LIÈGE université Library

https://lib.uliege.be

https://matheo.uliege.be

Travail de fin d'études en gestion des forêts et des espaces naturels : Collage multi-essences de feuillus « d'avenir » à destination de fabrication de poutre structurelle en bois lamellé-collé.

Auteur : Chiavetta, Ugo
Promoteur(s) : De Mil, Tom; Mortelmans, Tom
Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)
Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée
Année académique : 2025-2026
URI/URL : http://hdl.handle.net/2268.2/27663

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.

LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech

RTFE2009-1

Collage multi-essences de feuillus « d'avenir » à destination de fabrication de poutre structurelle en bois lamellé-collé

UGO CHIAVETTA

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

CO-PROMOTEURS : PR. TOM DE MIL & IR. TOM MORTELMANS

JURY : PROF. AVEZ CORALIE
PROF. DUCHÊNE LAURENT
PROF. RONDEAUX JEAN-FRANÇOIS

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

Le présent document n'engage que son auteur.

LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech

Collage multi-essences de feuillus « d'avenir » à destination de fabrication de poutre structurelle en bois lamellé-collé

UGO CHIAVETTA

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

CO-PROMOTEURS : PR. TOM DE MIL ET IR. TOM MORTELMANS

JURY : PR. AVEZ CORALIE
PR. DUCHÊNE LAURENT
PR. RONDEAUX JEAN-FRANÇOIS

Remerciements

Avant toutes choses, je me dois de remercier chaleureusement ma famille, sans qui mon cheminement au travers de ces vieux murs de Gembloux n'aurait pas été possible. J'exprime également une profonde reconnaissance envers Tom Mortelmans, qui, par son œil avisé et son omniprésence tout au long de ces derniers mois, nous a permis, à mes collègues Samuel Konsdorff, Timon Luizi et moi-même, d'entreprendre nos travaux dans les conditions les plus favorables. Je suis d'ailleurs ravi d'avoir fait partie de cette belle équipe, dont les rouages bien huilés ont contribué à l'abord de cette épreuve avec légèreté et spontanéité. Dans le même temps, je remercie sincèrement tout le corps professoral qui constitue mon encadrement pédagogique : messieurs De Mil Tom, Duchêne Laurent, Rondeaux Jean-François et madame Avez Coralie. Leur disponibilité, ainsi que leur supervision et réactivité, ont conduit au dénouement de nombreux problèmes tout au long de ce mémoire. Merci à toute l'équipe du Laboratoire de Technologie du Bois, Yannick Delzant, Anne Bauvin, Cécilé Verheyen et Jean-Marc Henin pour leur dévouement et leur précieux conseils. Ils nous ont éveillé sur de nombreux plans. Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans l'aide incommensurable de l'équipe de la Faculté Polytechnique de Mons. Je pense particulièrement à monsieur Baele Michael dont la clairvoyance, la détermination et l'endurance sont à toute épreuve. Je n'oublie pas le soutien indéfectible de messieurs Randazzo Alessandro, Duyck Arthur et Descamps Thierry. Merci également à toute l'équipe de recherche sur le chêne rouge de la Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen pour nos échanges fructueux : Wieland Stefanie, Jansen Tom et Norda Dennis. Merci aux propriétaires forestiers membres de la SRFB qui ont assuré notre approvisionnement en matière première. Merci pour votre attention et votre intérêt lors de notre journée de rencontre en vue de la présentation de nos projets respectifs. Merci à Massif Ardennes et Copains des bois pour leur expertise et leur engagement tout au long du projet.

Financements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Interreg Grande Région W.A.V.E. (Wood Added Value Enabler), cofinancé par l'Union européenne via le Fonds européen de développement régional (FEDER).

Collaborations

Ce travail est le fruit de collaborations avec la Société Royale Forestière de Belgique (SRFB), les entreprises Massif Ardennes et Copains des Bois, le Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W), la Faculté Polytechnique de Mons ainsi que le Centre de recherche AZH Simmerath de l'université d'Aachen.

Résumé

Face aux crises sanitaires touchant les essences résineuses (*e.g. Picea abies)* actuellement dominantes en construction et aux incertitudes posées par le changement climatique, la valorisation d'essences feuillues « de l'avenir » en bois lamellé-collé (BLC) constitue un enjeu majeur pour la résilience de la filière bois. Ce mémoire, réalisé dans le cadre du projet Interreg Grande Région W.A.V.E., vise à identifier les composants - essences et adhésif - permettant de concevoir une poutre en BLC mixte associant une essence de fibre extrême performante en flexion, une essence de remplissage légère, et l'adhésif présentant la meilleure résistance en cisaillement. Quatre essences feuillues dont les performances mécaniques sont encore peu documentées pour un usage structurel ont été étudiées : le bouleau, le chêne rouge d'Amérique, le peuplier tremble et l'aulne glutineux, soit respectivement *Betula* spp., *Quercus rubra*, *Populus tremula* et *Alnus glutinosa*.

Les planches ont été caractérisées physiquement (taux d'humidité, masse volumique, stabilité dimensionnelle) puis mécaniquement en flexion 4 points sur bois massif et bois abouté (module local d'élasticité et résistance à la flexion axiale, EN 408), tandis que quatre adhésifs (deux polyuréthanes et deux mélamine-urée-formaldéhyde, à deux grammages) ont été comparés en cisaillement de joints collés (EN 14080 - Annexe D). *Betula* spp. et *Quercus rubra* présentent les propriétés mécaniques les plus élevées et les plus cohérentes entre elles ; *Populus tremula*, la moins dense, conserve des propriétés mécaniques suffisantes et bien corrélées ; *Alnus glutinosa* se distingue par les valeurs les plus faibles et une absence de corrélation entre rigidité et résistance, liée à l'origine géographique unique et au manque d'accompagnement sylvicole sur les individus qui constituent l'échantillon. Les adhésifs MUF à 500 g/m² se sont révélés systématiquement supérieurs aux PUR en cisaillement, avec un taux de rupture dans le bois élevé, et ont été retenus pour l'aboutage. L'aboutage conserve le module d'élasticité mais réduit fortement la résistance en flexion des quatre essences, un effet expliqué en discussion par la concentration de contraintes au niveau du plan de l'enture en fibre extrême tendue.

Ces résultats désignent *Quercus rubra* et *Betula* spp. comme candidates privilégiées pour la fibre extrême, *Populus tremula* pour l'âme de la poutre, et l'adhésif MUF pour l'assemblage - la position d'*Alnus glutinosa* restant à confirmer sur un échantillon plus représentatif. Les essais de cisaillement du bois massif, l'évaluation en délamination et le test de la poutre finale complète, non réalisés faute de temps, sont reportés à la thèse doctorale dans laquelle s'inscrit ce travail.

Abstract

Facing the health crises affecting the softwood species currently dominant in construction, together with the uncertainties raised by climate change, the valorisation of "future" hardwood species in glued laminated timber (glulam) constitutes a major challenge for the resilience of the wood industry. This thesis, carried out within the framework of the Interreg Grande Région W.A.V.E. project, aims to identify the components - species and adhesive - needed to design a hybrid glulam beam combining an outer-lamella species with strong bending performance, a lightweight core species, and the adhesive offering the best shear resistance. Four hardwood species still poorly documented for structural use were studied: *Betula* spp., *Quercus rubra*, *Populus tremula* and *Alnus glutinosa*.

Boards were physically characterised (moisture content, density, dimensional stability) and then mechanically tested in four-point bending on solid and finger-jointed wood (local modulus of elasticity and axial bending strength, EN 408), while four adhesives (two polyurethanes and two melamine-urea-formaldehyde, at two spread rates) were compared in glued-joint shear (EN 14080 - Annex D). *Betula* spp. and *Quercus rubra* showed the highest and most internally consistent mechanical properties; *Populus tremula*, the least dense species, retained sufficient and well-correlated mechanical properties; *Alnus glutinosa* stood out with the lowest values and a complete lack of correlation between stiffness and strength, linked to the single geographic origin and the lack of silvicultural follow-up of the individuals making up the sample. MUF adhesives at 500 g/m² consistently outperformed PUR adhesives in shear, with a high rate of wood failure, and were selected for the finger joints. Finger-jointing preserved the modulus of elasticity but markedly reduced the bending strength of all four species, an effect explained in the discussion by the concentration of stresses at the finger-joint plane on the tensioned outer fibre.

These results identify *Quercus rubra* and *Betula* spp. as the preferred candidates for the outer lamellae, *Populus tremula* for the beam core, and MUF as the adhesive of choice — while the suitability of *Alnus glutinosa* remains to be confirmed on a more representative sample. Solid-wood shear testing, delamination assessment, and full-scale final beam testing, which could not be carried out for lack of time, are deferred to the doctoral thesis in which this work is embedded.

Table des matières

Remerciements i
Financements i
Collaborations i
Résumé ii
Abstract iii
Table des matières iv
Liste des symboles vi
Liste des abréviations vii
Liste des équations viii
Liste des tableaux ix
Liste des figures x
Liste des annexes xiii
1. Introduction 1
1.1. Historique de la construction structurelle en bois 1
1.2. Historique de la ressource forestière wallonne 2
1.3. L'importance de la compatibilité entre l'essence et la station 3
1.4. La ressource bois wallonne face au changement climatique 4
1.5. Les facteurs aggravants du changement climatique 4
1.6. L'exploitation de la ressource bois 5
1.7. L'utilisation de la ressource bois 6
1.8. Le marché public du bois en Wallonie 7
1.9. La nécessité d'adaptation 7
1.10. La construction bois en Belgique 8
1.11. L'innovation des produits d'ingénierie du bois - focus sur le lamellé-collé 9
1.12. Objectifs du mémoire 15
1.12.1. Objectif principal 15
1.12.2. Sous-objectifs 15
2. Matériels et Méthodes 16
2.1. Caractérisation physique 19
2.1.1. Taux d'humidité - ISO 13061-1:2023 19
2.1.2. Masse volumique - ISO 13061-2:2023 19
2.1.3. Stabilité dimensionnelle - ISO 13061-13:2024 20
2.2. Caractérisation mécanique 22
2.2.1. Module local d'élasticité en flexion - EN 408 § 9:2012 22
2.2.2. Résistance à la flexion axiale - EN 408 § 9:2012 26
2.2.3. Résistance au cisaillement des joints de collage - l'EN 14080:2013 – Annexe D 28
2.3. Traitement de données et analyses statistiques 31

3. Résultats 31
3.1. Caractérisation physique 32
3.1.1. Taux d'humidité des planches séchées à l'air libre en atelier 32
3.1.2. Masse volumique 32
3.1.3. Stabilité dimensionnelle 32
3.2. Caractérisation mécanique 35
Module local d'élasticité en flexion des bois massifs 35
3.2.1. 35
3.2.2. Module local d'élasticité en flexion des bois aboutés 38
3.2.3. Comparaison du module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et bois abouté 39
Résistance à la flexion axiale 41
3.2.4. 41
Résistance à la flexion axiale des bois aboutés 42
3.2.5. 42
3.2.6. Comparaison de la résistance à la flexion axiale des essences en bois massif et abouté 43
..... 44
Résistance en cisaillement des joints de collages 44
3.2.7. 44
4. Discussion 46
4.1. Stabilité dimensionnelle 46
4.2. Flexion des bois massif 47
4.3. Flexion des bois aboutés 48
4.4. Comparaison bois massifs - bois aboutés 50
4.5. Cisaillement des joints de collage 51
5. 54
Contribution personnelle 54
6. Conclusion 56
6.1. Limites et perspectives 57
Limites 57
7. Bibliographie 60
8. Annexes 67

Liste des symboles

W : Taux d'humidité [%]

m1, m2 : Masse initiale / anhydre de l'éprouvette [g]

ρ_W : Masse volumique à l'humidité W [kg.m^{-3}]

$m_{W,}$ mu : Masse de l'éprouvette à l'humidité W/u [kg]

vw : Volume à l'humidité W [m³]

βr, βt, β_V : Retrait radial, tangentiel, volumique [%]

lr1, lr2, lt1, lt2 : Dimensions radiales/tangentielles avant/après séchage [mm]

Em,l : Module local d'élasticité en flexion [N.mm^{-2}]

E0, E0,u : Module d'élasticité corrigé / mesuré à u [N.mm^{-2}]

h, b : Hauteur, largeur de la section [mm]

w, w1, w2, w3 : Flèche, déplacements aux 3 LVDT [mm]

k, R : Courbure, rayon de courbure - / mm

M : Moment fléchissant [N.mm]

I : Moment quadratique d'inertie [mm⁴]

a : Distance appui-charge [mm]

o1 : Distance entre LVDT latéraux [mm]

F1, F2, Fmax, Fu : Forces (0,1·Fmax, 0,4·Fmax, max, ultime) [N]

f_m : Résistance à la flexion axiale [N.mm^{-2}]

*f*v : Résistance au cisaillement du joint de colle [N.mm^{-2}]

kv : Facteur de correction du cisaillement (= 0,978)

t, A : Épaisseur, aire de la section cisaillée [mm] / [mm²]

u, uref : Taux d'humidité, humidité de référence (12%) [%]

α / θ : Angle de l'enture [°]

Liste des abréviations

ISO : International Organization for Standardization

EN / NBN : Norme européenne / Bureau de Normalisation belge

CEN : Comité Européen de Normalisation

LVDT : Linear Variable Differential Transformer

PUR (PUR1, PUR2) : Polyuréthane (colles testées)

MUF (MUF1, MUF2) : Mélamine-urée-formaldéhyde (colle M0, durcisseurs M1/M2)

BLC : Bois lamellé-collé

CLT : Cross Laminated Timber

LTB : Laboratoire de Technologie du Bois (CRA-W)

CRA-W : Centre wallon de Recherches agronomiques

SRFB : Société Royale Forestière de Belgique

W.A.V.E. : Wood Added Value Enabler (projet Interreg)

GLTA : Glued Laminated Timber Association

ANOVA : Analysis of Variance

FEDER : Fonds européen de développement régional

Liste des équations

Équation 1 : Formule du taux d’humidité

Équation 2 : Formule de la masse volumique

Équations 3, 4 et 5 : Formules du retrait radial, tangentiel et volumique

Équation 6 : Relation fondamentale de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli

Équation 7 : Formule de détermination de la flèche en flexion pure

Équation 8 : Formule du module local d’élasticité en flexion

Équation 9 : Formule de la résistance à la flexion axiale

Équation 10 : Formule de la résistance au cisaillement des joints de collage

Liste des tableaux

Tableau 1 : Critères de choix des essences étudiées

Tableau 2 : Plan matière

Tableau 3 : Processus expérimental du mémoire

Tableau 4 : Moyennes et écart-types des masses volumiques à 12% expérimentales et issues de la littérature par essence

Tableau 5 : Moyennes et écart-types des retraits radiaux, tangentiels et volumiques expérimentaux par essence

Tableau 6 : Module local d'élasticité en flexion expérimental et issu de la littérature par essence

Tableau 7 : Masses volumiques des essences lors des essais de flexion

Tableau 8 : Taux d'humidité des essences lors des essais de flexion

Tableau 9 : Module local d'élasticité en flexion expérimental des essences aboutées

Tableau 10 : Module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et abouté

Tableau 11 : Résistances en flexion axiale expérimentales et issues de la littérature des essences

Tableau 12 : Résistance à la flexion axiale des bois aboutés par essence

Tableau 13 : Résistance en flexion des essences en bois massif et abouté

Tableau 14 : Probabilités d'obtenir un pourcentage de rupture dans le bois d'au moins 90%

Liste des figures

Figure 1 : Frise chronologique de l'histoire du bois dans la construction

Figure 2 : Diagramme de fabrication du bois lamellé-collé

Figure 3 : Diagramme d'Ashby du module d'élasticité en flexion en fonction de la densité des essences d'intérêt comparées aux essences de référence

Figure 4 : Rigidités spécifiques des essences d'intérêt comparées aux essences de référence

Figure 5 : Diagramme des contraintes d'une section de poutre en flexion pure

Figure 6 : Modèle de poutre BLC mixte visé

Figure 7 : Sites d'approvisionnements et volumes sur pieds correspondants des essences étudiées

Figure 8 : Mécanisme de formation du polyuréthane (PUR) par réaction isocyanate–polyol

Figure 9 : Structure de résine mélamine-urée-formaldéhyde

Figure 10 : Schéma de placement des repères et de mesure de distance

Figure 11 : Dimensions d'un essai de flexion 4 points et placement des LVDT pour la mesure du module local d'élasticité en flexion

Figure 12 : Schéma du circuit d'un capteur LVDT

Figure 13 : Schéma de détermination de la flèche en flexion pure

Figure 14 : Courbe force-déplacement dans la plage des déformations élastiques

Figure 15 : Schéma du dispositif d'essais en flexion 4 points sur bois abouté

Figure 16 : Schéma du modèle de fraise Minifinger Marathon

Figure 17 : Échantillonnage du test de résistance en cisaillement des joints de collage

Figure 18 : Dispositif d'essais de résistance en cisaillement des joints de collage

Figure 19 : Moyennes et écart-types des masses volumiques à 12% expérimentales et issues de la littérature par essence

Figure 20 : Moyennes et écart-types des retraits expérimentaux et issus de la littérature par essence

Figure 21 : Retraits radiaux expérimentaux par essence

Figure 22 : Retraits tangentiels expérimentaux par essence

Figure 23 : Retraits volumiques expérimentaux par essence

Figure 24 : Régression linéaire du retrait volumique en fonction de la masse volumique

Figure 25 : Courbes d'essais Force-Flèche des essences

Figure 26 : Module local d'élasticité en flexion expérimental et issu de la littérature par essence

Figure 27 : Module local d'élasticité en flexion par essence

Figure 28 : Régressions linéaires du MOE en fonction de la masse volumique par essence

Figure 29 : Régression linéaire du MOE en fonction du taux d'humidité des essences

Figure 30 : Courbe d'essais Force-Flèche des essences aboutées

Figure 31 : Module local d'élasticité en flexion des essences aboutées

Figure 32 : Module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et abouté

Figure 33 : Comparaison des MOE des essences en bois massif et abouté

Figure 34 : Résistance à la flexion axiale expérimentale et issues de la littérature des essences

Figure 35 : Résistance à la flexion axiale expérimentale des essences à 12%

Figure 36 : Régression linéaire de la résistance à la flexion axiale en fonction du module local d'élasticité en flexion par essence

Figure 37 : Résistance à la flexion axiale des bois aboutés

Figure 38 : Comparaison des résistances en flexion axiale des essences en bois massif et abouté

Figure 39 : Comparaison des MOR des essences en bois massif et abouté

Figure 40 : Résistance en cisaillement des colles par groupe d'essence avec densités différentes

Figure 41 : Résistance en cisaillement des colles par groupe d'essence avec mêmes densités

Figure 42 : Impact des densités d'application des colle PUR sur leur résistance au cisaillement

Figure 43 : Régression linéaire de la résistance en cisaillement en fonction du pourcentage de rupture dans le bois

Figure 44 : Diagramme d'Ashby de la rigidité en fonction de la masse volumique pour les valeurs expérimentales et issues de la littérature

Figure 45 : Profil d'une enture (a) et détermination de l'angle θ à partir de la demi-géométrie de l'enture (b)

Figure 46 : Schéma de décomposition des efforts sur le plan d'une enture en flexion

Figure 47 : Cercle de Mohr correspondant au cas d'une enture en fibre extrême en traction soumise à une flexion pure

Figure 48 : Schéma du diagramme des contraintes de flexion appliquées au joint de colle et à son voisinage

Figure 49 : dispositif de cisaillement des joints de collage en double cisaillement type « arc de triomphe »

Figure 50 : dispositif de cisaillement des joints de collage en double recouvrement

Liste des annexes

Annexe 1 : Grange de l'abbaye de Bonport, 1228

Annexe 2 : Évolution des surfaces forestières de 1866 à 2008

Annexe 3 : Superficie des différents peuplements de la forêt productive en Wallonie

Annexe 4 : Répartition des types de produits de bois de résineux en 2020

Annexe 5 : Sections standards les plus courantes des sciages résineux

Annexe 6 : Diagramme de Sankey du flux de biomasse ligneuse en Belgique en 2021

Annexe 7 : Comparaison du bilan carbone de différents matériaux de construction

Annexe 8 : Éprouvettes de cisaillement axial

Annexe 9 : Plan de découpe des planches de flexion et des cubes de stabilité dimensionnelles

Annexe 10 : Plan de découpe et d'assemblage des barreaux lamellés-collés

Annexe 11 : Plan de découpe et d'assemblage des planches aboutées

Annexe 12 : Ensembles des machines ayant servies au façonnage des échantillons testés

Annexe 13 : Abaque d'équilibre hygroscopique du hêtre (à gauche) et des résineux

Annexe 14 : Équation de correction du module d'élasticité axial en fonction du taux d'humidité

Annexe 15 : Équation de correction de la masse volumique en fonction du taux d'humidité

Annexe 16 : Balance de précision Sartorius

Annexe 17 : Échantillons de stabilité dimensionnelle à l'étuve

Annexe 18 : Pesée hydrostatique d'un échantillon séché à l'air libre

Annexe 19 : Échantillons de stabilité dimensionnelle

Annexe 20 : Échantillons de stabilité dimensionnelle en immersion

Annexe 21 : Extraction de l'air des échantillons de stabilité dimensionnelle par le vide

Annexe 22 : Table micrométrique

Annexe 23 : Diagramme de l'effort tranchant et du moment de flexion dans un essais de flexion 4 points

Annexe 24 : Dispositif d'essais pour la mesure du module local d'élasticité en flexion

Annexe 25 : Machine d'essais universelle TIRA

Annexe 26 : Poste de commande de la machine d'essais universelle TIRA

Annexe 27 : Dispositif en flexion 4 points sur la machine d'essais universelle TIRA

Annexe 28 : Planches d'essais en flexion 4 points d'Alnus glutinosa présentant des défauts

Annexe 29 : Façonnage des entures à la toupie, photo de l'auteur

Annexe 30 : encollage des entures, photo de l'auteur

Annexe 31 : Pressage des planches enturées et collées, photo de l'auteur

Annexe 32 : Schéma de calcul de la pression appliquée sur une planche aboutée

Annexe 33 : Dispositif d'essais pour la mesure de la résistance à la flexion axiale

Annexe 34 : méthode de détermination de la vitesse de chargement estimée par essence

Annexe 35 : Dispositif d'essais en flexion 4 points sur bois abouté

Annexe 36 : Application de la colle sur les blochets d'un barreau d'essais de chêne rouge

Annexe 37 : Façonnage des barreaux lamellés-collés de résistance au cisaillement des joints de collage

Annexe 38 : Schéma de calcul de la pression appliquée sur un barreau d'essais en cisaillement

Annexe 39 : Gouttières et serre-joints ayant servis au façonnage des barreaux de résistance en cisaillement des joints de colle

Annexe 40 : Dispositif de cisaillement avec barreau d'essais en place

Annexe 41 : Dispositif d'essais en cisaillement du joint de collage sur la machine d'essais universelle TIRA

Annexe 42 : Dimensions du dispositif d'essais de résistance en cisaillement des joints de collage

Annexe 43 : Gradation des pourcentages de rupture dans le bois dans des blochets issus des essais de cisaillement des joints de collage

Annexe 44 : Arbre décisionnel des tests d'inférence statistique pour plus de deux groupes

Annexe 45 : Arbre décisionnel des tests d'inférence statistique pour deux groupes

Annexe 46 : Taux d'humidité des essences séchées à l'air libre en atelier

Annexe 47 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk sur le retrait radial des essences

Annexe 48 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur le retrait radial des essences

Annexe 49 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk sur le retrait tangentiel des essences

Annexe 50 : Résultat du test de Bartlett sur le retrait tangentiel des essences

Annexe 51 : Résultats de l'ANOVA sur les retraits tangentiels des essences

Annexe 52 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk pour le retrait volumique des essences

Annexe 53 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le retrait volumique des essences

Annexe 54 : Test de normalité de Shapiro-Wilk sur les MOE des essences

Annexe 55 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur les MOE des essences

Annexe 56 : Test de normalités du MOE des essences aboutées

Annexe 57 : Résultat du test de Bartlett sur le MOE des essences aboutées

Annexe 58 : Résultat du test d'ANOVA Welch pour les MOE des essences aboutées

Annexe 59 : Tests d'inférence statistique pour la comparaison du module local d'élasticité en flexion des bois massifs et aboutés

Annexe 60 : Résultat du test de normalité de Shapiro-Wilk pour la résistance à la flexion axiale des essences

Annexe 61 : Résultat du test de Bartlett pour la résistance à la flexion axiale des essences

Annexe 62 : Résultat de l'ANOVA pour la résistance à la flexion axiale des essences

Annexe 63 : Résultat du test de Shapiro-Wilk pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées

Annexe 64 : Résultats du test de Bartlett pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées

Annexe 65 : Résultats de l'ANOVA Welch pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées

Annexe 66 : Tests d'inférence statistique pour la comparaison de la résistance à la flexion axiale des bois massifs et aboutés

Annexe 67 : Contraintes dans un joint collé

Annexe 68 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche d'Alnus glutinosa

Annexe 69 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche de Populus tremula

Annexe 70 : Mode de rupture d’un joint d’aboutage d’une planche de Betula spp

Annexe 71 : Mode de rupture d’un joint d’aboutage d’une planche de Quercus rubra

Annexe 72 : Mode de rupture illustrant le moment fléchissant parasite lors d’un essai de cisaillement du joint de collage entre un blochet de Populus tremula (en plus clair) et de Betula spp.

Annexe 73 : Rupture dans une planche (bois massif) de Populus tremula en flexion 4 points

Annexe 74 : Rupture dans une planche (bois massif) de Betula spp. en flexion 4 points

Annexe 75 : Rupture dans une planche (bois massif) de Quercus rubra en flexion 4 points

1. Introduction

1.1. Historique de la construction structurelle en bois

Les premières traces de structure en bois

Il y a 500 000 ans, alors qu'*Homo sapiens* ne foulait pas encore la surface du globe (Australian Museum, 2026), son ancêtre *Homo heidelbergensis* façonnait déjà la plus ancienne pièce de structure en bois connue à ce jour. En amont des chutes du Kalambo, en Zambie, le croisillon fabriqué lui aurait servi à isoler son habitation de l'humidité ou se frayer un accès à l'eau (Savatier, 2023). Depuis, la dendrochonologie (jusqu'à 12000 ans) puis l'archéologie ont permis de mettre en lumière l'évolution des techniques de travail du bois, notamment de charpenterie. Dans l'actuelle France, dès le Néolithique ancien (5500 av. J.C.), les assemblages fondamentaux tels que le tenon-mortaise et le mi-bois sont déjà maîtrisés. Des « méga-constructions » pouvant atteindre 1000 à 2400 m² ont été découvertes sur l'ensemble du territoire. La plus imposante d'entre-elles fût sans doute la construction des Vaux, dans l'Indre, s'étalant sur 18,5 mètres de large pour 130 mètres de long, la rendant plus longue que la cathédrale Notre-Dame de Paris (Epaud, 2024).

La construction structurelle au Moyen Âge

Le Moyen Âge fût par la suite considéré comme l'âge d'or de la charpenterie. Les charpentes romanes du XIème et XIIème siècles se caractérisent par des structures à chevrons-formant-fermes de faible pente, comprise entre 35 et 45°. Les rameaux entiers étaient utilisés sous forme de brin taillés au minimum et mis en œuvre encore verts. À partir du milieu du XIIe siècle, la diffusion du gothique bouleverse ces principes : l'apparition des voûtes entraîne une séparation entre fermes principales et secondaires, les pentes se redressent jusqu'à 60°, et une série d'innovations techniques - poinçon, suspentes, dispositifs longitudinaux - permet de gérer des portées toujours plus grandes. Au XIIIe siècle apparaît la charpente à pannes, illustrée par la grange de Bonport en 1228 (cf. annexe 1). Contrairement à la légende de forêts entières rasées pour bâtir les cathédrales gothiques, les surfaces forestières réellement sollicitées ne représentaient que quelques hectares de taillis de jeunes chênes âgés de 50 à 60 ans (Epaud, 2024).

Le déclin du bois à l'époque moderne

L'époque moderne marque en revanche un déclin progressif du bois. La surexploitation des forêts aux XVIIe et XVIIIe siècles, portée par les besoins industriels et urbains croissants, dégrade fortement la qualité du bois disponible, désormais issu de troncs courts et noueux. Cette pénurie

engendre des pathologies structurelles dans les charpentes et un recours croissant au sciage ainsi qu'aux renforts métalliques. Le bois, considéré comme un matériau noble au Moyen Âge, devient alors un matériau « pauvre » qu'il convient de dissimuler sous le plâtre ou les lambris (Epaud, 2024).

La standardisation à l'époque actuelle

La période contemporaine accentue cette tendance : le XIXe siècle voit les charpentes se simplifier à l'extrême, avec des structures à pannes standardisées en résineux sciés, tandis que se développent parallèlement les charpentes métalliques puis en béton armé, face à la pénurie persistante de bois de qualité. C'est dans ce contexte que les prémices du lamellé-collé apparaissent (Epaud, 2024). Le colonel Emy initie un procédé permettant d'empiler des planches à joints décalés, serrées par des étriers métalliques (Leloy, 2012). Cette méthode, appliquée aux manèges de Libourne en 1821 et de Bayonne en 1826, atteint déjà des portées de 21 mètres. L'invention du lamellé-collé moderne revient toutefois à Otto Hetzer, au tout début du XXe siècle. Il déposa en 1906-1907 un brevet décrivant le collage des lamelles à la caséine en Allemagne, en France et en Suisse. Ensuite dans les années 40 la caséine fut remplacée par des agents de liaisons synthétiques tels que les adhésifs à base de phénol-formaldéhydes (Klippel, 2014). Aux XXe et XXIe siècles, l'industrialisation s'achève avec la généralisation des fermettes en kit assemblées par connecteurs métalliques, ainsi que l'apparition de nouveaux matériaux comme le CLT ou le lamibois, le tout reposant sur une sylviculture intensive de résineux, notamment de l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst.) et du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) (Epaud, 2024).

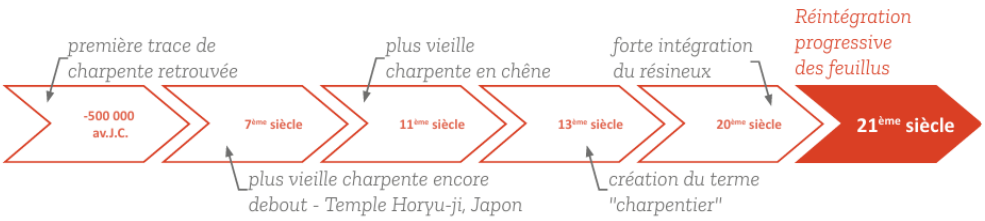


Figure 1 : Frise chronologique de l'histoire du bois dans la construction (source : Construire en bois feuillus, Faure, 2024)

1.2. Historique de la ressource forestière wallonne

L'histoire de la composition forestière actuelle

Au cours du XIXème siècle, une transition énergétique progressive s'est opérée au sein de l'industrie wallonne. Afin d'assurer l'approvisionnement en combustible des industries sidérurgiques, mais également pour la cuisson des briques, le charbon de bois a vu son utilisation décliner au profit du charbon de terre : la houille (Hardy & Dufey, 2015).

Avec l'ouverture de nouvelles galeries minières, la ressource bois s'est rapidement avérée cruciale pour étançonner les voies d'accès (Latte et al., 2022). Ainsi, à partir de la fin du XIXème siècle et durant la quasi-totalité du XXème siècle, une introduction massive de résineux a été entreprise à

cette fin. L'épicéa commun ainsi que le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) ont été choisis pour leur productivité accrue face aux essences feuillues indigènes, en vue de produire du bois de qualité recherchée (Petit et al., 2017). Vers le milieu du XXème siècle, c'est l'équivalent de toute la récolte annuelle d'épicéa — soit 2 millions de mètres cubes de bois — qui était enfouis dans les mines (Latte et al., 2022).

L'évolution des plantations sylvicoles

Graduellement, ces plantations résineuses ont évoluées vers une dominance de l'épicéa, qui atteignit son paroxysme dans la seconde moitié du XXème siècle, avec 193 850 ha contre 18 350 ha pour le pin sylvestre en 1984. La forêt wallonne comptait alors 537 700 ha de zones forestières, avec 494 000 ha de zones productives, soit plus de 86% (Alderweireld et al., 2015).

Au début des années 80, la proportion de peuplements résineux par rapport à la surface forestière totale atteint son maximum (cf. annexe 2). Ce résultat fait suite à une augmentation continue de la surface des peuplements résineux par rapport aux peuplements feuillus depuis le début du XXème siècle. En 1981, feuillus et résineux se partageaient à parts quasi égales la superficie de la forêt productive, avec respectivement 247 900 ha et 246 100 ha, soit environ 50 % chacun. À partir de cette date, la tendance s'inverse. Les peuplements résineux perdent 21% de leur superficie entre 1981 et 2019, principalement à cause du déclin de l'épicéa. Les pessières ont effectivement perdu 40,6 % de leur superficie sur cette période, soit 78 650 ha. En parallèle, les peuplements feuillus ont vu leur superficie augmenter jusqu'à 262 900 ha en 2019. À la même époque les peuplements résineux représentent 194 400 ha. L'équilibre de la forêt productive se situe à ce moment à 56,2 % pour les peuplements feuillus et 41,5 % pour les peuplements résineux (cf. annexe 3) (État de l'environnement wallon, 2026).

Cette évolution depuis 1981 est attribuable d'une part au prélèvement des épicéas arrivés à maturité, et d'autre part à la révision des pratiques sylvicoles (État de l'environnement wallon, 2026). Une prise de conscience chez les gestionnaires forestiers les a en effet poussés à repeupler les milieux plus adaptés à la sylviculture des feuillus, au détriment des résineux qui à l'origine avaient été plantés à tort dans ces zones (Alderweireld et al., 2015). Malgré cette tendance, en 2019, l'épicéa demeurait toutefois l'essence la plus répandue en forêt wallonne, occupant 115 200 ha, soit 24,6 % de la surface forestière productive (État de l'environnement wallon, 2026).

1.3. L'importance de la compatibilité entre l'essence et la station

L'erreur la plus importante commise lors de ce siècle d'enrésinement fût d'omettre l'adéquation des essences avec les stations sur lesquelles elles ont été plantées, en particulier pour l'épicéa. En effet, l'enthousiasme au sein de la filière bois, généré notamment par la productivité des résineux - 3 millions de mètres cubes par an dans la seconde moitié du XXème siècle - a engendré leur implantation débridée sur le territoire wallon (Latte et al., 2022). L'épicéa nécessite pourtant

des sols frais à mésiques[1] pour être à l'optimum au niveau hydrique et méso-oligotrophes[2] au niveau trophique (Petit et al., 2017). Il est à exclure des sols tourbeux ou très humides car sensibles à l'engorgement, mais également des sols très superficiels, à drainage excessif ou secs car sensibles au déficit hydrique. Ces sensibilités sont notamment dues à son enracinement traçant, superficiel, qui l'expose aux chablis[3]. Ce faisant, en 1980, 52% des stations occupées par l'épicéa étaient considérées comme compatibles avec la culture de cette espèce (96 583 ha), 21% peu compatibles (38 770 ha) et 27% incompatibles (50 096 ha). En 1998, sur l'ensemble des stations qu'occupaient les jeunes pessières, de moins de 26 ans, 62% étaient qualifiées de compatibles, 15% peu compatibles et 23% incompatibles (Claessens et al. 2001).

1.4. La ressource bois wallonne face au changement climatique

Sur la période de 2015 à 2023, le volume total de bois sur pied en Wallonie était évalué à environ 117 millions de m^3. 45 227 025 m^3 étaient représentés par l'épicéa, soit 38,7%. Il était suivi par le chêne (*Quercus spp.*) et le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) qui constituaient respectivement 23 777 324 m^3 (20,3%) et 15 623 832 m^3 (13,4%) (État de l'environnement wallon, 2026). Le fait est que ces ressources prépondérantes qui forment le paysage forestier wallon actuel sont menacées. En effet, mis à part le chêne sessile (*Quercus petraea* (Mattuschka) Lieblein) qui représente environ la moitié de la ressource en chêne régionale, les autres espèces sont en proies au changement climatique (Petit et al., 2017). Le hêtre et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) sont très sensibles à la sécheresse, au stade juvénile comme à l'âge adulte. Dans la perspective de changements climatiques engendrant des printemps et des étés plus secs qu'aujourd'hui, les périodes de déficit hydrique entraineraient du dépérissement lors des périodes de végétations. L'épicéa quant à lui, sensible à la sécheresse à l'âge adulte et très sensible au stade juvénile, se verrait être cantonné dans les stations les plus favorables de la région ardennaise. Il s'y trouve actuellement déjà en limite de tolérance dû aux apports en eau limités en période de végétation et aux chaleurs estivales trop intenses (Petit et al., 2017).

1.5. Les facteurs aggravants du changement climatique

De plus, dans ce contexte de réchauffement climatique, ces trois espèces présentent des facteurs aggravants. Les extrêmes climatiques dont la fréquence et la durée s'intensifient, telles que les sécheresses et les inondations à répétitions, perturbent la physiologie du hêtre. Des ravageurs secondaires tels que les lymexylons ou les scolytes du genre *Trypodendron* peuvent entraîner le déclin de l'essence alors qu'ils sont à priori incapables de s'attaquer aux arbres sains avec succès (La Spina et al., 2012). De même, le dépérissement aigu du chêne, une maladie complexe causée

[1] Qualifie un milieu, un sol ou un habitat qui a un taux d'humidité moyen.
[2] Un milieu méso-oligotrophe est un écosystème qui a une quantité faible à moyenne de substances nutritives.
[3] Un chablis est un arbre tombé ou qui a été cassé à cause des conditions climatiques, de la vieillesse, des maladies, ou par une combinaison de ces facteurs.

par plusieurs types de bactéries, est favorisé par la sécheresse et la chaleur (Dennert et al., 2023). De son côté, l'épicéa est victime du scolyte typographe (*Ips typographus*). Ce coléoptère effectue son cycle de développement sous l'écorce des résineux, dont cette essence plus spécifiquement. Les galeries creusées, qui peuvent atteindre 30 cm de long, dégradent progressivement le système vasculaire de l'arbre et engendrent sa mort dans les semaines ou les mois qui suivent . Le cycle, qui s'étend d'avril à début octobre, est favorisé par des températures supérieures à 20°C. Si bien que dans ces conditions, deux à trois générations peuvent se succéder sur cette période. L'insecte s'attaque souvent à un îlot d'arbres. Ces attaques sont favorisées par la présence de chablis. Les arbres fragilisés par la sécheresse qui viennent à s'abattre peuvent donc condamner tout un groupe d'épicéas voisins. En Belgique, entre 2018 et 2020, il a été estimé que plus de 2 millions de m^3 d'épicéas ont été scolytés (Leroy, 2025). Cette crise fût notamment favorisée par des étés chauds et secs, ainsi que des hivers doux durant cette période (RND, 2022). De plus, les peuplements équiens monospécifiques et les peuplements denses, les plus communs dans les plaines et en Ardenne, sont particulièrement sensibles à l'emballement des attaques de scolytes (Jactel & Marini, 2021). L'année 2021, plus humide et plus fraiche, a marqué la fin de la crise sanitaire car moins favorable au développement du scolyte, tout en étant plus propice à la croissance des épicéas. Des coupes sanitaires, dans lesquels les arbres étaient scolytés, ainsi que des coupes rases permettant la récolte d'épicéa voisins sains ont également empêché la prolifération du ravageur (Gilles et al., 2023).

1.6. L'exploitation de la ressource bois

Alors même que cette ressource bois principale qu'est l'épicéa en Wallonie subit de telles pressions, elle reste la plus exploitée. Sur la période de 2015 à 2023, ce sont 2 577 269 m^3 qui étaient prélevés annuellement en moyenne. Le prélèvement total de bois sur cette même période s'élevait à 4 117 806 m^3 en moyenne annuelle. L'épicéa représentait donc 63% des prélèvements totaux. Il était suivi par le chêne et le hêtre dont respectivement 320 033 m^3 (8%) et 307 028 m^3 (7%) étaient prélevés annuellement en moyenne. Qui plus est, le taux d'exploitation de l'épicéa sur cette même période s'élevait à 122%, contre 75% et 71% pour le chêne et le hêtre respectivement. Or, d'après le Code forestier wallon, une gestion durable de la ressource bois impose de garder un taux de prélèvement inférieur ou égal à 100%, soit que les volumes prélevés soient inférieurs ou égaux aux volumes produits. Cependant, il est a noté que ce taux d'exploitation de l'épicéa est le résultat de nombreux peuplements, plantés dans les années 70, arrivés à maturité. De plus les pratiques sylvicoles réfléchies employées par les gestionnaires forestiers ont également participé à ce taux élevé. En effet, ils n'ont pas nécessairement replanté cette essence après exploitation, en particulier dans les zones où elle n'était pas adaptée. Quant aux taux d'exploitation plus bas du chêne et du hêtre, ils résultent de l'état sanitaire dégradé de nombreux peuplements et du manque de régénération naturelle par endroits. Les agents forestiers

décidaient donc de voir les volumes à exploiter à la baisse (État de l'environnement wallon, 2026).

1.7. L'utilisation de la ressource bois

En matière d'utilisation de la ressource bois, en 2020, 2 917 000 m^3 de grumes ont été consommés par le secteur du sciage en Belgique. Ce volume se partage entre feuillus et résineux de façon très inégale, avec respectivement 217 000 m^3 et 2,7 millions de m^3. En ce qui concerne les résineux, dans les 33 scieries recensées en Belgique (dont 31 en Wallonie), 82,78% de l'approvisionnement étaient comblés par l'épicéa, soit 2 235 060 m^3. Il était suivi du douglas (12,64%), et dans une moindre mesure du pin sylvestre (2,55%) ainsi que du mélèze (*Larix decidua* Mill.) (2,02%). À noter que 55% des grumes de résineux provenaient de forêts belges, le reste étant issu d'imports depuis la France (21%), l'Allemagne (19%), le Luxembourg (3%) et les Pays-Bas (2%). De la même manière, les sciages de résineux commercialisés en 2020 étaient destinés à la Belgique à hauteur de 39%, le reste étant exporté vers la France (20%), l'Allemagne (18,3%), les Pays-Bas (14,7%), d'autres pays comme l'Angleterre, les États-Unis et l'Irlande (7,7%), ainsi que le Luxembourg (0,3%). En termes d'usages, les scieries de résineux produisent majoritairement du bois de construction. Ainsi, en 2020, les types de produits de bois résineux se répartissaient tel qu'illustré en annexe 4. 13% étaient destinés à la fabrication de planches et voliges pour lamellé-collé, dont les dimensions standards sont reprises en annexe 5. Concernant les feuillus, en 2020, une distinction est à opérer entre la Flandre et la Wallonie en termes d'approvisionnements en essences. En Flandre, les 30 scieries de feuillus recensées nécessitaient 142 000 m^3 de bois ronds, soit 66% des bois de feuillus approvisionnés en Belgique. Dans ce volume, 74% sont représentés par le peuplier (*Populus spp.*), suivi du chêne (23%), du hêtre (2%), et d'autres feuillus à hauteur de 1%. Cela peut s'expliquer par une présence plus importante de grandes unités de production dans la région, que sont les scieries de peupliers. Ces dernières sont spécialisées dans la production d'emballages en grands volumes, en traitant des qualités de grumes inférieures à celles des scieries de chêne. En Wallonie, les 32 scieries de feuillus recensées nécessitaient 72 000 m^3 de bois ronds. Dans ce volume, 66% sont représentés par le chêne, suivi du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) (13%), du hêtre (11%), du peuplier (9%), et d'autres feuillus à hauteur de 1%. Cela peut s'expliquer par une abondance de petites scieries (<10 000 m^3/an), plus artisanales dans la région, qui optent davantage pour des qualités de grumes supérieures. À noter que, en 2020, 58,8% des grumes de feuillus étaient issues de forêts belges, le reste étant issu d'imports depuis la France (32,4%), les Pays-Bas (4,4%), l'Allemagne (3,2%) et le Luxembourg (1,5%). De même, les sciages de feuillus commercialisés cette année étaient destinés à la Belgique à hauteur de 73,64%, le reste étant exporté vers les Pays-Bas (16,12%), la France (4,62%), le Luxembourg (1,85%), l'Espagne (1,15%), et minoritairement dans d'autres pays à hauteur de 2,63%. En termes d'usages, les clients majoritaires des scieries de feuillus belges sont les fabricants d'emballages (37,9%). Dans ce cadre, le marché est davantage tourné vers la Flandre où ce

secteur représente 42% des acheteurs. En Wallonie, le marché est plus diversifié, des négociants (28%) au chemin de fer (4%), en passant par les menuisiers (19%), les charpentiers (14%), ou encore la tournerie (9%). Cette diversité s'explique par l'absence d'unités de production de peupliers équivalentes à celles présentes en Flandre (Defays & Saerens, 2021).

Une manière synthétique de représenter la filière bois belge est le diagramme de Sankey. Ce type de diagramme permet d'apprécier les flux de matière au sein d'un système. La largeur des flèches est proportionnelle à la quantité représentée. Un exemplaire est illustré en annexe 6.

1.8. Le marché public du bois en Wallonie

En ce qui concerne le marché public du bois en Wallonie, un contraste est de nouveau observable entre feuillus et résineux. En effet, à l'issue de l'année 2025, l'épicéa a vu son prix augmenter de 14 à 17 % par rapport à l'année précédente. Il est considéré comme la référence du marché étant donné sa dominance dans la région. Les prix moyens ont atteint des records compris entre 120 et 135 €/m³, pour des lots 2 à 2,5 m^3 de volume d'arbre moyen. Cette hausse est explicable par l'accroissement de la pression sur la ressource due aux exploitations anticipées des entreprises voulant sécuriser leur approvisionnement. Les volumes d'épicéa disponibles dans les forêts publiques baissaient effectivement de 10% par rapport à 2024, alors que la demande des industries de première transformation restait constante. Le douglas s'est imposé comme essence de référence auprès des transformateurs en raison de sa croissance rapide et de ses performances mécaniques élevées. Sa demande, désormais consolidée, suit une tendance comparable à celle de l'épicéa, avec une préférence marquée pour les gros bois destinés à la charpente et aux usages structurels. Les prix d'autres résineux comme le mélèze ou le pin sylvestre conservent leur stabilité. De leurs côtés, les prix des feuillus se stabilisent. Néanmoins, les lots de chêne dépassaient rarement les 250 €/m³ en 2025. Suite aux années de sécheresse ayant contribué aux problèmes sanitaires, comme les piqûres d'insectes qui peuvent pénétrer jusqu'au duramen, les qualités de certains bois fût altérée. Les lots de hêtre trouvent de moins en moins de débouchés de transformation locaux et sont davantage destinés à l'exportation. Leurs prix dépassent rarement les 100 €/m³. Quant à lui, le frêne voit ses lots bénéficier d'une valorisation continue malgré les problèmes sanitaires liés à la chalarose (*Chalara fraxinea*), qui se vendaient entre 120 et 160 €/m³ en 2025 (Beauchamp, 2025).

1.9. La nécessité d'adaptation

Face aux problèmes d'ampleur auxquels sont en proies les essences forestières majoritaires de Wallonie, une sylviculture adaptative est de mise afin d'assurer la résilience des forêts de demain. De surcroît, leur part importante dans la chaîne industrielle du bois wallon impose de devoir trouver des alternatives d'approvisionnement. Les résineux, majoritairement représentés par l'épicéa, sont en première ligne. La méthode de sylviculture actuellement prépondérante de cette

essence, qu'est la plantation équienne monospécifique à haute densité de tiges, engendre des dégâts conséquents sur l'environnement. Son exploitation en mise à blanc contribue grandement au compactage des sols et à la déstructuration de ses horizons. Dans ce cas, la perte du couvert forestier expose davantage le sol à la sécheresse comme à l'érosion. L'épicéa est alors plus exposé aux incendies, aux tempêtes, ainsi qu'aux attaques de ravageurs (Claessens, 2001). Dans certains cas, elle peut aussi engendrer une acidification non-négligeable des sols et des eaux de surfaces (Petit et al., 2017). Toutefois, l'épicéa n'est pas à bannir des forêts wallonnes. L'impact de sa sylviculture sur l'environnement est le plus souvent réversible. Comme toute essence, il nécessite des moyens structurels et méthodiques permettant d'assurer son développement en adéquation avec les stations concernées (Claessens, 2001).

1.10. La construction bois en Belgique

Le secteur de la construction bois belge compte désormais 115 entreprises, soit une baisse de 6 % par rapport à la moyenne des années précédentes, après avoir atteint un pic de 150 entreprises en 2022. Ce recul touche particulièrement la Wallonie, où le nombre d'entreprises stagne depuis 2017, tandis que la région concentre malgré tout 60 % des sièges sociaux du secteur. Cette prédominance wallonne ne traduit toutefois pas un marché plus développé, mais reflète plutôt une structure différente, composée en grande partie de petites menuiseries (Hout Info Bois, 2024).

Sur le plan des nouvelles constructions, le nombre de réalisations résidentielles en bois recule nettement en 2023 et 2024, avec respectivement 1492 et 1902 unités, un niveau historiquement bas pour la Wallonie, alors que la Flandre continue sa croissance, bien qu'à un rythme ralenti. La part de marché du bois dans la construction résidentielle unifamiliale belge se situe ainsi autour de 8 % en 2024, après être tombée à 5,54 % l'année précédente. Plusieurs causes sont avancées pour expliquer ce ralentissement : la hausse des taux d'intérêt hypothécaires, l'augmentation du coût de la main-d'œuvre et des matériaux, le durcissement de la réglementation PEB, la crise énergétique, ainsi que la fin du moratoire sur les faillites, instauré après la période COVID, qui a entraîné 20 cessations d'activité cumulées sur les deux dernières années (Hout Info Bois, 2024).

Le segment de la rénovation, de l'extension et de la surélévation (RES) suit une tendance similaire, avec une part de marché du bois oscillant entre 1,8 % et 3,4 % selon les années, et un recul également observé en 2023-2024 (Hout Info Bois, 2024).

Le bois : un matériau d'avenir

Malgré ce ralentissement conjoncturel, il faut impérativement garder à l'esprit les atouts durables du matériau bois. Il est renouvelable, la régénération naturelle ou les plantations pallient les prélèvements, contrairement au béton et à l'acier conçus à partir de ressources épuisables : le fer extrait des mines, tout comme le sable, le gravier et les roches calcaires ne se reconstituent pas à l'échelle humaine (Himpens et al., 2017). Le bois est aussi recyclable. Les pièces de structure

peuvent être sujettes au réemploi avec ou sans transformation. Ce matériau peut aussi être recyclé sous forme de panneaux de particules ou de papier. En fin de chaîne de recyclage, le bois peut servir à la valorisation énergétique dans le cas où il est abîmé ou traité (Charloteaux, 2024).

Selon une gestion forestière durable, le bilan carbone du bois est neutre. Il est le seul matériau capable de stocker le CO_2 atmosphérique (cf. annexe 7). En moyenne, une tonne de CO_2 est stockée dans 1 m^3 de bois. En outre, le bois de structure est beaucoup moins polluant que les autres matériaux de construction traditionnels. Pour la production d'une tonne de matière, le bois demande 4 fois moins d'énergie que le béton, 6 fois moins que la brique, 24 fois moins que le verre, 60 fois moins que l'acier et 250 fois moins que l'aluminium. Dans le bâti, le bois permet d'effectuer des économies d'énergie car il est performant en termes d'isolation thermique, de capacité hygrothermique et de rayonnement (Himpens et al., 2017). Enfin, son futur sur le marché européen est prometteur au vu de son adaptation naturelle à la préfabrication et à la modularité, soutenue par une provenance locale (Hout Info Bois, 2024).

1.11. L'innovation des produits d'ingénierie du bois - focus sur le lamellé-collé

Définition du lamellé-collé

Le bois lamellé-collé (BLC), défini par la norme européenne EN 14080, qui prescrit les exigences relatives au bois lamellé-collé, au bois lamellé-collé en bloc et au bois massif reconstitué utilisé dans les structures portantes, est un matériau structurel obtenu par collage de plusieurs lamelles de bois dont le fil est orienté parallèlement à l'axe longitudinal de la pièce. Chaque lamelle a une épaisseur minimale de 6 mm pouvant atteindre 45 mm, et les plans de collage sont parallèles à la largeur de la poutre.

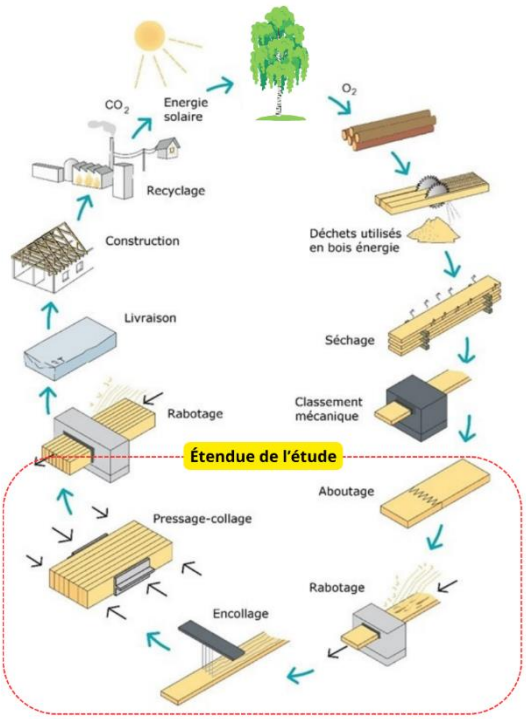


Figure 2 : Diagramme de fabrication du bois lamellé-collé (source : Glulam Handbook - *Volume 2*, Glued Laminated Timber Association, n.d.)

Ce procédé de fabrication en atelier, encadré par un contrôle qualité permanent des joints collés, confère au BLC plusieurs avantages par rapport au bois massif : il permet la réalisation d'éléments de grandes portées et de grandes sections, la mise en forme de pièces courbes (Glued Laminated Timber Association n.d.), ainsi qu'une meilleure homogénéité et prévisibilité des propriétés mécaniques : les défauts locaux (nœuds, singularités) étant redistribués et dilués entre les différentes lamelles plutôt que concentrés dans une seule pièce de bois massif (Falk & Colling, 1995).

Prépondérance des résineux

Parmi les essences disponibles, les résineux - et l'épicéa en particulier - dominent très largement la production de lamellé-collé. Cette domination n'est pas un hasard : elle reflète des choix industriels historiques. En Wallonie, la filière de sciage et de transformation du bois de construction s'est structurée autour d'un nombre restreint d'essences résineuses - épicéa, douglas, sapin, mélèze - reléguant les feuillus à un usage marginal. Plusieurs raisons expliquent ce déséquilibre. D'abord, les résineux se prêtent naturellement mieux à l'usinage : leur croissance régulière et leurs propriétés mécaniques homogènes en font une matière première plus simple à débiter et à calibrer que la plupart des feuillus, ce qui a orienté l'ensemble de l'outil industriel vers leur exploitation. Ensuite, le développement du lamellé-collé comme technique s'est fait autour des résineux : leur bois se colle plus facilement et de façon plus fiable que le bois de feuillus. Enfin, ce cercle s'est refermé avec le temps : à mesure que la demande en lamellé-collé résineux augmentait, les scieries spécialisées dans le sciage des feuillus se sont raréfiées, réduisant d'autant l'offre et la diversité d'essences feuillues disponibles pour ce type de produit (Mortelmans, 2025)

Les principales colles utilisées en bois lamellé-collé

Le collage constitue un procédé d'assemblage central dans la fabrication du bois lamellé-collé, permettant de répartir les charges de manière homogène sur de grandes surfaces tout en offrant une plus grande polyvalence et un meilleur rendement matière que les assemblages mécaniques traditionnels (HoutInfoBois, 2026). Bien que les colles ne représentent qu'environ 1 à 3 % de la masse d'une poutre en bois lamellé-collé, elles sont utilisées pour l'aboutage (assemblage des lamelles bout à bout) et la lamellation (assemblage des lamelles à fil parallèle) (GLTA, n.d.). Pour les usages structurels, les résines phénoplastes (PF, RF, PRF : colles phénoliques et résorcinoliques) et aminoplastes (UF, MF, MUF : colles urée-formol, mélamine-urée-formol) sont les plus utilisées : ces colles sont thermodurcissables ou se composent d'une résine et d'un durcisseur à mélanger avant l'emploi. Lorsqu’elles sont utilisées en bois lamellé-collé, les joints offrent une résistance à l'humidité moyenne à bonne (HoutInfoBois, 2026). Ces deux familles d'adhésifs sont couvertes par la norme EN 301:2023, qui les classe en deux types selon leur aptitude à l'emploi en fonction des conditions climatiques. Cette norme spécifie également les exigences de performance applicables selon le domaine d'application visé.

Valorisation des feuillus en construction - le projet W.A.V.E

Les forêts de la Grande Région[4] regorgent d'essences feuillues marginales sous-exploitées mais dotées de propriétés mécaniques, physiques ou esthétiques qui pourraient en faire des candidates crédibles pour la construction (Mortelmans, 2025). Face aux crises sanitaires touchant les

[4] La Grande Région est un espace de coopération transfrontalière en Europe qui regroupe la Wallonie (Belgique), le Grand-Duché de Luxembourg, la Lorraine (au sein de la région française Grand Est), ainsi que les Länder allemands de la Sarre et de Rhénanie-Palatinat.

essences principales de la filière bois actuelle, ainsi qu'aux incertitudes posées par le changement climatique, le projet Interreg Grande Région W.A.V.E. - Wood Added Value Enabler - vise à soutenir le développement d'une filière bois locale performante, fondée sur le maintien et la relocalisation de la chaîne de valeur ainsi que sur l'augmentation de l'usage des produits à base de bois (Filière Bois Wallonie, 2024). Réunissant 29 partenaires des différents territoires de la Grande Région, le projet s'articule autour de quatre modules de travail complémentaires, dont l'un vise spécifiquement à approfondir la connaissance de la ressource forestière et à identifier les essences dites « de l'avenir ». Dans le cadre du projet W.A.V.E., les essences « de l'avenir » se définissent comme des essences répondant à trois critères conjoints : une adaptabilité climatique suffisante pour se développer, croître et produire un bois de qualité dans les conditions climatiques projetées, une présence actuelle sur le territoire avec des volumes mobilisables, et un potentiel de valorisation au sein de la filière bois existante (Mortelmans, 2025).

Choix des essences dans le cadre du mémoire

Sur base de cette définition, les quatre essences étudiées dans ce mémoire sont : bouleaux (*Betula* spp.), chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*), peuplier tremble (*Populus tremula*) et aulne glutineux (*Alnus glutinosa*). Leurs situations dans les trois critères cités précédemment sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Critères de choix des essences étudiées

Essence	Adaptabilité climatique	Volumes mobilisables en Wallonie en 2024	Utilisations actuelles dans la filière bois
Betula spp.	*Betula pendula :* grande résistance aux variations climatiques *Betula pubescens :* sensible (intolérance au manque d'eau)	3 831 371 m^3 (3,3 % du volume total de bois sur pieds)	Menuiserie intérieure, meubles, contreplaqué, déroulage, bois lamellé-collé (BLC) et bois lamellé-croisé (CLT)
Quercus rubra	Bon potentiel d'avenir (Très plastique et compétitif, tolérant à la sécheresse)	907 743 m^3 (≈ 1% du volume total de bois sur pieds)	Menuiserie intérieure, parquet, meubles, contreplaqué, tranchage, déroulage
Populus tremula	Peu sensible aux variations climatiques (tolérance à la sécheresse mais baisse de productivité)	1 259 515 m^3 (1,1% du volume de bois sur pieds)	Charpente ancienne, emballage, pâte à papier, CLT
Alnus glutinosa	Bonne productivité sous réserve d'une présence en station (milieux frais à humides)	874 600 m^3 (≈ 1% du volume total de bois sur pieds)	Menuiserie intérieure, meubles, outillage

N.B. Le critère d'adaptabilité climatique a été détaillé sur base du fichier écologique des essences (Petit et al., 2017). Les volumes mobilisables en Wallonie sont issus de l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW) de 2015-2023 (État de l'environnement wallon, 2026). Les utilisations actuelles au sein de la filière bois sont décrites dans le catalogue des essences du projet W.A.V.E (Mortelmans, 2025).

En parallèle de ces trois critères, les essences étudiées ont été comparées en termes de propriétés mécaniques aux essences majeures employées dans l'industrie du bois lamellé-collé, à savoir l'épicéa, le douglas, le hêtre et le chêne. Le diagramme d'Ashby du module d'élasticité en flexion (E) (cf. section 2.2.1.) en fonction de la densité (ρ) (figure 3) montre que chaque essence d'intérêt se positionne dans un domaine de propriétés comparable à celui de son essence de référence homologue : le bouleau (*Betula* spp.) recouvre le domaine du hêtre (*Fagus sylvatica)*, tandis que chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra)* chevauche celui du chêne indigène (*Quercus spp*.), et que le peuplier tremble (*Populus tremula)* et l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa)* occupent une gamme de rigidité similaire à celle de l'épicéa (*Picea abies)*.

Cette correspondance est confirmée par l'indice de performance E/ρ (figure 4), qui rend compte de la rigidité spécifique du matériau. Les quatre essences sélectionnées se situent dans la même plage de valeurs que les essences de référence. Cette analyse préliminaire à l'échelle du matériau constitue ainsi un premier argument de pertinence mécanique pour l'utilisation de ces essences en structure.

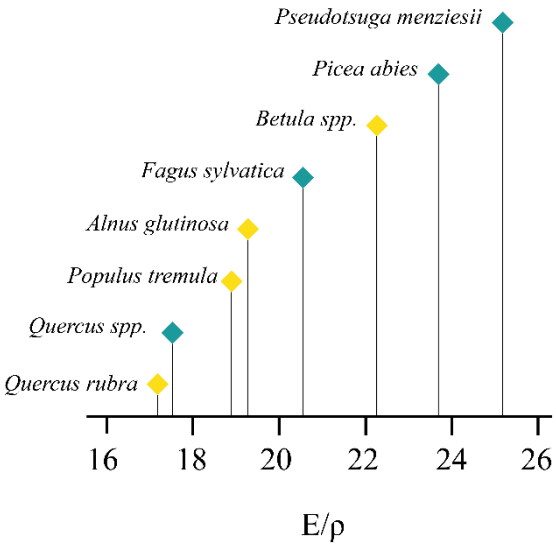


Figure 4 : Rigidités spécifiques des essences d'intérêt comparées aux essences de référence (source : Mortelmans, 2026, adapté de Technical, Environmental, and Economic Properties of Several Wood Species from Forests of Western Europe, Duyck & Mortelmans, 2025)

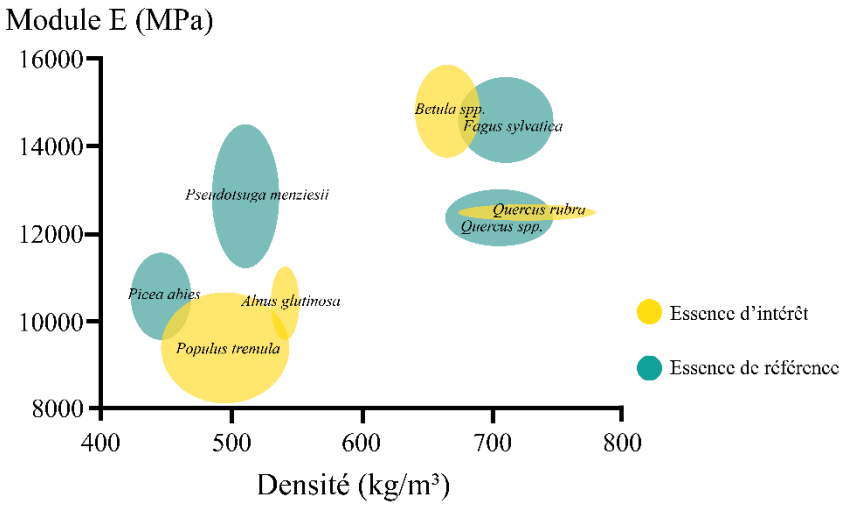


Figure 3 : Diagramme d'Ashby du module d'élasticité en flexion en fonction de la densité des essences d'intérêt comparées aux essences de référence (source : Mortelmans, 2026, adapté de Technical, Environmental, and Economic Properties of Several Wood Species from Forests of Western Europe, Duyck & Mortelmans, 2025)

Développer une poutre en bois lamellé-collé mixte à partir de feuillus

L'utilisation de bois feuillus dans la fabrication de bois lamellé-collé mixtes répond à une double problématique : la ressource dépérissante en résineux face à la demande croissante de construction bois, et la valorisation d'essences feuillues souvent sous-exploitées malgré leurs propriétés mécaniques intéressantes. La conception d'une poutre mixte, associant plusieurs essences feuillues au sein d'une même section, permet de tirer parti des atouts spécifiques de

chaque bois tout en maîtrisant le coût de la ressource la plus performante, généralement plus chère et plus difficile à mettre en œuvre (Fašalek et al., 2023). Le choix d'un profil symétrique plaçant l'essence la plus résistante et la plus rigide sur les fibres extrêmes, et une essence de remplissage au cœur, se justifie mécaniquement : dans un matériau homogène en flexion pure, les contraintes normales de traction et de compression sont maximales aux fibres extrêmes et nulles à l'axe neutre (cf. figure 5).

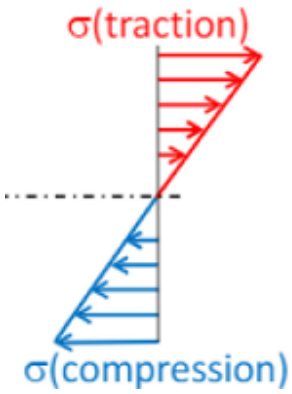


Figure 5 : Diagramme des contraintes d'une section de poutre en flexion pure (source : Résistance des matériaux et élasticité. Notes de cours, Latteur & Rondeaux, 2020-2021)

N.B. Ce diagramme n'est valable que si trois hypothèses fondamentales sont respectées : linéarisation géométrique (si les déformations sont petites, la géométrie déformée se confond avec la géométrie initiale), linéarisation matérielle (comportement élastique linéaire du matériau, répondant à la loi de Hooke) et hypothèse de Bernoulli (sections planes restant droites après déformation).

C'est dans cette perspective qu'il apparaît pertinent de tester une poutre BLC mixte feuillue combinant une essence davantage résistante et rigide en surface, ainsi qu'une essence mécaniquement moins performante et davantage disponible au cœur. Le bouleau, le chêne rouge, le peuplier tremble et l'aulne glutineux, quatre essences aux densités et rigidités contrastées, permettent d'explorer un gradient de propriétés mécaniques compatible avec cette architecture (cf. figure 6).

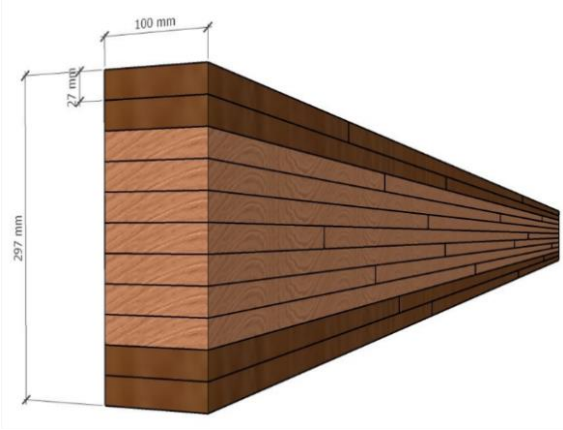


Figure 6 : Modèle de poutre BLC mixte avec en brun foncé les semelles basses et hautes et en brun clair l'âme. (Mortelmans, 2025)

Les innovations actuelles

Ces dernières années, plusieurs projets emblématiques démontrent la viabilité structurelle des feuillus en construction. Au Royaume-Uni, le programme *Building from England's Woodlands* a permis de tester des éléments hybrides associant hêtre, frêne, bouleau et sycomore à des résineux, jusqu'à la réalisation d'un démonstrateur exposé au V&A Museum (Hitt et al., 2026). En France, l'entreprise allemande Pollmeier a développé « BauBuche », un lamibois (LVL) de hêtre dont la résistance en compression est comparable à celle d'un béton C50/60[5] et dont les performances permettent des économies de matière par rapport au lamellé-collé résineux classique ; ce matériau a notamment été employé pour porter les charges d'un bâtiment tertiaire en structure poteaux-poutres à Berlin (Pollmeier, 2026). À Paris, la tour Wood Up (R+15) illustre concrètement l'arbitrage économique du feuillu : les poteaux en hêtre lamellé-collé, bien que 45,5

[5] Classe de résistance en résineux (C) équivalent à un module de rupture de 50 ou 60 MPa.

% plus chers au m³ que le résineux, ont permis de réduire le volume de bois de 31,8 % pour un coût total quasi identique, tout en libérant 20 m² de surface habitable supplémentaire par la réduction des sections (Fibois AuRA, 2024). Aux Pays-Bas, l'immeuble résidentiel SAWA à Rotterdam, structure de 50 mètres associant dalles Cross-laminated timber (CLT) et poteaux-poutres en bois lamellé-collé, a été désigné bâtiment de l'année par l'association des architectes néerlandais, symbole d'une filière bois-construction en pleine mutation (Mei architects and planners, 2025). Ce mouvement s'inscrit aussi dans un contexte de fragilisation du résineux, notamment l'épicéa massivement touché par les scolytes, qui pousse fabricants et bureaux d'études - dont l'Autrichien KLH (KLH Massivholz, 2026) et l'entreprise Hasslacher (HASSLACHER, 2026) - à développer des gammes de CLT et de BLC hybrides mêlant feuillus et résineux, combinant disponibilité de la ressource, performance mécanique et diversification des essences.

1.12. Objectifs du mémoire

1.12.1. Objectif principal

L'objectif principal visé par ce mémoire est d'identifier les composants permettant de créer une poutre en bois lamellé-collé associant :

- L'essence la plus à même de résister aux contraintes s'appliquant aux fibres extrêmes, en termes de résistance en flexion axiale et de module local d'élasticité en flexion ;
- L'essence de remplissage, constituant l'âme de la poutre, associant légèreté et caractéristiques mécaniques suffisantes en termes de résistances à la flexion axiale et de module local d'élasticité en flexion ;
- La colle présentant la meilleure résistance en cisaillement.

1.12.2. Sous-objectifs

1) Déterminer les caractéristiques physiques des essences étudiées (taux d'humidité, masse volumique et stabilité dimensionnelle)
2) Caractériser les essences désignées en résistance à la flexion axiale et en module local d'élasticité en flexion
3) Identifier la meilleure colle en résistance au cisaillement
4) Caractériser l'effet d'un joint d'aboutage, en zone de flexion pure, sur le module local d'élasticité en flexion et sur la résistance à la flexion axiale des essences.

À l'origine, le projet prévoyait également de tester l'association d'essences et de colle retenue en délamination, facteur souvent limitant de ce genre de configuration (Bourreau, 2011). Il était aussi prévu de tester la résistance en cisaillement du bois (conformément à l'EN 408) afin de la comparer à la résistance en cisaillement des colles. À l'issue de ces expériences, la poutre finale aurait dû être testée en flexion. En raison du temps disponible pour ce mémoire, ces tests n'ont pas pu être réalisés et feront l'objet d'une étude ultérieure dans le cadre de la thèse de doctorat menée par Tom Mortelmans. Néanmoins, les éprouvettes de cisaillement axial du bois ont été façonnées en atelier (cf. annexe 8).

2. Matériels et Méthodes

Plan matière

Le plan matière suivante contient l'ensemble des éléments constituants les échantillons utilisés dans le cadre de ce mémoire. Le matériel employé est détaillé dans les sections suivantes selon les expérimentations spécifiques.

Tableau 2 : Liste de la matière première

Matière	Quantité	Dimensions
Betula spp.	15 planches	3000x150x42 mm
Quercus rubra	15 planches	3000x150x42 mm
Populus tremula	15 planches	3000x150x42 mm
Alnus glutinosa	15 planches	3000x150x42 mm
Résine PUR 1	1 pot	1L
Résine PUR 2	1 pot	1L
Résine M0	2 pots	1L
Durcisseur M1	2 pots	1L
Durcisseur M2	2 pots	1L

Stockage et entreposage

L'ensemble du matériel a été stocké à l'atelier du Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) à Gembloux. Durant toute la période du mémoire, les planches de bois étaient abritées et ventilées. Chaque éprouvette a été façonnée dans ce même atelier. Les plans de découpe spécifiques à chaque expérimentation sont présentés en annexes 9, 10 et 11. Le détail des machines utilisées pour le façonnage des échantillons est présenté en annexe 12.

Une fois les éprouvettes façonnées, celles-ci ont été stockées dans une chambre conditionnée au LTB à une atmosphère normalisée de 20 ± 2°C et 65 ± 5 % d'humidité relative afin de se rapprocher au maximum du taux d'humidité de référence pour les essais mécaniques du bois (12 %) (EN 384, 2016) (cf. annexe 13).

Équations de correction

Afin d'exprimer les résultats de module local d'élasticité en flexion et de masse volumique à 12% d'humidité, deux équations de correction ont été utilisées conformément à la norme EN 384:2016. Elles sont présentées respectivement en annexes 14 et 15. La simplification de correction pour la résistance à la flexion consiste à ne pas ajuster tant que le taux d'humidité se situe entre 8 et 18%.

Origine des essences

Les planches de chaque essence ont été fournies par des propriétaires forestiers privés membres de la Société Royale Forestière de Belgique (SRFB). Les provenances géographiques de chaque essence sont illustrées sur la figure 7. L'arbre dont provient chaque planche n'est pas connu, tout comme le nombre de planches obtenues par arbre.



Figure 7 : Sites d'approvisionnements et volumes sur pieds correspondants des essences étudiées, carte de l'auteur (source du fond de carte : Forest cover Belgium, Popovic, 2023).

Colles utilisées dans le cadre du mémoire

Deux familles d'adhésifs ont été utilisées dans ce mémoire : les résines polyuréthanes (PUR) (cf. figure 8) et les résines aminoplastes mélamine-urée-formaldéhyde (MUF) (cf. figure 9).

Les colles PUR1 et PUR2 sont des polyuréthanes, soit des polymères résultant de la condensation d'isocyanates (-R-N=C=O) et de polyols ($R\text{-}(OH)_{n\geq 2}$) (cf. figure 8). Ces adhésifs mono-composant et expansifs durcissent au contact de l'humidité du bois. Cette réaction dégage du CO_2, faisant gonfler la colle et de ce fait comblant les interstices du joint de collage. Cette réaction crée des liaisons chimiques directes avec les groupes hydroxyles (-OH) du bois, ce qui explique leur bonne adhérence (Shirmohammadli et al., 2023). Elles sont majoritairement utilisées en menuiserie intérieure (Hout Info Bois, 2023), avec un emploi en assemblages structuraux grandissant (Shirmohammadli et al., 2023). Leur classification normative relève de l'EN 15425.

Les colles MUF1 et MUF2 sont des mélamine-urée-formaldéhyde, soit des polymères résultant de la condensation des monomères mélamine ($C_3H_6N_6$), urée (CH_4N_2O) et formaldéhydes (CH_2O) (cf. figure 9). L'activation de la MUF nécessite soit un apport d'énergie thermique, soit l'ajout d'un durcisseur, en faisant un système bi-composant. Par praticité, c'est ce dernier qui a été choisi. Les MUF1 et MUF2 résultent du mélange d'une même résine de base M0 avec deux durcisseurs différents, M1 pour MUF1 et M2 pour MUF2. Celui-ci déclenche la réaction de polymérisation (i.e. réticulation). Principalement utilisées dans les structures sous abri, sous forme de lamellé-collé, de contreplaqué ou de panneaux de particules, elles confèrent au joint une résistance à l'humidité moyenne à bonne (Hout Info Bois, 2023). La norme EN 301 distingue deux familles de résines — phénoplastes et aminoplastes. Ces résines sont classées en deux types (I et II) selon leur aptitude

à l'emploi dans des conditions climatiques données, elles-mêmes définies par trois classes de service, en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant.

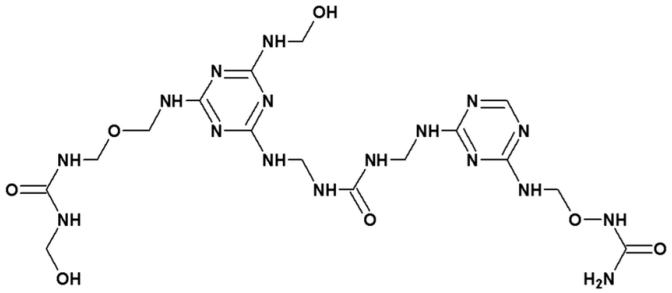


Figure 9 : Structure de résine mélamine-urée-formaldéhyde (source : Solid state NMR investigation of the roman Acqualadroni rostrum: tenth year assessment of the consolidation treatment of the wooden part., Spinella et al., 2021)

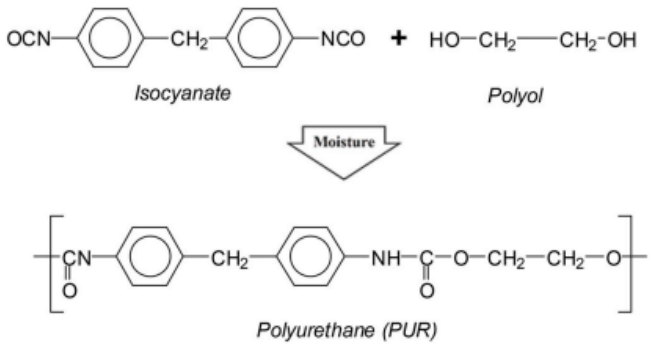


Figure 8 : Mécanisme de formation du polyuréthane (PUR) par réaction isocyanate–polyol (source : One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review, Shirmohammadli et al., 2023)

Processus expérimental

Le tableau 3 représente le processus expérimental de ce mémoire, des explications complémentaires sont données dans les sections suivantes.

Tableau 3 : Processus expérimental du mémoire

Essences	Adhésifs	Nombre de répétitions par essence [n]	Dimensions [mm]	Tests & Normes
Betula spp. *Quercus rubra* *Populus tremula* *Alnus glutinosa*	/	15	30x30x30	Taux d'humidité [W, %] ISO 13061-1:2023
	/	15	30x30x30	Masse volumique [ρ, kg.m^{-3}] ISO 13061-2:2023
	/	15	30x30x30	Retraits radial, tangentiel et volumique [β_r, β_t, β_v, %] ISO 13061-13&14:2024
	/	10-12	540x100x27	Module local d'élasticité en flexion [$E_{m,l}$, N.mm^{-2}] EN 408 § 9:2012 Résistance à la flexion axiale [$f_{m,}$ N.mm^{-2}] EN 408 § 19:2012
	PUR 1 PUR 2 MUF 1 MUF 2	10-20	297x45x45	Résistance au cisaillement des joints de collage [f_v, N.mm^{-2}] EN 14080:2013 – Annexe D
	MUF 2	13-15	670x100x27	Module local d'élasticité en flexion [$E_{m,l}$, N.mm^{-2}] EN 408 § 9:2012 Résistance à la flexion axiale [$f_{m,}$ N.mm^{-2}] EN 408 § 19:2012

2.1. Caractérisation physique

2.1.1. Taux d'humidité - ISO 13061-1:2023

Taux d'humidité des planches séchées à l'air libre en atelier

Le taux d'humidité [*W*, %] des planches séchées à l'air libre a été déterminé selon la norme ISO 13061-1:2023. En matière d'échantillonnage, un cube de 30 mm de côtés a été prélevé sur chaque planche présente en atelier. À raison de 15 planches par essence, un total de 60 cubes a donc été prélevé et testé. 15 échantillons ont donc été analysés pour obtenir les moyennes et écart-types standards du taux d'humidité des bois séchés à l'air libre en atelier par essence.

Le taux d'humidité se calcule comme suit :

$$W,\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} . 100 \quad (1)$$

W : taux d'humidité [%]

m_1 : masse initiale de l'éprouvette avant dessication [g]

m_2 : masse anhydre de l'éprouvette [g]

Équation 1 : Formule du taux d'humidité (ISO 13061-1, 2023)

Les masses initiale et anhydre des éprouvettes ont été mesurées en laboratoire à l'aide d'une balance Sartorius de précision (0.001g) (cf. annexe 16). Les échantillons ont été séchés à l'aide d'une étuve (ThermoScientific HeraTherm) à 103°C pendant 2 jours (cf. annexe 17), temps nécessaire pour que leur masse soit constante.

Taux d'humidité des planches d'essais en flexion

Lors de chaque essai de flexion, un barreau a été prélevé à l'aide d'une scie radiale metabo (KGS 315 Plus) dans chaque planche d'essais. Cette manipulation a eu pour but de déterminer le taux d'humidité des planches au moment des tests (EN 408, 2012).

2.1.2. Masse volumique - ISO 13061-2:2023

Masse volumique des planches séchées à l'air libre en atelier

La masse volumique à une humidité *W* [ρ_W, kg.m^{-3}] des planches séchées à l'air libre a été déterminée selon la norme ISO 13061-2:2023. Cette procédure a été effectuée sur les mêmes cubes ayant servis à la détermination du taux d'humidité, avant leur mise à l'étuve.

La masse volumique à une humidité *W* se calcule comme suit :

$$\rho_W = \frac{m_W}{V_W} \quad (2)$$

ρ_W : masse volumique à une humidité *W* [kg.m^{-3}]

m_W : masse de l'éprouvette pour l'humidité *W* [kg]

V_W: volume de l'éprouvette pour l'humidité *W* [m^3]

Équation 2 : Formule de la masse volumique (ISO 13061-2, 2023)

Les masses des éprouvettes pour l'humidité *W* ont été mesurées à l'aide d'une balance de précision Sartorius. Les volumes des éprouvettes à l'humidité *W* ont été déterminés à l'aide d'une balance de précision par pesée hydrostatique (cf. annexe 18), en convertissant directement la masse d'eau déplacée [g] en son volume respectif [cm^3]. Les résultats ont ensuite été convertis en [$kg.m^{-3}$] par un facteur 1000.

En matière d'échantillonnage, un cube a été prélevé sur chaque planche d'origine. 15 échantillons ont donc été analysés pour obtenir les moyennes et écarts-types standards de la masse volumique par essence.

Masse volumique des planches d'essais en flexion

Lors de chaque essai de flexion, le même barreau ayant servi au taux d'humidité a également servi à la détermination de la masse volumique. Cette manipulation a eu pour but de déterminer la masse volumique des planches au moment des tests (EN 408, 2012).

2.1.3. Stabilité dimensionnelle - ISO 13061-13:2024

La stabilité dimensionnelle du bois désigne son aptitude à conserver ses dimensions face aux variations d'humidité. Elle se caractérise par la mesure des retraits [β, %] du bois dans les différentes directions : radiale, tangentielle et longitudinale. Dans le cadre de ce mémoire, le retrait longitudinal n'a pas été évalué du fait de son caractère négligeable face aux autres (≈ 0%) (Martin, n.d.). Les retraits radiaux [β_r, %] et tangentiels [β_t, %] ont été déterminés selon la norme ISO 13061-13:2024. Le retrait volumique a lui été déterminé selon la norme ISO 13061-14:2024.

Placement des repères

Afin de mesurer ces retraits, des repères ont été placés à l'encre de Chine sur les échantillons à l'aide d'une épingle. L'encre de Chine permet de garantir l'indélébilité des repères lors de l'immersion des échantillons (cf. annexe 19). Les repères ont été placés à équidistance des bords sur la face transversale. Pour cette manipulation, un cube de 30 mm de côtés a été prélevé dans chaque planche présente en atelier. 15 échantillons par essence ont donc été prélevés.

Saturation des échantillons

Une fois les repères placés, les échantillons ont été immergés dans de l'eau oxygénée jusqu'à ce que leur masse saturée soit constante, soit au bout de 2 à 3 jours (cf. annexe 20). Afin d'accélérer l'absorption de l'eau par les échantillons, les récipients contenant les cubes en immersion furent placés dans une cloche sous-vide durant un cycle de 20 min (cf. annexe 21).

Mesures des distances

Lorsque la saturation fut achevée, une première mesure de distance entre les points de repères a été effectuée dans les directions perpendiculaires et tangentielles aux cernes (cf. figure 10) à l'aide d'une table micrométrique Zeiss stéréo (précise à 0.001 mm) (cf. annexe 22).

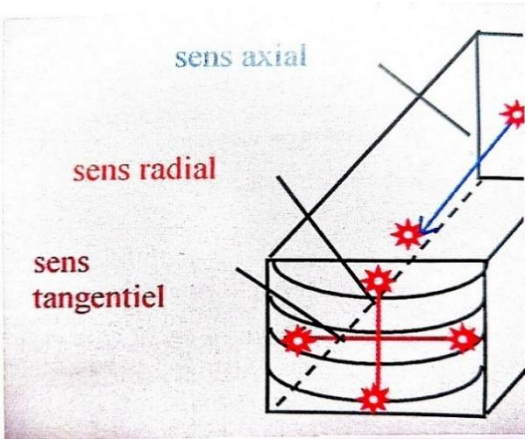


Figure 10 : Schéma de placement des repères et de mesure de distance (LTB, 2026)

Séchage des échantillons

Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre durant une journée afin d'éviter l'apparition de défauts dû à un séchage brusque, puis placés à l'étuve durant 2 à 3 jours, jusqu'à ce que leur masse soit constante. Ensuite, la même opération de mesure des distances entre les points de repère a été effectuée dans ce nouvel état anhydre (≈ 0 %) dans les directions perpendiculaires et tangentielles aux cernes. Les retraits radiaux, tangentiels et volumiques ont été calculés comme suit :

$$\beta_r = \frac{l_{r1} - l_{r2}}{l_{r1}} . 100 \qquad (3)$$

$$\beta_t = \frac{l_{t1} - l_{t2}}{l_{t1}} . 100 \qquad (4)$$

$$\beta_V = \frac{(l_{r1} . l_{t1}) - (l_{r2} . l_{t2})}{(l_{r1} . l_{t1})} . 100 \qquad (5)$$

Équations 3, 4 et 5 : Formules du retrait radial, tangentiel (ISO 13061-13, 2024) et volumique (ISO 13061-14, 2024)

B_r : retrait radial [%]

l_{r1} et l_{t1} : dimensions des échantillons saturés, mesurées dans les directions radiales et tangentielles, respectivement [mm]

B_t : retrait tangentiel [%]

l_{r2} et l_{t2} : dimensions des échantillons anhydres, mesurées dans les directions radiales et tangentielles, respectivement [mm]

B_V : retrait volumique [%]

N.B. Dans la formule (5), le retrait longitudinal n'est pas considéré dû à son caractère négligeable face aux autres types de retrait.

En matière d'échantillonnage, un cube a été prélevé dans chaque planche d'origine selon le plan de découpe présenté en annexe 9. 15 échantillons par essence ont donc été utilisés pour calculer les moyennes et écart-types standards des retraits radiaux, tangentiels et volumiques par essence.

2.2. Caractérisation mécanique

2.2.1. Module local d'élasticité en flexion - EN 408 § 9:2012

Flexion 4 points et moment constant

Le module local d'élasticité en flexion [$E_{m,l}$, N.mm^{-2}] a été déterminé selon la norme EN 408 § 9:2012. Il permet de mesurer la rigidité d'un matériau soumis à une charge en flexion en se basant uniquement sur la zone soumise à un moment fléchissant constant. Ce cas a pu être obtenu grâce à un essai en flexion 4 points, dans lequel la zone de moment fléchissant constant se trouve entre les deux points d'application de la charge (cf. annexe 23).

Dimensions des éprouvettes

La norme EN 408 § 9:2012 impose des distances entre appuis et entre points d'applications de force précises en fonction de la hauteur de la section transversale de la poutre (h) (cf. annexe 24). Dans le cas présent, les dimensions choisies pour les échantillons sont telles qu'illustrées sur la figure 11.

Ces choix ont été opérés selon les standards qui peuvent être retrouvés dans un lamellé-collé industriel (GLTA, n.d.).

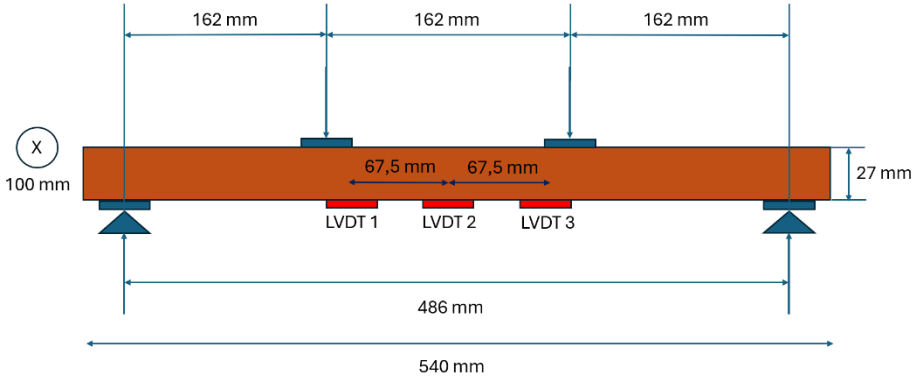


Figure 11 : Dimensions d'un essai de flexion 4 points et placement des LVDT pour la mesure du module local d'élasticité en flexion, schéma de l'auteur

Les LVDT - Linear Variable Differential Transformer

Comme indiqué sur la figure 12, les instruments de mesure utilisés permettant de mesurer le déplacement de l'échantillon chargé sont des LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Le principe de fonctionnement est le suivant : le capteur comprend une bobine primaire excitée par un courant alternatif et deux bobines secondaires symétriques. Un noyau ferromagnétique mobile, solidaire du point de mesure, se déplace axialement entre ces bobines sans contact mécanique avec elles. Ce déplacement modifie le couplage inductif entre la bobine primaire et chacune des secondaires, induisant une différence de tension proportionnelle à la position du noyau. Cette tension différentielle est ensuite convertie en signal de position (Fraden, 2016). La précision de cet appareil est de l'ordre de 10^{-5}mm.

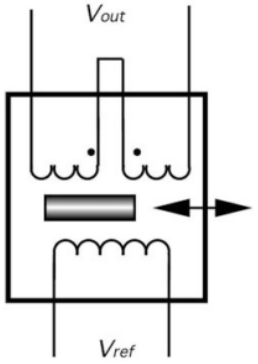


Figure 12 : Schéma du circuit d'un capteur LVDT (Source : Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed., *Fraden, 2016)*

Lien entre la déformée et le moment fléchissant

Le placement de ces LVDT selon l'EN 408 § 9:2012 est également régi par la hauteur de la section transversale de la poutre (*h*) (cf. annexe 24). Le calcul du déplacement qui en découle, appelé ici la flèche [*w,* mm], est spécifique au cas de la flexion pure dans le cadre des essais réalisés. En effet, en flexion pure, la déformation de l'axe neutre d'une poutre initialement droite forme un arc de cercle dont la courbure (*k*) est partout identique (cf. figure 13). Celle-ci est liée au rayon de courbure (*R*) par la formule suivante :

$$k = \frac{1}{R} = \frac{M}{E.I} \quad (6)$$

k : courbure de la poutre (mm^{-1})

R : rayon de courbure (mm)

M : moment fléchissant appliqué (N.mm)

E : module d'élasticité ($N.mm^{-2}$)

I : moment quadratique d'inertie de la section (mm^4)

Équation 6 : Relation fondamentale de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli (Latteur & Rondeaux, 2020-2021)

Cette formule repose sur les hypothèses de petites déformations, de comportement élastique linéaire du matériau dans la direction longitudinale (Loi de Hooke), et de sections planes restant planes après déformation (hypothèse de Bernoulli) (Latteur & Rondeaux, 2020-2021). Le bois étant un matériau orthotrope, les sections droites restent perpendiculaires à l'axe de la poutre lors de la flexion.

Calcul de la flèche

En admettant ce phénomène de déformation en arc de cercle, la flèche des échantillons a pu être calculée comme suit :

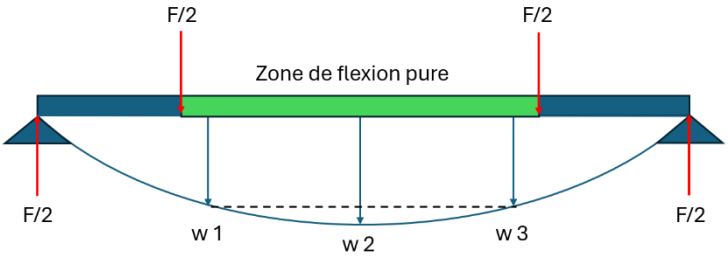


Figure 13 : Schéma de détermination de la flèche en flexion pure, schéma de l'auteur

$$w = w_2 - \frac{(w_1 + w_3)}{2} \quad (7)$$

Équation 7 : Formule de détermination de la flèche en flexion pure

w_1 et w_3 : déplacements mesurés par les LVDT latéraux (mm)

w_2 : déplacement mesuré par le LVDT central (mm)

w : flèche en flexion pure (mm)

Le module local d'élasticité en flexion

Une fois la flèche déterminée, le module local d'élasticité en flexion a pu être calculé selon la formule donnée par l'EN 408 § 9:2012 :

$$E_{m,l} = \frac{a.o_1^2.(F_2 - F_1)}{16.I.(w_2 - w_1)} \quad (8)$$

$E_{m,l}$: Module local d'élasticité en flexion (N.mm^{-2})

a : distance entre le point de chargement et l'appui le plus proche (mm)

o_1 : longueur de base pour la détermination du module d'élasticité (mm)

$(F_2 - F_1)$: Accroissement de force sur la ligne de régression avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux (N)

I : Moment quadratique de la surface (mm^4)

$(w_2 - w_1)$: accroissement de la flèche correspondant à $F_2 - F_1$ (mm)

Équation 8 : Formule du module local d'élasticité en flexion (EN 408 § 9, 2012)

N.B. o_1 correspond à la distance entre les deux LVDT latéraux.

Le comportement élastique linéaire

Sur cette ligne de régression, F_1 et F_2 correspondent respectivement à 0,1 F_{max} et 0,4 F_{max}.
F_{max} correspond à la force maximum appliquée lors de la rupture de l'échantillon.

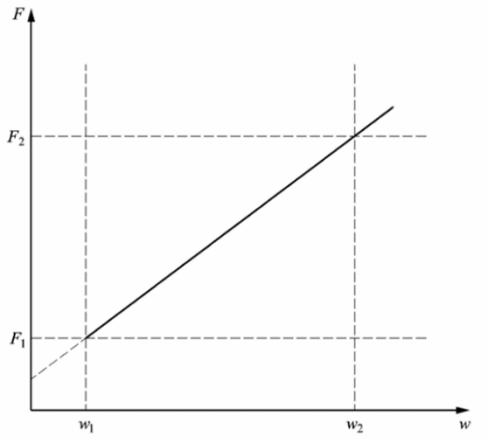


Figure 14 : Courbe force-déplacement dans la plage des déformations élastiques (EN 408 § 9, 2012)

Modalité de chargement

Lors d'un cycle de chargement, la vitesse de déplacement de la tête de chargement devait être constante et ne devait pas dépasser 0,003.h mm.s^{-1}, soit 0,081 mm.s^{-1} dans le cas présent. La vitesse de chargement a donc été fixée à 4,5 mm.min^{-1}, soit 0,075 mm.s^{-1}.

Machine d'essais universelle TIRA

Les essais ont été menés sur une machine d'essais universelle TIRA, d'une capacité de charge maximale de 300 kN (30 tonnes) (cf. annexes 25, 26 et 27). Il s'agit d'une machine électromécanique à portique fermé, équipée d'une tête de chargement à assise sphérique permettant l'application de la charge sans induire de moment parasite, conformément aux exigences de l'EN 408. Le déplacement de la traverse est piloté à vitesse constante, conformément aux vitesses de chargement imposées par la norme selon le type d'essai réalisé (TIRA GmbH, 2026). Les capteurs de déplacement (LVDT) sont synchronisés avec le système d'acquisition de la machine, garantissant la cohérence temporelle entre les mesures de force et de flèche.

Échantillonnage

15 échantillons ont été sélectionnés à partir des 15 planches d'origine pour l'analyse du module local d'élasticité en flexion. La norme EN 408 spécifie que les éprouvettes doivent être sans défauts. Cependant, certaines planches fournies par les gestionnaires présentaient systématiquement des défauts qu'il n'a pas toujours été possible d'éliminer au sciage. Cela a particulièrement été le cas pour l'aulne. Les planches ont néanmoins toutes été testées mais celles identifiées comme présentant des défauts à priori et ayant donné des valeurs aberrantes ont été filtrées pour ne pas biaiser les résultats (cf. annexe 28). Le nombre d'échantillons retenus varie donc de 10 à 12 selon les essences.

Aboutage

Une fois les tests réalisés sur le bois massif, la même méthode a été appliquée pour la détermination du module local d'élasticité en flexion sur le bois abouté selon le dispositif détaillé en figure 15.

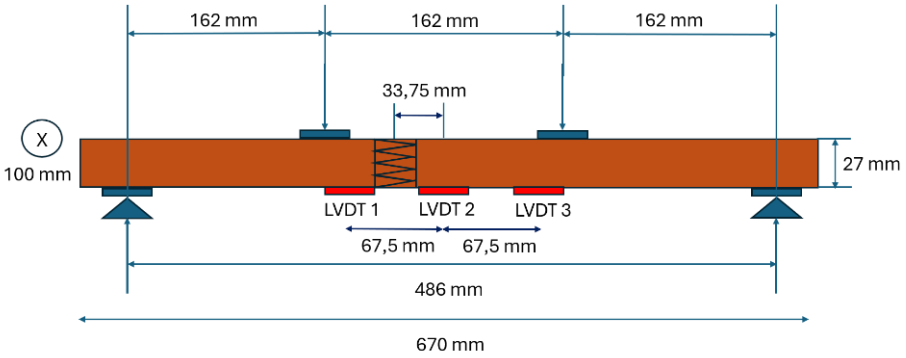


Figure 15 : Schéma du dispositif d'essais en flexion 4 points sur bois abouté, schéma de l'auteur

Échantillonnage et façonnage

Pour chaque essence, 15 échantillons ont été prélevés sur les 15 planches d'origine et façonnés selon le plan de découpe détaillé en annexe 11. Le joint d'aboutage a volontairement été décalé à équidistance du LVDT latéral et central pour ne pas le fragiliser avec les vis de fixation des plaques soutenant les LVDT. L'usinage des entures a été réalisé à la toupie (TS110 Sac Ducuroir) (cf. annexe 29). L'aboutage à entures multiples a été réalisé à l'aide d'une fraise Minifinger Marathon (Leitz), de longueur d'enture ZL = 15 mm et de pas TG = 3,8 mm (Leitz, 2022). Afin d'obtenir deux planches pouvant être aboutées, la fraise a été surélevée d'un demi pas, soit 1,9 mm, à l'aide d'anneaux en acier prévus à cet effet.

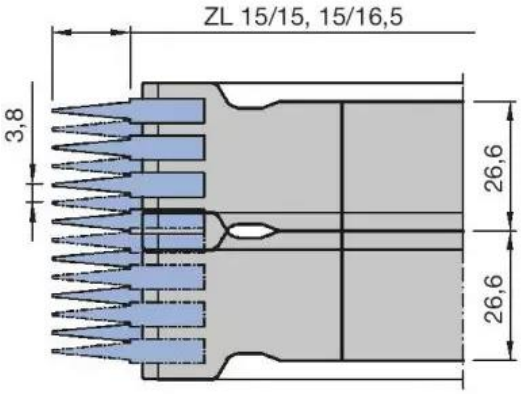


Figure 16 : Schéma du modèle de fraise Minifinger Marathon (source : Minifinger joint cutter, Marathon – ZL 15 mm, TG 3,8 mm [fiche technique en ligne], Leitz, 2022)

La notation 15/16,5 désigne la longueur du jeu visible en fond d'enture après mise sous presse, soit 1,5 mm (Leitz, 2026).

Modalités d'encollage et de pressage

Une fois les entures façonnées, elles ont été encollées avec la colle MUF 2 (cf. section 2.2.3.). Celle-ci a été appliquée à l'aide de lattes en bois permettant le comblage des entures (cf. annexe 30). Environ 40 g de colles ont été appliqués dans chaque jeu d'entures, pesés au préalable à l'aide d'une balance de précision 0.01g Sartorius. Le pressage a été réalisé à l'aide d'un serre-joint horizontal fixé sur un chevalet de 1,5 m (cf. annexe 31). La pression a été contrôlée avec un pèse personne mécanique (Listo L4) disposé entre l'un des mors du serre-joint et la planche. La masse observée sur le pèse personne a été convertie en force, elle-même convertie en pression grâce à la surface de contact entre la planche et le serre-joint (cf. annexe 32). La pression ainsi obtenue était d'environ 0,36 $N.mm^{-2}$. La vis du serre-joint a ensuite été marquée à la longueur correspondante à cette pression pour l'enchainement des pressages. La pression prescrite pour l'encollage des entures est comprise entre 5 et 10 $N.mm^{-2}$ (IRABOIS, 2015). Cette sous-pression constitue une limite de l'étude, en ce sens que les résultats obtenus ne peuvent être directement comparés aux conditions industrielles d'encollage. Dans le cas des comparaisons du module local d'élasticité en flexion et de la résistance en flexion entre les bois aboutés et les bois massifs, cette sous-pression constitue en outre un biais : seul le groupe des bois aboutés est affecté par une qualité de collage dégradée, le bois massif n'impliquant aucun joint collé. Les résultats de ces comparaisons doivent donc être interprétés avec prudence. Cette sous-pression ne constitue en revanche pas un biais pour les comparaisons réalisées entre les différentes planches aboutées elles-mêmes, la même pression ayant été appliquée de manière homogène à l'ensemble de ces éprouvettes.

Le temps de pressage des aboutages était de 2 secondes, jusqu'à ce qu'il y ait un contact suffisant entre les surfaces des entures encollées (IRABOIS, 2015).

La colle a été choisie sur base des tests de cisaillement des joints de collage (cf. section 2.2.3.).

Ce test a été réalisé en vue d'analyser l'impact d'un joint d'aboutage sur le comportement en flexion des planches de bois de chaque essence.

Sélection des planches à abouter

Tout comme les planches de bois massifs, les planches à abouter ont été sélectionnées de façon à minimiser les défauts. À cause de la moindre qualité de certaines planches, il n'a pas toujours été possible de chasser les défauts lors de l'aboutage. Les analyses se concentrent donc sur 13 à 15 planches selon les essences.

2.2.2. Résistance à la flexion axiale - EN 408 § 9:2012

La résistance à la flexion axiale [$f_{m,}$ $N.mm^{-2}$] a été déterminée sur chaque échantillon durant le même essai que le module local d'élasticité en flexion. Chaque essai a donc été effectué jusqu'à la rupture. Ce paramètre a été déterminé suivant la norme EN 408 § 19:2012. Les dimensions du

dispositif sont également régies par la hauteur de la section transversale de la poutre (*h*) (cf. annexe 33).

Paramètre de chargement

En ce qui concerne la vitesse de chargement, celle-ci devait être constante et appliquée de telle sorte que la force maximale soit atteinte en 300 ± 120 s. Des vitesses de chargement estimées ont donc été calculées pour chaque essence sur base de leurs dimensions et caractéristiques mécaniques trouvées dans la littérature (Duyck & Mortelmans, 2025). La méthodologie est présentée en annexe 34. Afin de garder une vitesse constante entre l'essai de module local d'élasticité en flexion et de résistance à la flexion, la valeur de 4,5 mm.min^{-1} a été retenue étant donné sa proximité avec la valeur calculée (≈ 4,86 mm.min^{-1}).

Une fois cette variable fixée, la résistance à la flexion axiale a pu être déterminée comme suit :

$$f_m = \frac{3.F.a}{b.h^2} \qquad (9)$$

f_m : résistance à la flexion axiale (N.mm^{-2})

F : Force (N)

a : distance entre le point de chargement et l'appui le plus proche (mm)

b : largeur de la section transversale (mm)

h : hauteur de la section transversale (mm)

Équation 9 : Formule de la résistance à la flexion axiale (EN 408, 2012)

Une fois ces tests réalisés sur bois massif, ils ont été réalisés selon la même méthode sur le bois abouté afin de comparer le comportement de résistance en flexion axiale des deux profils. Les planches aboutées utilisées pour la détermination du module local d'élasticité en flexion étaient les mêmes que celles utilisées pour le présent test.

2.2.3. Résistance au cisaillement des joints de collage - l'EN 14080:2013 – Annexe D

Échantillonnage et choix du dispositif

La résistance au cisaillement des joints de collage [f_v, N.mm^{-2}] a été déterminée selon l'EN 14080:2013 – Annexe D. Cette norme a été choisie pour maximiser le nombre d'échantillons tout en simplifiant le dispositif d'essais. 2 types de barreaux lamellés-collés ont dû être testés avec 4 colles différentes. Le premier type consiste à tester chaque essence avec elle-même (type mono-essence), tandis que le second consiste à tester chaque essence dense (*Betula spp.* et *Quercus rubra*) avec chaque essence légère (*Populus tremula* et *Alnus glutinosa*) (type bi-essences). Le modèle de poutre visé par ce travail ne reprend pas deux essences denses ensembles, ni deux essences légères ensembles (cf. section 1.12.). Ces combinaisons n'ont donc pas été testées.

L'échantillonnage est synthétisé en figure 17.

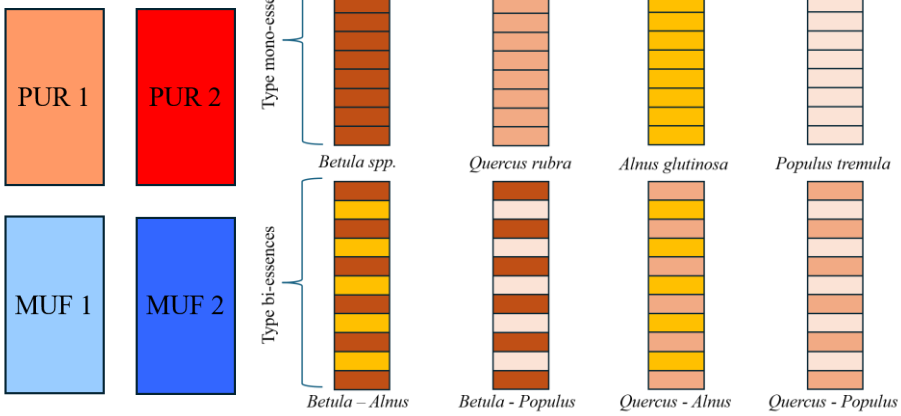


Figure 17 : Échantillonnage du test de résistance en cisaillement des joints de collage, schéma de l'auteur

Façonnage

Les barreaux ont été confectionnés de toutes pièces en atelier au LTB selon le plan de découpe détaillé en annexe 10.

Un barreau d'essais contient 11 blochets de 45x45 mm. Ce schéma a été répété selon les 8 combinaisons d'essences avec les 4 colles. Au total, 32 combinaisons de barreaux lamellés-collés ont été façonnées. À raison de 10 joints de colles par combinaison, 320 joints de colles ont été testés.

Modalités d'encollage

Toutes les colles ont été pesées à l'aide d'une balance de précision Sartorius et appliquées sur les blochets à l'aide de seringues graduées de façon à faire un cordon homogène (cf. annexe 36).

Les colles PUR ont été appliquées à une densité de 200 g/m² et les MUF ont été appliquées à une densité de 500 g/m² selon les conseils des fabricants. Les colles MUF ont été créées à partir d'un ratio résine/durcisseur de 100/50. Pour rappel, les deux colles sont les produits des mélanges de la même résine de base (M0) avec deux durcisseurs différents (M1 et M2). Les mélanges ont été

opérés à l’aide d’une balance de précision Sartorius, de lattes de bois (mélangeurs) et de contenants en plastique.

Les blochets ont été disposés dans des gouttières en panneau particule faites sur mesure. Ces gouttières ont préalablement été recouvertes de papier offset afin d’éviter tout collage indésirable. Une gouttière de 1,5 m pouvait contenir 5 barreaux d’essais, séparés les uns des autres par du papier offset (cf. annexe 37).

Une fois la gouttière comblée, elle était placée sur un serre-joint horizontal de 1,5 m surélevé par un chevalet. La pression a été contrôlée avec un pèse personne mécanique (Listo L4) disposé entre l’un des mors du serre-joint et le barreau. La masse observée sur le pèse personne a été convertie en force, elle-même convertie en pression grâce à la surface de contact entre le barreau et le serre-joint (cf. annexe 38). La pression ainsi obtenue était d'environ 0,49 N/mm². La vis du serre-joint a ensuite été marquée à la longueur correspondante à cette pression pour l’enchainement des pressages. La pression prescrite pour l'encollage des lamelles d'un BLC est comprise entre 0,6 et 1 N/mm² (Finlam, 2026). Cette légère sous-pression ne constitue pas un biais, la même pression d'encollage ayant été appliquée à l'ensemble des barreaux d'essais, quelle que soit la colle testée. Elle constitue néanmoins une limite de l'étude, dans la mesure où le classement relatif des colles observé dans ces conditions n'est pas garanti d'être strictement identique à celui qui serait obtenu dans des conditions de pression conformes à la prescription industrielle.

Le temps de pressage était d'environ 24 h, tandis que les temps préconisés par les fabricants de BLC varient de 20 min à 2 h (Finlam, 2026). Ce temps de pressage prolongé a pu favoriser un reflux différentiel des colles selon leur viscosité respective, susceptible de faire varier l'épaisseur du joint d'une colle à l'autre - épaisseur qui n'a pas été mesurée dans cette étude. Ce facteur constitue ainsi une limite supplémentaire, bien qu'il ait été appliqué de façon homogène à l'ensemble des barreaux et ne remette donc pas en cause la comparabilité relative des colles entre elles.

Dispositif d’essais

La norme EN 14080:2013 décrit un dispositif d’essais tel qu’illustré en annexe 40. Afin de s’en rapprocher au maximum, un dispositif a été mis en place à l’aide de l’équipe technique de la Faculté Polytechnique de l’Université de Mons (cf. annexe 41) :

Les dimensions du dispositif sont reprises en annexe 42.

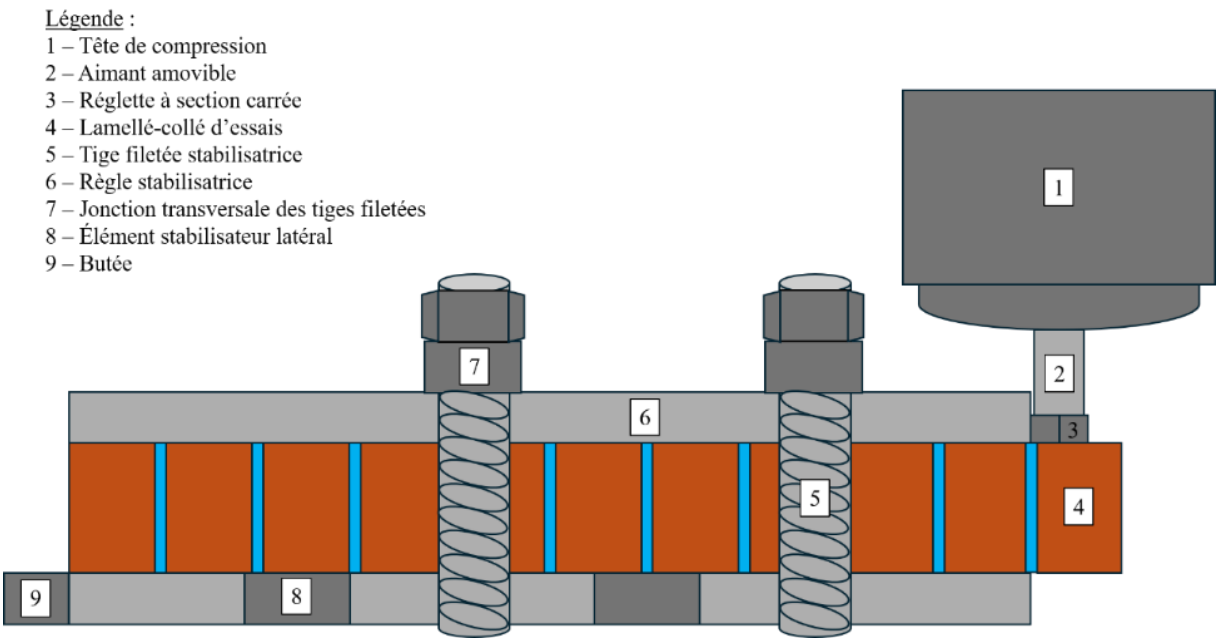


Figure 18 : Dispositif d'essais de résistance en cisaillement des joints de collage, schéma de l'auteur

La
résistance en cisaillement du joint de colle peut être déterminée selon la formule suivante :

$$f_v = k_v . \frac{F_u}{A} \qquad (10)$$

f_v : résistance au cisaillement ($N.mm^{-2}$)

F_u : charge de rupture (N)

A : Aire de la surface de cisaillement (mm^2)

$A = b\,t$ pour un barreau d'essais

b : largeur (mm)

t : épaisseur (mm)

k_v : facteur $k_v = 0{,}78 + 0.0044\,t$

Équation 10 : Formule de la résistance au cisaillement des joints de collage (EN 14080, 2013)

Le facteur k_v permet de corriger la résistance au cisaillement des éprouvettes d'essai pour lesquelles l'épaisseur de la surface de cisaillement parallèlement au fil est inférieure à 50 mm. La norme EN 14080:2013 spécifie une largeur (*b)* et une épaisseur (*t*) comprises entre 40 et 50 mm. Dans le cas présent, les sections produites étaient carrées de 45 mm de côtés.

Lors de chaque essai, le pourcentage de rupture dans le bois a été estimé visuellement, arrondi au multiple de 5 le plus proche. L'annexe 43 présente des exemples de ruptures dans le bois au multiple de 10 le plus proche en guise d'exemple.

N.B. Deux lots complets de 8 combinaisons d'essences ont été confectionnés à posteriori des premiers essais. Le premier lot contenait les 8 combinaisons encollées avec la colle PUR 1 appliquée à 500 g/m² et le second contenait les 8 combinaisons encollées avec la colle PUR 2

appliquée à 500g/m². Cette manipulation a été effectuée en vue de comparer les colles selon la même densité d'application.

2.3. Traitement de données et analyses statistiques

Les applications de formules ainsi que les statistiques descriptives ont été réalisées avec Excel. Les statistiques descriptives sont synthétisées sous forme de tableau comprenant la moyenne et l'écart-type de l'échantillon, accompagnés du nombre de répétitions sous forme (n = x).

Les tests d'inférence statistique ainsi que les graphiques ont été réalisés avec GraphPad Prism (version 8.0.1). La logique suivie durant chaque analyse a été de tester les hypothèses suivantes dans l'ordre : la normalité de chaque échantillon, l'homoscédasticité des échantillons, puis l'égalité des tendances centrales (moyennes ou médianes, selon le résultat des tests précédents) entre les échantillons.

Pour ce faire, une distinction a été opérée entre les analyses portant sur deux groupes ou plus. Les arbres décisionnels utilisés afin de poursuivre ces analyses sont présentés en annexe 44 et 45.

Les résultats de chaque test sont présentés sous forme de tableau. En ce qui concerne les tests de comparaisons multiples des tendances centrales, les niveaux de significativité ont été reportés sur les graphiques.

3. Résultats

N.B. toutes les valeurs de la littérature présentées dans cette section sont issues de la base de données créée par Arthur Duyck et Tom Mortelmans (*Technical, Environmental, and Economic Properties of Several Wood Species from Forests of Western Europe, 2025*). Le nombre de références qu'ils ont utilisées pour calculer les moyennes et écart-types par essence est repris dans les tableaux sous forme (r = x), l'ensemble de ces sources est disponible en bibliographie.

3.1. Caractérisation physique

3.1.1. Taux d'humidité des planches séchées à l'air libre en atelier

Le taux d'humidité des planches séchées à l'air libre en atelier est repris en annexe 46.

3.1.2. Masse volumique

Les masses volumiques expérimentales à 12 % d'humidité sont proches des valeurs de la littérature pour *Quercus rubra* (718,11 vs 725 kg.m⁻³) et *Alnus glutinosa* (540,99 vs 540 kg.m⁻³), avec chevauchement des intervalles. Un écart plus marqué est observé pour *Betula spp.* (627,66 vs 665 kg.m⁻³) et *Populus tremula* (519,24 vs 495 kg.m⁻³), bien que les intervalles se chevauchent également dans les deux cas. Les valeurs de référence proviennent d'un nombre variable de sources (r = 2 à 9 selon l'essence).

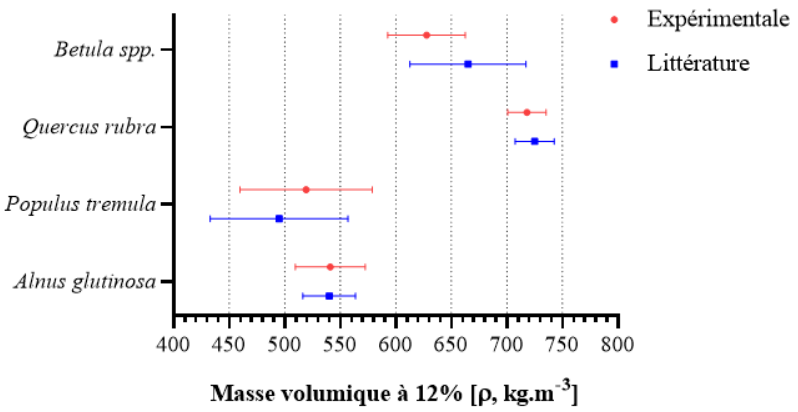


Figure 19 : Moyennes et écart-types des masses volumiques à 12% expérimentales et issues de la littérature par essence

Tableau 4 : Moyennes et écart-types des masses volumiques à 12% expérimentales et issues de la littérature par essence

Essence	ρ12% $_{exp.}$ [kg.m^{-3}]	ρ12% $_{litt.}$ [kg.m^{-3}]
Betula spp.	627,66 ± 34,98 (n = 15)	665 ± 52.3 (r = 9)
Quercus rubra	718,11 ± 17,3 (n = 15)	725 ± 17.5 (r = 7)
Populus tremula	519,24 ± 59,63 (n = 15)	495 ± 62.04 (r = 2)
Alnus glutinosa	540,99 ± 31,42 (n = 15)	540 ± 23.8 (r = 7)

3.1.3. Stabilité dimensionnelle

Tableau 5 : Moyennes et écart-types des retraits radiaux, tangentiels et volumiques expérimentaux par essence

Essence	Retrait radial [β_r, %]	Retrait tangentiel [β_t, %]	Retrait volumique [β_v, %]
Betula spp.	5,11 ± 1,3 (n = 15)	9,72 ± 1,87 (n = 15)	14,33 ± 2,48 (n = 15)
Alnus glutinosa	4,46 ± 1,51 (n = 15)	8,98 ± 2,02 (n = 15)	13,04 ± 2,47 (n = 15)
Quercus rubra	3,73 ± 2,05 (n = 15)	9,23 ± 1,93 (n = 15)	12,62 ± 2,64 (n = 15)
Populus tremula	5,26 ± 1,85 (n = 15)	9,57 ± 1,5 (n = 15)	14,31 ± 2,6 (n = 15)

Pour le retrait radial, les valeurs expérimentales et de la littérature sont proches pour *Quercus rubra* (3,73 vs 4,2 %), *Alnus glutinosa* (4,46 vs 4,4 %) et *Betula spp.* (5,11 vs 5,0 %, écart faible), tandis qu'un écart plus marqué apparaît pour *Populus tremula* (5,26 vs 3,9 %).

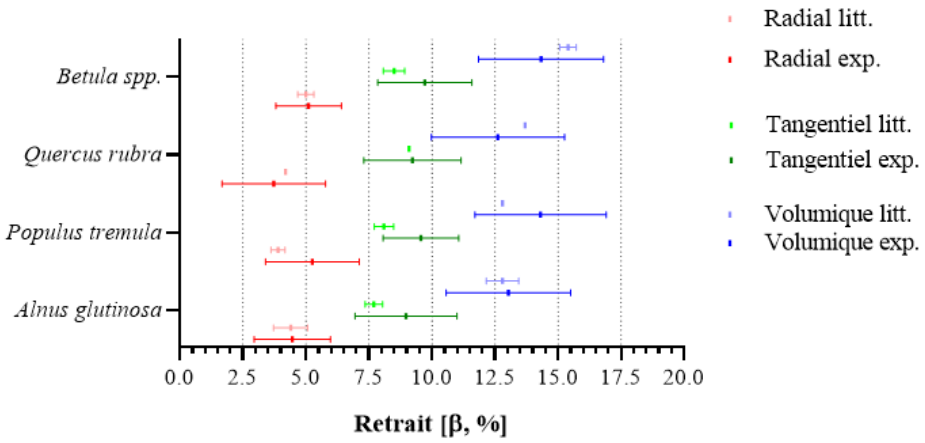


Figure 20 : Moyennes et écart-types des retraits expérimentaux et issus de la littérature par essence

Pour le retrait tangentiel, les valeurs expérimentales sont systématiquement supérieures à celles de la littérature, avec des écarts de l'ordre de 0,1 à 1,5 % selon l'essence (*Betula spp.* : 9,72 vs 8,5 % ; *Quercus rubra* : 9,23 vs 9,1 % ; *Populus tremula* : 9,57 vs 8,1 % ; *Alnus glutinosa* : 8,97 vs 7,7 %). Pour le retrait volumique, les valeurs restent cohérentes, avec un écart minimal pour *Betula spp.* (14,33 vs 15,4 %) et *Alnus glutinosa* (13,04 vs 12,8 %), et un écart plus visible pour *Populus tremula* (14,31 vs 12,8 %).

Le nombre de références mobilisées dans la littérature varie de 2 à 6 selon l'essence et le type de retrait (contre n = 14–15 pour les données expérimentales), avec les échantillons bibliographiques les plus restreints pour *Populus tremula* et *Alnus glutinosa* (r = 2 à 3).

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution non normale pour *Betula spp.* (p = 0,0042) et une normalité acceptée pour les trois autres essences (*Quercus rubra* : p = 0,3012 ; *Populus tremula* : p = 0,1036 ; *Alnus glutinosa* : p = 0,7914) (cf. annexe 47). En raison de cette hétérogénéité, un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour comparer les quatre essences (n = 60 valeurs, 4 groupes) (cf. annexe 48). Il ne révèle pas de différence significative des médianes de retrait radial entre essences (p = 0,0638). Le box-plot montre une médiane la plus faible pour *Quercus rubra* (3,73%) et une dispersion plus étendue pour cette même essence par rapport aux trois autres.

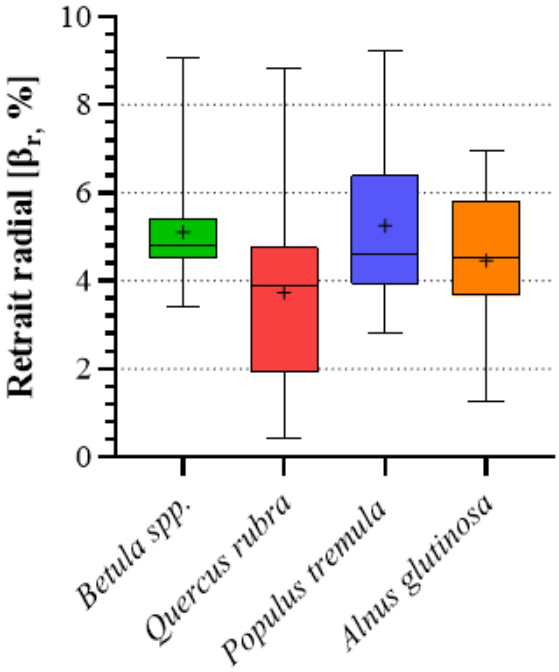


Figure 21 : Retraits radiaux expérimentaux par essence

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution normale pour les quatre essences (*Betula spp.* : p = 0,1998 ; *Quercus rubra* : p = 0,9092 ; *Populus tremula* : p = 0,9478 ; *Alnus glutinosa* : p = 0,9873) (cf. annexe 49). Le test de Bartlett confirme l'homoscédasticité des variances (p = 0,7432). Les conditions étant remplies, une ANOVA a été appliquée pour comparer les quatre essences (n = 60 valeurs, 4 groupes), qui ne révèle pas de différence significative des moyennes de retrait tangentiel entre essences (p = 0,6885 ; R^2 = 0,0262) (cf. annexe 50). Le box-plot montre des moyennes proches entre essences (≈ 9,0 à 9,8 %), avec une dispersion plus resserrée pour *Populus tremula* (cf. annexe 51).

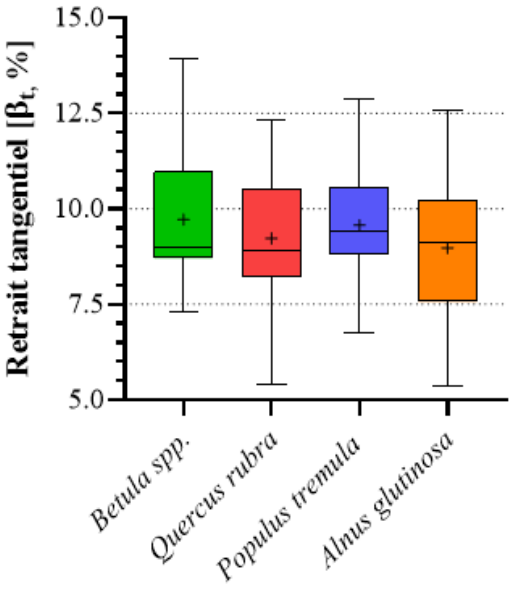


Figure 22 : Retraits tangentiels expérimentaux par essence

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution non normale pour *Betula spp.* (p = 0,005), *Quercus rubra* (p = 0,0206) et *Populus tremula* (p = 0,0262), et une normalité acceptée pour *Alnus glutinosa* (p = 0,8726) (cf. annexe 52). En raison de cette hétérogénéité, un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour comparer les quatre essences (n = 60 valeurs, 4 groupes) (cf. annexe 53). Il ne révèle pas de différence significative des médianes de retrait volumique entre essences (p = 0,0703). Le box-plot montre une médiane légèrement plus faible pour *Quercus rubra* (~12,5 %) et des médianes proches pour les trois autres essences (~13,0 à 14,5 %).

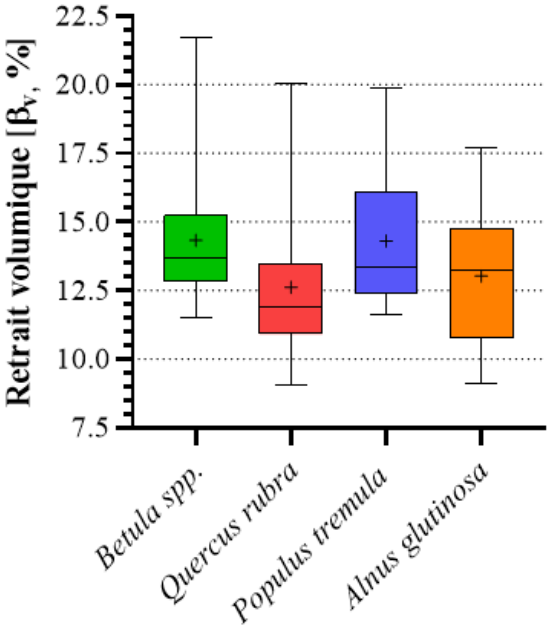


Figure 23 : Retraits volumiques expérimentaux par essence

La figure présente la relation entre le retrait volumique (β_v, %) et la masse volumique (ρ, kg·m⁻³) pour les quatre essences étudiées, avec une régression linéaire ajustée séparément pour chaque espèce. Pour Betula spp., la masse volumique varie de 622 à 760 kg·m⁻³ pour des valeurs de β_v comprises entre 11 et 22%, avec une pente de régression négative (Y = -0,0268·X + 32,17 ; R^2 = 0,0204 ; p = 0,6906). Pour Quercus rubra, ρ s'étend d'environ 650 à 744 kg·m⁻³ pour des β_v compris entre 10 et 20%, avec une pente positive (Y = 0,00682·X + 7,816 ; R^2 = 0,00457 ; p = 0,8108). Pour Populus tremula, ρ varie d'environ 465 à 681 kg·m⁻³ pour des β_v compris entre 10,5 et 20%, avec une pente positive (Y = 0,00855·X + 12,39 ; R^2 = 0,00769 ; p = 0,7657). Pour Alnus glutinosa, ρ s'étend d'environ 511 à 600 kg·m⁻³ pour des β_v compris entre 9 et 18%, avec une pente positive (Y = 0,0302·X - 3,765 ; R^2 = 0,0980 ; p = 0,2535). Les quatre régressions présentent des valeurs non-significative de p supérieures à 0,05 et des R^2 inférieurs à 0,10.

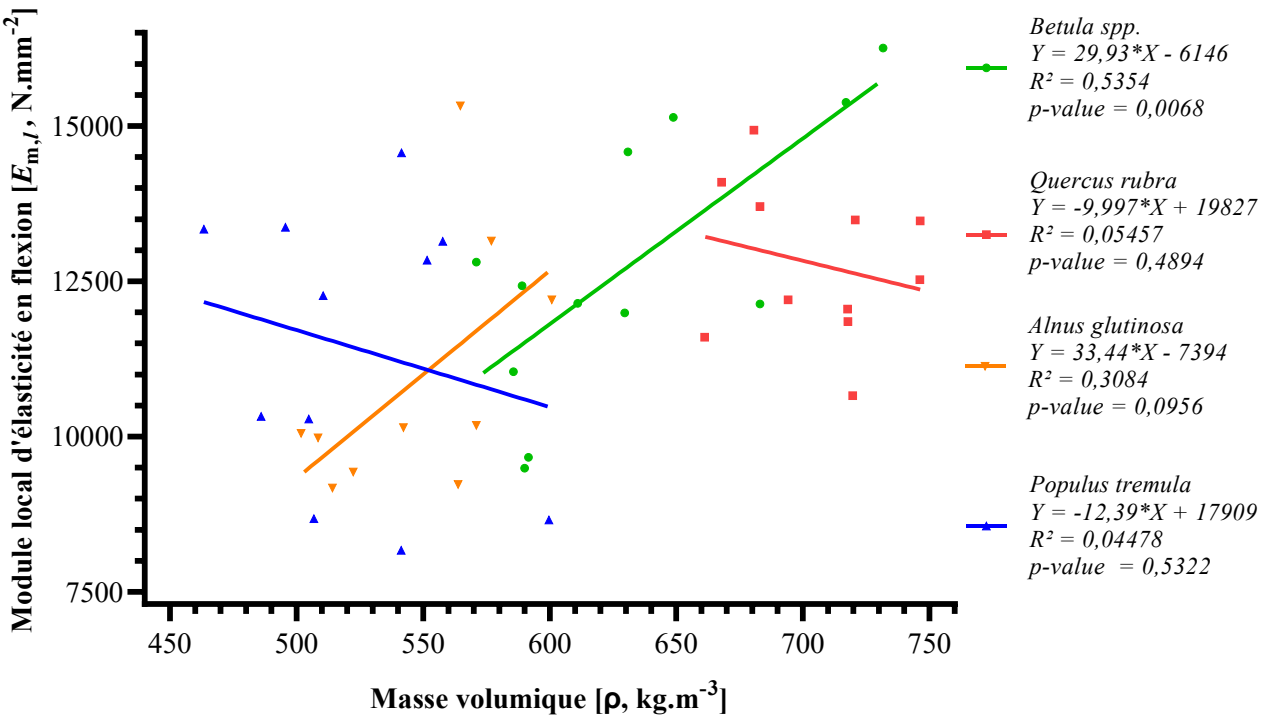


Figure 24 : Régression linéaire du retrait volumique en fonction de la masse volumique, graphique de l'auteur

3.2. Caractérisation mécanique

3.2.1. Module local d'élasticité en flexion des bois massifs

Les courbes force-flèche des éprouvettes représentatives de chaque essence (*Betula spp.* B.7, *Quercus rubra* C.3, *Populus tremula* T.10, *Alnus glutinosa* A.13) présentent une phase initiale quasi linéaire jusqu'à environ 5000–7500 N, suivie d'une inflexion progressive de la pente jusqu'à la charge maximale. *Quercus rubra* atteint la force maximale la plus élevée (~13000 N pour une flèche d'environ 2,0 mm), suivie par *Betula spp.* (~10200 N à ~1,9 mm) et *Populus tremula* (~10800 N à ~1,5 mm). *Alnus glutinosa* présente la force maximale la plus faible (~9000 N) pour une flèche d'environ 1,7 mm.

Les pentes initiales sont proches entre *Betula spp.*, *Populus tremula* et *Quercus rubra*, tandis que *Alnus glutinosa* montre une pente initiale moins marquée.

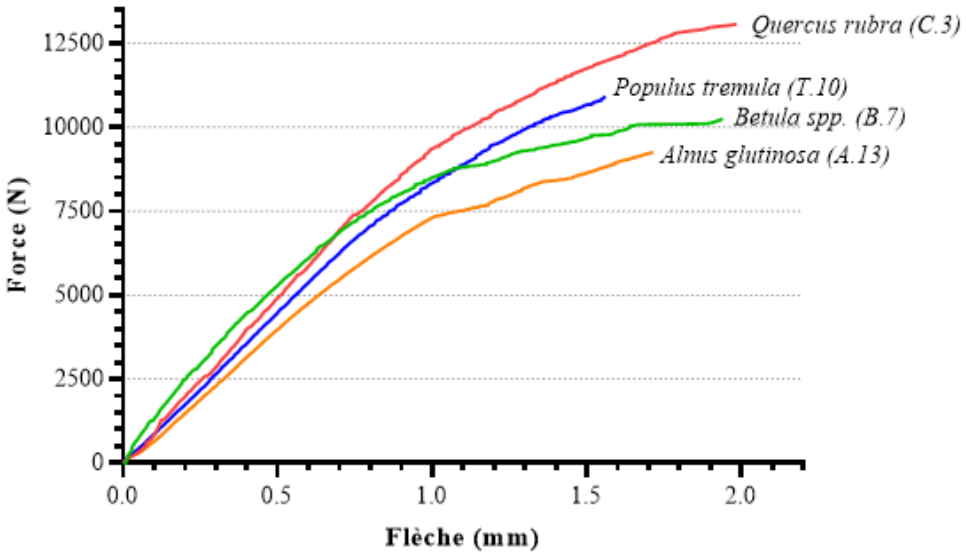


Figure 25 : Courbes d'essais Force-Flèche des essences

Tableau 6 : Module local d'élasticité en flexion expérimental et issu de la littérature par essence

Essence	$E_{m,l}$ 12% exp. [N.mm^{-2}]	$E_{m,l}$ 12% litt. [N.mm^{-2}]
Betula spp.	12542,16 ± 2172,55 (n = 12)	14800 ± 1069.2 (r = 5)
Quercus rubra	12641,7 ± 1264,88 (n = 11)	12450 ± 201.99 (r = 3)
Populus tremula	11151,17 ± 2192,35 (n = 11)	9350 ± 1274.32 (r = 4)
Alnus glutinosa	10715,11 ± 1984,84 (n = 10)	10400 ± 838.96 (r = 4)

Le module local d'élasticité en flexion expérimental est proche de la valeur de littérature pour *Quercus rubra* (12641,7 vs 12450 N.mm⁻²) et *Alnus glutinosa* (10715,11 vs 10400 N.mm⁻²), avec chevauchement des intervalles dans les deux cas. Un écart plus marqué est observé pour *Betula spp.* (12542,16 vs 14800 N.mm⁻²) et *Populus tremula* (11151,17 vs 9350 N.mm⁻²), bien que les intervalles se chevauchent également. Le nombre de références mobilisées dans la littérature varie de r = 3 à 5 selon l'essence, tandis que le nombre d'échantillons n = 10 à 12 pour les données expérimentales.

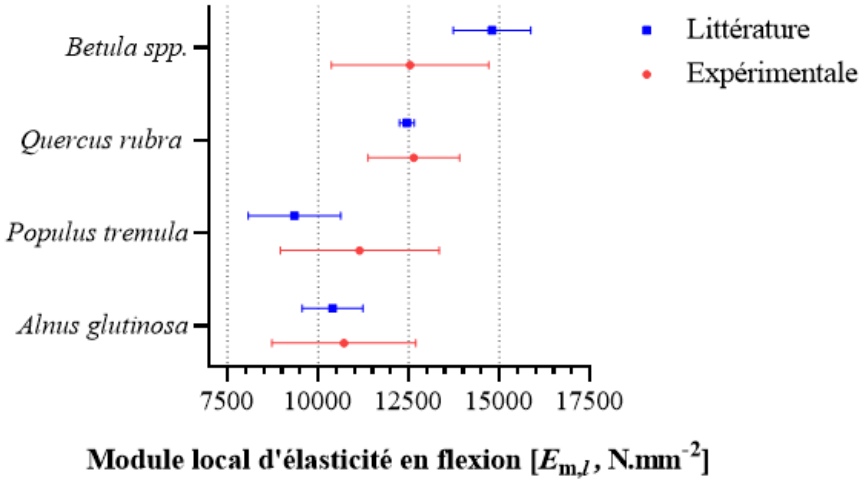


Figure 26 : Module local d'élasticité en flexion expérimental et issu de la littérature par essence

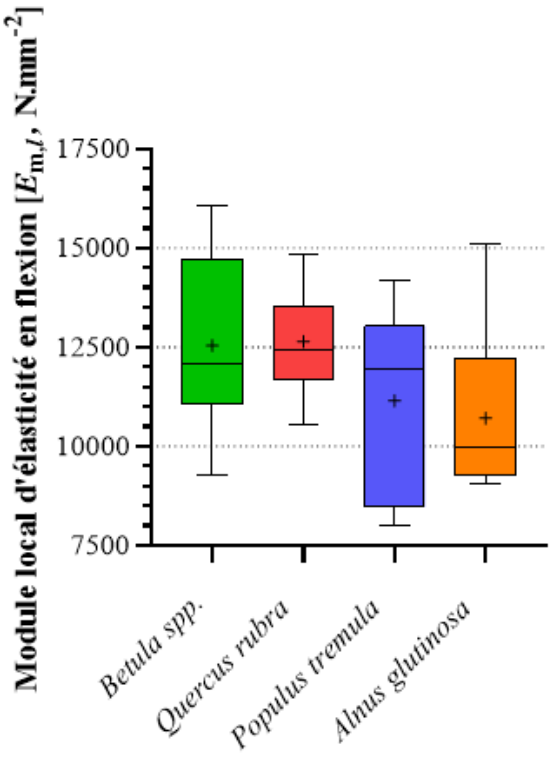


Figure 27 : Module local d'élasticité en flexion par essence, graphique de l'auteur

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution normale pour *Betula spp.* (p = 0,5555), *Quercus rubra* (p = 0,9335) et *Populus tremula* (p = 0,1759), et une non-normalité pour *Alnus glutinosa* (p = 0,0145) (cf. annexe 54). En raison de cette hétérogénéité, un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour comparer les quatre essences (n = 44 valeurs, 4 groupes) (cf. annexe 55). Il ne révèle pas de différence significative des médianes du module local d'élasticité en flexion entre essences (p = 0,098). Le box-plot montre une médiane plus élevée pour *Quercus rubra* (~12500 N.mm⁻²) et *Betula spp.* (~12500 N.mm⁻²), et une médiane plus faible pour *Populus tremula* et *Alnus glutinosa* (~10000–11000 N.mm⁻²), avec une dispersion plus étendue pour *Populus tremula.*

Tableau 7 : Masses volumiques des essences lors des essais de flexion

Essence	Masse volumique expérimentale [ρ, kg/m³]
Betula spp.	631,72 ± 53,68 (n = 12)
Quercus rubra	708,12 ± 25,98 (n = 11)
Populus Tremula	522,86 ± 46,34 (n = 11)
Alnus glutinosa	542,4 ± 32,34 (n = 10)

La régression du module local d'élasticité en flexion en fonction de la masse volumique montre une relation significative pour *Betula spp.* (Y = 29,93·X – 6146 ; R² = 0,5354 ; p = 0,0068), avec une pente positive. Pour les trois autres essences, la relation n'est pas significative : *Alnus glutinosa* (R² = 0,3084 ; p = 0,0956), *Quercus rubra* (R² = 0,05457 ; p = 0,4894) et *Populus tremula* (R² = 0,04478 ; p = 0,5322), ces deux dernières présentant une pente négative. Les coefficients de détermination varient de 0,045 à 0,535 selon l'essence.

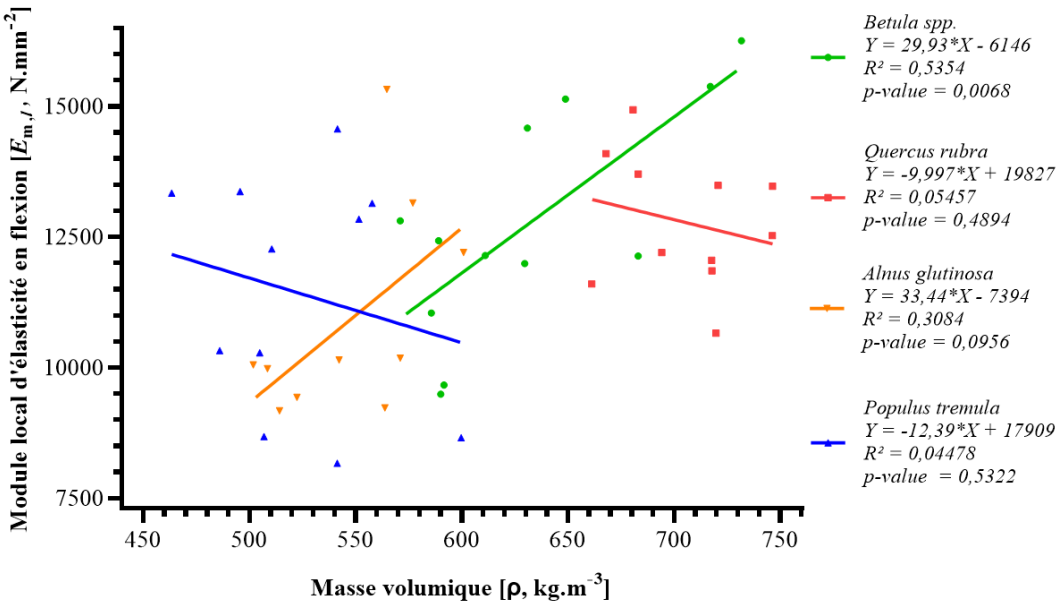


Figure 28 : Régressions linéaires du MOE en fonction de la masse volumique par essence

Tableau 8 : Taux d'humidité des essences lors des essais de flexion

Essence	Taux d'humidité (%)
Alnus glutinosa	10,53 ± 0,35 (n = 12)
Betula spp.	10,35 ± 0,31 (n = 11)
Quercus rubra	11,02 ± 0,34 (n = 11)
Populus Tremula	9,69 ± 0,35 (n = 10)

La régression du module local d'élasticité en flexion en fonction du taux d'humidité montre une relation significative pour *Populus tremula* (Y = −4616·X + 56083 ; R² = 0,4198 ; p = 0,0311), avec une pente négative. Pour les trois autres essences, la relation n'est pas significative : *Quercus rubra* (R² = 0,2736 ; p = 0,0987), *Betula spp.* (R² = 0,2019 ; p =

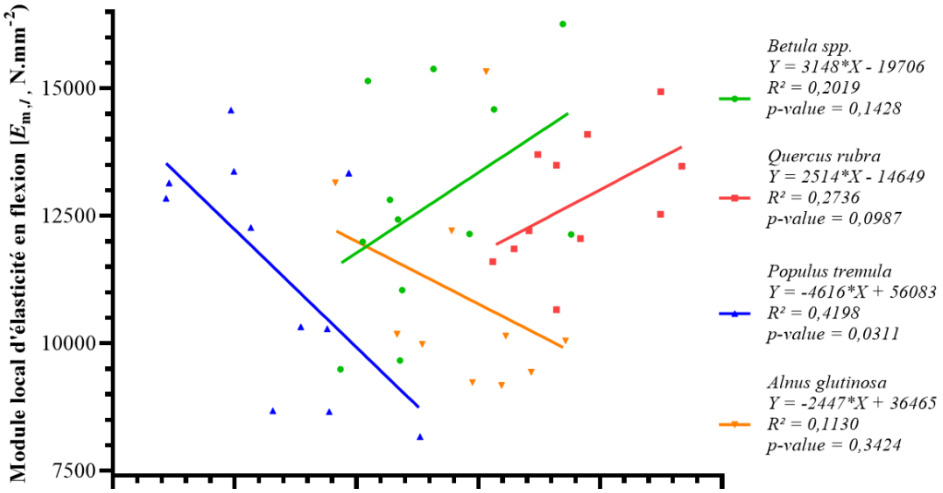


Figure 29 : Régression linéaire du MOE en fonction du taux d'humidité des essences

0,1428) et *Alnus glutinosa* (R^2 = 0,1130 ; p = 0,3424), ces dernières présentant néanmoins des pentes de signe opposé (positive pour *Betula spp.* et *Quercus rubra*, négative pour *Alnus glutinosa*). Les coefficients de détermination varient de 0,113 à 0,420 selon l'essence.

3.2.2. Module local d'élasticité en flexion des bois aboutés

Les courbes force-flèche des éprouvettes aboutées représentatives de chaque essence (*Betula spp.* B.1, *Quercus rubra* C.1, *Populus tremula* T.10, *Alnus glutinosa* A.12) présentent une phase initiale quasi linéaire, suivie d'une inflexion progressive jusqu'à la rupture. *Quercus rubra* atteint la force maximale la plus élevée (~9800 N pour une flèche d'environ 1,3 mm). *Betula spp.* et *Populus tremula* montrent des forces maximales proches (~8100 - 8300 N) pour des flèches d'environ 0,9 - 1,0 mm. *Alnus glutinosa* présente la force maximale la plus faible (~6600 N) pour une flèche d'environ 1,2 mm. Les pentes initiales sont proches entre les quatre essences, avec une pente légèrement plus faible pour *Alnus glutinosa*.

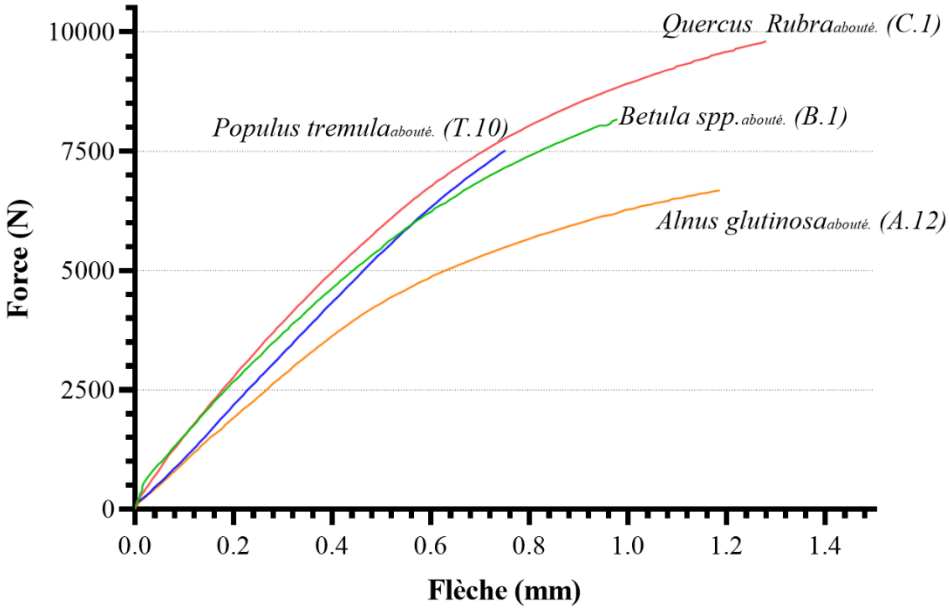


Figure 30 : Courbe d'essais Force-Flèche des essences aboutées

Tableau 9 : Module local d'élasticité en flexion expérimental des essences aboutées

Essence	$E_{m,l}$ exp. [N.mm^{-2}]
Betula spp.	13112,79 ± 3779,93 (n = 14)
Quercus rubra	13610,54 ± 1655,8 (n = 15)
Populus tremula	13510,31 ± 4128,27 (n = 14)
Alnus glutinosa	11210,68 ± 2349,98 (n = 13)

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution normale pour les quatre essences (*Betula spp.* : p = 0,1969 ; *Quercus rubra* : p = 0,8516 ; *Populus tremula* : p = 0,0901 ; *Alnus glutinosa* : p = 0,9162) (cf. annexe 56). Le test de Bartlett révèle en revanche une hétéroscédasticité des variances (p = 0,0081) (cf. annexe 57). En raison de cette inégalité des variances, une ANOVA de Welch a été appliquée pour comparer les quatre essences (n = 56 valeurs, 4 groupes), qui révèle une différence significative des moyennes du module d'élasticité en flexion entre essences (p =

0,0453) (cf. annexe 58). Le test post-hoc de Games-Howell identifie une différence significative entre *Quercus rubra* et *Alnus glutinosa*. Le box-plot montre une médiane plus faible pour *Alnus glutinosa* (~10500 N.mm⁻²) comparée aux trois autres essences (~13000–14000 N.mm⁻²), avec la dispersion la plus étendue pour *Populus tremula*.

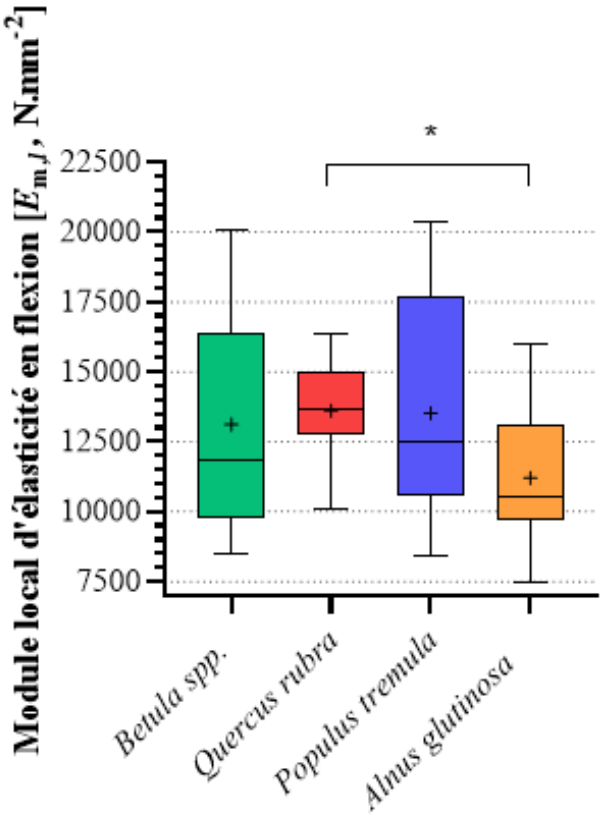


Figure 31 : Module local d'élasticité en flexion des essences aboutées, graphique de l'auteurFigure 31 : Module local d'élasticité en flexion des essences aboutées

3.2.3. Comparaison du module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et bois abouté

Le module local d'élasticité en flexion des éprouvettes aboutées est supérieur ou proche de celui des éprouvettes massives pour les quatre essences : *Betula spp.* (13112,79 vs 12542,16 N.mm⁻²), *Quercus rubra* (13610,54 vs 12641,7 N.mm⁻²), *Populus tremula* (13510,31 vs 11151,17 N.mm⁻²) et *Alnus glutinosa* (11210,68 vs 10715,11 N.mm⁻²). Les écarts-types sont plus élevés pour les éprouvettes aboutées que pour les éprouvettes massives dans les quatre cas.

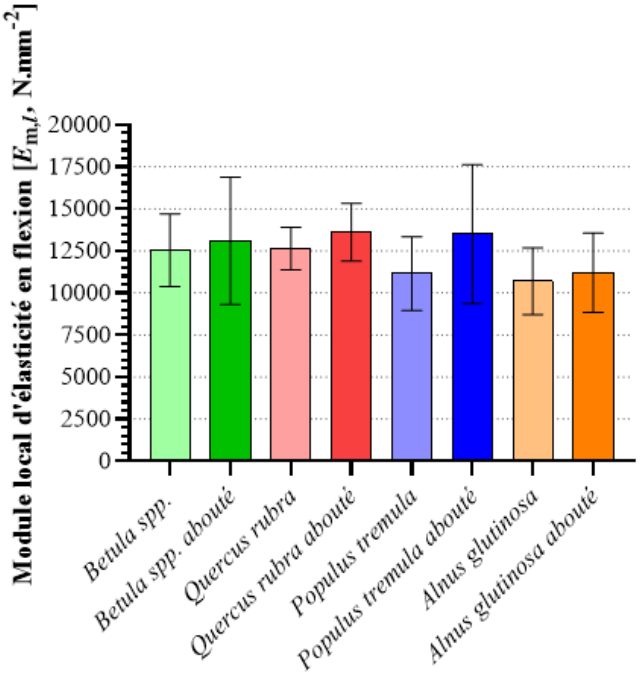


Figure 33 : Comparaison des MOE des essences en bois massif et abouté

Pour chacune des quatre essences, la normalité des distributions a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk (cf. annexe 59). Celle-ci est confirmée pour l'ensemble des configurations, à l'exception d'*Alnus glutinosa* massif (p = 0,0145). En conséquence, un test t de

Tableau 10 : Module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et abouté

Essence	$E_{m,l}$ 12% Massif $_{exp.}$ [N.mm^{-2}]	$E_{m,l}$ Abouté $_{exp.}$ [N.mm^{-2}]
Betula spp.	12542,16 ± 2172,55 (n = 12)	13112,79 ± 3779,93 (n = 14)
Quercus rubra	12641,7 ± 1264,88 (n = 11)	13610,54 ± 1655,8 (n = 15)
Populus tremula	11151,17 ± 2192,35 (n = 11)	13510,31 ± 4128,27 (n = 14)
Alnus glutinosa	10715,11 ± 1984,84 (n = 10)	11210,68 ± 2349,98 (n = 13)

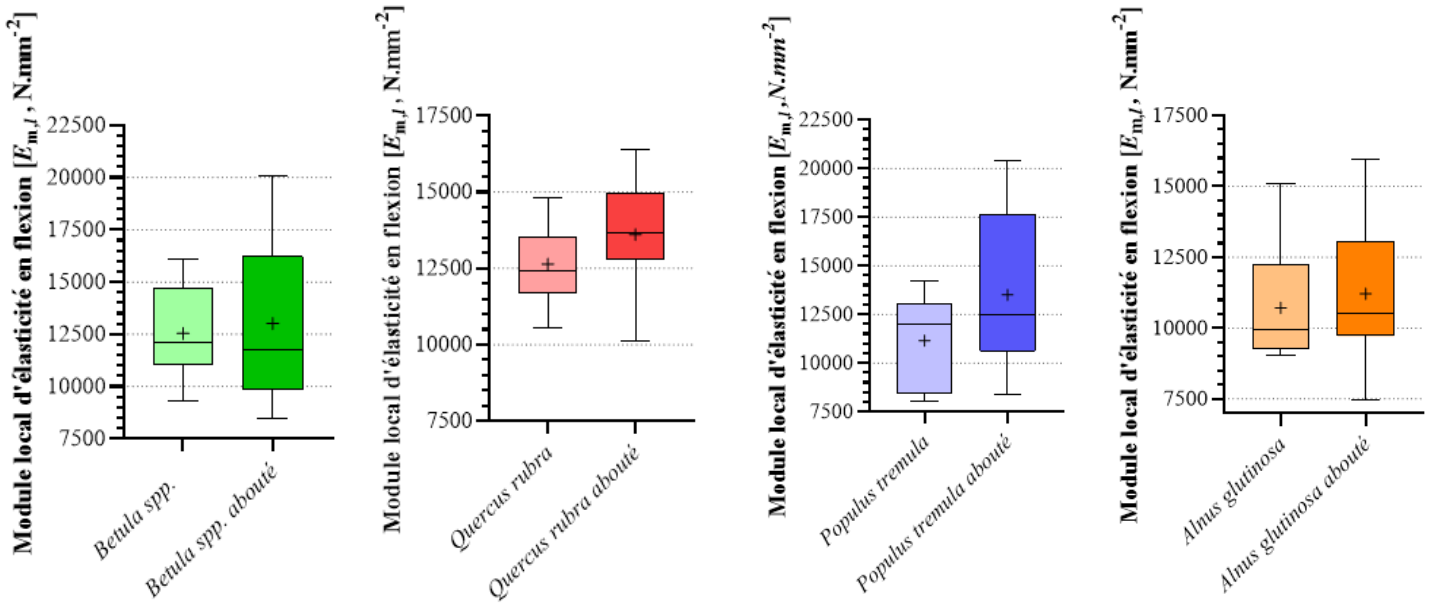


Figure 32 : Module local d'élasticité en flexion des essences en bois massif et abouté

Student a été appliqué pour *Betula* spp., *Quercus rubra* et *Populus tremula* - après vérification de l'homogénéité des variances par le test de Fisher -, tandis qu'un test non paramétrique de Mann-Whitney a été utilisé pour *Alnus glutinosa*.

Pour les quatre essences, aucune différence significative du module local d'élasticité en flexion n'est observée entre bois massif et bois abouté (p > 0,05 dans tous les cas, cf. annexe 59). Les box-plots montrent systématiquement une valeur centrale (moyenne ou médiane) légèrement plus élevée pour la version aboutée, avec une dispersion variable selon l'essence.

3.2.4. Résistance à la flexion axiale

La résistance à la flexion expérimentale est proche de la valeur de littérature pour *Quercus rubra* (103,92 vs 102,9 N.mm⁻²) et *Populus tremula* (72,04 vs 65 N.mm⁻²), avec chevauchement des intervalles dans les deux cas. Un écart plus marqué est observé pour *Betula spp.* (100,43 vs 124,8 N.mm⁻²) et *Alnus glutinosa* (57,65 vs 89,7 N.mm⁻²), avec un chevauchement des intervalles pour *Betula spp.* mais pas pour *Alnus glutinosa*. Le nombre de références mobilisées dans la littérature varie de r = 3 à 6 selon l'essence et le nombre d'échantillon n = 10 à 12 pour les données expérimentales.

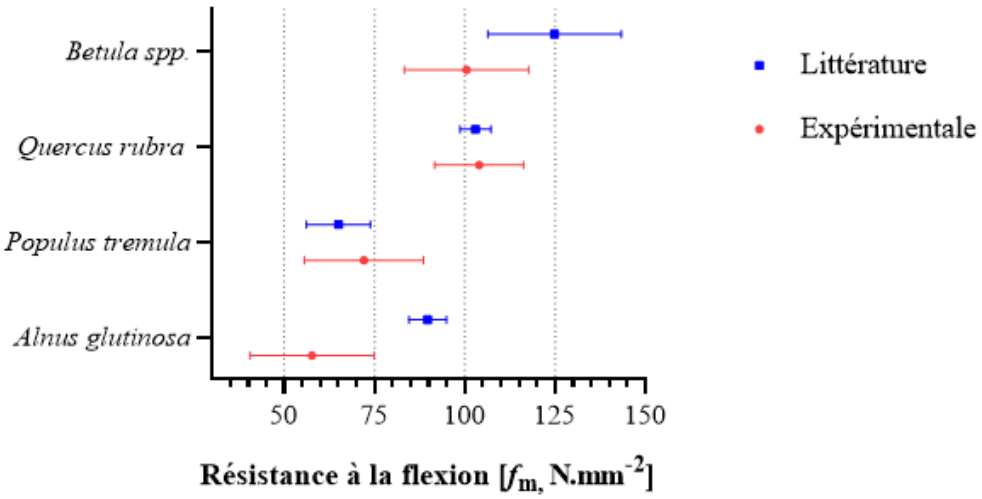


Figure 34 : Résistance à la flexion axiale expérimentale et issues de la littérature des essences

Tableau 11 : Résistances en flexion axiale expérimentales et issues de la littérature des essences

Essence	f_m12% exp. [N.mm^{-2}]	f_m12% litt. [N.mm^{-2}]
Betula spp.	100,43 ± 17,17 (n = 12)	124,8 ± 18,49 (r = 6)
Quercus rubra	103,92 ± 12,3 (n = 11)	102,9 ± 4,29 (r = 3)
Populus tremula	72,04 ± 16,54 (n = 11)	65 ± 8,83 (r = 4)
Alnus glutinosa	57,65 ± 17,17 (n = 10)	89,7 ± 5,15 (r = 4)

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution normale pour les quatre essences (*Betula spp.* : p = 0,9299 ; *Quercus rubra* : p = 0,9277 ; *Populus tremula* : p = 0,2548 ; *Alnus glutinosa* : p = 0,8663) (cf. annexe 60). Le test de Bartlett confirme l'homoscédasticité des variances (p = 0,7184) (cf. annexe 61). Les conditions étant remplies, une ANOVA a été appliquée pour comparer les quatre essences, qui révèle une différence hautement significative des moyennes de résistance à la flexion axiale entre essences (p < 0,0001 ; R² = 0,6137) (cf. annexe 62). Le test post-hoc de Tukey identifie des différences

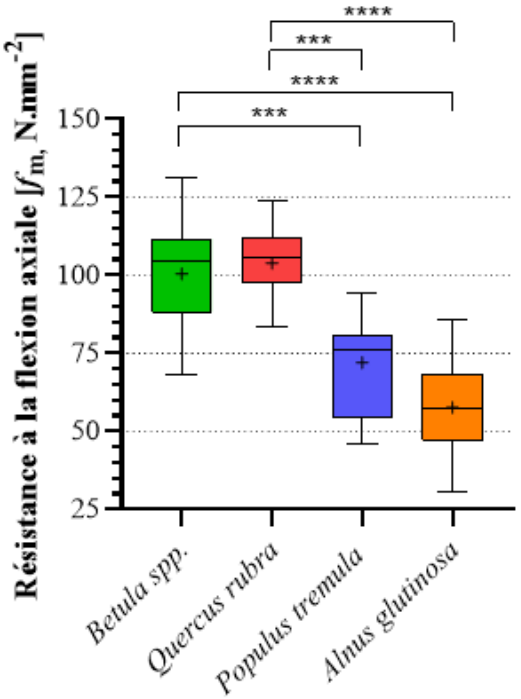


Figure 35 : Résistance à la flexion axiale expérimentale des essences à 12%

significatives entre *Betula spp.* et *Populus tremula* (p < 0,001), entre *Betula spp.* et *Alnus glutinosa* (p < 0,0001), entre *Quercus rubra* et *Populus tremula* (p < 0,001) et entre *Quercus rubra* et *Alnus glutinosa* (p < 0,0001). Le box-plot montre des médianes proches pour *Betula spp.* et *Quercus rubra* (~100–105 N.mm⁻²), et des médianes plus faibles pour *Populus tremula* et *Alnus glutinosa* (~55–75 N.mm⁻²).

La régression de la résistance à la flexion axiale en fonction du module local d'élasticité en flexion montre une relation significative pour *Betula spp.* (Y = 0,005326·X + 32,50 ; R² = 0,4620 ; p = 0,0150), *Quercus rubra* (Y = 0,006444·X + 21,58 ; R² = 0,4363 ; p = 0,0269) et *Populus tremula* (Y = 0,005640·X + 7,625 ; R² = 0,5971 ; p = 0,0053), avec des pentes positives dans les trois cas. Pour *Alnus glutinosa*, la relation n'est pas significative (R² = 0,009973 ; p = 0,7837). Les coefficients de détermination varient de 0,010 à 0,597 selon l'essence.

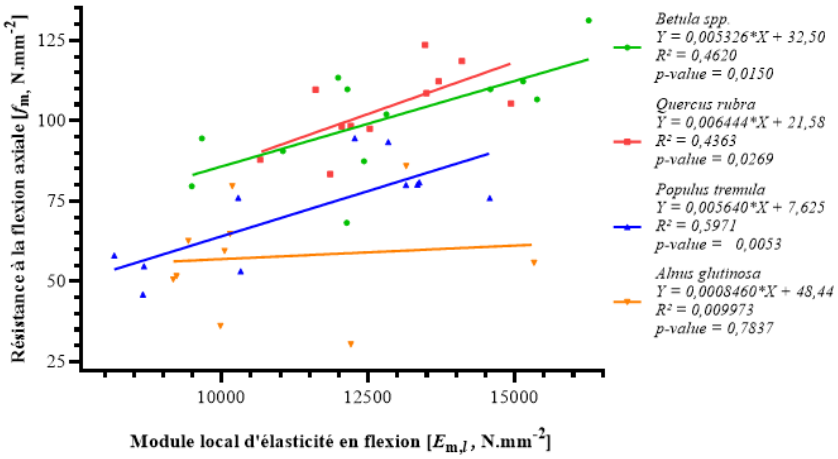


Figure 36 : Régression linéaire de la résistance à la flexion axiale en fonction du module local d'élasticité en flexion par essence, graphique de l'auteur

3.2.5. Résistance à la flexion axiale des bois aboutés

Tableau 12 : Résistance à la flexion axiale des bois aboutés par essence, tableau de l'auteur

Essence	f_m exp. [N.mm^{-2}]
Betula spp.	50,56 ± 9,25 (n = 14)
Quercus rubra	58,8 ± 4,11 (n = 15)
Populus tremula	43,42 ± 10,12 (n = 14)
Alnus glutinosa	48,31 ± 7,64 (n = 13)

Le test de Shapiro-Wilk indique une distribution normale pour les quatre essences (*Betula spp.* : p = 0,5491 ; *Quercus rubra* : p = 0,8017 ; *Populus tremula* : p = 0,6199 ; *Alnus glutinosa* : p = 0,8126) (cf. annexe 63). Le test de Bartlett révèle en revanche une hétéroscédasticité des variances (p = 0,0156) (cf. annexe 64). En raison de cette inégalité des variances, une ANOVA de Welch a été appliquée pour comparer les quatre essences, qui révèle une différence hautement significative des moyennes de résistance à la flexion axiale entre essences (p < 0,0001) (cf. annexe 65). Le test post-hoc de Games-Howell identifie des différences significatives entre *Betula spp.* et *Quercus rubra* (p < 0,05), entre *Quercus rubra* et *Populus tremula* (p < 0,001) et entre *Quercus rubra* et *Alnus glutinosa* (p < 0,01). Le box-plot montre une médiane plus élevée pour

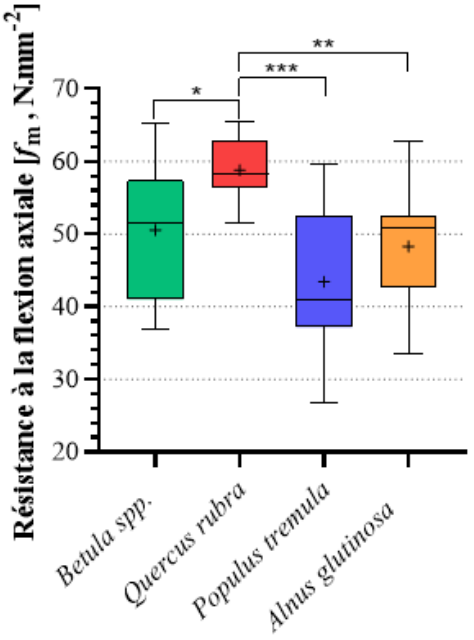


Figure 37 : Résistance à la flexion axiale des bois aboutés

Quercus rubra (~58 N.mm⁻²) et des médianes plus proches et plus faibles pour les trois autres essences (~43–50 N.mm⁻²).

3.2.6. Comparaison de la résistance à la flexion axiale des essences en bois massif et abouté

Tableau 13 : Résistance en flexion des essences en bois massif et abouté

Essence	f_m12% Massif $_{exp.}$ [N.mm^{-2}]	f_m Abouté $_{exp.}$ [N.mm^{-2}]
Betula spp.	100,43 ± 17,17 (n = 12)	50,56 ± 9,25 (n = 14)
Quercus rubra	103,92 ± 12,3 (n = 11)	58,8 ± 4,11 (n = 15)
Populus tremula	72,04 ± 16,54 (n = 11)	43,42 ± 10,12 (n = 14)
Alnus glutinosa	57,65 ± 17,17 (n = 10)	48,31 ± 7,64 (n = 13)

La résistance à la flexion axiale des éprouvettes aboutées est inférieure à celle des éprouvettes massives pour les quatre essences : *Betula spp.* (50,56 vs 100,43 N.mm⁻²), *Quercus rubra* (58,8 vs 103,92 N.mm⁻²), *Populus tremula* (43,42 vs 72,04 N.mm⁻²) et *Alnus glutinosa* (48,31 vs 57,65 N.mm⁻²). L'écart relatif est le plus marqué pour *Betula spp.* et *Quercus rubra* (réduction d'environ 50 %), et le moins marqué pour *Alnus glutinosa*.

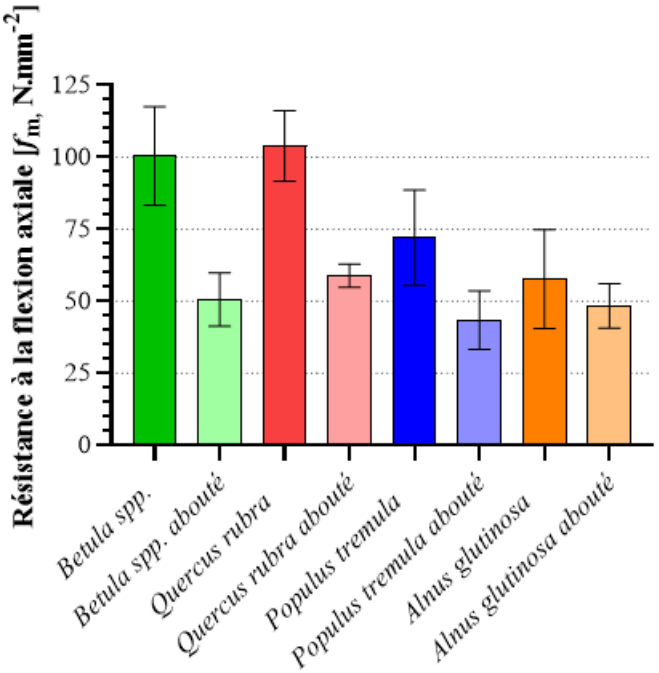


Figure 38 : Comparaison des résistances en flexion axiale des essences en bois massif et abouté, graphique de l'auteur

Pour les quatre essences, la normalité des distributions a été confirmée par le test de Shapiro-Wilk (cf. annexe 66). Le test de Fisher a révélé une hétéroscédasticité significative entre les groupes pour *Betula* spp., *Quercus rubra* et *Alnus glutinosa*, justifiant l'application d'un test t de Student avec correction de Welch ; l'homogénéité des

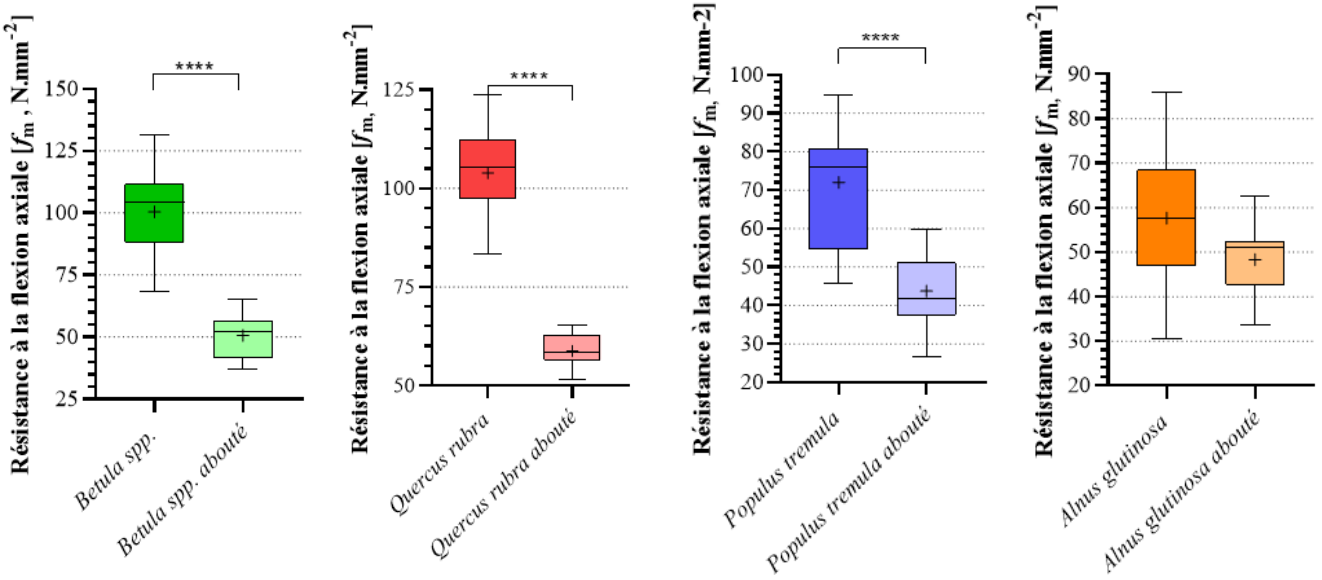


Figure 39 : Comparaison des MOR des essences en bois massif et abouté

variances a en revanche été confirmée pour *Populus tremula*, pour laquelle un test t de Student classique a été appliqué.

Contrairement au module local d'élasticité, la résistance en flexion diffère significativement entre bois massif et bois abouté pour trois des quatre essences (*Betula* spp., *Quercus rubra*, *Populus tremula* ; $p < 0,0001$), avec une perte de résistance de l'ordre de 35 à 50 % pour le bois abouté. Seule *Alnus glutinosa* ne présente pas de différence significative ($p = 0,136$), bien que la valeur moyenne du bois abouté reste inférieure à celle du bois massif.

3.2.7. Résistance en cisaillement des joints de collages

La résistance moyenne au cisaillement des joints collés varie de 7,99 à 13,53 N.mm⁻² selon l'essence et l'adhésif considérés. Pour *Alnus glutinosa*, les valeurs s'échelonnent entre 8,53 et 11,19 N.mm⁻² ; pour *Betula* spp., entre 8,14 et 13,23 N.mm⁻² ; pour *Quercus rubra*, entre 7,99 et 13,53 N·mm⁻² ; pour *Populus tremula*, entre 8,56 et 10,83 N·mm⁻². Les adhésifs MUF1 et MUF2 (500 g/m²) présentent des valeurs moyennes systématiquement supérieures à celles des adhésifs PUR1 et PUR2 (200 g/m²) pour l'ensemble des essences, avec l'écart le plus marqué observé pour *Quercus rubra* (M1-CR = 13,53 N.mm⁻² contre P2-CR = 7,99 N.mm⁻²)

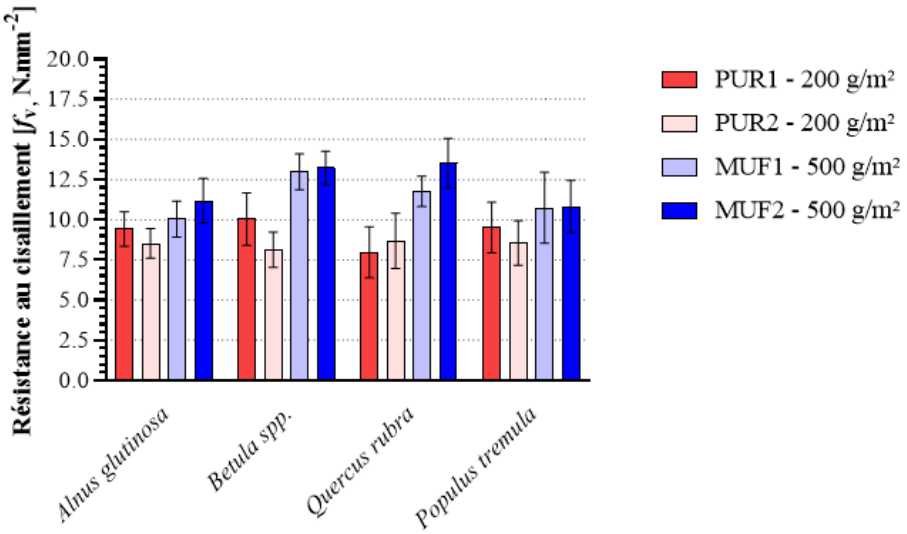


Figure 40 : Résistance en cisaillement des colles par groupe d'essence avec densités différentes

La résistance moyenne au cisaillement des joints collés à 500 g/m² varie de 8,31 à 13,53 N·mm⁻² selon l'essence et le type d'adhésif considérés. Pour *Alnus glutinosa*, les valeurs s'échelonnent entre 9,54 et 11,19 N·mm⁻²; pour *Betula* spp., entre 8,93 et 13,23 N·mm⁻² ; pour *Quercus rubra*, entre 8,31 et 13,53 N·mm⁻² ; pour *Populus*

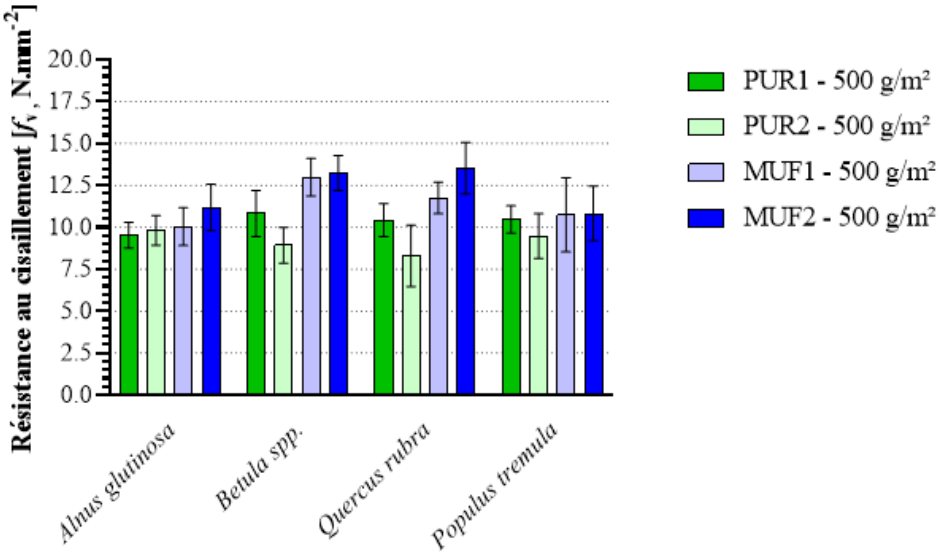


Figure 41 : Résistance en cisaillement des colles par groupe d'essence avec mêmes densités

tremula, entre 9,49 et 10,83 N·mm⁻². Les adhésifs MUF présentent systématiquement des valeurs moyennes supérieures à celles des adhésifs PUR pour toutes les essences. Bien que chez *Alnus glutinosa* et *Populus tremula* les quatre adhésifs donnent des résultats comparables.

La normalité des quatre groupes a été confirmée par le test de Shapiro-Wilk ($p > 0,35$ dans tous les cas) et le test de Bartlett n'a révélé aucune différence significative de variance entre les groupes ($p = 0,080$), permettant l'application d'une ANOVA classique. Celle-ci met en évidence une différence significative entre les moyennes ($p < 0,0001$). Le test de comparaison multiple de Tukey révèle des différences significatives entre PUR1-200 g/m² et PUR1-500 g/m² ($p < 0,01$), entre PUR1-200 g/m² et PUR2-200 g/m² ($p < 0,01$), entre PUR1-500 g/m² et PUR2-200 g/m² ($p < 0,0001$), ainsi qu'entre PUR1 - 500 /m² et PUR2 - 500 g/m² ($p < 0,01$).

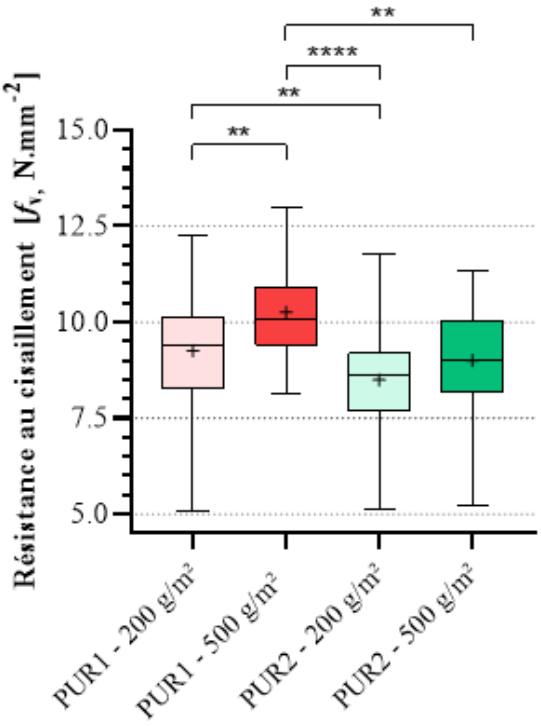


Figure 42 : Impact des densités d'application des colle PUR sur leur résistance au cisaillement, graphique de l'auteur

La régression linéaire entre la résistance au cisaillement et le pourcentage de rupture dans le bois révèle une relation positive et significative ($Y = 0,02396 \cdot X + 8,277$; $R² = 0,219$; $p < 0,0001$). Le coefficient de détermination indique que ce paramètre n'explique cependant qu'une part limitée de la variabilité observée sur *f*v.

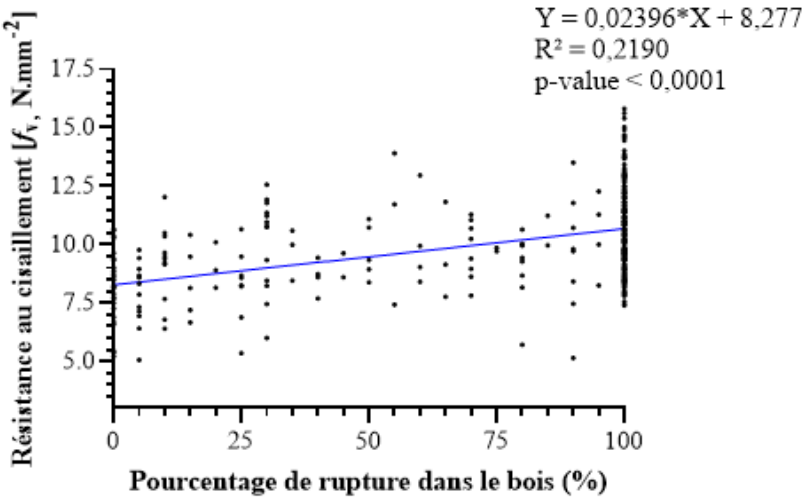


Figure 43 : Régression linéaire de la résistance en cisaillement en fonction du pourcentage de rupture dans le bois

Tableau 14 : Probabilités d'obtenir un pourcentage de rupture dans le bois d'au moins 90%

	PUR1 - 200 g/m²	PUR2 - 200 g/m²	PUR1 - 500 g/m²	PUR2 - 500 g/m²	MUF1 - 500 g/m²	MUF2 - 500 g/m²
Betula spp.	0,25	0,09	0,5	0,38	0,91	0,71
Quercus rubra	0,1	0	0	0	1	0,71
Populus tremula	0,42	0,38	0,88	0,6	0,92	0,81
Alnus glutinosa	0,59	0,28	0,44	1	0,82	0,89

Le tableau 14 présente, pour chaque combinaison essence-adhésif, la probabilité d'obtenir un pourcentage de rupture dans le bois d'au moins 90 %. Les valeurs les plus faibles sont observées pour *Quercus rubra* avec les adhésifs PUR1-200 g/m², PUR2-200 g/m², PUR1-500 g/m² et PUR2-500 g/m² (probabilités comprises entre 0 et 0,1), tandis que les adhésifs MUF1-500 g/m² et MUF2-500 g/m² atteignent des probabilités élevées pour l'ensemble des essences (0,71 à 1). *Populus tremula* et *Alnus glutinosa* présentent globalement des probabilités plus élevées que *Betula* spp. et *Quercus rubra* pour les adhésifs PUR à 200 g/m².

4. Discussion

4.1. Stabilité dimensionnelle

Les comparaisons des valeurs expérimentales avec la littérature pour les trois types de retrait convergent vers un même constat : les valeurs mesurées sont cohérentes avec la littérature, sans écart systématique dans l'une ou l'autre direction.

Les trois tests statistiques (Kruskal-Wallis pour les retraits radial et volumique, ANOVA pour le tangentiel) ne révèlent aucune différence significative entre essences, ni pour les moyennes ni pour les médianes ($p = 0,0638$ à $0,7432$ selon le type de retrait). Ce résultat mérite d'être souligné : il contraste avec les écarts de masse volumique très marqués entre essences (465 à 760 $kg.m^{-3}$ à 12 % d'humidité). Plus de matière ligneuse par unité de volume pourrait impliquer à priori davantage de retrait au séchage. L'absence de pente significative dans la régression retrait volumique-masse volumique confirme cette absence de lien direct au sein de l'échantillon (cf. figure 24). Cette absence de relation est en réalité cohérente avec la littérature sur le sujet : le retrait dépend moins de la masse volumique globale que de facteurs anatomiques plus fins - angle des microfibrilles, proportion et orientation des rayons ligneux, teneur en extractibles - qui varient d'une essence à l'autre indépendamment de la densité et peuvent ainsi masquer toute relation simple retrait-densité à l'échelle de cet échantillon (Elaieb et al., 2019).

Le rapport retrait tangentiel/retrait radial ($\beta t/\beta r$), indicateur classique du risque de déformation et de fissuration au séchage, distingue nettement *Quercus rubra* ($\beta t/\beta r \approx 2,47$) des trois autres essences (1,82 à 2,01). Cette forte anisotropie du chêne rouge est un trait bien connu du genre *Quercus*, généralement attribué à l'abondance et à la taille de ses rayons ligneux, qui limitent le retrait radial sans réduire proportionnellement le retrait tangentiel (Elaieb et al., 2019). À l'inverse, les trois autres essences, dépourvues de rayons aussi développés, présentent une anisotropie plus modérée et donc, toutes choses égales par ailleurs, un risque de déformation au séchage moindre.

4.2. Flexion des bois massif

Le diagramme d'Ashby rigidité-masse volumique (figure 44), permet de situer chaque essence testée par rapport aux valeurs publiées par Duyck & Mortelmans (2025), tout en offrant une indication visuelle de la cohérence du comportement mécanique des échantillons. Cette lecture est complétée par les régressions menées entre le module local d'élasticité en flexion (Em,l), la masse volumique (ρ), le taux d'humidité (W) et la résistance à la flexion axiale (*f*m), qui permettent de vérifier si les relations de la mécanique du bois - rigidité croissante avec la densité et rigidité décroissante avec l'humidité (Gerhards, 1982) - se retrouvent dans la présente étude.

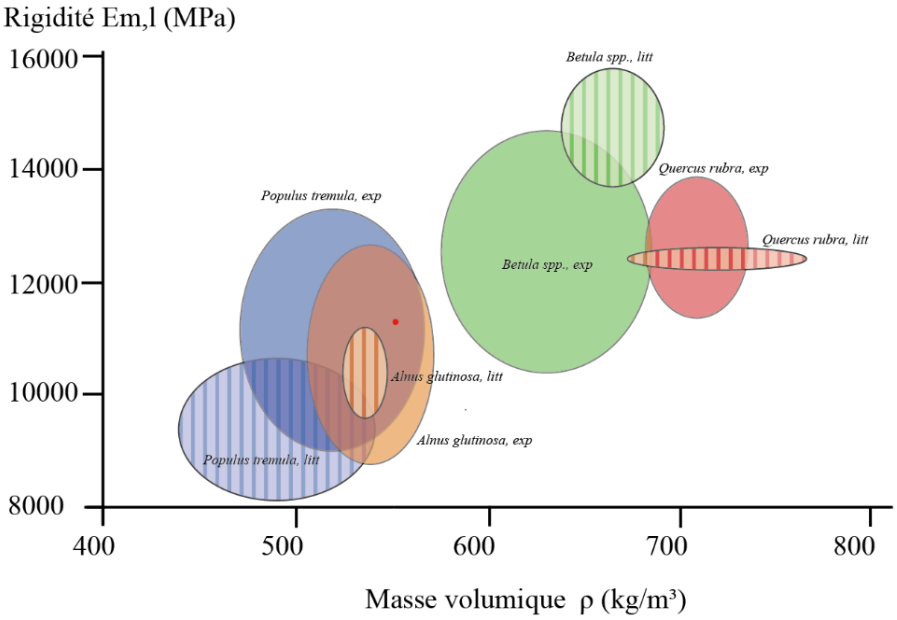


Figure 44 : Diagramme d'Ashby de la rigidité en fonction de la masse volumique pour les valeurs expérimentales et issues de la littérature (Mortelmans, 2026)

Seule *Betula spp.* présente une relation Em,l-ρ significative (R^2 = 0,5354 ; p = 0,0068) ; pour les trois autres essences, la relation n'est pas significative, avec des R^2 de 0,045 à 0,308 (cf. figure 28). *Quercus rubra* et *Populus tremula* montrant même une pente négative. De même, seule *Populus tremula* présente une relation Em,l-W significative (R^2 = 0,4198 ; p = 0,0311), les trois autres essences restant non significatives (cf. figure 29). Ces absences de relation ne remettent pas en cause les principes bien établis de la mécanique du bois : elles s'expliquent surtout par la plage de masse volumique et de taux d'humidité couverte au sein de chaque essence, trop restreinte, et par un effectif limité (n = 10-12), qui réduisent la puissance statistique pour détecter un effet attendu. C'est une absence de preuve plutôt qu'une preuve d'absence - cohérente avec le fait que l'EN 384 ne prévoit qu'un effet modeste de l'humidité sur Em,l.

La régression *f*m-Em,l est plus instructive, car elle porte sur deux propriétés mécaniques mesurées sur la même éprouvette plutôt que sur une propriété mécanique et une propriété physique (cf. figure 36). Elle est significative pour *Betula* spp. (R^2 = 0,4620 ; p = 0,0150), *Quercus rubra* (R^2 = 0,4363 ; p = 0,0269) et *Populus tremula* (R^2 = 0,5971 ; p = 0,0053) : pour ces trois essences, 44 à 60 % de la variabilité de la résistance s'explique par la rigidité mesurée localement. Résistance et rigidité repose sur une qualité commune du matériau, déterminée notamment par l'orientation du fil et l'absence de singularités. Pour *Alnus glutinosa*, cette relation est nulle (R^2 = 0,00997 ; p = 0,7837) : sa rigidité (10715 $N.mm^{-2}$) est la plus faible des quatre essences et ne

montre aucun pouvoir prédictif sur sa résistance - 57,65 N.mm^{-2}, également la plus faible, derrière *Quercus rubra* 103,92, *Betula spp.* 100,43 et *Populus tremula* 72,04 N.mm^{-2}.

Cette double singularité de l'aulne - rigidité et résistance les plus basses des quatre essences, et seule essence où l'une ne prédit pas l'autre - converge avec l'hypothèse, à partir de Claessens et al. (2010), d'un échantillon issu d'un peuplement unique et non suivi. Em,l est en effet mesuré sur une zone localisée, représentative du comportement élastique global de l'éprouvette, alors que f_m est régie par une zone de faiblesse sur l'échantillon, c'est-à-dire, le cas échéant, une singularité locale (nœud, défaut du fil du bois ou amorce de pourriture), qui n'affecte pas nécessairement la zone où Em,l est mesuré. La forte présence de défauts au sein des planches de cette essence est prévisible pour un peuplement n'ayant pas bénéficier d'accompagnement sylvicole. La station n'est en outre pas connue avec précision et joue un rôle primordial dans le développement des individus. À défaut de la diversité de provenance qui, pour les trois autres essences, dilue statistiquement ce type de singularités locales, l'échantillon d'aulne ne bénéficie d'aucun effet compensateur. Un même facteur - l'absence de dilution par la provenance - expliquerait ainsi à la fois l'absence de chevauchement des valeurs expérimentales de f_m avec la littérature et la rupture du couplage rigidité-résistance observée ici.

4.3. Flexion des bois aboutés

Pour ce qui est des essais de flexion des éléments enturés, le joint d'aboutage dans la zone de flexion pure a conduit à une augmentation de la rigidité des planches pour toutes les essences, avec toutefois des différences non significatives du module local d'élasticité en flexion. Cependant l'aboutage s'est avéré être la zone de faiblesse lors des essais résistance en flexion axiale. Les valeurs de résistance moyenne ont systématiquement baissé pour toutes les essences (cf. figure 38). L'analyse du mode de ruine des joints d'aboutage montre que des contraintes de cisaillement agissaient au niveau du joint. En considérant la fibre extrême en traction, la décomposition des contraintes de traction et de cisaillement au niveau d'une enture expliquent ce mode de ruine. Le cercle de Mohr appliqué à une enture située en fibre extrême tendue, dans la zone de flexion pure, permet d'illustrer cette décomposition. À partir du cas des contraintes dans un joints collé illustré dans les notes de cours de Latteur et Rondeaux (2020-2021) (cf. annexe 67), le développement peut être effectué comme suit :

Étape 1 : Détermination des angles d'une enture

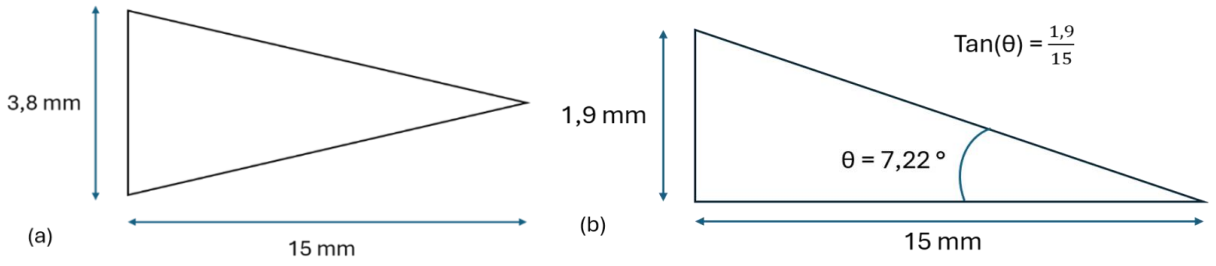


Figure 45 : Profil d'une enture (a) et détermination de l'angle θ à partir de la demi-géométrie de l'enture (b), schéma de l'auteur

L'angle θ, mesuré entre le plan de l'enture et l'axe longitudinal de la poutre, permet de déduire l'angle α utilisé dans la décomposition des efforts (figure 46), défini comme l'angle entre la normale au plan de l'enture et cet axe : α = 90° − θ = 82,78°.

Étape 2 : Décomposition des efforts appliqués à l'enture

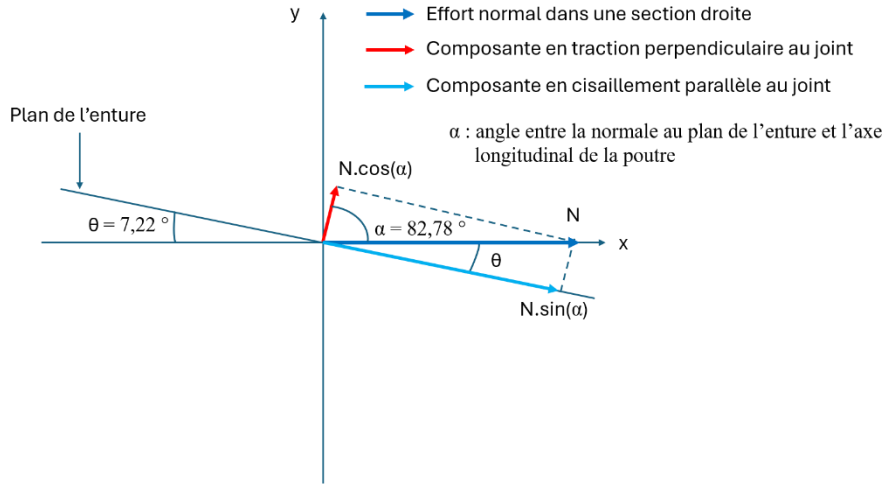


Figure 46 : Schéma de décomposition des efforts sur le plan d'une enture en flexion

Étape 3 : Expression des contraintes et construction du cercle de Mohr

En flexion 4 points, la zone centrale de la poutre (entre les deux points de charge) - où se situe systématiquement l'enture dans laquelle survient la rupture - est soumise à un moment fléchissant constant et à un effort tranchant nul : elle est donc en état de flexion pure. Dans cette configuration, la contrainte normale à la fibre extrême de la poutre correspond à un état de contrainte uniaxial (traction pure, sans cisaillement associé sur la section droite) : il s'agit donc de la contrainte principale σ_1. Cette contrainte, calculée selon la formule de Navier appliquée à la flexion 4 points au moment de la rupture, est assimilée à la valeur σ_0 utilisée dans la décomposition sur le plan incliné de l'enture (cf. annexe 67) ($\sigma_0 = \sigma_1$) :

Si $\sigma_0 = \sigma_1 = 50$ N/mm² (valeur arrondie proche des valeurs obtenues lors des essais),

$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos^2(\alpha) = 0{,}79$ N/mm² (contrainte normale sur le plan de l'enture)

$\tau = \sigma_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) = 6{,}23$ N/mm² (contrainte de cisaillement sur le plan de l'enture)

Pour α = 82,78°, la quasi-totalité de la contrainte de traction axiale se retrouve donc convertie en contrainte de cisaillement sur le plan de l'enture, la composante normale à ce plan restant comparativement faible. Cette décomposition montre que le plan de l'enture constitue mécaniquement une zone critique, sollicitée de façon quasi exclusive en cisaillement dès lors que la fibre extrême est sollicitée en traction.

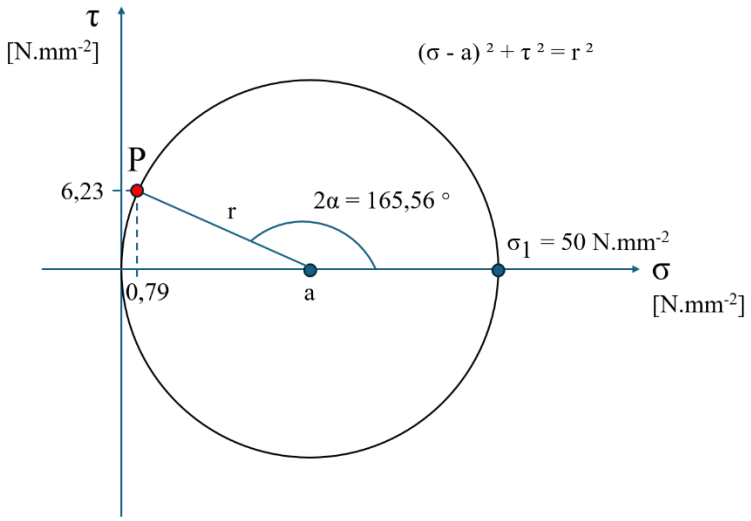


Figure 47 : Cercle de Mohr correspondant au cas d'une enture en fibre extrême en traction soumise à une flexion pure, schéma de l'auteur

4.4. Comparaison bois massifs - bois aboutés

Le joint d'aboutage produit un effet contrasté selon la propriété considérée. En rigidité, le module local d'élasticité en flexion des éprouvettes aboutées est systématiquement supérieur ou équivalent à celui des éprouvettes massives pour les quatre essences, sans différence statistiquement significative dans aucun cas ($p > 0,05$) (cf. figure 33). En résistance, l'effet est inverse : la résistance à la flexion axiale chute significativement pour trois essences sur quatre (*Betula spp.*, *Quercus rubra*, *Populus tremula* ; $p < 0,0001$), avec une perte d'environ 40 à 50 %, seul *Alnus glutinosa* ne montre pas de différence significative, avec une diminution d'environ 15% (cf. figure 39).

Cette dissociation est un résultat récurrent dans la littérature sur le bois lamellé-collé feuillu, et non une anomalie du dispositif expérimental. Une étude sur poutres BLC et sur planches simples en essences tropicales (Ozigo, Padouk) rapporte le même constat : la rupture précoce et fragile des éprouvettes aboutées est due à la présence des aboutages, qui constituent des zones de concentration de contraintes, tandis que l'aboutage n'a aucune influence mesurable sur la raideur des lamelles (Ndong Bidzo, 2023). Cette même étude observe que le mode de rupture des poutres à deux ou trois lamelles s'amorce systématiquement au niveau de l'aboutage lorsque celui-ci est positionné en fibre tendue. Le même découplage rigidité/résistance a par ailleurs été observé et modélisé sur du hêtre reconstitué par collage : la présence d'aboutages en zone tendue affecte légèrement la rigidité globale des poutres, alors qu'elle constitue un facteur nettement réducteur pour la résistance à la rupture (Tran, 2014).

Sur la sévérité de la perte de résistance observée, la thèse de Ndong Bidzo (2023) rapporte des chutes de 22 à 42% en fonction de l'essence étudiée. Ces valeurs étant attribuées à la présence des joints de colle en zone tendue. Sur poutres bi-lamelles, la même étude rapporte des pertes de 21 à 39 % selon la combinaison d'essences et la position de l'aboutage, avec une perte systématiquement plus marquée lorsque le joint est positionné sur la lamelle inférieure (fibre tendue) plutôt que sur la lamelle supérieure. Une autre étude effectuée sur du Pin maritime rapporte une diminution de résistance en flexion autour de 25% (Pommier, 2006). Les différences de résistance peuvent être directement liées à la densité des essences testées : les essences les moins denses montrant des pertes de résistance moins élevées (Ndong Bidzo, 2023). La présente étude s'oriente d'ailleurs vers une tendance similaire (cf. figure 38).

Cette dissociation a une implication directe pour la conception de la poutre en BLC feuillus mixte visée par ce mémoire : éviter le positionnement des joints d'aboutage dans la zone de moment fléchissant maximal en lamelle de rive.

La thèse de Tran (2014) indique par ailleurs que la géométrie de l'enture constitue un paramètre limitant de la résistance en flexion d'un joint d'aboutage. Parmi les trois paramètres caractérisant le profil d'une enture multiple - longueur, le pas et l'épaisseur d'extrémité - c'est la longueur de l'enture qui influence majoritairement la force maximale en flexion, suivie du pas, l'effet de l'épaisseur d'extrémité étant nettement plus faible. Cette sensibilité s'explique mécaniquement par la surface de collage effective : une géométrie optimisée (longueur et pas augmentés, épaisseur d'extrémité réduite) permet plus que de doubler cette surface par rapport à une géométrie initiale non optimisée, ce qui déplace le mode de sollicitation dominant du joint de la traction vers le cisaillement - un résultat favorable puisque l'adhésif structural résiste mieux en cisaillement qu'en traction pure.

4.5. Cisaillement des joints de collage

Les résistances au cisaillement obtenues (7,99 à 13,53 N/mm² selon l'essence et la colle ; figure 40) se situent dans la fourchette basse des valeurs rapportées par Aicher et al. (2018) pour des BLC feuillus industriels (9,5 à 19 N/mm² en moyenne selon l'essence). Cet écart est en partie du la sous-pression d'encollage relevée comme limite de l'étude (≈ 0,49 N/mm² contre 0,6–1 N/mm² prescrits) : une pression insuffisante réduit le contact effectif aux interfaces et abaisse mécaniquement la résistance du joint, sans remettre en cause le classement relatif des colles entre elles.

La supériorité systématique des MUF sur les PUR, à densité d'application égale (500 g/m²), rejoint la littérature sur le collage du bois feuillu. Les colles aminoplastiques offrent généralement un ancrage mécanique et une réticulation plus complète que les polyuréthanes monocomposants, ces derniers restant davantage utilisés en menuiserie qu'en structure (Shirmohammadli et al., 2023).

Cette performance mécanique repose en grande partie sur la pénétration de l'adhésif dans la microstructure du bois, qui s'opère à deux échelles distinctes : d'une part le remplissage des lumens cellulaires ; d'autre part l'infiltration des composants de faible masse moléculaire de l'adhésif dans la paroi cellulaire. Ces deux mécanismes créent une zone d'interphase bois-colle qui conditionne fortement la durabilité du joint (Kamke & Lee, 2007). Cette pénétration dépend à la fois de la viscosité et de la composition chimique de la colle, ainsi que de la porosité du bois - elle-même liée à l'essence et à la densité - ce qui peut expliquer en partie l'écart de performance observé entre familles de colles dans la présente étude. L'effet significatif de la densité d'application sur les PUR (Tukey, $p < 0,01$ à $p < 0,0001$ selon les paires ; figure 42) confirme par ailleurs que ce paramètre - et non uniquement la nature chimique de la colle - pilote une partie de la performance du joint, ce qui invite à la prudence lorsqu'on compare des colles testées à des grammages différents.

Enfin, la relation positive et significative entre résistance au cisaillement et pourcentage de rupture dans le bois ($R^2 = 0,219$; $p < 0,0001$) concorde avec la théorie. Un ancrage important de la colle dans les fibres confère à l'encollage une résistance élevée ainsi qu'une rupture préférentielle dans le bois plutôt qu'à l'interface (cf. figure 43).

Diagnostic du dispositif actuel

L'analyse des modes de ruine des éprouvettes révèle la présence d'un moment fléchissant parasite au sein du dispositif de l'EN 14080 - Annexe D, en plus du cisaillement recherché, du fait de l'excentrement du plan de collage par rapport à l'axe de chargement (figure 48).

Ce phénomène n'est pas propre au présent dispositif : toute configuration d'assemblage collé dont le plan de joint n'est pas aligné avec l'axe de chargement induit une déformation en flexion du joint, qui superpose des contraintes normales de pelage au cisaillement recherché (Kwakernaak et al., 2012). Plus l'épaisseur des adhérents augmente, plus cette excentricité - et donc les contraintes de pelage parasites - s'accroît (Kwakernaak et al., 2012). Cette limitation méthodologique n'est cependant pas propre au dispositif employé ici. Aicher et al. (2018) rappellent que l'ensemble des méthodes normalisées de cisaillement par bloc (dont l'EN 14080) appliquent en principe un effort de compression parallèle au plan de collage. La montée en charge génère alors invariablement des contraintes secondaires perpendiculaires à ce plan, dont l'ampleur dépend fortement du dispositif, de la largeur des appuis et de la présence de maintiens latéraux.

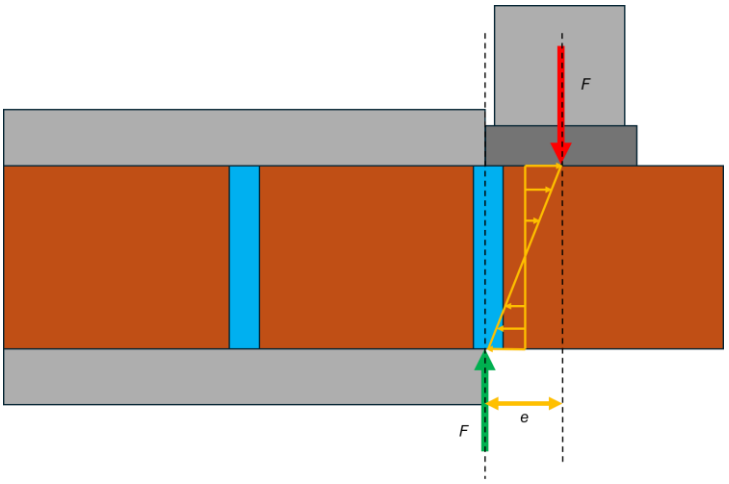


Figure 48 : Schéma du diagramme des contraintes de flexion appliquées au joint de colle et à son voisinage, schéma de l'auteur

C'est précisément pour s'affranchir de cette déficience méthodologique qu'un dispositif de cisaillement par compression orienté à 14° entre le plan de cisaillement et l'axe de sollicitation a été proposé (Steiger et al., 2010, cité dans Aicher et al., 2018). Ce dispositif réduit sensiblement les contraintes perpendiculaires au plan cisaillé et la dispersion des résultats.

Malgré cette flexion parasite, la démarche par échantillons appariés, telle qu'utilisée dans la présente étude, reste robuste pour les comparaisons relatives. Tant que le moment parasite est appliqué de façon homogène à l'ensemble des combinaisons testées, la comparaison relative entre colles et entre essences demeure valide, même si les valeurs absolues de f_v ne sont pas directement transposables à la littérature.

Vers un dispositif corrigé

Augmenter la hauteur de l'éprouvette pour réduire l'excentricité relative doit être écarté : la théorie du shear-lag (Volkersen, 1938, reprise dans Kwakernaak et al., 2012) montre que la contrainte de cisaillement le long d'un joint n'est pas uniformément répartie mais présente des pics aux extrémités du recouvrement, la zone centrale contribuant nettement moins au transfert de charge. Augmenter la hauteur accentuerait cet effet, invalidant progressivement l'hypothèse de répartition homogène sur laquelle repose l'équation (10). Le facteur kv de l'EN 14080 a vraisemblablement été calibré empiriquement pour les dimensions imposées par le dispositif actuel, et rien ne garantit sa validité hors de cette plage.

Une option plus prometteuse consiste à réduire directement l'excentricité plutôt que d'en compenser les effets a posteriori. Kwakernaak et al. (2012) rappellent que le moyen le plus efficace de limiter le moment parasite dans un joint à recouvrement est de substituer une configuration symétrique - double recouvrement ou double cisaillement - à une configuration simple. Appliqué au dispositif d'essai, cela reviendrait à solliciter deux plans de collage simultanément et symétriquement de part et d'autre de l'axe de chargement, annulant le couple parasite. Le dispositif dit en « arc de triomphe » illustre l'alternative de type double cisaillement (figure 49), tandis que le dispositif de l'EN 302-1:2023 illustre l'alternative de type double recouvrement (figure 50). Par soucis d'économie de matière et de simplicité de mise en œuvre, le dispositif en « arc de triomphe » reste le plus recommandable comme alternative du dispositif utilisé dans la présente étude.

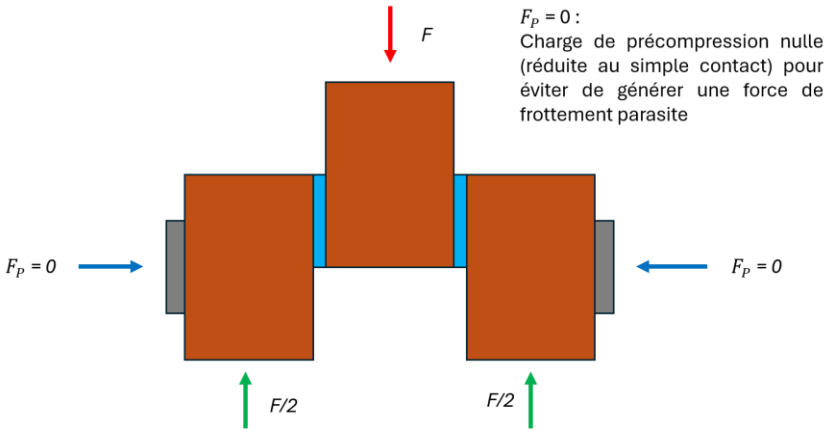


Figure 49 : dispositif de cisaillement des joints de collage en double cisaillement type « arc de triomphe », schéma de l'auteur (adapté de : Résistance au cisaillement des joints de colle de Bois Lamellé Collé d'origine tropicale, Ndong Bidzo et al., 2020)

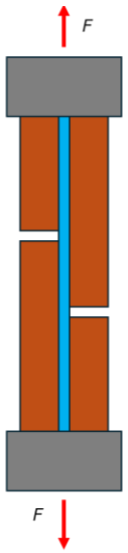


Figure 50 : dispositif de cisaillement des joints de collage en double recouvrement, schéma de l'auteur (adapté de : EN 302-1:2023)

5. Contribution personnelle

Utilisation de l'intelligence artificielle

Au cours de la réalisation de ce mémoire, l'auteur a eu recours à un assistant d'intelligence artificielle générative à plusieurs étapes du travail, principalement pour :

- l'aide à la mise en forme et la rédaction de certains passages de la discussion (notamment les sections « Flexion des bois aboutés », « Flexion des bois massifs » et « Limites et perspectives »), à partir des résultats, hypothèses et pistes d'interprétation produits par l'auteur lui-même ;
- l'aide à la recherche et à la vérification de sources bibliographiques complémentaires (notamment pour étayer les affirmations relatives à l'anisotropie du retrait, aux effets de l'humidité sur les propriétés mécaniques du bois, et à la sylviculture de l'aulne glutineux) ;
- l'aide à la production de figures explicatives (notamment la décomposition des contraintes par cercle de Mohr) ;
- l'aide à la traduction du résumé en anglais ;
- des reformulations ponctuelles pour améliorer la clarté ou la concision de certains passages.

L'ensemble des contenus produits avec cette aide a systématiquement fait l'objet d'une vérification de la part de l'auteur à l'aide de sources bibliographiques, d'une relecture critique et d'une reformulation personnelle avant intégration au mémoire. Aucun résultat expérimental, aucune donnée chiffrée ni aucune conclusion scientifique n'a été généré ou déterminé par l'IA : celle-ci n'est intervenue qu'en appui à la mise en forme, à la recherche documentaire et à la rédaction de contenus élaborés à partir des analyses propres à l'auteur.

Contribution personnelle aux différentes étapes du travail

Au-delà de cette aide rédactionnelle ponctuelle, l’auteur a personnellement assuré :

- l'échantillonnage et la sélection des éprouvettes testées, pour l'ensemble des expérimentations menées dans le cadre de ce mémoire ;
- le façonnage de ces éprouvettes, avec l'aide du Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) ;
- le conditionnement des éprouvettes dans les chambres climatiques du LTB ;
- les transports des éprouvettes jusqu'à la Faculté Polytechnique de Mons ;
- la réalisation des mesures et des essais présentés dans les différentes parties du mémoire, avec l'aide de l'équipe de la Faculté Polytechnique de Mons et du LTB ;
- l'entreposage des éprouvettes à l'issue des essais ;
- la récolte de l'ensemble des données issues de ces essais ;
- l'analyse des données brutes, incluant la production des résultats chiffrés ainsi que des graphiques et figures associés ;
- la discussion de ces analyses et des méthodes employées lors des expérimentations ;
- l'ensemble de la recherche bibliographique et la rédaction du mémoire ;
- les présentations intermédiaires devant l'équipe du ForWoodLab ;
- les déplacements jusqu'aux lieux de rencontre avec les encadrants en vue des présentations intermédiaires.

6. Conclusion

Face aux crises sanitaires touchant les essences résineuses actuellement dominantes en lamellé-collé et aux incertitudes posées par le changement climatique, l'objectif principal de ce travail est d'identifier les composants - essences et adhésif - permettant de concevoir une poutre en bois lamellé-collé associant une essence de fibre extrême résistante, une essence de remplissage légère et mécaniquement suffisante, et l'adhésif présentant la meilleure résistance en cisaillement. Quatre sous-objectifs ont structurés cette démarche : la caractérisation physique des essences, leur caractérisation mécanique en flexion, l'identification du meilleur adhésif, et la caractérisation de l'effet d'un joint d'aboutage sur les propriétés mécaniques. Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet Interreg Grande Région W.A.V.E., qui vise à soutenir le développement d'une filière bois locale résiliente en valorisant des essences feuillues « de l'avenir » encore marginales dans la construction. Ces essences se veulent d'allier un résistivité face aux changements climatiques, un volume sur pieds disponible suffisant à en déployer un gisement industriel, ainsi qu'un potentiel de valorisation en produits d'ingénierie ou éléments structurels.

La caractérisation physique a permis d'établir un gradient net de masse volumique entre les quatre essences, de *Populus tremula* (519 $kg.m^{-3}$) à *Quercus rubra* (718 $kg.m^{-3}$), en passant par *Alnus glutinosa* (541 $kg.m^{-3}$) et *Betula spp.* (628 $kg.m^{-3}$). Les retraits mesurés se sont montrés cohérents avec la littérature, et ont mis en évidence une anisotropie de retrait plus marquée chez *Quercus rubra*, attribuable à l'abondance de ses rayons ligneux. Ces résultats satisfont le sous objectif fixé.

La caractérisation mécanique a distingué deux groupes : *Betula spp.* et *Quercus rubra,* aux propriétés élevées et proches l'une de l'autre ($E_{m,l}$ = 12542 - 12641 $N.mm^{-2}$; f_m = 100–104 $N.mm^{-2}$), et *Populus tremula* et *Alnus glutinosa*, sensiblement plus faibles (f_m de 72 et 58 $N.mm^{-2}$ respectivement). *Alnus glutinosa* s'est distinguée par un comportement atypique : absence totale de corrélation entre rigidité et résistance en flexion axiale (R^2 = 0,01, contre 0,44 à 0,60 pour les trois autres essences), et écart marqué de cette dernière propriété avec les valeurs de littérature. L'hypothèse la plus cohérente avancée pour expliquer cette singularité est celle d'un échantillon issu d'un unique peuplement non suivi, dont les singularités locales n'ont pu être diluées par la diversité de provenance dont bénéficient les trois autres essences. Ce sous-objectif est atteint pour trois essences sur quatre, avec une réserve importante concernant la représentativité des résultats obtenus pour l'aulne.

L'identification du meilleur adhésif a clairement désigné les colles MUF appliquées à 500 g/m^2, dont la résistance en cisaillement (10,83 à 13,53 $N.mm^{-2}$) et la probabilité élevée de rupture dans le bois (71 à 100 % selon la combinaison essence-adhésif) surpassent systématiquement celles

des adhésifs PUR testés. Sur cette base, l'adhésif MUF2 a été retenu pour la réalisation des joints d'aboutage.

La caractérisation de l'effet du joint d'aboutage a montré un module d'élasticité en flexion inchangé, voire légèrement supérieur, entre bois massif et bois abouté pour les quatre essences, mais une chute marquée de la résistance en flexion - de l'ordre de 50 % pour *Betula spp.* et *Quercus rubra*, plus modérée pour *Populus tremula* et *Alnus glutinosa*. La décomposition des contraintes par cercle de Mohr a permis d'identifier une sollicitation quasi exclusivement en cisaillement dès lors que l'enture au niveau de la fibre extrême est en traction. Le joint d'aboutage dans la zone de flexion pure a été identifié comme étant une zone de concentration de contraintes.

Au regard de l'ensemble de ces résultats, l'objectif principal est considéré comme atteint dans ses grandes lignes, avec les nuances qui en découlent. *Quercus rubra* et *Betula spp.* se sont révélées toutes deux adéquates en tant qu'essences en fibre extrême, au vu de leurs résistances et rigidités élevées et cohérentes entre elles - le choix entre les deux relevant alors davantage de considérations de masse volumique, de disponibilité de la ressource ou de coût que de performance mécanique pure. *Populus tremula*, la moins dense des quatre essences tout en conservant des propriétés mécaniques cohérentes et bien corrélées entre elles, apparaît comme la candidate la plus indiquée pour l'âme de la poutre. La position d'*Alnus glutinosa* reste en revanche à confirmer : ses résultats, les plus faibles et les moins cohérents de l'échantillon, ne permettent pas de conclure à ce stade sur son potentiel réel pour cet usage, sans disposer d'un échantillon plus représentatif de l'essence.

Ce travail n'a en revanche pas pu aborder l'ensemble du périmètre initialement prévu par le projet : les essais de cisaillement axial du bois massif, l'évaluation en délamination des combinaisons essence-adhésif retenues, et le test en flexion de la poutre mixte finale n'ont pas pu être réalisés dans le temps imparti à ce mémoire. Ces volets, ainsi que les pistes de sélection d'échantillonnage évoquées plus haut, sont reportés à la thèse doctorale de Tom Mortelmans, dans laquelle s'inscrit ce travail. Ce mémoire en constitue néanmoins une première étape substantielle, apportant des éléments de caractérisation inédits sur quatre essences feuillues encore peu documentées pour un usage structurel, et contribuant ainsi, à son échelle, à l'objectif plus large du projet W.A.V.E. : celui d'une filière bois locale diversifiée et résiliente face aux défis sanitaires et climatiques à venir.

6.1. Limites et perspectives

Limites

Échantillonnage et matière première

Les planches d'origine (matière première) n'ont fait l'objet d'aucune sélection préalable, ce qui s'est traduit par une proportion importante de singularités redondantes au sein de certaines

éprouvettes même après purge des défauts (nœuds, déviations de fil, singularités locales). Cette limite est particulièrement marquée pour *Alnus glutinosa*, dont l'échantillon provient d'une seule zone géographique et d'un seul peuplement non suivi. Contrairement aux trois autres essences, dont les valeurs agrègent plusieurs provenances et diluent ainsi les singularités propres à un peuplement donné. Une diversification des provenances, associée à une sélection d'arbres suivis et bien conformés, serait nécessaire pour identifier les comportements propres à l'essence.

Moyens matériels de mise en œuvre

Le pressage et l'encollage des joints d'aboutage et des lamelles ont été réalisés avec des moyens de nature artisanale, non représentatifs des presses industrielles à froid ou à haute fréquence utilisées en production de BLC. La pression, le temps de pressage et l'homogénéité du grammage de colle appliqué ne bénéficient donc pas du même contrôle qu'en contexte industriel, ce qui a pu introduire une variabilité supplémentaire dans la qualité des joints collés, indépendante de l'essence ou de l'adhésif testés.

Dispositif de cisaillement des joints de collage

Le dispositif retenu (EN 14080 - Annexe D) a été choisi pour sa capacité à multiplier les répétitions sur un échantillonnage conséquent, mais sa géométrie induit un moment de flexion parasite qui vient s'ajouter à la sollicitation de cisaillement (cf. section 4.5.). Les valeurs de f_v qui en résultent sont donc probablement conservatives par rapport à la résistance en cisaillement pure du joint de colle, et le dispositif mériterait d'être amélioré ou remplacé par une configuration limitant cette excentricité.

Absence de comparaison directe bois/colle

Faute de temps, les éprouvettes de cisaillement axial du bois massif prévues initialement n'ont pas été testées, reportant cette comparaison à la thèse doctorale associée à ce travail (cf. section 1.12.). Une comparaison directe des résistances en cisaillement des colles et des essences aurait pu conduire à une meilleure interprétation des modes de ruptures observés, ainsi qu’à leur potentielle prédiction.

Puissance statistique

Les effectifs des tests en flexion par essence ($n \approx 15$) restent modestes au regard de la variabilité naturelle du matériau bois. Cette limite s'est notamment traduite par l'absence de relations significatives entre certaines propriétés pourtant physiquement liées ($E_{m,l}$ vs masse volumique et $E_{m,l}$ vs taux d'humidité pour la plupart des essences ; cf. section 4.2.), à interpréter comme une insuffisance de puissance statistique plutôt que comme une réfutation des principes de la mécanique du bois.

Perspectives

Amélioration et complément des essais de cisaillement

Le dispositif de cisaillement des joints de collage gagnerait à être révisé pour limiter le moment parasite identifié dans ce mémoire, tout en conservant sa capacité à traiter un échantillonnage important. Il serait également pertinent de tester en cisaillement axial les échantillons de bois massif déjà façonnés, afin de disposer d'une résistance en cisaillement du bois propre aux planches pour comparaison directe avec la résistance du joint collé.

Analyse des modes de rupture

Une caractérisation fine des modes de rupture, tant des joints d'aboutage en flexion que des éprouvettes de cisaillement des joints de collage, permettrait d'identifier avec certitude l'élément limitant (bois ou colle) et de complémenter les analyses du modèle de décomposition par cercle de Mohr proposé dans ce mémoire. À l'échelle microscopique, l'observation du faciès de rupture au niveau de l'interface colle-bois éclairerait également les mécanismes d'adhésion propres à chaque combinaison essence-adhésif. Une comparaison des modes de rupture en flexion selon différents types d'entures (sur chant, sur rive) permettrait en outre d'évaluer l'influence de la géométrie de l'aboutage sur le comportement observé.

Délamination

L'évaluation de la résistance à la délamination des joints collés, non abordée dans ce mémoire, constituerait un complément naturel à la caractérisation en cisaillement, notamment pour juger de la durabilité des assemblages en conditions d'humidité variable.

Poutres BLC mixtes à l'échelle réelle

Au-delà des éprouvettes élémentaires testées ici, une évaluation sur poutres lamellé-collées mixtes complètes, avec différents profils de composition (nombre et position des lamelles d'essences denses en extrémité, alternance des essences sur la hauteur, etc.), permettrait de valider les résultats obtenus à l'échelle de l'éprouvette et d'optimiser la répartition des essences en fonction des sollicitations réelles en service.

Diversification et suivi de l'échantillonnage

Comme souligné plus haut, un échantillonnage futur gagnerait à diversifier les provenances testées et à privilégier des individus issus de peuplements suivis et bien conformés, en particulier pour *Alnus glutinosa* dont les résultats de ce mémoire restent difficiles à généraliser à l'essence dans son ensemble.

Structuration de la filière

Enfin, au-delà des aspects strictement techniques, le développement d'un produit fiable et commercialisable à partir de feuillus « d'avenir » implique d'entretenir la collaboration entre laboratoires de recherche, équipes universitaires et acteurs de la filière bois, sur l'ensemble de la chaîne de valeur - de la gestion sylvicole des peuplements jusqu'à la mise en œuvre du produit fini - afin de répondre aux exigences normatives et aux attentes du secteur de la construction.

7. Bibliographie

Aicher, S., Ahmad, Z., & Hirsch, M. (2018). Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. *European Journal of Wood and Wood Products*, *76*(4), 1205–1222. https://doi.org/10.1007/s00107-018-1305-0

Alderweireld, M., Burnay, F., Pitchugin, M., & Lecomte, H. (n.d.). *Inventaire forestier wallon*.

The Australian Museum. (2026, 2 août). *Human evolution*. https://australian.museum/learn/science/human-evolution/ (consulté le 02/08/2026).

Beauchamp, G. (2025). Résultats des ventes publiques de l'automne 2025 : un marché du bois contrasté entre résineux sous pression et sérénité chez les feuillus. *Silva Belgica*, *6*, 43–46.

Benoit, Y. (2008). *Le guide des essences de bois*. Eyrolles.

BM TRADA. (2021). *WIS 2/3-10 : Timbers – Their properties and uses*. BM TRADA.

Boedts, M. (2016). *Effet du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du bois de bouleau* [Mémoire de fin d'études].

Bourreau, D. (2011). *Étude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane française* [Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane].

Cazzaniga, N., Tandetzki, J., & Camia, A. (2026). *Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU Member States from 2012 to 2021* [Jeu de données]. European Commission, Joint Research Centre. https://doi.org/10.2905/JRC.MXM8310

CEN (Comité Européen de Normalisation). (2016). *EN 350 : Durability of wood and wood-based products*. CEN.

CEN (Comité Européen de Normalisation). (2022). *EN 384:2016+A2:2022 — Bois de structure — Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. CEN. (Publiée en Belgique sous NBN EN 384:2016+A2:2022, Bureau de Normalisation.)

CEN (Comité Européen de Normalisation). (2023a). *EN 15425:2023 — Adhesives — One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures — Classification and performance requirements*. CEN.

CEN (Comité Européen de Normalisation). (2023b). *EN 301:2023 — Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures — Classification and performance requirements*. CEN.

Charloteaux, L. (2024). *Le bois déchet en Wallonie : vers de nouvelles voies de valorisation*. ValBiom. https://www.valbiom.be/actualites/le-bois-dechet-en-wallonie-vers-de-nouvelles-voies-de-valorisation

Claessens, H., Lecomte, H., Lejeune, P., & Rondeux, J. (2001). Plante-t-on l'épicéa n'importe où ? L'apport d'une analyse objective de la pessière wallonne. *Forêt Wallonne*, *49-50*, 45–51.

Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P., & Rondeux, J. (2010). A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *Forestry*, *83*(2), 163–175. https://doi.org/10.1093/forestry/cpp038

Defays, V., & Saerens, A. (2021). *Le secteur du sciage : État du secteur du sciage en Belgique en 2020*. Hout Info Bois & Confédération Belge du Bois.

Dennert, F., Beenken, L., Dubach, V., Queloz, V., & Stroheker, S. (2023). *Dépérissement aigu du chêne AOD (Acute Oak Decline)* [Factsheet]. Waldschutz Schweiz, Institut fédéral de recherches WSL.

Dubois, H. (2022). *Le bouleau (Betula pendula Roth et B. pubescens Ehrh.), essence d'avenir en Europe occidentale ?*

Duyck, A., & Mortelmans, T. (2025). *Technical, environmental, and economic properties of several wood species from forests of Western Europe* (Version v1) [Jeu de données]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.15038880

Elaieb, M. T., Shel, F., Jalleli, M., Langbour, P., & Candelier, K. (2019). Physical properties of four ring-porous hardwood species: Influence of wood rays on tangential and radial wood shrinkage. *Madera y Bosques*, *25*(2), e2521695. https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521695

EN 302-1:2023. *Adhésifs pour structures portantes en bois — Méthodes d'essais — Partie 1 : Détermination de la résistance au cisaillement en traction longitudinale*. NBN.

EN 408+A1:2012. *Structures en bois — Bois de structure et bois lamellé-collé — Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. NBN.

EN 14080:2013. *Structures en bois — Bois lamellé collé et bois massif reconstitué — Exigences* (2e éd.). NBN.

Epaud, F. (n.d.). *Une brève histoire de la charpenterie française*.

Falk, R. H., & Colling, F. (1995). Laminating effects in glued-laminated timber beams. *Journal of Structural Engineering*, *121*(12), 1857–1863. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:12(1857)

Fašalek, A., Straže, A., Šega, B., Huber, J. A. J., & Šernek, M. (2023). Bonding performance of melamine–urea–formaldehyde and polyurethane adhesives for laminated hybrid beams and their selected mechanical properties. *Buildings*, *13*, 2087. https://doi.org/10.3390/buildings13082087

FCBA, & IRABOIS. (2015). *Bois massifs aboutés (BMA)* [Fiche produit n° 11.03]. FCBA, IRABOIS.

Fibois Auvergne-Rhône-Alpes. (2024). *Construire en bois #8 : Feuillus* (Z. Faure, Réd.). Fibois Auvergne-Rhône-Alpes.

Filière Bois Wallonie. (2024). *Accueil — W.A.V.E., Wood Added Value Enabler*. https://wave-gr.eu/en/ (consulté le 11 août 2026).

Finlam. (2026). *Procédés de collage dans la fabrication du lamellé-collé*. https://www.finlam.fr/lemag/procedes-de-collage-dans-la-fabrication-du-lamelle-colle (consulté le 13 août 2026).

Fraden, J. (2016). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5e éd.). Springer International Publishing.

Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., & Cerre, J.-C. (2011). *Tropix 7*. CIRAD.

Gerhards, C. C. (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. *Wood and Fiber*, *14*(1), 4–36.

Gilles, A., Lisein, J., Latte, N., Lejeune, P., & Claessens, H. (2023). Est-ce la fin de la crise des scolytes ? Suivi du phénomène par télédétection. *Silva Belgica*, *3*, 24–33.

Glued Laminated Timber Association. (n.d.). *Volume 2 – Le bois lamellé-collé en tant que matériau de construction*. Glulam Handbook. https://handbook.glulam.org/volume-2-1-le-bois-lamelle-colle-en-tant-que-materiau-de-construction/

Grazide, C. (2014). *Une modélisation de la résistance en flexion du pin maritime utilisé en construction* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux].

Hardy, B., & Dufey, J. (n.d.). *[Notes de cours]*. UCLouvain, Earth & Life Institute, Environmental Sciences.

Hasslacher Group. (2026). *Glue laminated timber birch*. https://www.hasslacher.com/glue-laminated-timber-birch (consulté le 13 août 2026).

Heräjärvi, H. (2024). *Properties of birch (Betula pendula, B. pubescens) for sawmilling and further processing in Finland*.

Himpens, S., Laurent, C., & Marchal, D. (Coord.). (2017). *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes : Recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires*. Service Public de Wallonie.

Hitt, S. J., Hairstans, R., Hart, S., Rogers, L., Ridley-Ellis, D., Cramer, M., Plowas, W., & Charleson, F. (2026). *Building from England's woodlands*. New Model Institute for Technology and Engineering (NMITE).

Hout Info Bois. (2023). *Les colles pour le bois*. https://www.houtinfobois.be/informations-techniques/materiaux/les-colles-pour-le-bois/

Hout Info Bois. (2024). *État de la construction bois en Belgique 2011-2024* (en collaboration avec Embuild Bruxelles et Embuild Wallonie). https://www.houtinfobois.be/telechargements/enquete-etude

ISO 13061-1:2014. *Propriétés physiques et mécaniques du bois — Méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois sans défauts — Partie 1 : Détermination de la teneur en humidité en vue des essais physiques et mécaniques*. ISO.

ISO 13061-2:2014. *Propriétés physiques et mécaniques du bois — Méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois sans défauts — Partie 2 : Détermination de la masse volumique en vue des essais physiques et mécaniques*. ISO.

ISO 13061-13:2024. *Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage*. ISO.

ISO 13061-14:2024. *Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 14: Determination of volumetric shrinkage*. ISO.

Jactel, H., & Marini, L. (2021). Libre évolution des forêts et maîtrise du risque sanitaire associé aux scolytes des conifères. *Revue Forestière Française*, *73*(2–3), 383–390. https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.5477

Kakaras, J. A., & Philippou, J. L. (1996). Treatability of several Greek wood species with the water soluble preservative CCB. *Holz als Roh- und Werkstoff*.

Kamke, F. A., & Lee, J. N. (2007). Adhesive penetration in wood — A review. *Wood and Fiber Science*, *39*(2).

Klippel, M., (2014). FIRE SAFETY OF BONDED STRUCTURAL TIMBER ELEMENTS – Doctoral thesis. ETH Zurich.

KLH Massivholz GmbH. (2026). *Panneau bois contrecollé*. https://www.klh.at/fr/panneau-bois-contrecolle/ (consulté le 13 août 2026).

Kwakernaak, A., Hofstede, J., Poulis, J., & Benedictus, R. (2012). Improvements in bonding metals for aerospace and other applications. Dans *Welding and joining of aerospace materials* (pp. 235–287). Woodhead Publishing.

La Spina, S., Grégoire, J.-C., & De Cannière, C. (2012). Épidémies de scolytes sur le hêtre : le rôle du climat étudié par voie expérimentale. *Forêt Wallonne*, *117*, 3–12.

Latte, N., Perin, J., Lejeune, P., & Claessens, H. (2022). *Le point sur l'équilibre feuillus/résineux et son évolution en forêt wallonne*.

Latteur, P. (suppl. Rondeaux, J.-F.). (2020-2021). *INGE0001 – Résistance des matériaux et élasticité* [Notes de cours]. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.

Leban, J. M., et al. (2022). *XyloDensMap – Wood basic density for 156 tree forest species* [Base de données].

Leitz GmbH & Co. KG. (2022). *Minifinger joint cutter, Marathon – ZL 15 mm, TG 3,8 mm* [Fiche technique]. https://lexicon.leitz.org/en/minifinger-joint-cutter-marathon-zl-15-mm-tg-3-8-mm-1018602.html (consulté le 9 août 2026).

Leitz GmbH & Co. KG. (2026). *Encyclopédie Leitz édition 7 — 03 Rabotage et profilage* (Version 2). https://www.leitz.org

Leloy, C. (2012). Histoire d'un matériau d'avenir. Dans *Le eBook du centenaire : 100 ans de bois lamellé* (pp. 2–11). Le Bois Lamellé.

Leroy, Q. (2025). *Le typographe et sa gestion*. Observatoire wallon de la Santé des Forêts (OWSF), SPW-DGARNE-DEMNA-DMF.

Martin, P. (n.d.). *Retraits, déformations et fentes de séchage* [Fiche technique n° 3]. ATIBT.

Mei Architects and Planners. (2025). *SAWA*. https://mei-arch.eu/en/projects/sawa/ (consulté le 13 août 2026).

Meier, E. (2024). *The Wood Database*. https://www.wood-database.com (consulté le 9 août 2026).

Mortelmans, T. (2025). *Catalogue des essences du projet W.A.V.E. et de leur utilisation potentielle — Version vulgarisée*. ULiège, Filière Bois Wallonie & Société Royale Forestière de Belgique.

Ndong Bidzo, C. H., Moutou Pitti, R., Pambou Nziengui, C. F., Ikogou, S., & Kaiser, B. (2020). Résistance au cisaillement des joints de colle de bois lamellé collé d'origine tropicale. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, *38*(1), 349–356.

Ndong Bidzo, C. H. (2023). *Comportement mécanique des poutres en bois lamellé collé (BLC) des feuillus tropicaux : caractérisation expérimentale et analytique* [Thèse de doctorat, École nationale des eaux et forêts, Libreville].

Pensis, Z. (2020). *Potentiel du bois de bouleau (Betula pendula Roth & B. pubescens Ehrh.) produit en Région wallonne et en Europe - Application à l'entreprise belge Kewlox* [Travail de fin d'études, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège]. MatheO. http://hdl.handle.net/2268.2/10876

Petit, S., Cordier, S., Claessens, H., Ponette, Q., Vincke, C., Marchal, D., & Weissen, F. (2017). *Fichier écologique des essences*. Forêt.Nature, UCLouvain-ELIe, ULiège-GxABT, SPW-ARNE-DNF. fichierecologique.be (consulté le 27/07/2026).

Poliquin, L. (2022). Construire en bois. *Journal de la construction*, *13*. Cecobois.

Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG. (2026). *BauBuche*. https://www.pollmeier.com/baubuche/ (consulté le 13 août 2026).

Pommier, R. (2006). *Compréhension de l'aboutage du bois vert : élaboration du procédé et principes physico-mécaniques appliqués au pin maritime* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux].

Popovic, M. (2023). *Forest cover, Belgium* [Carte]. https://milospopovic.net

Rendle, B. J. (1969). *World timbers: Europe and Africa*. Ernest Benn Limited.

Ressources Naturelles Développement ASBL (RND). (2022). *Livre blanc de la crise du scolyte 2018-2022*. Projet Interreg V-A Grande Région « Regiowood II ».

Rijsdijk, J. F. (1994). *Physical and related properties of 145 timbers*. Kluwer Academic Publishers.

Ross, R. (Éd.). (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-282). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.

Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG. (2025). *Cubis® II — The new generation of modular premium balances* [Fiche technique]. www.sartorius.com

Savatier, F. (2023). *La plus ancienne charpente date de presque 500 000 ans*. Pour la Science. https://www.pourlascience.fr/sd/prehistoire/la-plus-ancienne-charpente-date-de-presque-500-000-ans-25729.php (consulté le 02/08/2026).

Sell, J., & Kropf, F. (1990). *Propriétés et caractéristiques des essences de bois*. Lignum.

Shirmohammadli, Y., Pizzi, A., Raftery, G. M., & Hashemi, A. (2023). One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *123*, 103358.

sp367 [University of Cambridge]. (n.d.). *Fundamentals of beam bending: Elastic bending of beams*. The Gordon Laboratory. https://sp367.user.srcf.net/mechanics2.pdf (consulté le 9 août 2026).

SPW – État de l'environnement wallon. (2026a). *Prélèvements de bois* [Fiche indicateur]. http://etat.environnement.wallonie.be (consulté le 14 juillet 2026).

SPW – État de l'environnement wallon. (2026b). *Ressources forestières* [Fiche indicateur]. http://etat.environnement.wallonie.be (consulté le 26 juillet 2026).

Spinella, A., Chillura Martino, D. F., Saladino, M. L., Sammartino, F., Caruso, F., & Caponetti, E. (2021). Solid state NMR investigation of the Roman Acqualadroni rostrum: Tenth year assessment of the consolidation treatment of the wooden part. *Cellulose*, *28*(2), 1025–1038. https://doi.org/10.1007/s10570-020-03563-2

Steiger, R., Gehri, E., & Richter, K. (2010). Quality control of glulam: Shear testing of bondlines. *European Journal of Wood and Wood Products*, *68*, 243–256.

TIRA GmbH. (2026). *TIRAtest universal testing machines* [Fiche technique]. https://www.tira-gmbh.de/en/material-testing/

Tran, V. D. (2014). *Caractérisation et modélisation numérique des poutres en bois massif reconstitué (BMR) réalisées avec une essence locale feuillue* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine].

Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold.

Varnier, M., Sauvat, N., Montero, C., Dubois, F., & Gril, J. (2019). Diffusion de l'eau dans le bois en extérieur : des résineux aux feuillus. *AJCE - Special Issue*, *36*(1), 171–174.

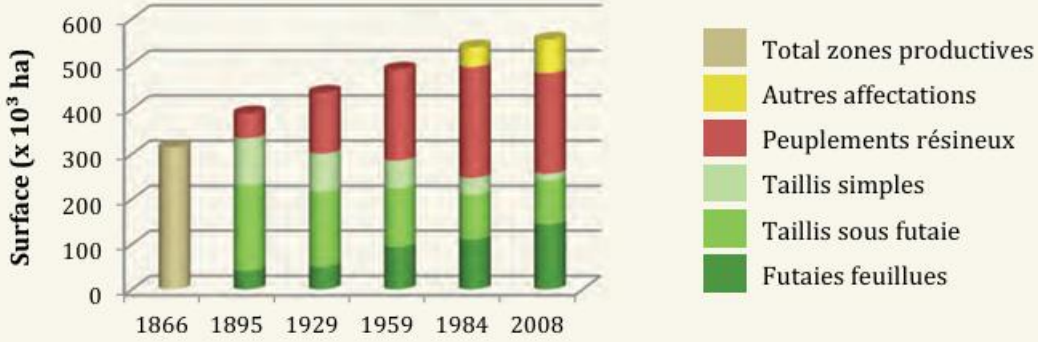
Vedernikov, D., et al. (2022). *Chemical composition and mechanical properties of various parts of birch wood*.

Wagenführ, R., & Wagenführ, A. (2022). *Holzatlas* (7e éd.). Carl Hanser Verlag.

8. Annexes

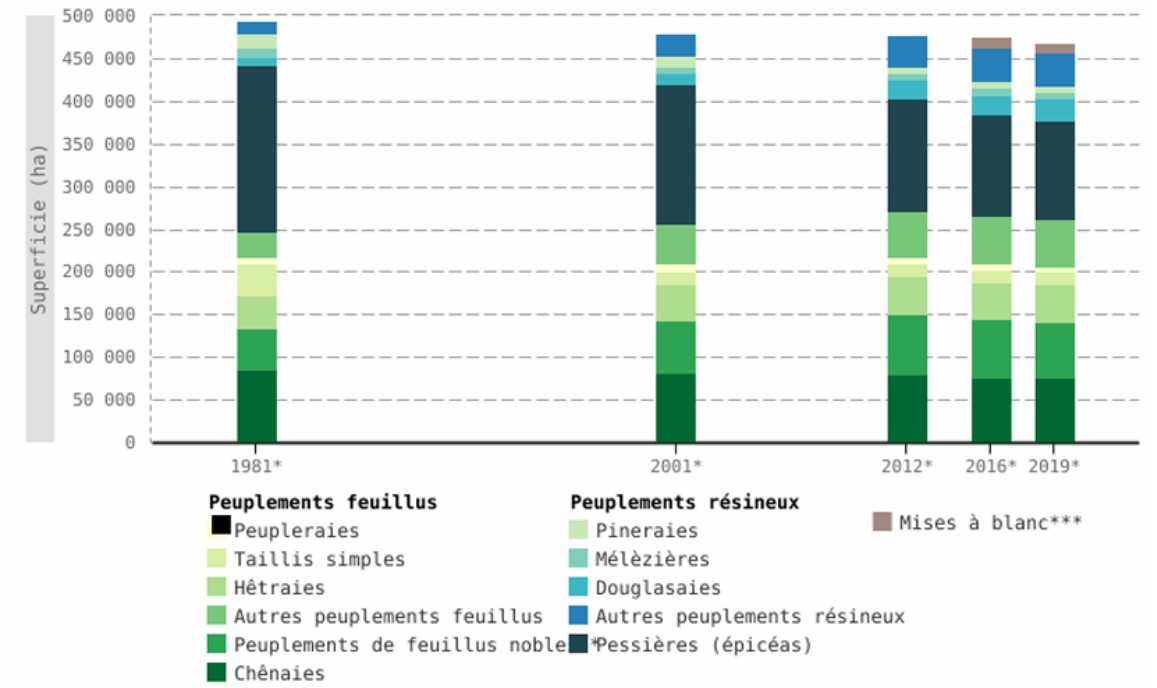


Annexe 1 : Grange de l'abbaye de Bonport, 1228 (source : Une brève histoire de la charpenterie française, Epaud, 2024)

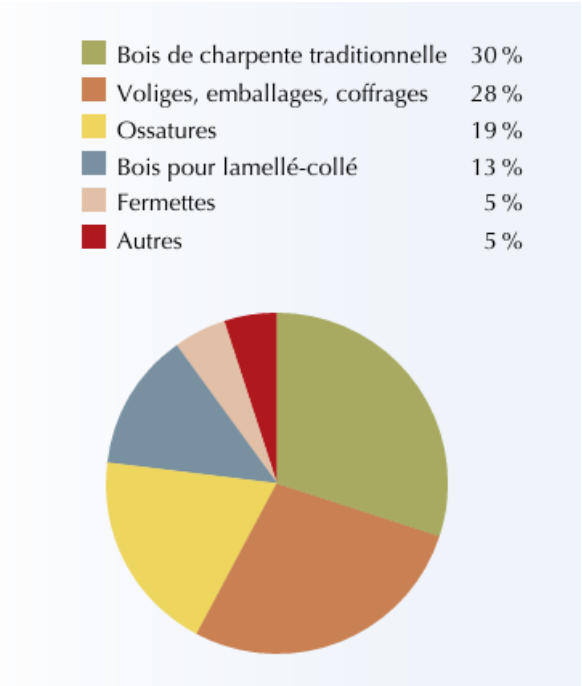


	1866	1895	1929	1959	1984	2008
Futaies feuillues	-	41	49	94	111	143
Taillis sous futaie (TSF)	-	190	167	130	100	98
Taillis simple	-	105	85	61	37	14
Peuplements résineux	-	56	136	202	246	223
Tous peuplements	**316**	**391**	**437**	**488**	**493**	**480**
Autres affectations	-	-	-	-	44	75

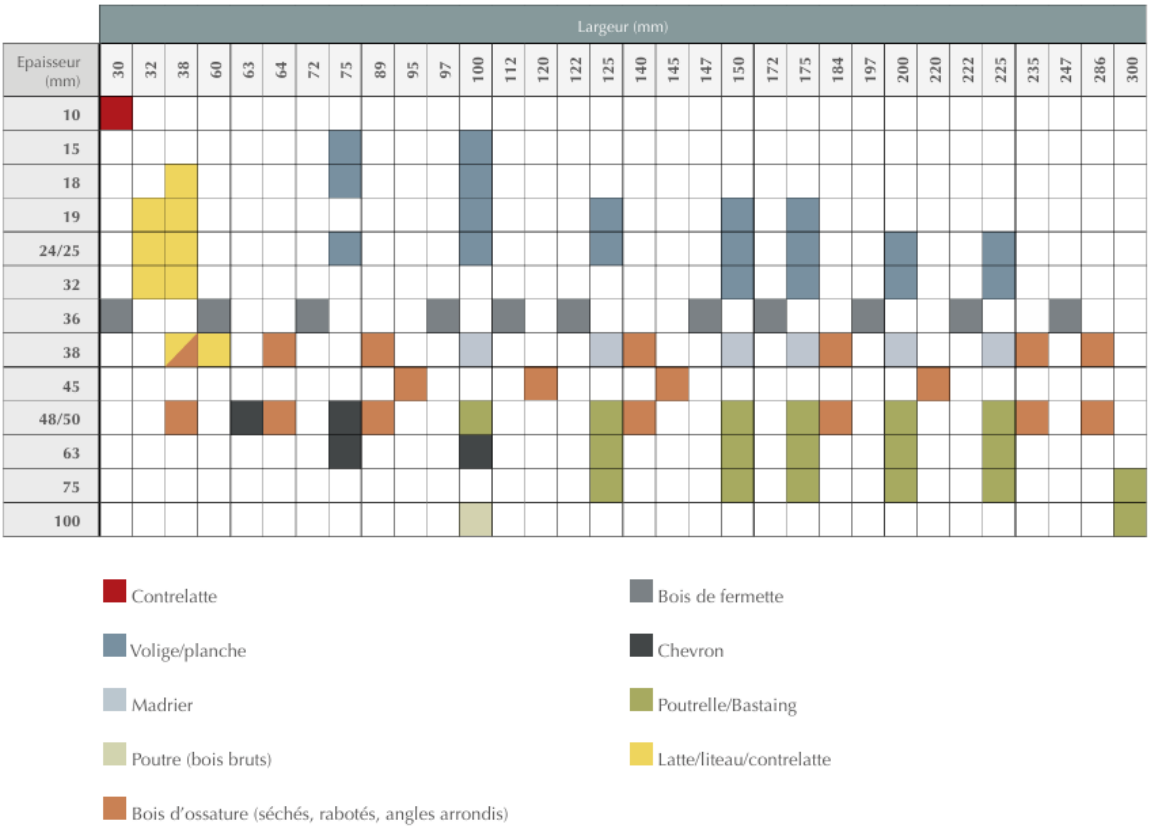
Annexe 2 : Évolution des surfaces forestières de 1866 à 2008, en milliers d'ha (source : Inventaire forestier wallon Résultats 1994-2012, Alderweireld et al., 2015)



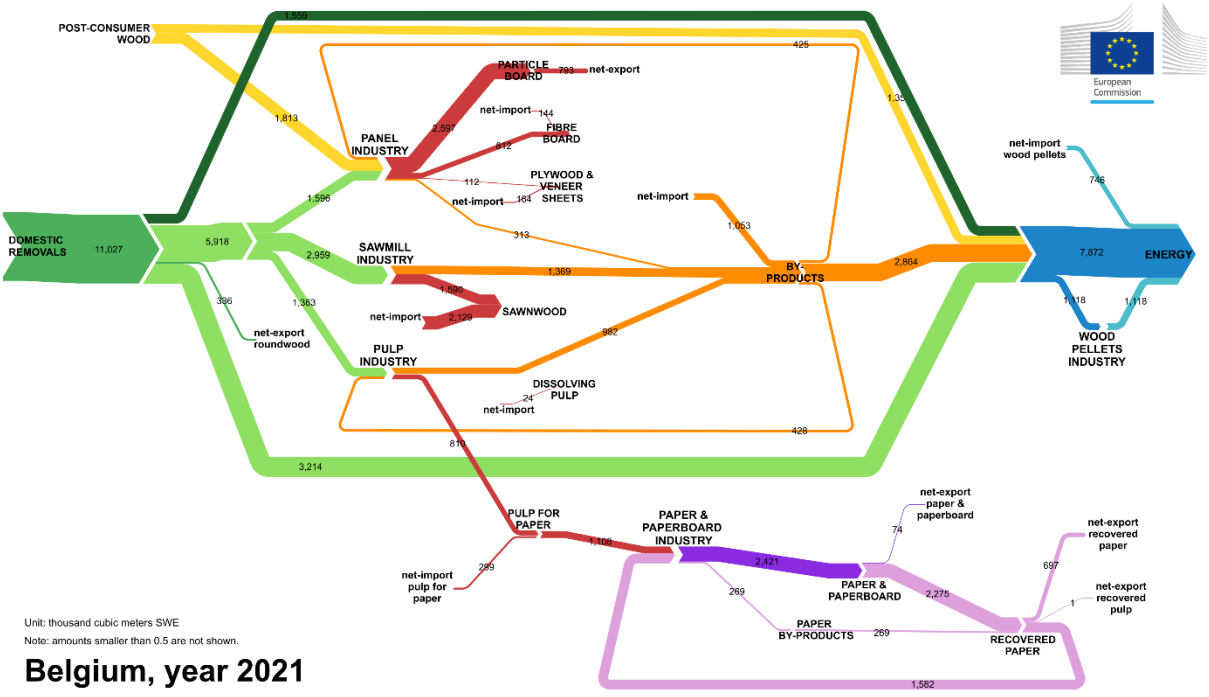
Annexe 3 : Superficie des différents peuplements de la forêt productive en Wallonie (source : Ressources forestières, État de l'environnement wallon, 2026)



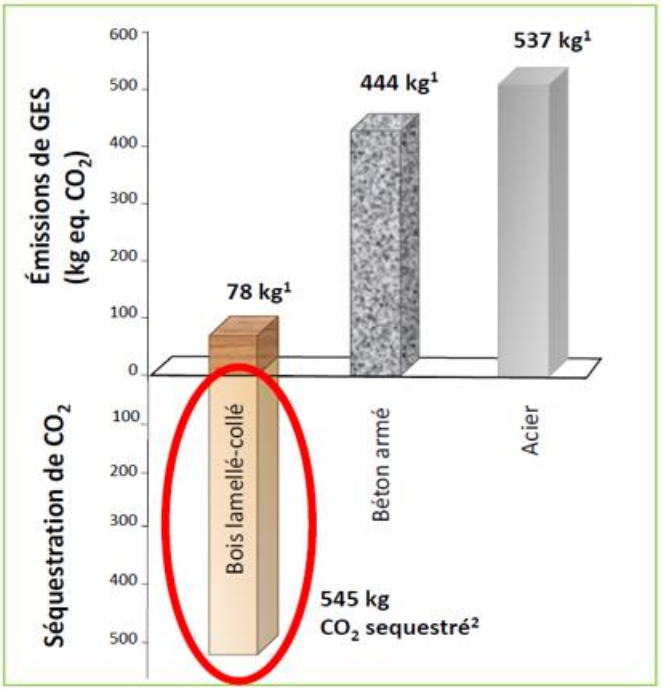
Annexe 4 : Répartition des types de produits de bois de résineux en 2020 (source : Le secteur du sciage, Defays & Saerens, 2021)



Annexe 5 : Sections standards les plus courantes des sciages résineux (source : Le secteur du sciage, Defays & Saerens, 2021)



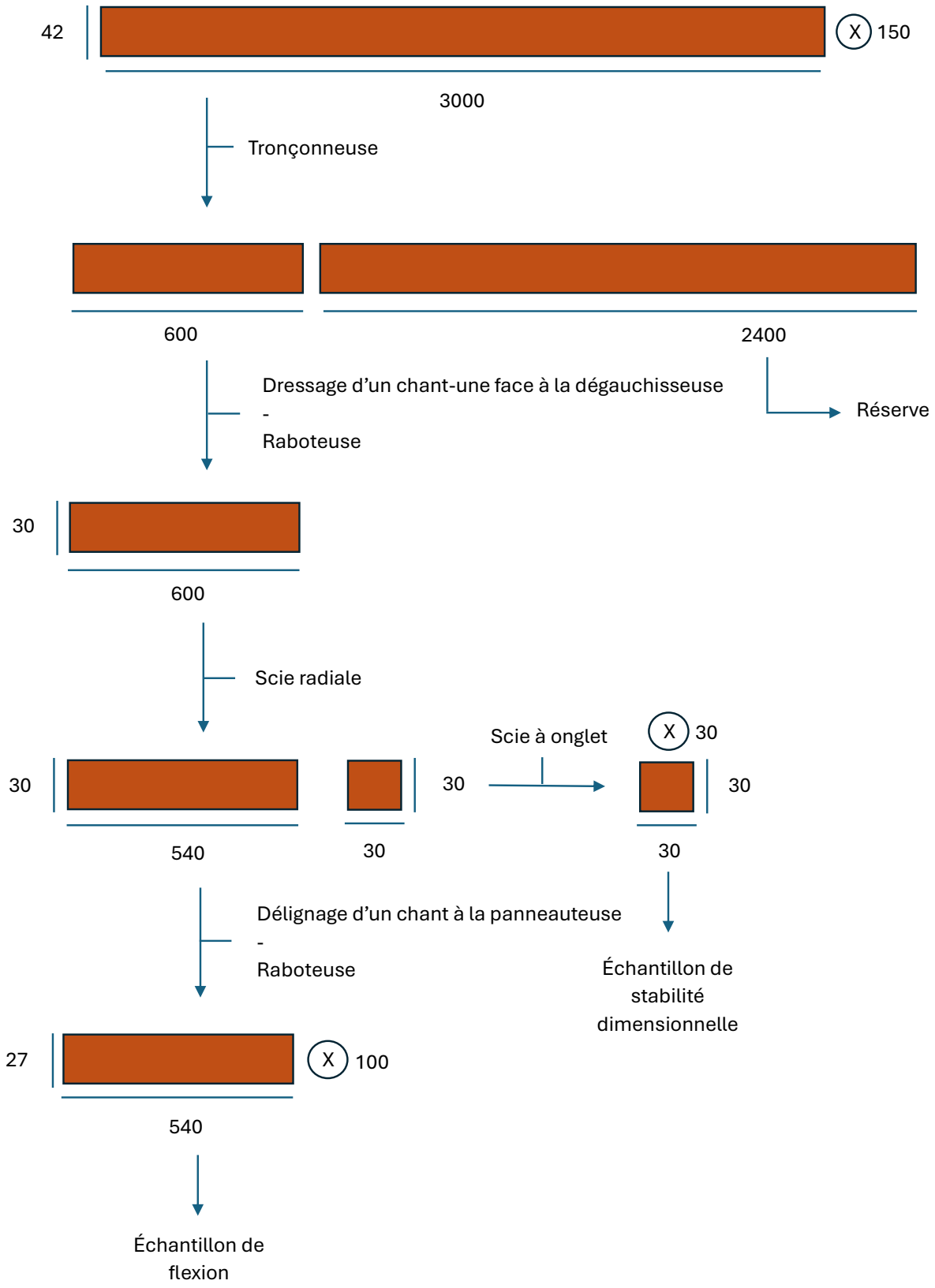
Annexe 6 : Diagramme de Sankey du flux de biomasse ligneuse en Belgique en 2021 (source : Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU, Cazzaniga et al., 2022)



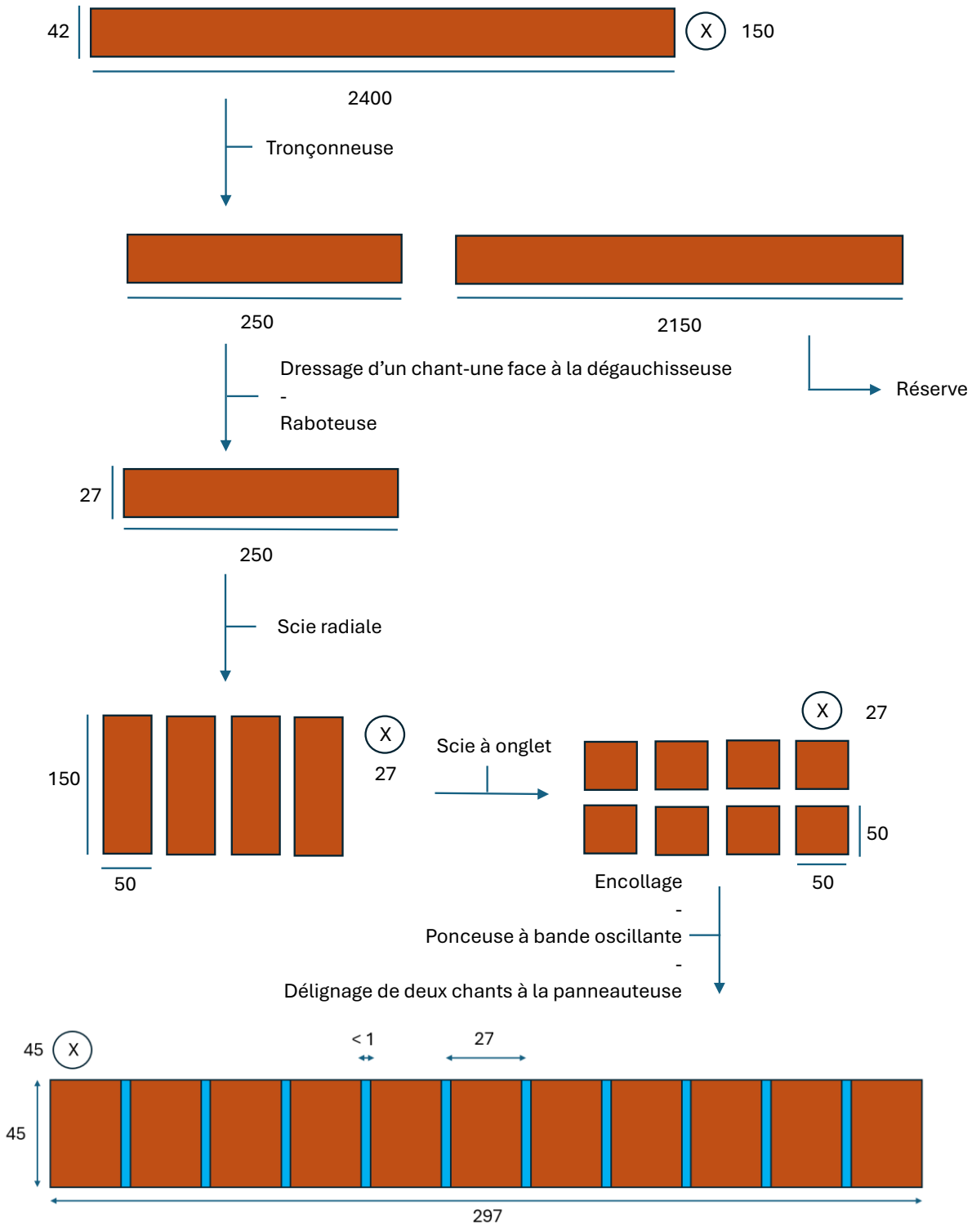
Annexe 7 : Comparaison du bilan carbone de différents matériaux de construction (source : Construire en bois, Poliquin, 2022)



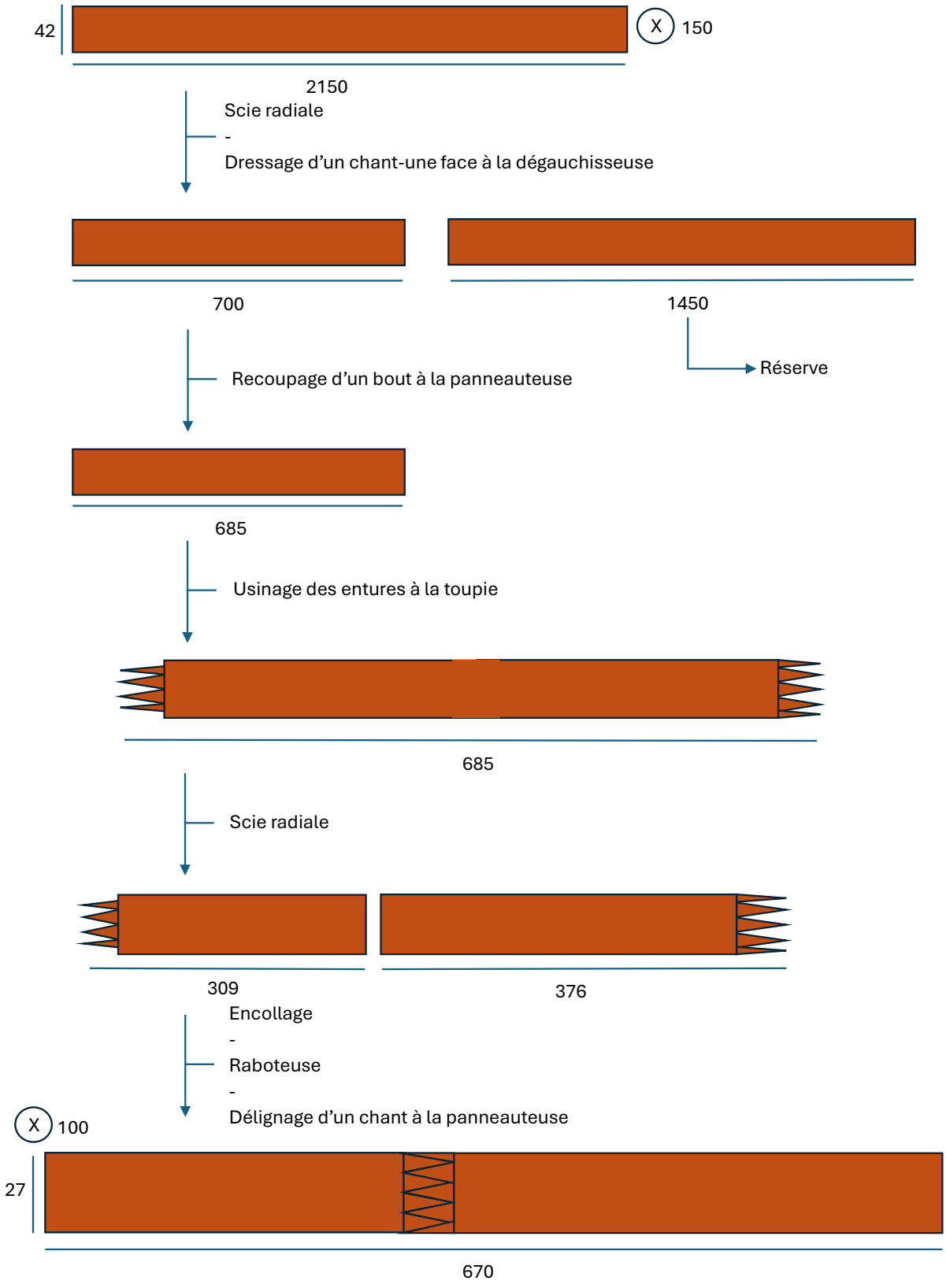
Annexe 8 : Éprouvettes de cisaillement axial (300x55x32 mm) de chaque essence façonnées au Laboratoire de Technologie du Bois, photo de l'auteur



Annexe 9 : Plan de découpe des planches de flexion et des cubes de stabilité dimensionnelles, dimensions exprimées en mm, schéma de l'auteur



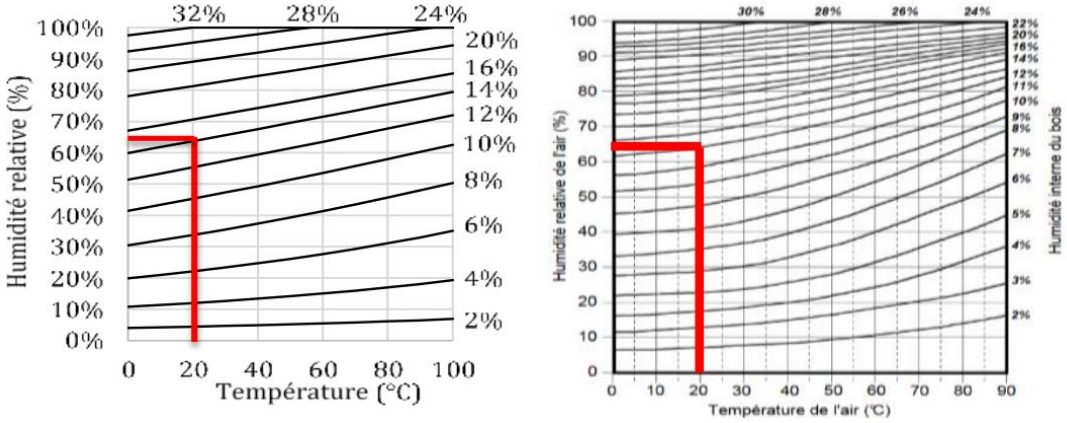
Annexe 10 : Plan de découpe et d'assemblage des barreaux lamellés-collés, dimensions exprimées en mm, schéma de l'auteur



Annexe 11 : Plan de découpe et d'assemblage des planches aboutées, dimensions exprimées en mm, schéma de l'auteur

Dénomination des machines	modèle
Scie radiale	De Walt
Scie à onglet	Elektra Beckum K5250
Scie à panneau	Robland Z320 – 10-5017
Toupie	TS110 Sac Ducuroir
Dégauchiseuse	Danckaert
Raboteuse	Casadei R63h3
Balance	Sartorius
Tronçonneuse	Sthill MS362
Cloueuse	Kitpro
Ponceuses à bande	Ryobi

Annexe 12 : Ensembles des machines ayant servies au façonnage des échantillons testés



Annexe 13 : Abaque d'équilibre hygroscopique du hêtre (à gauche) et des résineux (source : Diffusion de l'eau dans le bois en extérieur : Des résineux aux feuillus, Varnier et al., 2019)

$$E0 = E0,u\ (1+0,01\ (u - uref))(11)$$

E0 : module d'élasticité axial

u : la teneur en humidité au moment de l'essai (8 % ≤ u ≤ 18 %)

uref : teneur en humidité de référence, habituellement uref = 12 %

Annexe 14 : Équation de correction du module d'élasticité axial en fonction du taux d'humidité (EN 384, 2016)

$$\rho = \rho u\ (1 - 0,005(u - uref))\quad (12)$$

ρ : masse volumique

u : la teneur en humidité au moment de l'essai (8 % ≤ u ≤ 18 %)

uref : teneur en humidité de référence, habituellement uref = 12 %

Annexe 15 : Équation de correction de la masse volumique en fonction du taux d'humidité (EN 384, 2016)



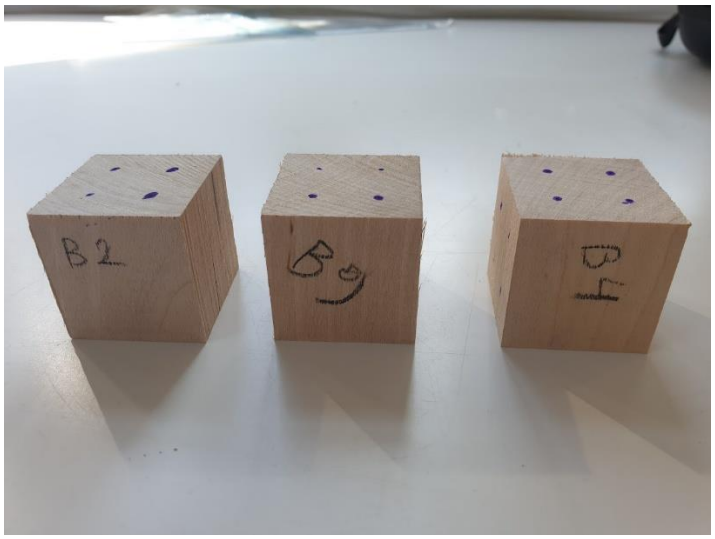
Annexe 16 : Balance de précision Sartorius (Sartorius Lab Instruments, 2025), photo de l'auteur



Annexe 17 : Échantillons de stabilité dimensionnelle à l'étuve



Annexe 18 : Pesée hydrostatique d'un échantillon séché à l'air libre



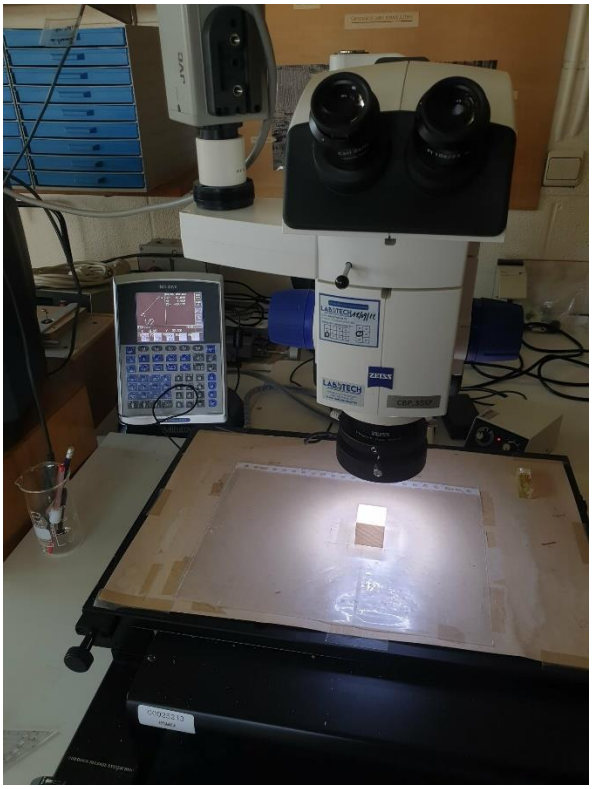
Annexe 19 : Échantillons de stabilité dimensionnelle



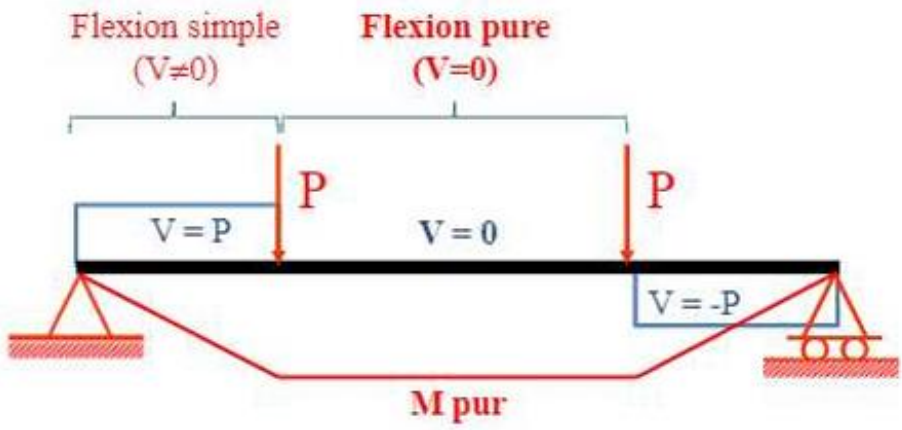
Annexe 20 : Échantillons de stabilité dimensionnelle en immersion



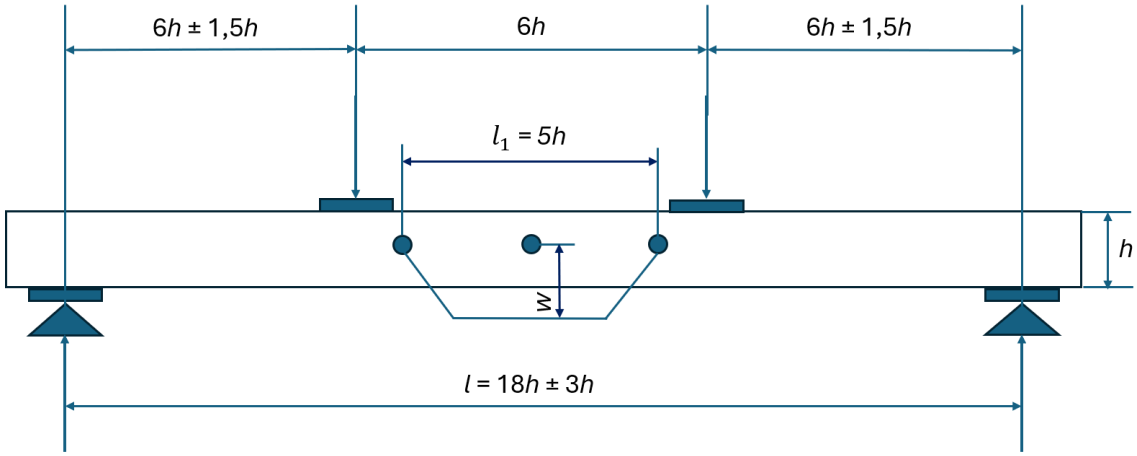
Annexe 21 : Extraction de l'air des échantillons de stabilité dimensionnelle par le vide



Annexe 22 : Table micrométrique



Annexe 23 : Diagramme de l'effort tranchant et du moment de flexion dans un essais de flexion 4 points (Source : Résistance des matériaux et élasticité. Notes de cours, Latteur & Rondeaux, 2020-2021)



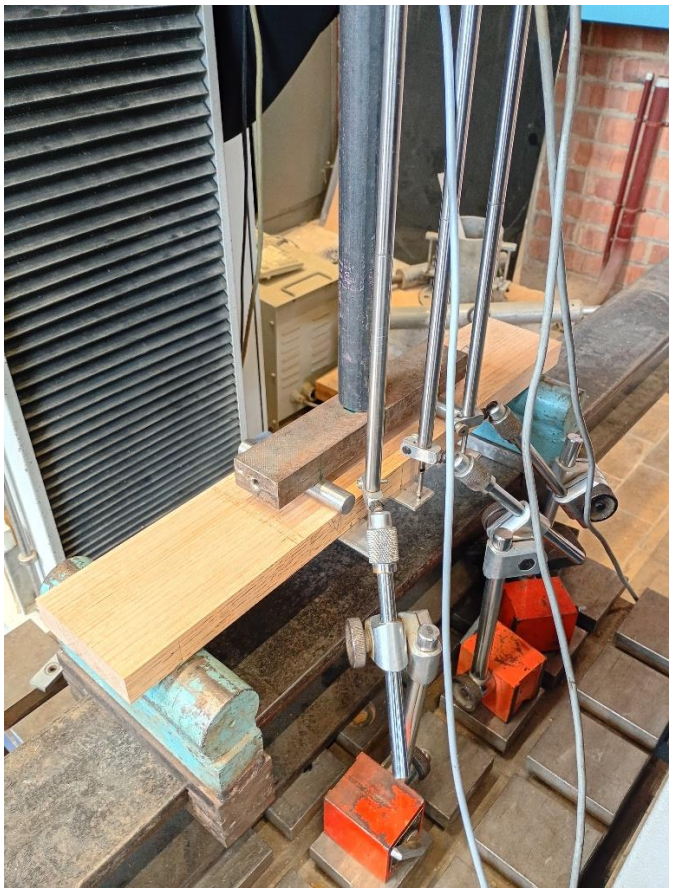
Annexe 24 : Dispositif d'essais pour la mesure du module local d'élasticité en flexion (EN 408 § 9, 2012), schéma de l'auteur



Annexe 25 : Machine d'essais universelle TIRA, photo de l'auteur



Annexe 26 : Poste de commande de la machine d'essais universelle TIRA, photo de l'auteur



Annexe 27 : Dispositif en flexion 4 points sur la machine d'essais universelle TIRA, photo de l'auteur



Annexe 28 : Planches d'essais en flexion 4 points d'Alnus glutinosa présentant des défauts (avec rupture au niveau du défaut), photo de l'auteur



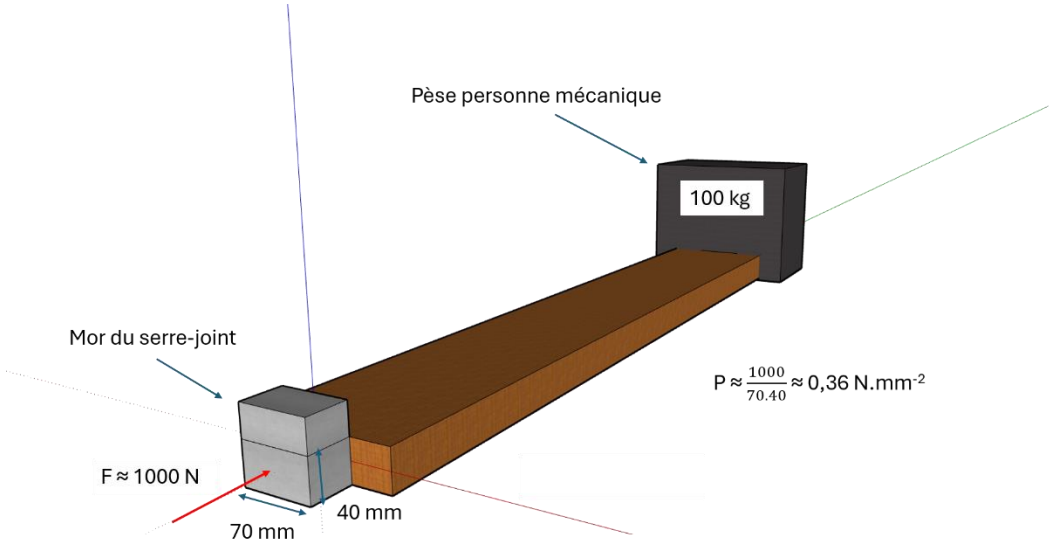
Annexe 29 : Façonnage des entures à la toupie, photo de l'auteur



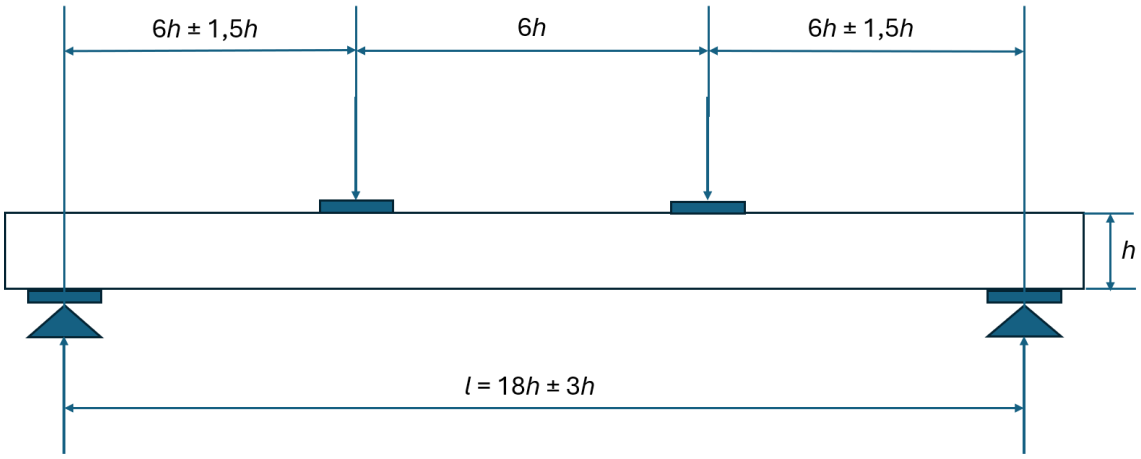
Annexe 30 : encollage des entures, photo de l'auteur



Annexe 31 : Pressage des planches enturées et collées, photo de l'auteur



Annexe 32 : Schéma de calcul de la pression appliquée sur une planche aboutée, schéma de l'auteur



Annexe 33 : Dispositif d'essais pour la mesure de la résistance à la flexion axiale (EN 408 § 19, 2012), schéma de l'auteur

Étape 1 : Recherche des MOE et MOR de la littérature

Tableau A.1 : MOE et MOR des essences étudiées (source : Technical, Environmental, and Economic Properties of Several Wood Species from Forests of Western Europe, Duyck & Mortelmans, 2025)

N.B. le nombre de références utilisées pour calculer les moyennes et écart-types par essences sont reprises dans le tableau sous forme (r = x), l'ensemble de ces sources est disponible en bibliographie

Essence	n planches	MOE littérature (MPa)	MOR littérature (MPa)
Betula spp.	15	14800 ± 1069.2 (r = 5)	124,8 ± 18,49 (r = 6)
Quercus rubra	15	12450 ± 201.99 (r = 3)	102,9 ± 4,29 (r = 3)
Populus tremula	15	9350 ± 1274.32 (r = 4)	65 ± 8,83 (r = 4)
Alnus glutinosa	15	10400 ± 838.96 (r = 4)	89,7 ± 5,15 (r = 4)

Étape 2 : Calcul des forces maximales estimées

$$f_m = \frac{3.F.a}{b.h^2}$$

f_m : résistance à la flexion axiale (N.mm^{-2})

F : Force (N)

a : distance entre le point de chargement et l'appui le plus proche (mm)

b : largeur de la section transversale (mm)

h : hauteur de la section transversale (mm)

Équation A.1 : Formule de la résistance à la flexion axiale (EN 408, 2012)

Tableau A.2 : Force maximale estimée jusqu'à la rupture des échantillons par essence

Essence	F max estimée (N)	0,1 F max estimée (N)	0,4 F max estimée (N)
Betula spp.	19500	1950	7800
Quercus rubra	15300	1530	6120
Populus tremula	8880	888	3552
Alnus glutinosa	13455	1345,5	5382

Étape 3 : Calcul des flèches maximales estimées

$$\delta = \frac{P.a.[3.L^2 - 4.a^2]}{48.E.I}$$

δ : flèche maximale (mm)

P : Force (N)

a : distance entre le point de chargement et l'appui le plus proche (mm)

L : distance entre les appuis extérieurs (portée) (mm)

E : module de Young (MPa)

I : moment quadratique de la section de la poutre (mm^4)

Équation A.2 : Formule générale de la flèche maximale pour une poutre sur deux appuis avec 2 charges ponctuelles symétriques (Fundamentals of Beam Bending, université de Cambridge, n.d.)

Étape 4 : Détermination de la vitesse de chargement estimée par essence

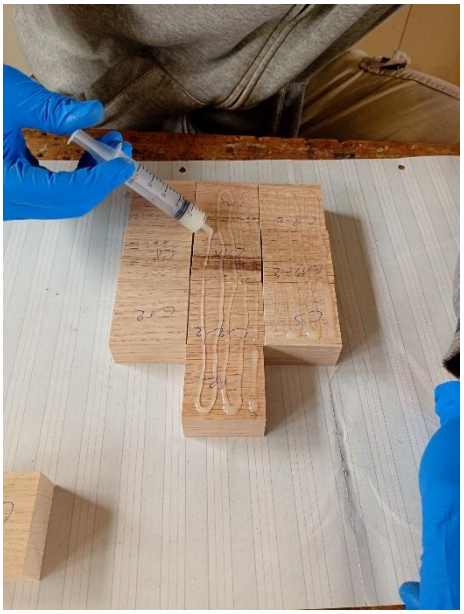
Tableau A.3 : Flèche maximale, temps jusqu'à rupture et vitesse de chargement estimés des échantillons par essence.

Essence	F max estimée (N)	Flèche max estimée (mm)	Temps estimé avant rupture (s)	Vitesse de chargement estimée (mm/s)
Betula spp.	19500	16,36	202,03	4,86
Quercus rubra	15300	15,26	188,43	4,86
Populus tremula	8880	11,80	145,63	4,86
Alnus glutinosa	13455	16,07	198,38	4,86

Annexe 34 : méthode de détermination de la vitesse de chargement estimée par essence



Annexe 35 : Dispositif d'essais en flexion 4 points sur bois abouté, photo de l'auteur

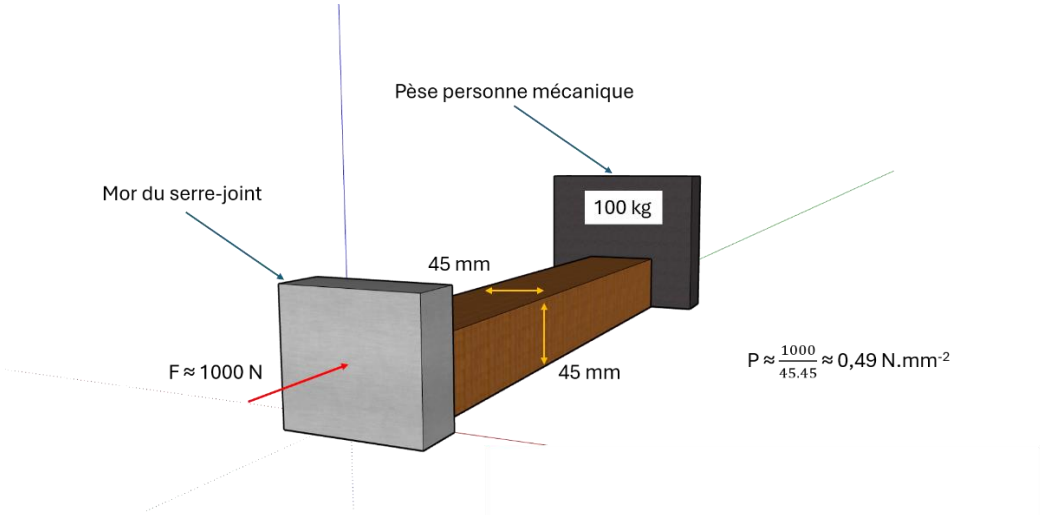


Annexe 36 : Application de la colle sur les blochets d'un barreau d'essais de chêne rouge, photo de l'auteur





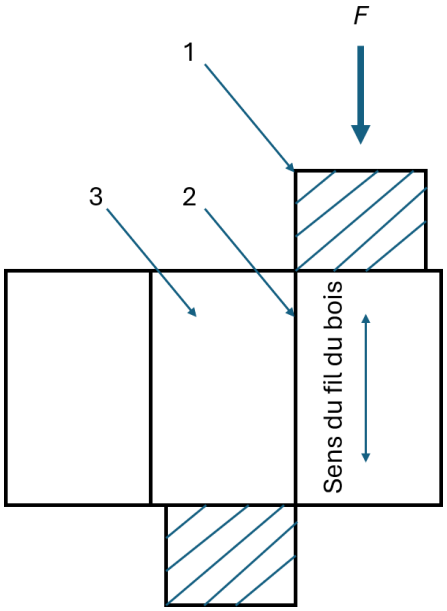
Annexe 37 : Façonnage des barreaux lamellés-collés de résistance au cisaillement des joints de collage, photos de l'auteur



Annexe 38 : Schéma de calcul de la pression appliquée sur un barreau d'essais en cisaillement, schéma de l'auteur



Annexe 39 : Gouttières et serre-joints ayant servis au façonnage des barreaux de résistance en cisaillement des joints de colle, photo de l'auteur

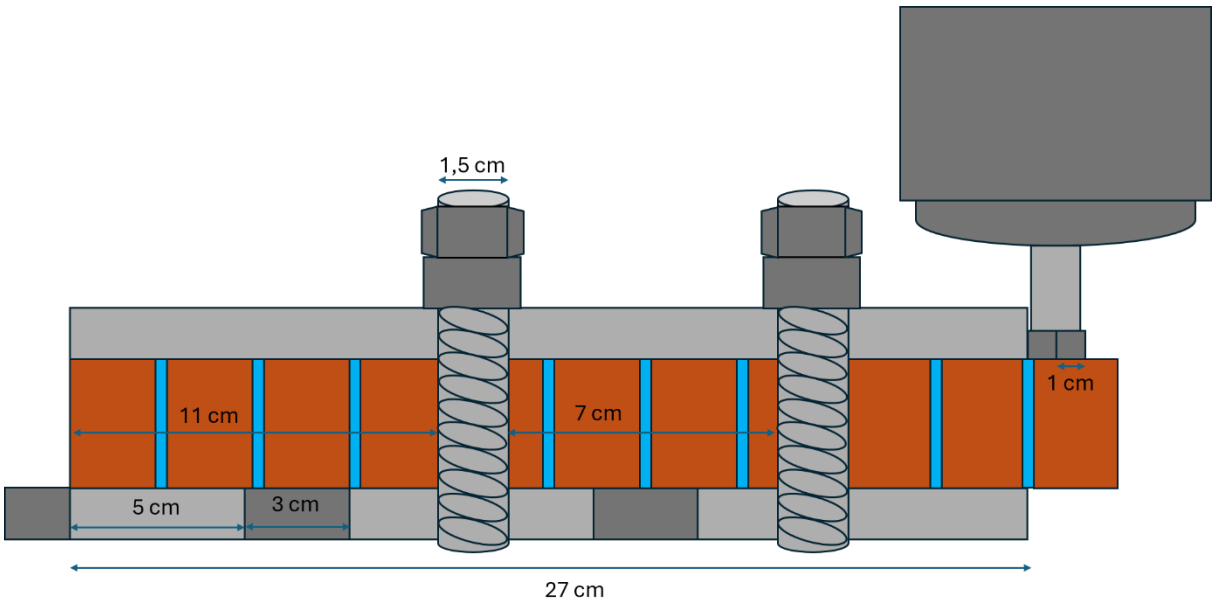


1	appuis à rotule
2	plan de cisaillement
3	barreaux d'essais fixé si nécessaire
F = effort	

Annexe 40 : Dispositif de cisaillement avec barreau d'essais en place (EN 14080, 2013), schéma de l'auteur



Annexe 41 : Dispositif d'essais en cisaillement du joint de collage sur la machine d'essais universelle TIRA, photo de l'auteur



Annexe 42 : Dimensions du dispositif d'essais de résistance en cisaillement des joints de collage, schéma de l'auteur



0 %



10 %



20 %



30 %



40 %



50 %



60 %



70 %



80 %

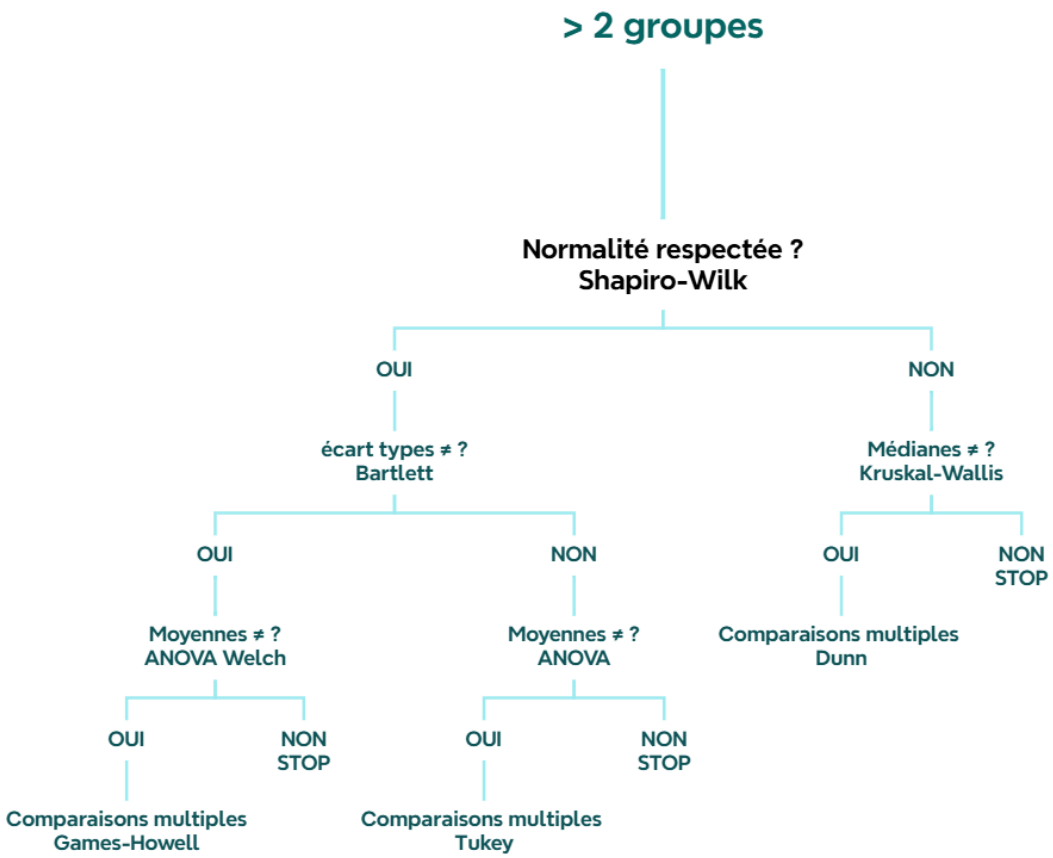


90 %

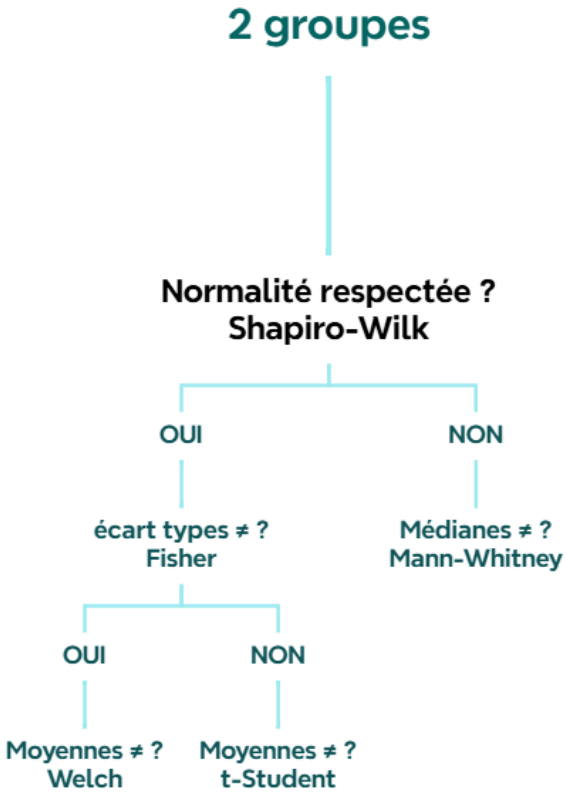


100 %

Annexe 43 : Gradation des pourcentages de rupture dans le bois dans des blochets issus des essais de cisaillement des joints de collage, photos de l'auteur



Annexe 44 : Arbre décisionnel des tests d'inférence statistique pour plus de deux groupes, schéma de l'auteur



Annexe 45 : Arbre décisionnel des tests d'inférence statistique pour deux groupes, schéma de l'auteur

Essence	**Taux d'humidité [%]**
Betula spp.	13,82 ± 0,55 (n = 15)
Quercus rubra	15,37 ± 0,79 (n = 15)
Populus Tremula	13,52 ± 1,31 (n = 15)
Alnus glutinosa	15,75 ± 0,84 (n = 15)

Annexe 46 : Taux d'humidité des essences séchées à l'air libre en atelier, tableau de l'auteur

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,0042	0,3012	0,1036	0,7914
Passed normality test (alpha=0.05)?	No	Yes	Yes	Yes
P value summary	**	ns	ns	ns

Annexe 47 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk sur le retrait radial des essences, tableau de l'auteur

Kruskal-Wallis test	
P value	0,0638
P value summary	ns
Do the medians vary signif. (P < 0.05)?	No
Number of groups	4
Number of values (total)	60

Annexe 48 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur le retrait radial des essences, tableau de l'auteur

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,1998	0,9092	0,9478	0,9873
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns

Annexe 49 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk sur le retrait tangentiel des essences, tableau de l'auteur

Bartlett's test	
P value	0,7432
P value summary	ns
Are SDs significantly different (P < 0.05)?	No

Annexe 50 : Résultat du test de Bartlett sur le retrait tangentiel des essences, tableau de l'auteur

ANOVA summary	
P value	0,6885
P value summary	ns
Significant diff. among means (P < 0.05)?	No
R square	0,0262
Number of treatments (columns)	4
Number of values (total)	60

Annexe 51 : Résultats de l'ANOVA sur les retraits tangentiels des essences, tableau de l'auteur

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,005	0,0206	0,0262	0,8726
Passed normality test (alpha=0.05)?	No	No	No	Yes
P value summary	**	*	*	ns

Annexe 52 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk pour le retrait volumique des essences

Kruskal-Wallis test	
P value	0,0703
P value summary	ns
Do the medians vary signif. (P < 0.05)?	No
Number of treatments (columns)	4
Number of values (total)	60

Annexe 53 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le retrait volumique des essences

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,5555	0,9335	0,1759	0,0145
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	No
P value summary	ns	ns	ns	*

Annexe 54 : Test de normalité de Shapiro-Wilk sur les MOE des essences, tableau de l'auteur

Kruskal-Wallis test	
P value	0,098
P value summary	ns
Do the medians vary signif. (P < 0.05)?	No
Number of treatments (columns)	4
Number of values (total)	44

Annexe 55 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur les MOE des essences, tableau de l'auteur

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,1969	0,8516	0,0901	0,9162
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns

Annexe 56 : Test de normalités du MOE des essences aboutées, tableau de l'auteur

Bartlett's test	
P value	0,0081
P value summary	**
Are SDs significantly different (P < 0.05)?	Yes

Annexe 57 : Résultat du test de Bartlett sur le MOE des essences aboutées, tableau de l'auteur

Welch's ANOVA test	
P value	0,0453
P value summary	*
Significant diff. among means (P < 0.05)?	Yes
Number of treatments (columns)	4
Number of values (total)	56

Annexe 58 : Résultat du test d'ANOVA Welch pour les MOE des essences aboutées, tableau de l'auteur

Essence	**Shapiro-Wilk massif (p)**	**Shapiro-Wilk abouté (p)**	**Test d'homoscédasticité**	**Test de comparaison**	**p (comparaison)**	**Conclusion**
Betula spp.	0,5555	0,1364	Fisher (p = 0,0888)	Student	0,6955	Non significatif
Quercus rubra	0,9335	0,8516	Fisher (p = 0,3372)	Student	0,1267	Non significatif
Populus tremula	0,1759	0,0901	Fisher (p = 0,0518)	Student	0,1007	Non significatif
Alnus glutinosa	0,0145	0,9162	/	Mann-Whitney	0,4833	Non significatif

Annexe 59 : Tests d'inférence statistique pour la comparaison du module local d'élasticité en flexion des bois massifs et aboutés

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,9299	0,9277	0,2548	0,8663
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns

Annexe 60 : Résultat du test de normalité de Shapiro-Wilk pour la résistance à la flexion axiale des essences, tableau de l'auteur

Bartlett's test	
P value	0,7184
P value summary	ns
Are SDs significantly different (P < 0.05)?	No

Annexe 61 : Résultat du test de Bartlett pour la résistance à la flexion axiale des essences, tableau de l'auteur

ANOVA summary	
P value	<0,0001
P value summary	****
Significant diff. among means (P < 0.05)?	Yes
R square	0,6137

Annexe 62 : Résultat de l'ANOVA pour la résistance à la flexion axiale des essences, tableau de l'auteur

Shapiro-Wilk test	*Betula spp.*	*Quercus rubra*	*Populus tremula*	*Alnus glutinosa*
P value	0,5491	0,8017	0,6199	0,8126
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns

Annexe 63 : Résultat du test de Shapiro-Wilk pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées, tableau de l'auteur

Bartlett's test	
P value	0,0156
P value summary	*
Are SDs significantly different (P < 0.05)?	Yes

Annexe 64 : Résultats du test de Bartlett pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées, tableau de l'auteur

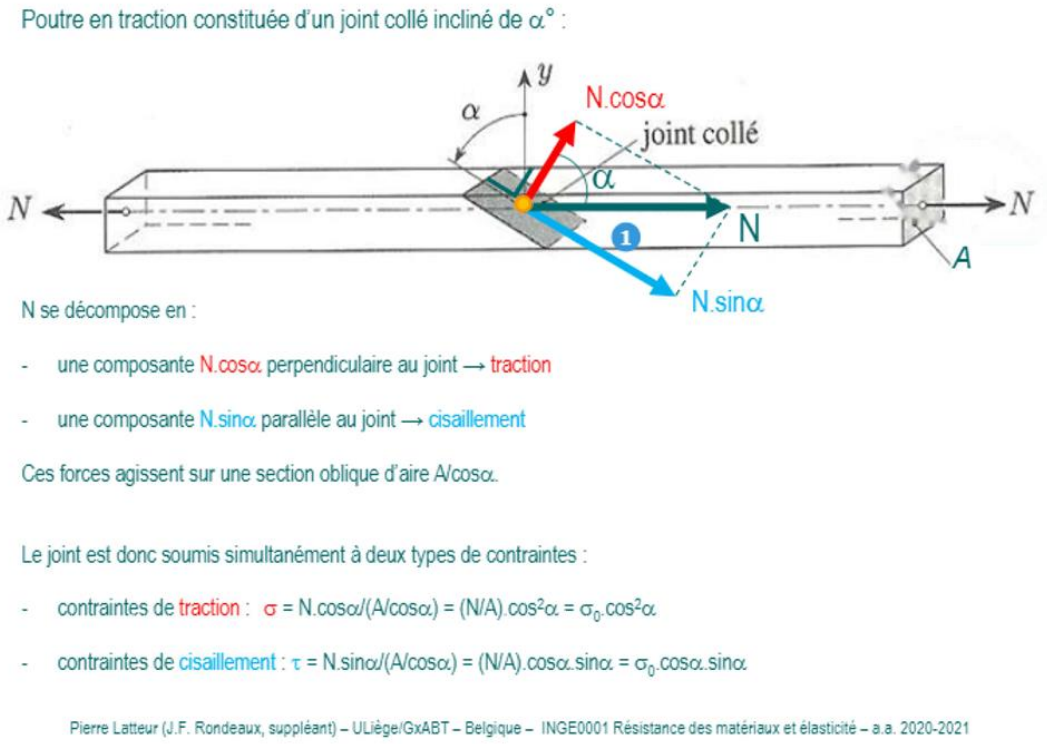
Welch's ANOVA test	
P value	<0,0001
P value summary	****
Significant diff. among means (P < 0.05)?	Yes

Annexe 65 : Résultats de l'ANOVA Welch pour la résistance en flexion axiale des essences aboutées, tableau de l'auteur

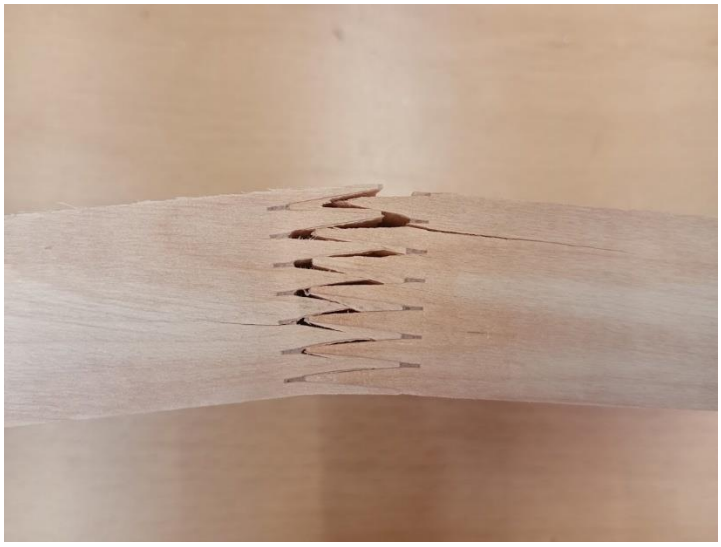
Essence	**Shapiro-Wilk massif (p)**	**Shapiro-Wilk abouté (p)**	**Fisher (p)**	**Test appliqué**	**p (comparaison)**	**Conclusion**
Betula spp.	0,930	0,525	0,024	Student (Welch)	< 0,0001	Différence significative
Quercus rubra	0,928	0,802	0,0003	Student (Welch)	< 0,0001	Différence significative

Populus tremula	0,255	0,688	0,074	Student (classique)	< 0,0001	Différence significative
Alnus glutinosa	0,866	0,813	0,0113	Student (Welch)	0,136	Non significatif

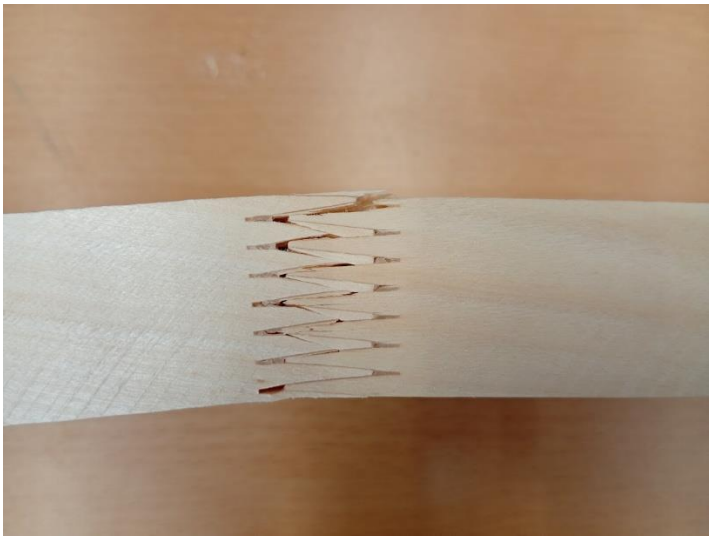
Annexe 66 : Tests d'inférence statistique pour la comparaison de la résistance à la flexion axiale des bois massifs et aboutés



Annexe 67 : Contraintes dans un joint collé (Source : Résistance des matériaux et élasticité. Notes de cours, Latteur & Rondeaux, 2020-2021)



Annexe 68 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche d'Alnus glutinosa, photo de l'auteur



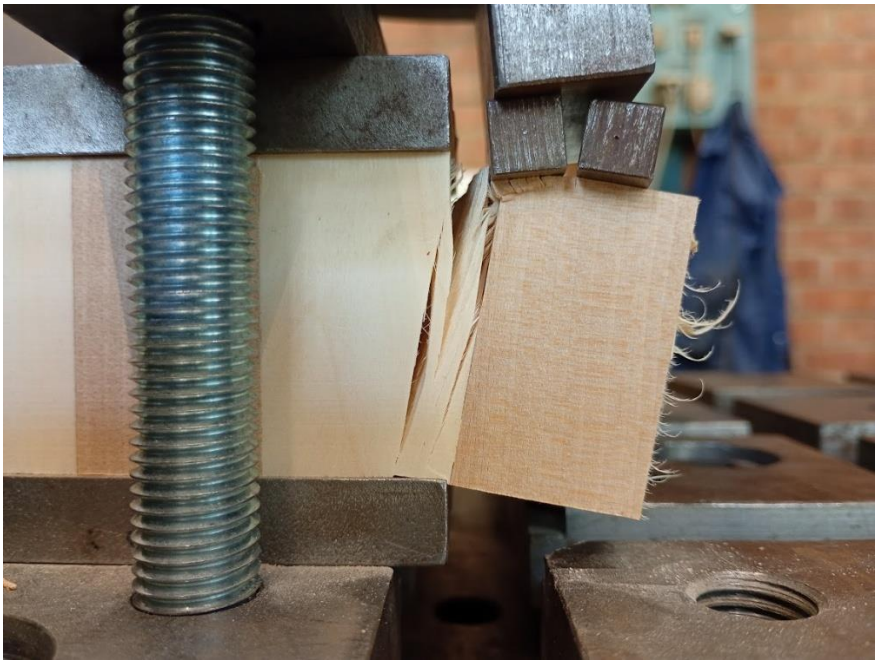
Annexe 69 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche de Populus tremula, photo de l'auteur



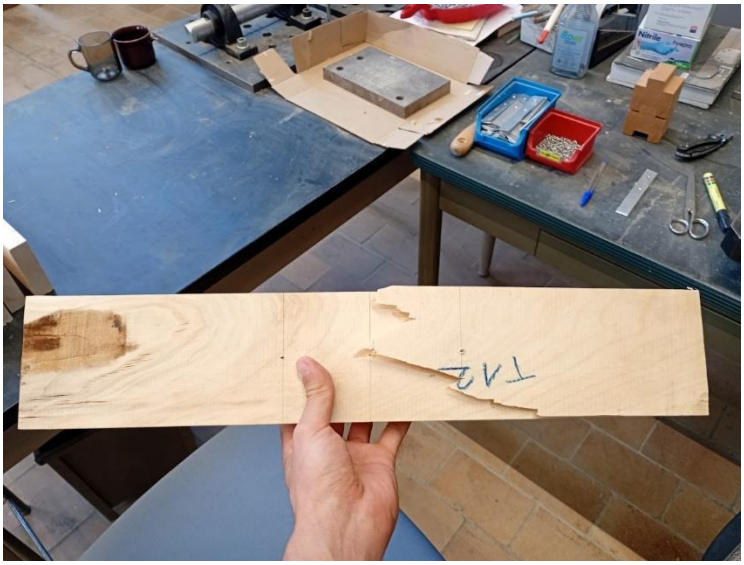
Annexe 70 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche de Betula spp., photo de l'auteur



Annexe 71 : Mode de rupture d'un joint d'aboutage d'une planche de Quercus rubra, photo de l'auteur



Annexe 72 : Mode de rupture illustrant le moment fléchissant parasite lors d'un essai de cisaillement du joint de collage entre un blochet de Populus tremula (en plus clair) et de Betula spp. (en plus foncé), photo de l'auteur



Annexe 73 : Rupture dans une planche (bois massif) de Populus tremula en flexion 4 points, photo de l'auteur



Annexe 74 : Rupture dans une planche (bois massif) de Betula spp. en flexion 4 points, photo de l'auteur



Annexe 75 : Rupture dans une planche (bois massif) de Quercus rubra en flexion 4 points, photo de l'auteur