurs en envisageant, si cela s'avère nécessaire, de remplacer le hêtre

dans ses productions. Dans cette optique, le bois de bouleau, dont les caractéristiques sont proches de celles du hêtre, semble a priori présenter un potentiel intéressant comme essence alternative, si la ressource est suffisante. Outre les similitudes entre les deux bois, l'attrait pour le bouleau s'illustre également par l'envie de l'entreprise de fonctionner en circuit-court, avec une majorité de bois local.

Avant de détailler les objectifs de ce travail, il est à noter que ce dernier a été réalisé durant la période de pandémie du covid-19. Le confinement imposé en Belgique limitant grandement les possibilités d'expérimentation en dehors du domicile, les objectifs ont dû être réadaptés au jour le jour en fonction de l'évolution de la situation.

1.2. Objectif

Afin de répondre à la demande de la société Kewlox, ce travail a pour objectif principal d'analyser le potentiel du bouleau comme essence de remplacement du hêtre pour la réalisation des meubles tels que l'entreprise les conçoit actuellement.

Pour atteindre cet objectif, il convient premièrement de présenter la société et d'en décrire les activités et besoins. La définition de ces derniers permet de mettre en lumière les propriétés attendues du bois massif utilisé dans la confection de leurs meubles et de cibler l'étude du bois de bouleau en fonction de celles-ci.

Un second chapitre détaille les caractéristiques principales de cette essence et compare certaines de ses propriétés avec celles du hêtre sur base bibliographique. En effet, leurs bois présentent des propriétés mécaniques et visuelles proches qu'il est intéressant de préciser, mais les deux essences se différencient toutefois par leur disponibilité. Les informations trouvées dans la littérature sont assez générales et pas toujours suffisamment précises. Cela s'explique par le manque d'intérêt porté au bouleau jusqu'à présent en Europe occidentale. Afin de fournir les précisions attendues, une analyse des propriétés mécaniques du bois de bouleau issu des forêts wallonnes était prévue par la mise en place d'essais au sein du Laboratoire de Technologie du Bois (DEMNA). Cependant, la situation causée par la pandémie n'a pas permis la réalisation de ces expérimentations. La description des propriétés physico-mécaniques du bouleau se limite donc ici à une étude bibliographique.

La ressource du bouleau en Région wallonne et en Europe sont détaillées dans le chapitre suivant, sur base de recherches bibliographiques également. Ces informations sont complétées par des résultats issus d'une analyse des ventes de bois en Wallonie pour les quatre dernières années qui illustrent la place du bouleau dans les lots vendus lors des ventes publiques. Cette analyse des ventes a également permis de comparer les prix unitaires (au m³) du bouleau et du hêtre, grâce au logiciel d'estimation des prix « Prix des Bois ». La description de ce dernier ainsi que les résultats obtenus font l'objet du chapitre 5.

La partie expérimentale de ce travail concerne la réalisation d'essais en usine au sein de l'entreprise Kewlox. Il s'agit d'une étape indispensable pour justifier le remplacement potentiel du bois de hêtre dans leur production. Des pièces types ont dès lors été usinées par leurs menuisiers en bois de bouleau belge, avec leurs propres machines et dans les mêmes conditions de transformation que lors du travail du hêtre. Le chapitre 6 détaille le matériel, les étapes expérimentales ainsi que les résultats obtenus.

2. L'entreprise Kewlox

2.1. Histoire et généralités

Kewlox est une entreprise bien connue du monde de l'ameublement en Belgique et à l'étranger, dont la réputation n'est plus à faire. Elle valorise notamment le matériau bois en l'incluant dans la fabrication de ses meubles de rangement design personnalisables au look unique, indissociable de la marque.

Si ces meubles ont vu leur popularité grandir, c'est notamment par leur conception particulière permettant leur assemblage via des cornières métalliques, sans l'utilisation de vis ou de colle. Ils sont dès lors aisément assemblables par l'acheteur et entrent dans une philosophie minimaliste, sans pièces superflues et avec un impact minimisé sur l'environnement par l'absence de colle, notamment. A cet aspect s'ajoute également l'esthétisme de ces meubles Kewlox qui se veut épuré, sobre mais aussi personnalisable.

La société Kewlox a été fondée en 1959 par M. Maurice Le Clercq. Une quarantaine d'années plus tard, la marque voit son réseau s'agrandir aux Pays-Bas, ainsi que rapidement en France et en Allemagne. Depuis lors, innovations après innovations, Kewlox ne cesse de se développer tout en gardant la même philosophie et mode de conception qui a fait sa réputation. Aujourd'hui, l'entreprise est dirigée par Mme. Geneviève Le Clercq.

L'usine et le showroom se situent à Leuze, dans la province de Namur. Quatre autres magasins se trouvent à Anvers, Liège, Kraainem en Belgique et à Köln en Allemagne. L'entreprise emploie actuellement 25 personnes, employés et ouvriers confondus. L'usine de 3500 m² comprend six halls et 15 machines. Le chiffre d'affaire est de 3 millions d'euros.

2.2. Concepts et philosophie

Par son mode d'assemblage de ses meubles sans clou, vis et colle, Kewlox se différencie de la grande majorité des entreprises d'ameublement. La marque propose de la sorte des meubles faciles à monter et à démonter, avec un nombre restreint de pièces. L'entreprise souhaite offrir à sa clientèle, en plus de meubles minimalistes en termes de matériels et conception, des meubles durables et solides sur le long terme. Kewlox se situe loin de la tendance actuelle de surconsommation et se veut responsable, tant au niveau des matériaux utilisés que de la qualité de ses produits.

Un autre concept de l'entreprise, qui fait également sa réputation, est le caractère personnalisable de ses meubles de rangement. De fait, depuis sa conception, Kewlox n'a cessé de proposer de nouveaux modèles, accessoires et finitions. Aujourd'hui, la marque propose 40 couleurs de panneaux, 10 largeurs, 5 profondeurs et 7 hauteurs de casiers. Tout cela avec différents assemblages de matériaux possibles. Les panneaux et portes sont proposés en MDF (panneau de fibres à moyenne densité) naturel ou mélaminé, en acrylique translucide ou opaque, et également en verre, miroir ou aluminium. Les cornières sont toujours métalliques et proposées en quatre couleurs. Cette palette d'options fait de ces meubles des produits personnalisables presque à l'infini. Seules les traverses sont toujours faites de bois massif, sans finition.

La figure ci-dessous démontre le principe général d'un meuble Kewlox. Il s'agit d'une armoire de 80 cm de largeur et 42 cm de profondeur pourvue de trois casiers, dont un sans porte. Les cornières sont ici en inox, les plateaux en MDF blanc, les traverses en bois massif et les portes, côtés et fonds en acrylique noir (Figure 1). Ce type de configuration peut être détourné en penderie, étagère, meuble bas, vitrine ou encore meuble suspendu, et être intégré dans la majeure partie des pièces d'une habitation.



Figure 1: exemple d'une armoire Kewlox.

Le tableau ci-après reprend les différentes dimensions de casier possibles (Tableau 1).

Tableau 1 : Dimensions des casiers.

Largueur	25, 32, 42, 52, 62, 80, 90, 100, 110 et 120 cm *dimensions pour lesquelles des portes coulissantes peuvent être intégrées
Profondeur	25, 32, 42, 52 et 62 cm
Hauteur	10, 27, 37, 47, 98, 119 et 139 cm *dimensions pour lesquelles des portes coulissantes peuvent être intégrées

Les hauteurs indiquées ci-dessus représentent les hauteurs utiles de casier, c'est-à-dire sans tenir compte de la taille des traverses et donc de la hauteur réelle du meuble.

Le montage se veut le plus simple possible. Pour chaque étage du meuble, le principe est d'insérer les traverses dans les cornières métalliques suivies de tasseaux verticaux de la hauteur du casier correspondant. Les côtés et le fond sont ensuite encastrés dans les traverses et les tasseaux. Finalement, le plateau peut être inséré. Ce montage se fait à partir du bas du meuble jusqu'au dernier casier supérieur. Une fois le dernier plateau placé, les portes sont ajoutées.

L'entreprise, écoresponsable, fabrique ses produits dans son usine située en Belgique et de façon semi-artisanale. Elle a été sélectionnée pour faire partie de la campagne « j'achète belge », car reconnue officiellement par les institutions soutenant le design local. De la découpe des éléments en bois et la

fabrication de cornières jusqu'à l'emballage et la vente, tout se veut belge. Le circuit court entre producteur et consommateur est donc de mise.

Kewlox est une entreprise moderne et responsable, qui se veut à contre-courant de la surconsommation mondiale actuelle en proposant des produits durables, locaux et avec un moindre impact environnemental.

2.2.1. Usinage des pièces en bois

Etape n° 1 : rabotage



Passage des barreaux à la quatre-faces de la marque Weinig Profimat 23 E.

Aucune modification des longueurs lors de cette opération.

Utilisation d'un lubrifiant de la marque Waxilit pour faciliter le passage du bois dans une machine à surfaces métalliques.

Vitesse de rabotage : 18m/min.

*Dimensions initiales : 50*26mm - 50*38mm.*

*Dimensions finales : 45*21mm - 45*31mm.*

*Mise en longueur des barreaux.
Découpe des rainures destinées à accueillir les montants métalliques.
Découpe d'onglets (coupes diagonales des cotés selon un angle de 45°).*

Vitesse : 10m/min ou 11m/min.

*Dimensions initiales et finales : 45*21mm – 45*31mm (longueurs variables).*

Etape n° 2 : mise en longueur à la tenonneuse



Etape n° 3 : profilage des cotés à la moulurière



Profilage des côtés, donc des rainures destinées à recevoir portes, plateaux et cotés de casiers.

Vitesse : 10m/min ou 11m/min.

*Dimensions initiales : 45*21mm – 45*31mm.*

*Dimensions finales : 40*21mm – 40*31mm (longueurs variables).*

Il y a rupture dans la chaîne de production entre le rabotage et la mise en longueur des barreaux. Cela permet à l'opérateur de la menuiserie de vérifier les défauts potentiels et de les purger ou de réduire la taille des barreaux avant la suite du processus. Le cahier des charges n'autorisant pas l'approvisionnement de matériel avec nœuds, gerces ou fentes, l'observation se limite principalement à la rectitude des pièces (Annexe 1). Celles qui sont trop cintrées sont recoupées dans leur longueur pour corriger ce défaut.

En parallèle, des tasseaux de longueurs allant de 10 à 47 cm et de section 1.92*1.92 cm² sont souvent fabriqués dans les chutes provenant de barreaux ou parties de barreaux rejetés en raison de l'existence d'un défaut (Figure 2).

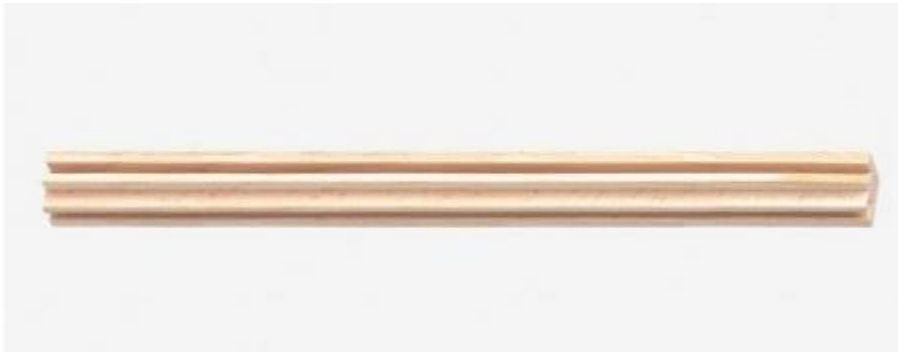


Figure 2 : Tasseau en bois massif de hêtre.

2.3. Besoins de l'entreprise

2.3.1. Les éléments en bois

Comme indiqué précédemment, Kewlox utilise deux types de matériaux de base pour ses confections de pièces en bois. Du bois massif de hêtre sert à la fabrication de traverses de section 40*21 mm² ou 40*31mm². Leur longueur dépend évidemment de la profondeur et de la largeur du meuble. Il existe six profilés différents :

- Traverses frontales : inférieure et supérieure (Figures 3 et 4).



Figure 3 : traverse frontale inférieure



Figure 4 : traverse frontale supérieure

- Traverses dorsales et latérales : inférieure et supérieure (Figure 5 et 6).



Figure 5 : traverse dorsale/latérale inférieure



Figure 6: traverse frontale/latérale supérieure

- Traverses frontales renforcées (pour les meubles de largeur supérieur ou égale à 110cm) : inférieure et supérieure (Figure 7 et 8).



Figure 7 : traverse frontale inférieure renforcée



Figure 8: traverse frontale supérieure renforcée

Les traverses dites « inférieures » sont destinées à être placées entre les casiers. Les « supérieures » sont placées aux extrémités des meubles et ne possèdent, dès lors, de rainures que sur une des faces. Les traverses frontales sont découpées pour pouvoir y insérer les portes. Les latérales/dorsales, elles, ne sont pourvues que d'une rainure de part et d'autre permettant d'y placer les panneaux verticaux faisant office de côtés et de dos de casiers.

Ces différents profilés sont découpés au sein de la menuiserie de l'entreprise à partir de sciages bruts. Des tasseaux de longueurs variant entre 10 et 47 cm et de section 1.92*1.92 cm² sont également fabriqués à partir de bois massif.

Ces pièces en bois massif de hêtre ne font l'objet d'aucun traitement de finition ni d'aucune modification de leur aspect visuel. Il est donc important que la qualité des sciages soit impeccable, tant au niveau de leur couleur que de leur absence de défauts. L'entreprise exige d'ailleurs auprès de ses fournisseurs des planches brutes de premier choix, sans gerces, fentes ni nœuds et parfaitement droites. Les tasseaux, compte tenu de leurs plus faibles dimensions, peuvent en partie être façonnés dans le bois destiné aux traverses présentant un très léger cintrage.

Bien que ce travail porte sur les pièces précédentes faites de bois massif, il faut savoir que l'entreprise utilise également du bois sous forme de panneaux MDF (panneau de fibres à moyenne densité). Il est

utilisé pour les plateaux qui constituent les fonds et/ou les plafonds des casiers et qui s’encastrent dans la structure en bois massif. Le MDF est également un des matériaux proposés pour la confection des portes coulissantes et des parois latérales. L’épaisseur de ces panneaux est de 3 mm, avec des variantes possibles comme des plateaux supérieurs de 18mm ou des doubles plateaux verre/MDF. Toute la structure est renforcée par des cornières métalliques (Figure 9).



Figure 9 : Structure de meuble avec cornière métallique, traverses en bois massif, plateaux et pièces de casier en MDF naturel.

2.3.2. Approvisionnement en matière première

Kewlox est approvisionné en matière première via différents fournisseurs. Un négociant en bois et deux scieries belges en ont actuellement la charge. L’approvisionnement se fait à raison d’une dizaine de camions par an, ce qui équivaut à environ 300-400 m³ de bois scié. Ceux-ci fournissent l’entreprise de façon régulière, à une fréquence répartie tout au long de l’année.

Les sciages de hêtre proviennent de débits sur liste, c’est-à-dire de découpes de billons selon des dimensions spécifiées au préalable (Editions Eyrolles, 2020). Celles définies par Kewlox sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 2).

Tableau 2 : Sciages spécifiés dans le cahier des charges de Kewlox.

	Sciage 1	Sciage 2
Section brute de sciage après séchage à 12% (mm)	50 x 26	50 x 38
Longueurs (mm)	430, 530, 630, 810, 910, 1010, 1110 et 1210	630, 810, 910, 1010, 1110 et 1210

L’entreprise tolère un débit de 30mm supérieur pour la longueur, et de 3 mm supérieur pour l’épaisseur et la largeur. Evidemment, aucun débit en deçà des chiffres ci-dessus n’est accepté.

La qualité exigée pour le hêtre est de premier choix, sans nœuds, gerces ou fentes. Les nœuds et fissures sont strictement proscrits car ils provoquent des déchirements au niveau du revêtement des portes coulissantes des meubles. La couleur du bois doit être claire sans être rosée comme cela peut parfois être le cas pour le hêtre étuvé (Hoebeek, 2020). L’apparence des planches se veut la plus homogène possible afin de permettre l’assemblage de diverses provenances sur un même meuble. Les sciages doivent être séchés artificiellement jusqu’à une humidité de 12% avant d’être acheminé chez Kewlox.

Finalement, l'entreprise se voulant écoresponsable, une de ses exigences est qu'au moins 70% de l'approvisionnement soient certifié PEFC. Kewlox adhère également au label « Bois Local ». Il est donc nécessaire que les produits bois utilisés soient conformes aux recommandations et indications de ce dernier. Il s'agit d'un label offrant la garantie de produits transformés en Wallonie et dont le bois utilisé provient de forêts situées à proximité de l'endroit de transformation. L'objectif de la marque est de favoriser le circuit court en assurant l'économie locale et en limitant au maximum les intermédiaires et les distances de transport (Bois local, 2020).

2.3.3. Remplacement du hêtre par le bouleau : Craintes, questionnement et exigences de l'entreprise

Il va de soi que les exigences en termes de qualité et de dimensions des sciages restent les mêmes pour le bouleau que pour le hêtre. L'entreprise accorde énormément d'importance à la qualité visuelle de ses produits. Le bois de bouleau se doit donc d'être dépourvu de défauts tels que les nœuds ou les taches médullaires. Ces dernières pourraient constituer le principal problème car elles sont souvent présentes dans le bois de bouleau. Leur présence se limitant à une zone de 10-15cm autour du cœur, il faut que la grume soit de dimension suffisante pour obtenir un volume adéquat de bois sans tache.

La crainte principale de l'entreprise concerne l'approvisionnement sur le long terme, en quantité suffisante, de matière première qualitative. Le futur du bouleau en Région wallonne est inconnu mais il est possible d'émettre des hypothèses sur base de l'état actuel de la ressource. L'entreprise reste ouverte à l'approvisionnement en bois européen, si la disponibilité régionale est insuffisante. Cette partie sera abordée dans le chapitre 4.

Finalement, il est évident que l'usinage de ce bois pose aussi question. Il est nécessaire qu'il se travaille au moins aussi bien que le bois de hêtre avec les machines de l'entreprise. Cette caractéristique a été testée au sein de l'usine Kewlox et sera présentée dans la partie pratique de ce travail.

3. Le bouleau

Le choix du bouleau comme essence alternative prometteuse s'explique pour diverses raisons. Ce chapitre est consacré à la description des caractéristiques déjà connues de l'essence et de son bois qui justifient le type de valorisation proposé ici.

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois de bouleau, très proches de celles du hêtre, en font un bon candidat pour les productions en bois de l'entreprise Kewlox tout en assurant la pérennité de la philosophie de cette dernière. En effet, ce choix d'essence de remplacement lui permettrait de continuer à valoriser le matériau bois, en ayant la possibilité de favoriser le circuit-court et en conservant les propriétés qui font la renommée de ses meubles.

A cela s'ajoute son potentiel d'avenir en Région wallonne dans le contexte du changement climatique. Cet avantage certain se justifie notamment par son écologie. La ressource future sera, probablement, favorisée par l'intérêt croissant des propriétaires et gestionnaires forestiers pour le bouleau. Ils sont de plus en plus nombreux à vouloir s'investir dans la sylviculture de cette essence pour en tirer des grumes de qualité.

Les deux essences principales de bouleaux présentes en Europe sont le bouleau verruqueux et le bouleau pubescent. Elles possèdent toute deux de nombreuses caractéristiques proches, bien qu'elles se différencient par leurs aptitudes stationnelles. Pour simplifier la lecture, ces deux espèces sont reprises sous l'appellation du genre, excepté lorsque des différences entre celles-ci sont à mettre en évidence.

3.1. Caractéristiques générales de l'essence

3.1.1. *Aptitudes écologiques*

Le bouleau est une essence présentant une large amplitude écologique illustrée notamment par son importante amplitude trophique. En effet, les deux espèces présentes en Belgique, le bouleau verruqueux et le bouleau pubescent, se trouvent en conditions optimales autant sur des sols méso-oligotrophes que sur des sols carbonatés beaucoup plus riches. Elles sont également tolérantes aux sols oligotrophes.

En ce qui concerne leur adaptation face aux différents niveaux hydriques, les deux espèces diffèrent l'une de l'autre. Le bouleau pubescent est en effet davantage exigeant vis-à-vis de ce facteur. Il ne tolère guère les sols xériques et secs et se trouve à son optimum sur les stations présentant un niveau hydrique plus humide. Il peut même se retrouver dans les zones marécageuses, ce qui est moins toléré par le verruqueux. Ce dernier, en revanche, tolère les sols secs et peut se retrouver en accompagnement sur des stations xériques. Cette notion d'accompagnement fait référence à la survie de l'essence sans qu'il n'y ait de croissance suffisante pour assurer une production. Sa gamme optimale de niveaux hydriques est particulièrement large, allant des zones plutôt sèches aux zones humides. Les stations trop humides lui conviennent moins qu'au bouleau pubescent mais il y présente toutefois une tolérance ou une tolérance élargie dans les cas les plus humides (Tableau 3). Il n'y est donc pas exclu (Fichier écologique des essences, 2017). La présence du bouleau, particulièrement le verruqueux, dans ce type de stations aux conditions contraignantes lui a souvent valu le statut d'essence non productive

étant donné l'intolérance de la plupart des essences commerciales dans ce type de milieu (Hynynen & al, 2010).

Tableau 3 : Synthèse de l'amplitude trophique et de l'adaptation aux niveaux hydriques du bouleau verruqueux (*Betula pendula*) et du bouleau pubescent (*Betula pubescens*).

	Bouleau verruqueux	Bouleau Pubescent
Richesse du sol	<p>Optimum : sols carbonatés -> méso-oligotrophes. Tolérance : sols oligotrophes.</p>	
Niveau hydrique	<p>Optimum : plutôt secs -> humides Tolérance : secs. Tolérance élargie : xériques et marécageux.</p>	<p>Optimum : frais -> humides. Tolérance : marécageux et mésiques. Intolérance : xériques et secs.</p>

En plus de sa vaste amplitude écologique, le bouleau présente également une grande amplitude bioclimatique. Bien que les limites exactes de sa tolérance ne soient pas définies, il semble tout à fait adapté à toutes les variantes de climats de Wallonie, ce qui explique sa présence dans toutes les régions naturelles. Il s'agit de l'essence feuillue ayant la plus large aire de distribution au sein de l'Eurasie. Le bouleau pubescent est tout de même sensible à la sécheresse et nécessite une humidité suffisante tout au long de l'année, et ce, de son stade juvénile au stade adulte. Les deux essences sont sensibles aux givres et à la neige, principalement durant leur stade juvénile. Une fois adultes, ils peuvent être fragilisés par les importantes chutes de neiges. Cela est à nuancer car cette sensibilité dépend de la forme de l'arbre. Il est d'autant plus sensible à la neige collante qu'il est fin et élancé. Le risque de casse ou de verse est augmenté par l'asymétrie de la cime. La sensibilité du bouleau face à la neige peut donc être fortement impactée par la sylviculture appliquée.

Concernant les besoins en lumière, le bouleau étant une espèce pionnière, il est particulièrement exigeant, et ce, dès le stade semis. Il ne supporte ni le couvert supérieur, ni la compétition latérale. S'il est isolé, un important éclaircissement permet une croissance importante et très rapide. Au contraire, une lumière insuffisante affecte la croissance et entraîne la mortalité des parties ombragées de la cime, voire de l'arbre.

3.1.2. Phénologie

Son adaptabilité s'explique également par sa phénologie. La maturité sexuelle du bouleau est précoce et apparaît lorsque l'arbre est âgé de 5 à 10 ans. La pollinisation abondante est aisément dispersée sur des kilomètres et la floraison est synchronisée sur de larges zones géographiques, ce qui favorise le flux de gènes et donc la variabilité génétique (Ranta & al, 2008). Les fructifications sont également abondantes et se produisent chaque année, avec des épisodes plus abondants tous les 2 à 3 ans. Les graines sont disséminées par le vent à partir de la mi-août jusqu'au mois de décembre. La germination des nouveaux plants prend place d'avril à juin dès le printemps suivant la dissémination des graines. Ces disséminations anémochores d'importantes quantités de pollens et de graines permet au bouleau de s'installer aisément dans les zones ouvertes. En y ajoutant l'avantage de la plasticité phénotypique, l'adaptation à bon nombre de types de stations et de conditions se justifie aisément (Rosenvald & al, 2014).

3.1.3. Croissance et productivité

La croissance du bouleau est précoce et rapide, davantage pour le verruqueux que le pubescent, et non soutenue. En effet, au cours du temps, l'évolution de la hauteur se schématise sous la forme d'une courbe. La croissance est rapide durant les 20 premières années, durant lesquelles la hauteur des bouleaux dépasse celle de la plupart des essences du même âge. Ensuite sa vitesse de croissance décroît progressivement jusqu'à une quasi-stagnation vers 50 à 60 ans (Dubois & al, 2020). A maturité, à partir de 50 ans, le bouleau verruqueux atteint une hauteur de 15 à 30m tandis que le pubescent croît jusqu'à 20-25m (Figures 10 et 11). Au-delà de 70 ans, le bois de bouleau peut laisser apparaître des pourritures ou des colorations. Ces différents aspects justifient son exploitation avant cet âge.

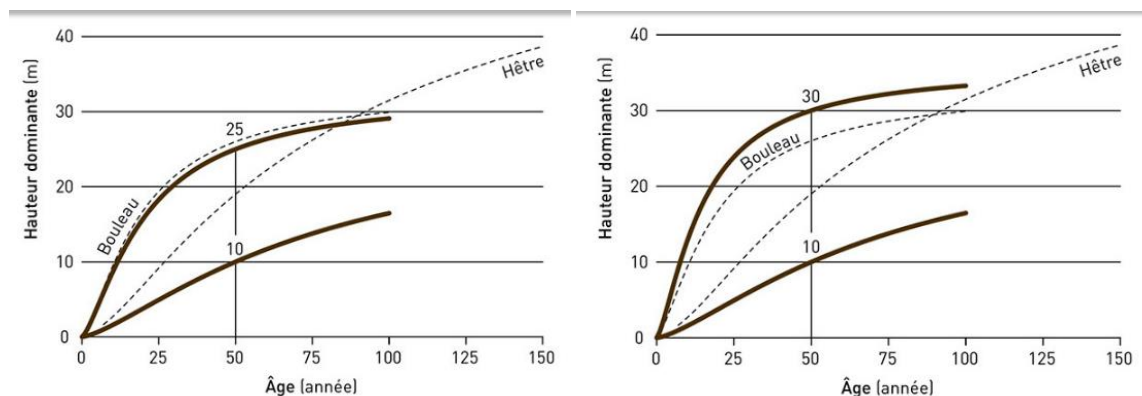


Figure 10 : Courbe de croissance du bouleau pubescent. Figure 11 : Courbe de croissance du bouleau verruqueux.

La productivité du bouleau peut atteindre à maturité 5 à 10 m³/ha/an sur les sites productifs et parfois même davantage dans des conditions particulières.

Il est important de notifier que les chiffres présentés ici réfèrent à la sylviculture du 20ème siècle, qui n'a pas été menée en vue de favoriser cette essence et d'en obtenir des grumes particulièrement qualitatives et de grandes dimensions. Ils ne sont pas représentatifs de la productivité que pourrait avoir le bouleau si une gestion spécifique lui était accordée, avec, par exemple, une mise en lumière par un dégagement précoce de sa cime. Dans le Nord de l'Europe, là où l'essence est bien connue et populaire, ce type de sylviculture est largement appliqué (Dubois & al, 2020).

3.1.4. Intérêt des peuplements et avantages pour la biodiversité

Le bouleau a notamment pour avantage d'améliorer la qualité du sol là où il est installé. En effet, l'abondance et la décomposition de ses nombreuses et fines racines favorisent la structuration du sol, son aération ainsi que l'infiltration de l'eau dans celui-ci. Sa fane joue également un rôle important pour le sol par sa richesse en éléments minéraux et par sa décomposition rapide qui améliorent la fertilité du sol (Fichier écologique, 2017). Celle-ci est illustrée par la percolation moindre des nitrates, l'inversion du processus de podzolisation ainsi que par les pertes moindres en cations basiques.

Cette fane améliorante, en partenariat avec le couvert léger qu'offre le bouleau, permet l'installation aisée d'espèces herbacées et arbustives, favorisant dès lors la biodiversité. Cette dernière se voit, de plus, augmentée indirectement par les espèces animales associées aux plantes nectarifères, telles que les insectes butineurs, et associées au sol lui-même, comme les vers de terre ou les collemboles (Dubois et al, 2020).

3.2. Propriétés du bois de bouleau

Des essais physico-mécaniques ont été réalisés en 2016 par Martin Boedts dans le cadre de son travail de fin d'études portant sur l'analyse des effets du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du bois de bouleau. Ceux-ci ont été réalisés au sein du Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Département de l'Etude du Milieu naturel et agricole (DEMNA) du Service public de Wallonie (SPW). Les essais ont été menés sur des avivés traités thermiquement et sur leurs homologues provenant du même billon faisant office de blanco. Les pièces débitées provenaient de cinq bouleaux pubescents les plus gros et mieux conformés d'une boulaie privée du Brabant Wallon. Les données obtenues par les essais sur blancs sont exploitables dans le cadre du travail présent. Les valeurs des différentes propriétés sont comparées à celles du bois de hêtre.

Outre les aspects physico-mécaniques, les propriétés esthétiques et texturales du bois de bouleau ainsi que sa durabilité et son usinabilité sont abordées dans cette partie. Ce sont des caractéristiques particulièrement importantes dans le cadre de la valorisation considérée ici, au vu des exigences esthétiques de l'entreprise Kewlox. Il s'agit d'informations synthétisées provenant de la littérature et d'études déjà réalisées. Les deux essences européennes présentant un bois et des propriétés physico-mécaniques similaires, les différentes caractéristiques décrites font référence au genre.

3.2.1. Propriétés physiques

L'**humidité** du bois a été déterminée par la mesure des masses humide (M_h) et anhydre (M_0) selon la norme ISO 3130 (Bureau de normalisation (NBN), 1992) et est exprimée selon la formule ci-dessous.

$$\text{Humidité (\%)} = 100 \frac{M_h - M_0}{M_0}$$

L'humidité de chaque éprouvette a été contrôlée lors des essais visant à déterminer les propriétés mécaniques. Pour les éprouvettes « blanco » issues des planches non thermo-traitées, l'humidité d'équilibre était de 12 +0.2% après un conditionnement à 20°C et 65% d'humidité relative conformément aux exigences des normes européennes (Boedts, 2016). Il s'agit d'une propriété importante car l'eau présente dans le bois impacte à la fois le comportement du produit fini et les différentes étapes de transformation. De fait, par sa structure poreuse, le bois voit sa teneur en eau varier en fonction des conditions de température et d'humidité ambiantes. En Belgique, la mise en œuvre du bois en intérieur est conseillée à un taux d'humidité de 10%, ce qui correspond à la moyenne entre les conditions hivernale et estivale à l'intérieur des bâtiments en Belgique (Tableau 4).

Tableau 4 : Humidité d'équilibre du bois en fonction des températures et humidité relative selon les saisons.

ÉTÉ	HIVER
Température ambiante : 20°C	Température ambiante : 20°C
Humidité relative : 70%	Humidité relative : 35%
Humidité d'équilibre du bois : 13%	Humidité d'équilibre du bois : 7%

La **masse volumique** a été déterminée en divisant la masse de chaque échantillon par son volume, selon la norme ISO 3130 (Bureau de normalisation (NBN), 1992). L'humidité a toujours été précisée étant donné la variation de la masse volumique en fonction de celle-ci. Les résultats de l'expérimentation donnent une valeur moyenne de masse volumique de 654 +40 kg/m³ pour une humidité de 12% (Boedts, 2016). Cette valeur moyenne correspond à celle trouvée dans la littérature (Wagenführ et Scheiber, 1985).

L'**infra-densité** a également été déterminée. Cette valeur présente l'avantage de comparer deux caractéristiques parfaitement définies, la masse anhydre et le volume saturé, via leur rapport selon la formule ci-après. Le volume saturé (Vs) des échantillons est déterminé par pesée hydrostatique après humidification par immersion au-dessus du point de saturation des fibres. L'infra-densité a été évaluée à 518+35 kg/m³ de moyenne pour les échantillons blancs (Boedts, 2016).

$$ID = \frac{M_0}{V_S}$$

Le **point de saturation de la fibre** caractérise l'état du bois qui ne contient plus d'eau libre mais où les fibres sont toujours saturées en eau liée (Clair, 2001). Cet état est atteint pour une valeur d'humidité particulière, propre à chaque espèce. C'est en deçà de ce point de saturation que des mouvements du bois apparaissent. L'équation ci-après permet de calculer l'humidité au point de saturation de la fibre (PSF). Les trois volumes, saturé (Vs), anhydre (V0) et sous le PSF (Vx), sont déterminés par pesée hydrostatique. « Hx » correspond à l'humidité à laquelle le volume Vx a été déterminé. L'humidité au PSF (ci-après notée « PSF ») obtenue pour les blancs est de 42 +/- 6 % (Boedts, 2016).

$$PSF = \frac{V_S - V_0}{V_x - V_0} * H_x$$

Le **retrait volumique** a été lui aussi l'objet d'expérimentations. Comme énoncé plus tôt, la stabilité dimensionnelle du bois est mise à mal par les variations de teneur en eau, occasionnant notamment des difficultés lors de la transformation. Celles-ci s'illustrent notamment par des retraits ou des gonflements volumiques.

Le retrait intervient lors de l'étape de séchage du bois jusqu'à l'humidité d'équilibre souhaitée et caractérise la variation de volume entre l'état saturé et l'état anhydre. Cette variation apparaît lors de la perte de l'eau liée, donc en deçà du point de saturation de la fibre. La perte de l'eau libre lors du séchage n'entraîne aucune modification des propriétés du bois. Lorsque les variations dimensionnelles apparaissent une fois le bois mis en œuvre, le terme de « mouvement » plutôt que « retrait » est utilisé.

Le retrait total correspond à la somme des retraits longitudinal, radial et tangentiel. Le premier, dans le sens des fibres, est négligeable contrairement aux deux autres. Le retrait tangentiel est de 1,5 à 2,5 fois supérieur au radial. De ce fait, un débit sur dosse subira un plus grand mouvement qu'un débit sur quartier d'une même essence qui, lui, présentera un mouvement dans la direction radiale. En effet, une planche provenant d'un débit sur dosse voit sa face orientée dans le sens tangentiel et son chant dans le sens radial (Figure 12). Les déformations et variations dimensionnelles sont donc maximales, inversement au cas d'un débit sur quartier (Figure 13).

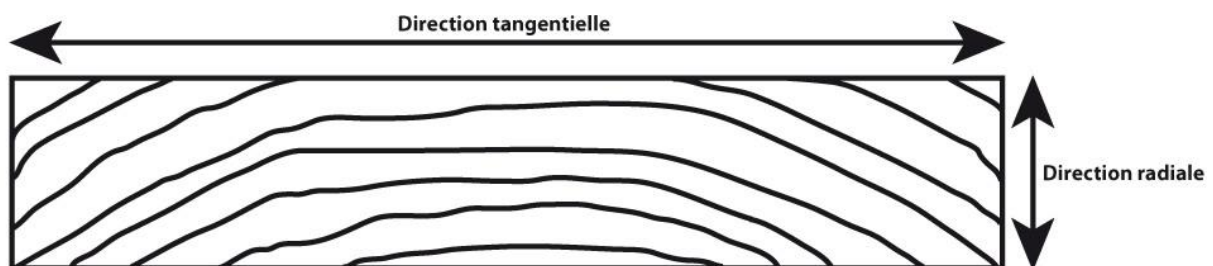


Figure 12 : Directions de mouvements du bois d'un débit sur dosse.

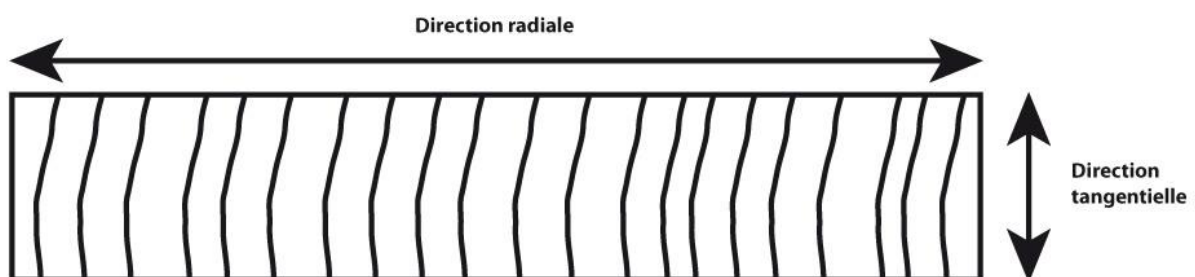


Figure 13 : Directions de mouvements du bois d'un débit sur quartier.

Le calcul du retrait volumique total a été réalisé selon l'équation ci-après faisant intervenir les volumes saturé (V_s) et anhydre (V_0). Le premier a été déterminé de la même manière que précédemment décrit. Le volume anhydre (V_0) est obtenu également par pesée hydrostatique après passage à l'étuve (103°C) jusqu'à masse constante de l'échantillon. La valeur de retrait total obtenue par les essais est de $18\pm 1\%$ (Boedts, 2016).

$$\beta_{tot} = \frac{V_s - V_0}{V_s}$$

Le retrait volumique dépend à la fois de la quantité d'eau en dessous du point de saturation de la fibre et de la masse volumique. Il est d'autant plus important que l'infra-densité est élevée. En effet, un bois dense contient davantage de matière cellulosique, permettant de fixer ou libérer une plus grande quantité d'eau.

Le **coefficient de retrait volumique**, détermine la réduction relative du volume pour une réduction d'humidité du bois de 1%. La moyenne obtenue pour les blancs est de 0,43 +/- 0,06 % (Boedts, 2016).

$$\theta_v = \frac{\beta_{tot}}{PSF}$$

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des propriétés physiques du bois de bouleau (valeurs moyennes et écarts-types)

Propriétés physiques	Valeur moyenne obtenue par les essais sur échantillons blancs (Boedts, 2016)
Humidité d'équilibre (%)	12(+/- 0.2)
Masse volumique à 12% d'humidité (kg/m³)	654(+/-40)
Infra densité (kg/m³)	518(+/-35)
Retrait volumique total (%)	18(+/-1)
Humidité au point de saturation de la fibre (%)	42(+/- 6)

Le tableau ci-dessus rassemble les données propres aux notions précédemment détaillées (Tableau 5). En conclusion, l'infra-densité du bois de bouleau se situe entre celles de la grande majorité des essences commerciales qui varient entre 350 et 800 kg/m³ (Walker, 1993). Cette valeur permet d'estimer la porosité du bois. La masse volumique anhydre moyenne des tissus ligneux, relativement constante entre les essences, est de 1500 kg/m³. L'infra-densité de 518 kg/m³ représente dès lors 34,53 % de cette masse, indiquant une porosité approximative de 65,47%.

Le retrait est considéré comme nul lorsque le bois de bouleau se trouve à une humidité de 42%. En deçà, le retrait volumique augmente jusqu'à atteindre 18% à l'état anhydre. Cela signifie que lorsque l'humidité du bois varie de 1%, le volume de celui-ci varie de 0,43%, ce qui correspond au coefficient de retrait volumique décrit plus haut. Le retrait total trouvé lors des essais est toutefois supérieur à celui de la littérature qui se situe entre 13,7 et 14,2 % (Wagenführ & Scheiber, 1985).

L'humidité d'équilibre calculée lors des essais se trouve légèrement au-dessus de l'humidité conseillée pour la mise en œuvre du bois en intérieur qui est de 10%. Au vu des humidités d'équilibre du bois en intérieur en hiver et en été, respectivement de 7 et 13%, il est évident que le bois subira un mouvement plus important en hiver s'il est mis en œuvre à l'humidité définie précédemment de 12%. En effet, l'humidité du bois variera de 5% contre 1% pour la saison estivale. Avec un coefficient de retrait de 0,43%, la variation volumique attendra dès lors 2,15 % en hiver et 0,43 % en été. En considérant un retrait tangentiel deux fois supérieur au radial et un retrait longitudinal négligeable, le premier varie de 1,44 à 0,28 % entre les deux saisons. Une traverse Kewlox de section 40*21mm² façonnée dans un débit sur dosse peut voir apparaître un mouvement maximal de 0,576 mm dans la direction tangentielle (partie de section de 40mm au départ) en hiver, et de 0,112 mm en été. Ces variations sont dès lors minimes et Kewlox ne commet pas d'erreur en commandant du bois à 12% d'humidité. L'entreprise n'est pas obligée de commander du bois à 10% d'humidité, dont le prix serait forcément impacté par le séchage plus long et, dès lors, plus coûteux. De plus, les installations actuelles de son lieu de stockage ne permettraient pas le maintien de ce taux d'humidité d'équilibre, qui attendra rapidement une valeur proche de 12%.

3.2.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont importantes à considérer si le bois est destiné à un usage structurel où il est soumis à des charges pouvant induire des déformations, voire une rupture. Pour les usages où l'esthétisme prévaut, comme c'est le cas pour l'ameublement, ces propriétés passent au second plan. Cependant, les meubles Kewlox sont destinés à supporter jusqu'à 80kg. La résistance à la flexion est dès lors importante à définir et à comparer avec celle du bois de hêtre.

Le **module d'élasticité en flexion statique** a été évalué à 15000 (+/- 2180) MPa à la suite des essais de Martin Boedts, ce qui correspond aux données de Wagenführ & Scheiber (1985) qui situent la valeur du module entre 14500 et 16500 MPa. Ce module est déterminé en mesurant la flèche d'une éprouvette sans défauts soumise à une charge croissante.

La **résistance en flexion statique** est de 100 (+-13) MPa pour les blancs à 12% d'humidité. Cette valeur représente la résistance de l'échantillon à une charge appliquée à égale distance des deux appuis de manière continue avec une vitesse constante jusqu'à rupture.

La **résistance moyenne au choc** encore appelée résilience (A_w) est exprimée en KJ/m². C'est une mesure de l'énergie absorbée nécessaire pour provoquer, en un seul choc, la rupture de l'éprouvette. La résistance maximale est déterminée dans le sens radial et la minimale dans le sens tangentiel (Vittone, 2010). Dans la littérature, la valeur de la résilience pour le bouleau se situe entre 4,5 à 13 KJ/m² (Wagenführ & Scheiber, 1985). Il s'agit d'une propriété importante dans le cadre de cette étude car l'assemblage des meubles Kewlox sans clou ni visse nécessite parfois de forcer sur les traverses pour pouvoir les fixer correctement. Il est important que cette opération ne provoque aucune fissure.

3.2.3. Durabilité

La durabilité du bois est un autre paramètre qu'il est nécessaire de connaître afin de justifier les différentes utilisations d'une essence de bois. Cette notion illustre l'aptitude d'un bois à l'emploi ainsi que sa durée de service en fonction de sa résistance intrinsèque face aux organismes destructeurs, champignons ou insectes. Ce concept permet de définir les modalités d'utilisations, de conception ou de traitements s'ils sont nécessaires. La norme européenne EN 350 a défini 5 classes de durabilité naturelle pour les bois belges selon la longévité moyenne d'un poteau de 50x50 mm partiellement enfoui dans le sol (Tableau 6) (Bureau de Normalisation (NBN), 2016). Celles-ci sont valables uniquement pour le duramen, l'aubier étant naturellement non durable et faisant dès lors partie de la classe 5. Cette caractéristique de l'aubier découle de l'absence de substances fongicides et insecticides naturellement présents dans son bois.

Tableau 6 : Classes de durabilité et durée de vie du matériau correspondante (Bureau de Normalisation (NBN), 2016).

Classe I	Plus de 25 ans	Très durable
Classe II	De 15 à 25 ans	Durable
Classe III	De 10 à 15 ans	Moyennement durable
Classe IV	De 5 à 10 ans	Peu durable
Classe V	Moins de 5 ans	Très peu durable

Il est à noter que la classification de la durabilité ci-dessus ne concerne que les attaques de champignons, les attaques dues aux insectes n'étant pas à ce jour catégorisées de la sorte. La résistance du bois face aux principaux insectes attaquant le bois d'intérieur est également définie par la norme EN 350 qui définit si une essence est sensible (classe S) ou non à un insecte (classe D) (Bureau de Normalisation (NBN), 2016).

Les classes de durabilité ci-dessus sont définies pour du bois en contact direct avec le sol, donc dans des conditions particulièrement néfastes. La longévité de ce type de bois est grandement supérieure lorsque celui-ci est utilisé dans des conditions intérieures avec un faible taux d'humidité (sous 20%) et protégé des intempéries. Le bois brut de bouleau présente une durabilité naturelle de classe V, ce qui fait de celui-ci un bois très peu durable et par conséquent non destiné à une utilisation extérieure. Le bois de bouleau, sans traitement protecteur, est donc réservé à un usage intérieur, dans une ambiance sèche (Luostarinen & Verkasalo, 2000). Ce type de conditions correspond à une classe d'emploi 1, définie par la norme E335, caractérisée par des ouvrages complètement protégés des intempéries et n'étant exposés qu'exceptionnellement à des températures et humidités ambiantes supérieures à 20°C et 65% respectivement (Bureau de Normalisation (NBN), 2013). Les risques majeurs pour cette classe de service sont les dégâts d'insectes. En effet, certains insectes xylophages peuvent occasionner des dégâts sur des bois mis en œuvre et protégés de l'humidité. Le bois sec est notamment attaqué par certains coléoptères et termites, les premiers étant localisés sur l'ensemble du territoire européen et les secondes présentes localement.

3.2.4. Propriétés macroscopiques et aspects visuels

La porosité du bois est diffuse et les vaisseaux, de tailles relativement similaires, sont isolés et uniformément distribués. Les rayons ligneux sont fins et uniformes, présentant un aspect plus homogène. Les cernes ne sont pas ou très peu visibles à l'œil nu. Ils peuvent parfois être discernés à la loupe grâce aux tissus fibreux plus denses formant une ligne mince avec des vaisseaux légèrement plus petits, mais cette observation reste très compliquée et permet difficilement de compter ces cernes. Ses rayons médullaires sont fins et uniformes, contrairement à ceux du hêtre, beaucoup plus hétérogènes.

Le bois de bouleau est d'apparence homogène, lisse par sa structure anatomique. Son grain fin et sa texture lui permettent de s'affranchir d'un choix particulier d'orientation des plans apparents en cas d'agencement de plusieurs composantes. Il présente également une couleur blanc-crème homogène (Panshin & De Zeeuw, 1980) et un aspect brillant lui conférant des caractéristiques esthétiques intéressantes pour la valorisation de produits d'apparence (Dubois & al, 2020).

3.2.5. Comparaison avec les propriétés du hêtre

Le tableau ci-après compare les différentes propriétés du bois de bouleau avec celles du bois de hêtre décrites dans la littérature afin de mettre en évidence les similitudes entre les deux essences (Tableau 7). Les propriétés physico-mécaniques, la dureté et l'aspect du bois étant les caractéristiques les plus intéressantes pour justifier la valorisation ici considérée y sont donc reprises.

Tableau 7 : Comparaison des propriétés des bois de bouleau et de hêtre.

	Bouleau (conditions belges) (Boedts, 2016)	Hêtre
Masse volumique à 12-15 % d'humidité (kg/m³)	654 [614-694]	720 [540-910]
Résistance en flexion statique (MPa)	100(+/-13)	70-80 (Lignum, 2010)
Infra densité (kg/m³)	518(+/-35)	585 [450-725]
Retrait volumique total (%)	18 [17-19]	17,9 [14-21]
Dureté	Mi-dur Selon méthode Brinell (N/mm ²) (Lignum, 2010) : - 48 // aux fibres - 21...34 T aux fibres	Mi-dur Selon méthode Brinell (N/mm ²) (Lignum, 2010) : - 71 // aux fibres - 28 T aux fibres
Durabilité	Non durable	Non durable
Propriétés macroscopiques et aspect visuel	<ul style="list-style-type: none"> • Bois blanc • Reflets rosés ou bruns • Parfois brillant 	<ul style="list-style-type: none"> • Bois blanc ou brun pâle, parfois rosé • Rayons ligneux apparents en sections tangentielle et radiales (maillure prononcée dans ce cas)

Le tableau ci-dessus démontre les similarités entre les deux essences. Il y a peu, voire pas de variations entre chacune des propriétés. Le bois de bouleau présente toutefois une plus grande résistance en flexion statique que le bois de hêtre, ce qui témoigne de sa capacité à supporter tout aussi bien la charge maximale de 80kg que l'entreprise Kewlox conseille aux usagers de ses meubles.

Les valeurs des retraits volumiques totaux sont ici quasiment identiques pour les deux essences. Cependant, comme énoncé précédemment, la valeur obtenue pour le bois de bouleau est supérieure à celle trouvée dans la littérature qui avoisine plutôt les 14 % (Wagenführ & Scheiber, 1985). Les informations issues de recherches bibliographiques mettent en évidence un retrait radial identique de 6% pour les deux essences. Le retrait tangentiel, lui, est plus important chez le hêtre avec une valeur de 12% contre 9% pour le bouleau (FNB, 2018). En associant les diverses informations récoltées, le bouleau semble présenter un retrait volumique égal ou inférieur à celui du bois de hêtre. Le rendant dès lors tout à fait apte à remplir la même fonction au sein du meuble.

Les deux bois sont considérés comme mi-durs. Les chiffres illustrant cette dureté ont été calculés selon la méthode optique Brinell. Celle-ci consiste à mesurer l'empreinte laissée par un pénétrateur de diamètre connu, avec une force définie (en Newton), sur la surface du bois. Plus la valeur en N/mm² est élevée, plus le matériau testé est tendre. Le bois de hêtre est plus tendre dans le sens parallèle aux fibres, bien qu'il soit classé parmi les mi-durs, comme le bouleau.

Une différence notable concerne leur esthétisme. Le bois de bouleau ne présente pas la même maille que le hêtre, dont les rayons ligneux sont particulièrement visibles en coupe radiale. Chez ce dernier,

ces rayons sont hétérogènes, une fois fins, une fois larges, contrairement à ceux du bouleau, tous fins et uniformes, donnant un aspect visuel plus homogène.

Les deux essences possèdent la même résistance aux attaques d'insectes xylophages.

3.3. Principaux usages

Les propriétés du bois brut de bouleau permettent son utilisation pour de nombreux usages tels que notamment l'ameublement, le revêtement de sol, les instruments de musique, etc. Par son absence d'odeur, sa non-toxicité ainsi que son bois lisse, sans écharde, il peut même être utilisé pour la fabrication de jouets.

Transformé, il trouve également de nombreuses valorisations. Dans le domaine de la construction, la popularité des bois lamellés-collés et contre-collés (CLT) est grandissante. Il s'avère de plus que ce type de produits fabriqués en bouleau possède un meilleur module de cisaillement que ceux fabriqués en pin ou en épicéa (Dubois et al, 2020). Le contre-plaqué est utilisé comme revêtement de sol sur lequel une essence plus esthétique telle que le chêne y est collée. Par sa résistance au choc et sa flexibilité, il est aussi utilisé pour la confection de longboard, planche à roulette cousine du skateboard (Perone, 2020).

Grâce à sa couleur claire et uniforme ainsi que par ses fibres courtes et rigides, il permet la fabrication de certains types de papiers et cartons aux propriétés particulièrement recherchées.

Par ses qualités esthétiques et acoustiques, le bois de bouleau est aussi utilisé en contre-plaqué ou en sciage dans les intérieurs de salles de concert ou comme décorations de maisons. De plus, la tendance actuelle est au bois clair. Ikea utilise d'ailleurs 18% de bois de bouleau, ce qui place cette essence en deuxième position après l'épicéa dans les produits bois de l'entreprise (Trubins, 2009).

En outre, le bouleau offre d'autres opportunités d'utilisations notamment grâce à sa sève, déjà bien connue. La sève de bouleau est appréciée en usage alimentaire pour ses propriétés réputées en faveur de la santé.

Ces quelques exemples de valorisation du bouleau mettent en évidence le large panel de marchés et domaines pouvant être enrichis par l'utilisation de cette essence. Historiquement peu utilisé, le bouleau prouve peu à peu ses qualités et sa popularité n'est que grandissante.

3.4. Transformations

Afin de justifier l'utilisation du bouleau dans l'ameublement, il est également intéressant de déterminer les forces et faiblesses de son bois face aux différentes étapes de transformation, allant du sciage des grumes jusqu'aux découpes précises de profilés. Il va de soi que s'il veut être le candidat idéal pour remplacer le hêtre dans les éléments en bois des meubles Kewlox, il faut que son usinage le permette.

3.4.1. Sciage et séchage

Le choix des méthodes de séchage et de transformations du bois est très important pour l'obtention de produits de qualité.

Le sciage dépend principalement de la qualité et la taille des grumes. En termes de rendement, le bouleau verruqueux semble produire davantage de bois que le bouleau pubescent. Cela s'explique notamment par la tendance de son tronc à être plus droit, limitant de ce fait les pertes lors du sciage. Il est toutefois à préciser que le bouleau verruqueux est davantage présent en Région wallonne, alors que le pubescent est limité à des stations marginales, ne lui conférant ni une qualité de grume intéressante ni une bonne croissance.

Concernant leur taille, les grumes doivent être suffisamment longues pour obtenir les produits finaux adéquats, bien que ces derniers soient d'assez petite dimension dans le cas des meubles Kewlox. Une circonférence minimale (100 cm) est également indispensable pour assurer un rendement au sciage satisfaisant. Cette valeur constitue une des principales limites du bois de bouleau pour la transformation. En effet, il est actuellement rare de trouver des grumes de bouleau de grosses dimensions. De plus, le rendement se voit également diminué par des défauts internes du bois tels que des taches médullaires ou une oxydation du cœur causée par un usinage trop tardif après la coupe. Les taches médullaires s'illustrent par des fines lignes foncées souvent rencontrées au cœur des bouleaux (Figure 14). Elles sont limitées à cette partie de la grume car elles sont la conséquence de piqûres d'insectes qui, une fois l'écorce devenue plus épaisse, ne peuvent plus pénétrer le bois. Ces types de défauts de cœur, s'ils sont trop voyants, est réhivitoire pour le genre de valorisation décrit dans ce travail. Le rendement au sciage se voit dès lors diminué.



Figure 14 : Sciages de bouleaux avec taches médullaires (Giroud, 2005).

Les principaux risques d'apparition de défauts lors du sciage résident en l'apparition de voilures, de retraits et de torsions (Möttönen, 2005). Ces déformations sont les conséquences de la présence de contraintes internes, de nœuds, de bois juvénile et de différences de densités. Il est à noter que ces dernières sont faibles dans le bois mature du fait de la porosité diffuse et de la faible proportion de bois d'été. Outre ces défauts potentiels, il se peut que le sciage provoque l'apparition de traces noires sur les planches par suite d'une brûlure provoquée par le passage de la lame. Cela peut être dû à une lame émoussée ou à une vitesse de rotation trop élevée (Bois passion et cie, 2020). Le bois de bouleau étant de couleur très clair, cela se marque particulièrement fort. La propriété du bois qui influence la sensibilité d'une essence à ce type de défaut est sa dureté. Celle du hêtre et du bouleau étant similaire, le risque d'apparition de brûlures est identique pour les deux essences.

La méthode traditionnelle, et encore largement utilisée pour le séchage du bois, est le séchage à l'air libre. En ce qui concerne le bouleau, le principe est de laisser les planches débitées avec écorce,

empilées et couvertes, sécher durant plusieurs mois, voire plusieurs années (Möttönen, 2005). Cette méthode permet de limiter les déformations et de favoriser l'homogénéité de la couleur du bois. Cependant, étant chronophage, elle est peu économique et peu compatible avec une production industrielle. A cela s'ajoutent les incertitudes liées à la qualité finale et à la durée du processus, largement dépendante des conditions climatiques. Finalement, cette méthode traditionnelle permet d'obtenir du bois à minimum 15% d'humidité, ce qui n'est généralement pas suffisant pour les industries et pour un usage en intérieur dans un bâtiment chauffé.

Afin de remédier à ces inconvénients et pour permettre aux scieries d'être réactives et de fournir rapidement les industries, le séchage artificiel est préconisé. Cependant, bien qu'il ait l'avantage de limiter le temps de processus, il peut provoquer des décolorations et des déformations du bois scié. La décoloration se situe généralement à l'intérieur de la planche, la surface maintenant sa couleur claire naturelle sur 1 à 5 mm (Luostarinen & Luostarinen, 2001). Les variations de couleurs peuvent différer légèrement selon le type de séchage artificiel.

Le séchage conventionnel au four constitue une des méthodes connues. Au-dessus du point de saturation de la fibre, le bouleau est séché à basse température (<45°), ce qui minimise ou annule l'effet de décoloration du bois. Le reste du processus de séchage se traduit par l'augmentation progressive de la température jusqu'à 95°C. Ce type de procédé dure de trois à cinq semaines.

Dans le Nord, en Finlande, le séchage sous vide est devenu particulièrement populaire ces dernières années. Cette méthode est beaucoup plus courte que la précédente et nécessite seulement trois à cinq jours de séchage. Le second avantage est qu'elle permet de sécher des bois de grandes sections. Ce type de procédé se base sur le principe selon lequel, lorsque la pression atmosphérique diminue, le point d'ébullition de l'eau nécessaire à son évaporation diminue également (Möttönen, 2005). Par son temps de séchage très court et la moindre concentration en oxygène, ce processus artificiel provoque une décoloration moins importante que la méthode précédente.

Malheureusement, ces phénomènes de décoloration sont à ce jour mal connus. Il a toutefois été mis en évidence que la température utilisée pour le séchage au-dessus du point de saturation de la fibre est un élément important dans ce processus. Il semblerait que des planches de bouleaux sans décoloration ni autres défauts aient été obtenues grâce à une première phase de séchage à 30°C, suivie d'une phase d'augmentation progressive jusqu'à 70°C (Luostarinen & Verkasalo. 2000). La littérature met également en évidence la possibilité de trier les planches selon l'humidité initiale du bois (Möttönen, 2005) et selon leur taille avant le séchage pour minimiser au maximum les variations de couleur (Luostarinen & Verkasalo. 2000).

Bien qu'il semble exister des méthodes plus performantes que d'autres, de nombreux autres facteurs entrent en compte dans ce phénomène relativement complexe de changement de coloration. La couleur du bois varie au sein d'une même essence notamment selon les conditions environnementales (Phelps & al., 1982) mais également selon les facteurs génétiques (Rink & Phelps, 1989). A cela s'ajoutent les aléas liés aux procédés de transformation et de stockage ainsi que les variations chimiques et physiques inhérentes aux bois qui compliquent grandement le contrôle du changement de couleur lors du séchage.

A ce jour plusieurs études sont menées afin de déterminer les meilleures méthodes permettant de limiter les variations de couleurs. Des études concernant l'acceptabilité de ces dernières par le marché sont aussi à envisager.

3.4.2. Stockage

Le bois de bouleau est particulièrement sensible aux attaques d'insectes et de champignons, ce qui ne permet pas son stockage en forêt ou dans les parcs à grumes des scieries durant une période trop longue avant l'acheminement vers la scierie. Les attaques de ces organismes causent rapidement des dégâts, notamment la décoloration et l'apparition de taches sur cette essence (Luostarinen & Verkasalo, 2000).

Des utilisateurs de bois scié de bouleau affirment qu'un stockage entre le sciage et le séchage final permet de palier l'effet de décoloration (Luostarinen & Verkasalo, 2000). Cependant il est important d'éviter le stockage dans un endroit trop chaud qui pourrait mener à cet effet non désiré.

Concernant le stockage après le séchage, il ne doit pas être considéré à la légère. En effet, après le processus de séchage, le taux d'humidité du bois continue à s'équilibrer en fonction des conditions ambiantes. Il est important de maintenir ce taux à une valeur adéquate à l'usage souhaité. Pour le bois destiné à la menuiserie d'intérieur, il peut être avantageux, selon la période et la durée de stockage, de l'emballer. Cela éviterait les risques de gonflements si les conditions sont trop humides.

3.4.3. Rabotage

Cette opération permet l'obtention d'une surface lisse par mise à dimension en longueur et largeur. A la suite du rabotage, il est possible que le bois de bouleau présente un aspect pelucheux qui se trouve être la conséquence de la présence de contre fil. Il est à noter que ce risque se rencontre également chez d'autres essences et n'est pas spécifique au bouleau.

3.4.4. Profilage, finitions et traitements.

Grâce à sa texture et à ses pores fins, le bois de bouleau est apprécié des menuisiers car il présente de très bonnes propriétés d'usinage et permet l'obtention de finitions lisses par une découpe aisée. Ce bois est facile à travailler avec des outils électroportatifs. Il permet également un collage propre et peut être percé de vis et de clous de façon précise, sans être abimé tout en maintenant bien fixés ces derniers (Perone, 2017).

Le bois utilisé en menuiserie d'intérieur, dans un environnement où le taux d'humidité est suffisamment bas que pour éviter les attaques de champignons, peut toutefois faire l'objet d'un traitement de préservation destiné à le protéger des attaques d'insectes xylophages. Les essences ne possèdent toutefois pas la même imprégnabilité, c'est-à-dire la capacité de son bois à voir pénétrer un liquide et à le faire circuler, car elles ne présentent pas les mêmes caractéristiques anatomiques. Le bois de bouleau, tout comme celui de hêtre, est imprégnable. Cela sous-entend, selon la norme EN 350 (Bureau de Normalisation (NBN), 2016), que les produits de préservation y pénètrent facilement et de façon homogène, permettant un traitement aisé.

4. Ressources

Les caractéristiques écologiques du bouleau et les propriétés de son bois ne suffisent pas à justifier sa valorisation dans l'ameublement. Ce chapitre est consacré à la description de la ressource en Région wallonne qui se doit d'être suffisante pour assurer l'approvisionnement de l'entreprise à long terme. La seconde partie du chapitre décrit la ressource à plus large échelle, au niveau européen. Celle-ci constituerait une opportunité pour Kewlox si la ressource locale ne suffit pas. L'entreprise se dit ouverte à cette éventualité.

Pour compléter ces informations, une analyse des ventes de bois a permis de mettre en lumière la place du bouleau au sein du marché wallon.

4.1. Ressource actuelle du bouleau en Région Wallonne

L'estimation exacte de la ressource en bouleau est loin d'être évidente. De fait, cette essence par sa large amplitude écologique est adaptée à un grand nombre de stations aux conditions diverses. Elle est dès lors disséminée sur tout le territoire wallon, dans une large gamme de conditions stationnelles (Fichier écologique des essences, 2017) et de peuplements forestiers (Dubois & al, 2017). Cependant, la mise en commun et la synthèse de diverses données fournies notamment par l'IPRFW et le DNF ont permis d'estimer de façon relativement précise la place du bouleau au sein des forêts wallonnes.

La ressource en bouleau en Région wallonne a été détaillée en 2016 et 2017 par l'Unité de Gestion des Ressources Forestières (ULg-GxABT) à partir des données récoltées par l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie (Département de la Nature et des Forêts, SPW-DGO3) lors du premier et second cycle d'inventaire (de 1994 à 2008 et depuis 2008 respectivement). Les unités d'échantillonnage de l'IPRFW sélectionnées ont été établies au sein des forêts productives comportant au moins un bouleau. Les zones dites « productives » comprennent à la fois tous les peuplements forestiers, tout stade de développement confondu, et les zones temporairement déboisées telles que les coupes rases et les clairières (IPRF Wallonie, 2020). Les bouleaux peuvent toutefois se retrouver hors de ces espaces, comme les chemins, gagnages, etc. L'analyse des unités d'échantillonnage a été réalisée suivant les méthodologies décrites par Rondeux et Lecomte (Rondeux & Lecomte, 2010). Il est important de spécifier que l'inventaire a été réalisé en considérant le genre, donc les deux espèces considérées ici sont confondues.

Les résultats démontrent que la surface totale occupée par les peuplements comportant au moins un bouleau est de 120 000 ha (Dubois & al, 2016). Ce chiffre a été obtenu en considérant également la présence de fourrés ou de semis de l'essence. Lorsque seuls les arbres d'au moins 20cm de circonférence sont recensés, la surface totale de ces peuplements dits « à bouleaux » est de 64 000 ha (Dubois & al, 2017). La présence de cette essence est marquée dans toutes les régions naturelles excepté les zones agricoles du Hainaut et de Hesbaye. La région Ardennaise étant la plus boisée, elle contient la surface la plus importante de peuplements contenant du bouleau. Cependant, en termes de proportion par rapport à la superficie forestière de la région, le Condroz est la plus riche (Dubois & al, 2016).

Une typologie des peuplements comportant du bouleau a été conçue sur base des données de l'IPRFW. Cette étude a permis de mettre en évidence différents types de peuplements à bouleaux caractérisés par la portion de surface terrière occupée par l'essence, la structure des peuplements, leur

composition, ainsi que le milieu. Ci-après sont détaillés les résultats majeurs obtenus par l'étude en question.

La richesse en bouleau a notamment, et comme spécifié ci-dessus, été décrite en utilisant des seuils de surface terrière. La plupart des peuplements avec au moins un bouleau possèdent une surface terrière variant entre 15 et 30 m²/ha (Figure 15) (Dubois & al, 2017).

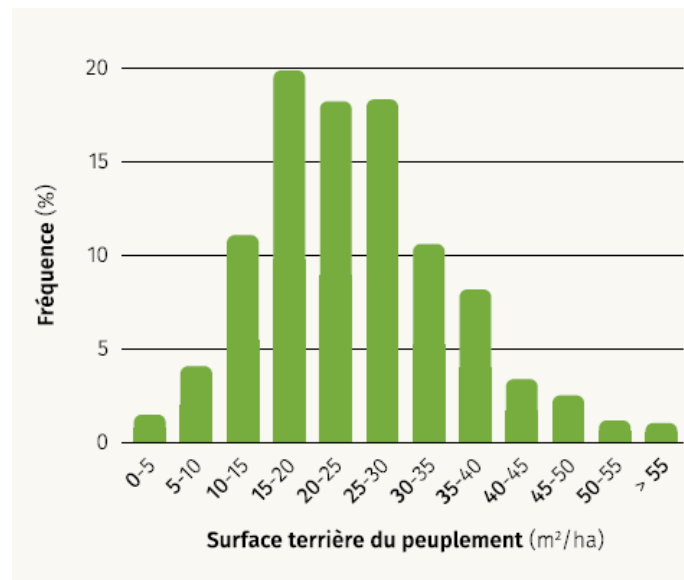


Figure 15 : Distribution des peuplements à bouleau selon leur surface terrière totale (m²/ha) (Dubois et al, 2017).

Trois types de peuplements dits « à bouleau » peuvent être décrits en fonction du pourcentage de cette surface :

- **Les boulaies** : peuplements où le bouleau occupe au moins deux tiers de la surface terrière totale (soit > 66%). Ceux-ci sont présents sur une surface de 6 000 ha en forêt wallonne et totalisent un volume de bouleau de 0,7 millions de m³.
- **Les boulaies mélangées** : peuplements où il occupe entre 33 et 66% de la surface terrière. Ceux-ci occupent une surface de 14 000 ha et la surface terrière moyenne du bouleau y est de 50%. En termes de volume, l'essence totalise dans ces peuplements 1,3 millions de m³.
- **Les peuplements pauvres en bouleau** : peuplements où l'essence n'occupe pas plus de 33% de la surface terrière. Ce dernier type est présent sur une surface totale de 39 000 ha. Le volume total de bouleau est de 1,1 millions de m³. La surface terrière de celui-ci ne varie ici qu'entre 5 et 20%.

La figure ci-dessous illustre les proportions des différents types de peuplements décrits ci-dessus par rapport à tous les peuplements où l'essence est présente (Figure 16). Les boulaies « pures » sont les plus rares parmi les trois peuplements à boulaux. Ceux qui sont pauvres en cette essence, au contraire, sont les plus rencontrés et représentent 63% des peuplements où le bouleau a été recensé. Cela témoigne du fait que ce dernier est surtout retrouvé dans des zones forestières largement dominées par d'autres essences. Dans ce cas, il est généralement représenté de façon éparse et isolée. Le chêne est l'essence la plus fréquemment rencontrée au côté du bouleau. En effet, 37% des peuplements où l'essence est présente sont dominés par celui-ci (Dubois & al, 2017).

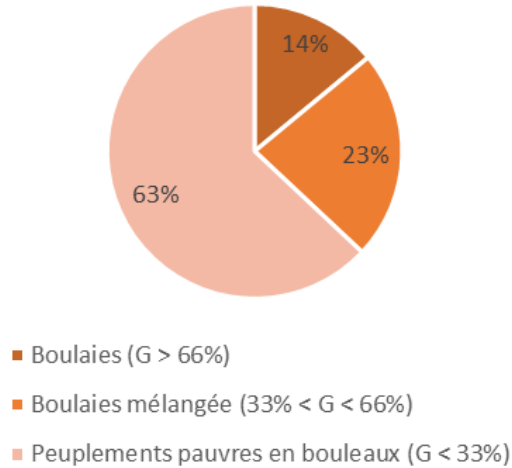


Figure 16 : Richesse en bouleau dans les différents peuplements qu'il occupe en fonction de la proportion de surface terrière (G en %) (Dubois et al, 2017).

Le bouleau représente un volume de bois fort tige de 3,4 millions de mètres cubes et est la troisième essence feuillue après le chêne (sessile et pédonculé) et le hêtre dont les volumes sont respectivement de 23 Mm³ et 14Mm³.

En ce qui concerne la circonférence moyenne des bouleaux en Région Wallonne, elle se situe généralement entre 20 et 60 cm. Les gros bois (120 cm de circonférence) sont rares et ne correspondent qu'à 7% du volume total en bouleau. Jusqu'à présent, ces gros bois ne perçoivent pas de valeur ajoutée par rapport aux plus petits utilisés comme bois de chauffage ou de trituration. En effet, ils présentent généralement des défauts tels que des nœuds ou pourritures, d'où le manque d'intérêt des gestionnaires forestiers pour les bouleaux de grandes dimensions. Actuellement, seul 3,8 % du volume de ces gros bois entrent dans la classe de qualité B contre 82% dans la qualité C (Dubois & al, 2016).

La proportion de l'essence est également détaillée au sein des différentes structures de peuplement : taillis, taillis sous futaie, futaies régulière et irrégulière. Cela démontre que la moitié de la surface des peuplements à bouleau appartient au régime du taillis sous futaie (Figure 17). L'essence est cependant rare dans les futaies irrégulières, pourtant bien représentées en Région Wallonne (Dubois & al, 2017).

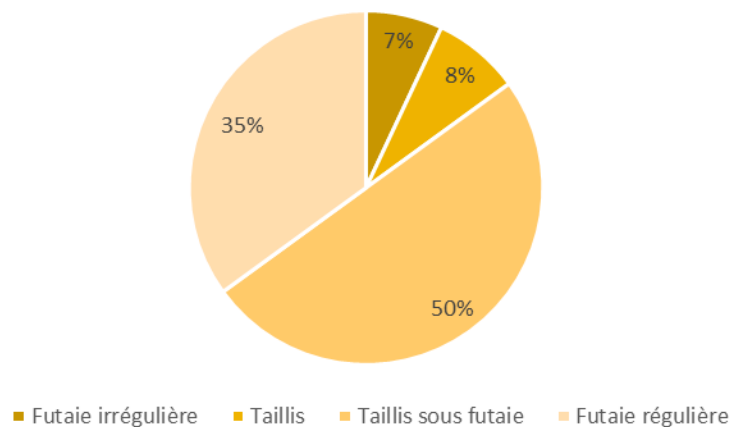


Figure 17 : Distribution des peuplements à bouleau selon leur structure (Dubois et al, 2017).

Au niveau des habitats potentiels, le bouleau occupe principalement les hêtraies acidophiles. Les habitats potentiels sont définis selon la typologie des habitats WaleUNIS, en fonction des

caractéristiques abiotiques et des relevés phytosociologiques. Ces habitats potentiels sont caractérisés notamment par leur situation topographique, leur répartition biogéographique, leur pédologie et leur variabilité trophique et hydrique (Dufrêne & Delescaille, 2005). Ils représentent dès lors des caractéristiques stationnelles définies.

En Région wallonne, la hêtraie acidophile (hêtraie acidophile du *Luzulo-Fagetum*) se rencontre sur des substrats siliceux acides et représente un habitat très commun dans la Région Ardennaise. En effet, elle y occupe la totalité des substrats géologiques. Beaucoup de peuplements y prenant place sont traités en taillis ou taillis sous futaie de chênes (Dufrêne & Delescaille, 2005). Il n'est dès lors pas étonnant que le bouleau se retrouve principalement dans ce type d'habitat au vu des conclusions précédentes. 63% des peuplements à bouleaux sont présents dans cet habitat. Il est toutefois retrouvé dans bien d'autres habitats potentiels comme les hêtraies mésophiles, les chênaies-frênaies, chênaies-charmaies, etc. (Dubois & al, 2017).

Ces différents résultats illustrent la diversité des situations, tant sylvicoles que stationnelles, dans lesquelles le bouleau se retrouve en Région Wallonne. De fait, comme spécifié précédemment, cette essence possède une grande capacité d'adaptation et de dispersion qui lui vaut le statut d'espèce pionnière. Elle se trouve à son optimum dans toute la Wallonie où elle semble s'être maintenue malgré qu'elle n'ait pas été favorisée dans la gestion forestière menée jusqu'à présent. Cependant, malgré sa large zone de répartition, le bouleau présente un faible pourcentage de volume sur pied. Il est en effet minoritaire en termes de surface terrière dans la majorité des peuplements où il est présent.

4.1.1. Importance sur le marché belge

La présence du bouleau sur le marché belge est également difficile à mettre en évidence malgré l'amélioration de la qualité des données statistiques rassemblées par l'Office économique wallonne du bois (OEWB). Ce dernier publie l'état des lieux socio-économiques de la filière bois en Wallonie tous les deux ans. On ne retrouve pas le bouleau dans l'édition 2019 du baromètre économique publié par l'OEWB, ce qui témoigne de la faible occurrence actuelle du bouleau sur le marché belge (Bays, 2019). Sa place est d'autant plus difficilement évaluable par le fait que le bouleau est généralement repris dans les lots « autres feuillus » comprenant d'autres essences comme le tilleul, l'aulne, le charme, etc. en proportions inconnues.

Afin de se rendre compte plus en détails de la place du bouleau au sein du marché belge, une analyse des données issues des ventes de bois des années 2016 à 2019 a été réalisée. Les données en question proviennent d'une base gérée par le Département Nature et Forêt (DNF). Les informations détaillées concernant chaque lot (composition, volumes, etc.) sont contenues dans des fichiers Access de structures identiques. La base de données contient les résultats des ventes de bois des communes, de la Région et autres institutions publiques pour chaque année. Il n'existe pas de données équivalentes disponibles pour les forêts privées.

Le premier tableau présente l'ensemble des lots ayant été vendus par le DNF durant les quatre années considérées (Tableau 8).

Tableau 8 : Ensemble des lots vendus par le DNF dans les ventes publiques, pour les quatre années.

Année	Ensemble des lots vendus		
	Nombre de lots	Nombre de bois (milliers)	Volume total (milliers m ³)
2016	4 568	2 121	1 232
2017	5 078	2 048	1 241
2018	5 231	1 815	1 129
2019	5 162	1 618	1 090

Le tableau suivant reprend les données obtenues pour les lots contenant au moins un bouleau (Tableau 9). Le nombre de ces lots ainsi que la somme de leurs volumes sont présentés en valeurs absolue et relative par rapport à tous les lots vendus. Le nombre total de bois, toutes essences confondues, ainsi que le nombre de bouleaux sont également chiffrés pour chaque année. Les valeurs relatives de ces derniers s'expriment par rapport au nombre total de bois dans les lots contenant du bouleau. Cela met en évidence la part moyenne de cette essence dans les lots en contenant au moins un arbre. Finalement, les deux dernières colonnes concernent les volumes en bois de bouleau. Les pourcentages sont également fonction du volume total de ces lots.

Tableau 9 : Données correspondant aux lots vendus contenant au moins un bouleau.

Année	Lots contenant du bouleau								
	Nombre de lots		Volume lots		Nombre de bois			Volume bouleaux	
	Valeur absolue	Valeur relative (%)	Valeur absolue (m ³)	Valeur relative (%)	Total	Bouleaux_ valeur absolue	Bouleaux_ valeur relative (%)	Valeur absolue (m ³)	Valeur relative (%)
2016	430	9.41	96 000	7.79	208 000	31 739	15.26	7 282	7.60
2017	520	10.24	101 000	8.14	277 000	43 411	15.70	9 422	9.30
2018	379	7.25	86 000	7.62	218 000	31 768	14.60	5 718	6.70
2019	329	6.37	65 000	5.96	182 000	24 521	13.50	5 413	8.30

Ce tableau montre que, en moyenne :

- 8% de tous les lots vendus contiennent au moins un bouleau.
- Les lots contenant au moins un bouleau représentent 7% du volume total des lots vendus.
- La part de bouleaux en volume est de 8% du volume total des lots avec bouleaux.

La part de lots contenant du bouleau étant connue, il est intéressant de spécifier la part de ceux qui sont purs, ou presque purs. Ceux-ci sont sélectionnés pour contenir au moins 80% de bouleaux en volume (m³). Le tableau présenté ci-dessous rassemble les données obtenues (Tableau 10). En moyenne, 9.18% des lots avec au moins un bouleau sont considérés comme purs ou quasiment purs.

Tableau 10 : Part de lots purs ou quasi-purs de bouleaux dans les lots en contenant au moins un.

<i>Lots purs ou quasi-purs</i>			
Année	Nombre total de lots contenant au moins 1 bouleau	Nombre de lots purs ou quasi-purs	Proportion de lots purs ou quasi-pur (%)
2016	430	39	9.07
2017	520	51	9.81
2018	379	40	10.55
2019	329	24	7.29

Afin que l'analyse de la ressource en bouleau mise sur le marché chaque année soit cohérente, se limiter à la seule description du nombre de bois et du volume vendus n'est pas suffisant. En effet, pour un usage en bois d'œuvre, sans tenir compte de la qualité des fûts, il est nécessaire de disposer de grumes de grosseur adéquate au sciage (circonférence > 100cm). Afin de déterminer la part de bois de bouleaux possédant les dimensions souhaitées, le tableau ci-dessous présente la distribution en fonction de la classe de circonférence du nombre de tiges ainsi que du volume de bouleaux vendus en moyenne chaque année de 2016 à 2019 (Tableau 11). Les chiffres ci-après montrent que seulement un tiers (33%) du volume des bouleaux vendus chaque année en forêt publique entre dans la catégorie des bois sciabiles. Cela correspond à environ 2300 m³ dispersés à travers toute la Région wallonne.

Tableau 11 : Distribution du nombre de tiges et du volume moyens de bouleaux, pour les quatre années, en fonction de la classe de circonférence

Catégorie de circonférence (cm)	Nombre de tiges de bouleau vendues	Volume de bouleau vendu (m³)	Cumul relatif du volume depuis la dernière catégorie
25	5417	68	100%
35	6534	309	99%
45	5946	591	95%
55	4185	686	86%
65	3015	735	76%
75	2347	793	66%
85	1727	771	54%
95	1241	704	43%
105	887	622	33%
115	602	510	24%
125	407	408	17%
135	231	270	11%
145	153	206	7%
155	86	131	4%
165	44	76	2%
175	23	44	1%
185	11	24	1%
195	4	8	0%
205	1	3	0%
215	0	1	0%

Sa moindre occurrence sur le marché belge est aisément justifiée par le faible nombre de lots homogènes proposés à la vente, par le manque de valorisations actuelles de ce bois en Belgique et par la favorisation d'autres essences telles que le hêtre, le chêne ou le peuplier. Certaines scieries belges mettent en avant le manque de qualité des ressources en bouleaux disponibles jusqu'à présent pour justifier sa moindre utilisation (Dubois et al, 2020).

A cela s'ajoute le nombre décroissant de scieries feuillues en Belgique, avec une diminution drastique depuis plusieurs dizaines d'années. Ce phénomène s'explique principalement par la mondialisation des échanges commerciaux dont le secteur du sciage feuillu est particulièrement victime. En Wallonie le secteur n'a pas été épargné et les effectifs ont grandement fluctué depuis le milieu des années 90. Une étude menée en 2017 a mis en évidence la fermeture de 81 entreprises de transformation en 20 ans, avec une chute particulièrement importante entre 1996 et 2010 (Houters et Frère, 2017). Si la fermeture d'un grand nombre de petites scieries de résineux a été compensée par l'implantation de plus grandes unités de production, ce n'est pas le cas pour les scieries de feuillus (Boldrini, 2011). Après 2010, certaines scieries ont révisé leurs activités pour s'adapter au mieux aux éventuelles fluctuations du marché grâce à des technologies plus modernes et polyvalentes. Les scieries mixtes ont dès lors vu leurs effectifs augmenter contrairement aux entreprises strictement spécialisées en résineux ou feuillus. En 2017 la Wallonie comptait 20 scieries feuillues et 18 mixtes alors que l'Annuaire Forestier de Wallonie de 1996 en liste 49 et 39 respectivement.

Outre ce manque de scieries, sa moindre occurrence sur le marché belge s'explique par d'autres éléments tels que le manque de connaissances et de formations des propriétaires ou gestionnaires forestiers quant à la sylviculture du bouleau. En effet, cela impacte directement la qualité des grumes qui ne sont donc pas valorisées dans la production de produits qualitatifs.

Bien que les chiffres précédemment exposés soient assez faibles, il est nécessaire de préciser à nouveau que l'entreprise Kewlox se fournit à raison de 300 à 400 m³ de bois sciés par an, ce qui est également relativement faible. En considérant un rendement approximatif au sciage de 40%, la ressource actuelle semble suffire pour subvenir aux besoins de l'entreprise tant que la concurrence n'y fait pas obstacle. Le marché du bois de bouleau pour ce type d'utilisation n'étant pas développé actuellement en Belgique, cette dernière n'est pas un frein. La disponibilité future du bouleau est à appréhender en fonction du développement du marché du bois dans les prochaines années.

4.2. Ressource forestière mondiale

Le bouleau est particulièrement bien représenté tant au niveau des forêts tempérées que boréales. Ce qui en fait une essence forestière parmi les plus représentées en Europe en termes d'aire de distribution (Fichier écologique, 2017).

Betula pubescens, plus nordique, s'étend de l'Océan Arctique jusqu'à la Sibérie. Il est également présent dans la péninsule ibérique à la pointe du Sud-Ouest de l'Europe, à proximité des cours d'eau et dans les zones humides. *Betula pendula* voit son aire de répartition s'étendre de l'Atlantique vers l'est de la Sibérie ainsi que jusqu'à la péninsule volcanique Kamtchatka, la Chine et le Japon. Plus au Sud de son aire, il occupe l'étage collinéen, premier étage de végétation rencontré lors d'une montée en altitude en massifs montagneux des régions tempérées. Cet étage voit son altitude varier selon le climat et l'ensoleillement local, pouvant aller jusqu'à 800m dans les Pyrénées et les Alpes (Barrere, 2020). Il peut être retrouvé à plus de 2500m dans l'étage subalpin de certaines régions comme le Grand Caucase (Dubois & al, 2016).

Dans son aire, 90% de la ressource totale du bouleau occupent les Pays Nordiques, ce qui équivaut à environ 15 milliards de m³. Dans cette région du monde, spécifiquement en Scandinavie et en Russie, il est la première essence feuillue et représente environ 18% de la ressource nationale en bois en volume sur pied (m³), ce qui est loin d'être négligeable. La gestion sylvicole du bouleau ainsi que ses propriétés physiques et mécaniques qui justifient sa large gamme d'utilisation font l'objet de nombreuses recherches dans cette partie de l'Europe, et ce, depuis des années. Aujourd'hui en Finlande, il existe d'ailleurs un guide de recommandations sylvicoles pour la production de bouleaux de qualité (Dubois & al, 2020).

C'est en Europe centrale que la ressource est la plus pauvre, avec seulement 1% de la ressource totale en bouleau. Il est cependant à noter que ces chiffres sont à considérer avec prudence étant donné la disparité entre les méthodes et qualités d'échantillonnages des différents pays. De plus, un manque de données au sein de certains d'entre eux sous-estime la ressource pourtant présente. Certaines régions sont pourvues de plusieurs espèces de bouleaux autres que pubescent et verruqueux qui entrent également dans les statistiques (Dubois & al, 2016). Finalement, étant donné sa présence dans des peuplements largement dominés par d'autres essences, il est certain que son occurrence dépasse les zones indiquées (Luostarinen & Verkasalo, 2000). Malgré ces biais potentiels, ces échantillonnages permettent toutefois de mettre en évidence les grandes tendances au niveau de la ressource en bouleau au sein de l'Eurasie.

4.2.1. Importance sur le marché Européen

La Finlande fait partie des pays où le bouleau est le plus valorisé industriellement et ce depuis le 19^{ème} siècle. L'essence a notamment connu une hausse de popularité à la suite du développement de l'industrie du contre-plaqué (Luostarinen & Verkasalo, 2000). Le bouleau a connu plusieurs fluctuations dans sa valorisation, passant de l'industrie papetière à l'industrie du design et de l'ameublement intérieur, en gardant toujours une place importante dans la sylviculture nordique. De façon générale, alors que l'Europe occidentale valorise principalement le chêne et le hêtre parmi les essences feuillues, le Nord profite de la grande disponibilité en bouleau pour développer un grand nombre de marchés et d'industries spécialisées (Dubois & al, 2020).

La disponibilité du bois de bouleau varie en fonction des fluctuations du marché. Ces dernières années, les importations de grumes de la Russie vers les pays Nordiques ont diminuées, et les coûts de celles-ci ont augmentés (Dubois & al, 2020).

La plupart du sciage de bouleau finlandais est exporté, principalement en Suisse, Allemagne et au Royaume-Unis. Ce n'est pour l'instant pas encore le cas en Belgique. Le Sud-Est de la Finlande exporte actuellement environs 25% de sa production alors que les exportations de la région du centre atteignent 70%.

4.3. Ressource future attendue

Les chapitres précédents mettent en évidence la ressource en bouleau, actuellement faible en Belgique et importante ailleurs dans le monde. Sa disponibilité est actuellement réduite en Région Wallonne même si la ressource est en augmentation depuis plus d'une décennie. On peut penser que cette tendance se verra favorisée dans les années futures.

Etant donné la tendance actuelle et l'intérêt de diversifier les peuplements en essences, âges et structures, en favorisant notamment la régénération naturelle, il faut s'attendre à une augmentation progressive de la ressource. Le bouleau se mélangeant naturellement aux essences principales comme le chêne, il est une essence secondaire intéressante à maintenir dans le cadre de la diversification des peuplements qui entre en vigueur dans diverses dispositions légales (Dubois et al, 2016). Les deux espèces, verruqueux et pubescent, deviendront davantage présentes dans les peuplements mixtes (Dubois & al, 2020). Cette hypothèse se voit renforcée par les capacités d'adaptation et l'écologie du bouleau qui en fait une essence plus adaptée que d'autres pour faire face aux changements climatiques attendus comme cela a été détaillé précédemment.

Dans différentes régions d'Europe, la ressource en bouleau augmente par l'abandon et l'afforestation de nombreuses zones agricoles. Ce phénomène s'illustre principalement dans les pays scandinaves et baltiques, en Europe de l'Est et aux Pays-Bas (Dubois & al, 2016). Le bouleau est dès lors largement favorisé dans ces espaces nouvellement ouverts, qui se voient coloniser rapidement par l'essence dont la dispersion des graines est très efficace. Par conséquent, son expansion est déjà importante dans certaines régions. Etant une espèce pionnière, colonisatrice, à croissance rapide et à large amplitude écologique, il faut s'attendre à voir ses effectifs continuer à augmenter par la dissémination dans des espaces ouverts abandonnés, aux conditions difficiles, mal gérés ou ravagés par des aléas divers. En Belgique et ailleurs en Europe, ces aléas s'illustrent principalement par les problèmes sanitaires qui font rage et détruisent progressivement de plus en plus d'essences et de peuplements entiers. Ces notamment le cas dans les Ardennes, où le scolyte ravage les épicéas (*Picea abies*). Ces zones dévastées sont une aubaine pour l'installation du bouleau. Si ce dernier s'établit aisément naturellement, l'installation par le gestionnaire forestier est une garantie pour celui-ci de voir l'essence croître dans ses parcelles. Il est plus qu'intéressant pour lui de garantir la présence du bouleau dans des anciennes pessières en y restaurant la fertilité du sol (Dubois & al, 2020).

S'il s'installe spontanément dans les peuplements ou les espaces mis à nus, l'avenir du bouleau dépend également de la sylviculture. En effet, s'il ne fait pas l'objet d'une gestion efficace, les grumes comportent beaucoup de défauts et un faible volume de bois individuel. Historiquement laissé pour compte, il semble aujourd'hui être de plus en plus reconnu pour ses atouts sylvicoles et écologiques (Dubois & al, 2017). En Wallonie, certains sylviculteurs commencent à percevoir son potentiel et envisagent de tirer parti de son installation aisée et gratuite au sein des peuplements (Dubois & al, 2016). A une époque où les changements climatiques et globaux menacent, où l'avenir sanitaire des forêts et du marché du bois sont difficilement prévisibles, les gestionnaires et propriétaires sylvicoles se doivent de revoir leurs habitudes et de tirer parti de ce que la nature offre. En gérant les bouleaux nouvellement installés, les sylviculteurs peuvent contrôler la qualité de ceux-ci et amener cette essence à des valorisations plus nobles. Il s'agit de tirer avantage de l'installation naturelle du bouleau, que ce soit dans les zones ouvertes, les stations aux conditions particulières, dans les plantations échouées ou les peuplements mal entretenus, et donc de profiter de la succession forestière (Dubois & al, 2016). La sylviculture de cette essence est actuellement étudiée dans tous ses aspects en Belgique, offrant de ce fait un guide complet aux gestionnaires forestiers du pays.

5. Analyse des ventes de bois

Une analyse des ventes de bois publiques a été réalisée pour les années 2016, 2017, 2018 et 2019 pour le bouleau ainsi que pour le hêtre afin de décrire les tendances principales liées aux prix des deux essences. Les données utilisées à cet effet sont les mêmes que celles décrites précédemment pour l'étude de la place du bouleau sur le marché belge. L'analyse a été réalisée avec le logiciel d'estimation des prix « Pris des Bois ».

5.1. Logiciel « Prix des bois »

Le logiciel Prix des bois est un programme d'estimation des prix de vente, en euros/m³ développé par l'Unité de gestion des ressources forestières. Les prix unitaires sont estimés grâce à une méthode de régression statistique sur base d'informations connues de ventes précédemment réalisées.

Le programme permet à l'utilisateur de sélectionner des lots selon différentes caractéristiques, parmi lesquelles :

- Année.
- Cantonnement(s).
- Essence(s).
- Volume minimum des lots.
- Qualité(s) des bois.
- Type(s) d'opération(s) sylvicoles.
- Classes de circonférence.
- Proportion minimum de ou des essences sélectionnée(s) dans les lots.

Ces possibilités de choix permettent d'obtenir des estimations pour une gamme de lots qui ne se limite pas aux seuls lots dits « caractéristiques » et qui n'écarte pas les plus atypiques a priori.

Une fois la sélection réalisée, la visualisation des lots permet d'observer la composition et les détails de vente de chacun d'eux. Un graphique représentant la répartition des prix moyens (euros/m³) en fonction du volume moyen (vol/nombre de bois) de chaque lot est également disponible. Cette interface met en évidence des lots parfois particuliers, non vendus au prix du marché, qui peuvent être éliminés manuellement par l'utilisateur s'il le juge nécessaire.

Le logiciel génère également, par l'analyse statistique, une courbe des prix unitaires en fonction de la grosseur. Il est possible de visualiser les lots ayant été vendus à un prix supérieur de 20% au prix estimé, ou inférieur à -20% de ce dernier. Une fois de plus, l'utilisateur a la possibilité de retirer de l'analyse les lots jugés trop marginaux.

Le modèle de régression linéaire estime des prix unitaires possédant la forme d'une équation polynomiale du 4^{ème} degrés, telle que présentée ci-dessous. PU_i correspond au prix unitaire de la i ème catégorie de grosseur.

$$PU_i = p_0 + p_1c_i + p_2c_i^2 + p_3c_i^3 + p_4c_i^4$$

Le prix d'un lot est exprimé selon l'équation suivante :

$$\widehat{PL}_j = \sum_{i=1}^n v_{ij} PU_i$$

Les prix sont ajustés de façon à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs des prix réellement observés et celles des prix estimés pour les lots concernés. Ils sont également présentés sous forme pondérée. Le facteur de pondération équivaut à l'inverse du carré du volume total de chaque lot, et permet dès lors à ceux-ci d'avoir un poids identique dans l'estimation des prix. Les lots volumineux n'ont donc pas plus de poids que les plus petits.

Une fois l'analyse des prix réalisée pour les lots retenus, les résultats obtenus sont enregistrés dans un fichier Excel.

5.2. Méthode d'analyse des ventes pour le bouleau et le hêtre

Les deux essences ont été traitées indépendamment. Ci-après sont détaillé les choix effectués sur le logiciel pour la sélection des lots (Tableau 12).

Tableau 12 : Choix principaux de sélection des lots dans le logiciel Prix Des Bois.

ESSENCE(S)	BOULEAU	HÊTRE
QUALITÉ	Normale	Normale
OPÉRATION(S) SYLVICOLE(S)	Coupe amélioration + définitive	Coupe amélioration + définitive
PROPORTION MINIMUM DE L'ESSENCE CHOISIE	80%	80%

Le choix d'une proportion de 80% en volume de l'essence sélectionnée se justifie par la nécessité d'obtenir suffisamment de lots pour une analyse cohérente. Au-delà de cette proportion, les lots deviennent trop peu nombreux, particulièrement pour le bouleau. En-deçà, le nombre de lots avec d'autres essences en proportions plus importantes augmente et diminue la qualité de l'ajustement. En effet, certains de ceux-ci peuvent impacter l'estimation des prix par la présence de certaines essences aux prix très différents de celles qui nous intéressent.

5.3. Résultats

Actuellement, le prix moyen au mètre cube des lots contenant du bouleau est environ quatre fois inférieur à ceux contenant du hêtre (Tableau 13). Cela s'explique par le marché actuel qui ne favorise pas le bouleau. Peu d'acheteurs s'y intéressent pour l'instant alors que le hêtre est encore largement disponible.

Tableau 13 : Résultats obtenus pour les lots sélectionnés comportant au moins 80% de volume de bouleau ou de hêtre pour les quatre années considérées.

Année	Bouleau (>80% en volume dans les lots)				Hêtre (>80% en volume dans les lots)			
	Nombre de lots	Volume total (m3)	Montant total des lots vendus (€)	Moyenne par m ³ (€)	Nombre de lots	Volume total (m3)	Montant total des lots vendus (€)	Moyenne par m ³ (€)
2016	35	659	12 072	18	77	37315	2 349 530	63
2017	51	1107	10 779	10	50	30545	2 105 032	69
2018	40	1132	20 330	18	43	23418	1 857 824	79
2019	24	609	7 191	12	70	29925	1 879 905	63

- Courbe des prix unitaires du hêtre

Les profils des deux essences diffèrent l'un de l'autre. Celui du hêtre est connu, car il s'agit d'une essence commerciale très bien représentée dans les ventes de bois en Belgique. La courbe du prix en fonction de la classe de circonférences possède l'allure ci-dessous (Figure 18) :

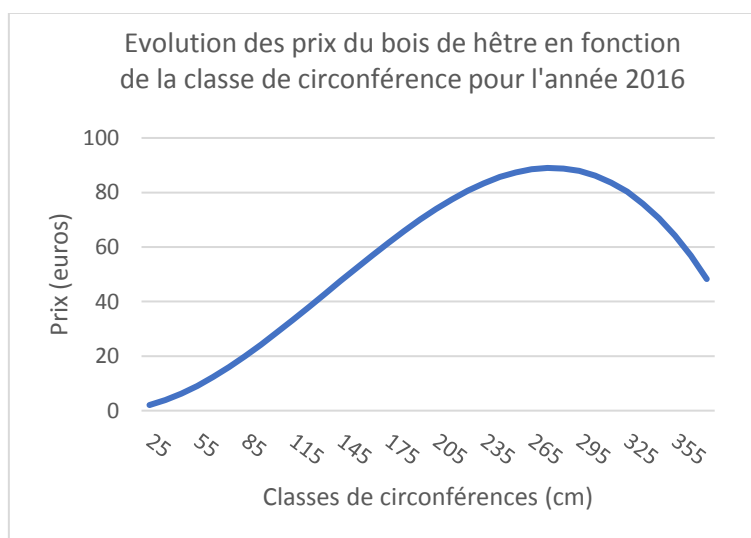


Figure 18 : Evolution du prix du hêtre en fonction de la classe de circonférence pour l'année 2016

Cette courbe a été réalisée sur base des ventes publiques de l'année 2016. Le prix augmente avec la classe de circonférence jusqu'à atteindre un maximum, généralement autour de 280 cm. Ensuite, le prix chute. Cela s'explique notamment par le fait que la plupart des arbres de grosses circonférences sont plus âgés et présentent dès lors davantage de défauts, parmi lesquels on peut citer le cœur rouge. Une autre cause de cette décroissance des prix est le coût de transformation. En effet, la grande majorité des scieries belges ne dispose pas d'outils adaptés à de si grandes dimensions et se doit, dès lors, de redimensionner au préalable les grumes achetées afin de permettre leur sciage. Cela engendre un travail et un coût supplémentaires pour les acheteurs. Ces derniers sont donc moins nombreux et les prix sont impactés.

Les prix générés par le logiciel « Prix des bois » ne doivent être considérés qu'à l'intérieur des limites de validité des estimations. Le graphique ci-après donne pour chaque année la courbe d'évolution des prix du hêtre, à l'intérieur de cette zone de validité (Figure 19).

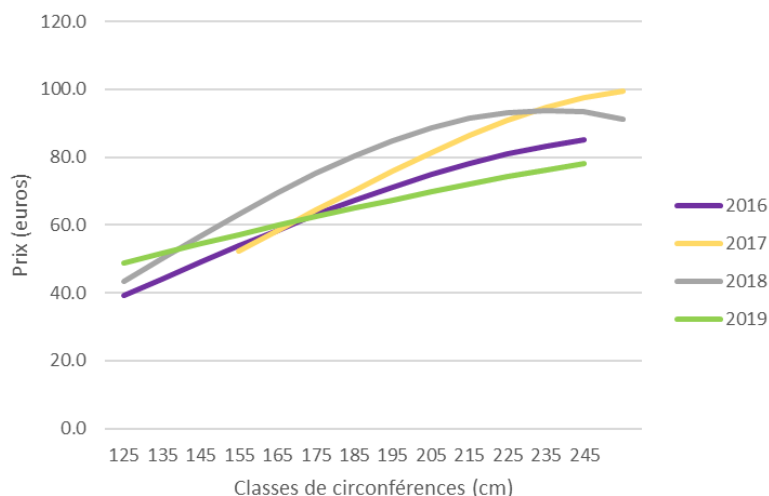


Figure 19 : Evolution du prix du hêtre en fonction de la circonférence pour les quatre années considérées

Les allures de courbes correspondent à l'allure générale du modèle économique du hêtre, ce qui témoigne d'une sélection cohérente des lots pour l'étude réalisée. En 2019, le prix de l'essence connaît une chute par rapport aux années précédentes. Cela s'explique notamment par l'importance du nombre d'épicéas scolytés disponibles pour l'industrie du panneau qui se voit donc saturé (Bays, 2019).

- Courbe des prix unitaires du bouleau

Concernant le modèle de courbe de prix unitaires du bouleau, celui-ci n'est pas connu contrairement à ceux des essences commerciales principales. De plus, le peu de bois de bouleau actuellement sur le marché ne permet pas l'obtention d'une courbe ajustée comme c'est le cas pour le hêtre. Il a dès lors fallu trouver le modèle qui caractérisait au mieux l'évolution des prix du bouleau en fonction de la classe de grosseur. Deux modèles simplifiés ont été testés sur base des données fournies par le DNF.

Le premier est un modèle minimum-maximum qui suppose que sous une certaine classe de grosseur « charnière », le prix unitaire au m³ est constant et minimum, et qu'au-delà de cette même classe, ce prix est également constant mais maximum (Figure 20). L'hypothèse est que les petits bois sont utilisés comme bois de chauffage alors que les plus gros peuvent trouver des débouchés plus rémunérateurs. Cela explique donc l'écart entre les deux types de bois.

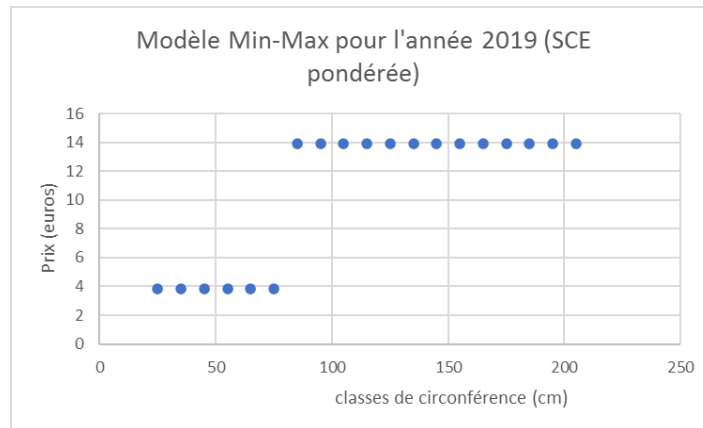


Figure 20 : Graphique illustrant le modèle Min-Max obtenu avec les données 2019.

Le second modèle est une droite segmentée possédant une valeur constante sous une classe de circonférence déterminée et étant linéairement croissante au-dessus de cette même classe (Figure 21). L’hypothèse ici est que, comme pour le hêtre, le prix augmente proportionnellement à la classe de circonférence.

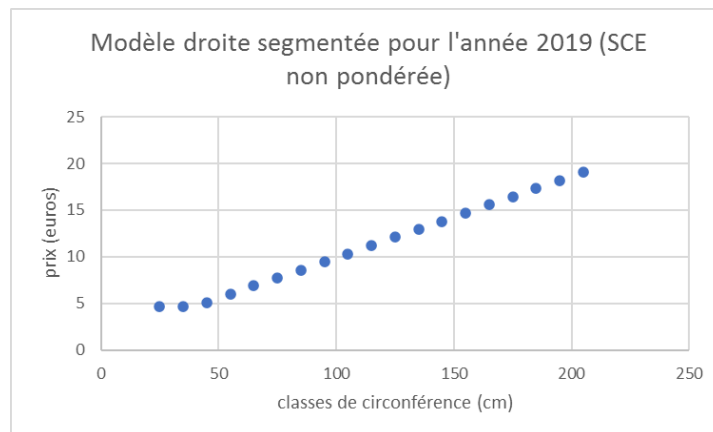


Figure 21 : Graphique illustrant le modèle de droite segmentée obtenu avec les données 2019.

Pour les deux modèles testés, la classe de circonférence « charnière » est déterminée à l’aide de la fonction Solveur d’Excel en même temps que les deux paramètres qui caractérisent ces deux modèles.

Afin de faire ressortir les meilleurs résultats pour chacune des quatre années, deux critères d’ajustement ont été utilisés. Le premier se base sur une somme des carrés des écarts (SCE) entre les prix observés et ceux estimés. Le second est une SCE pondérée par le prix de vente observé. Ce dernier critère d’ajustement augmente l’importance des petits lots, contrairement au premier qui donne davantage de poids aux lots les plus importants. Le tableau ci-après donne les meilleurs ajustements obtenus pour chaque année (Tableau 14). Au vu de ce dernier, il apparaît que le modèle minimum-maximum est celui qui donne la majorité du temps le meilleur ajustement. Le tableau met également en évidence le prix relativement bas des bouleaux de grandes circonférences qui, au maximum, est de 20-30 euros.

Tableau 14 : Meilleurs ajustements obtenus pour les quatre années et pour les SCE pondérées et non pondérées.

Classe de circonférence (cm)	2016		2017		2018		2019	
	SCE non pondérée	SCE Pondérée	SCE non pondérée	SCE Pondérée	SCE non pondérée	SCE Pondérée	SCE non pondérée	SCE Pondérée
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max	segm	min-max
25	5.3	4.4	6.3	1.6	9.4	8.4	4.7	3.8
35	5.3	4.4	6.3	1.6	9.4	8.4	4.7	3.8
45	5.3	4.4	6.3	1.6	9.4	8.4	5.1	3.8
55	5.3	4.4	6.3	1.6	9.4	8.4	6	3.8
65	26.3	4.4	6.3	1.6	9.4	8.4	6.9	3.8
75	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	7.7	3.8
85	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	8.6	13.9
95	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	9.5	13.9
105	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	10.3	13.9
115	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	11.2	13.9
125	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	12.1	13.9
135	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	13	13.9
145	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	13.8	13.9
155	26.3	31.5	15.2	19.4	25.4	22.9	14.7	13.9
165	26.3	31.5			25.4	22.9	15.6	13.9
175	26.3	31.5					16.4	13.9
185							17.3	13.9
195							18.2	13.9
205							19.1	13.9

Ce prix relativement bas s'explique par la faible demande actuelle pour ce bois, ce qui diffère grandement du hêtre. Il est à noter, une fois de plus, que tous les chiffres présentés dans cette partie ne correspondent qu'aux ventes publiques. En effet, aucune donnée pertinente n'existe au niveau des forêts privées.

6. Essais d'usinage au sein de la menuiserie Kewlox

La partie pratique de ce travail concerne la réalisation d'essais d'usinage réalisés au sein de la menuiserie de l'entreprise Kewlox. L'objectif est de tester la production de profilés à partir d'un certain nombre de planches de bois de bouleau à l'aide des machines utilisées par l'entreprise et d'observer différentes caractéristiques du bois justifiant ou non son aptitude à être utilisé pour la fabrication de ce type de meubles.

Malheureusement, les possibilités se sont vues fortement réduites à cause de la pandémie et du confinement en décollant. La directrice, Mme. Le Clercq, a toutefois accepté gracieusement d'ouvrir les portes de son usine pendant une après-midi afin de réaliser les essais. Ceux-ci ont été supervisés par deux membres du personnel, dont le chef de menuiserie.

6.1. Matériel et méthode

6.1.1. Matériel

Le matériel utilisé dans le cadre de ce travail provient de planches en surplus débitées dans des grumes de bouleaux utilisées dans le cadre d'un précédent travail de fin d'études réalisé par Martin Boedts en 2016 sur l'effet du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du bois de bouleau. En effet, la situation de pandémie n'a pas permis l'approvisionnement d'un matériel plus récent et de qualité supérieure.

Les planches ont subi un séchage naturel dans un hall ventilé avant un stockage dans un hall chauffé qui a permis d'amener le taux d'humidité avant essais à 11% en moyenne (Annexe 3).

Origine des bois (matériel 2016) :



Figure 23 : Deux billons de 3m provenant de l'arbre n°2.



Figure 22 : Trois billons de 3m provenant de l'arbre n°4.

Le matériel de base provient de cinq bouleaux d'une boulaie (peuplement pauvre en bouleau) située à Lasnes, dans la province du Brabant Wallon. Ces arbres ont été sélectionnés sur base de leur circonférence et de leur morphologie, c'est-à-dire présentant une bonne rectitude, un élagage naturel et le moins de défauts apparents possible. Ils sont numérotés de 1 à 5. Les deux premiers ont donné deux billons de trois mètres (Figure 23) et les trois autres, trois billons (Figure 22).

Chaque billon a été par la suite recoupé en deux tronçons de 1m50 comme le montre le schéma ci-après. Chaque paire ainsi obtenue comprend donc un demi-billon destiné aux blancs (Figure 24) et un demi-billon destiné au traitement thermique (Figure 25) noté par une lettre (a, b ou c) avec ou sans apostrophe respectivement. Des plateaux centraux de 85mm d'épaisseur et des planches de 32mm d'épaisseur ont été découpé dans chaque demi-billon.

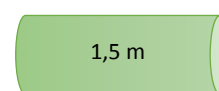


Figure 24 : Demi-billon blanco.

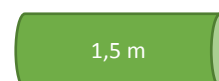


Figure 25 : Demi-billon pour thermotraitement.

La figure ci-après illustre le schéma de sciage de deux demi-billons de 1m50 (Figure 26). Le tronçon destiné aux essais de traitement thermique (à gauche) a permis de scier une planche de 32mm en plus (57a) que celui destiné aux blancs (à droite). Ces surplus non utilisés car sans homologue font donc office de matériel de base dans le cadre du travail ci-présent. Elles sont au nombre de 28 et correspondent aux planches (dosses) situées la majorité du temps à proximité de l'écorce. Il est à noter qu'aucune de ces planches n'a été traitée. Les schémas de sciage des cinq arbres sont présentés dans l'annexe n°2.

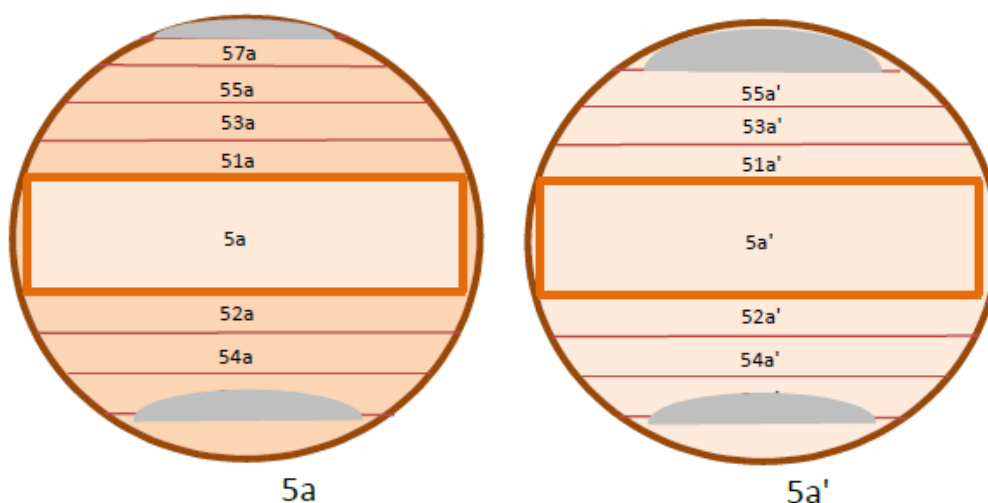


Figure 26 : Schéma de sciage de deux tronçons de 1m50 provenant d'un même billon de 3m. A gauche : demi-billon à traité, à droite : demi-billon blanco.



Figure 27 : Découpe de la planche 57a.

Matériel utilisé pour les essais chez Kewlox :



Figure 28 : Eprouvettes finales, triées et dimensionnées au LTB, et destinées aux essais d'usinage chez Kewlox.

Ces 28 planches en surplus ont ensuite été triées au du Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du DEMNA (Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole) à Gembloux pour purger les éventuels défauts. La longueur minimale finale tolérée étant de 50cm, certaines planches n'ont pas pu être utilisées car les défauts présents (entre-corces, nœuds, fentes de séchage, etc) étaient trop importants ou mal situés. Plusieurs planches assez larges ont pu être coupées dans leur largeur. Finalement, de ce tri et cette redécoupe, 57 barreaux de 51mm de large, 31mm d'épaisseur et de longueurs diverses ont été obtenues (Figure 28).

Le nombre d'éprouvettes diffère d'un billon et d'un arbre à l'autre, étant donné qu'elles proviennent de planches en surplus issues d'expériences précédentes.

Les éprouvettes obtenues ont toutes été marquées par un code pour assurer la traçabilité de chaque échantillon. Voici à quoi correspond chacun des éléments de ce code :

- Premier chiffre, de 1 à 5 : numéro de l'arbre.
- Deuxième chiffre, de 1 à 7 : numéro de la planche de 1m50 d'un même demi-billon.
- Lettre (a, a', b, b', c, c') : demi-billon.
- Dernier chiffre, de 1 à 4 : numéro de l'éprouvette d'une même planche ayant été redécoupée dans sa largeur.

Ci-après, la numérotation des 57 barreaux obtenus et destinés à l'usinage dans la menuiserie de Kewlox (Tableau 15). Les codes présents sur une même ligne correspondent aux éprouvettes découpées dans une même planche d'1m50.

Tableau 15 : Numérotation des 57 barreaux pour les cinq arbres.

	Traçabilité éprouvettes			
Arbre n°1	11a 13b/1	13b/2		
Arbre n°2	21a 23a/1 24b'/1 25a/1	24b'/2	24b'/3	
Arbre n°3	31a/1 31b/1 33a/1 35a/1	35a/2		
Arbre n°4	42c/1 44c/1 45a/1 45b/1 45b'/1 46a'/1 46b/1 46b'/1 47a/1 47a'/1	44c/2 45a/3 45b'/2 46a'/2 46b/2	44c/3 46a'/3 47a/3	44c/4 46a'/4 47a/4
Arbre n°5	52c/1 53a/1 53b'/1 54b/1 55a'/1 55a/1 56b/1 57a/1	53a/2 53b'/2 54b/2 55a'/2 55a/2 56b/2 57a/2	53b'/3 54b/3 55a/3	57a/3 57a/4

6.1.2. Méthode

Etapas d'usinage au sein de la menuiserie

Les essais d'usinage ont été réalisés au sein de l'usine de l'entreprise Kewlox avec la supervision de deux membres de son personnel, parmi lesquels le responsable de la menuiserie et la technicienne en charge, entre autres, de la sélection et du tri des barreaux avant usinage.

Afin d'apprécier l'usinabilité du bois de bouleau et de pouvoir la comparer avec celle du hêtre, chaque éprouvette a suivi l'ensemble de la chaîne de fabrication, passant du rabotage, à la mise en longueur jusqu'à la découpe des profilés à la moulurière. Les barreaux ont été usinés à un pourcentage d'humidité moyen de 11%.

Les produits finaux sont des traverses dorsales supérieures, avec une rainure de part et d'autre pour accueillir les planches de casier. Il n'a pas été possible de réaliser des traverses frontales avec l'épaisseur du matériel à disposition. En effet, la fabrication de celles-ci nécessite des sciages de section 50*36 mm².

Ci-après sont détaillées toutes les étapes d'usinage par lesquelles le bois de bouleau est passé ainsi que le type d'évaluations qualitatives et quantitatives en découlant.

ETAPE N° 1 : Numérotation des éprouvettes

Afin d'assurer la traçabilité de chaque barreau, les éprouvettes ont été triées en trois piles selon l'arbre dont elles proviennent : une pour celles de l'arbre 4, une pour celles de l'arbre 5 et une pour les éprouvettes, moins nombreuses, des arbres 1, 2 et 3.

Un code couleur a été attribué à chaque pile et chaque barreau a été à numéroté de 1 à 22 maximum avec la couleur adéquate. Cela permet de simplifier le suivi, étant donné la complexité du code de base des éprouvettes.

ETAPE N° 2 : Pré-rabotage

Avant d'entamer les étapes de transformation habituelles, le responsable de la menuiserie a réalisé pour toutes les éprouvettes un pré-rabotage dans la corroyeuse weinig afin de mettre chaque barreau aux dimensions des sciages de hêtre habituellement commandés par l'entreprise. Cela permet de commencer le processus de fabrication de traverses sur la même base, rendant la comparaison plus cohérente. Après cette étape, les barreaux, au départ de 51*31mm² ont été ramenés aux dimensions de 50*26mm² et une partie des déformations a été éliminée.

ETAPE N° 3 : Rabotage définitif

L'étape précédente est directement suivie du rabotage définitif, duquel les barreaux sortent aux dimensions finales de 45*21mm². Les éprouvettes passent dans la machine à une vitesse de 18m/min, soit la même que lors de l'usinage du hêtre.

Il a précédemment été notifié que le hêtre est toujours enduit de lubrifiant avant le passage dans la raboteuse. Au vu du temps nécessaire pour faire sécher le produit avant la suite de l'usinage, la majorité des barreaux de bouleau n'a pas été traitée. Seules trois planches ont été enduites afin de juger des potentielles différences entre les deux essences.

A priori, l'absence de lubrification n'a pas eu d'impact sur l'usinage.

ETAPE N° 3 : Tri des barreaux avant mise en longueur

Entre le rabotage et le reste du processus, il y a rupture de chaîne, ce qui permet d'analyser la qualité des barreaux et de trier ces derniers selon les longueurs souhaitées de traverses avant leur passage dans la tenonneuse.

Bien que les éprouvettes aient été triées et purgées de nombreux de leurs défauts au Laboratoire de Technologie du Bois de Gembloux, certains jugés acceptables par ce dernier n'entrent pas dans les

exigences de l'entreprise Kewlox. La technicienne, habituellement en charge de cette fonction, a donc vérifié chaque barreau afin de juger de la longueur finale adéquate. Les éprouvettes les plus cintrées ont été recoupées dans la longueur en deux ou trois. Les défauts jugés trop importants ont également été purgés. Il s'agit principalement de nœuds, parfois relativement discrets (Figure 29).

Il a été demandé à la personne chargée du tri de sélectionner les barreaux et leur longueur finale adéquate en fonction de leur qualité avec les mêmes exigences que pour les barreaux de hêtre.



Figure 29 : Exemples de type de nœuds non acceptés par l'entreprise.

ETAPE N° 5 : Mise en longueur et profilage

Une fois la longueur finale des traverses de section 40*21 mm² déterminée, la tenonneuse est réglée en conséquence et les barreaux sont placés dans la machine. Le réglage de cette dernière doit être modifié si la longueur est différente et la vitesse est la même que celle prévue pour l'usinage du hêtre, soit 10 ou 11 m/min.

Une fois dans le circuit, les éprouvettes passent dans la tenonneuse et dans la moulurière, sans interruption entre les deux étapes. La première permet la découpe des onglets (coupe diagonale à 45°) aux extrémités (Figure 30) et la mise en longueur, la seconde a pour but de découper les angles et les rainures. L'angle des onglets est vérifié en fin de chaîne.

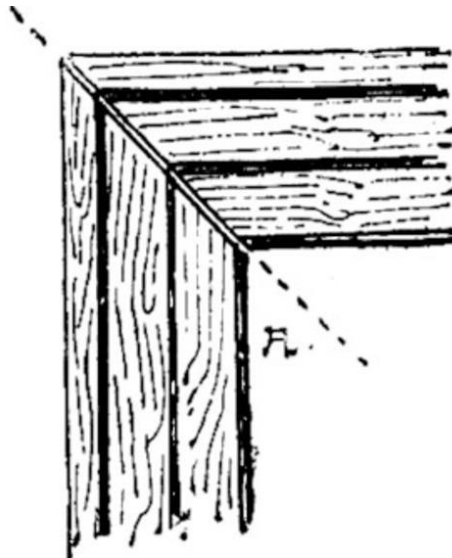


Figure 30 : Exemple d'onglet en menuiserie. Source : <https://www.meubliz.com/definition/onglet/>

Dans un souci de traçabilité, ces deux étapes sont réalisées pile par pile et longueur par longueur.

ETAPE INTERMEDIAIRE : Fabrication de tasseaux

Des tasseaux ont également été réalisés avec les chutes provenant du tri après rabotage et avant profilage. Lorsque les chutes ne permettent pas la réalisation d'une traverse en raison d'une longueur trop courte ou de la présence de défauts visuels, elle peut être utilisée pour la fabrication de tasseaux. La longueur de tasseaux choisie est ici de 27cm.

Evaluations qualitative et quantitative

Evaluation qualitative

Appréciation de l'usinage par le personnel de la menuiserie :

L'usinage du bois de bouleau a été apprécié par les membres du personnel de la menuiserie lors de chacune des étapes décrites précédemment. Ils ont travaillé les planches de bouleau exactement de la même manière que celles de hêtre et ont, lors de chaque étape, mis en évidence les similitudes ou les différences entre les deux essences.

Ces appréciations concernent principalement la façon dont le bois réagi à chaque étape du processus de transformation, avec notification des défauts éventuels après chacune d'elles. Il s'agit donc d'une évaluation qualitative basée sur des échanges avec les menuisiers qui connaissent parfaitement leurs machines et le travail du bois de hêtre.

Evaluation ultérieure des défauts d'apparence :

Un travail ultérieur a été réalisé au Laboratoire de Technologie du Bois. L'appréciation qualitative a été complétée par un relevé des défauts, comme les nœuds, les marques d'outils ou les taches médullaires, sur les produits finis. Chacune des traverses a été scrutée afin de recenser ces derniers.

La traçabilité des échantillons permet de faire des liens entre les défauts observés et l'origine de la traverse (arbre ou planche). Ces liens potentiels ont été illustrés par une analyse statistique réalisée avec le logiciel Minitab 19. Il s'agit d'évaluer si la présence de défaut(s) est potentiellement liée à l'origine de la traverse.

Evaluation quantitative

Ayant connaissance des longueurs avant et après usinage, un calcul de rendement a été réalisé afin de comparer ce dernier à celui du hêtre usiné dans les mêmes conditions. Pour une comparaison cohérente, les dimensions initiales utilisées pour les calculs sont celles après pré-rabotage, donc conformes à celles du hêtre lors de son approvisionnement (50*27mm²).

Le rendement a été évalué en centimètres courants de traverses et tasseaux produits ainsi qu'en volume (cm³). Ce dernier a été calculé en considérant les traverses et les tasseaux comme des parallélépipèdes rectangles, sans tenir compte des rainures et onglets.

Concernant la présence de défauts visuels sur les produits finis, une analyse quantitative a été réalisée dans le but de connaître la proportion de traverses en présentant au moins un. L'analyse a également été faite pour chacun des types de défauts observés, afin d'évaluer leur importance respective.

6.2. Résultats et discussions

6.2.1. Produits obtenus

Au total, 57 barreaux ont été usinés pour donner finalement 80 traverses dorsales inférieures de longueurs diverses et 16 tasseaux de 27 cm (Tableau 16). Le nombre plus élevé de traverses par rapport aux barreaux initiaux se justifie par le tri réalisé avant la mise à longueur. En effet, certaines éprouvettes de grande longueur ont été recoupées pour rectifier leur courbure et ont ainsi permis d'obtenir deux traverses.

Tableau 16 : Nombre de traverses produites et nombre de barreaux de base provenant des cinq arbres.

Arbre d'origine	Nombre de barreaux avant usinage	Nombre final de traverses réalisées
1	3	3
2	6	9
3	5	8
4	23	36
5	20	24

Le tableau ci-après détaille le nombre de traverses fabriquées de chaque longueur standard de la marque Kewlox (Tableau 17).

Tableau 17 : Nombre de traverses produites et longueurs correspondantes.

Longueur (cm)	Nombre
120	10
100	1
90	5
80	8
62	12
52	21
42	10
32	13

6.2.2. Analyse qualitative lors des différentes étapes de l'usinage _ Appréciation de la qualité de transformation par les menuisiers


ETAPE	OBSERVATIONS (AVEC L'AIDE ET L'AVIS DU PERSONNEL)
MATÉRIEL DE BASE	<p>→ Présence de quelques gros nœuds (Figure 31). Cela importe peu étant donné que l'entreprise refuse la présence de ce type de défaut dans son cahier des charges et n'est dès lors pas supposée recevoir du matériel avec des nœuds apparents. Les planches de bouleau ont été purgées de leurs défauts selon ce que le personnel du Laboratoire de Technologie du bois du DEMNA jugeait acceptable. Au sein de l'entreprise Kewlox, ces défauts jugés trop importants sont éliminés.</p>  <p>Figure 31 : type de défauts présent avant l'usinage.</p>
PRÉ-RABOTAGE ET RABOTAGE DÉFINITIF	<p>→ Même texture et apparence de copeaux que le hêtre (Figure 32). Cela démontre la similitude entre les structures anatomiques des deux essences. En effet, le comportement du bois lors du passage dans les machines dépend de cette structure et est, dès lors, identique ici.</p>



Figure 32 : copeaux issus du pré-rabotage. Hêtre à gauche et bouleau à droite.

→ Les grandes longueurs sont souvent cintrées.



Figure 33 : barreaux de bois de bouleau cintré.

→ En sortie de raboteuse, le bois présente parfois des traces de rabotage. C'est également le cas lors du travail du hêtre. Ce type de défaut peut toutefois être évité en adaptant la vitesse de passage du bois dans la machine.

→ Un essai de lubrification avec le produit Waxilit a été réalisé sur une planche de bouleau. En sortie de raboteuse, cette dernière avait un aspect sec, ce qui est différent du hêtre qui, lui, présente un aspect mouillé lorsqu'il est traité avec le même produit. L'absorption du produit est probablement différente entre les deux essences. Une analyse plus poussée serait nécessaire pour déterminer si la lubrification est nécessaire avec le bois de bouleau bien que, à priori, l'usinage de celui-ci ait été qualitatif malgré l'absence de lubrifiant.

**MISE EN
LONGUEUR À
LA
TENONNEUSE**

→ Qualité de découpe identique au hêtre. Le personnel de la menuiserie n'y a pas observé de différence notable.

→ Eclats en sortie sur quelques pièces (Figure 34). Cela se produit également chez le hêtre mais ils disparaissent lors de l'étape finale de découpe des rainures.

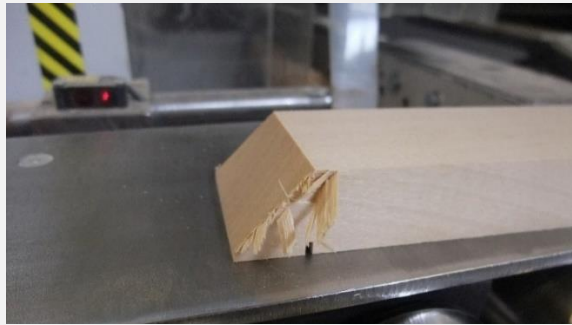


Figure 34 : éclats en sortie de tenonneuse.

**PROFILAGE PAR
MOULURIÈRE
ET PRODUITS
FINIS**

→ Pièces en sortie de moulurière très nettes et sans éclat. Les éclats précédemment observés en sortie de tenonneuse ont disparu et les rainures sont parfaitement découpées (Figure 35).



Figure 35 : pièce en fin de chaîne.

→ Les grandes pièces (1.2m) sont relativement cintrées. Pour rappel, les planches de bouleaux sont issues de dosses en surplus, provenant d'une expérience précédemment réalisée. Leur qualité aurait été améliorée si des billons avaient été sélectionnés et sciés spécifiquement pour ce travail. En effet, la proportion de planches sur quartier et faux quartier aurait pu être plus élevée et limiter ce genre de déformations.

→ Esthétisme différent. Le bois de bouleau est plus clair et plus homogène, ce qui diffère du maillage du hêtre (Figure 36).



Figure 36 : Aspect visuel des deux bois. En haut : bois de hêtre. En bas : bois de bouleau.

MONTAGE D'UN MEUBLE	→ Le montage d'un meuble avec des traverses en bois de bouleau a été concluant. Aucune fissure lors de l'insertion de ces dernières dans les montants métalliques, même avec l'utilisation d'un marteau.
TASSEAUX	→ Quelques éclats mais jugés sans importance et de même type que ceux observés avec la fabrication de tasseaux en hêtre.

6.2.3. Rendement usinage

Le tableau ci-après présente les rendements en centimètres courants pour le matériel issu de chacun des cinq arbres (Tableau 18). Le rendement moyen est calculé par la moyenne des valeurs obtenues pour chacun des cinq arbres. Le rendement total, lui, exprime le rendement pour l'ensemble du bois usiné, sans tenir compte des valeurs propres à chacun des arbres d'origine. Ce dernier est de 85.51%. Il s'agit de la part de la longueur totale des barreaux ayant été transformée en traverses.

Tableau 18 : Rendement en cm courants pour le matériel issu de chaque arbre.

ARBRE	LONGUEUR TOTALE DE BOIS AVANT USINAGE (CM)	LONGUEUR TOTALE DE TRAVERSES APRÈS USINAGE (CM)	RENDEMENT (%)
1	249	194	77.91
2	755	532	70.46
3	593	532	89.71
4	2340	2066	88.29
5	1033	926	89.64
		Rendement moyen :	83.20
		Rendement total :	85.51

A ce rendement s'ajoute les 16 tasseaux usinés de 27cm de long. Deux tasseaux de cette taille sont découpés côte à côte dans une même chute. Le tableau ci-dessous présente le rendement en centimètres courants de tous le matériel usiné, soit traverses et tasseaux (Tableau 19). En tout, 89.86% de la longueur totale du matériel de base ont été usinés. La moyenne entre les cinq arbres est de 88.16%.

Tableau 19 : Rendement total en cm courant, en tenant compte des tasseaux fabriqués à partir des chutes.

ARBRE	LONGUEUR TOTALE DE BOIS AVANT USINAGE (CM)	NOMBRE DE TASSEaux DE 27CM	LONGUEUR DE BOIS USINÉ (CM)	RENDEMENT (%)
1	249	0	194	77.91
2	755	6	613	81.19
3	593	4	586	98.82
4	2340	4	2120	90.60
5	1033	2	953	92.26
			Rendement moyen :	88.16
			Rendement total :	89.86

Le tableau suivant met en évidence le rendement du matériel de chaque arbre ainsi que le rendement total de volume de bois usiné (cm³) (Tableau 20). En tout, 60.20 % du volume de bois au départ ont été transformés en traverses. Le reste se retrouve dans les copeaux et dans les chutes issues de la purge des défauts en début de chaîne.

En ajoutant à cela le volume des tasseaux fabriqués de dimensions 27*1.92*1.92 cm³, le rendement total est de 62.59 %.

Tableau 20 : Rendement en volume de bois usiné en traverses.

ARBRE	VOLUME TOTAL AVANT USINAGE (CM ³)	VOLUME TOTAL DE TRAVERSES APRÈS USINAGE (CM ³)	RENDEMENT (%)
1	3 362	1 833	54.54
2	10 193	5 027	49.32
3	8 006	5 027	62.80
4	31 050	19 524	62.88
5	13 946	8 656	62.07
		Rendement moyen :	58.32
		Rendement total :	60.20

Le rendement calculé ici est supérieur à celui calculé par l'entreprise pour le bois de hêtre, qui est de 40%. De plus, il est sous-estimé pour le bouleau étant donné que les exigences du tri réalisé au sein du Laboratoire de Technologies du Bois sont moins importantes que celles du cahier des charges de l'entreprise pour son bois de hêtre.

Cette différence entre les rendements s'explique par le fait que, parmi 500 bois sciés de hêtre commandés, en moyenne 350 sont utilisées dans toute leur longueur avec un rendement entrée/sortie maximum. Les autres sont recoupées en plus petites dimensions car elles ne présentent pas la qualité souhaitée. Bien que les barreaux de bouleaux aient présentés quelques défauts non acceptables pour l'entreprise, le tri réalisé au préalable a tout de même permis d'obtenir un maximum de bois

suffisamment qualitatifs que pour ne pas subir trop de purges avant l'usinage. Le rendement se voit dès lors maximisé, ce qui n'est pas forcément le cas lors d'un approvisionnement en plus grande quantité où tous les barreaux ne peuvent être analysés en détail avant l'acheminement vers l'entreprise.

6.2.4. Défaits et aspect visuel des pièces usinées

L'observation des traverses fabriquées en bois de bouleau a mis en évidence la présence des défauts suivants :

- Nœuds.
- Taches médullaires.
- Contrefils.

Les **nœuds** visibles avant les opérations de transformation, de grosses dimensions et/ou particulièrement foncés, ont été purgés. N'en sont dès lors ressortis que quelques nœuds de faible dimension et rarement présents en plus d'une unité sur une même traverse (Figure 37). Le problème potentiel le plus important concerne le risque d'arrachement des portes si les nœuds sont présents dans les rainures (Figure 38).

L'entreprise accorde beaucoup d'importance à l'homogénéité de ses pièces en bois, d'où la réticence face à ce genre de défaut. Bien qu'ils soient discrets, il vaut mieux que leur présence soit évitée. Leur occurrence peut être nettement réduite par une sylviculture adaptée.



Figure 37 : Type de nœud observé sur les produits finis.



Figure 38 : Nœud présent au niveau d'une rainure.

Les **taches médullaires** apparaissent en groupe de plusieurs taches quand elles sont présentes. Cependant, elles sont relativement discrètes et leur occurrence se voit réduite dans le cas de l'utilisation d'un matériel issu de bouleaux de circonférences plus importantes, occasionnant un meilleur rendement au sciage (Figure 39).



Figure 39 : types de nœud et taches médullaires observés sur les produits finis.

Le **contrefil** résulte de l'orientation oblique du trait de scie ou du tranchant des couteaux par rapport au fil du bois aligné longitudinalement, ce qui impacte l'état de surface du bois. Le changement de direction du fil est souvent dû à la présence d'un nœud. Seules deux traverses présentent ce défaut visuel sur leur face visible (Figure 40). La majorité de ces arrachements du fil se trouvent dans les rainures des côtés, non visibles une fois le meuble monté et, dès lors, n'impactant pas l'aspect esthétique du produit (Figure 41).



Figure 40 : Aspect de surface du bois dû au contrefil.



Figure 41 : Contrefil dans rainure de traverse.

Le tableau ci-après donne les pourcentages pour chaque provenance (arbre d'origine) de traverses présentant au moins un défaut parmi ceux énoncés ci-dessus (Tableau 21). Les barreaux de l'arbre n°3 sont ceux ayant donné la plus grande proportion de traverses avec défauts. Ceux-ci sont représentés par des nœuds, des taches médullaires et des contrefils, soient les trois défauts décrits précédemment.

Parmi la totalité des traverses fabriquées, 57.50 % présentent des défauts d'aspect visuel. La moyenne de 66.39 % entre les cinq arbres est influencée par les proportions de traverses défectueuses des arbres 1, 2 et 3 qui sont plus importantes que pour les arbres 4 et 5.

Tableau 21 : Part de traverses avec au moins un défaut pour chaque arbre d'origine.

ARBRE	NOMBRE DE TRAVERSES	NOMBRE DE TRAVERSES AVEC AU MOINS UN DÉFAUT	POURCENTAGE DE TRAVERSES AVEC AU MOINS UN DÉFAUT (%)
1	3	2	66.67
2	9	7	77.78
3	8	7	87.50
4	36	18	50.00
5	24	12	50.00
		Moyenne	66.39
TOTAL	80	46	57.50

Une analyse de la variance à un critère de classification a été réalisée afin de mettre en avant une éventuelle influence significative du facteur considéré sur la présence ou l'absence de défaut (Figure 42). Ce critère correspond à l'arbre d'origine qui est un facteur fixe. La p-valeur obtenue est de 0.832, ce qui signifie que l'hypothèse d'égalité des moyennes ne peut être rejetée et que l'effet du facteur « arbre » sur la présence de défaut ne peut être mis en évidence. L'origine des planches n'a pas d'impact sur la proportion de défauts. Ce résultat n'est pas surprenant car les défauts les plus importants ont été éliminés préalablement, donnant un matériel de qualité comparable.

Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
arbre	4	0.2036	0.05089	0.36	0.832
Erreur	23	3.2250	0.14022		
Total	27	3.4286			

Figure 42 : résultats analyse de la variance à un critère de classification.

Afin de relier le nombre et le type de défauts à l'emplacement de la planche dont proviennent les barreaux, les données récoltées pour chacune des traverses ont été rassemblées par planche d'origine grâce au code de traçabilité. Pour rappel, ces planches sont au nombre de 28. Les traverses présentant au moins un défaut visuel sont issues de 24 de celles-ci, ce qui équivaut à une proportion de 85.71 %.

Le tableau ci-dessous indique les proportions de planches en fonction du type de défaut, d'une part, parmi l'ensemble des 28 planches et, d'autre part, parmi les 24 planches avec défauts (Tableau 22). Cela met en évidence l'importance des taches médullaires qui sont observables sur 54.17% de ces dernières. La présence de contrefil concerne la moitié des 24 planches, alors que les nœuds sont présents sur 41.67% de celles-ci.

Tableau 22 : Proportion des planches présentant un ou plusieurs type(s) de défaut(s), par rapport à l'ensemble des planches et par rapport aux planches avec au moins un défaut.

Défaut(s)	Proportion parmi la totalité des planches (%)	Proportion parmi les 24 planches avec défaut(s) (%)
Taches médullaires	21.43	25.00
Contrefil	17.86	20.83
Nœuds	10.71	12.50
Taches médullaires + nœuds	10.71	12.50
Taches médullaires + contrefil	10.71	12.50
Nœuds + contrefil	10.71	12.50
Les 3	3.57	4.17
Total (%)	85.71	100.00

La majorité (57.14%) des planches est située à proximité de l'écorce. Le reste est réparti équitablement entre la zone la plus proche du cœur, et la zone entre les deux. Une analyse de la variance a également été réalisée afin de définir l'effet du facteur « position » sur la présence de défauts (Figure 43). La p-

valeur de 0.014, inférieure au seuil de signification $\alpha = 0.05$, indique le rejet de l'hypothèse nulle de l'analyse qui suppose une égalité des moyennes.

La structuration de celles-ci indique que les planches provenant de la zone à proximité du cœur (position « B ») sont significativement différentes de celles situées près de l'écorce ou entre les deux (positions « A » et « C » respectivement) (Figure 44). Au vu des moyennes, les défauts à proximité du cœur sont dès lors significativement moins nombreux. Cela s'explique notamment par l'absence totale de nœud dans cette zone.

Analyse de la variance

Source	DL	SomCar	ajust	CM	ajust	Valeur F	Valeur de p
Position	2	0.9911	0.49554	5.08		0.014	
Erreur	25	2.4375	0.09750				
Total	27	3.4286					

Figure 43 : Résultats analyse de la variance à un critère de classification.

Position	N	Moyenne	Groupement
C	6	1.000	A
A	16	0.9375	A
B	6	0.500	B

Figure 44 : Résultat de la structuration des moyennes.

L'analyse par type de défauts, indépendamment les uns des autres, n'a pas permis de mettre en évidence des différences significatives entre les moyennes. En effet, les p-valeurs obtenues sont supérieures au seuil de signification de 0.05 (Tableau 23). Ce qui équivaut à conclure que le type de défaut, contrairement à leur simple présence, n'est pas influencé ici par la position de la planche d'origine au sein de l'arbre. Pourtant, les taches médullaires sont supposées être davantage observées dans les planches provenant des zones proches du cœur de l'arbre. Or, beaucoup d'entre-elles sont issues des zones plus proches de l'écorce et entre les deux. Cela s'explique par le fait que les planches en question proviennent des arbres les plus jeunes.

Tableau 23 : Résultats analyses de la variance à un critère de classification.

TYPE DE DÉFAUT	P-VALEUR
TACHES MÉDULLAIRES	0.495
NŒUDS	0.123
CONTREFIL	0.234

7. Conclusion et perspectives

Ce travail a démontré par divers aspects le potentiel du bouleau et de son bois pour remplacer le hêtre dans la production des meubles Kewlox dans le contexte du changement climatique, si cela devait s'avérer nécessaire dans les années futures.

Les essais d'usinage au sein de la menuiserie de l'entreprise ont été concluants, donnant des produits qualitatifs. Les défauts résultants des diverses étapes de transformation, que ce soient des éclats, des traces de rabotages, etc., sont, d'après les menuisiers de l'entreprise, comparables à ceux perçus avec le bois de hêtre. Et ce, tant en termes d'occurrence que de type de défauts. L'usinage des deux essences est donc similaire pour la confection des produits de l'entreprise Kewlox et ne constitue pas une limite dans le potentiel remplacement du hêtre.

En tout, 60.20 % du volume total du bois de bouleau ont été transformés en traverses. Ce qui représente un rendement relativement important. Les 40 autres pourcents se retrouvent dans les copeaux et dans les quelques chutes issues de la purge de défauts avant rabotage. Certaines de ces dernières ayant été utilisées pour la fabrication de tasseaux, ce rendement est sous-estimé. De plus, le cahier des charges de l'entreprise Kewlox est plus exigeant que le tri des barreaux de bouleau effectué au Laboratoire de Technologie du bois du DEMNA, ce qui contribue également à la sous-estimation du rendement calculé.

L'appréciation des produits finis en bouleau fut également concluante bien que l'aspect visuel diffère de ce que la marque propose actuellement. En effet, la couleur de ce bois est très claire et présente des nuances et brillances qui n'apparaissent pas sur le bois de hêtre. Ce dernier, souvent plus rosé, possède une maille particulière due à ses rayons médullaires plus gros donnant un rendu proche, mais toutefois différent entre les deux essences. Le bouleau est très esthétique et en phase avec la tendance actuelle. Une des inconnues de ce travail est la réceptivité du public dans les années futures.

Les traverses fabriquées sont de qualité et présentent très peu de défauts esthétiques pouvant occasionner leur exclusion des ventes. Les nœuds, taches médullaires et contrefils, sont pourtant présents sur plus de la moitié des produits, soit sur 46 traverses. Cependant, par leur discrétion, la majorité de ces défauts n'occasionnent pas un déclassement des produits en fin de chaîne. En effet, et malgré le fait qu'il s'agit du défaut le plus communément observé sur les traverses fabriquées, seule une traverse sur 80 présente des taches médullaires peu discrètes et en nombre important. Deux de plus présentent du contrefil sur la partie visible de la traverse, ce qui impacte l'état de surface et l'aspect visuel de la traverse. Ce défaut est probablement le plus gênant s'il est présent car relativement visible, donnant un aspect pelucheux et déchiré au bois. Concernant les nœuds, leur nombre se verrait largement réduit si le matériel provenait d'arbre ayant été géré par une sylviculture adaptée. Il est important de préciser ici que le matériel utilisé par défaut dans ce travail n'est pas des plus qualitatifs. Des sciages de qualité supérieure auraient présentés beaucoup moins de défauts de ce type.

L'usinabilité et la qualité des produits finis ayant été validées, la principale limite réside en l'obtention de grumes de bouleau qualitatives, de dimensions adéquates et disponibles en quantité suffisante. En effet, les scieurs critiquent la qualité actuelle de la majorité des grumes ainsi que leur faible nombre et les effectifs fluctuants. Le bouleau est une essence actuellement peu représentée sur le marché belge. En effet, seul 8%, en moyenne, des lots vendus par le DNF durant ces quatre dernières années contiennent au moins un bouleau. Parmi ces derniers, 9% sont composés de plus de 80% de l'essence

en volume. Finalement, un tiers du volume de bouleau vendu entre dans la catégorie des bois sciabls. Cependant, l'entreprise Kewlox n'a besoin que d'une faible quantité de bois sciés pour subvenir à ses besoins annuels. Pour rappel, l'approvisionnement se fait à raison de 300 à 400 m³ par an environs. En considérant un rendement au sciage de 40%, la disponibilité actuelle du bouleau sur le marché semble suffisante pour permettre à l'entreprise de s'approvisionner.

Pour ce qui est de la qualité, une sylviculture adéquate permet d'obtenir des grumes qualitatives dans un délais relativement court. Celle-ci s'envisage de plus en plus chez les gestionnaires et principalement les propriétaires privés. Les quelques scieries belges ayant déjà été témoins de la qualité d'une belle grume de bouleau sont très ouvertes à l'idée de valoriser davantage l'essence s'ils arrivent à se procurer des quantités suffisantes de lots qualitatifs.

Actuellement, le prix du bois de bouleau est relativement faible par rapport à celui du hêtre. En effet, il est en moyenne, et selon l'analyse des ventes des quatre dernières années, de 14,5% du m³ contre 68,5% pour le hêtre. Cela s'explique, outre par la qualité, par la faible demande actuelle. Ce prix risque toutefois d'augmenter avec le développement futur du marché mais ne dépassera probablement pas celui du hêtre si la ressource est suffisante.

Concernant cette ressource, les données récoltées par l'IPRFW démontrent que la ressource actuelle est en augmentation et que celle-ci est sous-estimée par la durée du cycle de mesures. Dans les années futures, il est évident que la ressource continuera à croître en Région wallonne. De fait, le bouleau s'établi très facilement et dans de nombreuses conditions stationnelles grâce à ses caractéristiques écologiques. Il est un très bon candidat pour s'intégrer dans les peuplements actuels.

Le futur du bouleau dépend également des débouchés et de la demande du grand public qui soutiendraient la ressource à long terme. La promotion du bouleau passe notamment par les architectes. Actuellement ils sont peu nombreux à proposer le bouleau pour l'ameublement et la construction. Les personnes préférant cette option viennent généralement du milieu forestier et connaissent dès lors déjà ses excellentes propriétés esthétiques et physico-mécaniques. Cependant pour que le bouleau se fasse connaître à plus grande échelle, il semblerait judicieux de le promouvoir auprès des architectes et entreprises spécialisées qui pourront les intégrer dans leurs projets. Ce n'est actuellement pas encore fait, mais il s'agit d'une piste à approfondir.

L'avenir du bouleau se base sur une série d'hypothèses. Si elles sont vérifiées, l'essence se verra réellement intégrer à part entière la filière bois future en Belgique. Bien qu'elles soient raisonnables et que la tendance montre une augmentation de la ressource, il reste une incertitude. La ressource future dépend de nombreux facteurs et de l'intervention de beaucoup d'acteurs. Cependant, l'optimisme est de mise et est renforcé par le nombre grandissant de travaux et d'études réalisées actuellement sur le bouleau qui donneront les clés nécessaires aux différents acteurs de la filière pour permettre l'expansion de la ressource et de la valorisation de l'essence.

Une des perspectives serait de s'intéresser davantage aux bois nordiques dans le cas où la ressource belge ne suffirait pas à satisfaire les besoins de l'entreprise. Les pays du Nord de l'Europe possèdent une bonne connaissance du bouleau, de sa sylviculture et de ses débouchés, produisant de la sorte des grumes de qualité et, dès lors, des planches qualitatives et en nombre important.

Pour l'instant, l'approvisionnement en hêtre reste satisfaisant malgré les aléas sanitaires dont l'essence est victime. A court terme, l'entreprise ne souhaite pas modifier ses habitudes car l'introduction d'une autre essence nécessiterait un remaniement complet de leur organisation, tant au niveau de l'approvisionnement que de la commercialisation. L'entreprise Kewlox connaît toutefois dès à présent une alternative pour le futur si le hêtre venait à manquer.

8. Références bibliographiques

Normes :

Bureau de Normalisation (NBN). *Bois – détermination de l'humidité en vue des essais physiques et mécaniques*. ISO 3130, 1992.

Bureau de Normalisation (NBN). *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois*. EN 350, 2016, 67 p.

Bureau de Normalisation (NBN). *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*. EN 335, 2013, 14 p.

Ouvrages de références :

Panshin, A.I., De Zeeuw, C. [1980]. *Textbook of wood technology: structure identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada*. New York, Etats-Unis, 722 p.

Vittone, R. [2010]. *Bâtir, manuel de construction*. Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1016 p.

Wagenführ, R., Scheiber, C. [1985]. *Holzatlas*. Leipzig, Allemagne, 816 p.

Walker, J.C.F. [2006]. *Primary Wood Processing : Principles and Practice*. Londres, Royaume-Unis, 595 p.

Articles :

Dubois, H. & Latte, N. [2016]. Les peuplements à bouleau en forêt wallonne : reflet de la sylviculture du 20e siècle. *Forêt Nature*, 140, pp. 44-58.

Dubois, H. & Latte, N. [2017]. Le bouleau, une essence qui s'impose. Description de la ressource dans son aire de répartition. *Forêt Nature*, 142, pp. 56-66.

Dubois, H., Verkasalo, E. & Claessens, H. [2020]. Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests*, 11, pp. 1-26.

Hynynen, J., Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Brunner, A., Hein, S. & Velling, P. [2010]. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry*, 83(1), pp. 103-119.

Landmann, G., Dupouey, J-L., Badeau, V., Lefevre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L-M., Chuine, I. & Lebourgeois, F. [2008]. Le hêtre face aux changements climatiques : Connaître les points faibles du hêtre pour mieux les surmonter. *Forêt-entreprise*, 182, pp. 30-34.

- Luostarinen, K. & Luostarinen, J. [2001]. Discolouration and deformations of birch parquet boards during conventional drying. *Wood Science and Technology*, 35, pp. 517-528.
- Luostarinen, K. & Verkasalo, E. [2000]. Birch As Sawn Timber and in Mechanical Further Processing in Finland. A Literature Study. *Silva Fennica Monographs*, 1, pp. 1-38.
- Phelps, J.E., McGinnes, E.A., Garret, H.E. & Cox, G.S. [1983]. Growth quality evaluation of black walnut wood. II. Color analyses of veneer produced on different sites. *Wood and Fiber Science*, 15(2), pp. 177-185.
- Ranta, H., Hokkanen, T., Linkosalo, T., Laukkanen, L., Bondestam, K., Oksanen, A. [2008]. Male flowering of birch: Spatial synchronization, year-to-year variation and relation of catkin numbers and airborne pollen counts. *Forest Ecology & Management*, 255(3-4), pp. 643–650.
- Rink, G. & Phelps, J.E. [1989]. Variation in heartwood and sapwood properties among 10-year old black walnut trees. *Wood and Fiber Science*, 21(2), pp. 177-182.
- Rosenvald, K., Tullus, A., Ostonen, I., Uri, V., Kupper, P., Aosaar, J., Varik, M., Söber, J., Niglas, A., Hansen, R., Rohula, G., Kukk, M., Söber, A., Lõhmus, K. [2014]. The effect of elevated air humidity on young silver birch and hybrid aspen biomass allocation and accumulation – Acclimation mechanisms and capacity. *Forest Ecology & Management*, 330, pp. 252–260.
- Teng, F. & Chandelier, A. [2018]. Dépérissement du hêtre en Ardenne : étude des aspects phytosanitaires. *La lettre d'info de l'OWSF*, 6, pp. 22-23.

Thèses et mémoires :

- Boedts, M. [2016]. *Effet du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du bouleau*. Université de Gembloux Agro Bio-Tech, Belgique.
- Clair, B. [2001]. *Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse*. Ecole Nationale du Génie Rural, des eaux et forêts, Montpellier, France.
- Giroud, G. [2005]. *Caractérisation de la proportion de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier (Betula papyrifera marsh.)*. Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec.
- Latte, N. [2017]. *Comment le changement climatique influence-t-il la croissance du hêtre (Fagus sylvatica L.) le long du gradient bioclimatique de la Belgique ? Une approche dendroécologique*. Université de Gembloux Agro Bio-Tech, Belgique.
- Möttönen, V., [2005]. *Variation of colour and selected physical and mechanical properties related to artificial drying of sawn silver birch (Betula pendula Roth) timber from plantations*. University of Joensuu, Finlande.
- Trubins, R. [2009]. *Introduction of GIS into IKEA's wood sourcing system. Aspects of forest resource data availability and system functionality*. Southern Swedish Forest Research Centre, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.

Sites web :

Barrere, P. [2020]. *MONTAGNES - Le milieu montagnard*, Encyclopædia Universalis. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/montagnes-le-milieu-montagnard/>. (Consulté le 15-06-2020)

Bois local, [2020]. *Les garanties de la marque*. <https://www.boislocal.be/fr/>. (Consulté le 12-05-2020).

Bois passion et cie, [2020]. *Questions du bricoleur*. <https://www.boispassionsetcie.com/fr/questions-bricoleur/pourquoi-a-t-il-des-marques-de-brulure-sur-le-bois-lors-de-coupes>. (Consulté le 19-06-2020).

Dufrêne, M. et Delescaille, L.M. [2005]. *La typologie WalEUNIS des biotopes wallons, version 1.0*. <http://biodiversite.wallonie.be>. (Consulté le 12-06-2020).

Editions Eyrolles, [2020]. *Le dictionnaire professionnel du BTP*. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=3001>. (Consulté le 18-04-2020).

Fédération Nationale du Bois (FNB), [2018]. *Fiche comprendre le retrait du bois*. https://www.bois-de-france.org/wp-content/uploads/2019/03/FichesC13-LRDB_6pages.pdf. (Consulté le 21-07-2020).

Hoebeek-Passion for wood since 1904, [2020]. *Hêtre*. <http://fr.hoebeek.be/wood/55>. (Consulté le 15-02-2020).

IPRF Wallonie, [2020]. *Bases méthodologiques*. http://iprfw.spw.wallonie.be/base_methode.php. (Consulté le 06-05-2020).

IPRF Wallonie, [2020]. *La forêt wallonne en quelques chiffres au cycle 1*. <http://iprfw.spw.wallonie.be/cy1-chiffres.php#:~:text=Les%20surfaces%20foresti%C3%A8res,qui%20repr%C3%A9sente%2033%20%25%20du%20territoire>. (Consulté le 21-06-2020).

Lignum, Economie Suisse du bois. [2010]. *Propriétés mécaniques du bois*. https://www.lignum.ch/files/_migrated/content_uploads/Propri%C3%A9t%C3%A9s_m%C3%A9caniques_du_bois_01.pdf. (Consulté le 15-04-2020).

Perone, J. [2017]. *Birch Wood: Types & Uses*. <https://study.com/academy/lesson/birch-wood-types-uses.html>. (Consulté le 20-05-2020).

Autres :

Accord Cadre de Recherche et de Vulgarisation forestières [2017]. *Le Fichier Écologique des Essences* Seconde édition, Forêt Nature.

Bays, E. [2019]. *Baromètre économique, Le point sur les ventes d'automne de bois sur pied en forêts publiques*. Prix des bois, édition spéciale 2019. 11p.

Boldrini, S., [2011]. *Le secteur du sciage en Belgique : besoins en matière première et production*. Bruxelles : Fédération Nationale des Scieries. 36 p.

Houters, B., Frère, H., [2017]. *Le secteur du sciage : Etat du secteur du sciage en Wallonie en 2017*. 22 p.

Rondeux, J., Lecomte, H. [2010]. *Inventaire permanent des Ressources Forestières de Wallonie (IPRFW) - Guide méthodologique*. DGO3 – Département de la Nature et des Forêts, Jambes, Belgique, 163 p.

Office économique wallon du bois, [2019]. *PanoraBois Wallonie*, édition 2019.

