

---

## Caractérisation et valorisation du bois d'épicéa commun de faible diamètre en construct

**Auteur :** García, Diego

**Promoteur(s) :** 10918; 5714

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/18199>

---

### *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.*

---

**CARACTÉRISATION ET  
VALORISATION DU BOIS D'ÉPICÉA DE  
FAIBLE DIAMÈTRE EN  
CONSTRUCTION**

**DIEGO GARCIA**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**CO-PROMOTEURS : TOM DE MIL (ULIÈGE) ET THIERRY DESCAMPS (UMONS)**



© 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<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority<sup>2</sup> of Gembloux Agro-Bio Tech.

This document is the sole responsibility of its author.

---

<sup>1</sup> L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT (Tom De Mil)

<sup>2</sup> The academic authority is represented by the thesis supervisors, members of the GxABT teaching staff (Tom De Mil)



# **CARACTÉRISATION ET VALORISATION DU BOIS D'ÉPICÉA COMMUN DE FAIBLE DIAMÈTRE EN CONSTRUCTION**

**DIEGO GARCIA**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**CO-PROMOTEURS : TOM DE MIL (ULIÈGE) ET THIERRY DESCAMPS (UMONS)**

# Remerciements

L'aboutissement de ce travail de fin d'études n'aurait pas pu avoir lieu sans le soutien de personnes envers lesquels je souhaite témoigner une immense gratitude :

Benoît Jourez, Tom De Mil et Thierry Descamps, mes promoteurs : votre disponibilité ainsi que vos conseils avisés ont joué un rôle crucial en orientant mon travail et en enrichissant mes réflexions. Benoît Jourez, merci pour votre temps dédié sur la route et derrière les machines, sans vous le départ de ce travail n'aurait pas pu avoir lieu.

Yannick Delzant et Hadiy Lahcen, techniciens du LTB : merci d'avoir partagé votre savoir-faire, votre expérience dans le domaine du bois était une valeur-ajoutée dans l'usinage du bois. Merci pour ce temps précieux que vous avez accordé à mon travail.

Clémence Piette, stagiaire au LTB : merci pour le temps conséquent que tu as passé à m'aider dans mon projet, ta rigueur et ton efficacité ont été un véritable soutien.

Théo et Thibault, personnel du DEMNA : ce trajet dans les Fagnes en votre compagnie a été une véritable bulle d'air dans ce travail, encore merci pour le transport du bois.

Michael Baele et Alessandro Randazzo, techniciens de l'UMons, : merci pour votre efficacité et la qualité de votre travail, qui m'ont permis d'aller plus loin que je ne l'aurais espéré. Michael, merci pour ton dévouement et ta disponibilité dans ce travail, je me sens grandement reconnaissant pour toute l'aide que tu m'auras apportée.

Arthur Duyck, doctorant de l'UMons : merci pour ta réactivité et tes conseils éclairés. Tes compétences en codage et tes qualités d'ingénieur ont été remarquablement utiles dans ce travail.

Inès Prévot, étudiante à Mons, merci pour ton accueil indéfectible durant mes séjours à Mons.

Guillaume Charles, Tanguy Vangansbek, Thibaut Smeets, Clémence Tharin et Bastien Bestgen, camarades de classe : votre aide dans les moments urgents a été un soutien considérable, merci d'avoir été présents malgré la charge de vos travaux respectifs.

Hugo Vanvarebergh, Yannis Govaerts, Matthieu Delespesse, Victor Herman et Maxime Piront, mes colocataires du Liroux : merci pour votre présence quotidienne, elle m'aura porté jusqu'au bout de ce périple.

A mon père, ma mère et Lara Jouaux : merci pour vos relectures et votre soutien distanciel, votre amour a constitué une force considérable pour achever ce travail.

## Résumé

Dans les forêts du monde entier, une surabondance des bois de faible diamètre participe à l'affaiblissement de la santé des forêts et les expose à un risque accru d'incendies, de dégradation de l'environnement et d'attaques d'insectes. Ce manque d'action de la part des gestionnaires forestiers est dû à l'absence de secteurs rentables pour valoriser ce bois, qui est donc laissé sur place. Or, une meilleure caractérisation de ces petits arbres permettrait leur valorisation dans des marchés à haute valeur ajoutée, comme dans certains segments du secteur de la construction.

Cette étude prend place dans ce contexte en déterminant le potentiel de valorisation du bois d'épicéa commun de petit diamètre faiblement transformé en tant qu'élément structurel d'un mur en ossature bois. 40 billons d'épicéas ont été préusinés selon cinq modalités : (1) bois rond ; (2) bois rond avec deux fentes de décharge ; (3) bois rond avec une fente de décharge ; (4) bois équarri deux faces ; (5) bois équarris deux faces avec deux fentes de décharges. Leur comportement au séchage a été évalué par une norme de classement qualitatif du bois et par des mesures de fissuration en surface (nombre et longueur totale). Deux membrures par modalité ont été testées en grandeur réelle pour déterminer leur module d'élasticité (MOE) et leur résistance à la compression. Le MOE des membrures issues de la modalité 1 a été comparé à celui d'une poutre de section standard d'ossature bois sciée à partir de ces poutres. Enfin le rendement au sciage d'une faible transformation est évalué et ainsi qu'une potentielle voie de valorisation de ces membrures.

La clé de qualification visuelle pré- et post-séchage a relevé des modifications de trois paramètres : le fils tors, la courbure et les fentes de cœur. Les fentes de décharges doubles et simples ont réduit le nombre de fissures de façon très hautement significative. Cependant, elles sont à l'origine d'apparition des fentes de cœur importantes. L'équarrissage a permis de réduire de manière significative la fissuration, mais il est susceptible d'être à l'origine d'un vrillage important. Concernant les tests de flexion, aucune différence significative n'est observée selon les modalités de préusinage, pour un MOE moyen de 12,61GPa. La résistance à la compression des éprouvettes est d'en moyenne 39,99MPa, compris dans une fourchette de valeurs allant de 31,72 à 50,93MPa. Il n'y a pas de différence significative entre le MOE du bois scié deux faces et quatre faces. Enfin, le rendement matière d'une faible transformation est d'en moyenne 69,18% contre 35,1% pour des bois avivés.

Les résultats de la fissuration, du niveau de déformation et des performances mécaniques du bois ont probablement été impactés de manière significative par le faible taux d'humidité atteint (moyenne de 8,6%). Les résultats du séchage indiquent néanmoins que le meilleur traitement du bois de faible diamètre est la forme ronde préférendue deux fois. Ce traitement implique cependant un coût supplémentaire dans le processus de fabrication. Le MOE et la densité du bois de faible diamètre excèdent les valeurs moyennes rapportées dans la littérature. Ainsi, les performances mécaniques des membrures testées correspondent à une classe de résistance C30. Bien qu'il n'y ait pas de différence entre les MOE du bois scié deux ou quatre faces, la première méthode ajoute un surplus matière au bois, améliorant considérablement sa rigidité. Concernant le rendement matière, l'approche d'une faible transformation se démarque nettement en termes d'efficacité par rapport à l'équarrissage traditionnel, avec une mise en œuvre simple qui peut être intégrée dans les processus existants des scieries.

Bien que des recherches sur le bois de faible diamètre doivent continuer à être menées, cette étude apporte des éclairages substantiels sur divers aspects du matériau, couvrant les domaines du séchage, des performances mécaniques et du rendement. Les résultats obtenus remettent en question certaines notions préconçues et ouvrent la voie à des perspectives novatrices pour l'utilisation du bois de faible diamètre dans des applications structurelles. Le bois de faible diamètre présente la possibilité d'être valorisé en structure et permettrait l'utilisation d'une ressource actuellement sous-valorisée.

**Mots-clés** : bois, valorisation, construction, structure, séchage, flexion, compression, rendement

## Abstract

In forests all over the world, an overabundance of small-diameter wood is contributing to the weakening of forest health and exposing them to increased risk of fire, environmental degradation and insect attack. This lack of action on the part of forest managers is due to the absence of profitable sectors in which to exploit this wood, which is therefore left in place. However, a better characterization of these small trees would enable them to be valorized in high value-added markets, such as segments of the construction sector.

This study takes place in this context by determining the value-added potential of small-diameter, lightly processed common spruce lumber as a structural element of a timber-frame wall. 40 spruce logs were pre-milled according to five modalities: (1) round timber; (2) round timber with two discharge slots; (3) round timber with one discharge slot; (4) two-sided squared timber; (5) two-sided squared timber with two discharge slots. Drying behavior was assessed by means of a wood quality grading standard and surface cracking measurements (number and total length). Two members per modality were tested at full scale to determine their modulus of elasticity (MOE) and compressive strength. The MOE of the members from modality 1 was compared with that of a standard cross-section timber-frame beam sawn from these beams. Finally, the sawing yield of a low transformation is evaluated, and a potential recycling route for these members is proposed.

The pre- and post-drying visual qualification key identified changes in three parameters: twisted wires, curvature and heart splits. Double and single discharge cracks reduced the number of cracks by a highly significant amount. However, they are also responsible for the appearance of significant core cracks. Squaring significantly reduced cracking, but is likely to be the cause of significant twisting. Regarding bending tests, no significant differences were observed between pre-machining methods, for an average MOE of 12,61GPa. Specimen compressive strength averaged 39,99MPa, ranging from 31,72 to 50,93MPa. There was no significant difference between the MOE of two-sided and four-sided sawn timber. Finally, the material yield of low-processed lumber averaged 69,18%, compared with 35,1% for edged lumber.

The results for cracking, deformation level and mechanical performance of the lumber were probably significantly impacted by the low moisture content achieved (average 8,6%). The drying results nevertheless indicate that the best treatment for small-diameter lumber is the twice-preferred round shape. However, this treatment implies an additional cost in the manufacturing process. The MOE and density of small-diameter lumber exceed the average value reported in the literature. As a result, the mechanical performance of the members tested corresponds to strength class C30. Although there is no difference between the MOE of two-sided and four-sided sawn timber, the former method adds extra material to the timber, considerably improving its stiffness. In terms of material yield, the low-processing approach stands out clearly in terms of efficiency compared with traditional squaring, with simple implementation that can be integrated into existing sawmill processes.

Although further research into small-diameter timber is required, this study sheds substantial light on various aspects of the material, covering the areas of drying, mechanical performance and yield. The results challenge certain preconceived notions and open the way to innovative approaches for the use of small-diameter wood in structural applications. Small-diameter wood has the potential to be put to good use in structural applications, enabling the use of a resource that is currently undervalued.

**Keywords:** wood, valorization, construction, structure, drying, bending, compression, yield

# Table des matières

Remerciements .....	i
Résumé.....	ii
Abstract .....	iii
Table des matières.....	iv
Table des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
<b>1   Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>2   Objectifs .....</b>	<b>4</b>
<b>3   État de l’art .....</b>	<b>5</b>
3.1 Les propriétés du bois de faible diamètre.....	5
3.2 Caractérisation mécanique du matériau.....	6
3.3 Préparation du matériel .....	7
3.4 Construction en ossature bois .....	9
<b>4   Matériel et méthodes.....</b>	<b>10</b>
4.1 Prototype.....	10
4.2 Matériel.....	12
4.2.1 Éprouvettes.....	13
4.2.2 Mesures.....	14
4.3 Comportement au séchage .....	15
4.4 Caractérisation mécanique .....	17
4.4.1 Classement visuel.....	18
4.4.2 Essai de flexion .....	18
4.4.3 Essai de compression .....	21
4.5 Calcul du rendement matière .....	21
4.6 Analyse statistique.....	23
<b>5   Résultats.....</b>	<b>24</b>
5.1 Comportement au séchage .....	24
5.2 Caractérisation mécanique .....	28
5.2.1 Classement visuel structurel .....	28
5.2.2 Essai de flexion .....	29
5.2.3 Résistance à la compression.....	33
5.3 Rendement matière .....	34
5.4 Prototype.....	35
<b>6   Discussion .....</b>	<b>37</b>
6.1 Qualité du séchage.....	37
6.2 Caractérisation structurelle.....	39
6.3 Rendement matière .....	41

6.4	Performance des membrures.....	42
6.5	Prototype.....	43
6.6	Limites de l'étude.....	43
6.7	Perspectives et améliorations .....	44
<b>7</b>	<b>  Conclusion .....</b>	<b>45</b>
	<b>Contributions .....</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>48</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>56</b>
A.	Classement visuel qualitatif .....	56
B.	Calcul exact du rendement matière .....	58
C.	Point de Saturation des Fibres de tous les échantillons .....	58
D.	Données brutes des mesures de la fissuration.....	59
E.	Essais de flexion des billons issus de la modalité 4.....	60
F.	Courbes charge – déformation des tests de compression.....	60
G.	Données brutes des tests de résistance à la compression.....	62

# Table des figures

Figure 3.1 - Synthèse graphique des paramètres qui augmentent ou diminuent entre le bois juvénile et mature.....	6
Figure 3.2 - Schéma des dimensions requises pour la mise en service d'un mur en ossature bois avec des panneaux verticaux à bords droits.....	9
Figure 4.1 – Schéma du prototype.....	10
Figure 4.2 – Inscription d'une section d'ossature bois 45x95mm sur la face transversale fin-bout d'un billon.....	11
Figure 4.3 – Illustration d'une faible transformation d'un bois rond de faible diamètre.....	11
Figure 4.4 - Zone d'approvisionnement approximatif de l'entreprise Philippe Cornet Bois (en rouge).....	12
Figure 4.5 – Réalisation des éprouvettes.....	13
Figure 4.6 - Modalités d'usinage des membrures avant séchage.....	15
Figure 4.7 - Equarrissage des billons issus des modalités 2 et 3 .....	17
Figure 4.8 - Forme finale des faces transversales des membrures issues des cinq modalités de séchage pour les essais de flexion.....	18
Figure 4.9 - Schéma du test de flexion à trois points.....	19
Figure 4.10 - Présentation du banc d'essai durant le test de flexion de la membrure A33. ....	19
Figure 4.11 - Modélisation des sections « réelles » d'une extrémité du billon selon les cinq modalités.. .....	20
Figure 4.12 - Flexion sur l'axe fort et faible d'une membrure équarrie 2 et 4 faces selon sa position sur le banc d'essai. ....	21
Figure 5.1 - Détermination du PSF par voie graphique.....	24
Figure 5.2 - Boxplots du nombre total des fentes de surface apparues après séchage selon cinq traitements différents. ....	26
Figure 5.3 - Boxplots du nombre total de fentes par catégorie d'épaisseur des fentes (< 1 mm, 1 à 3 mm, 3 à 5 mm et > 5 mm).....	27
Figure 5.4 - Boxplots des longueurs totales des fentes apparues après séchage selon cinq traitements différents .....	27
Figure 5.5 - Boxplots des longueurs totales de fentes par catégorie d'épaisseur des fentes (< 1 mm, 1 à 3 mm, 3 à 5 mm et > 5 mm). ....	28

Figure 5.6 - Courbes contrainte – déformation jusqu'à rupture : Force appliquée en fonction de la flèche de quatre membrures. ....	29
Figure 5.7 - Courbes contraintes – déformation dans le domaine élastique du matériau selon cinq modalités. ....	30
Figure 5.8 - Boxplots des MOE obtenus par le logiciel d'éléments finis selon les cinq modalités d'usinage des membrures. ....	31
Figure 5.9 - Courbes charges - déformation sur des membrures équarries deux faces (Eq. 2 faces) et quatre faces (Eq. 4 faces).....	32
Figure 5.10 - Boxplot du MOE des membrures équarries deux faces (Eq. 2x) ou 4 faces (Eq. 4x) testés en flexion sur leur axe faible ou fort .....	33
Figure 5.11 - Courbes charge – déformation des éprouvettes lors du test de résistance à la compression.....	33
Figure 5.12 - Graphique du rendement matière théorique.....	34
Figure 5.13 - Photos du démonstrateur .....	36
Figure 6.1 - Apparition d'une fente de cœur à partir des fentes de décharge après séchage (indiqué par la flèche rouge) .....	38



# Liste des tableaux

Tableau 3.1 - Dimensions standard de sciage des bois résineux en Belgique pour un usage en ossature bois.....	9
Tableau 4.1 - Coefficients spécifiques de retrait ou de gonflement radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), point de saturation des fibres de l'Épicéa commun.....	12
Tableau 4.2 - Dimensions (moyenne $\pm$ écart-type) des billons d'épicéa classés selon quatre classes de diamètre avec le nombre de répétitions.....	13
Tableau 4.3 - Liste des traitements réalisés avant séchage du bois, avec le nombre de répétitions par modalité. ....	16
Tableau 4.4 - Résumé de l'abaque de séchage de l'entreprise Huet & Simon bois.....	17
Tableau 4.5 - Test statistique réalisé selon que la distribution des résidus soit normale ou non et que l'homogénéité des variances soit vérifiée ou non.....	23
Tableau 5.1 - Statistiques descriptives (moyenne et écart-type) des billons en fonction des quatre classes de diamètre.....	24
Tableau 5.2 - Proportion du nombre d'échantillons ayant été déplacés de classe après séchage selon le type de traitement .....	25
Tableau 5.3 - Récapitulatif de la fissuration des billons après séchage en fonction de leur traitement.....	26
Tableau 5.4 - Récapitulatif du déclassement des membrures après séchage selon les cinq modalités d'usinage des membrures avant séchage.....	29
Tableau 5.5 - Résultats du test de rupture.....	29
Tableau 5.6 - Résultats de l'analyse du test de flexion.....	31
Tableau 5.7 - Résultats de l'analyse des tests de flexion des membrures équarries 2 et 4 faces selon leur axe fort et faible .....	32
Tableau 5.8 - Synthèse des résultats du test de résistance à la compression.....	34
Tableau 6.1 - Comparaison des valeurs (moyenne $\pm$ écart-type) des modules d'élasticité (MOE), résistance à la compression ( $f_c, 0$ ) et densité du bois d'épicéa issues de l'expérience.....	42

# 1 | Introduction

Depuis 1960, des chercheurs du monde entier s'alarment d'un défi majeur : les peuplements forestiers sont surchargés de jeunes arbres [1–3] ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) inférieur à 22-25 cm [1,3,4]. Cette surabondance en plantes ligneuses participe à l'affaiblissement de la santé des forêts [3] et expose les zones forestières à un risque accru d'incendies, de dégradation de l'environnement et d'attaques d'insectes [1,3,5].

Outre ces problèmes environnementaux, la surdensité au sein d'un peuplement forestier empêche la production d'arbres destinés aux récoltes commerciales [1], notamment à cause d'une concurrence latérale trop importante entre individus [6]. Cette problématique touche particulièrement les régions où la demande en bois est en augmentation importante, provoquant un manque d'approvisionnement en bois de grande section [2,7].

Ce manque de gestion est dû en partie à l'absence de produits rentables pour valoriser ce bois, qui ne permettent pas de couvrir les coûts liés à l'exploitation de ces peuplements [1–3,7–10]. Pourtant, la production de grumes de qualité implique des pratiques sylvicoles coûteuses qui nécessitent de procéder à des opérations d'éclaircies précoces pour extraire les arbres de moindre qualité à différentes étapes de croissance avant la récolte finale [1,5,7,9].

Le coût d'exploitation d'une parcelle à éclaircir est généralement supérieur à une coupe rase car demande une élimination sélective des arbres, ce qui requiert plus de soin de la part de l'opérateur [3]. Une récolte manuelle de ces arbres est très coûteuse en main d'œuvre, et l'exploitation mécanique de ces petits bois est parfois l'option la plus crédible dans les plantations écartées [8], même si les têtes d'abattage pour cette tâche spécifique doivent encore être améliorées [8,11].

Cela crée une incertitude quant aux profits liés au secteur des plantations, impactant les pratiques sylvicoles allant parfois jusqu'à l'abandon des plantations [4]. Les petits arbres sont donc laissés en forêt [2], ce qui présente un coût pour la santé et la rentabilité des forêts jusqu'à la récolte finale [1,9] et dégrade la viabilité économique du secteur [5].

En Europe, le bois de faible diamètre a commencé à trouver une utilisation croissante en milieu rural en tant que poteaux électriques et pieux de fondation à faible coût [1], ou encore comme poteaux et piquets de clôture [7,9,12]. En industrie, les grumes de faible diamètre sont généralement destinées (i) au sciage pour palettes et emballages [4,9], (ii) à la trituration pour la fabrication de panneaux à particules ou de fibres [2,4,9,13,14], (iii) pour la fabrication de pâte à papier (cellulose) [2,4,9,12–14] ou (vi) utilisés comme biomasse pour l'énergie et le chauffage [2,8,9,13,14]. Ces secteurs ont des coûts de transformation élevés et sont sujets aux fluctuations des prix sur le marché mondial des matières premières [13,14], ce qui entraîne des revenus faibles et peu fiables pour les propriétaires forestiers [4,13,14].

Le bois de faible diamètre présente cependant plusieurs désavantages à être utilisé dans des secteurs plus rentables, comme en structure, ce qui motive en partie l'absence d'exploitation de ce bois. En effet, les grumes de faible diamètre sont constituées d'une grande fraction de bois juvénile, produit durant les 20 premières années de l'arbre [15,16]. Ce bois présente des qualités structurelles inférieures au bois mature [1,5,17–19], même lorsqu'il est duraminisé [20]. De plus, ces arbres sont généralement caractérisés par une proportion élevée de nœuds [1,16,17] et d'autres défauts naturels relativement importants qui diminuent les propriétés mécaniques du bois [5,21].

Ce sont des paramètres importants à prendre en compte pour leur évaluation en structure [7] car les arbres de faible diamètre sont souvent caractérisés par de moindres résistance, dureté et

densité par rapport aux arbres matures de la même espèce [5]. Des faibles caractéristiques technologiques provoquent une baisse de la qualité des sciages [22], limitant l'usage de ce bois en structure ou à la production de bois d'œuvre [5,21,23].

Par ailleurs, le défilement d'un arbre, qui décroît avec l'âge, peut avoir un impact significatif sur le rendement au sciage qui est généralement plus élevé et stable lorsque les billons ont un diamètre supérieur à 20cm [22]. Celui-ci peut diminuer de 25% lorsque la décroissance passe de 0,5 à 3 cm/m [22]. Les arbres dont la section transversale est faible ne se prêteraient donc pas à un sciage en poutres rectangulaires dû à un faible rendement [1,7,17,21,24].

Un panel des recherches antérieures a également mis en évidence que l'étape de séchage du bois de faible diamètre est une cause majeure de la diminution de sa qualité visuelle (Arganbright et al. ; Blake et Voorhies ; Mackay et Rumball ; Markstrom et al. dans [23]), notamment à cause d'un retrait longitudinal beaucoup plus important lors du séchage qui augmente sa tendance au gauchissement [17,25], bien que les petits bois issus de peuplements naturels ne présenteraient pas de gauchissement lors du séchage (Paul dans [20]).

Le rendement et les qualités intrinsèques inférieures du bois de faible diamètre n'incitent donc pas à récolter ces arbres car il n'existe actuellement guère de marché viable pour les valoriser [4,5]. Pour répondre à une demande croissante en bois de haute qualité [7], il est nécessaire d'améliorer la rentabilité de ces peuplements en évaluant l'utilisation potentielle de ce matériau dans des secteurs industriels à haute valeur ajoutée [3,5,7]. Une valorisation dans le secteur de la construction présenterait un intérêt économique et industriel considérable [7], même si cela représente une déviation importante du bois utilisé traditionnellement en structure [17] puisque les scieries transforment généralement des grumes avec un diamètre supérieur [12,17].

La plantation des arbres à des intervalles rapprochés ralentit la vitesse de croissance en faveur de leur rectitude et de la densité des cernes de croissance [1,6], offrant des proportions relativement homogènes de sciage [4]. De la sorte, ces petits arbres auraient une potentielle valorisation dans certains segments de la construction [4]. Cependant, un conflit significatif existe entre une productivité accrue des forêts et la nécessité de préserver une qualité suffisante des produits d'éclaircie [22].

En Europe, Hébert et al. [4] et Ranta-Maunus [26] ont mis en lumière la possibilité de valoriser le bois d'éclaircie en tant que bois rond ou de sciage en structure, offrant des voies de valorisation plus rémunératrices que les voies actuelles. Cependant, pour promouvoir le développement des marchés des grumes de petit diamètre, il est essentiel de disposer de données rigoureuses afin d'établir des normes de conception adaptées à une application structurelle [3]. En effet, le développement de ces normes est principalement limité par l'incompatibilité avec la construction conventionnelle et une compréhension limitée des effets du bois juvénile sur la capacité de connexion des assemblages [17].

Alors que l'Espagne et l'Italie ont déjà mené une récente normalisation de sciage structurels des bois de faible diamètre [7], aucune étude n'a encore été menée en Wallonie, dont la filière bois est majoritairement articulée autour de l'épicéa commun [4]. Cette essence représente à elle seule 85% du volume de bois résineux mis sur le marché belge chaque année [27]. Ce bois est issu à plus de 95% des forêts de plantations pures équiennes dont 21% des peuplements encore sur place ont un faible diamètre (circonférence < 70 cm) [28]. Ces bois sont systématiquement redirigés vers des industries peu lucratives de trituration, de pâte à papier, et d'emballage [4]. Le faible spectre de valorisation de cette ressource est dû en partie aux tendances de diminution de l'âge d'exploitation et des pratiques sylvicoles associées à l'épicéa, conduisant cette ressource vers un accroissement des cernes important [22].

De plus, la Wallonie connaît un prélèvement important des peuplements arrivés à leur dimensionnable [29], atteignant un taux de récolte de 138% en 2021 [27]. La diminution de cette ressource

pourrait occasionner des problèmes en termes d’approvisionnement en bois d’œuvre, car les peuplements replantés seront encore trop jeunes [29].

Des chercheurs du monde entier étudient la possibilité d’utiliser le bois de faible diamètre en construction avec des produits bois et/ou des structures innovantes [2–5,9,12,15–17,23,26,30] ; des moyens simples de valorisation qui offriraient une valeur marchande élevée aux propriétaires forestiers qui effectuent ces éclaircissements [26,31–33]. L’usage du bois massif en construction est considéré comme le système plus durable et gagne en popularité dans de nombreuses régions, en raison de son faible impact sur le cycle de vie et ses avantages en matière de séquestration carbone [34], sans parler de l’énergie grise du bois massif (60 kWh/m<sup>2</sup>) significativement inférieure aux matériaux couramment utilisés tel que le béton (350 kWh/m<sup>2</sup>) ou les *Engineered Wood Products* (150 kWh/m<sup>2</sup>)<sup>3</sup>.

La meilleure valorisation en structure serait d’utiliser le bois de faible diamètre sous sa forme naturelle, car il est physiologiquement plus apte à un usage en flexion [17]. La forme ronde du bois offre une plus grande capacité de charge du matériau [2,3], avec notamment une résistance à la flexion 2 à 4 fois supérieure que la plus grande pièce rectangulaire de bois pouvant être sciée à partir de ce bois [17]. Cependant, les petits bois ronds sont rarement utilisés structurellement en raison du peu d’informations disponibles [2]. Puisque le bois n’est pas un matériau isotrope, son sciage peut avoir un effet significatif sur son module de rupture car il expose du bois juvénile et sectionne le fil du bois autour des nœuds [17]. Ainsi, une transformation poussée du bois de petite dimension présente des faibles rendements en planches de qualité [15,30]. Procéder à une faible transformation du bois semble donc être une opportunité pour valoriser ce bois en structure [17,21] puisqu’il diminue le nombre de surfaces présentant des discontinuités locales autour des nœuds causées par le sciage [17]. Préserver la conicité de l’arbre ajoute également de la matière à sa section inférieure, ce qui augmente significativement la capacité de charge d’une poutre [17].

A ce jour, aucune étude globale sur la construction en bois massif de faible diamètre n’a été réalisée [1]. C’est un potentiel inexploité car des avancées importantes voient le jour notamment dans la caractérisation des matériaux, les technologies de transformation ou de conception des assemblages et des systèmes structurels, qui mériteraient d’être jointes à la valorisation de bois de faible diamètre [1]. La valorisation de ce matériau en structure pourrait donc être une ressource locale pour la construction [31] et offrirait une bonne valeur économique aux gestionnaires forestiers [12]. Cela permettrait de réduire les refus d’éclaircie en forêt [31], de diminuer la pression sur les ressources actuelles et d’adapter les itinéraires sylvicoles en faveur d’une production de bois d’éclaircie de meilleure qualité.

---

<sup>3</sup> Intervention de Johannes Natterer à la Conférence « Construire et aménager avec du bois peu transformé » au 12<sup>ème</sup> Forum International Bois Construction (FIBC) 2023 à Lille.

## 2 | Objectifs

L'objectif de ce travail est de déterminer le potentiel de valorisation du bois rond d'épicéa (*Picea abies* (L.) H. Karst, 1881) de faible diamètre en tant qu'élément structurel d'un mur en ossature bois.

Le bois est faiblement transformé de sorte à maximiser son rendement au sciage, et a pour ambition d'être valorisé au sein d'un système constructif original sous forme de kit.

La ressource est préalablement caractérisée en déterminant (i) son point de saturation des fibres et (ii) son comportement au séchage par qualification visuelle pré- et post-séchage selon cinq modalités de préusinage basées sur la littérature.

Les membrures sont ensuite caractérisées mécaniquement (module d'élasticité en flexion et résistance à la compression axiale) selon ces cinq modalités dans le but d'examiner la pertinence de leur utilisation dans le domaine de la construction.

Puis, une comparaison des performances mécaniques (module d'élasticité en flexion) entre les membrures faiblement transformées et la plus grande section standard d'ossature bois sciée à partir du même bois est réalisée. L'impact de la méthode de conditionnement du bois sur ses performances structurelles est également évalué.

## 3 | État de l'art

Les gestionnaires forestiers connaissent depuis des décennies les avantages économiques des opérations d'éclaircie du bois de faible diamètre pour la production de bois de qualité. Dans les années 1950 et 1960, on observe des travaux intensifs sur la caractérisation industrielle des petits arbres pour leur usage dans la fabrication de panneaux de particules et de pâte à papier [10]. Il a fallu attendre les années 1980 pour que les autorités politiques reconnaissent l'importance de mieux valoriser ce matériau, ce qui explique le peu de recherches dans ce domaine et le manque de littérature publiée sur ce sujet jusqu'aux années 1990 [9].

### 3.1 Les propriétés du bois de faible diamètre

On distingue trois éléments de variabilité dans le bois : (i) la variation intracerne, bois initial – bois final, (ii) la variation radiale, de la moelle vers l'écorce et (iii) la variation longitudinale, selon les différentes hauteurs de l'arbre [19]. Les trois directions fondamentales selon lesquelles il faut observer les variations du bois sont la direction (i) longitudinale / axiale ; (ii) radiale et (iii) tangentielle [35]. C'est dans la variation radiale qu'on distingue, en plus du bois d'été et de printemps, le bois juvénile et mature.

#### Bois juvénile

Le bois juvénile, appelé « bois de cœur », est majoritairement présent dans les bois de faible diamètre [1,15]. Il est produit dans les premiers 5 – 20 ans de croissance de l'arbre [1,15], avec des caractéristiques qui évoluent progressivement chaque année jusqu'à se stabiliser en bois mature [7,15,20,35,36]. Il est également variable au sein de l'arbre, avec un bois juvénile à la base de l'arbre qui se distingue du bois juvénile formé en hauteur [36]. Il est prépondérant dans le bois rond de faible diamètre, et possède des propriétés mécaniques généralement indésirables en structure [1].

Chez les résineux, le bois juvénile possède une densité plus faible [15,36] de  $386 \text{ kg/m}^3$  [20], une rigidité plus faible [36], des parois cellulaires plus minces, une teneur en cellulose plus faible, une teneur en lignine plus élevée, une fraction plus faible en bois d'été [15,36], plus de bois de compression [15], des trachéides plus courtes [20,36], une résistance plus faible à la flexion [15] et un MOE réduit de 10 à 50% [37], un angle des microfibrilles plus grand causant un retrait axial plus important [15,20,36]. Ce dernier est jusqu'à 10 fois supérieur au retrait du bois mature lors du séchage [37] mais présente en revanche des retraits radiaux et tangentiels significativement inférieurs au bois mature [20,36] lui attribuant une meilleure stabilité dimensionnelle que le bois mature dans les sens transversal [20]. Enfin, le bois juvénile possède une durabilité naturelle inférieure au bois mature (João et al. ; Schimleck et al. dans [1]). Un schéma synthétique de l'augmentation/diminution de ces propriétés passant de l'état juvénile à mature est présenté à la Figure 3.1.

L'évolution graduelle de ces paramètres à différentes vitesses amène un degré de subjectivité dans les estimations de la limite entre le bois mature et juvénile, car elle dépendra significativement du critère étudié [22], ce qui rend son identification visuelle complexe [7]. Ainsi, le nombre de cernes considérés comme bois juvénile pour l'épicéa commun peut aller jusqu'aux 30 premiers cernes de l'arbre [22].

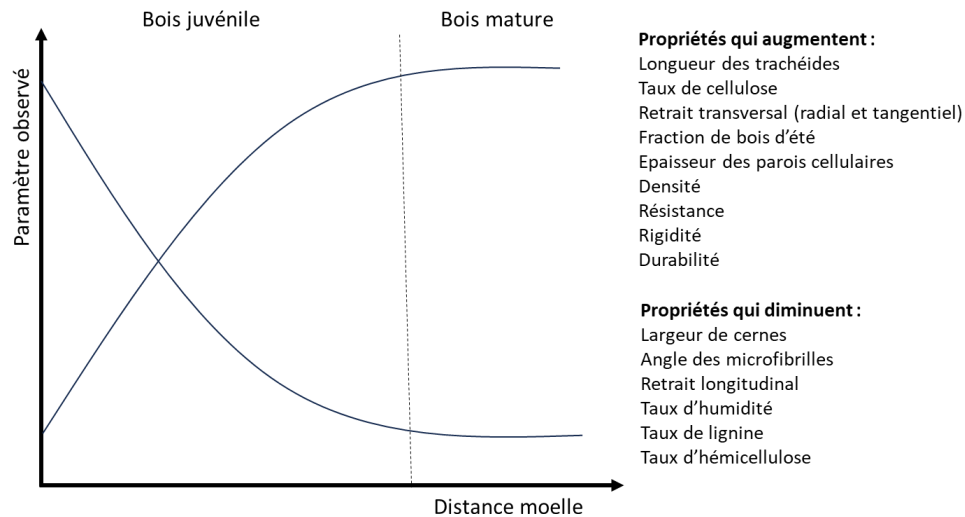


Figure 3.1 - Synthèse graphique des paramètres qui augmentent ou diminuent entre le bois juvénile et mature.

Mvolo [35] et Zobel et Van Buijten [19] sont arrivés à une estimation empirique dans laquelle le bois est purement juvénile lorsque son diamètre est inférieur à 10,2 cm, mais la proportion de ce dernier varie entre des individus d'une même espèce selon les conditions environnementales, le patrimoine génétique et l'itinéraire sylvicole du peuplement [7,20,35].

En sylviculture, la densité de plantation a un impact significatif sur la taille des cernes et donc leur densité [22]. L'application d'une sylviculture plus proche de la nature (maintien d'un sous-étage, plantation denses, éclaircies modérées et progressives) diminue la quantité de bois juvénile et le nombre de nœuds sur les arbres du peuplement [20]. À l'inverse, une plantation à large écartement augmente la proportion de bois juvénile dans le tronc [18] notamment à cause d'un faible rapport entre la taille du houppier et la température cambiale, causant une faible production hormonale et de larges cernes de croissance (Iablokoff dans [20]).

## 3.2 Caractérisation mécanique du matériau

Pour utiliser un matériau en structure, il est essentiel de pouvoir déterminer avec justesse ses caractéristiques mécaniques [22]. Le manque de données fiables sur le bois de faible diamètre constitue un frein important à l'élaboration de normes de conception adéquates [3]. Ainsi, les normes actuelles qui permettent l'utilisation de grumes en structures [7] ne peuvent pas être appliquées en toute sécurité aux bois de faible diamètre car les valeurs de calcul ne sont pas adéquates [1]. Il existe des normes qui définissent les règles de classement visuel des bois ronds (EN 1927 et DIN 4074) mais elles sont inefficaces pour un classement en fonction des propriétés mécaniques [7]. Ces dernières sont également difficiles à appliquer et ont une faible efficacité de classement (pourcentage élevé de rejets) [9].

Les méthodes classiques pour déterminer les propriétés mécaniques du bois en construction sont (i) des essais destructifs sur un échantillon représentatif du matériau bois, (ii) le classement visuel selon des normes ou (iii) l'élaboration d'un modèle non destructif qui caractérise efficacement un échantillon représentatif du matériau afin de classer les autres matériaux sans avoir besoin de les détruire [1].

### Essais destructifs

Ces essais sont souvent réalisés sur des échantillons de bois parfait prélevés du matériau utilisé en structure, ce qui représente une méthode relativement pratique et économique pour

caractériser les propriétés mécaniques du bois considéré [38]. Cependant, cette approche ne prend pas en compte les effets de réduction de la résistance causés par les nœuds et l'inclinaison du fil [38]. Si une pièce de bois n'est pas conforme à un critère de classement non destructif, il faut procéder à un essai grandeur nature jusqu'à rupture de l'élément afin de déterminer ses performances mécaniques [1]. Les essais destructifs sont également intéressants pour valider une méthode d'évaluation non destructive, car donnent les véritables propriétés mécaniques du matériau [1].

## Evaluation non destructive

### Classement visuel

Le classement visuel est pratique car il requiert un équipement minimal. Toutefois, la faible corrélation entre les observations et le comportement mécanique réel joue en leur défaveur, causant des valeurs de prédiction très conservatrices lors d'un classement [1]. Ainsi, les exigences minimales de qualité et dimensions du bois de faible diamètre selon la norme de classement visuel Nord-Américaine ASTM 3957 donne des prévisions bien inférieures des résistances à la flexion (40 à 60%) et à la compression (40%) des valeurs obtenues par un essai destructif [39].

Ranta-Maunus [26] a développé le VPS-SRT-2, un classement visuel du bois rond de faible diamètre pour un usage en structure. Cette norme de produit volontaire s'applique aux bois ronds de Pin Sylvestre et à l'Épicéa d'un diamètre inférieur à 20 cm. Cependant, aucune norme de classement a été créée à partir de ce travail [1]. Les normes de classement qualitatif des grumes EN 1927 [40] et EN 1316 [41] sont utiles pour réaliser un tri préalable des grumes lors de leur achat [1], mais elles n'ont pas été liées à des essais destructifs, et ne peuvent donc pas être utilisées pour estimer les propriétés de résistance du matériau [40,41].

### Flexion statique

Les essais statiques en flexion transversale non destructifs consistent à appliquer une charge endéans le domaine élastique du matériau [1]. Ils sont couramment utilisés pour déterminer le module d'élasticité longitudinal (MOE) d'une poutre en bois, ce qui lui vaut parfois le nom de « classement mécanique » [1]. La détermination de ce dernier serait un bon moyen de prédire les capacités de résistance du bois de faible diamètre [1,3,42,43] car ces éléments sont fortement corrélés ( $r=0,75$ ) [44,45].

Cependant, les défauts liés à la rondeur et à la rectitude des petits bois non régularisés compliquent l'obtention précise de la géométrie par rapport à du bois avivé, ce qui impacte directement la précision des résultats du MOE [46]. Bien que Wolfe et Moseley [3] ont mis en place une méthode analytique pour calculer le MOE des bois coniques, la méthode d'éléments finis qui fonctionne par "squelettisation" du matériau peut également être appliqué [1].

## 3.3 Préparation du matériel

### Séchage

Le processus de séchage revêt une importance primordiale au sein de la production du bois [18,47]. Il permet d'améliorer l'utilisation, les performances et la durée de vie du matériau [18]. Durant cette étape, du bois frais est introduit dans une enceinte spécialement conçue avec des conditions ambiantes rigoureusement contrôlées afin d'extraire la majeure partie de l'eau présente dans les pores et les parois cellulaires du bois [18]. Le point de saturation des fibres (PSF) désigne le taux d'humidité à partir duquel il ne reste que de l'eau liée dans les parois cellulaires des fibres [18,48]. C'est un élément essentiel à prendre en compte lors du séchage car il définit le moment



où commence le retrait dans le bois, généré par l'évacuation des molécules d'eau des parois cellulaires ce qui rapproche les chaînes de cellulose [18].

Sécher du bois de faible diamètre jusqu'à une humidité souhaitée présente plusieurs défis. Si le bois est avivé, cela peut occasionner une déformation excessive du bois lors du séchage [25], notamment à cause du bois juvénile [20,22]. S'il est conservé rond, alors le temps de séchage augmente significativement à cause du faible rapport surface/volume qui empêche une évacuation efficace de l'eau [1]. Cette dernière méthode est donc plus énergivore et coûteuse [1].

De plus, le séchage du bois rond a tendance à développer une fissuration importante en surface du matériau [1]. Ces défauts sont le résultat d'un retrait hétérogène du bois qui génère des tensions internes [16,18]. Ces contraintes sont le fruit de la combinaison de deux facteurs : (i) un retrait tangentiel généralement deux fois plus élevé que le radial et (ii) un gradient d'humidité entre l'enveloppe extérieure qui sèche plus rapidement que le cœur du bois [18,49]. Les couches superficielles subissent alors un retrait limité en raison de la présence des couches internes encore humides, entraînant la fissuration [18].

Bien que les fissures longitudinales n'aient pas d'effet majeur sur les performances mécaniques des éléments, leur présence à proximité des points de fixation peut notablement diminuer la résistance des assemblages [3,50–52]. L'application de fentes de décharges se sont avérées être très efficaces pour diminuer les tensions internes de séchage, et permettent de mieux contrôler l'emplacement des fissures. [53–56].

Enfin, que le séchage soit naturel ou artificiel, le bois doit être préalablement écorcé [17]. Autrement la vitesse de séchage peut être considérablement ralentie [29]. De plus, l'empilage du bois doit être méticuleux afin de prévenir autant que possible le gauchissement [17].

## **Transformation du bois**

Le comportement mécanique du bois de faible diamètre diffère lorsqu'il est sollicité à son état naturel ou scié [1,12,33]. Les bois utilisés entiers (ronds et coniques) présentent une résistance à la flexion supérieure et moins variable que le bois scié [12,17,33]. Cette optimisation du comportement mécanique du bois s'explique en partie par la continuité des fibres sur l'axe longitudinal offrant une phase semi-ductile avant la rupture [12,57] et permet d'augmenter sa résistance de 30% [12].

Cependant, les bois ronds sont fréquemment sciés partiellement afin d'obtenir une ou plusieurs faces planes [1], ce qui interrompt la continuité des fibres dans les zones du bois les plus sollicitées en flexion. Bien que cela diminue la résistance à la flexion, elle n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression ou le module d'élasticité longitudinal du bois [58]. L'ASTM D4957 fournit des directives concernant la profondeur maximale des parements plats des bois ronds et limite l'enlèvement de matière à 30% du rayon du bois entier [1].

## **Rendement au sciage**

Le rendement au sciage d'une grume est fonction de son défilement et de sa longueur [22]. Ces paramètres sont corrélés négativement au rendement [22]. Cependant, la longueur n'a quasiment pas d'impact sur le rendement lorsque les billons sont coupés à des longueurs de 2 ou 3 mètres [22], ce qui représente largement les longueurs standards des montants en ossature bois [59]. Le défilement (ou décroissance) quant à lui varie principalement en fonction du traitement sylvicole ; il est en général plus important chez les essences à croissance rapide [22]. Pour une sylviculture fixée, ce défilement décroît avec l'âge [22].

Le rendement au sciage du bois d'épicéa de faible diamètre est de 40%, pour un défilement généralement fixé à 2 cm/m [4]. S'il faut purger des défauts, le rendement peut descendre à 25%

[4]. Cependant, ces résultats sont issus de sciages conventionnels, à savoir un équarrissage quatre faces des grumes [4,22]. Une faible transformation du matériau pourrait donc présenter un meilleur bilan.

### 3.4 Construction en ossature bois

L'ossature bois semble gagner un intérêt croissant parmi les autres systèmes constructifs [60,61], et serait une solution prometteuse pour répondre aux demandes de logements [54]. De plus, l'utilisation du bois de faible diamètre dans ces structures semble pertinente [21]. La construction en ossature bois permet la préfabrication d'habitations sous forme de modules [61], prouvant son efficacité et sa compétitivité en matière de conception, de vitesse de production et de confort [54]. Les dimensions standard de sciage des bois résineux en Belgique utilisés pour l'ossature bois sont présentés au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Dimensions standard de sciage des bois résineux en Belgique pour un usage en ossature bois. Sources : Hout Info Bois [62].

Épaisseur [mm]	Largeur [mm]
38	38 / 63 / 89 / 140 / 184 / 235 / 275
45	95 / 120 / 145 / 220
48 / 50	38 / 64 / 89 / 140 / 184 / 235 / 275
60	100 / 140 / 160 / 180 / 200 / 220 / 240

L'ossature est contreventée par des panneaux posés verticalement (panneaux à bords droits) ou horizontalement (panneaux rainurés-languetés) [63]. En absence de colle lors d'une pose horizontale, la résistance moyenne au contreventement par mètre de longueur est de 3,7 kN/m contre 9,4 kN/m pour une pose verticale [63]. L'épaisseur minimum du montant à la jonction de deux panneaux verticaux est de 45 mm [64–66]. Cette épaisseur permet d'avoir un joint de dilatation de 3 à 5 mm entre les panneaux et garantir un recouvrement de minimum 20 mm entre la périphérie du panneau et le montant (Figure 3.2)<sup>4</sup> [65].

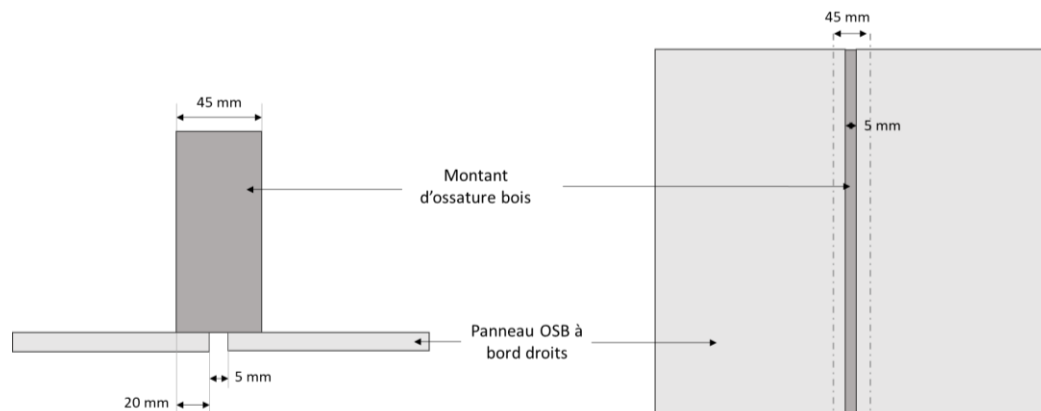


Figure 3.2 - Schéma des dimensions requises pour la mise en service d'un mur en ossature bois avec des panneaux verticaux à bords droits. Le dessin n'est pas à l'échelle.

<sup>4</sup> Interview avec H. Vanvarebergh, étudiant en construction ossature bois.

## 4 | Matériel et méthodes

### 4.1 Prototype

Puisque la qualité du bois n'a de sens que par rapport au produit final visé [19,67–69], il semble pertinent de proposer une voie de valorisation potentielle du bois de faible diamètre qui pourra être testée à la fin de l'expérience. Un prototype est proposé à la Figure 4.1. Celui-ci s'est inspiré des systèmes constructifs en ossature bois (point 3.4), avec des membrures faiblement transformées pour former un panneau structural. Ce modèle a été conçu en tâchant de penser à la facilitation de sa préfabrication et de son assemblage sur chantier, avec un faible niveau d'outillage. Son transport se présenterait sous forme de kit, avec des panneaux structuraux qui s'emboîtent l'un à la suite de l'autre.

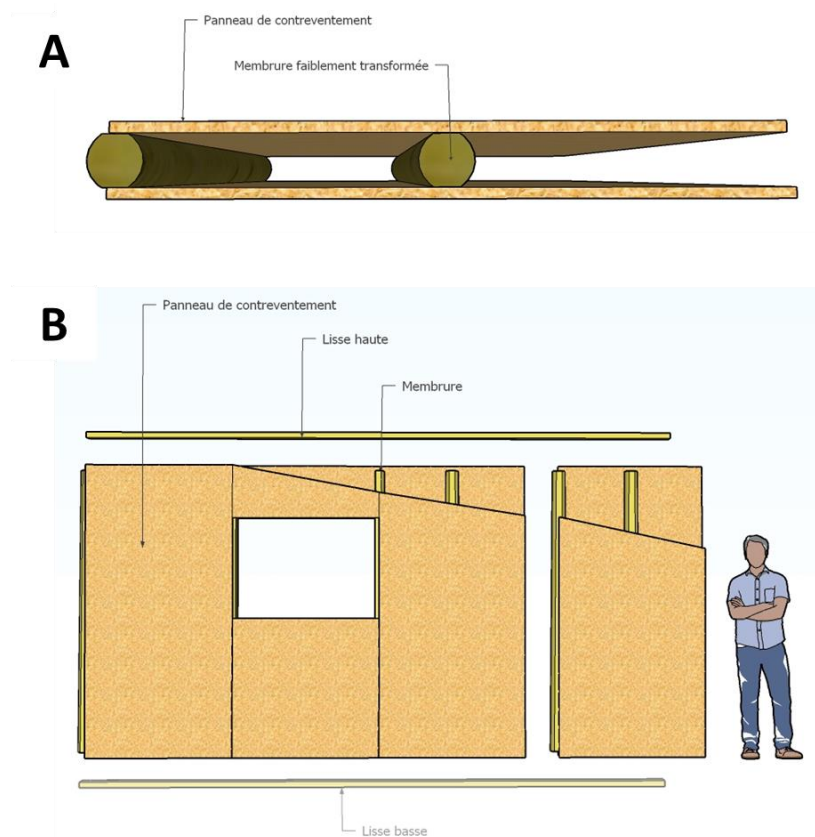


Figure 4.1 – Schéma du prototype A : Coupe transversale du panneau structural. B : Vue de face du prototype.

Pour utiliser le bois de faible diamètre en structure, il faut que les dimensions de celui-ci correspondent aux dimensions standards de la construction en ossature bois. La largeur standard associée à l'épaisseur de 45 mm est minimum 95 mm (Tableau 3.1) [62]. Le rapport entre la largeur et l'épaisseur de cette section étant inférieur à six, cela garantit un usage conforme en construction [66]. Ainsi, les bois ronds pouvant inscrire une section de 45x95 mm sur leur section transversale fin-bout ont la dimension requise pour accueillir en leur sein une poutre standardisée d'ossature bois. Le diamètre fin-bout minimum des billons est obtenu par la diagonale de ce rectangle inscrit, soit 10,5 cm à l'état sec. Des bois ronds avec un diamètre suffisamment grand (13,5 cm) peuvent inscrire deux sections standards, formant alors deux demi-membrures une fois sciés en deux (Figure 4.2).

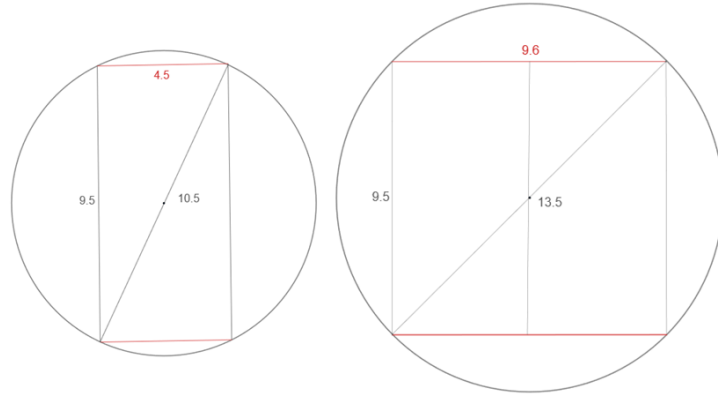


Figure 4.2 – Inscription d’une section d’ossature bois 45x95mm sur la face transversale fin-bout d’un billon. **Gauche** : Inscription de la section sur le plus petit billon acceptable pour l’expérience. **Droite** : inscription de deux sections sur un grand billon, celui-ci peut être scié en deux pour obtenir deux membrures.

Les billons correspondant à ces dimensions minimales pourront être usinés avec une faible transformation. Celle-ci cherchera à préserver un maximum l’état naturel du bois, en sciant uniquement deux dosses opposées au bois rond, avec un écart constant entre les deux faces planes (Figure 4.3).

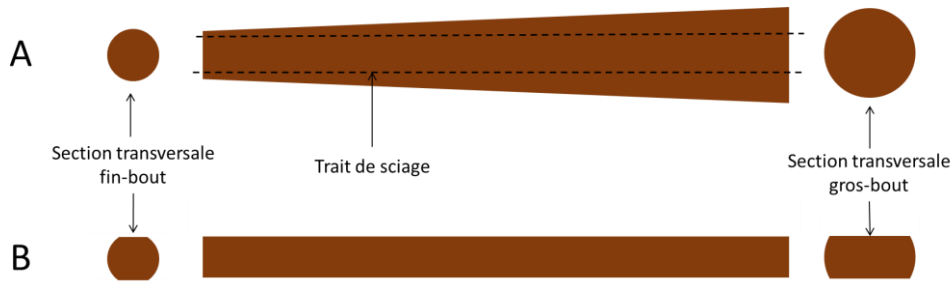


Figure 4.3 – Illustration d’une faible transformation d’un bois rond de faible diamètre. Avant sciage (A) et après sciage (B).

Ces membrures sont sujettes à un usage en classe d’emploi 2 [70], dont l’humidité des éléments internes ne peut excéder  $17 \pm 2\%$  [70,71]. Le bois doit cependant être redimensionné à l’état vert pour fournir le matériel nécessaire à l’étude du séchage.

Pour déterminer le retrait du bois après séchage, il faut calculer la variation dimensionnelle du matériau dans une direction considérée (équation 4.1) [72].

$$\Delta L = \frac{\alpha * \Delta H * L_i}{100} \quad (4.1)$$

Où  $\Delta L$  est la variation de la longueur dans une direction en cm,  $\alpha$  le coefficient spécifique de retrait ou de gonflement radial et tangentiel en % pour une variation de 1% de H sous le point de saturation des fibres (PSF),  $\Delta H$  est la variation de l’humidité entre le PSF et l’humidité finale du bois en %,  $L_i$  est la dimension initiale du bois dans la direction considérée en cm.

$L_i$  peut être déterminé car  $\Delta L$  est la différence entre la dimension initiale et finale du bois (équation 4.2).

$$L_i = \frac{L_f * 100}{100 - \alpha * \Delta H} \quad (4.2)$$

Où  $L_i$  est la dimension initiale du bois en cm et  $L_f$  la dimension finale du bois dans la direction considérée en cm.

Les valeurs des coefficients spécifiques de retrait ou de gonflement radial et tangentiel ( $\alpha$ ) ainsi que le PSF de l'épicéa commun sont décrits au Tableau 4.1. Bien que ces valeurs soient valables pour du bois mature d'Épicéa, elles seront utilisées dans les calculs car aucune valeur du bois juvénile n'a été trouvée.

Tableau 4.1 - Coefficients spécifiques de retrait ou de gonflement radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), point de saturation des fibres de l'Épicéa commun. Sources : [64,72,73].

Paramètre	Valeur
$R_r$	0,15
$R_t$	0,32
PSF [%]	33

Pour connaître la dimension minimale requise pour les billons à l'état vert, on ne tiendra compte que de la variation de son diamètre principalement influencée par un retrait radial. En incorporant les valeurs décrites au tableau 4.1 à l'équation 4.2 avec une humidité finale de 17%, le diamètre fin-bout minimum d'un billon à l'état vert est 10,8 cm. La dimension de la section rectangulaire à l'état vert est quant à elle de 47x97mm.

## 4.2 Matériel

40 billons frais et écorcés d'une longueur de trois mètres ont été commandés auprès de la société Philippe Cornet SA, une entreprise d'exploitation forestière de résineux et de commerce de bois ronds dont la zone d'approvisionnement forme un quart de cercle d'un rayon de 50km du côté de Libramont et Tellin (Figure 4.4).

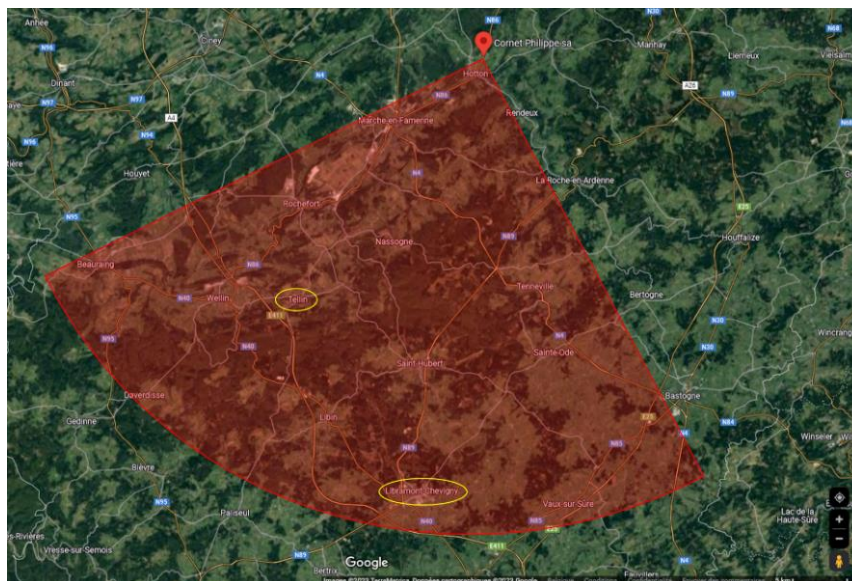


Figure 4.4 - Zone d'approvisionnement approximatif de l'entreprise Philippe Cornet Bois (en rouge). Tellin et Libramont sont entourés en jaune.

Un douglas présent dans le lot a dû être écarté de l'étude, car ne correspondant pas au matériel requis pour l'essai. 39 billons d'épicéas communs (*Picea abies* (L.) Karst, 1881) ont donc été utilisés pour la réalisation de l'expérience. Ces bois ont été répartis équitablement en quatre classes de diamètre (Tableau 4.2).

Les billons de la **classe A** sont juste assez grands pour inscrire section de 45x95mm sur leur face transversale fin-bout. Ceux en **classe B** peuvent largement inscrire cette section. Les grumes appartenant à la **classe C** peuvent inscrire tout juste deux fois la section rectangulaire 45x95

mm afin de former deux demi-membrures et la **classe D** correspond aux billons pouvant largement accueillir ces deux sections.

Tableau 4.2 - Dimensions (moyenne  $\pm$  écart-type) des billons d'épicéa classés selon quatre classes de diamètre avec le nombre de répétitions. Un rondin appartenant à la classe de diamètre B était un douglas et a été écarté de l'expérience.

Classe de diamètre	Diamètre fin-bout [cm]	Diamètre gros-bout [cm]	Nombre
A	11,32 $\pm$ 0,81	13,23 $\pm$ 0,72	10
B	12,86 $\pm$ 0,89	14,61 $\pm$ 0,64	9
C	13,67 $\pm$ 0,40	15,22 $\pm$ 0,72	10
D	14,89 $\pm$ 0,50	16,38 $\pm$ 0,68	10

Tous les billons ont été recoupés à la tronçonneuse à 2,5 m en partant du fin-bout. Le fragment le plus long a été utilisé pour l'étude du comportement au séchage tandis que la petite section (environ 50 cm) était utilisée pour la détermination de l'humidité de départ et le point de saturation des fibres.

### 4.2.1 Éprouvettes

La préparation des éprouvettes est réalisée au Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Centre de Recherche Agricole Wallon (CRA-W) à Gembloux. Une rondelle de 20 à 40 mm d'épaisseur dans le sens du fil du bois est prélevée à la scie à ruban sur chaque fin bout des petits billons de 50 cm, avec des faces autant que possible perpendiculaires entre elles. Les 39 rondelles sont ensuite découpées en quatre quartiers numérotés, avec une première ligne égale au plus grand diamètre de la rondelle passant par la moelle et une deuxième ligne perpendiculaire à la première passant par la moelle également (Figure 4.5).

Deux quartiers opposés sont choisis (généralement 1 et 3), pour un total de 78 échantillons. Lorsqu'un défaut est présent sur un échantillon (poche de résine, nœud, etc.), elle est remplacée par le numéro précédent. L'identifiant est noté à l'indélébile sur chaque quartier (billon d'origine, numéro du quartier). Tous les échantillons sont directement conservés dans un sac hermétique. La conformité des éprouvettes est spécifiée dans la norme NBN 225 [74].

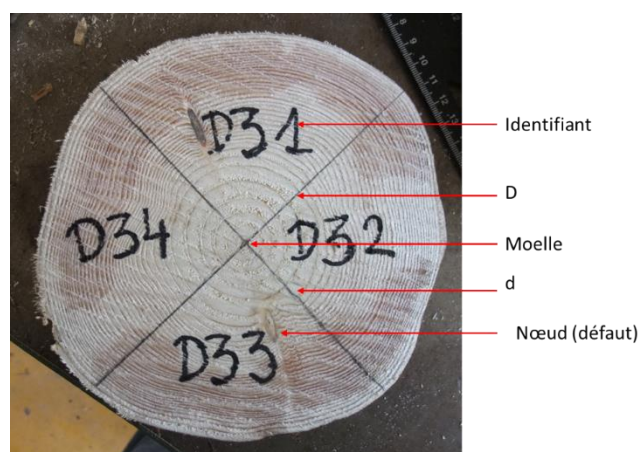


Figure 4.5 – Réalisation des éprouvettes. Traçage du plus grand diamètre passant par la moelle (D) et du 2<sup>ème</sup> diamètre perpendiculaire à D passant par la moelle également (d). Numérotation des quartiers selon un identifiant unique. Les deux échantillons conservés pour la suite de l'expérience doivent être exempt de défauts (ici : D32 et D34).



## 4.2.2 Mesures

Les 78 échantillons sont immédiatement pesés lorsqu'ils sont retirés de leur contenant hermétique, une pesée à l'air et une pesée hydrostatique sont réalisées. Les quartiers sont ensuite amenés à saturation par immersion dans l'eau osmosée à l'intérieur d'une cloche à vide *Vacuubrand*. L'état saturé est atteint grâce à plusieurs cycles de vide de 20 à 35 minutes. Les échantillons sont alors essuyés et le poids à l'air et poids hydrostatique sont à nouveau mesurés. Ensuite, les quartiers sont placés dans une étuve électrique *Snol* à  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 48 h, jusqu'à stabilisation de la masse de 0,1% entre deux pesées à deux heures d'intervalle [75]. Les quartiers anhydres sont ensuite placés dans un dessiccateur en verre borosilicaté pour empêcher la reprise d'humidité durant leur refroidissement. Le poids à l'air et poids hydrostatique sont notés. Enfin, les quartiers sont laissés à l'air libre deux semaines pour garantir une reprise d'humidité, pour une dernière pesée à l'air et une pesée hydrostatique. Les mesures du poids à l'air sont au 0,001g près et la pesée hydrostatique est réalisée au 0,01g près sur une balance *Sartorius*. Afin d'éviter toute modification des propriétés du bois durant les manipulations, les opérations sont réalisées dans une température ambiante avoisinant  $21^{\circ}\text{C}$ , l'eau osmosée est à température constante de  $21^{\circ}\text{C}$ .

### Pesée hydrostatique

La pesée hydrostatique est la méthode recommandée pour mesurer précisément le volume d'un échantillon de bois [76]. Le quartier immergé dans l'eau déplace un volume d'eau équivalent à celui de l'échantillon. Ce volume est donc déterminé par le rapport entre la masse d'eau déplacée par l'échantillon immergé et la densité de l'eau (équation 4.3).

$$V_{\text{éch}} = V_{\text{eau déplacée}} = \frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad (4.3)$$

Où  $V_{\text{éch}}$  est le volume de l'échantillon en  $\text{cm}^3$ ,  $m_{\text{eau}}$  la masse d'eau déplacée en gr et  $\rho_{\text{eau}}$  la densité de l'eau en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . À  $21^{\circ}\text{C}$ , la densité de l'eau est de  $998,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  [77–79].

### Taux d'humidité

L'humidité du bois est mesurée conformément à la norme EN 13183-1 [75]. Elle est définie par la différence entre la masse humide et anhydre de l'échantillon rapporté à sa masse anhydre (équation 4.4).

$$H = \frac{m_h - m_0}{m_0} * 100 \quad (4.4)$$

Où  $H$  est la teneur en humidité en % (à 0,1% près),  $m_h$  est la masse de l'éprouvette à l'humidité  $H$  en gr,  $m_0$  est la masse anhydre de l'éprouvette en gr.

### Point de saturation des fibres (PSF)

Le PSF est déterminé conformément à la norme NBN 225 [74]. Il est défini comme étant le rapport entre la rétractabilité volumétrique totale ( $R_v$ ) et le coefficient de rétractabilité volumétrique ( $r_v$ ) [74,80] (équation 4.5).

$$PSF = \frac{R_v}{r_v} \quad (4.5)$$

Où les paramètres sont tous exprimés en %. La rétractabilité volumétrique totale est définie comme la variation maximale du volume de l'état saturé à l'état anhydre de l'éprouvette [80] (équation 4.6).

$$R_v = \frac{V_s - V_o}{V_o} * 100 \quad (4.6)$$

Où  $V_s$  est le volume de l'éprouvette saturée d'humidité en  $\text{cm}^3$  et  $V_o$  est le volume de l'éprouvette anhydre en  $\text{cm}^3$ . Le coefficient de rétractabilité volumétrique ( $r_v$ ) caractérise le comportement du bois sous l'influence de l'humidité [80]. Il indique la variation du volume sous une variation du taux d'humidité du bois de 1% [48] (équation 4.7).

$$r_v = \frac{V_h - V_o}{V_o * H} * 100 \quad (4.7)$$

Où  $V_h$  est le volume de l'éprouvette à l'humidité  $H$  sous le *PSF* en  $\text{cm}^3$ . En insérant les équations 4.6 et 4.7 à la formule 4.5, le *PSF* peut être calculé à partir de quatre mesures (équation 4.8).

$$PSF = \frac{V_s - V_o}{V_h - V_o} * H \quad (4.8)$$

Le *PSF* est déterminé pour tous les échantillons du point 4.2.1. Puisque le retrait dans le bois est considéré linéaire entre le *PSF* et l'état anhydre, une visualisation graphique est réalisée à partir des pentes des droites des échantillons. Une analyse statistique est réalisée pour déterminer l'influence potentielle des paramètres initiaux du bois (âge, densité et taux d'accroissement) sur les résultats.

### 4.3 Comportement au séchage

Cette partie ne concerne que les billons de 250 cm. Leur préparation avant le séchage (mesures et conditionnement) est réalisée au Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Centre de Recherche Agricole Wallon (CRA-W) à Gembloux.

#### Préusinage des billons

Les 39 billons sont usinés selon les cinq modalités présentées à la Figure 4.6.

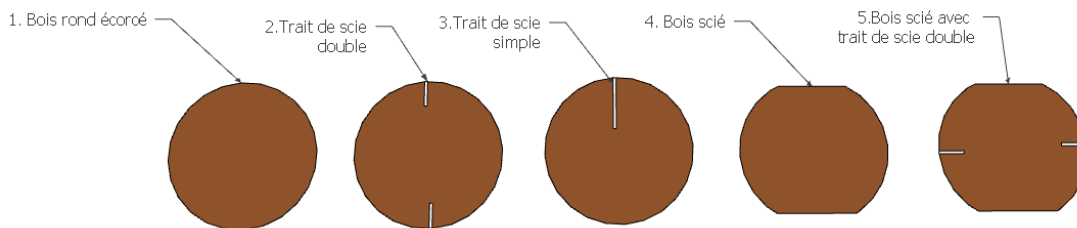


Figure 4.6 - Modalités d'usinage des membrures avant séchage

La **modalité 1** correspond aux bois ronds n'ayant subi aucun pré-usinage avant séchage. La **modalité 2** sont les bois ronds avec une double fente de décharge dont la profondeur équivaut à  $1/3$  du rayon de la section transversale [54]. La **modalité 3** correspond aux bois ronds avec une simple fente de décharge, dont la profondeur équivaut  $1/3$  du diamètre de la section transversale du billon [53,81]. La **modalité 4** sont les bois équarris deux faces avec une largeur constante de 97 mm le long du billon (déterminé au point 4.1). Enfin, la **modalité 5** s'applique aux billons équarris deux faces avec une largeur constante de 97 mm le long du billon ainsi qu'une double fente de décharge dont la profondeur équivaut à  $1/3$  du rayon de la section transversale [54]. L'équarrissage est réalisé avec la scie à grumes du LTB. Un résumé est présenté au Tableau 4.3. Tous les traits de scie ont été réalisés avec une scie circulaire *Elu MH85*. La



variation de la profondeur du trait de scie dû au défilement du bois est assurée par l'utilisation d'une table réglable servant de guide à la scie circulaire.

Tableau 4.3 - Liste des traitements réalisés avant séchage du bois, avec le nombre de répétitions par modalité.

Modalité	Traitement	Nombre
1	Aucun	8
2	Double fente de décharge	8
3	Simple fente de décharge	8
4	Billon équarri deux faces	8
5	Billon équarri deux faces et double fente de décharge	7

Un code couleur est utilisé afin de distinguer les quatre classes de diamètres dans chacune des cinq modalités. Une peinture en spray « Sylva Mark » de *SOPPEC* de couleur verte, bleue et jaune ou *Color SPRAY* de couleur rouge est appliquée aux extrémités des billons de 250 cm afin d'obstruer toutes les trachéides sur leur faces transversales. Enfin, une étiquette est agrafée sur chaque extrémité du billon reprenant la classe de diamètre, la modalité de pré-usinage et son numéro unique au sein d'une classe de diamètre. Les 39 billons sont conservés dehors.

## Mesures pré- et post- séchage

Des mesures sont réalisées avant et après l'opération de séchage, dans le but d'évaluer le niveau de déformation du bois ainsi que l'apparition de défauts selon chaque modalité de pré-usinage et chaque classe de diamètre.

Un classement qualitatif de départ est réalisé sur tous les billons d'épicéa selon la norme EN 1927-1 [40]. La méthode de mesure utilisée est celle décrite dans la norme EN 1310 [82]. Les caractéristiques observées sont les nœuds, la présence de poche de résine, le taux de croissance, le fils tors, l'excentricité du cœur, la présence de bois de réaction, la courbure, la décroissance, les fentes de cœur, l'attaque d'insectes, les échauffures, les pourritures et les discolorations. La clé de classification et la marche à suivre sont présentées en Annexe A.

La norme EN 1927-1 [40] spécifie également que si certaines caractéristiques des bois ronds des classes A et B ne satisfont pas à certains critères de qualité, il est possible de les compenser en utilisant d'autres caractéristiques de qualité supérieure, sauf dans le cas de critères non compensables (attaques d'insectes, pourriture et discoloration). Ainsi, le seuil de qualité d'un billon n'est pas nécessairement défini par le critère le moins bien classé.

De plus, les fentes en surface sont comptées et mesurées au mètre ruban en notant le départ et la fin des fissures au marqueur indélébile. Elles sont classées selon quatre classes d'épaisseur (< 1 mm, 1 à 3 mm, 3 à 5 mm, > 5 mm). Tous les billons sont pesés à 0,1 kg près.

## Séchage

Les bois sont entreposés dans un séchoir sous vide *Eberl V-Premium* de l'entreprise Huet & Simon Bois, société belge spécialisée dans la production de bois ronds. Le programme utilisé est le « Sapin-Tanne scharf » destiné au séchage de rondins de 20 cm de diamètre pour une humidité finale de 20%. Au total, 20 heures ont été dédiées au chauffage et 261 heures à la phase de séchage. Un résumé de l'abaque de séchage est présenté dans le Tableau 4.4.

Lors du chargement dans le séchoir, l'empilage des billons a correctement été effectué avec des baguettes placées entre chaque lit de billons, perpendiculairement au fil du bois, tous les 70 – 80 cm. Les paquets sont ensuite cerclés et trois sondes sont placées dans trois billons différents. A la fin du séchage, le taux d'humidité est mesuré à nouveau de manière similaire au point 4.2.2

avec une rondelle cette fois-ci prélevée à 10 cm du gros-bout. Un tableau comparatif de l'évolution de la qualité des billons à la suite du séchage est réalisé.

Tableau 4.4 - Résumé de l'abaque de séchage de l'entreprise Huet & Simon bois. Avec les différentes phases de séchage, le temps en heures, la température dans le séchoir en °C et l'humidité relative de l'air (HR) en %.

Phase	Temps [h]	Température [°C]	HR [%]
Chauffage	1	22	45
	1	26	45
	1	31	45
	1	36	45
	1	41	45
	15	45	45
Séchage	1	45	35
	1	50	35
	1	55	35
	1	60	35
	98	65	35
	34	66	35
	125	67	35
Refroidissement	3	Ambient	35

## 4.4 Caractérisation mécanique

L'usinage des membrures a été réalisé au Laboratoire de Technologie du Bois (LTB) du Centre de Recherche Agricole Wallon (CRA-W) à Gembloux. Les essais mécaniques ont eu lieu au « Department of Structural Mechanics – Timber Research Group » de l'université de Mons.

### Usinage final des billons

Après séchage, les billons issus des modalités 1 à 3 sont équarris deux faces à la scie à grumes à une largeur constante de 95mm. Pour les modalités 2 et 3, les bois issus des classes de circonférences A et B sont équarris parallèlement au trait de scie. Les bois des classes C et D sont quant à eux équarris perpendiculairement au trait de scie pour ensuite être recoupés en deux (Figure 4.7). Tous les sciages ont été réalisés à la scie à grumes du LTB.

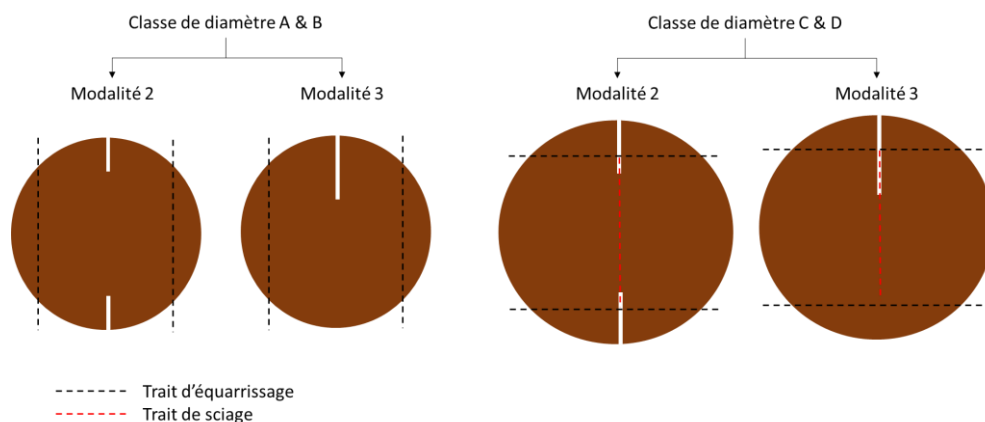


Figure 4.7 - Equarrissage des billons issus des modalités 2 et 3. Les billons appartenant aux classes de diamètre A et B sont équarris parallèlement aux fentes de décharges. Les billons des classes C et D sont quant à eux équarris perpendiculairement à la fente de décharge, pour ensuite être sciés en deux.

Deux types de membrures sont distinguées : les **membrures simples**, issues des classes A - B et les **demi-membrures**, issues des classes C - D. Ils sont tous recoupés à 235 cm en tâchant de rafraîchir les deux faces et les rendre parallèles entre elles. Ces découpes sont réalisées avec la panneauteuse du LTB. Ainsi, les montants ont une dimension adaptée pour une construction en ossature bois à panneaux verticaux de 122x244cm.

#### 4.4.1 Classement visuel

Avant d'être testés mécaniquement, un classement visuel de chaque membrure a été effectué selon les critères de la norme STS 04 [83]. Bien que le bois ne soit pas rectangulaire, les deux faces planes ont permis d'observer tous les paramètres de la clé avec fidélité (nœuds, inclinaison des fibres, cernes de croissance, fentes, déformations, résine, altérations, etc). Les membrures devaient correspondre au minimum à la classe S8, ce qui équivaut à une classe de résistance C24 selon la norme EN 338 [84].

Trois groupes sont distingués lors du classement : (i) les membrures ayant atteint une classe de tri S8 ou plus, (ii) ceux dont la classe de résistance ne va pas au-delà de la classe S6 et (iii) les membrures déclassées, avec des défauts trop importants pour être admis en structure. Puisque les membrures étaient usinées à leur dimension finale d'utilisation, aucune purge des défauts n'était possible. Les bois déclassés sont donc définitivement retirés de l'expérience. Un tableau du classement des membrures est réalisé en fonction de leur modalité de séchage.

#### 4.4.2 Essai de flexion

Cinq géométries des faces transversales sont distinguées pour les essais mécaniques, avec les membrures simples pleines, préfendues une ou deux fois et les demi-membrures pleines ou préfendues une fois (Figure 4.8).

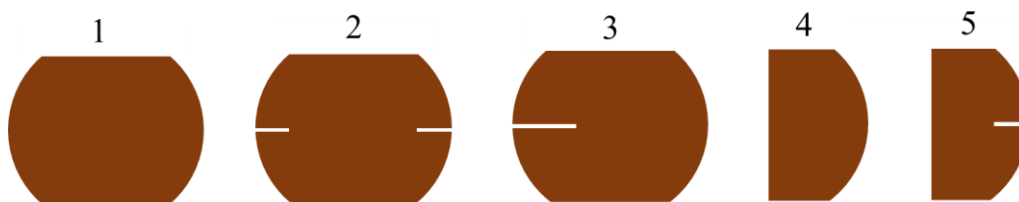


Figure 4.8 - Forme finale des faces transversales des membrures issues des cinq modalités de séchage pour les essais de flexion. Avec les membrures simples pleines (1), préfendues deux fois (2), préfendues une fois (3) et les demi-membrures pleines (4) et préfendues une fois (5).

#### Banc d'essai

Un test de flexion à trois points a été réalisé sur un banc d'essai aux points d'appui espacés de 220 cm. Une plaque métallique dépassant la largeur des billons était placée au centre du billon afin d'y poser deux capteurs de déplacement à pointe de touche *HBM* de type *LVDT (1-WA/100MM-T)* situés perpendiculairement de part et d'autre du billon. Un capteur de force était situé au centre de cette plaque, au point d'application de la charge. Deux autres capteurs de déplacement selon l'axe Z étaient disposés sur l'axe X à 66 cm de part et d'autre du centre du billon. Une vue schématique aérienne et latérale du dispositif d'essai est présentée à la Figure 4.9.

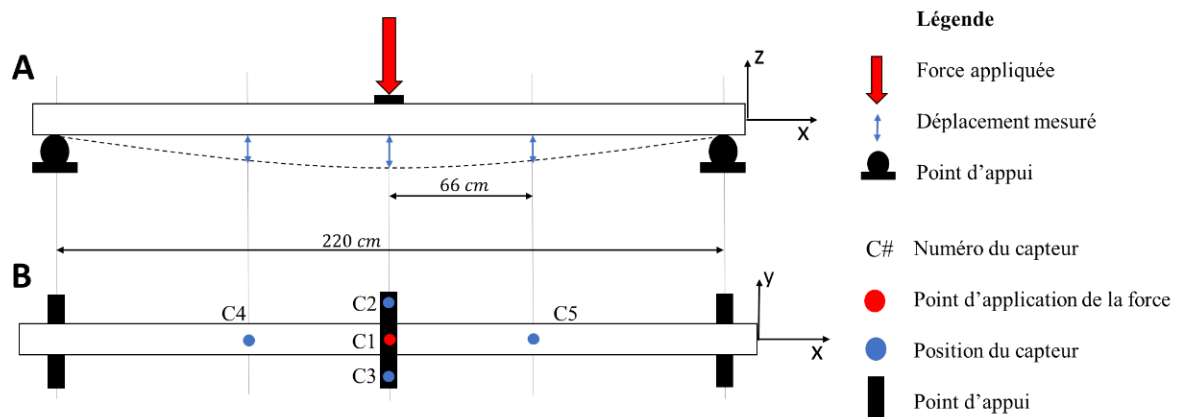


Figure 4.9 - Schéma du test de flexion à trois points. **A** : Vue latérale du test. **B** : Vue aérienne du dispositif.

Une force progressive était appliquée au centre du billon. L'augmentation de la charge était assurée par un vérin hydraulique *ENERPAC* à double effet de type *CLRG10012*. La vitesse d'augmentation de la charge était réalisée manuellement par un opérateur. Toutes les données (temps, force appliquée et déplacement vertical) ont été récupérées par un boîtier d'acquisition *QuantumX MX840*. Les données étaient enregistrées tous les deux centièmes de secondes sous un format ASC. Une photo du banc d'essai est présentée à la Figure 4.10.

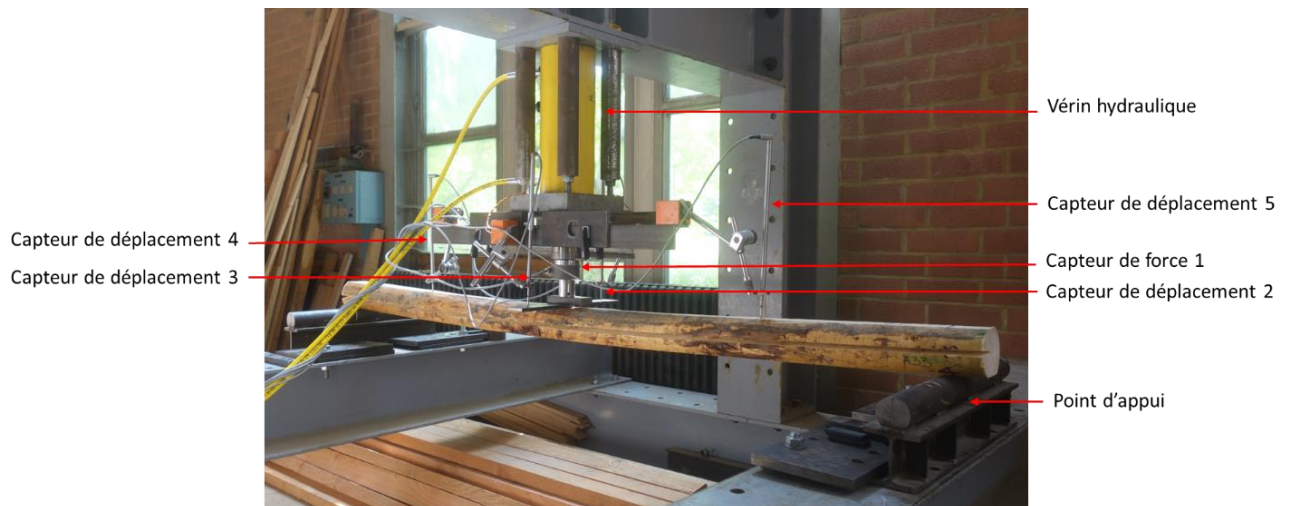


Figure 4.10 - Présentation du banc d'essai durant le test de flexion de la membrure A33.

## Rupture à la flexion axiale

Des tests préliminaires de résistance à la rupture en flexion des membrures ont été réalisés afin de déterminer le domaine d'élasticité du matériau. Ces tests ont été réalisés conformément à la norme EN 408 [85] sur quatre membrures déclassées. La rupture était considérée atteinte dès le premier éclatement des fibres. L'objectif de ce test était de déterminer un déplacement vertical maximal dans la plage élastique du matériau. La flèche maximale autorisée pour la suite de l'expérience a été déterminée en prenant 50% du déplacement vertical moyen mesuré.

## Module d'élasticité (*MOE*)

Des tests de flexion simple à trois points d'appuis ont été réalisés conformément à la norme EN 408 [85] sur deux billons par modalités, totalisant dix échantillons. Une charge a été appliquée de manière progressive sur ces derniers jusqu'à atteindre le déplacement vertical moyen déterminé au point précédent. Pour chaque billon testé, il a fallu vérifier que le coefficient de corrélation de la droite de régression entre la charge appliquée et la déflexion des membrures était d'au moins 0,99.

En raison de la variation de l'inertie sur l'axe X des billons, la formule habituellement utilisée pour déterminer le MOE n'est pas applicable. Il est donc extrait grâce à une routine d'éléments finis écrit par Sélim Datoussaïd, professeur en mécanique des structures à l'UMons. Le script permet de calculer les efforts au sein d'une structure sur le logiciel GBU Octave (version 8.2.0), un environnement de code mathématique comparable à MATLAB.

Pour modéliser la géométrie des billons, ceux-ci ont été subdivisés en 10 tronçons de 22 cm. Au total 11 sections transversales ont été idéalisées par le programme. Pour modéliser les courbures d'une section, celles-ci ont été discrétisées en 100 segments par le logiciel. Chaque tronçon idéalisé était issu de la moyenne des sections idéalisées aux extrémités du tronçon correspondant. Ainsi, les efforts, la géométrie et la déformation du billon étaient connues. Le MOE a donc pu être déterminé par calibrage du modèle numérique d'éléments finis avec les données expérimentales.

Des mesures plus précises ont été prises aux deux extrémités des membrures, avec notamment les surfaces de découvrément supérieure et inférieure, une épaisseur unique du trait de scie pour les modalités 2 et 5 et l'épaisseur du trait au centre et en surface du billon pour la modalité 3. Ces mesures prises pour la modélisation des sections « réelles » sont présentées à la Figure 4.11. Ainsi, une détermination de l'erreur associée aux section idéalisées a été réalisée à titre indicatif.

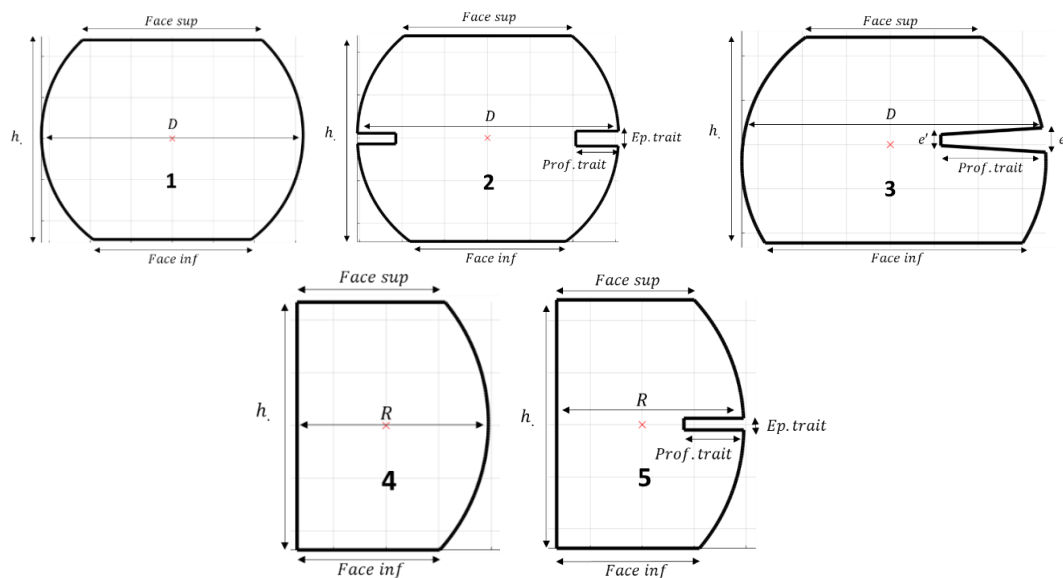


Figure 4.11 - Modélisation des sections « réelles » d'une extrémité du billon selon les cinq modalités. Ces sections sont créées à partir des mesures indiquées sur celles-ci. Avec la face supérieure (*Face sup*) et inférieure (*Face inf*), la hauteur ( $h$ ), le diamètre ( $D$ ), le rayon ( $R$ ), la profondeur du trait de scie (*Prof. Trait*), son épaisseur générale (*Ep. Trait*) ou son épaisseur proche de la moelle ( $e'$ ) et en périphérie ( $e''$ ).

## Impact d'une faible transformation du bois

L'effet éventuel de la faible transformation des membrures sur le MOE est déterminé sur les membrures issues de la modalité 1 car elles présentent la plus grande proportion de fibre continue au sein d'une section transversale. Cinq membrures ont été testées en flexion sur leur face plane (flexion axe faible) et sur le chant (flexion axe fort) afin de solliciter au maximum les fibres continues. Ensuite, ces mêmes membrures ont été sciées sur 4 faces à la scie à grume du LTB, afin de dimensionner un chevron standard de 45x95mm qui a été testé en flexion sur l'axe fort et faible également. Une présentation de ces quatre tests de flexion se trouve à la Figure 4.12.

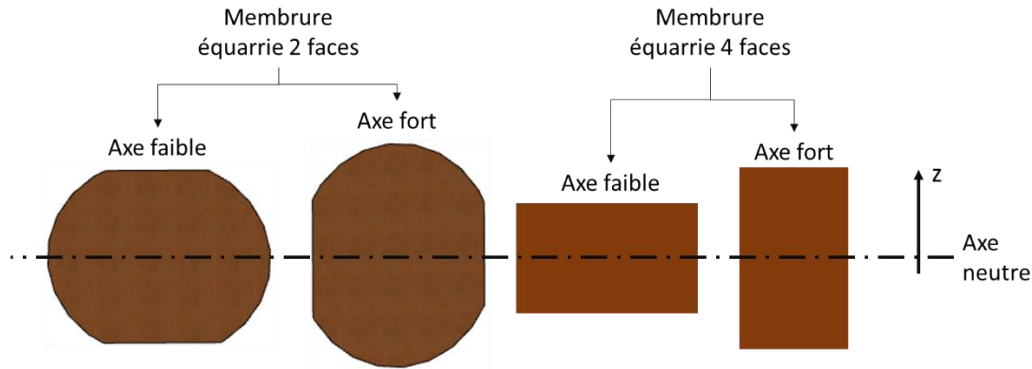


Figure 4.12 - Flexion sur l'axe fort et faible d'une membrure équarrie 2 et 4 faces selon sa position sur le banc d'essai.

Le MOE a été déterminé pour les quatre essais de flexion. Pour les membrures équarries deux faces, le code d'éléments finis décrit au point précédent a été utilisé. Pour les chevrons équarris quatre faces, le MOE a été déterminée par l'équation 4.9 [18].

$$E_{m,l} = \frac{L^3 * \Delta F}{48 * I * \Delta w} \quad (4.9)$$

Avec  $E_{m,l}$  le module d'élasticité en flexion en MPa,  $L$  la portée entre les points d'appuis en mm,  $\Delta F$  l'accroissement de force en N sur la droite de régression entre  $0,1 * F_{max}$  et  $0,4 * F_{max}$ ,  $\Delta w$  l'accroissement de la flèche en mm correspondant à  $\Delta F$  et  $I$  le moment quadratique de la section en  $mm^4$ .

#### 4.4.3 Essai de compression

Un test de résistance à la compression axiale est réalisé conformément à la norme EN 408 [85]. Des éprouvettes sont réalisées à partir de l'extrémité des billons ayant été testés préalablement, à savoir les cinq membrures équarries quatre faces, deux membrures testées en flexion statique et quatre membrures testées jusqu'à rupture, pour un total de 24 éprouvettes. Ce test a pour but de mesurer la capacité du matériau à supporter une charge en compression avant de se rompre ou de subir une déformation permanente.

Les éprouvettes d'essai ont une section transversale de 45x95mm et une longueur dans le sens des fibres de 270mm. Elles sont positionnées au milieu de la machine d'essai universelle *TIRAtest 28300* avec une vitesse de mise en charge de 0,0135mm/s jusqu'à rupture sans induire de flexion. Sont notés à partir de ce test la force maximale, le temps pour atteindre la rupture et le déplacement total. La résistance à la compression  $f_{c,0}$  est donnée par l'équation 4.10 [85].

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (4.10)$$

Où  $F_{max}$  est la force maximale appliquée sur l'éprouvette en N et  $A$  l'aire de la section transversale de l'éprouvette en  $mm^2$ .

#### 4.5 Calcul du rendement matière

Un calcul analytique du rendement matière est réalisé à partir du sciage des bois coniques de 235cm de long. Il se définit comme le rapport entre le volume produit sur le volume initial [86]. Trois paramètres influencent le rendement : (i) les pertes liées au trait de scie et la surface totale des découpes, (ii) les pertes liées à la géométrie (type de débit) et (iii) les pertes de matière dues

aux défauts purgés dans le bois [86]. Dans le cas présent, la faible transformation du bois (équarrissage deux faces) procure une géométrie complexe, à savoir un cône tronqué à deux faces planes parallèles. Seules les pertes liées à la géométrie du sciage sont considérées, les autres étant jugées non significatives. Le volume final ( $V_{final}$ ) se définit donc comme la différence entre le volume initial du billon ( $V_{billon}$ ) et le volume des deux dosses sciées ( $V_{dosse}$ ) (équation 4.11).

$$V_{final} = V_{billon} - 2 V_{dosse} \quad (4.11)$$

### Volume initial ( $V_{billon}$ )

Si le défilement est considéré constant, alors le rayon de la section transversale d'un billon est une fonction linéaire de sa hauteur (équation 4.12).

$$r_h = r_{min} + \frac{r_{max} - r_{min}}{h_{max}} h \quad (4.12)$$

Où  $r_h$  est le rayon d'une section transversale situé à une hauteur  $h$ ,  $r_{min}$  est le rayon situé au fin-bout du billon,  $r_{max}$  est le rayon situé au gros-bout du billon,  $h_{max}$  la hauteur totale du billon,  $h$  est une hauteur considérée entre 0 et  $h_{max}$ . L'unité de tous ces paramètres est le cm.

Le volume initial est obtenu en intégrant l'aire d'une section circulaire de rayon  $r$  par rapport à sa hauteur totale (équation 4.13).

$$V_{billon} = \int_0^{h_{max}} \pi * \left( r_{min} + \frac{(r_{max} - r_{min})}{h_{max}} * h \right)^2 dh \quad (4.13)$$

La résolution de cette intégrale donne l'équation 4.14.

$$V_{billon} = \pi \frac{h_{max}}{3} (r_{min}^2 + r_{max}^2 + r_{min}r_{max}) \quad (4.14)$$

En travaillant avec des diamètres à la place des rayons, on obtient l'équation du volume d'un cône tronqué, validant l'utilisation de cette équation.

### Volume des dosses sciées ( $V_{dosse}$ )

Le volume scié peut être calculé en intégrant l'aire du segment circulaire ( $A$ ) par rapport à sa hauteur totale. Selon la résolution de Weisstein [87], l'aire du segment circulaire peut s'écrire selon l'équation 4.15.

$$A = \frac{r^2}{2} (\theta - \sin\theta) \quad (4.15)$$

Où  $r$  est le rayon de la section transversale en cm et  $\theta$  est l'angle formé par le secteur circulaire en degrés. Pour tenir compte de la variation du rayon selon la hauteur du billon, on incorpore l'équation 4.12 à 4.15, que l'on intègre selon la hauteur afin d'obtenir le volume d'une dosse (équation 4.16).

$$V_{dosse} = \int_0^{h_{max}} \left( r_{min} + \frac{(r_{max} - r_{min})}{h_{max}} * h \right)^2 * \frac{\theta - \sin\theta}{2} dh \quad (4.16)$$



Afin de simplifier l'intégrale, l'angle  $\theta$  est considéré constant le long du billon. Sa valeur est donc obtenue par le rayon moyen compris entre  $r_{min}$  et  $r_{max}$ . L'intégrale exacte du volume d'une dosse est donnée en Annexe B. Par résolution de l'équation 4.16, on obtient l'équation 4.17.

$$V_{dosse} = \frac{\theta - \sin\theta}{6} * h_{max} * (r_{min}^2 + r_{max}^2 + r_{min}r_{max}) \quad (4.17)$$

En incorporant les équation 4.14 et 4.17 à l'équation 4.11, on obtient l'équation du volume final (équation 4.18).

$$V_{final} = \frac{h_{max}}{3} (r_{min}^2 + r_{max}^2 + r_{min}r_{max})(\pi - \theta + \sin\theta) \quad (4.18)$$

Avec un espacement constant de 95 mm entre les deux faces planes et un rayon connu,  $\theta$  est obtenu par les propriétés des triangles rectangles (équation 4.19).

$$\theta = 2 * \text{ArcCos}\left(\frac{95 / 2}{r}\right) \quad (4.19)$$

Un graphique comparatif des rendements théoriques en fonction du diamètre du bois faiblement transformé et équarri quatre faces est réalisé sur RStudio.

## 4.6 Analyse statistique

Les analyses statistiques sont réalisées avec le logiciel RStudio (version 4.0.3). Plusieurs packages ont été utilisés : tidyverse (version 2.0.0), ggpubr (version 0.6.0), rstatix (version 0.7.2).

Une analyse de la variance à un facteur fixe (ANOVA) est réalisée pour comparer les résultats obtenus. Les conditions d'application de l'ANOVA sont préalablement vérifiées en fonction du nombre de répétitions et de moyennes à comparer. La distribution normale des résidus est vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk tandis que l'homogénéité des variances est vérifiée avec le test de Levene. Si des conditions d'application ne sont pas rencontrées (distribution non normale ou hétérogénéité des variances), il conviendra d'utiliser un test ANOVA plus robuste, moins sensible à la violation de ces conditions (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 - Test statistique réalisé selon que la distribution des résidus soit normale ou non et que l'homogénéité des variances soit vérifiée ou non.

	Distribution normale	Distribution non normale
Homogénéité des variances	Test ANOVA	Test de Kruskal - Wallis
Hétérogénéité des variances	Test de Welch	Test de Kruskal - Wallis

Le test de Kruskal-Wallis est l'équivalent non paramétrique de l'ANOVA à un facteur. Ce test permet de comparer les médianes entre les groupes plutôt que les moyennes, sans supposer une distribution normale ou une homogénéité des variances. Le test de Welch permet quant à lui de relaxer l'hypothèse d'homogénéité des variances.



## 5 | Résultats

Un descriptif du matériel de départ classé en fonction des classes de diamètres est présenté au Tableau 5.1. Les paramètres tels que l'accroissement et le défilement sont relativement similaires entre les quatre classes de diamètres. Au sein de tous ces groupes, les valeurs moyennes du diamètre des nœuds, du nombre de cernes, du poids humide et de l'humidité initiale possèdent un écart-type élevé, avec des valeurs comprises entre un minimum et maximum de respectivement 10 – 35mm ; 14 – 46 cernes ; 13,7 – 42,1 kg ; 29 – 154,3 % classes. Les diamètres et le poids des grumes est toujours croissant en allant des classes A à D.

Tableau 5.1 - Statistiques descriptives (moyenne et écart-type) des billons en fonction des quatre classes de diamètre.

Paramètres	A	B	C	D
Diamètre fin-bout [cm]	11,32 ± 0,81	12,87 ± 0,84	13,67 ± 0,4	14,89 ± 0,5
Diamètre gros-bout [cm]	13,23 ± 0,72	14,71 ± 0,68	15,22 ± 0,72	16,38 ± 0,68
Défilement $k_d$ [cm/m]	0,76 ± 0,2	0,7 ± 0,15	0,62 ± 0,24	0,6 ± 0,19
Diamètre nœuds [mm]	21,3 ± 5,7	21,8 ± 5,07	16 ± 4,19	16,2 ± 3,16
Nombre de cernes []	26,6 ± 5,91	26 ± 7,07	28 ± 5,96	31,7 ± 10,36
Accroissement [mm/cerne]	2,32 ± 0,84	2,77 ± 0,81	2,46 ± 0,82	2,44 ± 1
Excentricité du cœur [mm]	3 ± 2,67	7,1 ± 3,98	4,5 ± 1,27	6,8 ± 3,79
Poids humide [kg]	19,68 ± 4,43	24,38 ± 5,85	24,48 ± 6,67	30,61 ± 8,55
Humidité initiale [%]	70,05 ± 35,26	82,07 ± 26,19	66,99 ± 28,61	72,08 ± 31,75

### 5.1 Comportement au séchage

#### PSF

La Figure 5.1 présente les droites de régression de l'humidité en fonction de la variation du volume de chaque échantillon. Les résultats aberrants ont été supprimés (échantillons A7, B2, B9, C7, D1 et D8). Le graphique complet des 39 billons se trouve en Annexe C. La valeur moyenne du PSF est  $29,14 \pm 4,21$  %.

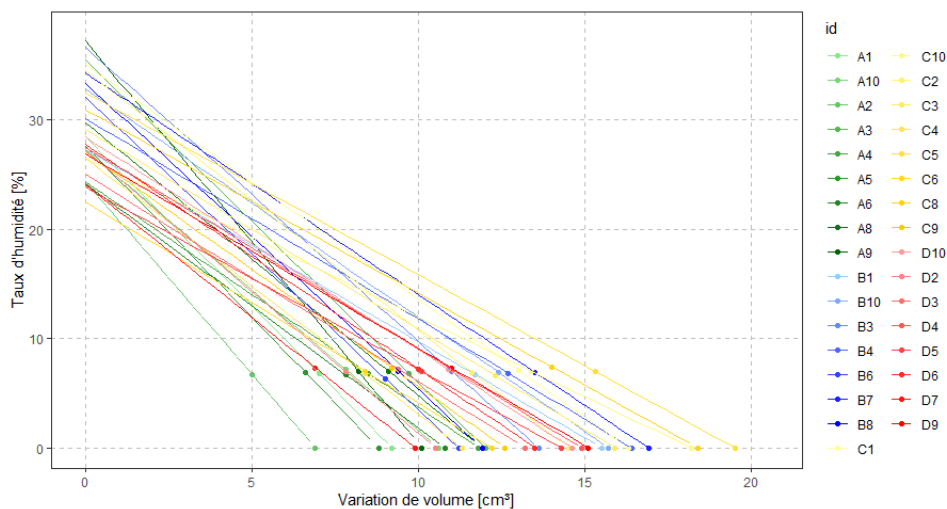


Figure 5.1 - Détermination du PSF par voie graphique.

Le nombre de cernes, la densité et l'accroissement n'ont montré aucun effet significatif sur le PSF, avec des p-valeur de respectivement 0,369, 0,813 et 0,453.

## Classement visuel qualitatif

Sur tous les billons, les critères suivants étaient absents : bois de réaction, roulure, attaque d'insectes, pourritures, discolorations et excentricité du cœur inférieur à 10%. Seulement 5 individus avaient une poche de résine unique (critère de qualité B). D'autres éléments présents n'ont pas été influencés par le séchage, notamment le diamètre des nœuds très majoritairement compris entre 15 et 20 mm (qualité B chez 100% des individus) et taux d'accroissement du bois très majoritairement inférieur à 4 mm (qualité A).

Quatre éléments ont été jugés pertinents pour comparer le pré- et post- séchage : le fils tors, la courbure, les fentes de cœur aux extrémités fin-bout et gros-bout, la proportion d'individus ayant changé de classe de qualité après séchage est présentée au Tableau 5.2. On observe dans ce tableau que le fils tors augmente pour les modalités 1 et 2 pour respectivement 50 et 37% des individus qui passent d'une classe de qualité A à B. Inversement, le fils tors diminue pour les bois équarris deux faces chez 12% des échantillons (modalité 4). La courbure quant à elle augmente pour 12% des individus des modalités 1,2 et 5. Les fentes aux extrémités se sont refermées lors du séchage, améliorant le classement visuel des billons.

Tableau 5.2 - Proportion du nombre d'échantillons ayant été déplacés de classe après séchage selon le type de traitement. Les quatre classes de qualité vont de A à D. Dans le tableau, une valeur positive est l'augmentation du nombre d'individus en pourcentage au sein d'une classe de qualité tandis qu'une valeur **négative** est la diminution du nombre d'individus. « - » signifie qu'il n'y a aucune augmentation/diminution du nombre d'individus au sein de cette classe de qualité.

Qualité → Modalité ↓	Fils tors				Courbure				Fentes fin-bout				Fentes gros-bout			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	<b>-0,5</b>	0,5	-	-	<b>-0,12</b>	0,12	-	-	<b>-0,13</b>	-	0,13	-	-	-	-	-
2	<b>-0,37</b>	0,37	-	-	<b>-0,12</b>	0,12	-	-	-	-	-	-	0,12	-	-	<b>-0,12</b>
3	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>-0,12</b>	-	0,12	-	0,38	-	<b>-0,25</b>	<b>-0,12</b>
4	0,12	<b>-0,12</b>	-	-	-	-	-	-	0,5	-	<b>-0,37</b>	<b>-0,1</b>	-	-	-	-
5	-	-	-	-	<b>-0,14</b>	0,14	-	-	0,26	-	<b>-0,26</b>	-	0,29	-	<b>-0,29</b>	-

## Fissuration

L'écorçage mécanique a généré une quantité importante de microfissures en surface des grumes. Par conséquent, le premier comptage et marquage des fentes inférieures à 1mm d'épaisseur du bois à l'état vert a été abandonné. Aucune fente d'épaisseur supérieure à 1 mm n'a initialement été observée.

Un tableau synthétique de la fissuration est présenté au Tableau 5.3. Un tableau ventilé selon les classes de diamètre est présenté en Annexe D. Les modalités 2 et 5 sont les traitements ayant le moins de fentes après séchage en termes de nombre et de longueur totale. Le traitement 2 possède une longueur totale de fentes en surface 43 fois plus faible que le traitement 1 pour 18 fois moins de fentes en surface.

Tableau 5.3 - Récapitulatif de la fissuration des billons après séchage en fonction de leur traitement : bois ronds entier, bois avec une double fente de décharge (x2), bois avec une fente de décharge (x1), équarris deux faces (Éq. 2 faces), équarris deux faces avec une double fente de décharge (Éq. 2 faces + trait de scie x2). Sont indiqués (moyenne + écart-type) le nombre de répétitions, l'humidité initiale et finale moyenne du bois, le nombre total de fentes observées en moyenne par billon et la longueur totale des fentes observées en moyenne par billon en cm.

Modalité	n	Humidité initiale [%]	Humidité finale [%]	Nombre total de fentes en surface	Longueur totale des fentes [cm]
1 : Bois rond	8	76,99 ± 30,19	8,16 ± 0,44	29,5 ± 9,47	753,31 ± 234,3
2 : Fente de décharge x2	8	71,56 ± 19,52	7,95 ± 0,74	1,63 ± 2,2	17,31 ± 18,82
3 : Fente de décharge x1	8	84,89 ± 28,24	9,52 ± 2,97	6,75 ± 7,11	177,88 ± 202,91
4 : Éq.2 faces	8	61,96 ± 22,27	9,13 ± 0,42	10,63 ± 9,01	327,76 ± 105,64
5 : Éq.2 faces+fente de déchargex2	7	74,83 ± 38,8	8,11 ± 0,59	1,43 ± 2,3	19,64 ± 33,08

Les tests statistiques ont révélé qu'il y a des différences (très) hautement significatives entre le nombre de fentes observé sur les billons issus du traitement 1 et tous les autres traitements. Ces différences sont présentées sous forme de boxplots à la Figure 5.2.

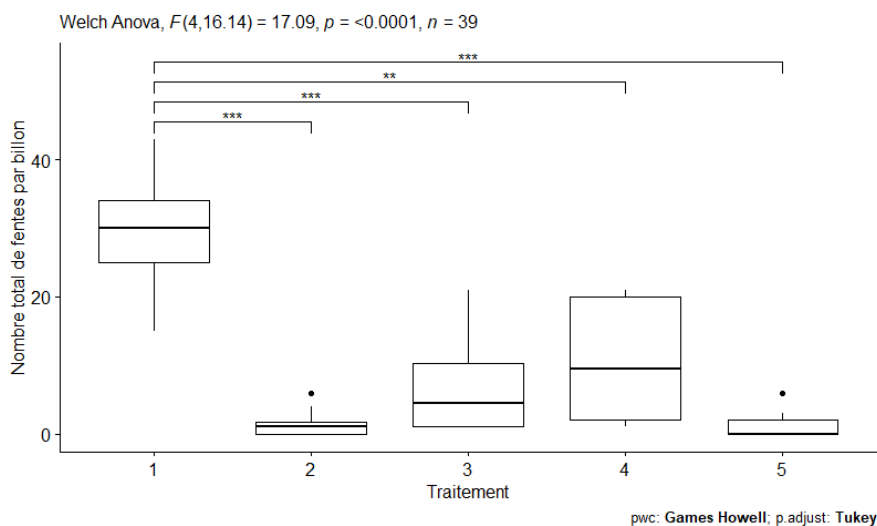


Figure 5.2 - Boxplots du nombre total des fentes de surface apparues après séchage selon cinq traitements différents. Les seuils de signification pour les facteurs de traitement sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y a absence d'astérisque.

Ces différences sont ventilées selon les quatre classes d'épaisseur des fentes sous forme de boxplots à la Figure 5.3. On observe que le nombre de fentes d'une épaisseur supérieure à 3 mm est quasiment nul pour les traitements 2, 3 et 5. Dans toutes les observations, les traitements 2 à 5 ont un nombre de fentes inférieur au traitement 1.

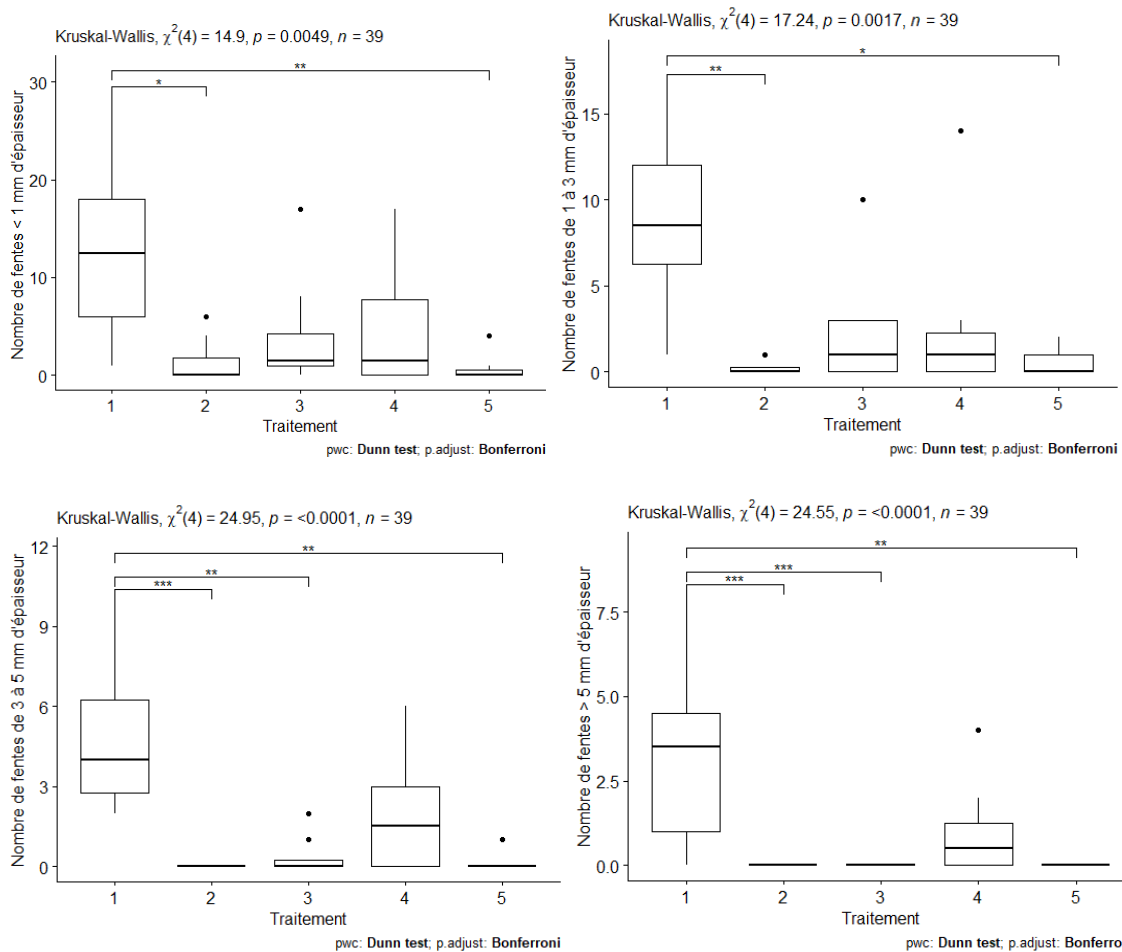


Figure 5.3 - Boxplots du nombre total de fentes par catégorie d'épaisseur des fentes (< 1 mm, 1 à 3 mm, 3 à 5 mm et > 5 mm). Les seuils de signification pour les facteurs de traitement sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y a absence d'astérisque.

Concernant la longueur totale des fentes, les tests statistiques ont révélé qu'il y a également des différences significatives entre les traitements. Ces différences sont illustrées sous forme de boxplots à la Figure 5.4.

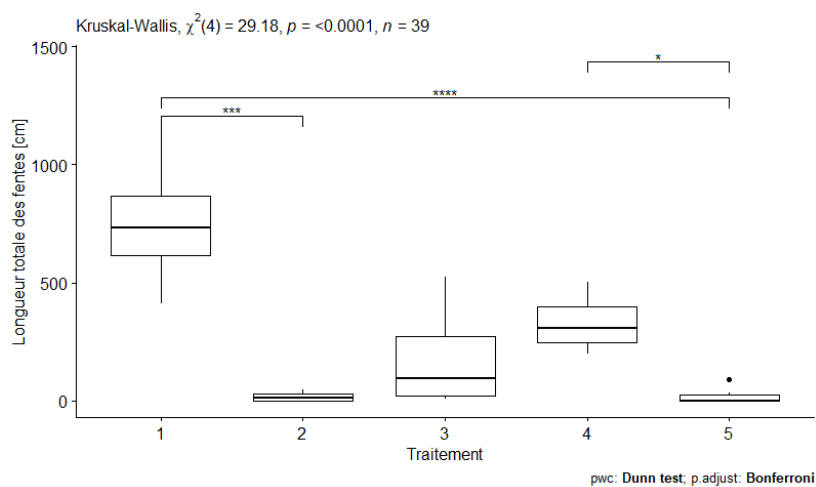


Figure 5.4 - Boxplots des longueurs totales des fentes apparues après séchage selon cinq traitements différents. Les seuils de signification pour les facteurs de traitement sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y a absence d'astérisque.

Enfin, ces différences sont ventilées selon quatre classes d'épaisseur des fentes sous forme de boxplots à la Figure 5.5. On observe que les longueurs de fentes suivent les mêmes dynamiques selon l'épaisseur des fentes. Pour une épaisseur supérieure à 3 mm les longueurs de fentes sont (quasiment) nulles pour les traitements 2, 3 et 5. Dans toutes les observations, les traitements 2 à 5 ont un nombre de fentes inférieur au traitement 1.

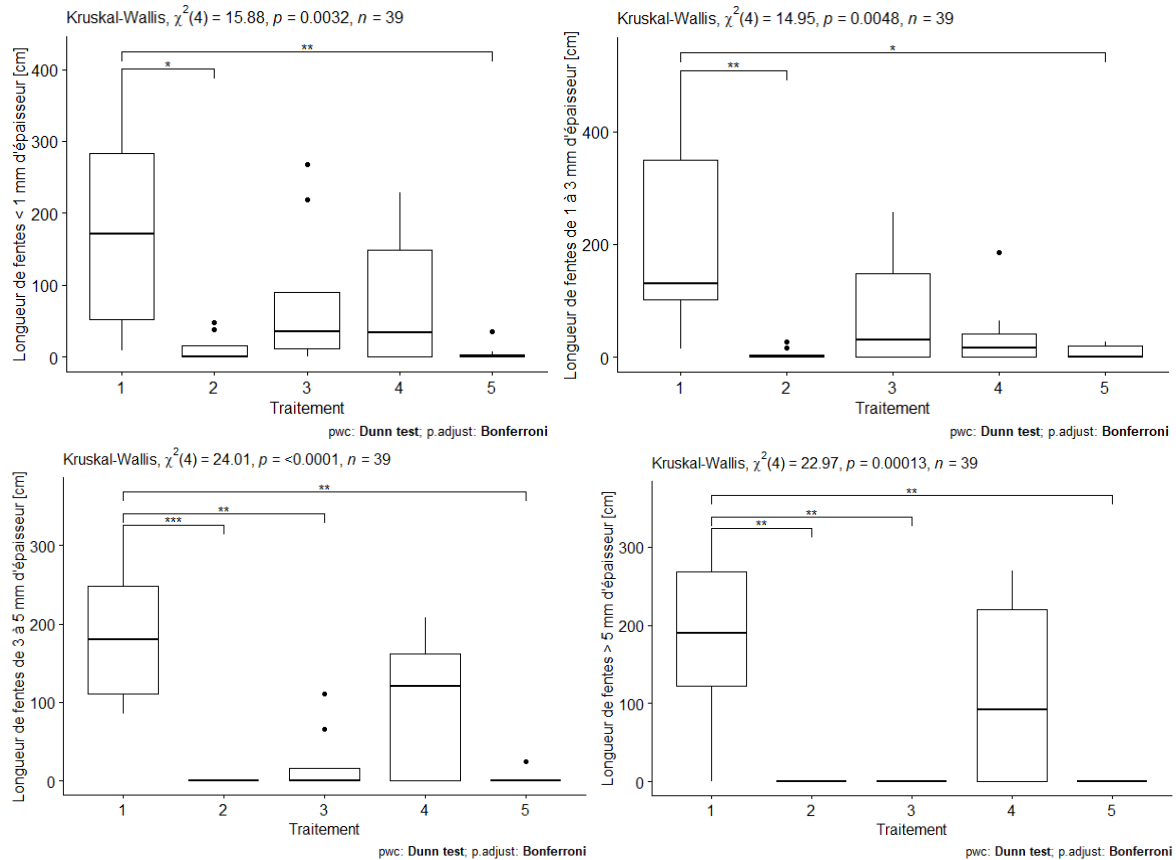


Figure 5.5 - Boxplots des longueurs totales de fentes par catégorie d'épaisseur des fentes (< 1 mm, 1 à 3 mm, 3 à 5 mm et > 5 mm). Les seuils de signification pour les facteurs de traitement sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y absence d'astérisque.

## 5.2 Caractérisation mécanique

### 5.2.1 Classement visuel structurel

Parmi les 60 membrures issues du séchage, 15 ont été déclassées. Les raisons du déclassement sont ventilées en fonction des cinq modalités de séchage au Tableau 5.4. Les déclassés ont lieu principalement à cause d'un twist ou d'un spring trop important, des fentes uniques supérieures à 124cm de long ou encore une surface de découvrément inférieure à 38mm. 16 membrures avaient des défauts trop importants pour avoir une classe de résistance supérieure à S6 (C18), soit 26,7% des membrures.

Tableau 5.4 - Récapitulatif du déclassement des membrures après séchage selon les cinq modalités d'usinage des membrures avant séchage : bois ronds entier, bois avec une double fente de décharge (x2), bois avec une fente de décharge (x1), équarris deux faces (Éq. 2 faces), équarris deux faces avec une double fente de décharge (Éq. 2 faces + fente de décharge x2). Avec le nombre de répétitions (n) et le taux d'humidité moyen final. Les défauts responsables du déclassement sont le découplement, la longueur des fentes, l'intensité du twist et du spring. Le total représente le nombre d'éléments observés conduisant à un déclassement ou à une classe de tri S6, une membrure peut donc contenir plusieurs défauts importants.

Modalité d'usinage avant séchage	n	Humidité [%]	Découplement		Fentes		Twist		Spring		Total	
			< 38	< 45	D	S6	D	S6	D	S6	D	S6
1 : Bois rond	12	8,23 ± 0,43				1				1	0	2
2 : Fente de décharge x2	12	8,13 ± 0,76		3						1	0	4
3 : Fente de décharge x1	12	10,13 ± 3,09	2			1			1		3	1
4 : Éq. 2 faces	12	9,06 ± 0,44	2	2	3	4	4	5			9	11
5 : Éq 2 faces + fente de décharge x2	11	7,98 ± 0,52	2	1			2	8			4	9

## 5.2.2 Essai de flexion

### Rupture à la flexion

Les courbes de la force appliquée en fonction du déplacement vertical jusqu'à rupture sont visibles à la Figure 5.6. Ces courbes montrent un comportement linéaire des billons jusqu'à rupture (fragile).

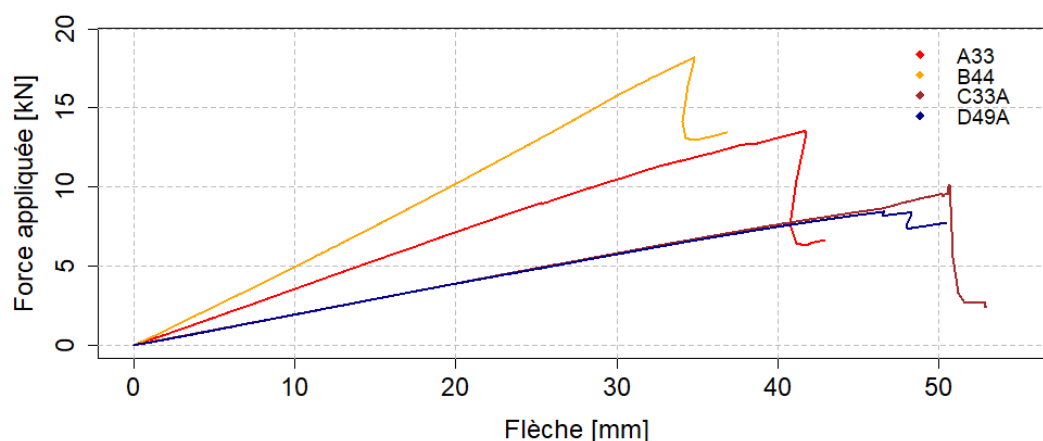


Figure 5.6 - Courbes contrainte – déformation jusqu'à rupture : Force appliquée en fonction de la flèche de quatre membrures.

Les détails sur les membrures sont présentés au Tableau 5.5, avec la charge totale appliquée (F max), le déplacement total (flèche max) et le type de rupture. Le déplacement vertical déterminé pour la suite des expériences est de 20mm.

Tableau 5.5 - Résultats du test de rupture. Pour les quatre membrures, les informations données sont le type de membrure, son module d'élasticité (MOE), la charge maximale appliquée (Force max), le déplacement total moyen au centre du billon (flèche max) et le type de rupture.

id	Membrure	MOE [GPa]	Force max [kN]	Flèche max [mm]	Type de rupture
A33	Simple	11,42	13,54	41,68	Effort tranchant
B44	Simple	13,38	18,17	34,8	Flexion
C33A	Demi	11,69	8,434	46,57	Flexion
D49B	Demi	10,14	10,17	50,68	Flexion

## Module d'élasticité en flexion

Les dix courbes de la charge appliquée en fonction de la flèche lors du test de flexion sont données à la Figure 5.7. Toutes les droites présentées ont un coefficient de corrélation supérieur ou égal à 0,99. Au total, 11 tests ont dû être réalisés car une membrure de la modalité 4 n'avait pas un déplacement linéaire à la charge appliquée. Cette dernière a été éradiquée des échantillons et une troisième membrure appartenant à cette modalité a été testée. Un graphique avec les trois essais flexion des billons de la modalité 4 est présenté en Annexe E.

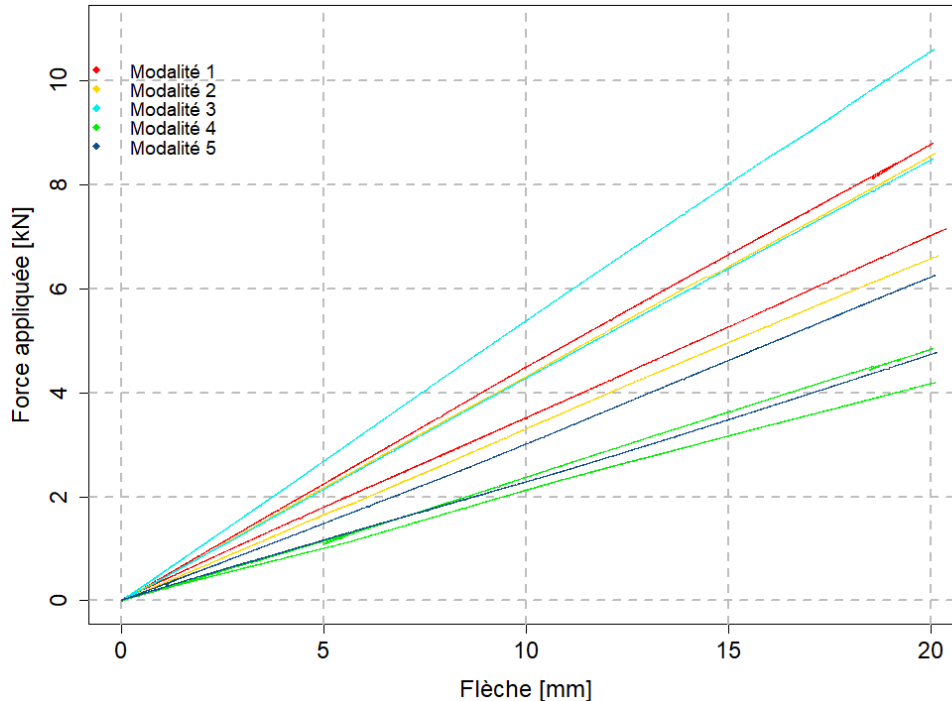


Figure 5.7 - Courbes contrainte – déformation dans le domaine élastique du matériau selon cinq modalités.

Le Tableau 5.6 reprend les valeurs enregistrées pour chaque membrure, avec sa modalité correspondante, son taux d'humidité au moment de l'essai, sa densité, son module d'élasticité (MOE), la force maximale appliquée lors de l'essai, le déplacement mesuré et l'erreur moyenne associée aux sections idéalisées au fin bout et gros bout de la membrure. Les membrures ayant les plus grandes valeurs d'erreur d'about sont les membrures A11, A38, C22A, les autres étant relativement faibles.

Tableau 5.6 - Résultats de l'analyse du test de flexion. Pour chaque membrure est donnée la modalité, le taux d'humidité lors du test, la densité, le module d'élasticité (MOE), la force appliquée, la flèche et l'erreur moyenne des sections idéalisées d'about.

Id	Modalité	Taux d'humidité [%]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	MOE [GPa]	Force appliquée [kN]	Flèche [mm]	Erreur moyenne d'about [%]
A11	1	7,8	428,88	11,83	7,16	20,19	-9,88
B16	1	7,56	582,67	14,08	8,80	20,09	1,14
	<i>Moyenne</i>	<i>7,68</i>	<i>505,78</i>	<i>12,96</i>	<i>7,98</i>	<i>20,14</i>	<i>-4,37</i>
A22	2	7,29	459,16	12,31	6,64	20,07	4,59
B510	2	8	443,14	11,82	8,61	20,12	1,56
	<i>Moyenne</i>	<i>7,65</i>	<i>451,15</i>	<i>12,07</i>	<i>7,62</i>	<i>20,10</i>	<i>3,08</i>
A38	3	7,29	543,32	15,60	10,61	20,10	8,18
B33	3	8,35	545,9	12,85	8,50	20,07	3,30
	<i>Moyenne</i>	<i>7,82</i>	<i>544,61</i>	<i>14,23</i>	<i>9,55</i>	<i>20,09</i>	<i>5,74</i>
C22A	4	9,67	422,94	10,93	4,19	20,15	-10,39
C33B	4	8,39	480,39	12,20	4,86	20,10	2,93
	<i>Moyenne</i>	<i>9,03</i>	<i>451,67</i>	<i>11,57</i>	<i>4,52</i>	<i>20,13</i>	<i>-3,73</i>
D510B	5	7,63	495,38	12,03	6,25	20,38	-1,15
D55B	5	7,57	438,93	12,44	4,77	20,05	-5,13
	<i>Moyenne</i>	<i>7,60</i>	<i>467,16</i>	<i>12,24</i>	<i>5,51</i>	<i>20,22</i>	<i>-3,14</i>

Un boxplot des résultats de l'ANOVA de Welch sur la moyenne des MOE en fonction des modalités d'usinage des membrures est présenté à la Figure 5.8. Bien que les modalités 3 et 1 présentent des valeurs de MOE légèrement supérieures, le test indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités d'usinage des membrures.

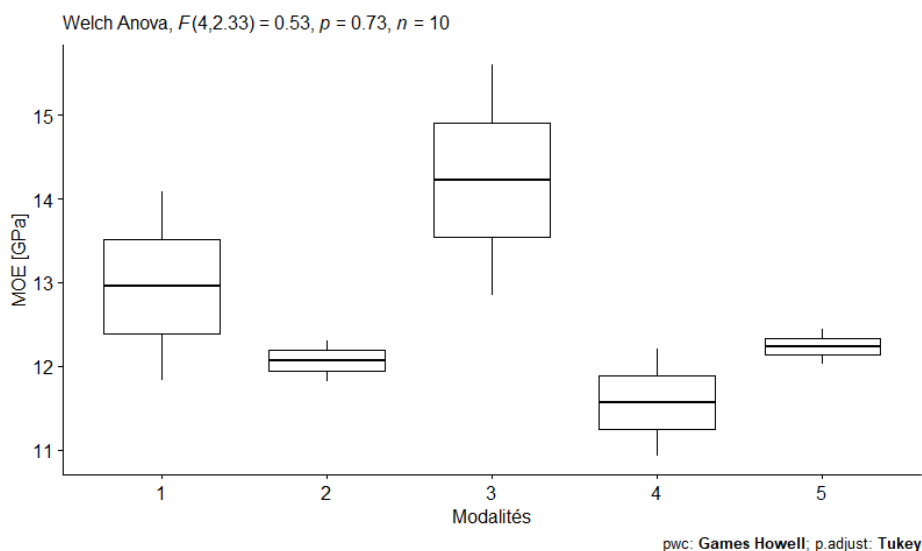


Figure 5.8 - Boxplots des MOE obtenus par le logiciel d'éléments finis selon les cinq modalités d'usinage des membrures. Les tests statistiques n'ont révélé aucun effet significatif des modalités sur le MOE. Les seuils de signification pour les facteurs modalité sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y a absence d'astérisque.

L'ANOVA sur le MOE en fonction du type de membrure indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les membrures simples ( $n=6$ ) et les demi-membrures ( $n=4$ ), avec des valeurs (moyenne  $\pm$  écart-type) de respectivement  $13,08 \pm 1,49$ MPa et  $11,9 \pm 0,67$ MPa.



## Impact d'une faible transformation sur le MOE

Les courbes charge - déplacement des membrures équarries deux ou quatre faces testées selon l'axe fort et faible sont compilées dans la Figure 5.9. Toutes les droites ont un coefficient de corrélation supérieur ou égal à 0,99.

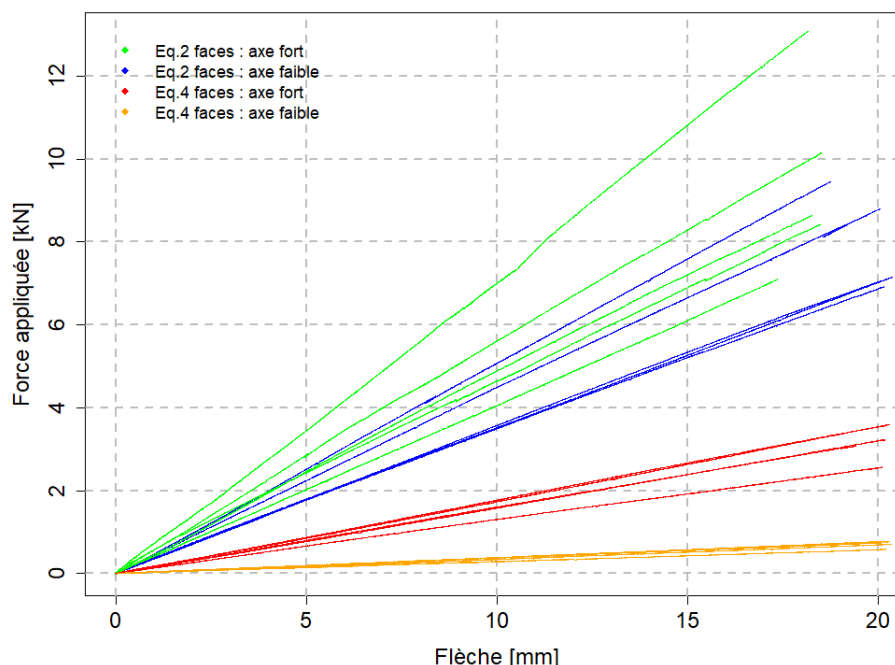


Figure 5.9 - Courbes contrainte - déformation sur des membrures équarries deux faces (Eq. 2 faces) et quatre faces (Eq. 4 faces). Celles-ci ont été testées en flexion sur leur axe fort et faible.

Le Tableau 5.7 présente la synthèse des résultats selon le type d'équarrissage ainsi que l'axe sollicité lors du test de flexion. Il reprend les valeurs moyennes du MOE, la force maximale appliquée et le déplacement associé. Le module d'élasticité le plus grand provient des billons sciés sur deux faces fléchis sur l'axe faible. Le MOE le plus faible provient des mêmes billons testés sur l'axe fort.

Tableau 5.7 - Résultats de l'analyse des tests de flexion des membrures équarries 2 et 4 faces selon leur axe fort et faible. Les valeurs indiquées sont les moyennes avec leur écart-type associé (n=5).

Équarrissage	Axe de flexion	MOE [GPa]	F app [kN]	Flèche [mm]
Deux faces	Faible	12,21 ± 1,31	7,88 ± 1,16	19,88 ± 0,65
	Fort	9,83 ± 1,28	9,47 ± 2,29	18,16 ± 0,47
Quatre faces	Faible	10,85 ± 1,29	0,73 ± 0,08	20,21 ± 0,12
	Fort	11,06 ± 1,43	3,21 ± 0,42	20,03 ± 0,35

Un boxplot du test statistique est présenté à la Figure 5.10. Une différence significative est observée entre le MOE des membrures équarries deux faces sollicitées en flexion sur l'axe fort et faible ( $p = 0,047$ ). Cette significativité augmente lorsque le test est réalisé uniquement entre ces deux modalités ( $p = 0,02$ ). Il n'y a pas de différence significative entre les MOE des bois équarris quatre faces selon l'axe faible et fort ( $p = 0,99$ ).

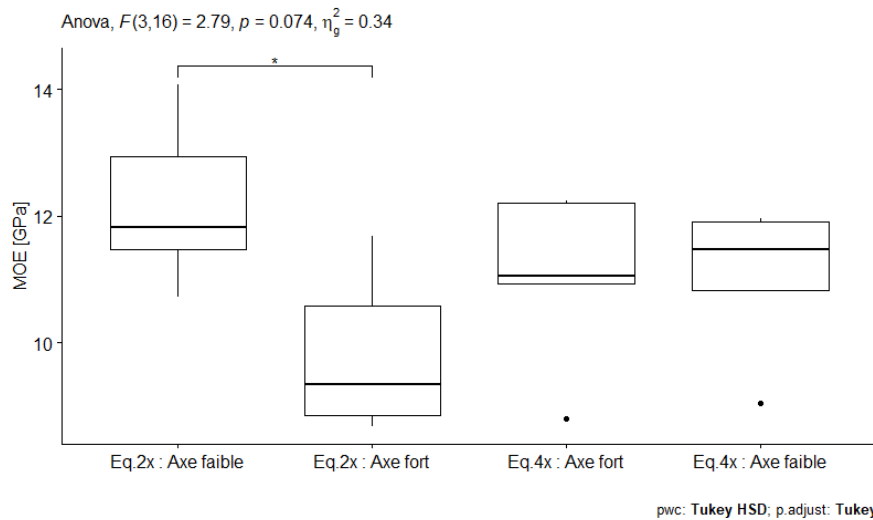


Figure 5.10 - Boxplot du MOE des membrures équarries deux faces (Eq. 2x) ou 4 faces (Eq. 4x) testés en flexion sur leur axe faible ou fort. Les seuils de signification pour les facteurs de modalité sont \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , \*\*\*\* $p < 0,0001$ . Lorsque le facteur est non significatif il y a absence d'astérisque.

### 5.2.3 Résistance à la compression

Un graphique charge – déformation du test de compression se trouve à la Figure 5.11. Ces courbes sont séparées en fonction de leur classe de diamètre initial (A, B et C-D) en Annexe F. Lors de la réalisation des éprouvettes, l'extrémité fin-bout du billon C33A n'avait pas les dimensions requises pour usiner un rectangle aux bonnes proportions pour le test de compression. Ce dernier a été écarté de l'expérience et 23 éprouvettes ont été testées. Toutes les éprouvettes ont présenté une phase semi-ductile avant rupture.

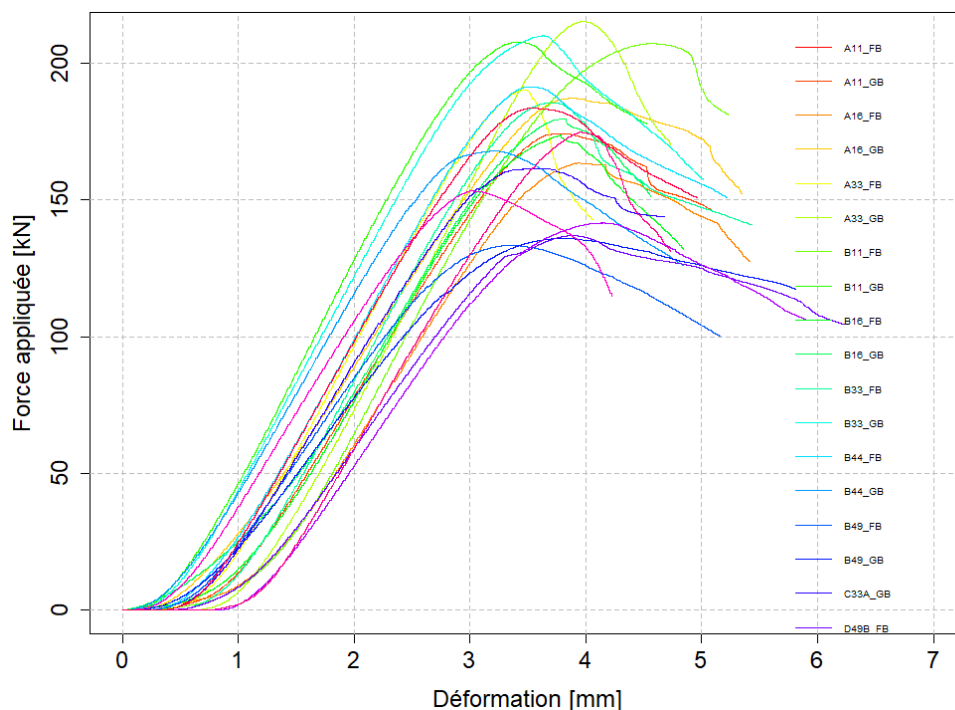


Figure 5.11 - Courbes contrainte – déformation des éprouvettes lors du test de résistance à la compression. La dimension des éprouvettes est 45x95x270mm.

Le Tableau 5.8 est la synthèse des résultats obtenus, avec la valeur moyenne obtenue par billon, et le nombre de répétitions associé (n). Un tableau avec les données brutes de tous les tests de

compression est présenté en Annexe G. La résistance à la compression axiale (moyenne  $\pm$  écart-type) est de  $39,99 \pm 5,80$  MPa, compris entre un minimum et maximum de respectivement 31,72 et 50,93 MPa. La déformation associée est comprise entre des valeurs allant de 3,02 à 4,56mm.

Tableau 5.8 - Synthèse des résultats du test de résistance à la compression, avec l'identifiant des éprouvettes (Id), le nombre de répétitions (n), la charge maximale appliquée, la déformation associée, le temps d'essai, la résistance à la compression  $f_{c,0}$ , le taux d'humidité au moment de l'essai et la densité des billons.

Id	n	Charge [kN]	Déformation [mm]	Temps [s]	$f_{c,0}$ [MPa]	Humidité [%]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
A11	2	155,03	3,79	277,98	36,05	7,80	428,88
A16	2	175,30	3,92	288,73	40,58	7,89	448,88
A33	2	202,64	3,72	269,08	47,22	7,46	491,71
B11	2	207,39	3,99	293,64	47,76	8,54	509,87
B16	2	176,63	3,81	281,30	40,47	7,56	582,67
B33	2	197,74	3,67	268,18	46,70	8,35	545,90
B44	2	179,57	3,37	247,66	41,17	9,32	486,87
B49	2	134,68	3,57	262,13	31,84	8,82	422,68
C33A	1	161,45	3,56	258,74	36,56	8,77	480,39
D49B	2	139,21	4,01	288,62	33,19	8,44	495,38
D55B	2	153,21	3,02	222,72	35,86	7,63	438,93
D510B	2	179,16	3,75	270,30	40,80	7,57	495,38

### 5.3 Rendement matière

Un graphique comparatif du rendement matière en fonction du diamètre du bois transformé faiblement ou conventionnellement est présenté à la Figure 5.12. A partir d'un diamètre gros bout de 15cm, deux demi-membrures peuvent être obtenues à partir d'une seule grume. Ce passage correspond à une augmentation nette du rendement lorsque le bois est équarri quatre faces (courbe bleue). A l'inverse, il représente une légère diminution d'environ 2% pour les bois équarris deux faces (courbe rouge). Le rendement au sciage (moyenne  $\pm$  écart-type) d'une faible transformation est de  $69,18 \pm 11,4\%$  contre  $35,10 \pm 7,9\%$  pour les bois sciés conventionnellement.

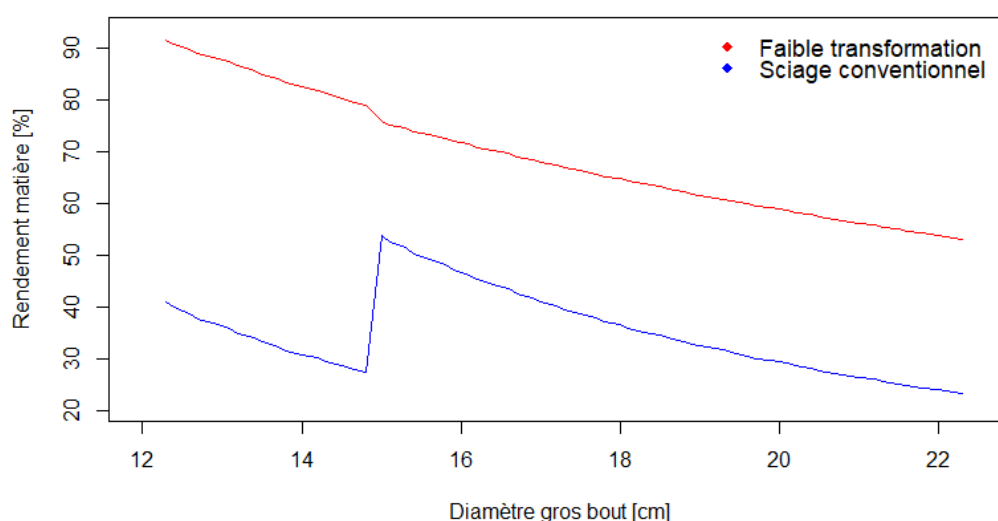


Figure 5.12 - Rendement matière théorique. Courbe rouge : Rendement d'une faible transformation du bois (équarrissage deux faces). Courbe bleue : rendement selon une transformation conventionnelle du bois (équarrissage quatre faces). Le rendement au sciage est déterminé pour des membrures de 235 cm de long et de section 45x95mm. La zone où la linéarité est interrompue chez les deux courbes correspond à la valorisation d'une grume en deux demi-membrures.

## 5.4 Prototype

Un démonstrateur à l'échelle 1 a été fabriqué selon le schéma présenté à la Figure 4.1. Etant donné qu'aucune différence significative du MOE par modalités n'a été déterminée, les membrures ont été sélectionnées de sorte à avoir une répartition équitable entre les membrures simples et les demi-membrures. Trois panneaux structurels ont été construits, constitué au total de six panneaux OSB 3 12mm de 122x244cm à bords droits fixés aux membrures avec des vis AGGLO PZ2 de 4,0x45mm placés tous les 20 cm en bordure du panneau et tous les 30 cm à l'intérieur du panneau [63]. Enfin, deux poutres SRN 50x95mm ont servi de lisse basse et haute pour obtenir une planéité du mur, assurer la liaison avec les diaphragmes horizontaux et homogénéiser la descente de charges.

Le démonstrateur a premièrement été assemblé sous sa forme de kit. Une lisse basse a été fixée à une dalle de CLT (*Cross Laminated Timber*), pour ensuite monter le mur. Des photos du processus de montage sont présentées à la Figure 5.13.

Le poids de chaque panneau est 61, 55 et 56 kg, pour un total de 172 kg. La variation du poids est due aux (demi-)membrures ayant une forme différente et donc un poids variable de quelques kilos. La répartition du poids entre l'ossature et les panneaux de contreventement (OSB) est de respectivement 48,2 et 123,8 kg.

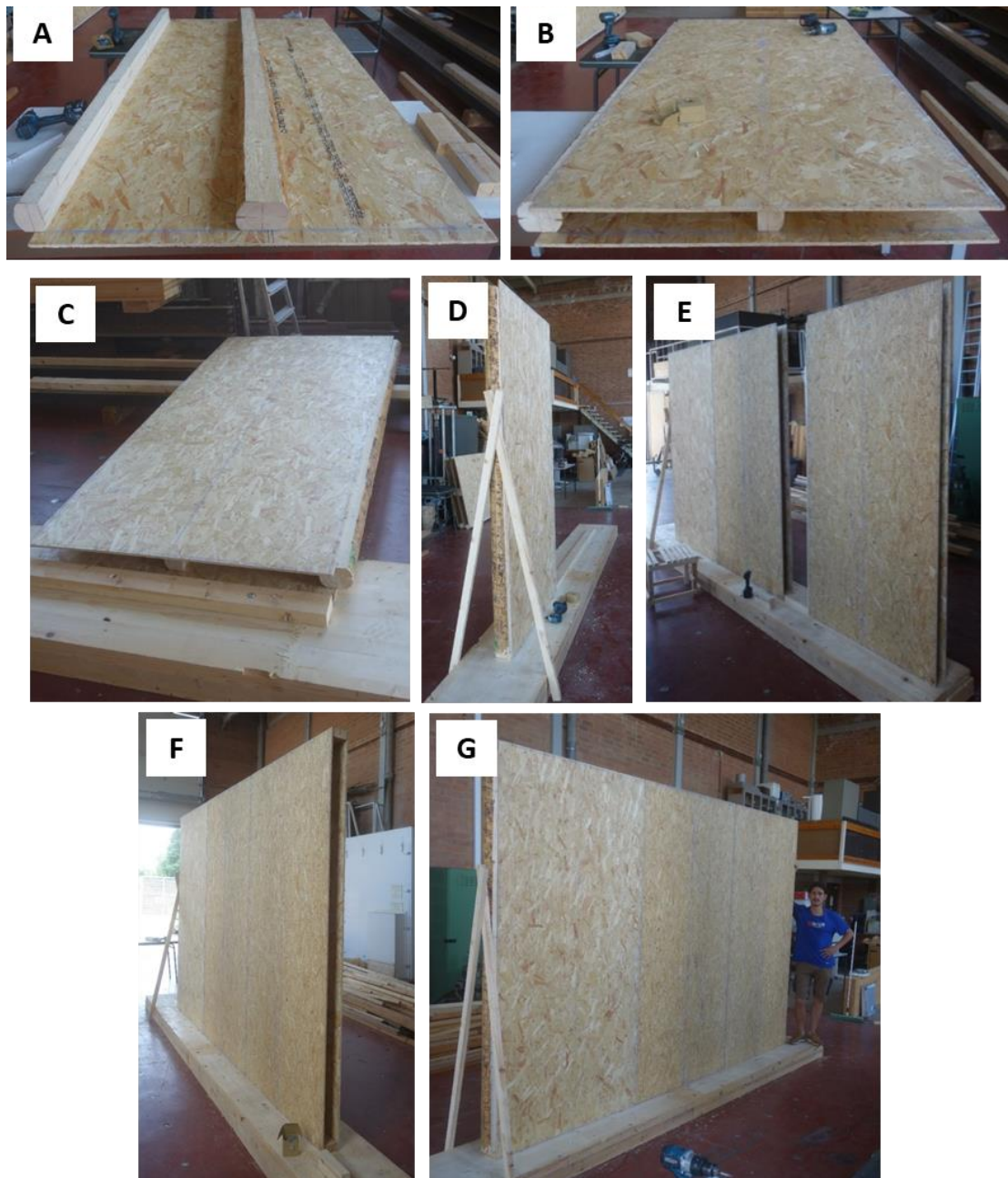


Figure 5.13 - Photos du démonstrateur. **A** : Fixation des montants au panneau avec une entraxe de 60 cm. **B** : Fixation du deuxième panneau de contreventement. **C** : Pose d'un panneau structurel (kit final) sur la lisse basse. **D** : Fixation du panneau structurel à la lisse basse après avoir été mis à niveau. **E** : Emboîtement du troisième module au panneau précédent. **F** : Fixation du troisième module et de la lisse haute. **G** : Vue d'ensemble du démonstrateur terminé.

## 6 | Discussion

Les calculs préliminaires pour estimer le retrait du bois lors du séchage ont permis d'aboutir à l'objectif souhaité, en passant d'une section de 47x97 mm à 45x95 mm après séchage. Cependant, le taux d'humidité atteint ( $8,7 \pm 0,9\%$ ) est conséquemment plus faible que celui recherché ( $17 \pm 2\%$ ), signifiant que l'équation 4.2 utilisée pour le dimensionnement du bois manque de précision, car le retrait aurait dû être supérieur. Cela s'explique par les coefficients du Tableau 4.1 adaptés au bois mature qui, en absence d'information concernant le bois juvénile, ont été utilisés. Les résultats sont en revanche cohérents vis-à-vis des particularités du bois juvénile, qui possède un retrait transversal moindre. Enfin, l'équation 4.2 semble plus rigoureuse que l'hypothèse de variation dimensionnelle de la norme EN 336 [88], où l'épaisseur et la largeur du bois résineux augmentent de 0,25% à chaque élévation de 1% de la teneur en humidité.

### 6.1 Qualité du séchage

#### PSF

La valeur moyenne du PSF obtenu (29,14%) concorde avec la structure anatomique du bois juvénile, possédant une paroi cellulaire plus mince [35] et un diamètre des lumens plus important [22], ce qui augmente la proportion d'eau libre dans les trachéides. La proportion initiale d'eau liée diminue, impliquant un PSF inférieur au bois mature, de 29% contre 33% respectivement.

La variabilité du PSF compris entre des valeurs minimum et maximum de respectivement 22,64% et 37,74% (Figure 5.1) et un écart-type de 4,21% ne semble pas corrélée aux paramètres tels que l'âge et le taux d'accroissement des individus. Pourtant, d'autres travaux ont remarqué une différence du PSF entre le bois de cœur et la périphérie d'une même section de bois [18]. L'absence d'effet significatif s'explique en partie du fait que les échantillons (i) avaient des épaisseurs très variables, comprises entre 2 et 4cm et (ii) étaient des quarts de cercle allant de la moelle jusqu'à la périphérie. Le nombre de cernes des échantillons était compris entre 14 et 46, incluant parfois une fraction importante de bois mature. La réalisation d'éprouvettes plus homogènes endéans les 20 premiers cernes de l'arbre fournirait probablement un résultat moins variable.

#### Fente de décharge

À la suite du séchage, un nombre important de billons ont eu une diminution de leurs fentes de cœur situées aux extrémités, mis à part pour les modalités 1 et 3 (Tableau 5.2). Souvent, ces fentes n'étaient plus visibles à cause du rétrécissement du bois. Cependant, des fentes de cœur sont régulièrement apparues à partir des fentes de décharges. Ces dernières n'ont pas été incluses dans les résultats initiaux car considérées comme étant artificiellement ajoutées. Or, comme l'indique la Figure 6.1, les fentes de décharge ont permis l'apparition d'une fente allant du cœur jusqu'à la périphérie de l'arbre. Si l'on tient compte de ces défauts, une grande partie de billons des modalités 2,3 et 5 auraient une classe de qualité D pour les fentes de cœur.



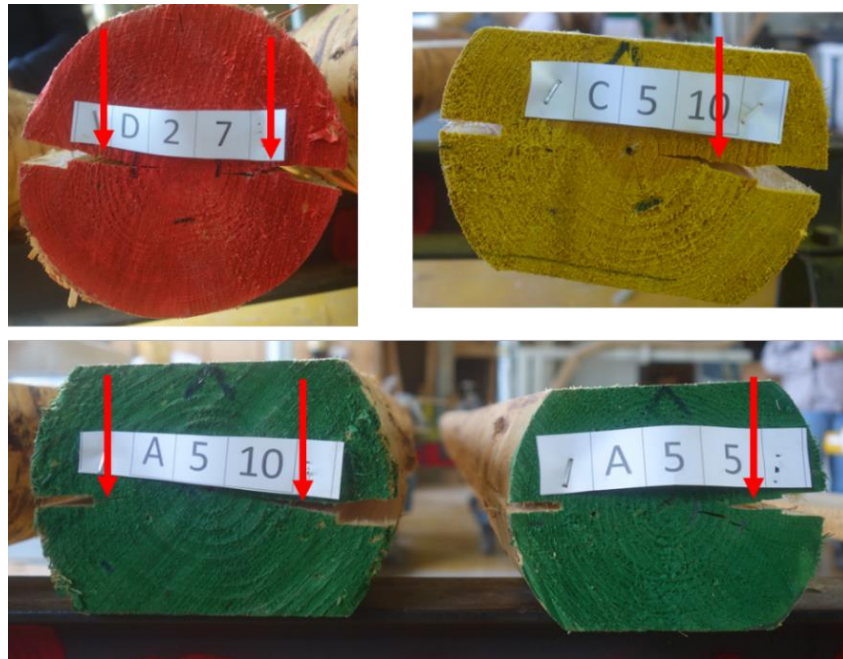


Figure 6.1 - Apparition d'une fente de cœur à partir des fentes de décharge après séchage (indiqué par la flèche rouge). Celle-ci atteint généralement la moelle.

Ces résultats sont à analyser avec prudence car le séchage a été significativement plus fort que celui souhaité, avec un taux d'humidité final bien inférieur (8,6%) à celui visé (17%). Or, la maîtrise de la teneur en eau dans le bois est primordiale pour éviter les désordres liés aux mouvements (retrait-gonflement) de ce dernier [70]. Selon l'étude de Vladimir et Anait [54], une différence de 5% du taux d'humidité final sous le PSF modifie significativement le niveau de fissuration. Ainsi, une différence supérieure à 8% entre l'humidité réelle et souhaitée de cette expérience pourrait être la cause de l'apparition des fentes de cœur à partir des fentes de décharges, car aucune étude n'a relevé cette tendance [53,54,81].

Cependant, l'effet significatif des fentes de décharge sur la réduction de la fissuration apparue en surface lors du séchage devrait être similaire, bien que moins prononcé, comme en témoignent les études précédentes [53,54]. En effet, les modalités 2 et 5 avec des doubles fentes de décharge ont les meilleurs résultats (Tableau 5.3) avec quelques fissures en surface d'une épaisseur de 3mm maximum. Ces dernières ont visiblement mieux libéré les contraintes qu'une simple fente de décharge (modalité 3) qui possède une longueur totale de fentes 10 et 9 fois supérieur que les modalités 2 et 5 respectivement.

En effet, une simple fente de décharge permet une libération locale des contraintes dans le bois lors du séchage. De la sorte, la majeure partie des fissures observées en surface des billons de la modalité 3 étaient généralement situées à l'opposé du trait de scie. De plus, le trait de scie unique s'agrandit significativement après le séchage, avec une ouverture parfois allant jusqu'à 20mm. Des ouvertures aussi importantes pourraient causer des problèmes pour l'assemblage des structures [89], en réduisant la force et la qualité des connexions [1].

## Équarrissage

Néanmoins, les résultats aux Figure 5.2 et Figure 5.4 indiquent qu'un trait de scie diminue de manière très hautement significative la fissuration en surface (\*\*\*) . L'équarrissage deux faces du bois sans fente de décharge (modalité 4) a également diminué significativement la fissuration (\*\*). Le sciage du bois permet de libérer des contraintes lors du processus de séchage, bien que de manière moins efficace car les surfaces sciées représentent des zones de faiblesses où apparaît la fissuration [18].

Quoi que les billons équarris deux faces avant séchage (modalités 4 et 5) aient présenté significativement moins de défauts que la modalité 1, leur traitement est certainement à l'origine du vrillage (ou twist) important des membrures justifiant leur déclassement à hauteur de 26% des billons (Tableau 5.4). Cela s'accorde avec les observations de Danborg [25], où des planches avivées de jeunes épicéas ont été fortement déclassées après séchage, notamment dû à une répartition hétérogène du bois juvénile au sein de la matière. Les traitements 4 et 5 sont a priori non recommandés pour le séchage. Cependant, comme énoncé plus tôt, l'humidité finale particulièrement faible est susceptible d'avoir amplifié cet effet.

### **Meilleur traitement**

Les résultats de ce travail semblent montrer que le bois rond muni de deux fentes de décharges est le traitement le plus approprié avant séchage. En effet, des traits de scie multiples libèrent les contraintes de manière plus homogène en surface du billon lors du séchage, bien qu'ils soient moins profonds. Le séchage du bois rond a l'avantage de répartir uniformément du bois juvénile sur 360°, provoquant une déformation moins importante. L'équarrissage ultérieur du bois rond permet également d'éliminer en partie l'apparition d'effets indésirables du séchage comme le vrillage. Cependant, cette technique demande de sécher un surplus de matière qui sera purgé lors d'une transformation post-séchage. Cela représente un coût supplémentaire à prendre en compte. Ce choix peut être d'autant plus délicat avec la hausse actuelle des prix de l'énergie en Europe [90,91].

## **6.2 Caractérisation structurelle**

### **Classement visuel**

Le classement visuel du bois selon la norme STS 04 [83] a rejeté l'utilisation de 25% du bois issu du séchage et 26,7% des membrures ont obtenu une classe de résistance limitée à C18 (Tableau 5.4). Enfin, l'usinage des membrures a généré également le rejet d'un certain nombre de membrures, car les surfaces de découverture étaient inférieures à 38mm, ce qui est la limite inférieure acceptée pour une utilisation en ossature bois [64,65,70]. Les membrures avec une surface de découverture située entre 38 et 45mm ne répondaient pas aux critères de départ, mais peuvent néanmoins être placées au centre d'un panneau [64,65,70].

Cependant, les causes de ce déclassement important sont à prendre avec précaution car la STS 04 s'applique normalement à des bois dont l'humidité est comprise entre 12 et 20% [83]. Le faible taux d'humidité atteint compris entre 7,29 et 9,67% est une cause importante du retrait conséquent du bois, exacerbant les défauts de séchage (point 6.1). De plus, le bois est susceptible de gonfler après sa mise en service jusqu'à atteindre l'humidité de mise en service recommandée ( $17 \pm 2\%$ ) [70,71]. Cela pourrait générer une instabilité dimensionnelle des membrures allant probablement au-delà des écarts admissibles par la norme EN 336 [88], avec une tolérance de  $-1/+3$  mm en classe 1.

### **Module d'élasticité**

Parmi les cinq géométries d'usinage des membrures, l'analyse statistique à la Figure 5.8 ne relève aucune différence significative des MOE. On distingue néanmoins la modalité 3 avec un MOE supérieur d'au moins 14% par rapport aux modalités 2, 4, 5 et seulement 9% par rapport à la modalité 1. Cela s'explique en partie par la densité moyenne plus élevée des billons appartenant à la modalité 3 ( $544 \text{ kg/m}^3$ ) suivie d'assez près par la modalité 1 ( $505 \text{ kg/m}^3$ ). En effet, il existe une corrélation positive entre la densité du matériau et ses propriétés mécaniques [18,22] où la variation du MOE en flexion serait expliquée à 80% par la densité du bois (Goodman ; Guitard et El Amri dans [22]).



Concernant le calcul de l'erreur moyenne d'about, celui-ci permet d'avoir une vérification grossière des résultats mais reste à titre purement indicatif car (i) l'erreur n'est valable que pour les sections de bout et (ii) le calcul de l'erreur manque de précision puisque la section « réelle » est une section idéalisée également. Il faut donc rester prudent avec les résultats obtenus pour les sections ayant un niveau d'erreur moyen élevé, tel que les échantillons A11 (-9,88%), A39 (8,18%) et C22A (-10,39%). Ainsi, pour une force et un déplacement fixés, une surestimation de l'inertie réelle dans la routine d'éléments finis diminue le MOE tandis qu'une sous-estimation a pour effet de l'augmenter (cf. équation 4.9).

## Rupture en flexion

Bien que la résistance à la flexion n'ait pas été déterminée, le type de rupture des quatre membrures communique des informations complémentaires pertinentes sur leur usinage. Dans les quatre tests réalisés, une rupture fragile est observée. Cela est dû aux faces sciées du bois qui diminuent sa rigidité notamment à cause de son comportement anisotrope et des nœuds qui introduisent des discontinuités locales des fibres [12]. Ces éléments provoquent une rupture dans le domaine élastique du matériau (fragile), affaiblissant sa résistance ultime [12]. Des essais destructifs en flexion sur l'axe fort des membrures auraient certainement permis d'observer une phase semi-ductile avant rupture [12]. La présence d'une fente de décharge dans la membrure A33 est certainement responsable de la rupture à l'effort tranchant décrit au Tableau 5.5. Cela est probablement dû à la discontinuité locale des fibres générée par ce trait de scie, diminuant sa résistance en flexion [53].

## Résistance à la compression

Les tests de compression n'ont pas été distingués selon la modalité ou la géométrie des membrures, étant donné que tous les échantillons étaient usinés à la même dimension. Les valeurs obtenues devraient néanmoins être représentatives du matériau faiblement transformé étant donné que l'interruption des fibres à cause du sciage n'a pas d'effet significatif sur sa valeur [58].

La rupture du matériau en compression s'est généralement caractérisée par une compaction plastique aux extrémités de l'éprouvette suivie la plupart du temps d'une bande de cisaillement. Bien que le schéma de rupture soit fortement influencé par la structure de l'éprouvette [18], cette dernière suivait généralement les nœuds dans le bois.

La résistance à la compression des échantillons est élevée, comprise entre 31,84 et 47,76 MPa, ce qui correspond à une classe de résistance C50 selon la norme EN 338 [84]. Ces valeurs s'expliquent en partie par un faible taux d'humidité, une densité élevée du matériau et des fibres quasiment parallèles à l'axe de compression qui impactent favorablement les performances mécaniques du bois [18]. Enfin, la microstructure du bois (nœuds, fentes, etc.) de chaque éprouvette est certainement responsable des variabilités observées entre les éprouvettes à la Figure 5.11 [18].

## Impact d'une faible transformation sur le MOE

L'absence de différence significative entre les membrures simples ou demi-membrures témoigne que les fibres continues n'impactent pas le MOE lorsque le bois est sollicité sur son axe faible. Ceci est confirmé par les résultats obtenus du bois équarri quatre faces, dont le MOE est très proche à celui du bois équarri deux faces (Tableau 5.7). Cela est cohérent car les fibres continues ne sont pas fortement sollicitées sur cet axe. La valeur du MOE légèrement supérieur du bois équarri deux faces (12,21 GPa) par rapport au bois équarris quatre faces (11,06 GPa) s'explique en partie par deux composantes non exclusives : (i) les efforts internes croissants partant de l'axe neutre à la périphérie auraient un impact bénéfique dans le cas d'une faible transformation et/ou (ii) l'erreur associée aux sections idéalisées aurait majoré les performances du bois équarré deux faces.

Une différence significative de presque 20% (2,38 GPa) est observée entre le MOE du bois équarri deux faces fléchi sur son axe faible et fort (Tableau 5.7). L'augmentation de la pente des courbes dans le domaine élastique du matériau à la Figure 5.9 serait donc majoritairement dû à l'effet de la géométrie des membrures, dont l'inertie est plus élevée sur l'axe fort.

Bien que la flexion sur l'axe fort sollicite au maximum les fibres continues, parfois constituées de bois mature, la diminution systématique du MOE atteste de l'effet d'autres paramètres non pris en compte au départ de l'expérience. Cette diminution sur l'axe fort s'expliquerait en partie par (i) une distribution différente des singularités du bois dans un sens ou dans l'autre et /ou (ii) la sollicitation combinée du bois mature et juvénile qui, dû à leurs caractéristiques intrinsèques différentes, impacterait négativement la transmission des contraintes au travers du matériau lors de l'application d'une charge. De plus, le faible taux d'humidité des membrures, compris entre 7,29 et 9,67% est susceptible d'avoir généré des contraintes internes importantes dans le matériau, notamment dû à des retraits volumétriques hétérogènes entre le bois mature et juvénile. Ces éléments influenceraient la capacité de transmission des contraintes à travers le matériau.

Une observation similaire est établie dans l'étude de Yeo et al. [53] où la résistance à la compression axiale des bois ronds est systématiquement supérieure lorsqu'ils ont une âme creuse purgée du bois juvénile. L'élimination du cœur offrirait donc une qualité globale plus uniforme du matériau. Cependant, cela est contradictoire aux interprétations de Lim et al. [2] où la performance en flexion des bois ronds augmentait avec le diamètre, allant de 10 à 18 cm, dû à une proportion décroissante du bois juvénile dans la section remplacée par du bois mature en périphérie de la circonférence. Le bois mature situé aux extrémités serait majoritairement sollicité, contribuant davantage aux charges supportées en flexion, ce qui augmenterait le MOE [2].

Enfin, la différence minime de 1,9% entre le MOE de l'axe fort et faible du bois équarri quatre faces témoigne quant à lui de l'homogénéisation du matériau ayant été purgé du bois mature en périphérie. La légère différence entre les valeurs est probablement causée par une distribution hétérogène des défauts dans le bois dans un sens ou dans l'autre.

## 6.3 Rendement matière

Le rendement matière théorique d'une faible transformation est nettement supérieur au rendement obtenu par l'équarrissage quatre faces du bois de faible diamètre, avec respectivement un rendement au sciage moyen de 69%, contre 35%. Le rendement minimum lors d'un sciage deux faces est 53,2% tandis qu'il est de 23% pour le sciage conventionnel. Cette faible transformation a l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre, car elle ne nécessite pas de nouvel outillage dans les scieries résineuses, qui sont généralement équipées de canters [92].

Ces résultats obtenus sont issus d'un artifice de calcul, ce qui demande généralement de passer par des approximations, causant alors des biais dans le résultat. Cependant, les trois éléments susceptibles d'avoir introduit un biais ont un niveau de gravité assez faible : (i) les sections transversales ont été définies comme parfaitement circulaires. Bien que les billons présentent parfois un méplat, cela reste occasionnel et le biais causé par ce proxy semble limité. (ii) Le défilement a été considéré constant. En Wallonie, sa valeur est généralement fixée à 0,64 cm/m [4], ce qui est relativement proche des valeurs observées dans l'étude (Tableau 5.1). Cette approximation ne devrait donc pas apporter d'erreur significative aux résultats. (iii) Le proxy le plus important est sans doute l'angle  $\Theta$  calculé à partir du rayon moyen du billon. Cet angle peut avoir une différence allant jusqu'à  $\pm 15\%$  avec les extrémités.

## 6.4 Performance des membrures

Il a été démontré qu'une faible transformation du bois n'améliore pas significativement le MOE des membrures, voire le diminue lorsqu'elles sont contraintes sur leur axe fort. Bien que l'expérience présente un faible nombre de répétitions, la valeur moyenne du MOE ainsi que la densité du bois est supérieure à celle trouvée dans la littérature, et ce malgré leur forte fraction de bois juvénile. La résistance à la compression moyenne est quant à elle inférieure à ces données. Cette comparaison est présentée au Tableau 6.1, où les données issues de l'expérience ont été ajustées conformément à la norme EN 384 [93] afin de calibrer les résultats à 12% d'humidité. Ainsi, le MOE a diminué de 0,52 GPa, la résistance à la compression de 4,63 MPa et la densité a augmenté de 9,85 kg/m<sup>3</sup>.

Tableau 6.1 - Comparaison des valeurs (moyenne  $\pm$  écart-type) des modules d'élasticité (MOE), résistance à la compression ( $f_{c,0}$ ) et densité du bois d'épicéa issues de l'expérience ajustés à 12% d'humidités selon la norme EN 384 [93]. Ces résultats sont comparés aux données provenant de la littérature.

Source	MOE [GPa]	$f_{c,0}$ [Mpa]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Expérience	12,09 $\pm$ 1,22	35,36 $\pm$ 5,10	494 $\pm$ 58
CIRAD [94]	11,9 $\pm$ 2,00	46 $\pm$ 16	450 $\pm$ 60
Hout Info Bois [95]	10	45	420
Niemz et al. [18]	10	40,2	470
C30 selon l'EN 338 [84]	12	24	460

La norme EN 384 [93] est adaptée pour calibrer les résultats du matériau bois dont l'humidité au moment de l'essai est de minimum 8%. Bien qu'elle soit très proche, l'humidité minimale rencontrée dans cette expérience est en dehors de la limite imposée par la norme (7,56%). Néanmoins, les résultats semblent à priori contradictoires aux études démontrant que les performances mécaniques du bois juvénile sont inférieures au bois mature, généralement réduites de 10 à 50% [37].

Les valeurs relativement élevées de l'expérience s'expliquent en partie par la qualité du matériel de départ. La grande majorité du bois d'éclaircie collecté avait une bonne rectitude, une moelle centrée, une pente de fil quasiment nulle, un faible taux d'accroissement (compris entre 1,4 et 4,6 mm/cerne), des diamètres de nœuds toujours inférieurs à 20mm, etc. Certains de ces paramètres ont pour effet d'influencer la densité du bois d'épicéa, capable de varier dans un intervalle de 355 à 519 kg/m<sup>3</sup> (cv 10,4%) [96]. La densité du bois est corrélée positivement à ses performances mécaniques [18]. De plus, le faible taux d'humidité a certainement impacté l'expression des performances mécaniques du bois car il est corrélé négativement à ces performances [18,97], et ferait varier certains paramètres de façon exponentielle [98]. Il est admis qu'une diminution de l'humidité de 1% augmente la résistance à la flexion d'environ 4% [18]. Neuhaus dans [18] a obtenu une valeur du MOE de l'épicéa de 16,23 GPa à 9,8% d'humidité.

Les résultats de cette expérience permettent de nuancer les études menées sur le bois juvénile qui en l'occurrence possède des propriétés parfois supérieures aux moyennes admises dans la littérature. Si l'on ne tient compte que des observations disponibles dans cette étude (MOE en flexion, résistance à la compression et densité), les membrures testées peuvent être admises à une classe de résistance C30 comme en témoigne le Tableau 6.1. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Melo Moura [22] qui met en évidence l'impact significatif de la vitesse de croissance sur le classement mécanique du bois, où un peuplement à croissance lente avec des qualités visuelles similaires à cette étude produit une proportion constante de bois d'une classe de résistance C30, pouvant aller jusqu'à 70% du bois récolté.

Enfin, le surplus matière maintenu par une faible transformation augmente la superficie de la section transversale du bois ce qui confère une meilleure rigidité au matériau. Ainsi, il a fallu

appliquer une force en moyenne 2,4 fois supérieure pour observer un déplacement vertical équivalent sur la poutre peu transformée par rapport à la poutre sciée sur quatre faces (Tableau 5.7). Ce gain peut jouer un rôle significatif dans l'utilisation des membrures en construction, notamment vis-à-vis des états limites ultimes et en service.

## 6.5 Prototype

Le prototype proposé demande un faible niveau d'outillage et pourrait aisément être préfabriqué en usine. En plus d'être un kit facilement transportable, les panneaux ont un poids relativement faible et leur assemblage est rapide. Ils peuvent être manipulable par deux personnes sur chantier. L'insertion d'ouvertures dans la paroi (porte, fenêtres, etc.) demande cependant d'avoir les deux types de membrures à disposition, afin de bénéficier d'une face plane pour l'insertion d'un châssis.

Le bois de faible diamètre pourrait occuper des niches en industrie selon leur qualité, et la mise sur le marché de ce matériau dans le secteur de la construction semble réaliste. Cependant, l'utilisation appropriée de cette ressource ne doit pas entrer en concurrence avec l'état actuel de la filière bois wallonne (industrie des panneaux et du bois de chauffage), mais plutôt devenir une valeur ajoutée.

## 6.6 Limites de l'étude

La qualité du matériel utilisé pour cette expérience ne prétend pas être représentative de la qualité générale observée en forêt Wallonne. En effet, les grumes collectées chez le fournisseur Philippe Cornet avaient une qualité irréprochable, et ont certainement été triées pour la commande.

L'écorçage mécanique des grumes a sévèrement abîmé l'état de surface des billons, amplifiant la difficulté de la qualification initiale, notamment pour le comptage des microfentes ( $< 1\text{mm}$ ) présentes avant et après séchage. De plus, la présence d'écorce parfois significative nuisait à une observation correcte des caractéristiques du bois. Ces éléments ont également rendu l'observation du fil tors difficile.

L'hétérogénéité de l'humidité initiale entre les bois a compliqué le dimensionnement préalable des membrures, car certains billons étaient proches du PSF tandis que d'autres étaient encore frais. De plus, cette variabilité peut poser des difficultés pour obtenir un séchage homogène de qualité [47,72].

Le test de flexion à trois points d'appui n'est pas indiqué dans la norme EN 408 [85]. Cependant, la méthode peut être considérée conforme à la norme car l'effet tranchant est faible et qu'il est présent dans tous les tests effectués, ce qui ne devrait pas changer les tendances observées.

Un faible nombre de répétitions des essais de flexion a été réalisé ( $n=10$ ). Néanmoins, une augmentation de l'effectif avec une qualité du bois similaire ne devrait pas changer les tendances observées. Ces tests de flexion sont également des charges instantanées uniques atteignant un déplacement-cible en  $300 \pm 120$  s. Ce modèle de test ne prend donc pas en compte l'effet de charges répétées ou la perte de résistance liée à l'âge.

## 6.7 Perspectives et améliorations

Cette étude semble préliminaire en Belgique. Elle offre l'opportunité d'approfondir ce domaine de recherche, que ça soit au niveau des connaissances ou dans ses voies de valorisation. De manière générale, des études à plus large échelle doivent être menées avec un nombre de répétitions plus important afin d'améliorer la fiabilité statistique des résultats.

Réaliser un échantillonnage représentatif du bois d'épicéa issu d'éclaircies semble primordial. En tenant compte de sa provenance et de son régime sylvicole, des informations fiables sur les propriétés mécaniques de l'espèce selon son origine pourraient être déterminées. Ceci doit s'étendre à d'autres espèces, comme les petits bois rouges (mélèze et douglas), dont la situation est particulièrement alarmante en Belgique [4].

Pour mieux prédire les mouvements du bois de faible diamètre d'épicéa commun lors du séchage, des recherches sur les coefficients spécifiques de retrait ou de gonflement radial et tangentiel doivent encore être réalisées. Avec l'utilisation d'un PSF adapté, une meilleure estimation des retraits dans le bois de faible diamètre pourrait être établie.

Des mesures de l'humidité pourraient être prises à la circonférence et au cœur du bois. Cela permettrait d'établir un profil d'humidité du bois sur sa section, car l'obtention d'une valeur uniforme au sein d'une grume s'est avérée difficile lors d'études ultérieures [56,99]. Ces éléments permettraient une meilleure analyse des étapes de séchage, pouvant mettre en lumière de nouvelles différences qui n'ont pas pu être observées entre les modalités de cette étude.

L'horaire de séchage du bois mériterait d'être repensé en appliquant l'abaque proposé par Ranta-Maunus [26]. Cependant, cet horaire doit être modifié afin de correspondre à une humidité finale avoisinant 17%.

La géométrie des membrures mériterait d'être réalisée par balayage 3D, avec des outils numériques récents comme la technologie LiDAR. Cela augmenterait considérablement la précision des calculs du MOE. Au plus les sections sont déterminées avec précision, au plus il serait possible de définir les paramètres clés qui impactent sa valeur lors des processus de transformation.

Enfin, de nouvelles voies de valorisation pourraient être pensées avec ce matériau, ainsi que la conception de nouveaux prototypes innovants qui exigeraient d'autres formes de conditionnement et/ou de mise en œuvre du bois. Par exemple, un système constructif comme l'ossature « balloon frame » offrirait l'opportunité de diminuer la transformation du bois en utilisant des membrures d'un seul tenant sur plusieurs étages.

## 7 | Conclusion

L'étude a confirmé le potentiel de valorisation du bois rond d'épicéa commun de faible diamètre en tant qu'élément structurel pour les murs en ossature bois. Avec une faible transformation, ce matériau a montré des performances mécaniques encourageantes, ce qui ouvre la voie à son utilisation dans des systèmes constructifs innovants. De plus, ce travail a mis en avant la qualité potentielle du bois d'éclaircie qui, avec des conditions de séchage adaptées, peut être valorisé à l'état massif en construction, même lorsqu'il est scié 4 faces, au détriment de son rendement au sciage.

Concernant le comportement au séchage, il a été démontré que le bois de faible diamètre présentait un PSF plus bas que le bois mature en raison de la structure anatomique spécifique du bois juvénile. Les résultats soulignent l'importance de mettre en œuvre des traitements appropriés avant séchage. Parmi les cinq modalités de préusinage, les fentes de décharge ont permis une réduction très hautement significative de la fissuration en surface (en nombre et en longueur totale de fentes). Cependant, elles ont été une voie d'accès pour l'apparition des fentes de cœur. Les bois équarris ont réduit la fissuration de manière hautement significative, mais ont été sujets à un déclassé important à cause du vrillage. La significativité des tests et la quantité de bois déclassé sont susceptibles d'être influencées par le taux d'humidité final très faible, ce qui met en évidence l'importance de maîtriser l'humidité pour éviter les fissures et les déformations. Le choix du traitement optimal, notamment l'utilisation de bois rond avec des fentes de décharge, se positionne comme une méthode prometteuse malgré les ajustements potentiels requis dans un processus industriel.

En ce qui concerne les performances mécaniques, les modalités de préusinage n'ont présenté aucune différence significative dans les valeurs du module d'élasticité (MOE). Cependant, les fentes de décharge sont susceptibles d'occasionner une rupture à l'effort tranchant, diminuant la résistance à la flexion. Les propriétés du bois de faible diamètre, contrairement aux attentes conventionnelles, peuvent parfois excéder les valeurs moyennes rapportées dans la littérature. Cela s'applique notamment au MOE, à la résistance à la compression et à la densité qui, considérées ensemble, ont atteint une classe de résistance C30. La faible transformation des membrures n'a pas eu d'effet sur ses qualités intrinsèques, mais a permis d'améliorer nettement sa rigidité. Enfin, le faible niveau d'humidité atteint et la qualité des grumes de l'expérience ont certainement impacté l'expression des résultats, mettant en évidence leur influence sur les performances structurelles du matériau bois.

En ce qui concerne le rendement, l'efficacité d'une faible transformation se démarque nettement par rapport à l'équarrissage traditionnel, avec un taux de rendement matière théorique significativement plus élevé. De plus, cette méthode présente l'avantage de pouvoir être intégrée dans les processus industriels existants sans nécessiter de changement majeur.

Le prototype proposé offre une alternative prometteuse pour la construction avec des éléments de bois de faible diamètre, les avantages sont la légèreté, la facilité d'assemblage et de manipulation. Le kit proposé peut également être préfabriqué et standardisé en usine, afin d'être assemblé sur chantier.

En guise de perspectives et d'améliorations, il est suggéré de mener des recherches plus approfondies sur le bois de faible diamètre, sur son comportement au séchage et ses performances mécaniques. Des études à plus grande échelle avec d'autres essences et des provenances variées pourraient améliorer la fiabilité statistique des résultats.

Dans l'ensemble, cette étude propose des avenues stimulantes pour l'industrie du bois, en ouvrant la voie à de nouvelles possibilités de valorisation du bois de faible diamètre dans certaines niches du domaine de la construction, tout en soulignant l'importance de sa caractérisation, du séchage contrôlé et de la recherche d'alternatives économiquement viables pour l'utilisation d'une ressource actuellement sous-valorisée. Une telle opportunité pourrait encourager des méthodes de sylviculture en faveur de la qualité des produits forestiers dès le départ, en assurant des débouchés rentables des produits d'éclaircies tout en bénéficiant la bonne santé des forêts et la production de bois d'œuvre de qualité.

# Contributions

Le design du prototype a été réalisé par l'étudiant, qui s'est inspiré de nombreuses sources et systèmes constructifs innovants. Des discussions entre l'étudiant et Benoît Jourez ont permis l'aboutissement final du produit.

Le protocole expérimental a été réalisé par l'étudiant, basé sur de nombreuses recherches dans la littérature.

L'utilisation des machines pour transformer le bois et préparer les échantillons a été réalisé par Benoît Jourez, Yannick Delzant et Hady Lahcen.

L'étudiant a réalisé les mesures nécessaires pour la détermination de l'humidité et la détermination du PSF.

L'étudiant, Hady Lahcen et Clémence Piette ont assuré les mesures pré- et post- séchage du bois

Les essais mécaniques ont été réalisés à l'université de Mons par Alessandro Randazzo et Michael Baele, personnel du département « Génie civil et Mécanique des Structures ».

La routine d'éléments finis a été réalisée avec l'aide de Arthur Duyck, doctorant de l'université de Mons.

Le traitement du jeu de données, leur interprétation et la comparaison avec d'autres études à été réalisé par l'étudiant.



# Bibliographie

1. Bukauskas A, Mayencourt P, Shepherd P, Sharma B, Mueller C, Walker P, et al. Whole timber construction: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. juill 2019;213:748-69.
2. Lim J, Oh JK, Yeo H, Lee JJ. Behavior of center-bored round timber beams in center-point bending test. *J Wood Sci*. oct 2013;59(5):389-95.
3. Wolfe R, Moseley C. Small-diameter log evaluation for value-added structural applications. *Forest Products Journal*. 2000;50(10):48-58.
4. Hébert J, Bailly F, Brunin E, Herman M, Jourez B. Valorsiation des petits bois rouges en région wallonne. *Forêt wallonne*. 2005;(75).
5. Underhill ID. The Development and Assessment of Engineered Wood Products Manufactured from Low Grade Eucalyptus Plantation Thinnings [Internet]. Queensland College of Art - Griffith University; 2017 [cité 30 juill 2023]. Disponible sur: <https://research-repository.griffith.edu.au/handle/10072/366340>
6. Claessens H. Sylviculture de l'épicéa commun. Gembloux Agro-Bio Tech; 2017.
7. Vega A, González L, Fernández I, González P. Grading and mechanical characterization of small-diameter round chestnut (*Castanea sativa* Mill.) timber from thinning operations. *Wood Material Science & Engineering*. 2019;14(2):81-7.
8. Erber G, Holzleitner F, Kastner M, Stampfer K. Effect of multi-tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood thinnings. *Silva Fennica*. 2015;50(1).
9. Fernández-Golfín JI, Diez Barra MR, Hermoso E, Mier R. Mechanical characterization of visually classified, small-diameter laricio pine round timber. *Span J Agric Res*. 2007;5(3):304.
10. Piqué M, Romà J. El rollizo torneado impregnado (RTI): una alternativa para rentabilizar claros y claras. *CIS-madera*. 2000;5:80-3.
11. Sallanon AL. Améliorer la productivité des premières éclaircies de pin maritime : valeurs ajoutées du système d'accumulation des tiges pour tête de bûcheronnage [Internet]. Institut Technologique FCBA; 2014. Disponible sur: <https://www.fcba.fr/ressources/fcba-info-ameliorer-la-productivite-des-premieres->

eclaircies-de-pin-maritime-valeurs-ajoutees-du-systeme-daccumulation-des-tiges-pour-tete-de-bucheronnage/

12. Sandoz JL. Form and treatment effects on conical roundwood tested in bending. *Wood Science and Technology*. 1991;25(3):203-14.
13. Ranta T, Karhunen A, Laihanen M. Factors behind the development of forest chips use and pricing in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 2017;98:243-51.
14. Wiedenbeck J, Scholl MS, Blankenhorn PR, Ray CD. Lumber Volume and Value Recovery from Small-Diameter Black Cherry, Sugar Maple, and Red Oak Logs. *BioResources*. 2016;12(1):853-70.
15. Hernandez R, Green DW, Kretschmann DE, Verrill SP. Improved utilization of small-diameter ponderosa pine in glued-laminated timber. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2005.
16. Bukauskas A. New structural systems in small-diameter round timber [PhD Thesis]. Massachusetts Institute of Technology; 2015.
17. Wolfe R, Murphy J. Strength of small-diameter round and tapered bending members. *Forest Products Society*. 2005;55(3):50-5.
18. Niemz P, Teischinger A, Sandberg D, éditeurs. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. 1<sup>re</sup> éd. Cham: Springer International Publishing; 2023. 2069 p. (Springer Handbooks).
19. Zobel BJ, Van Buijtenen JP. *Wood variation: its causes and control*. Springer Science & Business Media; 1989.
20. Polge H. Le bois juvénile des conifères. *Revue forestière française*. 1964;(6):474-505.
21. Wu G, Zhu E, Ren H, Zhong Y, Gong M. Application of small-diameter round timber as structural members in light frame construction. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2021;21(3):1029-39.
22. de Melo Moura JD. Utilisation en structures des résineux à faible densité: conséquences technologiques de scénarios sylvicoles extrêmes [PhD Thesis]. Université Henri Poincaré-Nancy; 1996.
23. Lowell EC, Green DW. Lumber recovery from small-diameter ponderosa pine from Flagstaff, Arizona. In: *Proc of conf on Ponderosa pine ecosystems restoration and conservation: Steps toward stewardship*. 2001. p. 161-5.

24. Bayatkashkoli A, Hemmati T. Effect of number of joints and layer arrangements in components on the mechanical strength of chairs made from small diameter poplar. *International wood products journal*. 2015;6(4):169-73.
25. Danborg F. Drying properties and visual grading of juvenile wood from fast grown *Picea abies* and *Picea sitchensis*. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1994;9(1-4):91-8.
26. Ranta-Maunus A. Round small-diameter timber for construction. Final report of project FAIR CT 95-0091. VTT Publications. 1999;95-0091.
27. OEWB. PanoraBois. Filière Bois Wallonie [Internet]. Office Economique Wallon du Bois; 2021. Disponible sur: <https://www.filiereboiswallonie.be/la-filiere/panorabois>
28. Lejeune P, Michez A, Perin J, Gilles A, Latte N, Ligot G, et al. L'épicéa wallon : état de la ressource en 2021. *Silva Belgica*. 2022;
29. Huet G. Valorisation du bois d'Épicéa de faible diamètre par la société Huet & Simon bois. [Internet]. 2023. Disponible sur: [https://mseduculiegebe-my.sharepoint.com/personal/diego\\_garcia\\_student\\_uliege\\_be/\\_layouts/15/stream.aspx?id=%2Fpersonal%2Fdiego%5Fgarcia%5Fstudent%5Fuliege%5Fbe%2FDocuments%2FEnregistrements%2FRdv%20pour%20discuter%20sur%20la%20valorisation%20du%20bois%20d%27%C3%A9pic%C3%A9a%20de%20faible%20diam%C3%A8tre%20en%20Belgique%2E%2D20230810%5F134208%2DENregistrement%20de%20la%20r%C3%A9union%2Emp4&referrer=Teams%2ETEAMS%2DELECTRON&referrerScenario=RecapOpenInStreamButton%2Eview%2Eview&ga=1](https://mseduculiegebe-my.sharepoint.com/personal/diego_garcia_student_uliege_be/_layouts/15/stream.aspx?id=%2Fpersonal%2Fdiego%5Fgarcia%5Fstudent%5Fuliege%5Fbe%2FDocuments%2FEnregistrements%2FRdv%20pour%20discuter%20sur%20la%20valorisation%20du%20bois%20d%27%C3%A9pic%C3%A9a%20de%20faible%20diam%C3%A8tre%20en%20Belgique%2E%2D20230810%5F134208%2DENregistrement%20de%20la%20r%C3%A9union%2Emp4&referrer=Teams%2ETEAMS%2DELECTRON&referrerScenario=RecapOpenInStreamButton%2Eview%2Eview&ga=1)
30. Fredriksson M, Bomark P, Broman O, Grönlund A. Using small diameter logs for cross-laminated timber production. *BioResources*. 2015;10(1):1477-86.
31. Burton R, Dickson M, Harris R. The use of roundwood thinnings in buildings—a case study. *Building Research & Information*. 1998;26(2):76-93.
32. LeVan-Green SL, Livingston J. Exploring the uses for small-diameter trees. *Forest products journal*. 2001;51(9):10-21.
33. Wolfe R. Research Challenges for Structural Use of Small-Diameter Round Timbers. *Forest Products Journal*. 2000;50(2).
34. Tettey UYA, Doodoo A, Gustavsson L. Effect of different frame materials on the primary energy use of a multi storey residential building in a life cycle perspective. *Energy and Buildings*. 2019;185:259-71.

35. Mvolo CS. Étude et modélisation de la variation de la qualité du bois basées sur les propriétés anatomiques, physiques et la croissance du bois chez l'épinette blanche (*Picea Glauca* (Moench) Voss) et le pin gris (*Pinus Banksiana* Lamb) [PhD Thesis]. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; 2015.
36. Zobel BJ, Sprague JR. Juvenile wood in forest trees. Springer Science & Business Media; 2012.
37. Kretschmann DE. Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA. 2010;
38. Woodward R, Zoli T. Two bridges built using black locust wood. In: Proceedings of the International Conference on Timber Bridges, Las Vegas, Nevada. 2013.
39. Green DW, Gorman TM, Evans JW, Murphy JF. Improved grading system for structural logs for log homes. Forest products journal. 2004;54(9):52-62.
40. EN 1927-1 : 2008. Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéa et Sapins. Bureau de normalisation (NBN); 2008.
41. EN 1316-1 : 2012. Bois ronds feuillus - Classement qualitatif - Partie 1 : Chêne et Hêtre. Bureau de normalisation (NBN); 2012.
42. Galligan WL, McDonald KA. Machine grading of lumber: practical concerns for lumber producers. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory ...; 2000.
43. Ross RJ. Static bending, transverse vibration, and longitudinal stress wave nondestructive evaluation methods. R Ross, Nondestructive evaluation of wood. 2015;5-20.
44. De Vries P, Gard WF. The development of a strength grading system for small diameter roundwood. Heron-English Edition. 1998;43:183-98.
45. Morgado TFM, Rodrigues J, Machado JS, Dias AMPG, Cruz H. Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles. Forest Products Journal. 2009;59(4):23-8.
46. Wang X, Ross RJ, McClellan M, Barbour RJ, Erickson JR, Forsman JW, et al. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. Wood and Fiber Science. 2001;33(4):522-33.

47. Bolmont D, Fouchard M. Le guide du bois et ses dérivés: l'arbre et la forêt, les propriétés, le séchage, la préservation. AFNOR éd.; 2010.
48. Sallenave P. Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'Union française. CTFT. 1955;
49. Park JH, Park Y, Han Y, Choi JW, Choi IG, Lee JJ, et al. Effect of Outer Surface Sealing Treatment on the Reduction of Surface Check Occurrence During the Drying of Center-Bored Round Timber. *Drying Technology*. 2014;32(2):236-43.
50. Huybers P. Timber Pole Space Frames. *International Journal of Space Structures*. 1987;2(2):77-86.
51. Jayanetti L. Timber pole construction. *Timber pole construction*. 1990;
52. Eckelman CA. Exploratory study of high-strength, low-cost through-bolt with cross-pipe and nut connections for square and roundwood timber frame construction. *Forest Products Journal*. 2004;54(12):29-37.
53. Yeo H, Eom CD, Smith WB, Shim KB, Han Y, Park JH, et al. Effects of center boring and kerf treatment on kiln-drying of larch square and round timbers. *Forest products journal*. 2007;57(11).
54. Vladimir G, Anait A. Prevention of round timber lateral cracking in wooden house construction. *Architecture and Engineering*. 2017;2(3):3-10.
55. Chabloz M, Dupraz PA. Forestry School in Lyss. *Structural Engineering International*. 2000;10(1):14-5.
56. Evans PD, Wingate-Hill R, Barry SC. The Effects of Different Kerfing and Center-Boring Treatments on the Checking of... *Forest products journal*. 2000;50(2).
57. Brunner M. On the plastic design of timber beams with a complex cross-section. *Proceedings of WCTE*. 2000;
58. Villasante A, Fernandez-Serrano A, Puigdomenech L, Lampurlanes J, Moliner D. Effect of a Longitudinal Cut on the Mechanical Properties of Small-Diameter Roundwood of *Pinus nigra* Arnold. *BioResources*. 2016;11(2):3587-97.
59. Cecobois. Guide technique sur la conception de bâtiments à ossature légère en bois. Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois; 2019.
60. Frenette C. Analyse multicritère des compositions de mur à ossature légère en bois [PhD Thesis]. Citeseer; 2009.

61. Kolb J. Bois: systèmes constructifs. PPUR Presses polytechniques; 2011.
62. Hout Info Bois. Dimensions des bois [Internet]. Hout Info Bois. [cité 7 août 2023]. Disponible sur: <https://www.houtinfo Bois.be/informations-techniques/materiaux/dimensions-des-bois/>
63. Skowron A, Parmentier B. Constructions à ossature en bois. 1e partie: contreventement des murs porteurs. Buildwise. 2011;
64. UNILIN. Manuel de construction - Panneau de particules structurel (P5) en construction à ossature bois. UNILIN; 2015.
65. Agepan. Panneau de contreventement - Fiche technique de mise en oeuvre. Agepan;
66. CBC. Facade ossature bois. Catalogue Bois Construction; 2022.
67. Briggs DG, Smith WR. Effects of silvicultural practices on wood properties of conifers: a review. Douglas fir: stand management for the future University of Washington Press, Seattle, WA. 1986;108-17.
68. Jozsa LA, Middleton GR. A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Forintek Canada Corporation Vancouver. 1994;(SP-34).
69. Savidge R. Intrinsic regulation of cambial growth. Journal of Plant Growth Regulation. 2001;20(1).
70. Moisse J. Cahier des Charges Type Bâtiments (CCTB). Superstructures. In 2022. Disponible sur: <https://batiments.wallonie.be/home/iframe-html.html>
71. De Poorter G. Spécifications techniques unifiées - STS 23.1: Construction en ossature bois. 2015.
72. Jourez B. Le séchage du bois. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech;
73. FCBA, IRABOIS. Fiches Produits Ouvrage Bois - Bois ronds structuraux. 2015.
74. NBN 225. Bois - Méthode d'essai de qualification. Bureau de normalisation (NBN); 1956.
75. EN 13183-1: 2002. Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1: Détermination par la méthode par dessiccation. Bureau de normalisation (NBN); 2002.

76. Picard N, Saint-André L, Henry M. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 2012;224.
77. Bigg PH. Density of water in SI units over the range 0-40 C. British Journal of Applied Physics. 1967;18(4):521.
78. Patterson JB, Morris EC. Measurement of absolute water density, 1 C to 40 C. Metrologia. 1994;31(4):277.
79. Tanaka M, Girard G, Davis R, Peuto A, Bignell N. Recommended table for the density of water between 0 C and 40 C based on recent experimental reports. Metrologia. 2001;38(4):301.
80. Sallenave P. Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux. Premier supplément. CTFT. 1964;
81. LCPC. Guide Technique : recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; 2008.
82. EN 1310: 1997. Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure des singularités. Bureau de normalisation (NBN); 1997.
83. STS 04. Bois et panneaux à base de bois - Spécification techniques unifiées. Service Public Walllon; 2008.
84. EN 338: 2016. Bois de structure - Classes de résistance. Bureau de normalisation (NBN); 2016.
85. EN 408+A1: 2012. Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. Bureau de normalisation (NBN); 2012.
86. Martin P. Les débits et rendements du bois - Fiche technique. Expertise Bois; 2021.
87. Weisstein EW. Circular segment. <https://mathworld.wolfram.com/>. 2002;
88. EN 336: 2013. Bois de structure - Dimensions, écarts admissibles. Bureau de normalisation (NBN); 2013.
89. Leroy M, Bossu J, Lehnebach R, Clair B. Valorisation des bois ronds de petit diamètre en construction en Guyane française. 2023;

90. Grekou C, Hache E, Lantz F, Massol O, Mignon V, Ragot L. Guerre en Ukraine: bouleversements et défis énergétiques en Europe. CEPIL, Policy Brief. 2022;(37).
91. Rüdinger A. Hausse des prix des énergies en Europe Quelles évolutions? Quelles explications? Et quelles conséquences pour les consommateurs et les politiques de transition écologique? 2021;
92. Jourez B. Sciage du bois. Gembloux Agro-Bio Tech;
93. EN 384: 2016+A2. Bois de structure - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique. Bureau de normalisation (NBN); 2022.
94. CIRAD. Épicéa. Centre de coopération Internationale en Recherche agronomique pour le Développement; 2012.
95. Hout Info Bois. Epicéa [Internet]. Hout Info Bois. [cité 9 août 2023]. Disponible sur: <https://www.houtinfo Bois.be/essences/epicea/>
96. Rijdsdijk JF, Laming PB. Physical and related properties of 145 timbers: information for practice. Springer Science & Business Media; 1994.
97. Tiemann HD. Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. US Department of Agriculture, Forest Service; 1906.
98. Wilson TRC. Strength-moisture Relations for Wood. U.S. Department of Agriculture; 1932. 96 p.
99. Green DW, Gorman TM, Evans JW, Murphy JF, Hatfield CA. Grading and properties of small-diameter Douglas-fir and ponderosa pine tapered logs. Forest Products Journal. 2008;58(11).



# Annexes

## A. Classement visuel qualitatif

Le Tableau A1 présente les différents paramètres observés avec la norme EN 1927-1 [40] avec les valeurs associées aux quatre classes de qualité. Les différentes classes de qualité sont : (i) A : Bois de première qualité. Il s'agit généralement d'une bille de pied sans nœud, sans altération avec des singularités ayant peu d'influences sur l'utilisation, (ii) B : Bois de qualité moyenne, ne pouvant répondre à une exigence particulière de bois sans nœud. Des nœuds sont admis dans une proportion telle qu'elle correspond à une moyenne pour chaque essence, (iii) C : Bois de faible qualité, autorisant toutes caractéristiques de qualité qui ne dégradent pas les caractéristiques naturelles du bois et (iv) D : bois sciable et utilisable qui, de par ses caractéristiques, ne correspond à aucune des classes de qualité A, B ou C.

Tableau A1 – Clé de classement visuel du bois rond d'épicéa selon la norme EN 1927-1

Caractéristiques	Classes			
	A	B	C	D
<b>noeuds</b>				
adhérents, sains	exclus <sup>a</sup>	≤ 4 cm	≤ 8 cm	permis
morts	exclus	≤ 3 cm	≤ 6 cm	permis
pourris	exclus	exclus	≤ 3 cm	permis
<b>Poche des résine</b>	exclue <sup>a</sup>	1 par section	permise	permise
<b>Taux de croissance</b>	≤ 4 mm	≤ 7 mm	sans limite	sans limite
<b>croissance</b>				
Fils tors	≤ 3 cm/m	≤ 7 cm/m	≤ 10 cm/m	sans limite
Cœur excentré	≤ 10 %	≤ 15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction <sup>b</sup>	exclu	≤ 10 %	≤ 33 %	sans limite
Courbure < 20 cm	pas d'exigence	≤ 1 cm/m	≤ 1,5 cm/m	≤ 3 cm/m
≥ 20 cm to < 35 cm	≤ 1 cm/m	≤ 1 cm/m	≤ 1,5 cm/m	≤ 3,5 cm/m
≥ 35 cm	≤ 1 cm/m	≤ 1,5 cm/m	≤ 2 cm/m	≤ 4,5 cm/m
décroissance <sup>c</sup> < 20 cm	pas d'exigence	≤ 1,25 cm/m	≤ 2 cm/m	sans limite
≥ 20 cm à < 35 cm	sans limite	≤ 1,5 cm/m	≤ 2,5 cm/m	sans limite
≥ 35 cm	sans limite	≤ 2 cm/m	≤ 4 cm/m	sans limite
<b>fentes</b>				
Fentes de cœur < 35 cm	exclues	exclues	≤ 1/2 Ø	permises
(exceptées fentes de retrait) <sup>c</sup> ≥ 35 cm	≤ 1/4 Ø	≤ 1/4 Ø	≤ 1/2 Ø	permises
roulures <sup>c</sup> < 35 cm	exclues	exclues	exclues	≤ 1/2 Ø
≥ 35 cm	exclues	≤ 1/4 Ø	≤ 1/3 Ø	≤ 1/2 Ø
<b>Attaques d'insectes</b>				
< 2 mm	exclues	exclues	exclues <sup>d</sup>	permises
(e.g. <i>Trypodendron lineatum</i> )				
≥ 2 mm	exclues	exclues	exclues	Petite attaque permise
(e.g. <i>Sirex</i> , <i>Cerambycidae</i> )				

« à suivre »

Caractéristiques	Classes			
	A	B	C	D
<b>échauffure</b>	exclue	exclue	Pour diamètre médian < 35 cm, permise en surface jusqu'à 10 % du diamètre médian Pour diamètre médian ≥ 35 cm permise en surface jusqu'à 20 % du diamètre médian	permise
<b>pourriture</b>	exclue	exclue	exclue <sup>e</sup>	permise <sup>f</sup>
<b>discoloration</b>	exclue	exclue	Permise dans la zone aubieuse <sup>g</sup>	permise
<p><sup>a</sup> En se référant à la description générale des classes de qualité</p> <p><sup>b</sup> méthode de mesure : largeur du bois de réaction par rapport au diamètre de la section (en complément de l'EN 1310).</p> <p><sup>c</sup> Diamètre médian sous écorce.</p> <p><sup>d</sup> premières étapes d'attaques de <i>Trypodendron lineatum</i> permises.</p> <p><sup>e</sup> petites zones de pourriture en surface sont permises dans l'empatement.</p> <p><sup>f</sup> pourvu qu'au moins 80 % de la section soient utilisables sur la longueur complète.</p> <p><sup>g</sup> des règles spécifiques contractuelles sont recommandées.</p>				

Ci-dessous le descriptif de chaque mesure réalisée, conforme aux méthodes de la norme EN 1310 [82].

**Nœuds** : Mesure le plus petit diamètre du nœud, en mm.

**Poche de résine** : Non mesuré, noter présence.

**Taux d'accroissement (mm)** : Mesurer (en mm) sur l'extrémité du billon les  $\frac{3}{4}$  extérieur du rayon. Compter le nombre de cernes le long de cette ligne. Diviser cette longueur par le nombre total de cernes.

**Fils tors** : Sélectionner sur surface de grume longueur de 1m avec la plus grande déviation du fil du bois. Mesurer la déviation par rapport à une ligne parallèle à l'axe de la pièce sur une distance de 1m (cm/m)

**Moelle excentrée** : Mesurer distance entre moelle et centre géométrique de section, exprimer résultat en % du diamètre total.

**Bois de réaction** : Mesurer la longueur ou la largeur du rectangle dans laquelle le bois de réaction est inscrit. Exprimer le résultat en % de la longueur/largeur

**Courbure** : Mesurer la distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondant sur les extrémités, exprimé en centimètres par mètres de longueur de grume.

**Décroissance (=défilement)** : Mesurer diamètre à chaque extrémité, faire la différence des diamètres en cm/m.

**Fentes** :

- De cœur : mesurer (en mm) à partir de moelle la longueur de fente visible sur face transversale
- Roulure : Mesurer diamètre (en mm) de cercle dont la roulure représente un arc

**Attaques d'insectes** : Mesurer diamètre du trou

**Echauffure** : Mesurer diamètre du cercle dans lequel l'échauffure s'inscrit, l'exprimer en % du diamètre de la section transversale où la mesure est effectuée.

**Pourriture** : Noter présence.

**Discoloration** : Noter présence.

## B. Calcul exact du rendement matière

Si  $\theta$  est variable selon la hauteur, on a l'équation B1.

$$\theta = 2 * \text{ArcCos} \left( \frac{95 / 2}{\left( r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{h_{\max}} \right) * h} \right) \quad (\text{B1})$$

En incorporant l'équation 9.1 à l'équation présentée pour le rendement on obtient l'équation B2.

$$V_{\text{dosse}} = \int_0^{h_{\max}} \left( r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{h_{\max}} * h \right)^2 * \frac{2 * \text{ArcCos} \left( \frac{95/2}{\left( r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{h_{\max}} \right) * h} \right) - \sin(2 * \text{ArcCos} \left( \frac{95/2}{\left( r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{h_{\max}} \right) * h} \right))}{2} dh \quad (2)$$

## C. Point de saturation des fibres de tous les échantillons

La Figure C1 présente les droites de régression obtenues pour les 39 membrures.

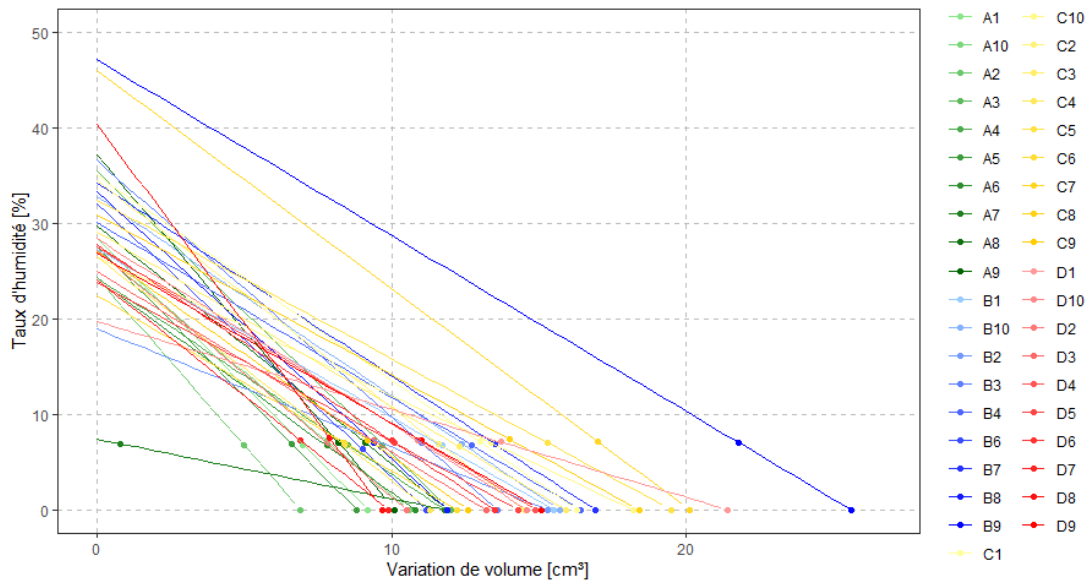


Figure C1 Graphique des droites de régression du taux d'humidité en fonction de la variation du volume des échantillons.

## D. Données brutes des mesures de la fissuration

Le Tableau D1 présente les données brutes des mesures de fissuration en fonction des classes de diamètre et de la modalité de préusilage du bois.

Tableau D1. Récapitulatif du comportement au séchage des billons ventilés selon leur classe de diamètre et leur traitement. Sont indiqués le nombre de répétitions, l'humidité initiale et finale du bois, le nombre total de fentes observées en moyenne par billon et la longueur totale des fentes observées en moyenne par billon.

Classe de diamètre	Modalité	Répétitions	Humidité initiale [%]	Humidité finale [%]	Nombre total de fentes en surface	Longueur totale des fentes [cm]
A	1	2	65,2	7,8	23	498,5
	2	2	88,8	7,4	1	12,3
	3	2	63,6	7,4	5,5	77,3
	4	2	48,6	9,7	17	385,3
	5	2	97,2	8,9	0	0,0
B	1	2	66,6	8,1	36	819,0
	2	2	85,5	7,4	0,5	14,0
	3	2	100,3	8,0	11,5	244,0
	4	2	80,5	9,1	11	318,8
	5	1	90,4	8,0	1	15,0
C	1	2	60,5	8,2	36	1041,0
	2	2	55,3	9,0	2	24,0
	3	2	102,1	12,3	4	121,0
	4	2	45,5	9,0	11	386,0
	5	2	75,8	7,9	0	0,0
D	1	2	115,7	8,5	23	654,8
	2	2	56,7	8,0	3	19,0
	3	2	73,6	10,5	6	269,3
	4	2	73,4	8,8	3,5	221,0
	5	2	43,7	7,5	4,5	61,3

## E. Essais de flexion des billons issus de la modalité 4

La Figure E1 présente les trois essais de flexion jusqu'à rupture des billons appartenant à la modalité 4.

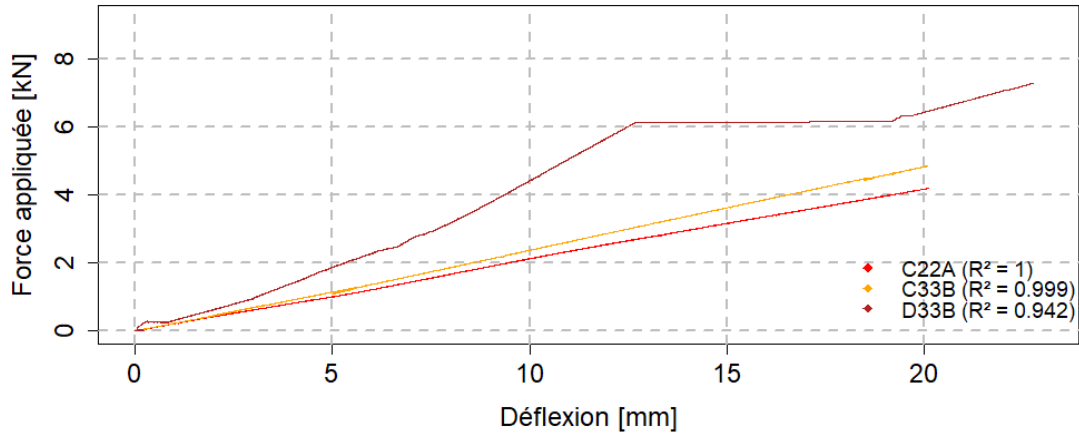


Figure E1. Essai de flexion des billons issus de la modalité 4.

## F. Courbes charge – déformation des tests de compression

Les Figures F1, F2 et F3 sont les courbes charge-déformation des tests de compression ventilés selon les classes de diamètres.

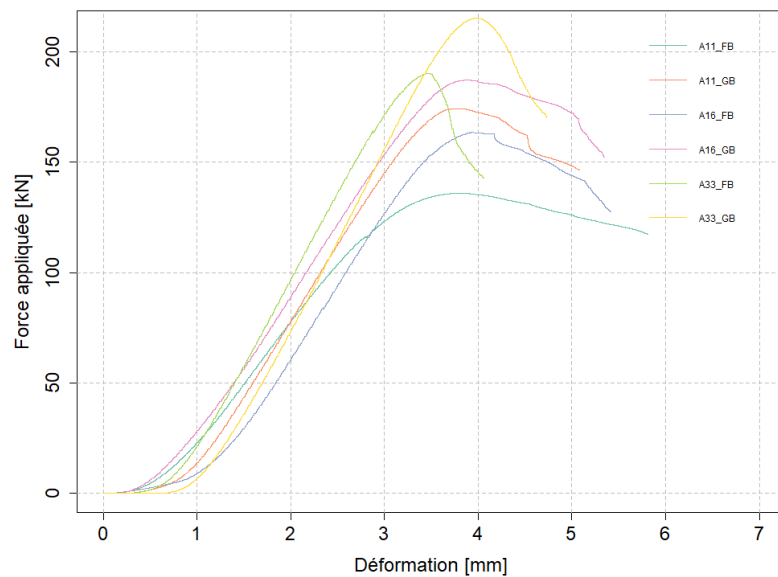


Figure F1. Courbe charge – déformation des éprouvettes de la classe de diamètre A lors du test de résistance à la compression. La dimension des éprouvettes est 45x95x270mm.

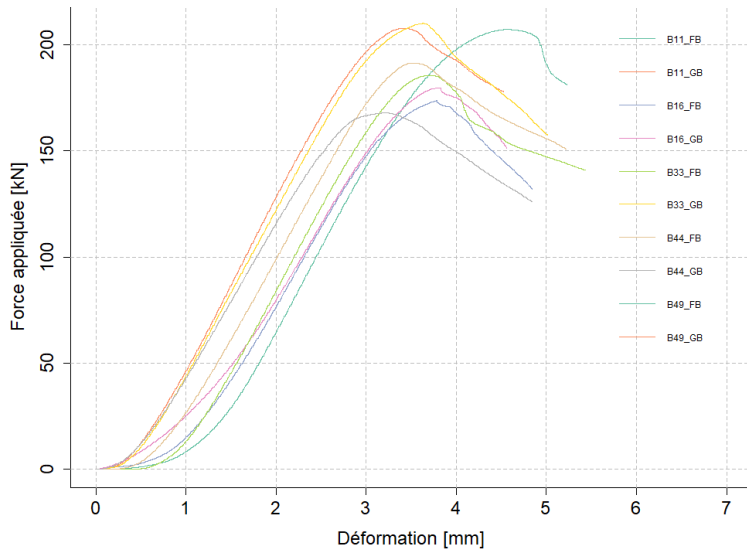


Figure F2. Courbe charge – déformation des éprouvettes de la classe de diamètre B lors du test de résistance à la compression. La dimension des éprouvettes est 45x95x270mm.

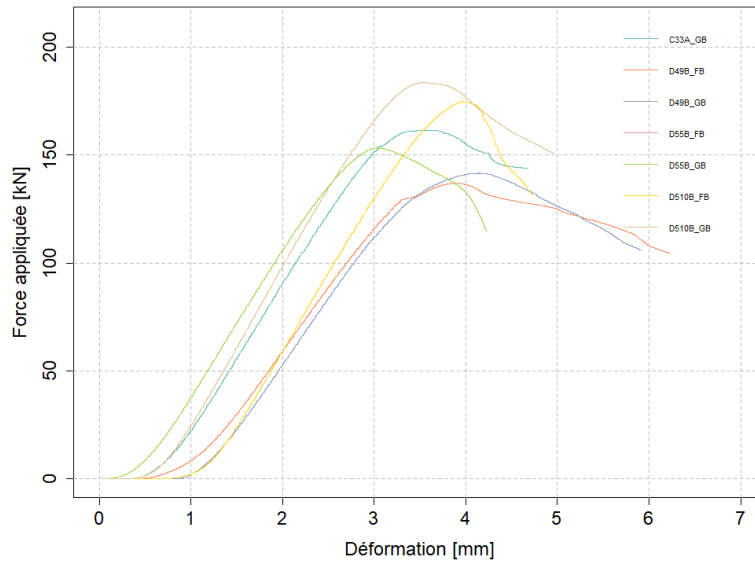


Figure F3. Courbe charge – déformation des éprouvettes de la classe de diamètre C et D lors du test de résistance à la compression. La dimension des éprouvettes est 45x95x270mm.

## G. Données brutes des tests de résistance à la compression

Le Tableau G1 reprend les données brutes obtenues lors des tests de compression.

Tableau G1. Données brutes des tests de compression. Avec l'identifiant (Id), la charge maximale appliquée, la déformation totale, le temps nécessaire pour atteindre la charge maximale, la résistance à la compression (f) et l'humidité au moment de l'essai

Id	Charge [kN]	Déformation [mm]	Temps [s]	f [MPa]	Humidité [%]
A11_FB	135,88	3,79	279,06	31,79	7,8
A11_GB	174,18	3,79	276,9	40,32	7,8
A16_FB	163,52	3,95	291,64	37,85	7,89
A16_GB	187,07	3,89	285,82	43,30	7,89
A33_FB	190,18	3,45	252,34	43,52	7,46
A33_GB	215,11	3,98	285,82	50,93	7,46
B11_FB	207,08	4,56	334,72	47,93	8,54
B11_GB	207,69	3,42	252,56	47,58	8,54
B16_FB	173,63	3,79	280,1	39,78	7,56
B16_GB	179,64	3,82	282,5	41,15	7,56
B33_FB	185,54	3,7	268,16	44,33	8,35
B33_GB	209,95	3,64	268,2	49,08	8,35
B44_FB	191,27	3,51	257,12	44,74	9,32
B44_GB	167,86	3,22	238,2	37,59	9,32
B49_FB	133,47	3,35	245,2	31,72	8,82
B49_GB	135,88	3,79	279,06	31,95	8,82
C33A_GB	161,45	3,56	258,74	36,56	8,77
D49B_FB	136,89	3,88	281,8	33,27	8,44
D49B_GB	141,53	4,14	295,44	33,11	8,44
D55B_FB	153,21	3,02	222,72	35,45	7,63
D55B_GB	153,21	3,02	222,72	36,27	7,63
D510B_FB	174,77	3,96	283,26	40,91	7,57
D510B_GB	183,55	3,54	257,34	40,69	7,57