

École polytechnique de Louvain

# Étude préliminaire portant sur l'aboutage de grumes de bouleau, à l'état vert et de faible diamètre

Auteurs : **Clémence PIETTE**

Promoteurs : **Hugues FRÈRE, Pierre LATTEUR**

Lecteurs : **Emmanuel DEFAYS, Justin GOOSSE, Sandra SOARES FRAZAO**

Année académique 2023–2024

Master [120] : ingénieur civil des constructions



# Abstract

Although small-diameter birch is a promising species in the face of climate change, it is currently mainly used in the paper industry. However, the growing demand for wood in the construction industry means that wood resources need to be optimised as much as possible, with as little processing as possible to keep costs down and promote competition.

Three trial campaigns were carried out on small-diameter birch logs (between 50 and 120 mm) to analyse the feasibility of finger-jointing small-diameter birch in the green state. Firstly, 15 bending tests were carried out on unfinger-jointed logs to analyse the bending strength of the birch. Then, 17 bending tests were further carried out on finger-jointed birch logs in the green state. Finally, 36 optimisation tests were also carried out on finger-jointed birch logs in the green state, with the aim of improving the test process and optimising finger-jointing process. The latter test campaign was carried out using a non-destructive test protocol developed as part of the ROBOTRONC project.

In the results of the first test campaign, the characteristic bending strength measured for small-diameter birch was 42.1 *MPa*. The characteristic strength obtained from the 17 tests on finger-jointed birches was 10.9 *MPa*, i.e. a quarter of the characteristic strength of the unfinger-jointed birch timber. For the latest test campaign, a number of improvements were made to ensure that the bending strength of finger-jointed logs approaches that of birch timber. Various factors were optimised, such as increasing the moisture content, the flexibility of the finger joints, the clamping devices and the alignment of the logs. These improvements led to better results, including a 5th percentile Ultimate Limit State strength of 10.7 *MPa*, which implies a higher characteristic breaking strength. Unfortunately, 23 out of 31 tests showed signs of weakness during non-destructive testing. Two clamping parameters during finger-jointing process were also analysed during this latest test campaign : time (5 minutes, 1 hour and 4 hours) and pressure (1, 5 and 8 *MPa*). 9 combinations were tested and the most optimal values were 1 hour and 4 hours of pressing time and 1 and 5 *MPa* of applied pressure.

Finally, although many improvements and optimisations remain to be made before manufacturing and industrial use can be envisaged, the results of this product are quite promising and really merit further explorations.



# Résumé

Le bouleau de faible diamètre, bien qu'étant une essence prometteuse face au changement climatique, est actuellement principalement valorisé dans l'industrie du papier. Or, la demande croissante présente dans la construction en bois pousse à optimiser le plus possible les ressources en bois tout en effectuant le moins de transformations pour limiter les coûts et favoriser la concurrence.

Trois campagnes d'essais ont été effectuées sur des billons de bouleau de faible diamètre (compris entre 50 et 120 mm) afin d'analyser la faisabilité de l'aboutage de bouleau de faible diamètre à l'état vert. Tout d'abord, 15 essais de flexion de billons non-aboutés ont été réalisés pour analyser la résistance en flexion du bouleau. Ensuite, 17 essais de flexion de billons aboutés à l'état vert ont été effectués. Finalement, 36 essais d'optimisation ont été réalisés également sur des billons de bouleau aboutés à l'état vert avec un objectif d'amélioration du procédé ainsi que d'optimisation de l'aboutage. Cette dernière campagne d'essais a été réalisée en utilisant un protocole d'essai non-destructif mis au point dans le cadre du projet ROBOTRONC.

Lors des résultats de la première campagne d'essais, la résistance caractéristique mesurée en flexion du bouleau de faible diamètre était de  $42,1 \text{ MPa}$ . La résistance caractéristique des 17 essais de billons aboutés obtenue est de  $10,9 \text{ MPa}$ , soit un quart de la résistance caractéristique du bouleau non-abouté. Pour la dernière campagne d'essais, plusieurs améliorations ont été apportées afin que la résistance en flexion de l'aboutage tende vers celle du bouleau. Différents facteurs tels que l'augmentation de la teneur en humidité, la souplesse des entures, le dispositif de serrage et l'alignement des billons ont été optimisés. Ces améliorations ont permis d'obtenir de meilleurs résultats avec notamment une résistance au 5<sup>e</sup> percentile à l'État Limite Ultime de  $10,7 \text{ MPa}$ , ce qui implique une résistance caractéristique à la rupture plus grande. Malheureusement, 23 essais sur 31 ont montré des signes de faiblesse lors des essais non-destructifs. Deux paramètres de serrage lors de l'aboutage ont également été analysés durant cette dernière campagne d'essais : le temps (5 minutes, 1 heure et 4 heures) et la pression (1, 5 et  $8 \text{ MPa}$ ). 9 combinaisons ont été testées et les valeurs les plus optimales sont 1 heure et 4 heures de durée de pressage et 1 ou  $5 \text{ MPa}$  de pression appliquée.

Finalement, même si de nombreuses améliorations et optimisations restent à effectuer avant d'envisager une fabrication et un usage industriel, les résultats de ce produit sont assez prometteurs et méritent réellement de plus amples explorations.



# Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mes promoteurs, Pierre Latteur, Professeur à l'UCLouvain, et Hugues Frère, directeur de Hout Info Bois. J'exprime ma plus sincère gratitude au Professeur Pierre Latteur pour m'avoir trouvé un sujet qui corresponde à mon intérêt pour le bois et mon envie de réaliser un mémoire sur cette thématique ainsi que pour son accompagnement tout au long de l'année et ses précieux conseils. Depuis ma 3e année de bachelier, il m'a permis de développer mes connaissances et mon intérêt sur le bois et sa passion pour celui-ci s'est avérée contagieuse. Merci de m'avoir donné l'occasion de travailler sur un sujet si passionnant. Merci à Hugues Frère pour sa bienveillance et ses remarques toujours très pertinentes et intéressantes. Il était particulièrement enrichissant d'avoir l'expertise d'un forestier durant toutes les étapes de mon mémoire et particulièrement d'un forestier aussi enthousiaste et passionnant. Je le remercie également pour ses nombreux commentaires lors de ses relectures.

Ensuite, j'aimerais remercier Justin Goosse pour tout le temps et l'énergie qu'il a consacrés à m'aider, particulièrement lors de la réflexion, de la conception et de l'analyse des essais au laboratoire, mais aussi lors de la relecture du mémoire. Sa vision pratique m'a permis de mener à bien tout ce projet et a été d'une aide si précieuse. Sa curiosité m'a motivée à aller toujours plus loin. Sa passion pour le bois m'a donné envie d'en savoir encore plus. Merci infiniment.

Merci à Emmanuel Defays et Vincent Defays pour leurs conseils grâce à leurs grandes connaissances et leur intérêt pour le bois et pour mon sujet. Leurs perceptions a été d'une grande richesse et ont soulevé des points cruciaux lors de cette recherche. Merci particulièrement à Emmanuel Defays d'avoir accepté d'être mon lecteur.

Merci également à la Professeure Sandra Soares-Frazao d'avoir accepté d'être ma lectrice. J'espère arriver à travers cet écrit à lui transmettre ma passion pour ce sujet, touchant aux enjeux environnementaux, un sujet qui nous rassemble.

J'aimerais aussi remercier le Professeur Régis Pommier et Jean-David Farre ayant travaillé sur la conception de la colle utilisée. Merci pour la colle ainsi que pour leurs conseils experts en termes d'aboutage du bois vert. Leur intérêt pour ce sujet a été une source de motivation.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de techniciens du LEMSC pour leur aide, leur bonne humeur et leur humour qui m'ont permis de rester positive malgré tous les soucis techniques rencontrés. Merci à Vincent pour les nombreuses heures à manger la poussière. Merci à Christophe et Antoine pour l'installation des différents protocoles. Merci à Justin et Noah pour leur disponibilité et leur aide quotidienne à régler mille et un soucis rencontrés. Merci à Stéphane, le bucheron, pour ses blagues et ses journées tardives me permettant de rester un peu plus longtemps au laboratoire.

Merci également à Catherine Doneux, la directrice du laboratoire de m'avoir permis de réaliser tous ses essais et merci pour sa gentillesse et sa bienveillance à mon égard.

J'aimerais aussi remercier Thibault Thyron, le garde forestier de l'UCLouvain, pour m'avoir permis d'aller couper du bouleau sur une parcelle. Merci également à l'entreprise Burgo qui a permis la livraison de grumes directement dans la cour du LEMSC.

---

J'aimerais remercier mes amis qui sont venus m'aider au laboratoire, Thibault Moriau et Léa Walgraffe. Leur aide a été d'une grande utilité, car je n'aurais pas pu m'en sortir seule avec des grumes si longues et si lourdes.

Je tiens aussi à remercier Benjamin Dardenne et Martin Petitjean pour les heures tardives au laboratoire me permettant de rester un peu plus tard ainsi que pour leur soutien.

Merci à mes parents pour leurs multiples relectures et leur support inconditionnel dans tous les moments de stress et où mon planning toujours trop chargé ne me permettait pas de tout faire sans leur aide.

Merci également à tous mes amis et mes proches pour leur support et leur patience à m'écouter parler de bouts de bois que je collais puis cassais, quelle idée... Merci particulièrement à Nathan pour son support moral et émotionnel, mais aussi à Pauline, Augustin, Emile, mon staff, mes cokotteurs, mes copains et copines de cours... Ils ont tous participé à faire de mes années universitaires une magnifique aventure.

# Avertissement sur l'utilisation de l'IA

Aucun LLM ou IA générative n'a été utilisé dans ce mémoire de master, à l'exception de ChatGPT pour la seule réalisation de codes Python pour l'interprétation de résultats.

Un outil de traduction et de correction grammaticale utilisant une IA non générative, à savoir DeepL, a été utilisé pour améliorer le niveau d'anglais de l'abstract.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I État de l'art</b>	<b>3</b>
<b>1 Le bouleau</b>	<b>4</b>
1.1 Gestion forestière durable	4
1.2 Distribution géographique en Europe	5
1.3 Sylviculture	6
1.4 Propriétés mécaniques et physiques	7
1.5 Bouleau de faible diamètre	8
1.5.1 Croissance et disponibilité	8
1.5.2 Utilisation	8
<b>2 Bois de faible diamètre dans la construction</b>	<b>10</b>
2.1 Historique	10
2.2 Exploitation	11
2.3 Propriétés mécaniques	11
2.4 Utilisation en structure	13
<b>3 Aboutage</b>	<b>15</b>
3.1 Aboutage à entures multiples	16
3.1.1 Géométrie des entures	16
3.1.2 Usinage	17
3.1.3 Collage	17
3.1.4 Modes de rupture	19
3.1.5 Résistance mécanique des aboutages	19
3.2 Aboutage du bois à l'état vert	19
3.2.1 Intérêt	20
3.2.2 Collage du bois à l'état vert	20
3.2.3 Colle	21
3.2.4 Résistance mécanique des aboutages de bois à l'état vert	22
<b>4 Caractérisation non-destructive de grumes</b>	<b>23</b>
4.1 Classement visuel	23
4.2 Méthodes mécaniques, électriques et dynamiques	24
4.3 Le proof-loading	24
<b>II Première campagne d'essais : 15 essais de résistance en flexion du bouleau</b>	<b>25</b>
<b>5 Matériel et méthode de la résistance en flexion du bouleau</b>	<b>26</b>

5.1	Grumes de bouleau . . . . .	26
5.2	Classement visuel . . . . .	27
5.3	Essai de flexion 4 points . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Résultats de la résistance en flexion du bouleau</b>	<b>30</b>
6.1	Classement visuel . . . . .	30
6.2	Essais mécaniques en flexion . . . . .	31
6.2.1	Résistance en flexion . . . . .	31
6.2.2	Module d'élasticité en flexion . . . . .	31
6.3	Conclusion . . . . .	33
<b>III</b>	<b>Deuxième campagne d'essais : 17 essais préliminaires d'aboutage de grumes reconstituées de bouleau de faible diamètre à l'état vert</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Matériel et méthodes des premiers essais d'aboutage</b>	<b>35</b>
7.1	Grumes de bouleau . . . . .	35
7.2	Classement visuel . . . . .	35
7.3	Groupes . . . . .	35
7.4	Aboutage . . . . .	36
7.4.1	Choix de l'aboutage . . . . .	36
7.4.2	Surfaces dégauchies . . . . .	36
7.4.3	Entures . . . . .	37
7.4.4	Colle . . . . .	38
7.4.5	Dispositif de serrage . . . . .	39
7.4.6	Paramètres de serrage . . . . .	39
7.5	Essais physiques et mécaniques . . . . .	40
7.5.1	Choix des essais . . . . .	40
7.5.2	Résistance en flexion . . . . .	41
7.5.3	Le module local d'élasticité en flexion . . . . .	41
7.5.4	Dispositif d'essais . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Résultats des premiers essais d'aboutage</b>	<b>44</b>
8.1	Classement visuel . . . . .	44
8.2	Aboutage . . . . .	44
8.2.1	Usinage des entures . . . . .	44
8.2.2	Collage . . . . .	46
8.3	Modes de rupture . . . . .	49
8.4	Essais mécaniques . . . . .	50
8.4.1	Résistance en flexion . . . . .	50
8.4.2	Module local d'élasticité en flexion . . . . .	52
8.5	Influence du classement visuel . . . . .	52
8.6	Esthétique . . . . .	52
8.7	Conclusion . . . . .	53
<b>9</b>	<b>Pistes d'amélioration</b>	<b>54</b>
9.1	Géométrie des entures . . . . .	54
9.2	Humidité . . . . .	54
9.3	Souplesse des entures . . . . .	55
9.4	Paramètres de serrage . . . . .	55
9.5	Dispositif de serrage . . . . .	56
9.6	Alignement . . . . .	56

<b>IV Troisième campagne d'essais : 36 essais d'aboutage de grumes reconstituées de bouleau de faible diamètre à l'état vert et optimisation du procédé</b>	<b>57</b>
<b>10 Adaptation du matériel et des méthodes pour les essais d'optimisation du procédé</b>	<b>58</b>
10.1 Grumes de bouleau . . . . .	58
10.2 Classement visuel . . . . .	58
10.3 Groupes . . . . .	58
10.4 Aboutage . . . . .	58
10.4.1 Usinage des entures . . . . .	58
10.4.2 Humidité . . . . .	59
10.4.3 Paramètres de serrage . . . . .	59
10.4.4 Dispositif de serrage . . . . .	60
10.5 Essais non-destructifs en flexion . . . . .	63
10.5.1 Protocole non-destructif . . . . .	63
10.5.2 Critères de rejet . . . . .	65
10.5.3 Orientation des entures . . . . .	67
10.5.4 Module local d'élasticité en flexion . . . . .	68
<b>11 Résultats de l'optimisation du procédé</b>	<b>69</b>
11.1 Classement visuel . . . . .	69
11.2 Aboutage . . . . .	69
11.2.1 Humidité . . . . .	69
11.2.2 Serrage . . . . .	70
11.3 Essais non-destructifs en flexion . . . . .	76
11.3.1 Critères de rejet . . . . .	76
11.3.2 Résistance en flexion . . . . .	80
11.3.3 Module local d'élasticité en flexion . . . . .	81
11.4 Influence des paramètres de serrage . . . . .	82
11.5 Influence du classement visuel . . . . .	83
11.6 Conclusion . . . . .	83
<b>V Discussion</b>	<b>84</b>
<b>12 Discussion</b>	<b>85</b>
12.1 Analyse des pistes d'amélioration appliquées . . . . .	85
12.1.1 Usinage . . . . .	85
12.1.2 Humidité . . . . .	86
12.1.3 Dispositif de serrage . . . . .	86
12.1.4 Paramètres de serrage . . . . .	87
12.1.5 Essais mécaniques . . . . .	88
12.2 Perspectives d'utilisation . . . . .	90
12.2.1 Plancher . . . . .	90
12.2.2 Analyse succincte des coûts . . . . .	92
12.3 Explorations futures . . . . .	92
12.3.1 Classement visuel . . . . .	92
12.3.2 Différents diamètres . . . . .	93
12.3.3 Comportement au séchage d'un aboutage de bois vert . . . . .	93
12.3.4 Durabilité des billons de bouleau . . . . .	94
12.3.5 Système vibratoire . . . . .	94
12.3.6 Exploration d'autres assemblages . . . . .	94
12.3.7 Industrialisation . . . . .	94

<b>Conclusion</b>	<b>96</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>98</b>
<b>Annexes</b>	<b>104</b>
<b>A Classement visuel</b>	<b>104</b>
A.1 Classement visuel de la campagne de 15 essais de résistance en flexion du bouleau . . . . .	104
A.2 Classement visuel de la campagne de 17 essais d'aboutage préliminaire . . . . .	106
A.3 Classement visuel de la campagne de 36 essais d'optimisation de l'aboutage . . . . .	108
<b>B Calcul du facteur 2.4375 pour le calcul de <math>F_{ELU}</math> dans les essais de flexion non-destructive</b>	<b>112</b>

# Introduction

Depuis le *Sommet de la Terre* de Rio de Janeiro en 1992, un mode de développement durable a été imposé par les participants qui ont décidé de reboiser la planète via la "Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement" [1, 2]. L'accent particulier mis sur le reboisement de la Terre se justifie par le fait que 90% de la biomasse se trouve dans les forêts et que ces dernières sont un vecteur important de la fixation du dioxyde de carbone atmosphérique [2, 3]. Suite à cette conférence, de nombreuses autres rencontres ont été organisées et de nombreuses conventions ont vu le jour. Parmi celles-ci, on retrouve le protocole de Kyoto en 1997, visant la réduction des gaz à effets de serre, qui comprend le dioxyde de carbone pour lequel les forêts jouent un rôle capital [4].

Dans les forêts gérées de manière durable, un nombre limité d'arbres sont prélevés de façon à ne pas perturber l'équilibre biologique. Dans ces forêts, le stockage de carbone est équilibré entre les arbres prélevés et ceux qui naissent et grandissent. Par conséquent, il n'est pas possible de stocker plus de dioxyde de carbone dans ces forêts. Le stockage doit se jouer via l'exploitation de la forêt, et par conséquent via l'utilisation du bois dans la construction qui permet le stockage du carbone [1, 2].

Bien que le bois ait toujours eu une place relativement importante dans la construction, une nette augmentation de la construction bois est notée en Europe depuis quelques dizaines d'années. Par exemple, les logements neufs en bois ont augmenté de 89% entre 2001 et 2005 en Région wallonne. De façon plus générale, en 2012, les Pays-Bas, l'Allemagne et la Wallonie possédaient un taux de construction neuve en bois de 7 à 10% [5]. En Belgique, en 2022, plus de 6% des bâtiments résidentiels neufs avec un seul logement ont été construits en bois. Entre 2011 et 2022, ces chiffres sont restés relativement constants, variant entre 6 et 12%. Ces chiffres montrent que l'intérêt pour la construction bois est relativement constant depuis une dizaine d'années et se maintient [6]. Cela n'est pas étonnant, car la construction est l'image de notre société. Avec la conscience environnementale grandissante, des matériaux ayant de meilleures propriétés écologiques et une plus grande durabilité sont de plus en plus demandés et le bois se trouve parmi eux [1].

Finalement, la construction en bois a énormément d'avenir en raison des propriétés écologiques de ce matériau que ce soit au niveau de sa production, de son stockage de carbone ou encore de sa renouvelabilité [1].

Actuellement, la construction en bois utilise en majorité des résineux en Wallonie. Par comparaison, les scieries de bois résineux consomment  $2\,500\,000\text{ m}^3$  par an alors que les scieries de bois feuillus ne consomment que  $72\,000\text{ m}^3$  par an, soit près de 34 fois moins. Pourtant, le prélèvement de résineux est supérieur à l'accroissement de la ressource résineuse, ce qui provoque sa diminution [6]. Pour limiter cet effet, il y a un grand intérêt à privilégier le feuillu au détriment du résineux. Une solution est d'utiliser du feuillu dans la construction. Cependant, cela implique des croissances moins droites ainsi qu'un rapport entre la masse volumique et les propriétés mécaniques plus élevées qui peut être plus compliqué à gérer.

Abouter du bois de bouleau pourrait être une solution à cette problématique, car l'aboutage permet d'extraire les longueurs les plus rectilignes et d'obtenir de grandes longueurs. De plus, le bouleau est une essence s'adaptant à divers climats, le rendant très prometteur face au changement climatique, qui touche de plus en plus nos régions [7]. Actuellement, le bouleau est également valorisé principalement dans l'industrie de la pâte à papier. Une utilisation en tant que bois de structure pourrait permettre une plus grande valorisation de cette ressource.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons décidé d'aboutir le bouleau sans l'équarrir dans un souci de moindre transformation d'une part pour limiter les coûts et d'autre part pour optimiser au maximum la matière. Un des problèmes de la construction en bois est son prix qui est trop élevé par rapport à son concurrent principal, le béton. Limiter les coûts permet donc de faire face à la concurrence.

Dans la première partie de ce travail, l'état de l'art, nous allons introduire certains concepts et techniques. Quatre chapitres présenteront respectivement le bouleau, le bois de faible diamètre dans la construction, l'aboutage et la caractérisation non-destructive de grumes. Ensuite, nous aborderons les trois campagnes d'essais.

La seconde partie du mémoire sera consacrée à la première campagne d'essais. Il s'agit des essais de flexion de billons de bouleau non-aboutés. L'objectif de cette partie est de déterminer la résistance en flexion de billons de bouleau de faible diamètre pour permettre la comparaison des résultats obtenus lors de l'aboutage de billons avec la résistance du bouleau. Le matériel, les méthodes et les résultats seront présentés.

La troisième partie abordera la deuxième campagne d'essais. Celle-ci consiste en une étude préliminaire composée de 17 essais en flexion de billons de bouleau aboutés à l'état vert. Le matériel, les méthodes et les résultats seront présentés.

La quatrième partie traitera de la troisième campagne d'essais, les essais d'optimisations, qui implique 36 essais de flexion non-destructive de billons de bouleau aboutés à l'état vert. Dans cette partie, le matériel et les méthodes utilisés lors de la deuxième campagne seront adaptés selon les résultats obtenus précédemment afin d'améliorer et d'optimiser le processus d'usinage et d'aboutage. Les résultats seront ensuite présentés.

Finalement, la cinquième partie sera consacrée aux comparaisons des résultats des trois campagnes d'essais et à la discussion.

Pour conclure cette introduction, l'objectif de ce mémoire est d'analyser la faisabilité d'aboutage de billons de bouleau à l'état vert de faible diamètre pour éventuellement pouvoir imaginer une utilisation de ce produit dans le domaine de construction en bois. Pour cela, une logique de moindre transformation sera appliquée afin de limiter les coûts et de pouvoir ainsi envisager de concurrencer le béton.

Première partie

État de l'art

# Chapitre 1

## Le bouleau

La gestion forestière actuelle se base essentiellement sur 5 essences d'arbres qui représentent 80% du volume de bois sur pied en Europe occidentale [8]. Ces 5 essences sont l'épicéa, le pin, le chêne, le hêtre et le douglas. En raison du contexte du changement climatique et de la crise de santé des forêts, ces essences sont plus facilement atteintes de pathologies diverses que par le passé. Il est par conséquent urgent de chercher à diversifier nos forêts.

Le bouleau ne fait pas partie des 5 essences majoritairement présentes en Europe occidentale même s'il y représente tout de même 0.5 à 15% du volume sur pied, en fonction du pays [8, 9]. C'est aussi l'essence feuillue la plus présente en Europe du Nord et de l'Est [9] et la plus abondante commercialement [8].

En complément de son abondance, cette essence présente d'assez bonnes propriétés physiques et mécaniques, comparables à celles du hêtre, ce qui est prometteur pour une plus grande utilisation dans la construction [9, 10]. Elle est actuellement utilisée en majeure partie dans l'industrie du papier ce qui la valorise peu par rapport à une potentielle utilisation en construction [10].

Bien qu'il existe plusieurs espèces de bouleau, ce travail va se centrer uniquement sur deux espèces : le bouleau pubescent (*Betula pubescens*) et le bouleau verruqueux (*Betula pendula*). La plupart du temps, ces deux espèces ne seront pas différenciées, car leurs propriétés mécaniques sont similaires et que leur identification est très complexe sans analyse de laboratoire à l'aide d'un microscope [7].

### 1.1 Gestion forestière durable

L'évolution des forêts tend vers une gestion plus durable, ce qui signifie que l'objectif est "*de s'assurer que les forêts fournissent des biens et services de façon à répondre aux besoins présents et futurs et qu'elles contribuent au développement viable des communautés*" [11]. Cette gestion prend en compte la diversité écologique, la productivité, la capacité de régénération et la vitalité des forêts et non plus uniquement la productivité comme cela a pu et cela peut encore être le cas dans certaines forêts [5]. Cette gestion permet de contribuer principalement à deux des objectifs de développement durable mis en place par les Nations Unies : "*l'eau propre et l'assainissement*" ainsi que "*la vie terrestre*" [11].

Afin de devenir plus durable, la gestion forestière, actuellement basée essentiellement sur 5 essences, nécessite de diversifier les essences présentes dans les forêts pour plusieurs raisons.

1. Il est intéressant, et inquiétant, de remarquer que le changement climatique et les problèmes sanitaires ont un impact important sur les 5 essences principales utilisées en Europe occidentale. Diversifier les essences permettrait de ne pas tout miser sur des essences qui ont déjà fait preuve de faiblesses [7]. Nous pouvons citer le hêtre, principal concurrent du bouleau [9, 12] et considéré comme une des essences les plus exposées aux changements climatiques. Le hêtre est en effet particulièrement sensible aux canicules et aux périodes

de sécheresse qui impliquent des périodes de stress hydrique et mènent à des pertes de vitalité [13, 14]. Jusqu'à présent, ces pertes de vitalité n'ont pas eu d'impact majeur sur la mortalité du hêtre. Cependant, cela pourrait, dans le futur, mener à des dépérissements et à la mortalité d'individus en grand nombre [14]. Selon les scénarios considérés, le hêtre verrait une diminution de sa surface forestière favorable entre 80 et 93% entre 2007 et 2100 [15]. Par ailleurs, pour l'épicéa, essence très représentée dans nos régions, la diminution serait de l'ordre de 92 à 99% [15] alors que cette essence est pourtant très représentée dans nos régions. Pour indication, elle représente 47% du volume de bois sur pied en Suisse et est une des essences majeures utilisées en construction [5]. Pour ces raisons, diversifier les essences serait plus sécuritaire d'un point de vue économique [7].

2. Varier les essences permet de diversifier les milieux et, par conséquent, les espèces y vivant en raison, entre autres, de la diversité lumineuse [7].
3. Les essences peuvent aussi s'entraider, car certaines essences peuvent avoir un effet d'abri en protégeant d'autres et ensemble, elles peuvent augmenter leur résilience sanitaire commune. En effet, lorsque les essences sont diversifiées, il est plus difficile pour les pathogènes de se propager et des régulateurs, qui vont permettre de conserver un équilibre écologique, peuvent plus probablement être présents [7].
4. Pour le moment, cette essence montre une bonne résilience aux changements climatiques, ce qui rend la perspective d'un développement encourageante pour le futur [7].
5. Le bouleau, au-delà d'être mélangé la plupart du temps avec d'autres essences et par conséquent de diversifier les forêts, contribue à la biodiversité ce qui est un élément clé d'une gestion forestière durable. Cette essence enrichit le sol grâce à la décomposition de ses feuilles et de ses racines mortes, ce qui améliore la porosité du sol ainsi que l'infiltration de l'eau dans celui-ci. De ce fait, il permet à beaucoup d'espèces de faune et de flore de s'installer. De plus, le bouleau laisse passer beaucoup de lumière à travers son feuillage, ce qui est bénéfique pour ces espèces [8].

Toutes ces raisons, motivant la diversification des essences pour une gestion forestière plus durable, incitent à développer la sylviculture d'essences du patrimoine boisé endémique de chaque région dont fait partie le bouleau en Wallonie [7].

## 1.2 Distribution géographique en Europe

Les bouleaux pubescents et verruqueux sont indigènes en Belgique et ont des aires de distribution assez similaires comme le montre la Figure 1.1.

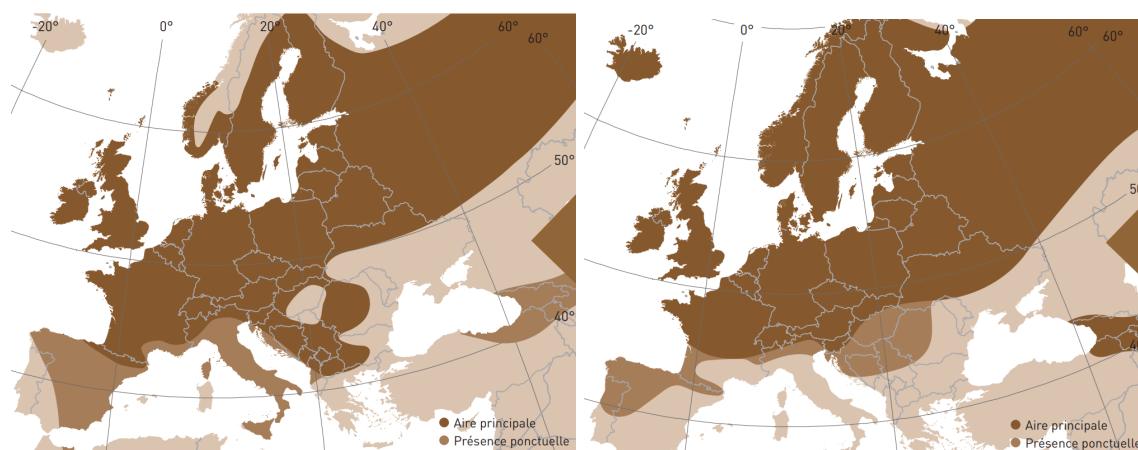


FIGURE 1.1 – Aire de distribution du bouleau verruqueux (à gauche) [16] et du bouleau pubescent (à droite) [9].

Les aires de distribution larges du bouleau, faisant partie des plus grandes représentativités parmi les essences forestières [7], montrent que le bouleau peut facilement s'adapter à des climats très différents. Le bouleau pubescent a particulièrement une très large amplitude écologique, ce qui lui permet d'être présent dans des milieux contraignants. Tous les deux ont aussi une grande résistance au froid et au gel [9, 16]. Leur bonne résistance à la sécheresse et aux feux de forêt est due à leur système racinaire en cœur très solide [8]. Avec le changement climatique, une adaptation à des climats divers peut être considérée comme un réel atout.

Le bouleau n'est cependant pas invincible et comporte des limites. Parmi celles-ci, il y a l'intolérance du bouleau pubescent au manque d'eau. C'est également une essence qui a une longévité limitée en raison du risque d'apparition de pourriture de cœur précoce. Le bouleau verruqueux est aussi très colonisateur, il faut donc le surveiller et se préparer à devoir intervenir pour maîtriser son développement [9, 16].

### 1.3 Sylviculture

Le bouleau est une essence pionnière, ce qui signifie que c'est souvent l'une des premières espèces à coloniser un terrain ayant subi une perturbation grâce, entre autres, à la capacité de ses graines à se déplacer sur des centaines de kilomètres [8, 17]. Ce qui explique son faible besoin de gestion forestière lors de l'implantation sur une surface. Le bouleau est issu de régénération naturelle sur 64% des surfaces qu'il occupe [17].

En Wallonie, la ressource du bouleau est promise à une augmentation en raison de plusieurs éléments. Premièrement, de plus en plus de parcelles sont délaissées après une mise à blanc ce qui donne de larges opportunités au bouleau pour s'implanter. Ensuite, les semis de bouleau sont abondants et vigoureux, ce qui leur permet de s'imposer face à d'autres essences. Finalement, cette essence se mélange facilement aux essences principales [17]. Le bouleau a cependant tendance à rendre sa propre reproduction inconfortable au vu des conditions lumineuses qu'il produit en grandissant. Par conséquent, il ne remplace généralement pas les espèces à long terme [8]. Ces éléments portent à croire que la ressource en bouleau va augmenter dans le futur et mettent en avant l'intérêt d'étudier cette essence.

Les bouleaux ne poussent pas en peuplement, par conséquent, il est plus difficile d'en couper des grosses quantités en une fois [10]. En effet, le bouleau est souvent minoritaire en surface terrière [12]. Cet aspect doit aussi être pris en compte dans l'étude de son utilisation en structure.

Actuellement, peu de techniques sylvicoles sont mises en place afin de permettre, après son implantation, une bonne gestion de la croissance du bouleau. Cela est dû en partie à la mauvaise image que le bouleau a jusqu'à présent, ainsi qu'à la méconnaissance de ses capacités et de ses besoins. Par exemple, certains pensent que comme il pousse sur des sites contraignants, c'est une essence non productive, ce qui n'est pas corrélé [8]. En contre-exemple, il faut savoir que le bouleau a été éradiqué de certaines parcelles les plus productives afin de favoriser des essences de production, et cela a contribué à sa mauvaise réputation [7]. De plus, le bouleau, principalement verruqueux, est particulièrement sensible au moment et à l'intensité des éclaircies. Cela rend par conséquent sa gestion plus complexe [18].

Dans son livre [7], Héroïse Dubois propose d'appliquer une sylviculture particulière afin de valoriser le bouleau. Elle explique notamment qu'en l'absence d'une sylviculture adaptée à son développement, l'accroissement de la circonférence du bouleau décline lorsque le peuplement atteint un âge entre 4 et 7 ans en raison de la compétition. Ce déclin est difficilement rattrapable dès que le bouleau atteint l'âge de 9 à 12 ans. Pour contrer ce déclin, l'élément clé, selon Dubois (2023), est l'éclaircie précoce afin d'atteindre les dimensions souhaitées rapidement et surtout avant la dégradation naturelle du bouleau [7].

## 1.4 Propriétés mécaniques et physiques

Les propriétés physiques et mécaniques du bouleau sont assez similaires à celles du hêtre [9, 12]. En particulier, la densité, le module d'élasticité, la contrainte de rupture en flexion statique et la dureté ont des valeurs assez proches [12].

En effet, selon Hout Info Bois (2012), les modules d'élasticité du hêtre et du bouleau sont respectivement de 13,5 et 14  $GPa$  [5]. Dubois (2022) énonce des valeurs autour de 14-15  $GPa$  pour le module d'élasticité du bouleau et autour de 16  $GPa$  pour celui du hêtre [12]. Verkasalo (2000) donne une valeur de module d'élasticité moyen du bouleau de 15.5  $GPa$  [10]. Ces valeurs, bien que légèrement différentes oscillent autour d'une moyenne de 14,5  $GPa$ .

Au niveau de la résistance moyenne en flexion, le hêtre se trouve à environ 113  $MPa$  et le bouleau est à 130  $MPa$  selon Hout Info Bois (2012) [5]. Dubois (2023) a mis en avant différents auteurs qui ont des valeurs différentes : 147, 114 et 100  $MPa$ , ce qui reste d'un ordre de grandeur similaire [7]. Pour la résistance moyenne à la traction, elle est de l'ordre de 135  $MPa$  alors que celle du hêtre est à 145  $MPa$  [5]. Verkasalo (2000) considère que la résistance moyenne à la traction du bouleau est de 137  $MPa$  et que c'est à cause de sa faible résistance à la traction que le bouleau n'est pas utilisé en structure [10].

Au niveau de la densité, le bouleau a une masse volumique de 660  $kg/m^3$  alors que le hêtre est à 700  $kg/m^3$  selon Hout Info Bois [5]. Selon Verkasalo (2000), la densité moyenne du bouleau est de 650  $kg/m^3$  en prenant en compte le bois juvénile près du coeur qui est le plus léger même si le bouleau est assez homogène en structure et en apparence [10].

Le bouleau est non durable, sa classe de durabilité est "V" [5], c'est-à-dire qu'il est considéré comme non-durable vis-à-vis des attaques de champignons basidiomycètes et des champignons à pourriture molle [19]. Par conséquent, il est recommandé de l'utiliser en classe d'emploi 1, c'est-à-dire à l'intérieur et au sec [20]. Cependant, le bouleau est considéré comme "imprégnable à peu imprégnable" [5], par conséquent, il est possible de lui conférer relativement facilement un traitement afin d'augmenter sa durabilité.

Almeida et al. (2006) ont mesuré le point de saturation des fibres (PSF) du bouleau à 31% [21]. Ce dernier est situé entre 22 et 35% selon les essences et correspond au stade où le bois ne contient plus d'eau libre, mais où les fibres sont encore saturées en eau liée [22]. L'eau liée est l'eau qui se situe dans les parois. Lorsque du bois est séché, l'eau liée s'évapore et mène à des déformations. De l'eau liée peut également être récupérée par le bois au cours de sa vie. Comme l'humidité du bois dépend de celle de l'humidité relative de l'air, ce phénomène se traduit par des gonflements. L'eau libre est l'eau qui remplit les cavités cellulaires. Afin d'éviter au maximum les variations dimensionnelles liées aux variations d'eau liée, des gammes de pourcentages d'humidité sont recommandées en fonction du type de mise en oeuvre. Par exemple, il est préconisé de mettre en oeuvre les parquets avec un taux d'humidité entre 8 et 12% et les menuiseries extérieures à un taux d'humidité situé entre 15 et 18% [5, 23].

Les variations dimensionnelles dépendent également du PSF. Le bois adapte son taux d'humidité en fonction des conditions de température et d'humidité ambiante pour tendre vers son équilibre hygroscopique. Quand cet équilibre se trouve en dessous du PSF, le bois subit des variations dimensionnelles. Par conséquent, plus le PSF d'un bois est haut, plus celui-ci sera sensible aux variations dimensionnelles [5].

Le Tableau 1.1 reprend les propriétés mécaniques et physiques du bouleau.

	Bouleau ( <i>Betula spp.</i> )	Hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> )
Module d'élasticité [ <i>GPa</i> ] [5, 10, 12]	14,5	13,5
Résistance moyenne en flexion [ <i>MPa</i> ] [5]	130	113
Masse volumique [ <i>kg/m<sup>3</sup></i> ] [5]	660	700
Classe de durabilité [5]	V	V
Imprégnabilité [5]	"imprégnable à peu imprégnable"	"imprégnable sauf le cœur rouge"
Stabilité dimensionnelle [5]	"Moyenne"	"Peu stable"

TABLEAU 1.1 – Propriétés mécaniques et physiques du bouleau et du hêtre

## 1.5 Bouleau de faible diamètre

Selon la littérature, les bois de faible diamètre correspondent à des bois d'un diamètre compris entre 7,5 et 22,5 cm [24]. Leur croissance, disponibilité et utilisations vont être analysées brièvement dans cette section.

### 1.5.1 Croissance et disponibilité

Le bouleau a tendance à croître d'environ un mètre par an durant les 10 à 12 premières années de sa vie. La croissance en circonférence entre 5 et 20 ans peut aller jusqu'à 2.5 à 4 cm par an en moyenne [7].

En Wallonie, 86% des bouleaux ont une circonférence inférieure à 60 cm, ce qui correspond à un diamètre moyen d'environ 19 cm, 7% des bouleaux ont une circonférence de plus de 120 cm, ce qui correspond à un diamètre de 38 cm, les 7% derniers ont par conséquent une circonférence entre 60 et 120 cm [12]. À titre d'indication, en Finlande, entre 3 et 18% d'un peuplement correspond à des bouleaux d'éclaircie de diamètre de minimum 11 cm et de longueurs entre 2.2 et 3.3 mètres [10].

### 1.5.2 Utilisation

En Finlande, l'utilisation traditionnelle du bouleau de faible dimension est le bois de chauffage. Dans les années 20's, il a commencé à être utilisé pour fabriquer de la pulpe pour le papier. Durant les années 80's, des essences tropicales ont commencé à concurrencer le bouleau avec des prix très bas, mais, suite aux enjeux environnementaux, cette tendance s'est essouffée. En Finlande, l'industrie de la pulpe de bois est maintenant une des plus grosses consommatrices de bouleau de faible diamètre [10]. Elle consomme, en effet, annuellement, plus de 10 millions de mètres cubes de pâte à bois [18].

Durant les années 90's, en Finlande et en Suède, une exploitation commerciale des bouleaux d'éclaircies a commencé afin de fournir de la matière aux industries de meubles qui utilisent des produits avec des noeuds sains. Cette industrie a ensuite été exportée dans des pays de l'Est et des produits similaires ont pu être fabriqués à l'aide de bouleaux non éclaircis même si certains aspects sont différents. Mais le sciage du bouleau de faible diamètre ne correspond seulement qu'à quelques pourcentages à peine des volumes de consommation de l'industrie du papier [18].

De plus, le sciage du bouleau est exigeant. Il comporte en effet des propriétés strictes, selon Verkasalo (2000), telles que le diamètre, la rectitude et la pourriture. Cependant des grumes assez courtes et de petits diamètres avec des noeuds sains peuvent parfois être acceptées dans certains sciages de bouleau finlandais. Par contre, ce n'est pas le cas des noeuds pourris et secs qui risquent de se détacher en séchant et de diminuer la résistance du bois [10]. Une étude réalisée par Kilpeläinen et al. (2011) indique un rendement moyen entre 10 et 20% sur le volume total du bouleau d'éclaircie pour un sciage. Kilpeläinen et al. (2011) remarquent que les défauts principaux pour le bouleau verruqueux sont les courbures multiples et simples et les ramifications. Pour le bouleau pubescent,

ils ont constaté que c'était plutôt les courbures dans les sections médianes des tiges [18].

L'utilisation du bouleau est similaire dans d'autres pays ayant aussi une ressource en bouleau comparable tels que la Suède, la Norvège et l'Estonie [18].

Actuellement, le bouleau d'éclaircie est une ressource sous-utilisée. Il y a cependant de l'espoir qu'en développant de nouvelles techniques et de nouveaux produits, ces grumes soient mieux valorisées [10]. Par exemple, d'autres essences qui ont des propriétés mécaniques et une qualité similaire, comme le pin sylvestre, sont plus utilisées en charpente, contrairement au bouleau dont l'utilisation en charpente reste particulièrement faible [10].

De plus, la superficie des peuplements de bouleaux qui doivent être éclaircis va augmenter encore durant les prochaines décennies, ce qui va augmenter la quantité de bouleaux d'éclaircie [18]. Cela donne une raison supplémentaire pour valoriser ces tiges.

## Chapitre 2

# Bois de faible diamètre dans la construction

Le bois de faible diamètre (compris entre 7,5 et 22,5 cm [24]) est encore peu utilisé dans la construction. Quand il l'est, la plupart du temps, il est au minimum fraisé, c'est-à-dire qu'on enlève l'écorce et une fine couche de bois afin d'obtenir une surface lisse. C'est ce qu'on appelle du bois rond. Peu de littérature est disponible à propos de l'utilisation en structure de bois de faible diamètre non fraisé.

### 2.1 Historique

Depuis la Préhistoire, l'Homme utilise des grumes de faible diamètre comme matériau de construction. Durant l'Antiquité, par exemple, de telles grumes étaient utilisées pour effectuer des fortifications romaines. Le critère principal recherché était la convenance de taille et de maniabilité, le critère des performances mécaniques étant plutôt un critère de second plan. Cette utilisation était possible grâce à l'abondance de ce matériau lié au faible volume de bois utilisé dans la construction [25].

Cependant, durant le 20<sup>e</sup> siècle, les changements dans l'industrie de la construction ont provoqué le déclin de l'utilisation de ce matériau coïncidant avec la révolution industrielle et avec, entre autres choses, le développement de l'acier dans la construction [2]. Mais, actuellement, avec la demande croissante de bois de construction et les changements dans la gestion forestière, son utilisation est revue. Il est dès lors devenu nécessaire d'optimiser tous les produits de la forêt [25].

Les arbres de petit diamètre sont un des produits actuellement peu valorisés. Pour pallier cela, une solution serait de promouvoir l'utilisation de ces grumes en tant que bois de structure [26, 27].

Malgré l'augmentation de l'utilisation des grumes, des craintes subsistent en Europe face à l'utilisation de bois rond de faible diamètre en construction, excepté dans les pays où une forte tradition de cette méthode de construction existe, comme l'Autriche ou la Finlande. Ces craintes sont basées sur plusieurs croyances [25] :

- le manque de stabilité dans la structure ;
- les connexions trop faibles ;
- les poteaux mal mis en œuvre moins durable ;
- les grandes déformations inhérentes qui ne sont pas acceptables.

En plus de ces craintes, plusieurs problématiques s'ajoutent à l'utilisation du bois rond de faible diamètre dans la construction [25, 26] :

- l'utilisation du bois rond n'est pas toujours à la hauteur de la compétition avec d'autres matériaux ;

- l'orientation des changements de philosophie d'architecture ne va pas toujours dans ce sens ;
- les entrepreneurs qui ne perçoivent pas la valeur ajoutée de cette ressource.

Malgré ces craintes et problématiques, l'utilisation de grumes de faible diamètre avec le moins de transformations possible reste une solution pour concurrencer le béton, car moins de transformations impliquent un prix plus faible. Il est actuellement nécessaire de trouver des solutions plus durables, mais moins chères, que le bois équarri par exemple, pour concurrencer le béton.

## 2.2 Exploitation

Une bonne gestion forestière génère des bois d'éclaircie en grand nombre. Une grande partie de ceux-ci se retrouvent généralement dans l'industrie de la pâte à papier. Un des problèmes principaux quant à l'utilisation de ces bois de faible diamètre en structure réside dans la sélection et le prélèvement en forêt de tiges de qualité suffisante pour cet usage. Ce prélèvement doit s'effectuer tout en conservant d'autres tiges à laisser croître pour obtenir des grumes de qualité dans le futur [25].

Wolfe (2000) affirme que la production de tiges de qualité doit s'accompagner d'une sylviculture adaptée. En effet, les propriétés mécaniques sont fortement influencées par la sylviculture. Par exemple, la densité et la conicité sont fortement corrélées à la résistance et à la rigidité du bois [26].

Selon Wolfe (2000), une tige de faible diamètre de qualité doit répondre à certains critères, tels que la rectitude, la pente du fil, la taille des nœuds ainsi que l'occurrence et la taille des défauts [26]. Alpo (1999) met en avant les critères de diamètre (maximum 3 cm) et de distance entre les nœuds (minimum 15 cm entre 2 nœuds) ainsi que l'absence de courbures, de cicatrices et de fissures [25].

Alpo (1999) a mis en avant deux méthodes d'exploitation pour pouvoir sélectionner des grumes à destination de la construction et des grumes à destination de la pâte à papier. La première consiste à sélectionner les grumes convenables selon les critères précédents sur le tas de grumes déjà coupées. C'est la méthode la moins chère, mais moins de 80% des grumes remplissent les critères de qualité requis. La deuxième méthode consiste à effectuer le tri lors de l'exploitation manuelle. Lors des éclaircies, les bûcherons vont sélectionner eux-mêmes les tiges de qualité qui peuvent être utilisées en construction et vont dès lors les couper de manière plus précautionneuse. Il s'agit de la meilleure méthode en prenant en compte le coût, le rendement et la sélection de qualité [25].

## 2.3 Propriétés mécaniques

Les bois ronds de faible diamètre ont de meilleures capacités de charge que les bois équarris pouvant être obtenus à partir du même élément comme ils permettent une meilleure optimisation de la matière. Selon Wolfe (2000), cette différence de capacité de charge est de l'ordre de 5, c'est-à-dire que le bois non-équarri est 5 fois plus résistant en traction, en compression, en flexion et en cisaillement que le bois équarri inscrit dans le bois non-équarri. Cela est un chiffre surprenant que cet auteur explique par la dépendance des propriétés mécaniques à la section des bois ainsi qu'aux fibres qui sont coupées, dans le cas de bois équarris, ce qui les empêche de transmettre efficacement les charges. Ce dernier phénomène peut être expliqué par la discontinuité de la surface des fibres du bois, plus particulièrement autour des nœuds [26]. Celui-ci pourrait avoir d'autant plus d'importance que le bois est dense en raison de la plus grande quantité de fibres par unité de surface, mais cette hypothèse est encore à vérifier [28].

Selon Alpo (1999), plusieurs effets pouvant s'opposer jouent sur la résistance de bois de faible diamètre :

- la résistance plus grande d'une grume de faible diamètre que la résistance du bois équarri inscrit dans cette grume ;
- la théorie de Weibull selon laquelle les petites sections ont une résistance plus élevée que les grandes. Selon cette théorie utilisée en résistance des matériaux, les grandes sections ont moins de probabilités d'avoir

beaucoup de défauts que les petites sections. Cela diminue les probabilités des petites sections d'atteindre la rupture comparées aux grandes ;

- le bois de faible diamètre comporte beaucoup de bois juvénile et de nœuds qui peuvent être de grande taille, ce qui peut avoir un impact négatif sur la résistance du bois.

Dans son étude, Alpo (1999) a constaté que, dans le cas de résistance à la flexion et en compression, ce sont les deux premiers effets énoncés qui dominent, c'est-à-dire celui lié à l'optimisation de la matière et celui provenant de la théorie de Weibull. Les valeurs de résistance en flexion et en compression des bois ronds de faible diamètre sont plus grandes que celles obtenues avec des bois sciés d'une section correspondante au carré inscrit dans la section ronde. Ces résultats sont illustrés à la Figure 2.1 sous forme d'une distribution cumulative de la résistance en flexion d'épicéa rond et d'épicéa scié[25].

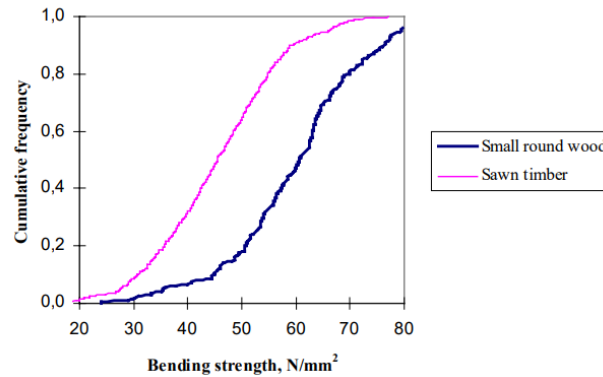


FIGURE 2.1 – Distribution cumulative de la résistance en flexion d'épicéa rond et scié basée sur 600 spécimens de bois scié et 200 spécimens de bois rond en Finlande.

Cependant, en analysant les résultats de cet article et en les comparant aux valeurs moyennes de résistance en flexion et en compression obtenues par Hout Info Bois, on constate que les résistances en flexion et en compression obtenues par Alpo (1999) pour des bois ronds de faible diamètre sont nettement plus faibles que les valeurs données par Hout Info Bois [5, 25]. Les valeurs sont données en comparaison dans le tableau 2.1.

	Alpo (1999)	Hout Info Bois
Résistance moyenne en flexion du douglas, $f_{m,moy,douglas}$	52 MPa	85 MPa
Résistance moyenne en compression du douglas, $f_{c,0,douglas}$	33 MPa	55 MPa
Résistance moyenne en flexion du mélèze, $f_{m,moy,mélèze}$	78.3 MPa	93 MPa
Résistance moyenne en compression du mélèze, $f_{c,0,mélèze}$	41.4 MPa	53 MPa
Résistance moyenne en flexion du pin sylvestre, $f_{m,moy,pin\ sylvestre}$ (Finlande/Royaume-Uni)	50.3/53.8 MPa	90 MPa
Résistance moyenne en compression du pin sylvestre, $f_{c,0,pin\ sylvestre}$ (Finlande/Royaume-Uni)	26.2/28.4 MPa	50 MPa

TABEAU 2.1 – Comparaison des résistances en flexion et en compression obtenues par Alpo (1999) et Hout Info Bois [5, 25]

## 2.4 Utilisation en structure

Le bois de faible diamètre est utilisé dans divers domaines en construction, bien que son utilisation ne soit pas encore très répandue actuellement. Voici une liste non-exhaustive des domaines dans lesquels on peut le retrouver accompagnée de quelques exemples [25].

- Murs de soutènement : Les murs de soutènement sont une application classique du bois de faible diamètre parmi les différentes applications possibles en génie environnemental. Les bois ne sont pas toujours écorcés pour leur mise en œuvre. Deux exemples sont présentés ici, tous deux réalisés par *Dynamique Environnement* [29].



FIGURE 2.2 – Mur de soutènement à la gare de Poix terton (France) réalisé par *Dynamique Environnement* [29].



FIGURE 2.3 – Aménagements de base de loisirs à Saint Germain des Fossés (France) réalisés par *Dynamique Environnement* [29].

- Maison en bois empilés : Ce système constructif peut être réalisé avec du bois de faible diamètre. Le premier exemple illustre une maison effectuée par *Huet Bois* [30]. Le deuxième représente un travail effectué par les étudiants de l'*Architectural Association School of Architecture* avec du hêtre empilé en conservant ses courbures naturelles [31, 32].



FIGURE 2.4 – Maison en madriers empilés (Belgique) réalisée par *Huet Bois* [30].



FIGURE 2.5 – Chaufferie dans le "Hooke Park" (Royaume-Uni) réalisée par les étudiants de l'*Architectural Association School of Architecture* [31].

- Toits et bâtiments en poteaux et/ou treillis : Le bois de faible diamètre peut se retrouver dans diverses applications structurelles dans un bâtiment et plus particulièrement dans les systèmes constructifs en poteaux-poutres ou les treillis. Le premier exemple, illustré à la Figure 2.6, a été réalisé par les étudiants de l'*Architectural Association School of Architecture* en grumes de mélèze assemblées à l'aide d'assemblages vissés ou de connecteurs en tôle d'acier [31, 32]. Le deuxième exemple, illustré à la Figure 2.7, consiste en une toiture dans le village de l'âge de fer de Castell Henllys. Ce village a été reconstruit à des fins touristiques avec les mêmes matériaux qu'à l'époque préhistorique.



FIGURE 2.6 – Grand hangar dans le "Hooke Park" (Royaume-Uni) réalisé par les étudiants de l'*Architectural Association School of Architecture* [31].



FIGURE 2.7 – Toiture à Castell Henllys (Royaume-Uni).

- Passerelles et pontons : Ces éléments structurels sont principalement construits pour des piétons, des vélos ou des petits véhicules de service. L'exemple présenté à la Figure 2.8 a été réalisé par *Dynamique Environnement* [29].



FIGURE 2.8 – Passerelle bois à Fortin de Biguglia (France) réalisée par *Dynamique Environnement*[29].

## Chapitre 3

# Aboutage

Un aboutage est un assemblage d'au moins deux lamelles de bois massif à l'aide d'une ou de plusieurs entures. L'intérêt principal de cet assemblage consiste à obtenir d'éléments de plus grandes longueurs que les éléments qui peuvent se trouver naturellement. L'aboutage permet également de purger les bois de leurs plus gros défauts et singularités afin d'améliorer leurs qualités, que ce soit au niveau de la résistance mécanique ou de l'esthétique [33-35].

L'aboutage permet par exemple d'utiliser des bois plus jeunes et par conséquent, plus courts, tout en ayant des produits finaux avec de grandes longueurs, ce qui est un avantage considérable étant donné la forte demande en bois actuelle [36]. L'aboutage permet également de diminuer les déchets générés pendant la production de bois sciés, ce qui est un des enjeux majeurs actuels de l'industrie du bois. Un assemblage satisfait particulièrement ce point en permettant d'utiliser même les courtes longueurs produites [37, 38].

Il existe plusieurs types de configuration de joints, illustrés à la Figure 3.1. Le type le plus performant mécaniquement est celui à biseau plat, mais il induit une grande perte de longueur comme il requiert une pente de 1 :10 [28, 39]. Le deuxième le plus performant est le joint à entures multiples. De plus, il s'agit du plus économique [28, 39]. La diminution de son efficacité structurale par rapport au joint à biseau plat provient des points de concentration des contraintes à chaque bout d'enture [39]. Il existe également des joints collés bout-à-bout mais ceux-ci sont assez peu performants mécaniquement comme les efforts ne sont pas transmis efficacement en raison de l'absence d'enture [28]. Au vu de ses avantages économiques et en termes de performance, ce travail va se concentrer sur l'aboutage à entures multiples.

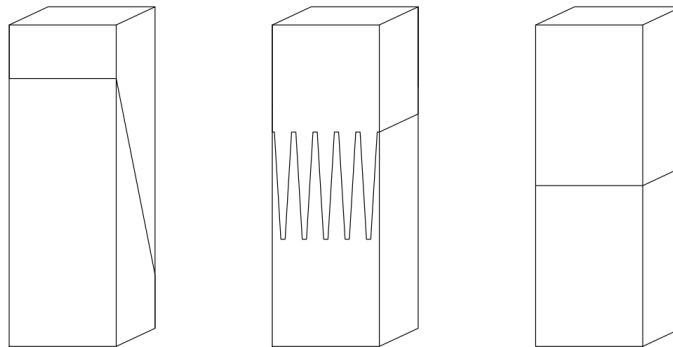


FIGURE 3.1 – Types de joints : aboutage à biseau plat, aboutage à entures multiples et joints collés bout-à-bout.

### 3.1 Aboutage à entures multiples

Parmi les aboutages à entures multiples, il existe aussi plusieurs types de configurations : sans épaulement, mâle-femelle et inversé, illustrés à la Figure 3.2. Les joints sans épaulements, correspondant à des entures usinées sur la totalité de la section des pièces, ont une meilleure performance mécanique, car ils ont une plus grande surface de collage [35, 39]. Selon Avila (2003), les joints avec épaulement sont les plus produits, car ils sont moins coûteux et sont plus faciles à fabriquer [39].

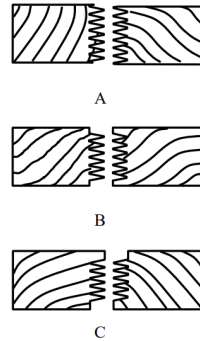


FIGURE 3.2 – Types de configurations de joints à entures multiples : A : sans épaulement, B : épaulement mâle-femelle et C : épaulement inversé [39].

#### 3.1.1 Géométrie des entures

La géométrie d'un aboutage à entures multiples est composée de plusieurs caractéristiques représentées sur la Figure 3.3. Ces caractéristiques sont :

- $l_j$ , la longueur des entures ;
- $p$ , le pas ;
- $b_t$ , l'épaisseur de l'extrémité de l'enture ;
- $l_t$ , le jeu de fond d'enture ;
- $\alpha$ , la pente des entures ;
- $H$ , la largeur totale de l'assemblage.

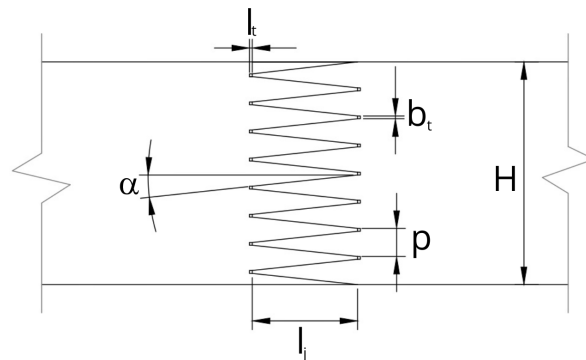


FIGURE 3.3 – Géométrie d'un aboutage à entures multiples.

La géométrie des entures d'un aboutage à entures multiples a un impact sur la résistance mécanique de ceux-ci. Les facteurs importants dans cette géométrie sont la pente, le pas, la longueur des entures et la largeur des extrémités des entures [39-41]. Ces caractéristiques sont dictées par la norme NBN EN 15497. Cette dernière préconise, entre autres points, une géométrie respectant certaines règles comme une longueur d'entures d'au moins 10 mm, ainsi qu'une pente de maximum 7.1°. Elle recommande également une taille de jeu de fond d'enture qui doit être comprise entre 1 et 8% de la longueur de l'enture. [42].

L'influence de ces facteurs a été étudiée par divers auteurs qui sont repris par Avila (2003) [39]. Cette auteure, ainsi que Vrazel et al. (2004), soulignent l'importance d'une pente faible et d'une longueur d'entures suffisante pour obtenir une surface de collage acceptable [39, 43]. Avila (2003) explique que, généralement, les longueurs d'entures sont comprises entre 15 et 35 mm. Pour des utilisations structurales, les entures ont plutôt une longueur comprise entre 22 et 28 mm selon Wisconsin Knife Works (2000). D'après Sunley (1980), ces dernières ont plutôt une longueur entre 10 et 15 mm ainsi qu'un pas entre 3 et 4 mm [39]. D'après Muthumala et al. (2021), qui ont étudié des entures de 13 et 19 mm de long sur des essences présentes au Sri Lanka, la résistance en flexion est d'autant plus grande que les entures sont longues comme les zones de liaisons sont alors également plus grandes [37]. Avila (2003) met aussi en évidence la perte de matériel ainsi que la nécessité d'une puissance plus importante lors de l'usinage qui vont de pair avec des longueurs d'entures plus importantes. Au niveau des extrémités des entures, il est recommandé qu'elles soient les plus minces possible afin d'obtenir une bonne résistance mécanique. Il est aussi préconisé d'avoir un pas suffisamment grand pour éviter la concentration des contraintes aux extrémités des entures [39]. Laca-Bocanegra et al. (2017) soulignent que plus les entures sont longues et l'épaisseur de l'extrémité des entures est fine, plus l'aboutage a une meilleure résistance en flexion, tout en affirmant que les entures usuelles ont une longueur entre 10 et 15 mm [41]. Mantanis et al. (2011) ont étudié l'aboutage du pin noir à l'état vert avec des longueurs d'entures de 4 et 10 mm et ont constaté que l'aboutage était plus résistant en flexion avec de plus longues entures [44].

En conclusion, la résistance de l'aboutage augmente avec la longueur des entures, selon divers auteurs. Cependant, les auteurs ont du mal à s'accorder sur les longueurs des entures optimales, qui varient entre 4 et 35 mm, même si les valeurs entre 10 et 15 mm sont légèrement plus fréquentes.

### 3.1.2 Usinage

L'usinage est un élément capital et déterminant de la qualité de l'aboutage, étant donné qu'un mauvais usinage génère des surfaces non qualitatives avec une plus grande épaisseur de cellules écrasées, de la rugosité et des irrégularités, ce qui impacte l'homogénéité de la ligne de colle. Pour obtenir un usinage de qualité, les paramètres les plus importants sont la vitesse de coupe et l'avance du couteau. La vitesse de coupe a également un impact important sur la durabilité des outils étant donné que la température augmente avec la vitesse, ce qui va de pair avec l'usure [39].

### 3.1.3 Collage

Lors du processus de collage, la colle doit tout d'abord établir un contact avec la surface du bois. La performance de ce contact est définie par la mouillabilité, dont un des facteurs majeurs est la rugosité de la surface, liée à l'usinage. C'est à ce moment-là que les molécules d'adhésif créent des forces moléculaires avec la surface du bois comme les forces de Van der Waals. Ensuite, la colle pénètre dans les pores de la surface du bois. Enfin, l'adhésif se polymérise et forme une liaison entre les 2 surfaces de bois [38].

Afin d'effectuer au mieux le collage, certains principes doivent être mis en place. Il faut tout d'abord fournir un film fin et continu de colle en appliquant une quantité suffisante. Pour obtenir un film de qualité, il est nécessaire d'exercer une pression permettant une distribution uniforme de la colle ainsi qu'une épaisseur optimale. Cette épaisseur ne doit être ni trop fine, sinon le joint est dit "affamé", ni trop grosse sinon il risque d'y avoir une concentration de contraintes dans la ligne de colle lors du séchage [39, 45]. Cette épaisseur dépend directement de la pression appliquée lors du collage ainsi que de la viscosité de l'adhésif qui font toutes deux varier la pénétration

de l'adhésif, ce qui a un effet positif sur la résistance [46]. Un autre principe, qui est d'application dans le cas de bois sec, est d'humidifier les deux surfaces juste avant l'assemblage [39].

La littérature est assez divergente au sujet de la pression à appliquer lors du collage. La norme DIN 68140, préconise une pression optimale de 11.77 MPa. Cependant, Juvonen (1982) a étudié l'effet de pressions différentes sur la performance mécanique en flexion d'aboutage en épicéa et affirme que cette valeur est trop haute. Il recommande plutôt une pression de 3 à 5 MPa pour des entures de longueurs entre 10 et 30 mm [47]. Muthumala et al. (2021) recommandent une pression de 6 MPa [37]. Bustos et al. (2011) ont également étudié la pression de collage optimale en se concentrant sur l'aboutage d'épinette noire. Ils ont constaté que la pression optimale était de 3.43 MPa. Ils font le lien entre la profondeur jusqu'à laquelle des cellules sont endommagées après le collage qui augmente avec la pression et la formation de bulles d'air dans la ligne de colle lorsque la pression est trop faible. Ils ont trouvé un équilibre entre ces 2 phénomènes avec une pression de 3.43 MPa. Une trop grande pression peut également mener à l'apparition de fissures dans le prolongement des entures comme les contraintes de la traction perpendiculaire au grain augmentent. Ils ont aussi remarqué que le jeu de fond d'enture diminuait avec la pression qui augmentait jusqu'à un certain point. À partir de 3.7 MPa, cet effet diminuait probablement en raison de la plus grande incompressibilité de la colle avec le jeu d'entures diminuant [45]. Bustos et al. (2011) citent aussi d'autres auteurs qui recommandent d'autres pressions : Stricker (1980) recommande une pression de 2.76 MPa pour les résineux, Madsen et al. (1962) recommandent une pression jusqu'à 4.14 MPa avec une pression de 2.76 MPa étant considérée comme optimale, tandis que Ayarkwa et al. (2000) affirment qu'il n'y a pas d'effets significatifs de la pression appliquée [45]. Lara-Bocanegra et al. (2017) ont étudié l'aboutage d'eucalyptus et ont conclu que la pression optimale était de 12 MPa car celle-ci permet de réduire le jeu d'enture au minimum, 1% de la longueur de l'enture selon la norme EN 15497 [42], tout en évitant le contact avec le fond de l'enture [41]. Tout comme Bustos et al. (2011), ils ont constaté des fissures dans certains échantillons avec des pressions trop grandes ainsi que de grands jeux de fond d'entures pour les basses pressions [41]. Vrazel et al. (2004) déclarent que, pour les entures de moins de 15 mm, la pression peut aller jusqu'à 11.72 MPa et pour les entures de 60 mm de long, jusqu'à 1.965 MPa. Par contre, ils affirment que la pression ne doit en tout cas pas se situer en dessous de 0.979 MPa [43].

Un collage de qualité permet d'assurer une bonne pénétration de l'adhésif dans les cellules du bois, ce qui implique de bonnes caractéristiques mécaniques [39]. Selon Muthumala et al. (2021), la densité du bois a un impact sur cette pénétration en raison de la perméabilité du bois qui est liée à cette densité [37]. Par contre, ce n'est pas ce qui est mis en évidence par Rosales et al. (2023) dans une étude sur l'aboutage de bois à l'état vert de différentes espèces de *Nothofagus chilien*. En effet, ils n'ont pas constaté de différence de pénétration de la colle entre des essences comportant différentes porosités [38]. Muthumala et al. (2021) expliquent que les résineux sont plus faciles à coller que les feuillus en conséquence de l'influence de la porosité sur la pénétration et de la perméabilité plus grande pour les résineux que pour les feuillus [37]. C'est aussi ce qu'affirment Lara-Bocanegra et al. (2017) en déclarant même que l'aboutage de feuillus n'atteint jamais la résistance du bois comme c'est le cas pour les résineux. Par contre, ils n'ont pas trouvé de bonne relation entre la résistance en flexion et la densité contrairement à Muthumala et al. (2021) [41]. De Souza Nogueira et al. (2022) mettent en avant qu'il existe une différence de performance d'aboutage entre les feuillus et les résineux et que ces derniers sont plus performants. Par contre, ils ont trouvé que les feuillus étaient dotés d'un meilleur rapport résistance-densité que les résineux [40].

Finalement, les facteurs liés au collage ayant le plus d'influence sur la performance mécanique des aboutages à entures multiples sont la nature du substrat, la pression du collage, la quantité de colle utilisée, le temps de serrage, le temps de séchage et l'épaisseur du joint de colle [28, 39, 45]. D'autres éléments peuvent avoir une influence sur la qualité de collage comme l'essence du bois mais aussi la structure du bois et ses extraits [43].

Lors du collage, l'effet de la rectitude des éléments entre eux est mis en avant par Juvonen (1982). La résistance de l'aboutage diminue si les éléments ne sont pas pressés de manière rectiligne. Cet effet augmente avec la diminution de la longueur des entures et avec l'augmentation de la largeur des pièces. Il n'est pas possible de le contrer avec une pression plus importante [47].

### 3.1.4 Modes de rupture

Il existe 3 types de ruptures principales des aboutages : dans la ligne de colle (rupture cohésive), à l'interface entre le bois et la colle (rupture adhésive) et dans le bois (rupture du bois) [46]. Ces différentes ruptures sont divisées en 6 modes [39] :

- Mode de rupture 1 : lié à la performance de l'adhésif, rupture le long de la ligne de colle avec moins de 70% de bris dans la fibre de bois ;
- Mode de rupture 2 : lié à la performance de l'adhésif, rupture le long de la ligne de colle avec plus de 70% de bris dans la fibre de bois ;
- Mode de rupture 3 : rupture principalement dans la zone du joint ;
- Mode de rupture 4 : rupture principalement sur les racines et/ou sur les bouts des entures ;
- Mode de rupture 5 : la rupture commence dans le joint et continue à l'extérieur du joint ;
- Mode de rupture 6 : la rupture a lieu complètement à l'extérieur du joint.

Lara-Bocanegra et al. (2017) ont remarqué une augmentation des modes de rupture 3 et 4 avec l'élargissement de la pointe des entures. Ils expliquent cela par la réduction de la section effective des pointes des entures. Aussi, ils n'ont trouvé aucune corrélation entre les modes de rupture et la résistance de l'aboutage [41].

Les bulles d'air et de la cavitation peuvent apparaître si les pièces jointes se détachent, même partiellement, avant la polymérisation de la colle. La cavitation apparaît lorsque des bulles s'agrandissent sous la traction. Les bulles d'air et la cavitation sont facilement reconnaissables et peuvent être la cause de rupture adhésive [46].

### 3.1.5 Résistance mécanique des aboutages

Un collage structural est censé conférer à l'aboutage une résistance mécanique au minimum supérieure à celle du bois qui est abouté [48]. Cependant, en pratique, ce n'est pas toujours le cas. Une étude a été faite sur l'aboutage de trois essences algériennes : la résistance mécanique des bois aboutés était systématiquement inférieure à celle obtenue sur bois massif. Dans ce cas, il s'agit d'une conséquence de la performance très variable des aboutages et du séchage hétérogène des éléments constitutifs [35].

L'orientation des entures par rapport à la force appliquée peut avoir un impact sur la résistance mécanique des aboutages mais la littérature est assez discordante sur ce point. En effet, Avila (2003) explique que les différences sont faibles même si les joints à entures verticales, où la force est appliquée parallèlement aux entures, semblent avoir une meilleure résistance mécanique en flexion et en traction [39]. Muthumala et al. (2021) précisent que la résistance en flexion de l'aboutage est affectée par son orientation par rapport à la largeur et l'épaisseur des éléments. Ils expliquent cela par le fait que les entures relâchent de la colle lorsqu'elles sont au contact de l'air. L'importance de ce phénomène dépend du nombre d'extrémités d'entures qui sont en contact avec l'air et, par conséquent, de l'orientation des entures et les dimensions des éléments. Ces auteurs expliquent cependant que si l'aboutage a été effectué avec prudence, la résistance devrait être la même, peu importe l'orientation [37]. De Souza Nogueira et al. (2022) mettent en avant une absence de variation selon Ahmad et al. (2017) et Ong et al. (2019) et une faible variation avec une orientation des entures verticales meilleure que celles horizontales, où la force est appliquée parallèlement aux entures, dans le cas d'enture de 10 mm de long selon Mantanis et al. (2011) [40]. Par contre, Mantanis et al. (2011) ont obtenu des valeurs similaires avec des entures de 4 mm de longueur, peu importe l'orientation [44].

## 3.2 Aboutage du bois à l'état vert

Le bois à l'état vert, aussi appelé bois vert, est un bois dont l'humidité est située au-dessus du PSF, entre 22 et 35% d'humidité selon les essences.

L'aboutage du bois à l'état vert, aussi appelé abovage, se base sur un principe de réaction de la colle avec l'humidité présente dans le bois. Ce principe permet, avec l'humidité du bois, d'augmenter l'élasticité des entures ce qui aboutit à une densification locale du bois. Ce phénomène s'explique par la présence de colle qui imprègne le bois et polymérise, ce qui augmente la densité de manière très locale, dans l'aboutage. Cette densification est assez favorable mécaniquement, car elle permet de freiner les fissures [48].

L'aboutage du bois vert s'est développé dans les années 90's et se développe encore via divers projets comme Greenweld en Nouvelle-Zélande, Soy Bond aux États-Unis, Semetic au Japon et ABOVE en France. Cependant, certains projets font face à la difficulté de créer une colle adaptée à l'aboutage du bois à l'état vert mais également aux réglementations au niveau de la pollution et de la toxicité, principalement en Europe. Le projet ABOVE a cependant réussi à créer une colle à base de polyuréthane adaptée à l'aboutage du bois vert [49].

Le bois abouté vert est tout de même généralement séché avant sa mise en oeuvre, comme les autres bois utilisés classiquement. Cependant, du bois vert peut être mis en oeuvre comme cela peut-être le cas de sections importantes dans les charpentes traditionnelles [50], mais cette méthode comporte encore des freins en raison des problèmes générés :

- la difficulté de bien calculer les résistances mécaniques initiales ;
- la méconnaissance de l'impact des fentes sur les propriétés mécaniques du bois ;
- l'aspect inesthétique des fentes non-négligeable ;
- la charge supplémentaire à la pose ;
- la gestion de l'humidité une fois le gros oeuvre fermé.

### 3.2.1 Intérêt

L'aboutage du bois à l'état vert comporte plusieurs avantages par rapport à l'aboutage du bois sec. Cette technique permet tout d'abord d'éviter de devoir sécher les bois jusqu'à un taux d'humidité largement inférieur au taux d'équilibre qu'aura le bois une fois mis en oeuvre. En effet, les aboutages traditionnels nécessitent généralement de sécher le bois jusqu'à des teneurs en humidité entre 9 et 14% alors que les teneurs requises pour la construction se situent en dessous de 20% [51]. Cela implique que l'aboutage traditionnel demande une énergie conséquente en séchage qui peut être, en partie, évitée avec l'aboutage du bois vert comme celui-ci ne nécessite pas de séchage, excepté juste avant sa mise en oeuvre. Cela permet un délai plus court entre la commande et l'expédition du bois abouté [36, 38].

De plus, limiter le séchage permet, évidemment de réduire le prix, car celui-ci est alors moins énergivore. Cela permet également de ne sécher que les éléments qui ont été aboutés [36], ce qui représente une économie de 30% sur le séchage selon Pommier (2007) [51]. De plus, comme expliqué dans la suite, la pression à appliquer lors du collage est généralement plus faible [36].

Finalement, l'aboutage du bois à l'état vert permet d'atteindre de bonnes performances mécaniques, souvent meilleures que celles atteignables avec l'aboutage du bois sec [36, 51, 52]. Ce point sera développé dans la suite.

### 3.2.2 Collage du bois à l'état vert

Le collage de bois vert implique certaines modifications par rapport à un collage du bois sec. Tout d'abord, les réactions chimiques ne sont pas les mêmes. Comme expliqué précédemment, le collage traditionnel consiste en la formation de forces physiques, celles de Van der Waals, ainsi qu'à des liaisons mécaniques. Avec l'aboutage du bois vert, il est possible d'améliorer ces liaisons, en effectuant des liaisons covalentes entre le bois et la colle.

Cependant, il est difficile de quantifier ces liaisons comme le bois peut présenter une composition chimique très différente en fonction de nombreux paramètres comme l'essence, la zone de croissance ou encore la composition du sol. La colle "innovante" a été mise au point lors du projet "Collage Bois Vert", faisant partie d'un plus large projet "ABOVE". "ABOVE", composé des projets "Collage Bois Vert", "Aboutage du Bois Vert" et "ABOVE

2+", a commencé en 2002 à l'Institut du Pin à l'Université de Bordeaux et a mis au point un adhésif à base de polyuréthane pour bois humide, industrialisé par l'entreprise COLLANO [48]. Cette colle a pour principe de fournir un excès de fonctions isocyanates qui vont sécher chimiquement la surface du bois. Il en résulte un relâchement des sites hydroxylés de la cellulose, qui va permettre aux fonctions isocyanates de s'attacher à ces sites et de créer des liaisons covalentes [49]. Pour que les liaisons puissent se faire, une attention particulière doit être accordée aux proportions d'eau et d'adhésif afin de s'assurer d'une présence en suffisance de chacun des composants par rapport à l'autre [53].

La mouillabilité du bois peut aussi être impactée par l'humidité du bois. Brenkreif et al. (2021) ont montré dans une étude effectuée sur le bouleau que l'angle de contact, l'angle formé entre la surface du bois et celle de la colle le long de leur ligne de contact, augmentait logarithmiquement et que la tension superficielle, l'énergie de surface du bois, diminuait logarithmiquement avec l'humidité. Il y a donc une moins bonne mouillabilité du bois plus il est humide. Les essais ont été effectués sur des bois avec une teneur en humidité entre 6 et 30% [38, 54].

Au niveau de la pression à appliquer lors du collage du bois vert, la littérature est assez disparate. Sterley (2012) affirme que la pression de l'aboutage du bois à l'état vert doit être réduite à 5 MPa comparée aux 10 MPa utilisés dans l'aboutage conventionnel et qu'elle est de 0.9 MPa dans les usines industrielles [55]. Pommier et al. (2006) affirment également que l'aboutage du bois à l'état vert requiert moins de pression lors du collage [49]. Cela est confirmé par Gonzales-Prieto et al. (2021) qui ont utilisé une pression de 7 MPa lors du collage d'eucalyptus à l'état vert et une pression de 12.5 MPa pour un collage d'eucalyptus sec [36]. Clouet (2014) ont choisi une pression de 0.8 MPa [56]. Pour abouter du chêne à l'état vert, Karastergiou et al. (2008) appliquent une pression située entre 6 et 8 MPa [57]. Mantanis et al. (2011) appliquent une valeur similaire pour abouter de l'épinette noire, 6 MPa [44]. Finalement, Rosales et al. (2023) ont exercé une pression de 0.6 MPa [38].

Afin de comparer l'aboutage du bois à l'état vert et l'aboutage traditionnel, Pommier et al. (2006) ont analysé la profondeur de pénétration de la colle sur du bois abouté à l'état vert et abouté sec. Ils ont constaté que la colle a pénétré le bois d'environ 100m pour l'aboutage du bois à l'état vert. Tandis que pour l'aboutage du bois sec, cette profondeur est 3 fois moins grande [49].

Selon Morlier et al. (2016), le collage du bois à l'état vert "*aboutit à une véritable soudure*" [48] en provoquant une densification locale du bois qui permet à la zone aboutée de devenir un obstacle à la propagation de fissures. Cette notion de soudure en parlant d'aboutage du bois à l'état vert est aussi reprise par Pommier (2006) et Pommier et al. (2006) [49, 51]. Elle mérite cependant d'être nuancée, car une ligne de colle est tout de même présente entre les 2 éléments de bois même si une bonne pénétration de la colle est possible, ce qui empêche qu'une soudure bois-bois s'effectue.

### 3.2.3 Colle

Il existe plusieurs types de colle. Les trois colles les plus communes sont celles à base de [28] :

- Phenol resorcinol
- Mélamine formaldéhyde
- Isocyanate

Le choix de la colle doit se faire en fonction de l'usage qui sera fait des pièces collées, des conditions dans lesquelles ces pièces seront soumises (taux d'humidité, variation d'humidité,...) et des sollicitations qu'elles vont subir [28]. Dans le cas d'aboutage de bois à l'état vert, la colle à base de polyuréthane, faisant partie des colles à bases d'isocyanate, est souvent privilégiée vu sa manière de réagir avec l'humidité présente dans le bois.

En fonction de leurs compositions, les colles vont réagir différemment lors du collage. Par exemple, les adhésifs de type isocyanate réagissent avec l'humidité présente dans le bois et l'humidité relative de l'air, ce qui leur donne un avantage considérable puisqu'ils n'ont pas besoin de catalyseur ou de chaleur supplémentaire pour durcir. Cela les différencie des adhésifs phénoliques [39]. Cependant, il est tout de même possible d'accélérer leur processus de

séchage via des pressages à chaud ou des traitements en radiofréquence [58].

La solidification de la colle à base de polyuréthane se déroule aussi de manière différente des autres adhésifs existants. En séchant, la colle réagit avec l'humidité de l'air provoquant une légère expansion et formant une forte liaison entre les surfaces [38]. C'est ce qui explique son aspect "mousseux".

Auparavant, la colle monocomposante à base de polyuréthane n'était pas beaucoup employée dans les utilisations industrielles mais ce n'est désormais plus le cas en raison de l'existence de normes la concernant. Elle remplace petit à petit les colles conventionnelles. Quelques-uns de ses avantages sont l'absence de formaldéhyde ou de solvants, l'absence de mélange durant le processus, les joints de colle invisibles et sa bonne performance mécanique permettant son utilisation en structure. De plus, cette colle a une bonne réaction au feu [41].

### 3.2.4 Résistance mécanique des aboutages de bois à l'état vert

Selon plusieurs auteurs, l'aboutage du bois à l'état vert offre une meilleure performance que celui effectué sur du bois séché. D'après Pommier (2007), les résultats obtenus avec des aboutages effectués sur du pin maritime à l'état vert et la colle "innovante" à base de polyuréthane montrent que la totalité des ruptures en flexion 4 points ont lieu hors de la zone d'aboutage [51]. C'est également le cas de 90% des essais effectués en flexion par Sterley (2004) [52]. Karastergiou et al. (2008) ont aussi démontré, cette fois-ci sur du chêne, que l'aboutage du bois à l'état vert a une résistance en flexion supérieure ou égale à celle de l'aboutage du bois sec [57]. González-Prieto et al. (2021) ont également eu la même conclusion sur de l'eucalyptus. Ils ont constaté que l'aboutage du bois à l'état vert est plus résistant en flexion que l'aboutage du bois sec et a des valeurs assez similaires à celles du bois non-abouté [36]. Cela peut s'expliquer en partie grâce à la densification qui a lieu au niveau de la ligne de colle continue qui ne laisse place à aucun vide, contrairement à l'aboutage sur du bois sec [51]. Toutes ces études ont été effectuées sur du bois équarri.

## Chapitre 4

# Caractérisation non-destructive de grumes

Actuellement, pour déterminer les propriétés mécaniques du bois, l'approche la plus utilisée est l'approche statistique. Cette méthode mesure la valeur caractéristique d'un grand nombre d'échantillons avec des méthodes destructives et c'est cette valeur qui est considérée comme la référence. Cette résistance caractéristique correspond à une valeur telle que 95% des échantillons se trouvent au-dessus. En pratique, cela signifie qu'un bois utilisé à 95% de probabilité d'avoir sa résistance réelle plus grande que la résistance caractéristique. Cette technique est utilisée aussi pour des matériaux tels que l'acier ou le béton, mais ceux-ci ont une répartition normale des résistances plus étroites que le bois qui est un matériau très hétérogène et qui peut comporter de grandes variabilités. Par conséquent, permettre d'utiliser la résistance réelle de chaque élément en bois pourrait avoir un réel impact sur l'optimisation de la matière.

Pour connaître la réelle résistance d'un bois et pouvoir l'utiliser, il est nécessaire de se tourner vers des méthodes non-destructives. Ces méthodes ne sont pas toujours précisément très développées pour les grumes.

### 4.1 Classement visuel

Le classement visuel est une méthode d'évaluation de la qualité d'éléments en bois en fonction de divers critères physiques visuels tels que les nœuds, les fentes ou encore la pourriture. Il existe plusieurs normes qui ont des objectifs différents permettant d'effectuer le classement visuel sur du bois sur pied, abattu ou équarri.

- La norme allemande DIN4074-2 - "*Classement des bois en fonction de leur capacité de charge - Partie 2 : Grumes rondes (Conifères)*" : Elle permet de classer les bois ronds de conifères selon des trois grades correspondants à une résistance faible, normale ou élevée sur base de la présence de défauts [59, 60].
- La norme allemande DIN1052 - "*Étude, calcul et dimensionnement des ouvrages en bois*" : Elle permet d'associer les grades de la norme DIN 4074-2 à une classe de résistance de la norme EN 338, cependant elle ne prend en compte que quelques essences, ce qui la restreint fortement [61].
- Les normes européennes EN1316 - "*Bois ronds feuillus - Classement qualitatif*" et EN1927 - "*Classement qualitatif des bois ronds résineux*" : Ces normes permettent de déterminer une classe de qualité visuelle pour certaines essences de feuillus et de résineux en fonction de critères physiques visuels sans faire le lien avec la résistance mécanique [62, 63].

Comme un classement visuel de bois de faible diamètre n'est pas disponible pour plusieurs essences et que celui-ci semble difficile à mettre au point pour les grumes, Wolfe (2000) propose de se baser sur des autres méthodes de caractérisation non-destructives de grumes que le classement visuel pour déterminer les propriétés mécaniques des grumes [26].

## 4.2 Méthodes mécaniques, électriques et dynamiques

La littérature à propos de méthodes mécaniques, électriques ou dynamiques pour déterminer différentes caractéristiques du bois est riche et très variée. Quelques exemples vont être énoncés ici.

Il existe notamment une méthode d'excitation par impulsion pour déterminer le module de Young qui consiste à induire une frappe légère à un élément bois à une extrémité de celui-ci et ainsi le faire rentrer en vibration. La fréquence est ensuite mesurée à l'aide par exemple de GrindoSonic® [64].

Une autre méthode utilisée se base sur les ultrasons et sur l'envoi d'ondes longitudinales et transversales avec une fréquence précise (54 et 250kHz pour la méthode Pundit 200) par une sonde. La vitesse est ensuite calculée comme la longueur entre les capteurs divisée par le temps de parcours et permet de déterminer aussi le module de Young [65].

Il existe également une méthode mécanique consistant à percer un élément à plusieurs endroits (généralement 3) et à peser les résidus de ce perçage pour déterminer la masse volumique. Cette technique comporte cependant un défaut majeur qui est la dégradation du bois [66].

Beaucoup d'autres techniques existent selon la littérature. Ces techniques sont principalement utilisées pour écarter les éléments en bois de qualité insuffisante lors de processus industriel, car ils ne sont pas suffisants pour assurer la qualité mécanique [64].

## 4.3 Le proof-loading

Le proof-loading est une technique développée pour déterminer la résistance d'un élément en bois sur base de l'application de charges sans endommager l'élément. Cette méthode est déjà utilisée dans le milieu industriel sur des éléments aboutés comme il n'est pas possible de voir les défauts dans l'aboutage, ce qui rend cette méthode particulièrement utile [67]. Cependant, au niveau du classement de grumes, les bancs de caractérisation mécanique sont très peu nombreux dans le monde. Il en existe un chez *Unilog*, une entreprise en Nouvelle-Zélande qui est illustré à la Figure 4.1 mais les réglages sont spécifiques à une population d'individus bien définie [60]. De plus, l'entreprise *Unilog* ne développe pas un des défis de cette méthode qui est la détermination de signes de faiblesses.



FIGURE 4.1 – Proof-testing d'une grume dans l'entreprise TTTproducts en Nouvelle-Zélande.

Un projet est en cours à l'UCLouvain depuis 2020, le projet ROBOTRONC, et a pour objectif de mettre au point un protocole non-destructif permettant de déterminer la capacité portante de grumes, en définissant des critères de rejet qui identifient et quantifient les signes de faiblesse. C'est ce dernier qui va être utilisé lors de la troisième campagne d'essais d'aboutage de billons de faible diamètre.

## Deuxième partie

Première campagne d'essais : 15 essais  
de résistance en flexion du bouleau

## Chapitre 5

# Matériel et méthode de la résistance en flexion du bouleau

L'évaluation de la résistance moyenne en flexion du bouleau est répertoriée dans la littérature. Selon Hout Info Bois, cette résistance est de  $130 \text{ MPa}$  [5]. Par contre, la résistance de grumes de bouleau de faible diamètre n'est pas documentée dans la littérature. Comme expliqué précédemment, cette valeur peut différer de celle utilisée dans le cas de bouleau scié en raison de différents effets contradictoires. Afin d'obtenir une valeur de comparaison claire et validée pour l'analyse des résultats de grumes aboutées, 15 essais de flexion ont été effectués sur des billons non-aboutés.

### 5.1 Grumes de bouleau

Pour ces essais, 11 grumes de bouleau ont été coupées sur une parcelle à Louvain-la-Neuve appartenant à l'UCLouvain. Elles ont ensuite été découpées en 15 billons de bouleau. Les termes grumes et billons sont expliqués à la Figure 5.1. Ces grumes avaient un diamètre compris entre 40 et 90 mm et une longueur comprise entre 1.5 et 3 m. Les billons avaient un diamètre compris entre 40 et 90 mm et une longueur comprise entre 90 et 180 cm. Les billons ont été sélectionnés sur base de leur diamètre et de leur rectitude. Le critère de rectitude s'est basé sur une évaluation visuelle relative en sélectionnant les billons dans les sections de grumes les plus droites.

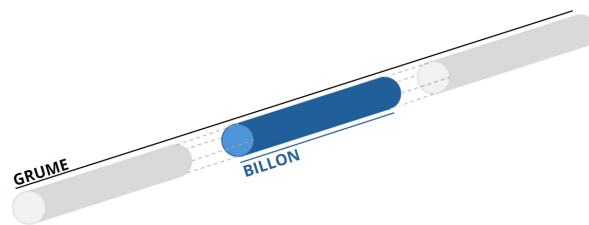


FIGURE 5.1 – Explication des termes billons et grumes.

## 5.2 Classement visuel

Un classement visuel a été effectué pour permettre d'évaluer la qualité visuelle des billons et pour pouvoir analyser si cette qualité visuelle a un impact sur la résistance.

Il n'existe pas actuellement de classement qualitatif visuel spécifique au bouleau, même équarri. Le classement visuel effectué s'est basé sur celui de deux autres essences disposant d'un classement visuel spécifique : le hêtre qui a des propriétés mécaniques et physiques semblables, [9, 12] et le peuplier, qui est une essence ayant plusieurs ressemblances avec le bouleau. La majorité des critères retenus proviennent du classement visuel du hêtre. La sélection des critères s'est basée sur les classements visuels de la norme EN 1316-1 et du "*Carnet d'assistance pour l'évaluation qualitative des bois sur pied et abattus*" [62, 68].

Les critères qui nous avons retenus choisis de retenir pour classer visuellement les billons sont illustrés dans le Tableau 5.1. Les dimensions des billons n'ont pas été retenues comme critère, car elles ne sont pas représentatives dans ce cas étant donné que des billons de faibles diamètres sont uniquement considérés dans cette étude.

	A	B	C	D
Nœuds recouverts [nbre/m]	Exclus	$\leq 3/3$	Permis	Permis
Nœuds sains [mm/m]	Exclus	$\sum$ des diamètres $\leq 200/3$	Permis	Permis
Nœuds pourris [mm/m]	$\sum$ des diamètres $\leq 40/3$	$\sum$ des diamètres $\leq 120/3$	Permis	Permis
Fentes de cœur	$\leq 1/4$ du diamètre	Permisses si non traversantes	Permisses	Permisses
Cœur étoilé	Exclu	Exclu	Permis	Permis
Fils tors [cm/m]	$\leq 5$	$\leq 9$	Permis	Permis
Cœur excentré [%]	$\leq 10$	$\leq 20$	Permis	Permis
Cannelure	Exclue	Exclue	Permise	Permise
Roulure	Exclue	Exclue	Permise	Permise
Fentes traversantes	Exclues	1 max sur un niveau ; la longueur de la fente sur la surface doit être plus petite que le diamètre médian	1 max sur un niveau ; la longueur de la fente sur la surface doit être plus petite que le double du diamètre médian	Permisses
Autres fentes	Exclues	Exclues	Permisses si la longueur la plus longue de la fente de surface est plus petite que le diamètre médian	Permisses
Gélivures	Exclues	Exclues	Permisses	Permisses
Attaques d'insectes	Exclues	Exclues	Exclues	Permisses
Discolorations	Exclues	Exclues	Permisses	Permisses
Pourriture	Exclue	Exclue	Permise	Permise
Pourriture de cœur [% du cœur]	Exclue	$\leq 15$	$\leq 25$	Permise
Courbure [cm/m]	$\leq 2$	$\leq 4$	$\leq 8$	Permise
Méplat [%]	$\leq 15$	Permis	Permis	Permis

TABLEAU 5.1 – Critères de classement visuel des billons de bouleau que nous avons choisis d'appliquer.

### 5.3 Essai de flexion 4 points

Étant donné que l'utilisation pressentie des billons de bouleau aboutés est le gîtage de plancher, nous avons décidé d'effectuer des essais en flexion qui est généralement le critère dimensionnant. L'objectif de ces essais était d'obtenir une valeur claire et certifiée de la résistance en flexion de grumes de bouleau de faible diamètre afin de savoir si celle-ci se rapproche des valeurs théoriques présentes dans la littérature. Un unique essai de résistance en flexion 4 points a été effectué en suivant les recommandations de la norme EN 408 [69].

La norme EN 408 préconisant une longueur de 19 fois la hauteur de la section,  $h$ , il a été décidé d'utiliser des billons d'une longueur de minimum 19 fois le diamètre moyen de la section [69]. Nous aurions pu considérer une hauteur fictive d'une section rectangulaire de surface moyenne identique mais nous avons choisi de travailler avec un critère se rapprochant le plus possible de la norme à appliquer aux poutres de section rectangulaire. Les points d'application de la force se situent en  $\frac{L}{3}$  et  $\frac{2L}{3}$  [69].

Au niveau des appuis, ceux-ci doivent se situer à une distance correspondant à 18 fois la hauteur de la section. C'est encore une fois le diamètre moyen des billons qui a été considéré. Au niveau de la distance entre les points d'application de la force, la norme préconise une distance de  $6h$  sans tolérance, c'est par conséquent ce qui a été effectué en prenant une distance de 6 fois le diamètre moyen [69].

Le dispositif d'essais de ces essais est illustré à la Figure 5.2 et est composé d'un vérin MTS 244.22A d'une force de 200  $kN$  fixé sur un portique de réaction. Sur ce vérin, une cellule de force, une rotule pour répartir équitablement la force entre les deux points d'application, et une poutrelle de répartition sont attachées. Sur la poutrelle de répartition, deux appuis, un à rouleau et un à rotule, sont accrochés tout en laissant leurs positionnements réglables afin de conserver une distance de  $6h$  pour chaque billon. Les deux appuis, un à rouleau et un à rotule, sont posés sur des blocs de béton à équidistance du centre. Ces appuis sont illustrés à la Figure 5.3. Sur cette figure, l'appui à rouleau n'est pas encore libéré, ce qui n'est pas le cas pendant les essais. Pour mesurer la flèche à mi-portée du billon, un laser a été placé en dessous du billon.



FIGURE 5.2 – Dispositif d'essais de flexion 4 points.

Lors de ces essais de flexion 4 points, le module local d'élasticité en flexion n'a pas pu être calculé selon la norme EN 408. Cette dernière préconise de prendre une mesure de la flèche locale sur une longueur de 5 fois la hauteur de la section [69], car cela requiert un dispositif qui n'était pas adaptable aux variations de longueurs des billons. Ce module "global" a tout de même été mesuré sur toute la longueur du billon.



FIGURE 5.3 – Appui à rotule (gauche) et appui à rouleau (droite).

## Chapitre 6

# Résultats de la résistance en flexion du bouleau

Les résultats du classement visuel ainsi que des essais mécaniques des essais de flexion du bouleau sont présentés dans ce chapitre.

### 6.1 Classement visuel

Le classement visuel effectué a permis de déterminer 4 classes de qualité visuelle décroissante allant de "A", la meilleure à "D", la plus faible. Les résultats du classement visuel des billons sont illustrés à la Figure 6.1. 12 des 13 billons ont une classe de qualité visuelle "C" ou "D". Les résultats détaillés du classement visuel sont repris à l'Annexe A.1.

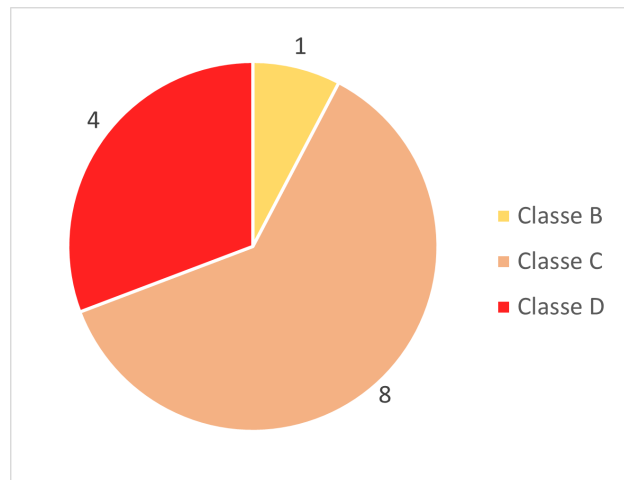


FIGURE 6.1 – Classes de qualité visuelle des billons non-aboutés testés en flexion.

Il a été remarqué que le facteur le plus restrictif pour le classement visuel est celui des nœuds. En effet, le classement visuel prenant en compte uniquement les nœuds est identique à celui reprenant tous les critères. Ce résultat concorde avec la littérature qui met en avant que "*la qualité commerciale est déterminée par le nouage dans plus de 90% des cas*" [10].

## 6.2 Essais mécaniques en flexion

Un des 15 essais a subi des dommages lors de l'essai de flexion en raison d'une part, d'une trop grande élasticité et d'autre part, d'un dispositif non adapté en raison d'une poutrelle de répartition trop courte et d'appuis trop proches. Il s'agit de l'essai 4 illustré à la Figure 6.2. Comme il est visualisé sur la photo, le billon a subi une flexion trop importante pour le dispositif ce qui a provoqué la mise en contact des extrémités de la poutrelle avec le billon. Cette disposition génère des données non exploitables, car les efforts n'ont pas été répartis correctement. Pour d'autres essais, une poutrelle de répartition plus petite a été fabriquée pour permettre de répartir les efforts selon les recommandations de la norme EN 408 [69].



FIGURE 6.2 – Essai de résistance en flexion du bouleau subissant une flexion trop importante pour le dispositif - Essai 4.

Suite à l'échec de cet essai, les résultats portent sur les 14 essais s'étant déroulés correctement. En raison d'une erreur d'enregistrement, la flèche globale des essais 1 et 2 n'a pas pu être récupérée. Le diagramme de contrainte-déformation ainsi que le calcul du module d'élasticité en flexion n'ont pas conséquent pas pu être effectué.

### 6.2.1 Résistance en flexion

Le diagramme des contraintes-déformations de 12 des 14 essais est présenté à la Figure 6.3. Celui-ci illustre la déformation des billons sous l'effet d'une contrainte croissante. La première partie linéaire des courbes illustre le comportement élastique du bouleau avec un module d'élasticité (rapport de la contrainte sur la déformation) qui sera étudié plus en détail par la suite. La deuxième partie des courbes illustre le comportement plastique du bouleau.

Les résultats de résistance en flexion obtenus pour les 14 essais sont illustrés dans le tableau 6.1.

Moyenne [MPa]	Caractéristique [MPa]	Écart-type [MPa]
53,32	42,14	5,62

TABLEAU 6.1 – Résistance en flexion de 14 essais de billon de bouleau non-abouté.

Les valeurs obtenues sont loin en deçà de la résistance en flexion moyenne théorique du bouleau qui est de 130 MPa [5]. L'impact de la présence de bois juvénile et des nœuds qui peuvent être de grandes tailles sont donc plus importants que les autres effets pouvant jouer sur la résistance en flexion du bois de faible diamètre discuté dans l'état de l'art [25].

### 6.2.2 Module d'élasticité en flexion

Le module d'élasticité "global" moyen en flexion a été mesuré ainsi que son écart-type et son erreur-type. Ces valeurs sont reprises dans le Tableau 6.2.

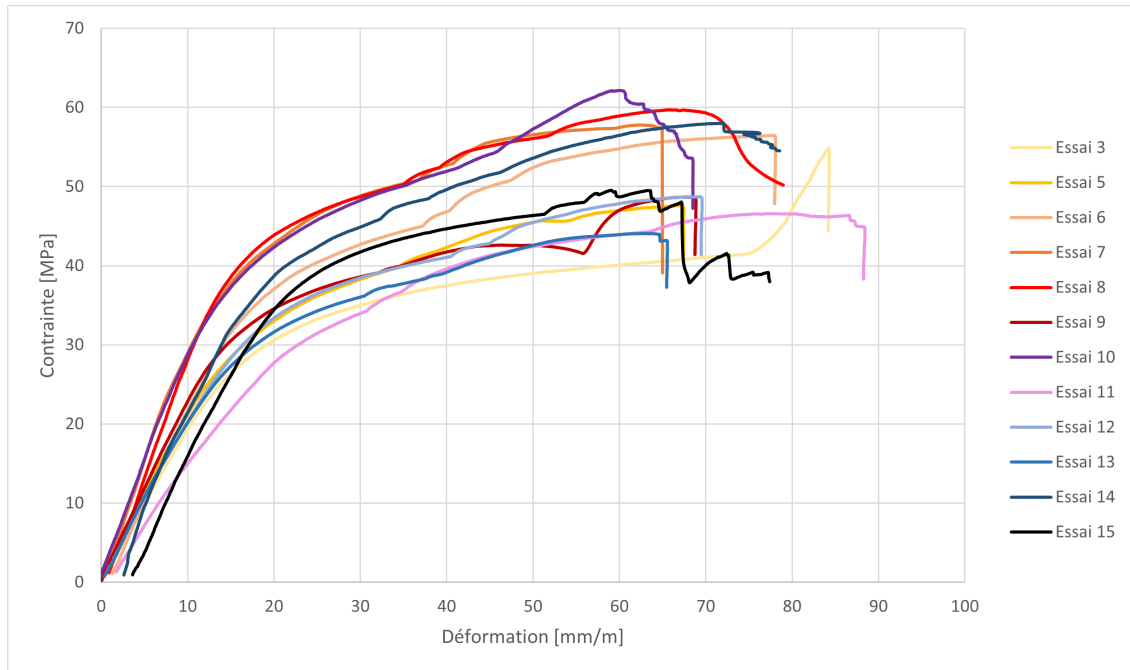


FIGURE 6.3 – Diagramme contraintes-déformations des 12 essais de billons de bouleau non-abouté.

Moyenne [MPa]	Ecart-type [MPa]
9.012,89	2.113,81

TABLEAU 6.2 – Module d'élasticité en flexion de 12 essais de flexion de bouleau non-abouté.

Selon Hout Info Bois, le module d'élasticité du bouleau est de 14 000 MPa [5]. Cette mesure est effectuée avec un bois conditionné à 12% d'humidité selon la norme EN 408 [69]. Cependant, le module d'élasticité du bois diminue lorsque la teneur en humidité du bois augmente, ce qui signifie que le bois devient moins rigide. Selon une étude réalisée par Moutee (2006), le module d'élasticité peut-être jusqu'à deux fois plus faible à 25% de teneur en humidité par rapport à celui calculé à 12% d'humidité [70]. C'est également ce que Bidzo et al. (2021) ont constaté en étudiant des éprouvettes à  $12 \pm 4\%$  et à  $21 \pm 3\%$  [71]. Dans ce cas, les billons testés avaient une teneur en humidité moyenne de 80,37% avec un écart-type de 16,43% entre 3 et 6 jours après la coupe et une semaine avant les essais. Une fois chaque essai terminé, une mesure de la teneur en humidité a été effectuée avec un humidimètre. Ce dernier a mesuré une teneur en humidité moyenne de 43,38% avec un écart-type de 9,74%.

Le principe de l'humidimètre consiste à mesurer le passage d'un courant entre deux électrodes enfoncées dans le bois [5]. Comme les bois mesurés n'étaient pas écorcés, il était donc compliqué d'enfoncer les aiguilles de l'humidimètre entièrement. C'est pourquoi les mesures d'humidité ont été prises sur le bois de bout. L'humidimètre a donné des valeurs relatives au-delà de 30% d'humidité [72]. Les imprécisions des valeurs ont été prises en considération lors de l'analyse des mesures d'humidité. Cela a été fait en examinant les valeurs de taux d'humidité comme des valeurs relatives à mettre en parallèle avec les essais de dessiccation.

Malgré les imprécisions dans la mesure de l'humidité, nous constatons que la teneur en humidité des billons testés est cohérente avec les valeurs obtenues pour le module d'élasticité en flexion qui est plus faible que le module d'élasticité théorique. En effet, le module d'élasticité en flexion obtenu est de 9.012,89 MPa avec un écart-type de 2.113,81 MPa comme repris dans le Tableau 6.2.

### 6.3 Conclusion

Pour conclure cette partie sur la résistance en flexion du bouleau, la résistance caractéristique en flexion du bouleau obtenue est de 42,1 *MPa*. La résistance moyenne en flexion a été mesurée à 53,3 *MPa*. Ces valeurs obtenues sont surprenantes étant donné que la résistance moyenne en flexion du bouleau est de 130 *MPa* selon la littérature [5]. Cela montre que la présence plus importante de nœuds et la présence de bois juvénile chez les bois de faible diamètre a un impact dominant sur la résistance en flexion du bois.

## Troisième partie

Deuxième campagne d'essais : 17  
essais préliminaires d'aboutage de  
grumes reconstituées de bouleau de  
faible diamètre à l'état vert

# Chapitre 7

## Matériel et méthodes des premiers essais d'aboutage

Cette section porte sur des essais préliminaires afin d'analyser la faisabilité de l'aboutage de grumes de bouleau, à l'état vert et de faible diamètre.

### 7.1 Grumes de bouleau

Pour cette étude préliminaire, 28 grumes de bouleau d'environ 3 mètres de longueur et de diamètres compris entre 65 et 170 mm ont été analysées. Ces bouleaux proviennent du Brabant Wallon et de la région Bruxelloise et étaient destinés à être livrés chez Burgo, une entreprise belge fabriquant de la pâte à papier à base de feuillus.

Malheureusement, en raison de la taille des copeaux utilisés pour l'aboutage, la partie de ces grumes ayant un diamètre supérieur à 120 mm n'était pas utilisable. Le choix des copeaux va être développé par la suite. 18 des 28 grumes ont pu être utilisées et fournir 34 billons. Les billons ont été sélectionnés sur base de leur diamètre, de leur rectitude et de l'absence de nœuds au niveau de l'aboutage. Ce dernier critère se base sur la norme EN 15497 qui préconise que l'aboutage ait lieu à une distance d'au moins 3 fois le diamètre du plus gros nœud le plus proche de la zone d'aboutage [42]. Ces 34 billons permettent en les assemblant deux par deux, pour former des grumes reconstituées, d'effectuer 17 essais d'aboutage. Le principe de la grume reconstituée est illustré à la Figure 7.1. Les grumes reconstituées ont été réalisées de manière à ce qu'elles ne soient pas composées de deux billons provenant d'une même grume.

### 7.2 Classement visuel

Le classement visuel est le même que celui utilisé lors des essais de résistance en flexion du bouleau non-abouté. Il est détaillé dans le Chapitre 5 au Tableau 5.1.

### 7.3 Groupes

Comme il n'était pas possible d'avoir des billons de diamètres identiques en raison de la variabilité naturelle des diamètres des billons, il a été décidé de conserver un élanement similaire pour chaque billon afin de pouvoir effectuer des comparaisons entre ceux-ci. Cependant, au vu des essais à effectuer, il aurait été assez complexe d'avoir des longueurs différentes pour chaque billon. Par conséquent, il a été décidé d'effectuer 3 groupes de billons, repris dans le Tableau 7.1, avec chacun une même gamme de diamètres et une même longueur. Cette décision permet de conserver un élanement similaire pour tous les billons, même si celui-ci n'est pas rigoureusement identique et elle permet de faciliter les essais.

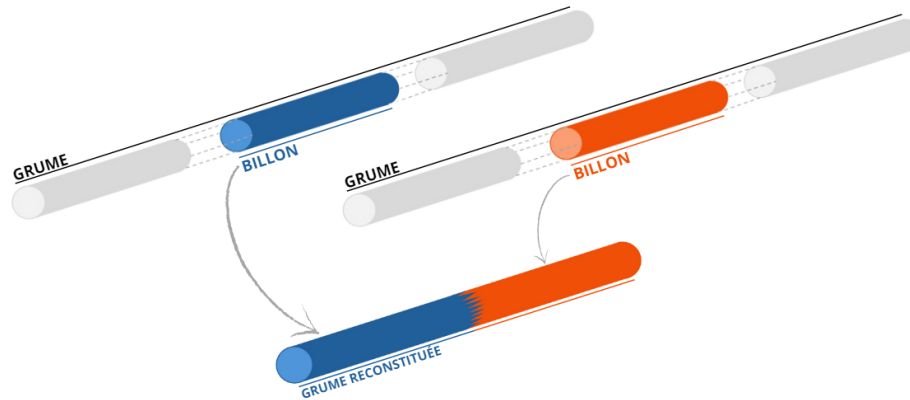


FIGURE 7.1 – Explication des termes billons, grumes et grumes reconstituées utilisés.

Groupe	Diamètre [mm]	Longueur [mm]
1	105 - 120	1140
2	90 - 105	1000
3	70 - 90	860

TABLEAU 7.1 – Groupes de billons des essais préliminaires.

## 7.4 Aboutage

Dans cette section, nous allons décrire toutes les étapes qui ont constitué la réalisation des aboutages. Mais, tout d'abord, nous allons discuter du choix de l'aboutage à entures multiple.

### 7.4.1 Choix de l'aboutage

Selon Kilpeläinen et al. (2011), un des principaux défauts du bouleau durant le sciage est la courbure [18]. Ce défaut est difficilement combinable avec une utilisation en structure en raison de la naissance d'efforts parasites pouvant découler de celles-ci. Afin de permettre l'utilisation de boudeaux de faible diamètre en structure, une des solutions possibles est de sélectionner des billons avec une relativement bonne rectitude et de les assembler afin d'en faire de plus grands éléments.

Après une analyse des différents assemblages existants, ayant été cité dans le Chapitre 3, l'assemblage qui a été retenu pour pallier cette problématique est l'aboutage à entures multiples, en raison de ses performances mécaniques et de son économie de matière, même si ce n'est pas le plus évident à usiner sur des bois non-équarris, ce qui était un des défis techniques de cette étude.

Au vu de la littérature mettant en avant les avantages de l'aboutage du bois vert (tels que ses performances mécaniques meilleures que celles de l'aboutage du bois sec ainsi que son absence de besoin de séchage excepté pour la mise en œuvre), il a été décidé d'étudier l'aboutage à entures multiples du bois vert [36, 49, 51].

### 7.4.2 Surfaces dégauchies

L'objectif de cette nouvelle utilisation des billons de bouleau de faible diamètre implique la plus faible transformation possible des billons. Néanmoins, l'usinage et la mise en œuvre sont facilités avec une surface de référence. Cette dernière permet aussi de s'assurer de la bonne concordance de deux billons au niveau de l'aboutage car leur diamètre ne sera pas parfaitement identique et leur périmètre encore moins. Un léger dégauchissement d'une face

a été conservé avec comme objectif d'obtenir une surface de référence pour l'usinage. Il est illustré à la Figure 7.2.



FIGURE 7.2 – Dégauchissement des billons avant l'aboutage.

### 7.4.3 Entures

Au vu du peu d'études sur le sujet dans la littérature et des préconisations assez disparates au sujet des longueurs d'entures optimales ou des autres caractéristiques, le choix de la géométrie de celles-ci n'a pas été évident. Nous avons tout d'abord décidé de respecter les préconisations de la norme EN 15497 à propos de la longueur des entures, minimum 10 mm, et de l'angle, maximum 7° [42].

Cependant, les longueurs d'entures les plus fréquemment citées dans la littérature sont celles situées entre 10 et 15 mm. Il est également affirmé par plusieurs auteurs que plus les entures sont longues, plus leur résistance mécanique est meilleure [37, 41, 44]. La longueur d'entures choisie a par conséquent été de 15 mm, ce qui est par ailleurs une longueur standard.

Les couteaux choisis, illustrés à la Figure 7.3, correspondant à cette dimension sont le modèle TG05FC05050 de la marque *Stark*. Ils ont une longueur d'enture de 15 mm, un pas de 3.8 mm ainsi qu'un angle de 6°, ce qui respecte la norme EN 15497 [42]. La géométrie des couteaux est illustrée à la Figure 7.4. Les deux couteaux sont fixés sur une toupie qui peut faire varier sa hauteur, ce qui leur permet d'abouter les éléments sur une hauteur de 120 mm en deux passes. Ce critère a été un facteur limitant dans le choix des billons.

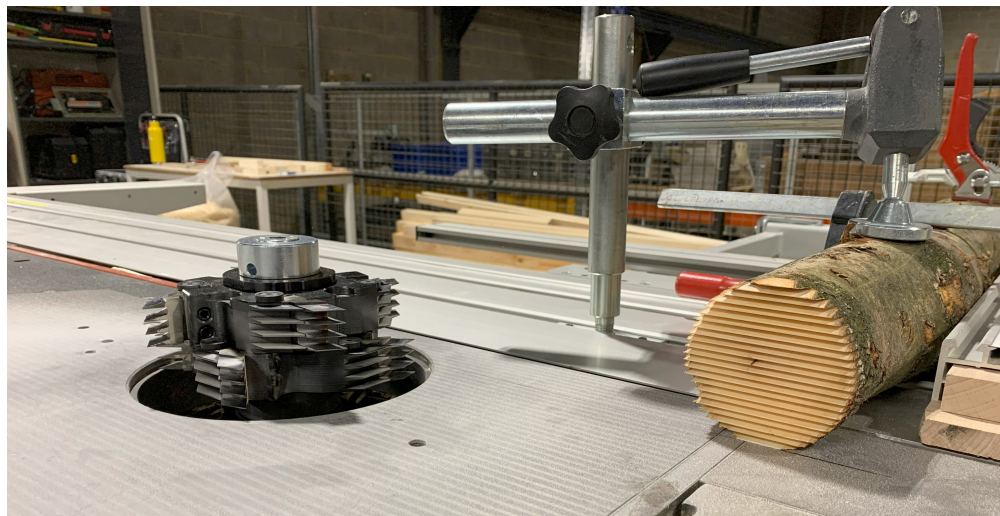


FIGURE 7.3 – Couteaux Stark TG05FC05050 utilisés pour l'usinage des entures.

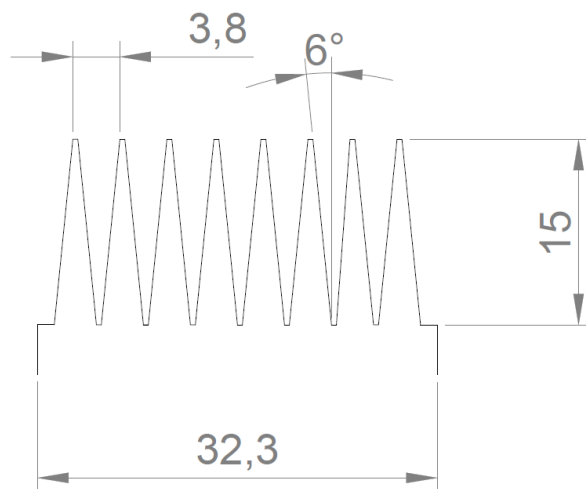


FIGURE 7.4 – Géométrie des couteaux pour l'aboutage à entures multiples.

Une fois les billons dégauchis et avant d'usiner les entures, les surfaces de chaque extrémité des billons ont été rafraîchies à la scie circulaire. Cette coupe a été effectuée pour que chaque billon ait des extrémités parfaitement perpendiculaires à son axe principal et dès lors également rigoureusement parallèles entre elles pour permettre un bon alignement lors du collage.

#### 7.4.4 Colle

Le choix de l'assemblage s'étant porté sur un aboutage vert à entures multiples, une colle adaptée a dû être trouvée. La colle mise au point par le projet ABOVE à base de polyuréthane a été choisie.

Il s'agit de la colle RPM 1127 de la marque *Everad*. Selon les recommandations du fabricant, elle doit être appliquée sur un bois avec une humidité entre 25 et 75%. La quantité de colle à appliquer doit se situer entre 150 et 350  $g/m^2$ . Pour son collage, il est préconisé d'appliquer une pression de 0.2 à 0.8  $MPa$  à la normale des

entures pendant une durée de 4 heures à 20°C et 65% d'humidité [73].

#### 7.4.5 Dispositif de serrage

Pour le collage, il a fallu mettre en place un système de serrage répondant à plusieurs critères :

- Contrôle visuel constant sur l'aboutage durant le collage
- Flexibilité du dispositif vis-à-vis des différentes gammes de longueurs, de diamètres et des défauts des grumes reconstituées tels que les courbures et les nœuds tout en conservant un bon alignement des éléments
- Résistance à la force maximale à appliquer, c'est-à-dire 100 *kN*
- Maintien de la pression durant 4 heures
- Dispositif utilisable par une seule opératrice et facile à mettre en place

Pour répondre à ces critères, plusieurs possibilités ont été étudiées. Il a fallu tout d'abord choisir un dispositif de serrage. Ce choix s'est tourné vers un cric hydraulique avec une cellule de force en raison de la possibilité de pouvoir constamment contrôler l'intensité de la force, de pouvoir maintenir la force pendant toute la durée du serrage ainsi que de pouvoir l'utiliser facilement seule. Le cric a été mis en place de manière à pouvoir régler sa hauteur pour pouvoir ainsi adapter le dispositif aux différents diamètres des billons.

La question du blocage des grumes reconstituées s'est également posée pour éviter que ces dernières ne s'écartent de leur position initiale durant l'application de la force. Plusieurs techniques ont été étudiées. Le dispositif retenu est illustré à la Figure 7.5. La technique choisie consiste à placer des équerres d'un côté des grumes reconstituées et de positionner de l'autre côté un profilé en L fixé au plancher du laboratoire. Des équerres ont été fixées à l'aide de serre-joints au profilé en L afin de maintenir les grumes reconstituées verticalement. Cette technique répond bien aux critères de la flexibilité des variations des grumes reconstituées et permet de garder un contact visuel constant.

Pour bloquer la grume reconstituée à l'extrémité opposée au cric hydraulique, des lourds blocs en métal ont été mis en butée contre des éléments fixés au plancher. Lors d'un essai, en raison de l'intensité de la force appliquée par le dispositif, ces blocs ont commencé à se soulever : un profilé a donc été mis en place au-dessus de ceux-ci et fixé au plancher afin de s'assurer du maintien parfait de ceux-ci.

#### 7.4.6 Paramètres de serrage

Selon les recommandations du fabricant de la colle, la pression appliquée à la normale des entures doit être située entre 0.2 et 0.8 *MPa* [73]. En prenant en compte la géométrie choisie, la pression à appliquer à la normale de la section de la grume reconstituée doit se trouver entre 1.9 et 7.65 *MPa*. Ces valeurs sont assez cohérentes avec celles trouvées dans la littérature (voir Section 3.2.2. Cependant, pour les premiers essais, il a été décidé de suivre les recommandations de la norme EN 14080 à ce sujet qui préconisent une pression 10 *MPa* pour des entures de 15 mm [74].

La norme recommande un temps d'application de la pression d'au moins une seconde. Cependant, la fiche technique de la colle utilisée recommandait un temps de serrage de 4 heures [73]. C'est ce dernier qui a été choisi.

En raison du dispositif de serrage utilisant un cric hydraulique, il n'a pas été possible de maintenir la pression exacte et constante de 10 *MPa* durant les 4 heures de serrage. Il a par conséquent été décidé de maintenir une pression rigoureuse de 10 *MPa* durant les 30 premières minutes étant donné que le temps de prise de la colle est de 35 minutes [73] et d'accepter que la pression diminue ensuite graduellement au fil du temps. Cela permet de garder un temps pour la mise en place de la grume reconstituée dans le dispositif une fois la colle appliquée.



FIGURE 7.5 – Dispositif de serrage des essais préliminaires

## 7.5 Essais physiques et mécaniques

### 7.5.1 Choix des essais

La norme EN 15497 au sujet des bois de structure avec des aboutages à entures multiples préconise une série d'essais afin de vérifier les performances et exigences minimales de fabrication d'un aboutage [42] :

- Résistance mécanique
  - Propriétés mécaniques de l'aboutage : module d'élasticité, résistance à la flexion, résistance à la compression, résistance à la traction et résistance au cisaillement
  - Propriétés du bois : résistance, rigidité et masse volumique du bois
  - Vérification de la géométrie
- Résistance au collage
- Durabilité de la résistance au collage
- Durabilité vis-à-vis des attaques biologiques
- Résistance au feu

- Réaction au feu
- Dégagement de formaldéhyde et d'autres substances dangereuses

Comme ce mémoire se concentre sur des essais préliminaires pour analyser la faisabilité de l'aboutage de billons de bouleau de faible diamètre, seule une petite partie des essais recommandés par la norme EN 15497 cités précédemment ont été effectués. Ces essais choisis se concentrent principalement sur les propriétés mécaniques de cet assemblage et plus particulièrement sur la flexion qui est assez bien représentative de la résistance d'un aboutage. La résistance à la flexion 4 points et le module local d'élasticité ont été testés selon la norme EN 408 avec les adaptations de la norme EN 15497 [42, 69].

En raison du choix effectué d'abouter le bois vert, le taux d'humidité dans le bois à différents moments du processus d'essais a été mesuré via la méthode de dessiccation recommandée par la norme EN 13183-1 [75]. La mesure de la masse volumique a également été effectuée selon la norme EN 14251 [76].

### 7.5.2 Résistance en flexion

L'essai de résistance en flexion 4 points a été réalisé en respectant le plus possible la norme EN 408, tout comme les essais de résistance en flexion non-aboutés du Chapitre 5. Les essais sur des grumes reconstituées ont été réalisés de la même manière que les précédents à l'exception des appuis.

Selon la norme EN 408, les appuis doivent se situer à une distance correspondant à 18 fois la hauteur de la section avec l'aboutage centré. C'est le diamètre moyen des billons qui a été considéré, mais celui-ci a été moyenné à l'ensemble de chaque groupe de billons par facilité pour les essais tout en respectant la norme qui préconise une distance de  $18h \pm 3h$  entre les appuis. Par contre, au niveau de la distance entre points d'application de la force, la norme préconise une distance de 6 fois la hauteur sans tolérance, c'est par conséquent évidemment ce qui a été effectué en prenant une distance de 6 fois le diamètre moyen.

### 7.5.3 Le module local d'élasticité en flexion

Pour la mesure du module local d'élasticité, la question du choix du diamètre utilisé s'est posée. Comme la mesure doit être effectuée sur une distance centrée sur l'aboutage de 5 fois le diamètre, la décision prise a été de considérer le diamètre comme la moyenne des diamètres des billons au niveau de l'aboutage. Cette distance n'a pas pu être appliquée parfaitement, car la norme n'accepte pas de tolérance et que le dispositif mis en place ne permettait pas d'obtenir une telle précision sur des billons avec des diamètres si variables. Par conséquent, une mesure moyenne de 5 fois le diamètre a été considérée pour chaque groupe.

### 7.5.4 Dispositif d'essais

Un seul dispositif d'essai a été mis en place pour tester la résistance en flexion et le module local d'élasticité en flexion puisque ces deux essais peuvent être effectués simultanément.

Le dispositif d'essai est illustré à la Figure 7.6. Il est similaire à celui utilisé pour les essais de flexion du bouleau non-abouté, mis à part le rajout de la partie permettant de mesurer la flèche locale. Le placement du laser permettant de mesurer la flèche globale est illustré à la Figure 7.7.

Pour la mesure du module local d'élasticité, un dispositif, illustré à la Figure 7.8, a été mis en place avec un profilé en aluminium et un capteur LVDT permettant de mesurer la flèche locale à une précision de 0.1%. Le dispositif est mis en place de chaque côté de la grume reconstituée.

Pour pouvoir étudier l'influence de l'orientation des entures, la moitié des essais a été réalisé avec les entures perpendiculaires à la force appliquée et l'autre moitié avec les entures parallèles à la force appliquée.



FIGURE 7.6 – Dispositif d'essais en flexion.



FIGURE 7.7 – Placement du laser pour la mesure de la flèche.



FIGURE 7.8 – Dispositif de mesure du module local d'élasticité.

# Chapitre 8

## Résultats des premiers essais d'aboutage

### 8.1 Classement visuel

Le détail du classement visuel de chaque billon est repris dans l'Annexe A.2. Comme illustré sur la Figure 8.1, les billons n'ont pas une très bonne qualité visuelle étant donné que tous les billons sont de qualité "C" ou "D" et qu'aucun billon ne se trouve dans la classe "A" ou "B".

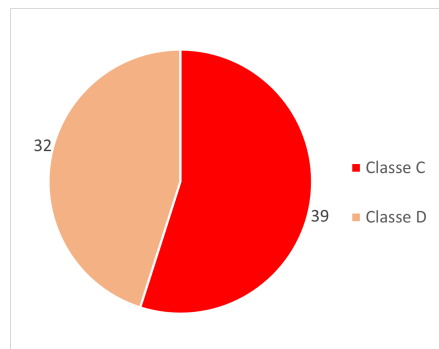


FIGURE 8.1 – Classes de qualité visuelle des billons de la deuxième campagne d'essais.

### 8.2 Aboutage

#### 8.2.1 Usinage des entures

L'usinage a donné des résultats assez qualitatifs comme la photo représentée à la Figure 8.2 en témoigne. Deux défauts sont mis en évidence : les brûlures sur les entures et les inégalités d'épaisseur entre les entures d'un même billon.

#### Brûlures

En raison d'une vitesse trop importante des couteaux et de leur double passage dans certaines entures, des marques de brûlures sont apparues sur la majorité des billons. Un exemple du billon B5-II est illustré à la Figure 8.3.



FIGURE 8.2 – Entures usinées.

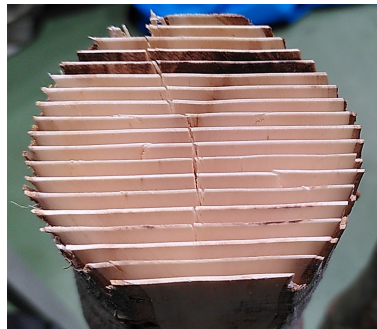


FIGURE 8.3 – Brûlures sur les entures.

Le problème avec ces brûlures est le risque de cémentation qui correspond à un phénomène de durcissement de la surface du bois durant un séchage artificiel. Nous avons testé le ponçage de ces brûlures avant le collage des essais pour y remédier. Après évaluation, il a été constaté que le grain de ponçage trop petit risquait de diminuer la porosité des rayons ligneux du bois et empêcherait la colle de pénétrer dans le bois. Le ponçage a par conséquent été abandonné, car le risque de diminuer la porosité des rayons ligneux était plus important que le risque de cémentation étant donné qu'il n'était pas prévu d'effectuer un séchage artificiel pour ces essais.

#### **Inégalité d'épaisseur entre les entures**

De légères irrégularités d'épaisseurs ont été remarquées entre les entures. Cela peut être expliqué par un défaut de réglage des couteaux ou par des déplacements minimes des billons lors de l'usinage comme le maintien de ceux-ci était imparfait. Nous avons pris contact avec le fournisseur des couteaux et malheureusement, il n'est pas possible de remédier à ce défaut. Ces différences sont visibles sur la Figure 8.3.

## Impact des nœuds

En raison de la décision de respecter la norme EN 15497 à propos d'une distance minimale (de 3 fois le diamètre de chaque nœud entre chaque nœud et l'aboutage)[42], l'occurrence du problème des nœuds lors de l'usinage des entures a été écarté lors de nos essais. Par contre, si cette norme n'est pas respectée, ce qui risque d'être le cas en industrie, cela pourrait avoir un impact sur la durabilité des copeaux ainsi que sur la résistance de l'assemblage. L'aboutage pourrait devenir plus compliqué également car il ne serait sûrement pas aussi propre en présence de nœuds et ceux-ci pourraient avoir un impact négatif sur la résistance de certaines entures [35].

## 8.2.2 Collage

### Humidité

Il s'est écoulé un laps de temps entre 3 et 4 mois entre l'exploitation des grumes et le début de l'usinage et de l'aboutage. Cette période a permis au bois de commencer à sécher naturellement. Avant l'usinage, le bois était en moyenne à 36.33 % d'humidité avec un écart-type de 10.32 %. La valeur minimale était de 18.54% et la valeur maximale de 52.06%. 8 billons étaient déjà en dessous des 25% d'humidité minimale recommandée pour l'application de la colle.

Il a été préconisé par les fabricants de la colle, d'attendre au minimum 24 heures entre l'usinage et le collage alors que la norme EN 15497 préconise 6 heures [42]. Malheureusement, d'un point de vue pratique, il n'était pas possible d'effectuer tous les aboutages systématiquement 24 heures avant leur collage comme chacun des 17 essais à effectuer durait 4 heures et qu'il n'était pas faisable de réaliser plusieurs essais en même temps. Il a été décidé d'effectuer tous les usinages des entures le même jour et ensuite, d'attendre 24 heures pour commencer le premier collage. 3 semaines se sont écoulées entre l'usinage des entures et le collage pour les essais réalisés les plus tardivement.



FIGURE 8.4 – Cellophane sur les entures.

Des ondulations des entures ont été remarquées sur quelques billons parmi les derniers à être aboutés. Elles sont probablement la cause d'une trop grande réhumidification ou d'un séchage. Ces ondulations sont illustrées à la Figure 8.5.

La teneur en humidité dans les entures a également été mesurée juste avant le collage à l'aide d'un humidimètre



FIGURE 8.5 – Ondulations des entures du billon B7-I.

parallèlement aux entures. Sur les 31 billons dont la teneur en humidité a été mesurée, seulement 6 se trouvaient au-dessus des 25% d'humidité minimum pour l'application de la colle, ce qui a dû avoir un impact non négligeable sur la qualité de l'aboutage. La teneur en humidité moyenne est de 18,08% avec un écart-type de 6,11%. La valeur minimale est de 9,8% et la valeur maximale de 30,6%. Notons que les 4 derniers billons qui ont été collés ont été réhumidifiés avec de l'eau versée sur les entures avant leur collage. 20 minutes se sont écoulées entre la réhumidification et le collage pour permettre à l'eau de pénétrer dans le bois. Ce n'était peut-être pas la meilleure technique étant donné que ce qui est intéressant c'est de réhumidifier la surface des entures, car la colle réagit avec l'eau présente dans les entures. Ceux-ci présentaient par conséquent une teneur humidité moyenne de 29,5%, ce qui a eu un impact sur la moyenne générale qui était à 16,38% d'humidité avant leur inclusion. Dans l'analyse de ces résultats, il a fallu prendre en compte les imprécisions de l'humidimètre qui n'a pas pu être utilisé correctement, car il doit être appliqué dans le sens du fil, ce qui n'est pas faisable pour mesurer l'humidité dans les entures. De plus, l'humidimètre est assez imprécis au-delà d'une humidité d'environ 30% comme il donne une humidité relative.

Après les essais de flexion, le taux d'humidité dans les billons a été déterminé avec la méthode de dessiccation selon les recommandations de la norme EN 13183-1 [75]. L'humidité moyenne obtenue était de 37,39% avec un écart-type de 12,97% et un minimum de 15,54%. La valeur moyenne est anormalement supérieure à celle obtenue avant l'usinage. Cela est probablement dû au fait que lors des premiers essais pour déterminer la teneur en eau des billons, l'échantillon à tester a parfois dû être sélectionné aux extrémités du billon qui était plus humides que les valeurs aux centres.

Malgré le fait que le taux d'humidité moyen des billons mesuré après les essais de flexion soit supérieur à 25%, la valeur moyenne mesurée dans les entures est problématique, car c'est la zone proche des entures et les entures qui doivent être humides pour réagir avec la colle. De plus, la valeur minimale de teneur en eau est inférieure de 10% à la teneur en eau minimale nécessaire pour la colle.

### Paramètres de serrage

La pression appliquée sur les grumes reconstituées durant les essais était de 10 MPa. Cette dernière impliquait une force assez conséquente pour le dispositif de serrage avec les gammes de diamètres les plus grandes. Ce dispositif a montré ses limites avec ces valeurs.

Suite à la présence d'excentricités, deux grumes reconstituées ont subi de grosses déformations liées au pressage durant les 30 premières minutes. Nous avons interrompu le maintien de la pression lorsque nous avons considéré que les déformations visibles risquaient d'endommager les grumes reconstituées de manière irréversible. Des déformations importantes se sont produites lors du pressage de l'essai 4, les grumes se sont soulevées de quelques centimètres comme illustré sur la Figure 8.6. Des déformations importantes en raison d'une courbure déjà présente

dans un des billons ont également été notées lors de l'essai 14, illustré à la Figure 8.7.

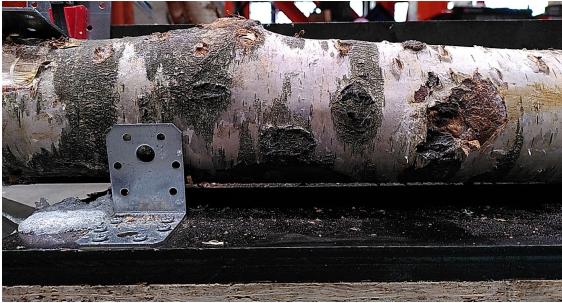


FIGURE 8.6 – Déformations lors du pressage de l'essai 4.



FIGURE 8.7 – Déformations lors du pressage de l'essai 14.

Le maintien de la pression durant les 30 premières minutes a été assez complexe pour les essais avec les quatre grumes reconstituées les plus grosses suite à la difficulté d'exercer une force aussi importante avec le cric hydraulique. En raison de fuites dans le système de pressage, la pression se relâchait très rapidement. Pour certaines grumes reconstituées, il n'a pas été possible d'atteindre les  $10\text{ MPa}$ , correspondant à des valeurs de force entre  $90$  et  $100\text{ kN}$ , à cause de ce relâchement de pression. La valeur maximale atteignable du cric hydraulique est de  $100\text{ kN}$ . Les essais des plus gros diamètres de grumes reconstituées sont les essais 1 à 4 représentés à la Figure 8.8. Pour les essais du groupe de grumes reconstituées de moyenne taille, la pression a été maintenue constante (à  $10\text{ MPa} \pm 2,5$ ), le relâchement de la pression étant plus faible. Pour les essais du groupe de grumes reconstituées de plus petite taille, la pression a été encore mieux maintenue (à  $10\text{ MPa} \pm 0,8$ ).

Comme illustré sur le graphique à la Figure 8.8, la pression ne se trouve jamais au-delà de  $6\text{ MPa}$  après les 4h de serrage. Pour certains essais, cette dernière est même en dessous d' $1\text{ MPa}$ . Sur le graphique, certaines mesures n'ont pas pu être prises au bout des 4 heures et ont dû être extrapolées. Il s'agit des essais 5, 7 et 12 extrapolés respectivement après 200, 180 et 52 minutes.

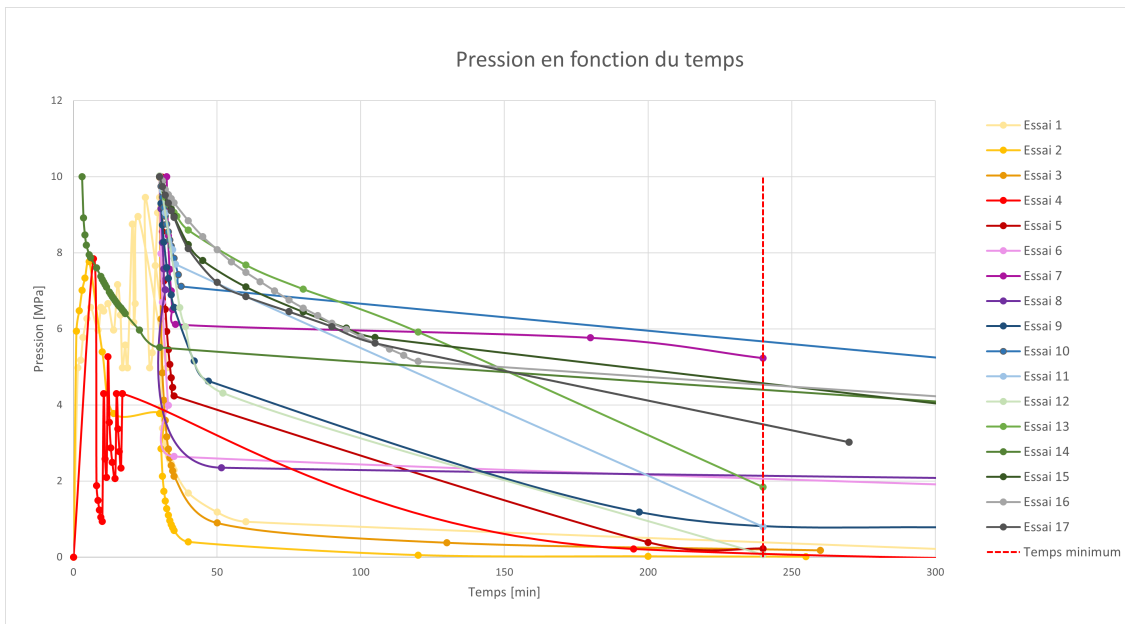


FIGURE 8.8 – Pression en fonction du temps.

### 8.3 Modes de rupture

Les ruptures de tous les essais se sont déroulées dans l'aboutage selon un mode de rupture 1, c'est-à-dire que la rupture s'est produite le long de la ligne de colle avec moins de 70% de bris dans la fibre de bois [39]. Trois ruptures sont illustrées à la Figure 8.9.

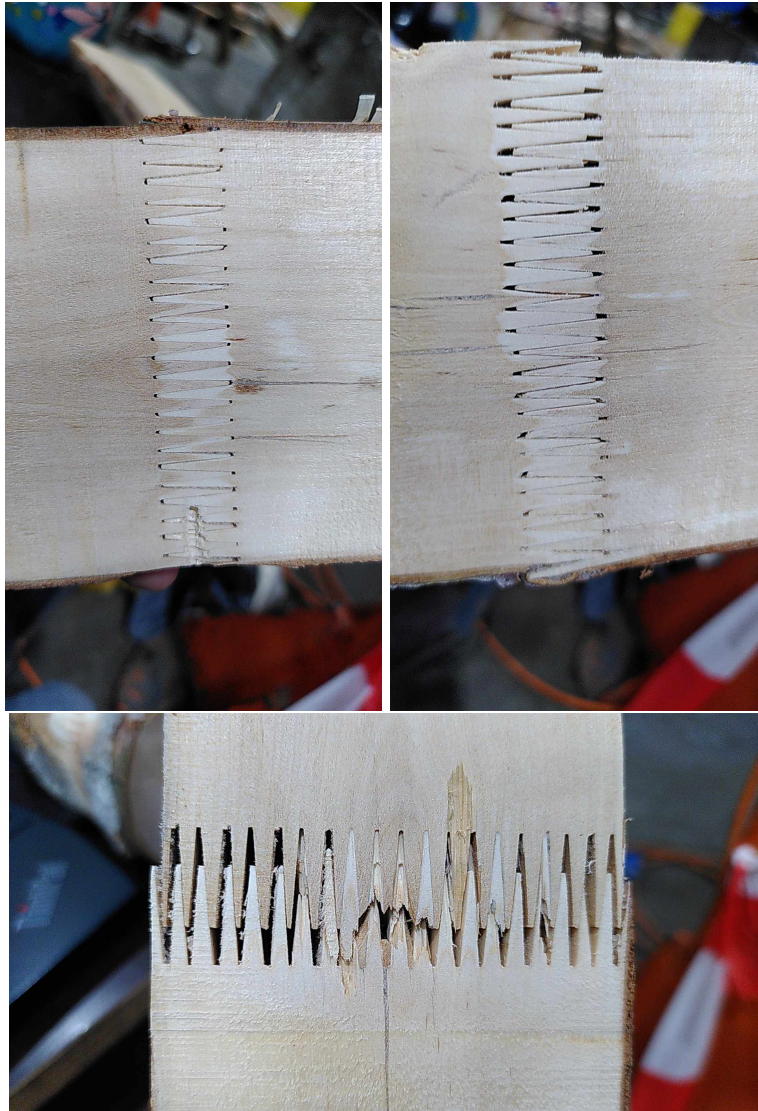


FIGURE 8.9 – Ruptures des essais 6, 8 et 11

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat.

1. Premièrement, les taux d'humidité des grumes utilisées étaient plus bas que les valeurs recommandées pour la mise en œuvre de la colle. Cette dernière recommande des valeurs de teneur en humidité entre 25 et 75% et les entures étaient en moyenne à 18.08% d'humidité.
2. Un facteur qui a pu également influencer les modes de rupture de l'aboutage est le temps entre le pressage et l'essai de flexion. Il a été recommandé par les fabricants de la colle d'attendre minimum 5 jours avant d'effectuer les essais de flexion. Ce temps a été respecté, mais il aurait probablement été bénéfique d'attendre

plus de temps que le temps minimum pour être certain que la colle ait bien polymérisé. Un passage des grumes reconstituées dans un four de séchage pourrait également être bénéfique et contrer ce facteur.

3. Un autre facteur pouvant influencer la performance de l'aboutage est la pression. Une pression trop élevée, comme c'est très probablement notre cas avec une pression de  $10\text{MPa}$ , peut induire une pénétration trop importante de la colle dans le bois qui engendre alors une ligne de collage où il n'y a plus suffisamment de colle. Cette pénétration dépend aussi de la viscosité de la colle qui va faciliter ou non la pénétration [46] ainsi que de la perméabilité du bois [19].
4. Finalement, l'alignement des grumes était probablement parfois imparfait et cela a pu avoir un impact sur la qualité des aboutages. En effet, si l'alignement des grumes n'est pas parfait lors du collage, certaines entures risquent de ne pas être bien emboîtées, ce qui provoque un risque de faiblesse dans l'aboutage.

## 8.4 Essais mécaniques

### 8.4.1 Résistance en flexion

Tout d'abord, une analyse des trois groupes de tailles de grumes reconstituées a été effectuée. Elle est illustrée par le graphique à la Figure 8.10. Le groupe 1 correspond aux grumes reconstituées de plus grandes longueurs et de plus grande gamme de diamètres et le groupe 3, aux grumes reconstituées de plus petites longueurs et de plus petite gamme de diamètre.

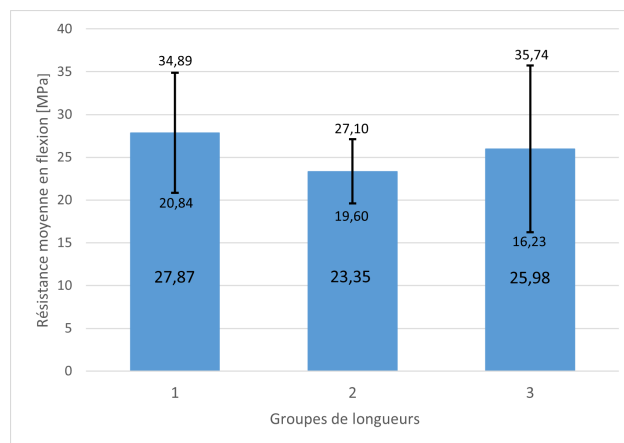


FIGURE 8.10 – Résistance moyenne en flexion en fonction de la taille des grumes reconstituées.

Sur la Figure 8.10, les contraintes moyennes de chaque groupe sont illustrées avec leurs écarts-types. Un test de Kruskal-Wallis a été utilisé, car les variances ne sont pas homogènes. Il a permis de définir qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les trois groupes de longueurs et de diamètres (Kruskal-Wallis :  $U=1,07$  ;  $p > 0.05$ ). Par conséquent, les 3 groupes peuvent être comparés ensemble sans différenciation.

La résistance moyenne obtenue pour des billons de bouleau non-aboutés est de  $53,32\text{MPa}$  et la résistance caractéristique calculée selon la norme EN 14358 est de  $42,14\text{MPa}$  [77]. Comme les essais ont tous eu une rupture dans l'assemblage, nous pouvons nous attendre pour nos essais à des valeurs de résistance plus faibles que celles obtenues pour les grumes de bouleau non-aboutées.

Cela s'est effectivement confirmé : la résistance moyenne des grumes reconstituées est de  $25,65\text{MPa}$  avec un écart-type de  $7,57\text{MPa}$ . La résistance caractéristique calculée selon la norme EN 14 358 est de  $10,92\text{MPa}$  [77]. L'évolution de la déformation en fonction de la contrainte des 17 essais est illustrée sur le graphique à la

Figure 8.11. Les valeurs obtenues sont encore loin des valeurs à atteindre pour obtenir un aboutage suffisamment résistant. Ces valeurs de résistance devraient idéalement être supérieures à la résistance du bouleau pour ne pas que l'assemblage soit considéré comme une faiblesse dans la grume reconstituée. Certaines améliorations ont déjà été énoncées dans la section à propos des modes de rupture et vont être développées dans la partie concernant les pistes d'amélioration.

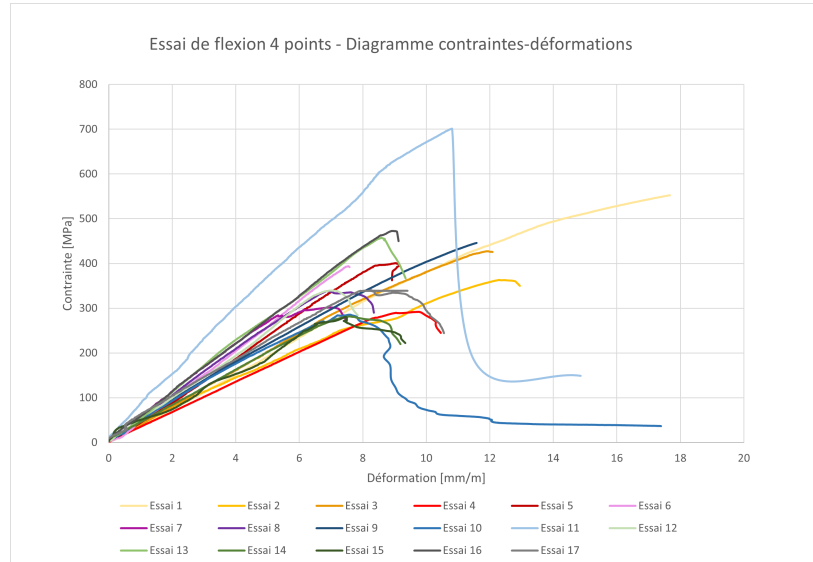


FIGURE 8.11 – Diagramme des contraintes en fonction de la déformation des 17 essais préliminaires.

L'impact de l'orientation des entures a pu être analysé et est illustré à la Figure 8.12. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.1. Pour les entures dites "horizontales", la force a été appliquée perpendiculairement aux entures et pour les entures dites "verticales", la force a été appliquée parallèlement aux entures. Les entures verticales ont une résistance en flexion de moyenne supérieure à celle des entures perpendiculaires de manière statistiquement significative (Mann-Whitney :  $U = 79,0$  ;  $p < 0,05$ ).

	Tous les essais	Entures verticales	Entures perpendiculaires
Moyenne	25,65 MPa	30,73 MPa	20,48 MPa
Écart-type	7,57 MPa	7,30 MPa	2,66 MPa
Percentile 5%	10,92 MPa	16,53 MPa	15,30 MPa

TABEAU 8.1 – Résistance à la flexion en fonction de l'orientation des entures.

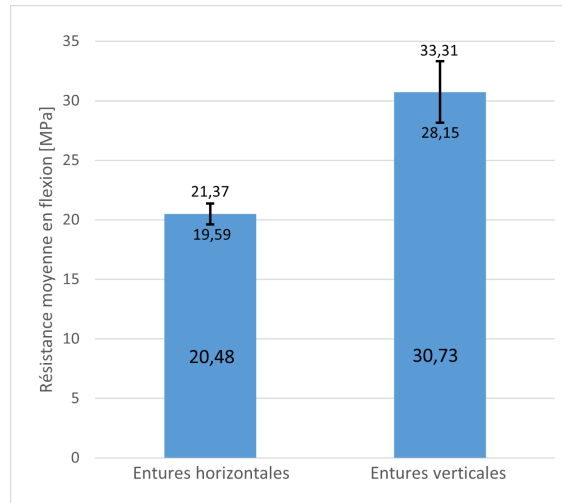


FIGURE 8.12 – Résistance moyenne en flexion de 17 essais de billons de bouleau aboutés en fonction de l'orientation des entures.

Lors des 2 derniers aboutages effectués, les essais 1 et 2, les entures avaient été réhumidifiées pour espérer une meilleure qualité de collage. Même si les résistances en flexion de ces deux essais se trouvent dans la moyenne haute des valeurs obtenues, cette modification ne semble pas avoir eu d'impact majeur sur la résistance de l'aboutage.

#### 8.4.2 Module local d'élasticité en flexion

Le module d'élasticité en flexion du bouleau est de  $14.000 \text{ MPa}$  selon Hout Info Bois [5]. Les valeurs obtenues sont légèrement inférieures, ce qui est cohérent puisque la teneur en humidité des billons est supérieure à 12%, la valeur de référence pour la mesure du module local d'élasticité et que l'augmentation de la teneur en humidité diminue la rigidité, comme déjà cité. Le module local moyen d'élasticité en flexion pour 17 essais se trouve à  $12.751 \text{ MPa}$  avec un écart-type de  $4.125 \text{ MPa}$ .

### 8.5 Influence du classement visuel

Pour analyser l'influence du classement visuel, chaque classe de qualité visuelle des deux billons des grumes reconstituées a été considérée. Cela a donné 5 nouvelles classes de qualité visuelle. Les résistances moyennes et écarts-types de ces éléments sont illustrés à la Figure 8.13.

Il n'y a pas de différence statistiquement remarquable entre ces nouvelles classes de qualité, ce qui n'est pas étonnant étant donné le faible nombre d'essais par nouvelle classe de qualité.

Cependant, les deux essais n'ayant pas supporté la pression appliquée lors du collage (en ayant des déformations non acceptables pour le dispositif), proviennent de la classe D. Mais, cet échantillon n'est pas assez grand pour tirer des conclusions à ce sujet.

### 8.6 Esthétique

Une des craintes de ce projet était portée sur le visuel obtenu de deux billons aboutés avec des circonférences non identiques. Après les premiers essais, cette crainte s'est vite dissipée. En effet, la différence de diamètre et de circonférence est masquée et les combinaisons de billons ont pu être assez bien effectuées avec le peu de billons disponibles (34) et sans abouter deux billons d'une même grume ensemble. Si cet assemblage s'effectue à plus

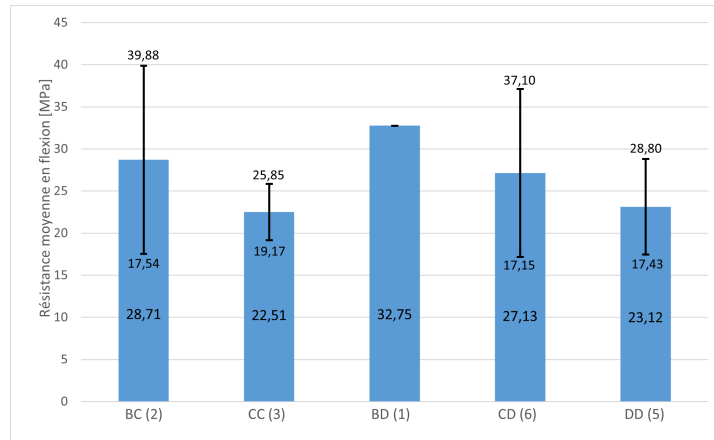


FIGURE 8.13 – Résistance moyenne en flexion en fonction des classes de qualité des deux billons composant chaque grume reconstituée.

grande échelle, les différences devraient être encore moins marquées au vu de la diversité des diamètres et des circonférences qui seront disponibles. Deux aboutages sont repris à la Figure 8.14 pour illustrer ces propos. Les photos ont été effectuées après les essais de flexion destructive et un ponçage permettant de mieux visualiser les entures.



FIGURE 8.14 – Aboutage des essais 10 (gauche) et 17 (droite) après la rupture et ponçage.

## 8.7 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, les essais en flexion ont donné des résultats assez faibles comparés à la résistance du bouleau testée dans le Chapitre 6 (10,92 MPa à la place de 42,1 MPa pour la résistance caractéristique). De plus, tous les essais ont eu leur rupture dans la zone d'aboutage. Beaucoup d'améliorations restent à faire pour augmenter la résistance de l'aboutage.

Ces essais ont mis en avant l'absence d'influence des groupes de catégories de diamètre et du classement visuel, même si ce dernier est peu représentatif dans ce cas. Cette campagne d'essais a également permis de mettre en avant l'influence de l'orientation des entures. Les entures verticales ont montré une résistance statistiquement plus grande que les entures horizontales.

# Chapitre 9

## Pistes d'amélioration

La résistance caractéristique en flexion du bouleau non-abouté obtenue via 14 essais était de  $42.14 \text{ MPa}$  et celle du bouleau abouté obtenue via 17 essais était de  $10.92 \text{ MPa}$ , soit 25.9% de la résistance caractéristique en flexion du bouleau non-abouté. Les bouleaux aboutés ont tous cassé dans l'aboutage. Or, la résistance de l'aboutage est censée être supérieure à celle du bouleau pour pouvoir considérer qu'un aboutage remplit sa fonction. Cependant, Derbal et al. (2015) affirment que la résistance en flexion des bois aboutés est toujours inférieure à celle du bois en raison de la qualité très variable des aboutages. Cette dernière peut-être due à plusieurs facteurs comme le séchage hétérogène, le profilage imprécis des entures ou un défaut de pression de serrage lors du collage [35]. Cependant, selon Laca-Bonegra et al. (2017), l'aboutage des feuillus n'atteint jamais la résistance du bois [41]. Malgré ce constat, il reste une marge d'amélioration importante pour augmenter la résistance caractéristique en flexion du bouleau abouté à l'état vert.

Selon Avila (2003), plusieurs facteurs ont un impact sur la résistance mécanique d'un aboutage : la masse volumique, l'état des outils, le type d'adhésif, le temps de durcissement de l'adhésif, le niveau de pression de l'assemblage et sa durée, l'orientation des entures dans la pièce, la géométrie des joints et l'effet de la pression de collage [39]. Ces facteurs peuvent tous être analysés afin d'améliorer les performances de l'aboutage ainsi que d'optimiser le procédé d'aboutage. Dans ce chapitre, nous allons analyser plusieurs des facteurs cités par Avila (2003) ainsi que d'autres pertinents pour cette étude.

### 9.1 Géométrie des entures

D'après Régis Pommier, responsable scientifique des projets ABOVE, "Aboutage du Bois Vert", ce qui est préconisé dans le cas d'aboutage à l'état vert sont des entures les plus courtes possible. Par ailleurs, selon plusieurs auteurs, plus les entures sont longues, plus la résistance en flexion de l'aboutage est grande [37, 41, 44]. Dans notre étude, des entures de 15 mm de long ont été choisies. Il pourrait être intéressant de comparer cette longueur d'entures avec une plus grande, par exemple 20 mm, et une plus courte, par exemple 10 mm, afin d'analyser les résultats. Cela permettrait de mettre en évidence la longueur qui a un impact positif dans le cas de billons de bouleau aboutés à l'état vert.

### 9.2 Humidité

Un des problèmes principaux rencontrés lors des essais préliminaires est la teneur en humidité trop faible du bois lors du collage. La teneur en humidité recommandée par le fabricant de la colle est située entre 25 et 75% d'humidité. La teneur moyenne d'humidité dans les billons avant l'usinage était de 36.33%. Dans les entures avant le collage, cette dernière se situait à 18.08%. Cette situation est à proscrire pour les essais d'optimisation.

Pour éviter de faire à nouveau face à ce problème, une attention particulière doit être mise sur le temps entre le profilage des entures et le collage, mais aussi entre l'usinage et le collage. Ces périodes doivent être les plus courtes possible afin de limiter le séchage des bois. Peu de données sont disponibles sur la cinétique du séchage d'avivés de bouleau et encore moins lorsqu'il s'agit de bois ronds. Néanmoins, il semble raisonnable d'estimer qu'une période de maximum un mois entre la coupe et le collage suffit dans des conditions similaires à celles rencontrées lors des essais préliminaires. Selon les fabricants de la colle, la durée idéale entre l'usinage et le collage est de 24 heures. Cette durée est probablement facilement applicable dans le cas d'industries, mais dans le cas d'essais en laboratoire, elle l'est plus difficilement en raison de contraintes organisationnelles.

Pour augmenter l'humidité dans les entures, une solution est de les réhumidifier en les tamponnant avec une éponge mouillée juste avant le collage. Il est également possible de mettre les extrémités des billons dans un récipient rempli d'eau.

### 9.3 Souplesse des entures

La dernière modification proposée pour augmenter l'humidité pourrait également améliorer la souplesse des entures. En effet, l'humidité dans le bois améliore l'élasticité du bois [78]. Cette dernière est importante afin d'éviter les fissures dans les entures qui peuvent apparaître si les entures sont trop sèches, car le bois risque d'avoir un comportement plutôt fragile.

Pour améliorer la souplesse des entures, il est également recommandé que l'éponge mouillée soit tiède comme, selon Tiemann (1906), la souplesse augmente avec la température, particulièrement des feuillus [22]. Il a constaté que le coefficient de déformation  $s_{11}$  était plus grand à 50°C qu'à 25°C à des teneurs en humidité égales pour le bouleau jaune et le hêtre, ce qui signifie que l'augmentation de la température augmente la déformabilité du bois dans la direction tangentielle et diminue par conséquent la rigidité des entures [79]. Moutee (2006) met également en avant différents auteurs qui ont analysé le module de Young en fonction de la température et qui ont constaté que l'élasticité augmentait avec la température. Les études ont été effectuées jusqu'à des températures de 50°C [70].

### 9.4 Paramètres de serrage

La pression appliquée lors du serrage était trop importante pour certaines grumes reconstituées, qui ont subi dès lors des déformations irréversibles. Cette pression causant des déformations trop importantes s'explique par le principe de décomposition des forces. Comme il faut appliquer une pression maximale à la normale des entures, la pression appliquée sur la grume pour atteindre la pression voulue dans les entures peut dépasser la résistance en compression de la grume. Ce type de problème qui est également rencontré dans des chaînes de production.

Même si ce problème risque aussi de survenir avec des pressions plus faibles, il est nécessaire de trouver une pression plus optimale afin de réduire les risques de déformations irréversibles tout en conservant une pression suffisamment importante. La littérature ayant des avis assez variés, il n'est pas évident de trouver la pression "parfaite" pour ce cas précis, l'aboutage de grumes de bouleau à l'état vert.

Au niveau du temps de serrage, la pression à appliquer durant 4 heures induit un long processus de collage. En industrie, cette partie est généralement beaucoup plus rapide. Par exemple, dans la scierie Hoffman, le serrage est effectué en deux secondes, ce qui est un temps suffisant pour que les entures s'emboîtent et la pression n'est pas maintenue par après. Il serait intéressant d'analyser l'influence du temps de serrage afin de voir s'il est possible de l'optimiser pour rendre le processus de collage plus efficace et moins coûteux.

## 9.5 Dispositif de serrage

Pour rappel, le dispositif de serrage mis en place pour les essais préliminaires devait répondre à plusieurs critères :

- Contrôle visuel constant sur l'aboutage durant le collage
- Flexibilité du dispositif vis-à-vis des différentes gammes de longueurs, de diamètres et des défauts des grumes reconstituées tels que les courbures et les nœuds tout en conservant un bon alignement des éléments
- Résistance à la force maximale à appliquer, c'est-à-dire 100  $kN$
- Maintien de la pression durant 4 heures
- Dispositif utilisable par une seule opératrice et facile à mettre en place

Les deux premiers critères ont été respectés, mais les trois derniers ne l'ont pas été pour tous les essais. En effet, le dispositif a fait face à ses limites lors des pressions des plus gros éléments devant subir une pression correspondant à une force de 100  $kN$ , ce qui est la capacité maximale du cric hydraulique utilisé. En raison de la difficulté physique de l'utilisation du cric hydraulique au-delà de certaines pressions, cette pression était difficilement atteignable pour une personne seule, ce qui était un des critères auquel le dispositif devait répondre. De plus, le dispositif de serrage n'a pas permis de maintenir une pression constante principalement à cause de fuites avérées dans les circuits hydrauliques du cric. Dans le maintien de la pression constante, il faut également prendre en compte une légère diminution de la pression correspondant à la colle qui polymérise et qui reprend une partie de la pression appliquée.

Pour pallier cette problématique, une solution est d'utiliser un vérin qui permettrait d'atteindre plus facilement la pression requise et de la maintenir. Cependant, si une telle solution est retenue, un système permettant d'interrompre l'augmentation de la pression s'il y a une trop grande déviation des éléments devra être mis en place.

Un autre élément méritant une attention particulière est la déviation des éléments de bois sous une trop grande pression. En effet, le dispositif de blocage des grumes reconstituées à base d'équerres et d'un profilé métallique a montré des faiblesses sous les pressions les plus importantes. Plusieurs solutions sont possibles pour faire face à cela : le renforcement des équerres, l'utilisation de profilé métallique en "L" des 2 côtés des grumes reconstituées, la mise en place d'un plus grand nombre d'équerres, l'utilisation d'une sangle pour attacher la grume reconstituée au profilé métallique en "L",...

## 9.6 Alignement

Tout au long du processus d'aboutage, des imprécisions ont pu survenir au niveau de l'alignement des entures par rapport à l'axe des billons, mais aussi entre les billons aboutés ensemble. Ces imprécisions peuvent influencer la résistance de l'aboutage en ayant par exemple des entures qui ne s'emboîtent pas parfaitement. Elles sont alors un point faible pour l'élément abouté qui a plus de chance de rompre à cet endroit.

Pour améliorer cet alignement, il faut principalement agir à deux moments du processus d'aboutage. Tout d'abord, lors de l'usinage, il faut veiller à ce que les surfaces soient bien perpendiculaires à l'axe des billons, tout comme les entures. Ensuite, un alignement parfait doit être assuré et maintenu lors du collage en disposant les billons de sorte que leurs axes soient parallèles. Lors du collage, les extrémités des grumes reconstituées doivent aussi avoir leurs surfaces perpendiculaires soit à l'endroit où la pression est appliquée, soit à l'endroit où l'élément est bloqué.

## Quatrième partie

Troisième campagne d'essais : 36  
essais d'aboutage de grumes  
reconstituées de bouleau de faible  
diamètre à l'état vert et optimisation  
du procédé

# Chapitre 10

## Adaptation du matériel et des méthodes pour les essais d'optimisation du procédé

Pour l'optimisation du procédé d'aboutage, il a été décidé de se concentrer sur la pression appliquée lors du collage ainsi que sur la durée du serrage. L'objectif est de trouver la pression et la durée la plus optimale du pressage pour obtenir un aboutage suffisamment résistant par rapport à la résistance mécanique du bouleau, tout en économisant le plus de temps et d'énergie possible en vue d'une potentielle industrialisation du procédé.

### 10.1 Grumes de bouleau

Les grumes de bouleau proviennent d'une parcelle à Louvain-la-Neuve appartenant à l'UCLouvain. Les 72 billons proviennent de 45 grumes qui avaient des diamètres compris entre 50 et 125 mm et des longueurs d'environ 3 mètres.

### 10.2 Classement visuel

Le classement visuel est le même que celui utilisé lors des essais de résistance en flexion du bouleau. Il est illustré dans le Chapitre 5 au Tableau 5.1.

### 10.3 Groupes

En raison du peu d'arbres disponibles sur la parcelle, un quatrième groupe a été créé par rapport aux essais préliminaires avec des diamètres plus petits et par conséquent une longueur plus courte, afin de pouvoir effectuer tous les essais désirés. La classe de diamètre du groupe 3 a été adaptée en conséquence en passant d'un diamètre initialement compris entre 70 et 90 mm à un diamètre entre 75 et 90 mm. Les quatre groupes sont repris dans le tableau 10.1.

### 10.4 Aboutage

#### 10.4.1 Usinage des entures

L'usinage est resté identique à ce qui a été fait lors des essais préliminaires, à l'exception d'une amélioration notable dans l'alignement des billons. Pour ce faire, après le léger dégauchissement des billons, des traits ont été

Groupe	Diamètre [mm]	Longueur [mm]
1	105 - 120	1140
2	90 - 105	1000
3	75 - 90	860
4	60 - 70	720

TABLEAU 10.1 – Groupes de billons des essais d'optimisation.

effectués aux 2 extrémités de tous les billons. Ces traits marquent sur chaque section l'axe perpendiculaire à la face inférieure dégauchie passant par le centre de la section. À l'aide d'un laser, ces traits ont été alignés lors de la découpe afin d'usiner les entures le plus perpendiculairement possible à l'axe du billon défini par ses deux traits. La Figure 10.1 illustre l'alignement des traits lors d'une coupe de rafraîchissement des surfaces pour s'assurer de leur perpendicularité parfaite avec l'axe du billon. Le même principe a été suivi lors de la découpe des entures.



FIGURE 10.1 – Alignement du laser lors de l'usinage des entures.

#### 10.4.2 Humidité

Pour pallier le problème de l'humidité, les essais ont été mieux organisés avant la coupe afin que le temps entre la coupe et l'usinage, et la coupe et le collage soit le plus court possible. L'usinage a notamment été effectué en deux temps afin de limiter le temps où les entures demeurent usinées sans être collées, tout en impliquant une contrainte raisonnable pour le laboratoire.

Les entures des billons ont été humidifiées par une éponge humide et tiède avant d'être collées pour améliorer leur souplesse et augmenter leur teneur en humidité.

#### 10.4.3 Paramètres de serrage

Pour les paramètres de serrage, il a été décidé d'effectuer 9 combinaisons différentes de temps et de pression avec 4 essais par combinaison, ce qui correspond à 36 essais.

Pour ce qui concerne les pressions, la valeur de 10 MPa appliquée lors des essais préliminaires a été écartée comme il a été prouvé que celle-ci était trop grande pour l'aboutage du bouleau à l'état vert lors des essais préliminaires. Une pression légèrement plus petite, 8 MPa, a été choisie. Pour la pression minimale, nous nous sommes basés sur les valeurs présentes dans la littérature correspondant aux valeurs minimales, situées légèrement en dessous de 1 MPa [38, 55, 56]. Cette valeur de 1 MPa a donc été choisie. Une valeur intermédiaire de 5 MPa a également été choisie comme elle correspond aux recommandations données par Sterley (2012) [55].

Pour ce qui concerne les temps de serrage, le maintien d'une pression durant 4 heures a été conservé, bien que cela implique un temps assez long pour un collage, étant donné qu'aucun critère ne l'écartait. De plus, conserver une même durée que lors des essais précédents permet d'avoir le double avantage d'avoir une donnée de comparaison et de respecter le temps recommandé par les fabricants de la colle. À l'autre extrême, pour se rapprocher le plus possible des conditions retrouvées en industrie, un temps de serrage de 5 minutes a été retenu. Un temps intermédiaire d'une heure a également été choisi. Ces durées ont été mesurées à partir du moment où la valeur de la pression concernée était atteinte.

Un récapitulatif des 9 groupes de serrage est repris à la Figure 10.2.

Groupe de serrage	Temps [min]	Pression [MPa]
A	5	1
B	5	5
C	5	8
D	60	1
E	60	5
F	60	8
G	240	1
H	240	5
I	240	8

TABLEAU 10.2 – Groupes de serrage des essais d'optimisation.

#### 10.4.4 Dispositif de serrage

Comme illustré à la Figure 10.2, le dispositif de serrage a été repensé pour les essais d'optimisation selon les pistes d'amélioration développées dans le chapitre précédent. Parmi celles-ci, un vérin MTS 204.63 a été choisi pour exercer la pression à la place du cric hydraulique. Celui-ci comporte plusieurs avantages comparé au cric hydraulique. Il permet d'atteindre la pression attendue sans difficulté. Il est également plus précis et enregistre la force qu'il applique en fonction du temps, ce qui permet un gain de temps considérable lors des essais. Cependant, un système a été réfléchi afin d'éviter que le vérin n'applique la force sans prendre en compte les déformations qui peuvent avoir lieu dans les éléments aboutés. Pour cela, un déplacement maximum de 15 mm à partir du moment où la force appliquée atteignait 1 kN a été imposé dans le protocole de chargement. Ce nombre a été choisi pour permettre aux éléments de s'emboîter jusqu'au fond d'entures et pour pallier les éventuels espaces restant dans le dispositif avant la mise en pression. Une cellule de force a été fixée au vérin afin de pouvoir contrôler la force mise en œuvre.

Le vérin a été fixé sur une colonne fixée au plancher. Cette solution implique qu'il n'est pas possible de régler la hauteur du vérin en fonction du diamètre des grumes reconstituées. Pour pallier cette limitation, des planches de différentes épaisseurs ont été découpées afin de pouvoir jouer sur la hauteur de l'élément abouté. Cette solution implique cependant une moins grande précision de jeu de hauteur que le dispositif précédent étant donné que les hauteurs ont été ajustées en fonction des groupes et non de manière individuelle. Pour éviter que la force non centrée crée des moments parasites, un disque rotulé a été fixé à la cellule de force. Un disque avait également été fixé sur le précédent dispositif pour appliquer la force de la manière la plus uniforme possible, mais celui-ci

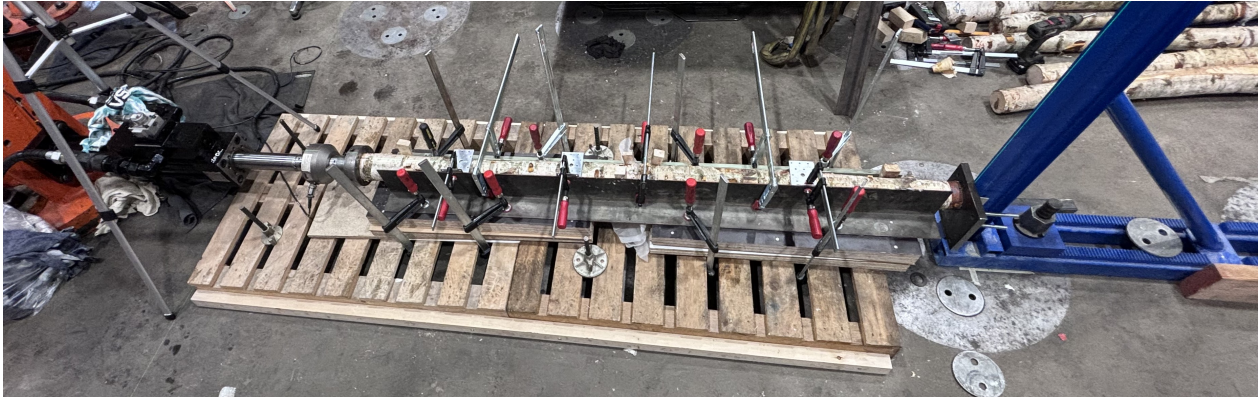


FIGURE 10.2 – Dispositif de serrage pour les essais d'optimisation.

n'était pas rotulé.



FIGURE 10.3 – Dispositif de serrage - Bracon.

Deux lots de planches ont été utilisés comme le décalage des entures entre les 2 billons implique une différence de hauteur de 1.9 mm. Ces planches ont été fixées à deux palettes à l'aide de serre-joints et fixées entre elles par un chevron et au plancher à l'aide de serre-joints. Pour bloquer les éléments de bois, le même profilé métallique en "L" que lors des essais préliminaires a été utilisé. Ce dernier a été découpé pour permettre son utilisation avec des grumes reconstituées plus courtes. De l'autre côté, des équerres ont tout d'abord été utilisées, mais celles-ci ne résistaient pas à la force appliquée et se sont rompues lors du deuxième essai effectué, elles ont par conséquent été renforcées dans un premier temps. Comme cela n'a pas suffi, et qu'elles se sont à nouveau rompues, elles ont été remplacées par un autre profilé en "L", aussi maintenu à l'aide de serre-joints. Étant donné que les grumes reconstituées n'ont pas une rectitude parfaite, des coins en bois ont également été utilisés pour bloquer les grumes reconstituées entre les profilés métalliques. Enfin, pour maintenir les éléments de bois verticalement, des équerres ont été fixées au plus haut profilé à l'aide de serre-joints.

Pour maintenir les éléments en butée, un bracon a été utilisé et fixé au plancher. Cependant, il a été remarqué que celui-ci reculait avec la force appliquée. Un deuxième élément de blocage a été mis en place pour empêcher le recul, il s'agit de cylindres emboîtés dans le plancher. Comme le bracon n'était pas assez large par rapport aux sections des grumes reconstituées, des tiges filetées ont été soudées sur une plaque métallique pour créer une plaque réglable en hauteur afin d'avoir un support de butée pour tous les essais. Le bracon, sur lequel est fixée la plaque métallique, est illustré à la figure 10.3.

Pour l'alignement des éléments avec le dispositif de serrage, un laser a été utilisé pour aligner les 4 traits situés à chaque extrémité des billons. La Figure 10.4 illustre l'alignement des éléments avec le laser. Les photos ont été modifiées pour faire ressortir la lumière verte du laser.



FIGURE 10.4 – Dispositif de serrage - Alignement des billons.

## 10.5 Essais non-destructifs en flexion

Pour les essais d'optimisation, il a été décidé d'effectuer des essais non-destructifs à la place des essais destructifs précédemment mis en œuvre afin de pouvoir utiliser les échantillons pour d'autres analyses dans la suite de ce mémoire. Parmi celles-ci, l'analyse du comportement au séchage est une question préoccupante pour des bois aboutés à l'état vert. Les essais non-destructifs permettent d'effectuer des essais avant et après le séchage et de les comparer. Ils permettent aussi une meilleure optimisation des éléments en considérant la résistance réelle et non une résistance caractéristique. Cette dernière peut sous-estimer fortement la résistance réelle des éléments par sécurité en garantissant que 95% des éléments auront une résistance plus importante.

### 10.5.1 Protocole non-destructif

Pour ces essais, un protocole basé sur celui mis en place par le projet ROBOTRONC a été utilisé et est illustré à la Figure 10.5. Ce dernier est composé de 4 étapes principales :

1. Soumettre les grumes reconstituées à un premier cycle de mise en place jusqu'à une flèche prédéterminée,  $\delta_{CT}$ , correspondant à une utilisation "normale et régulière" des billons pendant toute leur vie. La force atteinte par le vérin pour atteindre cette flèche est notée  $F_{verin}^{\delta_{CT}}$ .
2. Soumettre les grumes reconstituées à un premier set de 5 cycles de chargement-déchargement jusqu'à une flèche,  $\delta_{CT}$ . La force atteinte par le vérin pour atteindre cette flèche est aussi notée  $F_{verin}^{\delta_{CT}}$ .
3. Soumettre les grumes reconstituées à une charge théorique  $F_{ELU}$  correspondant à la force maximale atteinte par le vérin lors des 6 cycles précédents multipliée par un facteur 2.4375, expliqué par la suite. Cette force correspond à la charge théorique de la combinaison de charge ELU rare qui ne devrait jamais être dépassée pendant la vie de l'ouvrage.
4. Soumettre les grumes reconstituées à un deuxième set de 5 cycles de chargement-déchargement jusqu'à une flèche,  $\delta_{CT}$ .

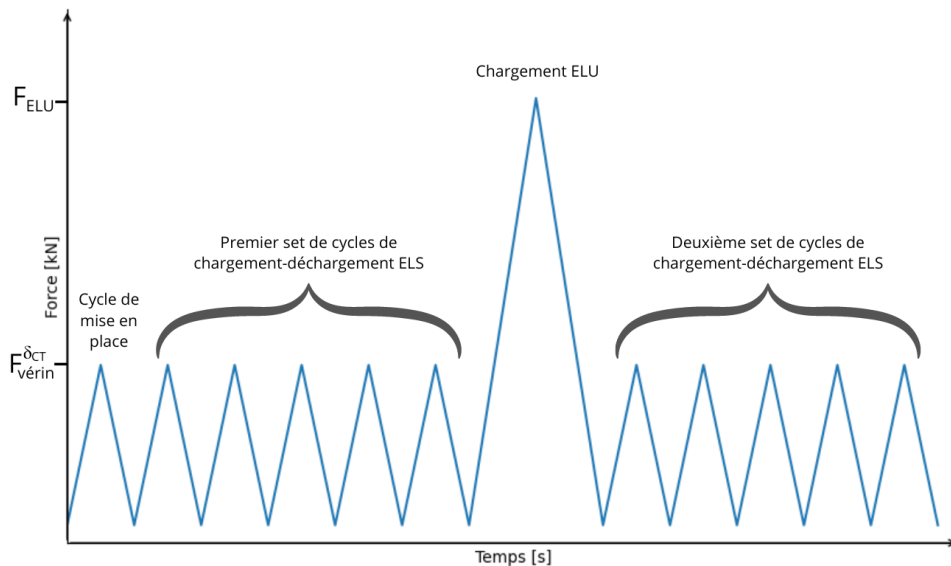


FIGURE 10.5 – Principe du protocole de flexion non-destructive.

Le protocole qui a été utilisé est illustré plus en détail à la Figure 10.6.

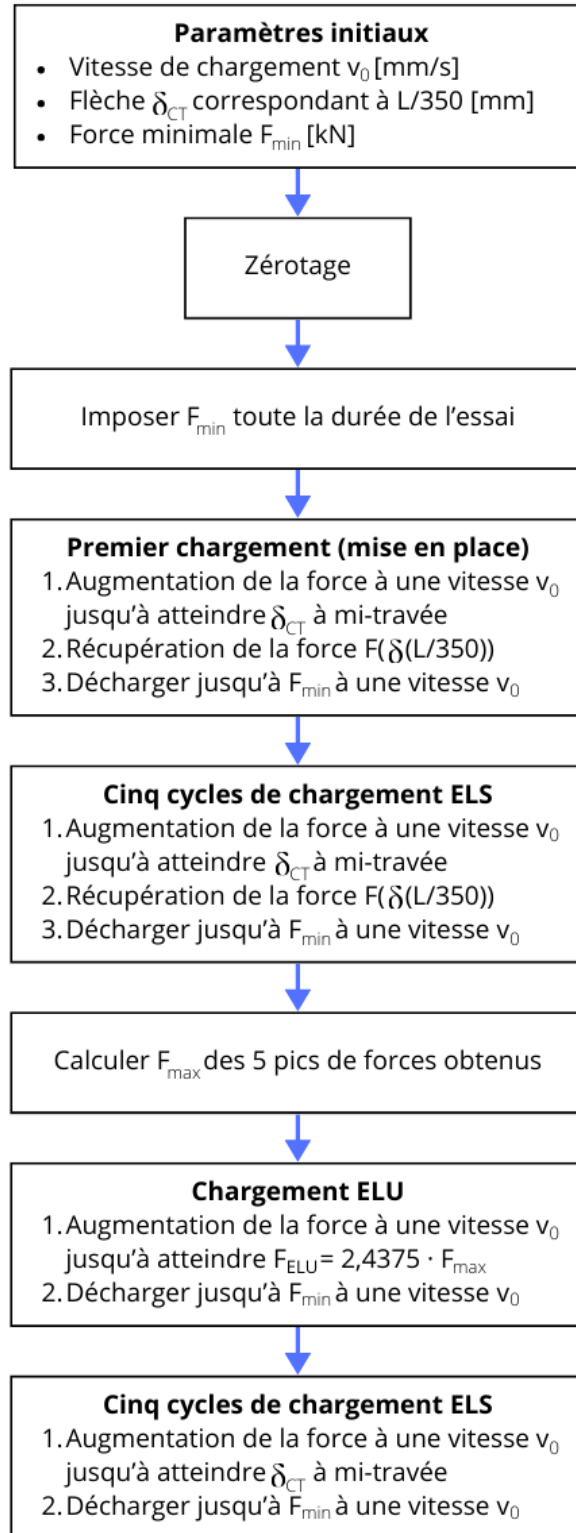


FIGURE 10.6 – Protocole de flexion non-destructive.

Pour bien comprendre ce protocole, il est nécessaire de discerner les notions d'État Limite de Service (ELS) et d'État Limite Ultime (ELU).

- L'État Limite de service (ELS) correspond à un état limite garantissant le bon fonctionnement de la structure, des éléments présents et du confort des usagers ainsi que l'apparence de l'ouvrage. Pour cela, il est nécessaire que la structure se déforme peu sous des conditions de chargements habituelles, dites "de service", mais aussi que la structure ne subisse pas de vibration ou d'altération de surface trop importantes. L'ELS peut être considéré selon 2 temporalités : le court terme qui comprend la flèche instantanée qui s'annule quand l'action disparaît et le long terme qui comprend la flèche qui persiste même lorsque l'action disparaît. L'état limite de service d'une structure en bois se vérifie sur base d'une flèche maximale [80, 81].
- L'État Limite Ultime (ELU) correspond à la charge maximale que peut supporter la structure sans compromettre la protection des usagers et de la structure [81, 82]. C'est pourquoi l'ELU correspond à une force 2.4375 fois plus grande que la force appliquée par le vérin à l'ELS. Le facteur 2.4375 sera expliqué par la suite.

Le protocole utilisé pour cette étude se base uniquement sur l'ELU et l'ELS à court terme (ELS,CT). Cependant, le critère d'ELS à long terme (ELS,LT) peut être calculé mathématiquement sur base du critère ELS à court terme, mais ne sera pas développé dans ce travail comme il a été décidé de se concentrer dans un premier temps sur l'ELU et l'ELS,CT.

Ce protocole demande 3 paramètres en entrée :

- La force minimale à appliquer sur les grumes reconstituées durant tout l'essai,  $F_{min} = 0.1kN$
- La vitesse de chargement,  $v_0$  [mm/s]. La norme EN 408 préconise une vitesse égale à  $0.003 \cdot h$  pour les éléments équarris [69]. Pour atteindre la même flèche sous des conditions d'appuis et de charge identiques, la hauteur d'une section équarrie carrée doit valoir 0.88 fois le diamètre d'une section circulaire. La vitesse de chargement utilisée dans ce protocole a donc été  $v_0 = 0.003 \cdot (0.88 \cdot \phi)$ .
- La flèche à mi-portée,  $\alpha = \delta(L/350)$ . La flèche pour les cycles de chargement-déchargement à l'ELS a été fixée à  $L/350$  sur base du projet ROBOTRONC qui a déterminé une valeur comprise entre  $L/300$  et  $L/500$  pour répondre aux exigences de court terme de l'Eurocode 5 [83]. Un compromis a été trouvé entre une flèche très faible,  $L/500$ , qui peut impliquer un endommagement plus difficilement détectable et une flèche très grande,  $L/300$  qui correspond à un projet peu exigeant. Pour la mesure de la flèche, une plaquette métallique circulaire a été collée pour s'assurer d'avoir une surface plane pour les mesures effectuées par le laser. Cette disposition est illustrée à la Figure 10.7. Cette amélioration a été apportée par rapport aux deux séries d'essais précédentes dans le but d'amener plus de précisions.

Le facteur 2.4375 par lequel est multiplié  $F_{verin}^{\delta_{CT}}$  pour obtenir  $F_{ELU}$  provient de [60] :

$$\frac{1.5 \cdot \gamma_m}{k_{mod}} = 2.4375$$

Avec les valeurs  $\gamma_m = 1.3$ , comme le cas considéré est du bois massif dans un calcul ELU, et  $k_{mod} = 0.8$  en considérant des charges d'exploitations. Il aurait été plus rigoureux de prendre  $k_{mod} = 0.6$ , cependant, cela impliquerait un facteur de 3.25 à la place de 2.4375. Après analyse des essais préliminaires, un tel facteur aurait mené à la rupture de plusieurs essais préliminaires. Même si des améliorations ont été apportées, il était plus sécuritaire de considérer  $k_{mod} = 0.8$  dans un premier temps afin de pouvoir analyser les améliorations [83]. Le choix s'est dès lors porté sur cette dernière valeur. Une explication plus développée de ce facteur se trouve à l'Annexe B.

### 10.5.2 Critères de rejet

Un des défis des essais non-destructifs et plus particulièrement du proof-loading, est la détection d'endommagement dans l'élément testé. Pour cela, trois critères mis au point dans le projet ROBOTRONC ont été légèrement adaptés pour les utiliser dans le cadre de cette étude.



FIGURE 10.7 – Plaquette métallique collée sur les grumes reconstituées pour s'assurer d'une bonne mesure de la flèche globale avec le laser.

- **Sauts marqués dans la courbe force-déformation** : Le projet ROBOTRONC a constaté des craquements audibles lors du chargement ELU qui sont le signe de rupture de certaines fibres, majoritairement périphériques. Cependant, des craquements plus bruyants se sont aussi fait entendre et ceux-ci sont signe de rupture de fibres plus importante dans le transfert des charges de la grume reconstituée en flexion. Ces craquements sont visibles sur la courbe force-déformation, ce sont des sauts dans la courbe, comme illustré sur la Figure 10.8 représentant l'essai II.4.

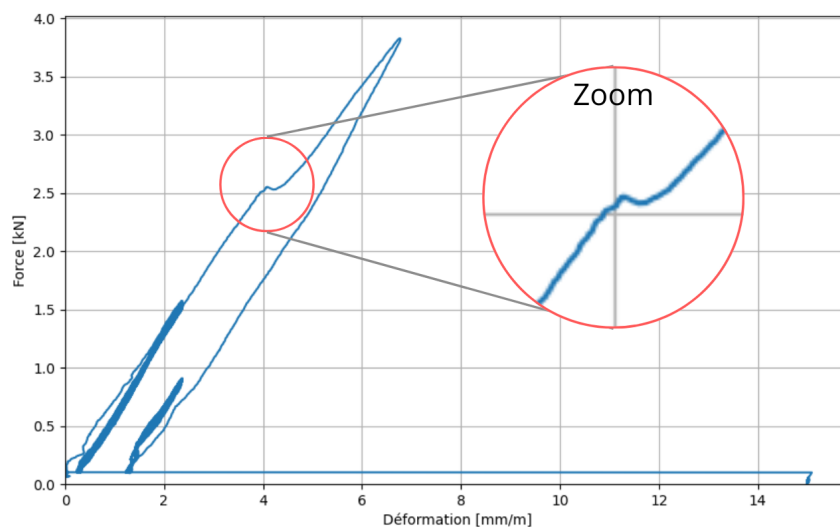


FIGURE 10.8 – Critère de sauts dans la courbe force-déplacement des essais non-destructifs en flexion - Essai II.4.

- **Absence de convergence de la raideur pendant le deuxième set de cycle ELS** : Les pics de force ELS correspondent à la force appliquée par le vérin pour atteindre une même flèche  $L/350$ . Si ces pics ne convergent pas lors du deuxième set de cycles, cela signifie que le chargement ELU a modifié de manière irréversible la raideur de la grume reconstituée. Ce critère est illustré sur la Figure 10.9 représentant l'essai III.7. Sur ce graphique, les pics de force sont tarés sur le premier pic de force du premier set de cycles ELS pour faciliter l'analyse des résultats.

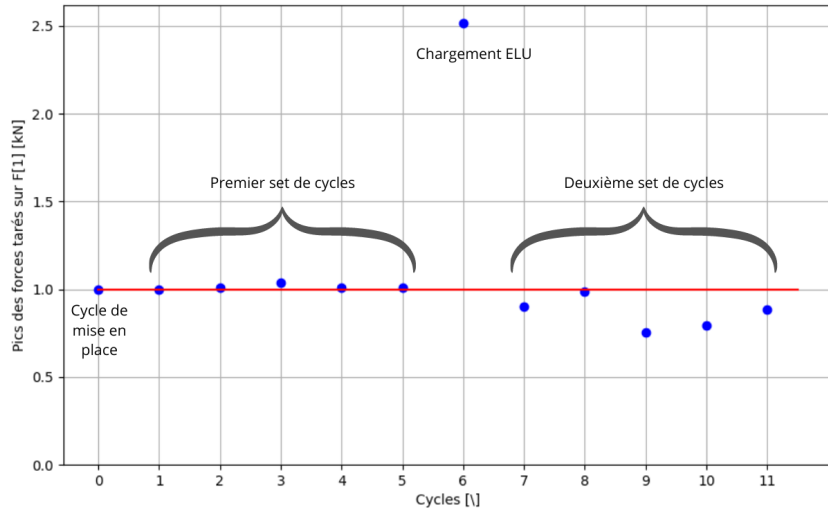


FIGURE 10.9 – Critère d'absence de convergence pendant le deuxième set de cycles ELS des essais non-destructifs en flexion - Essai III.7.

- **Écart de plus de 10% entre les raideurs ELS** : Un trop grand écart des raideurs peut traduire un endommagement des grumes reconstituées après le chargement ELU. La perte de raideur a été fixée à 10% par le projet ROBOTRONC. Cet écart est confirmé par la forte non-linéarité de la courbe de mise en charge ELU. La Figure 10.10 illustre ce critère avec l'essai III.10.

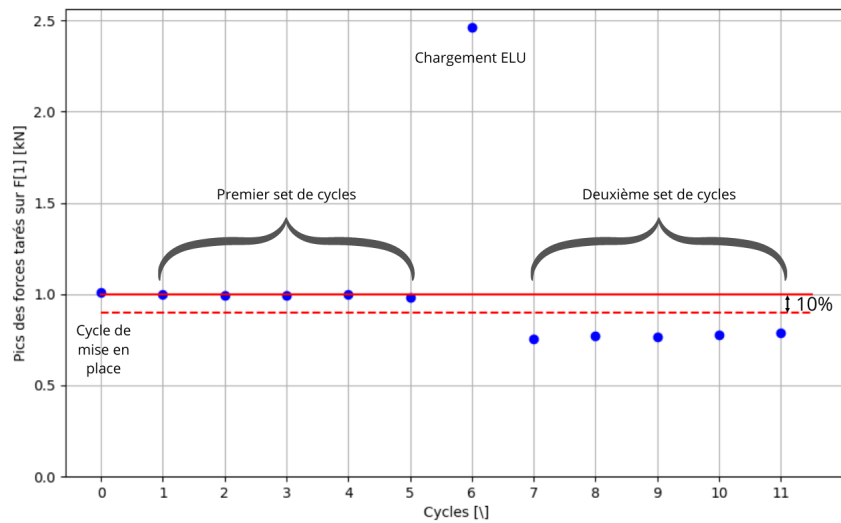


FIGURE 10.10 – Critère d'écart de plus de 10% entre les raideurs ELS des essais non-destructifs en flexion - Essai III.10.

### 10.5.3 Orientation des entures

Afin d'éviter d'avoir trop de paramètres ayant une influence sur la résistance des grumes reconstituées, en plus des deux paramètres de serrage variant, il a été décidé de conserver la même orientation des entures durant tous les essais pour garantir une interprétation des données claires. Tous les essais d'optimisation ont été effectués

avec les entures horizontales, par conséquent perpendiculaires à la force. Cette option a été choisie pour plus de facilités dans la réalisation des essais comme cela permettait de viser le laser sur la surface dégauchie et pour plus de facilités dans le positionnement des grumes reconstituées.

#### 10.5.4 Module local d'élasticité en flexion

Un dispositif de mesure de la flèche locale en flexion sur une longueur de 5 fois le diamètre moyen au niveau de l'aboutage a aussi été mis en place sur ces essais comme pour les essais préliminaires. Le module local a ensuite été calculé selon les recommandations de la norme EN 408, par rapport au premier cycle de chargement, celui de mise en place, en prenant la valeur maximale de ce cycle comme étant  $0.4 \cdot F_{max,est}$ . Cette valeur a été divisée par 4 pour obtenir la valeur  $0.1 \cdot F_{max,est}$  [69].

# Chapitre 11

## Résultats de l'optimisation du procédé

### 11.1 Classement visuel

Le classement visuel des 72 billons utilisés pour les essais d'optimisation est illustré à la Figure 11.1. Comme précédemment, la majorité des billons se situent en classe de qualité "C" ou "D". Les résultats détaillés du classement visuel sont repris à l'Annexe A.3.

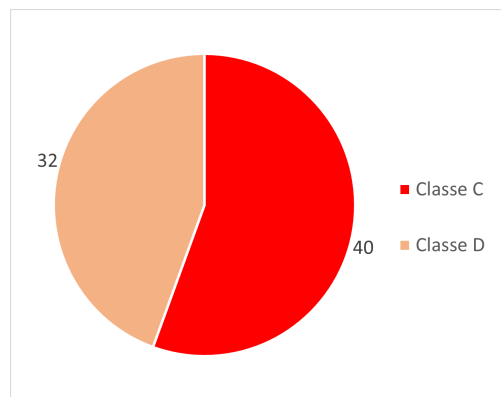


FIGURE 11.1 – Classes de qualité visuelle des 72 billons des essais d'optimisation.

### 11.2 Aboutage

Pour éviter les marques de brûlures des couteaux, lors de l'usinage, les couteaux ont été réglés de sorte à ne passer qu'une seule fois dans chaque enture. Ce réglage a permis de n'avoir aucune marque de brûlures sur les entures.

#### 11.2.1 Humidité

Pour pallier le problème du taux d'humidité trop faible, les essais en laboratoire ont été structurés et pensés à l'avance afin d'éviter le temps de latence entre la coupe des arbres et le collage. L'usinage a été effectué entre 12 et 23 jours après la coupe. Le collage a été effectué maximum 35 jours après l'exploitation et maximum 13 jours après l'usinage. Le temps prévu entre l'usinage et le collage était plus court que ce qui a été fait réellement, en raison de quelques imprévus et difficultés logistiques et matérielles qui ont impacté nos essais durant

deux jours. La pompe permettant de faire fonctionner les vérins a subi une panne de son système de refroidissement.

L'humidité moyenne des billons mesurée à l'aide d'un essai de dessiccation entre 4 et 7 jours après l'exploitation des boueaux est de 89,28% avec un écart-type de 9,17% [75]. Lors du collage, l'humidité moyenne dans les entures mesurée selon la norme EN 13183-2 à l'aide d'un humidimètre Protimeter <sup>®</sup> était de 26,43% avec un écart-type de 1,51% [84]. La valeur d'humidité minimale obtenue dans les entures était de 23,3%. Pour rappel, la teneur en humidité du bois recommandée par les fabricants de la colle est située entre 25 et 75% [73] et les entures ont été réhumidifiées avant le collage. Nous pouvons dès lors considérer que les recommandations des fabricants ont été respectées même si une plus grande teneur en humidité pourrait être plus sécuritaire.

Lors de l'essai I.1, un problème de fléchissement de l'élément a provoqué le pliage d'une équerre à 30° et a forcé l'arrêt de l'essai. Lors de celui-ci, de l'eau sortait de l'élément par une extrémité et gouttait sur le sol sous la pression du vérin. Cela témoigne de la présence d'eau libre dans le bois et, par conséquent, ce billon avait une teneur en humidité au-dessus de son PSF, c'est-à-dire au-dessus de 31% selon (2016) [21].

### 11.2.2 Serrage

Les graphiques représentant la pression en fonction du temps des 34 essais enregistrés sont illustrés par groupe aux Figures de 11.2 à 11.10. 2 essais sur 36 (les essais III.1 et IV.4) ont présenté des erreurs techniques qui ont rendu les essais inutilisables pour la suite.

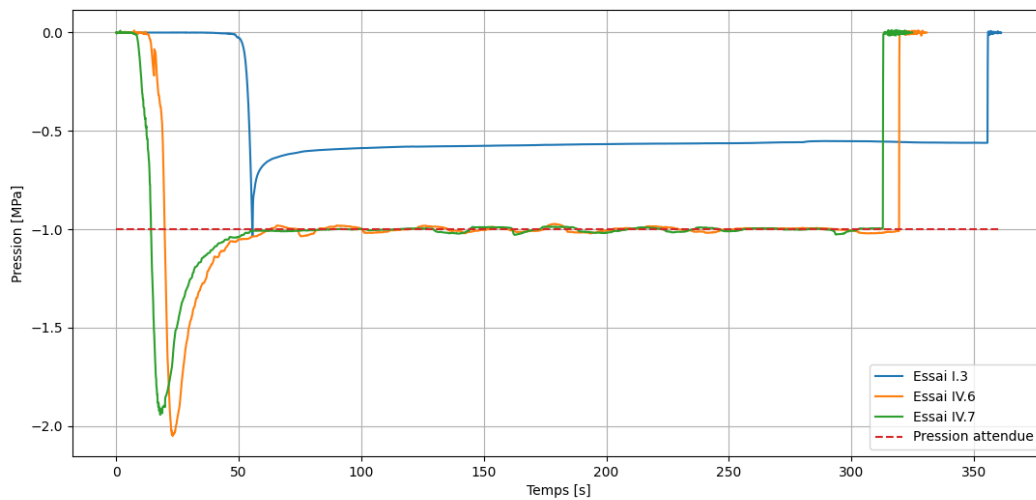


FIGURE 11.2 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe A : 1 MPa pendant 5 minutes.

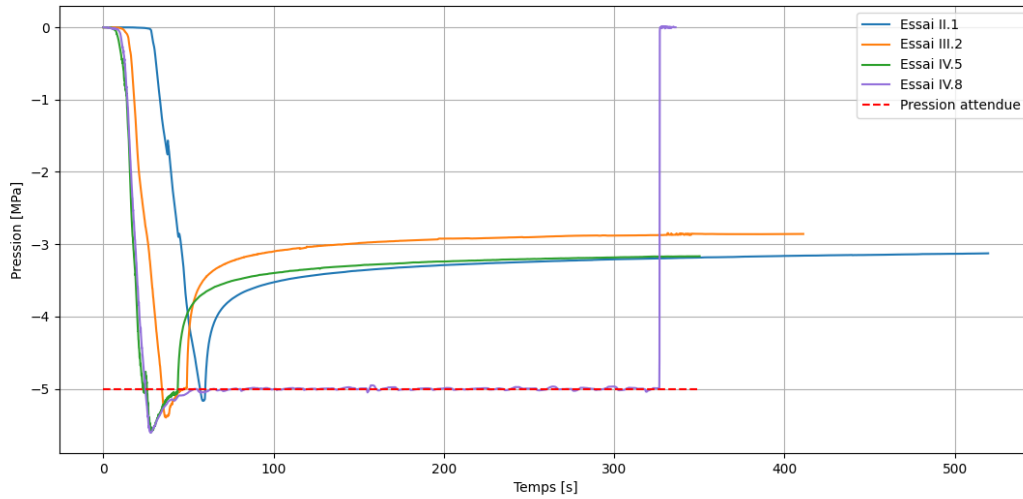


FIGURE 11.3 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe B : 5 MPa pendant 5 minutes.

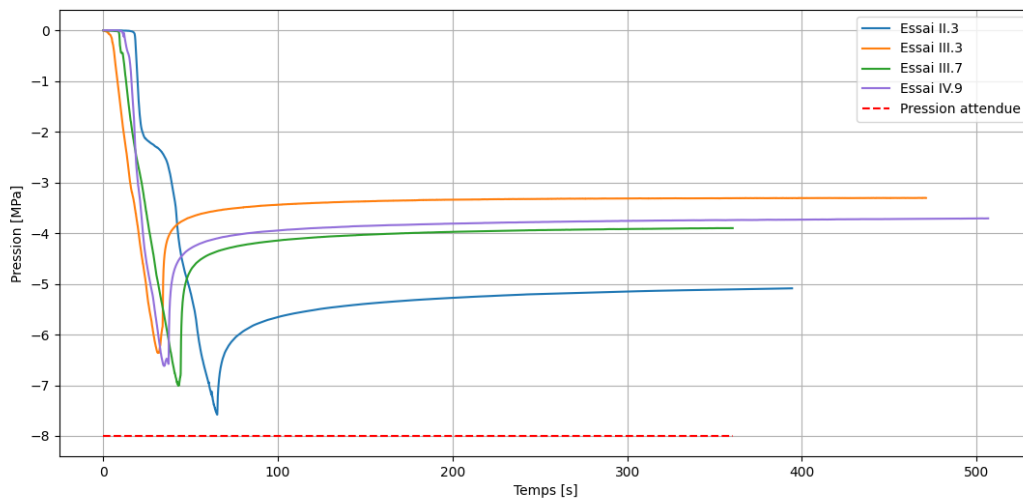


FIGURE 11.4 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe C : 8 MPa pendant 5 minutes.

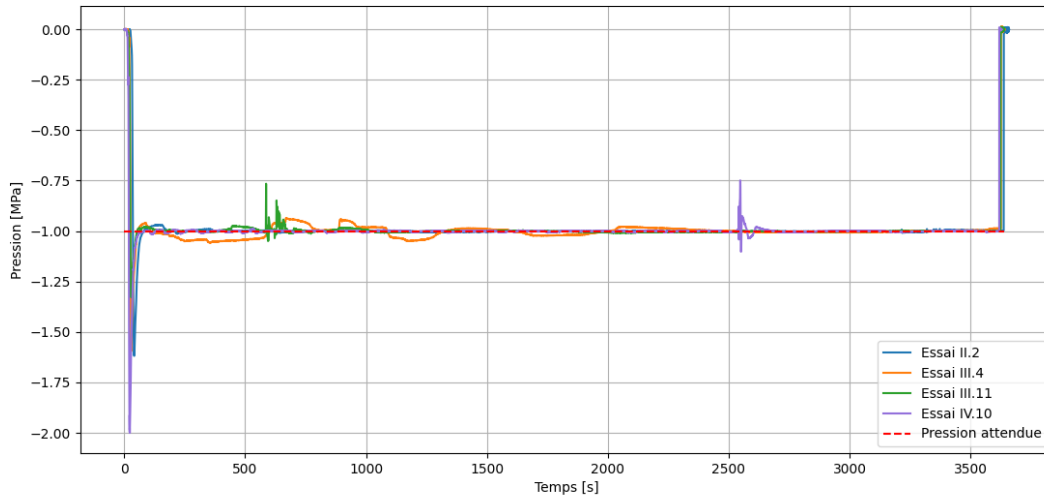


FIGURE 11.5 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe D : 1 MPa pendant 1 heure.

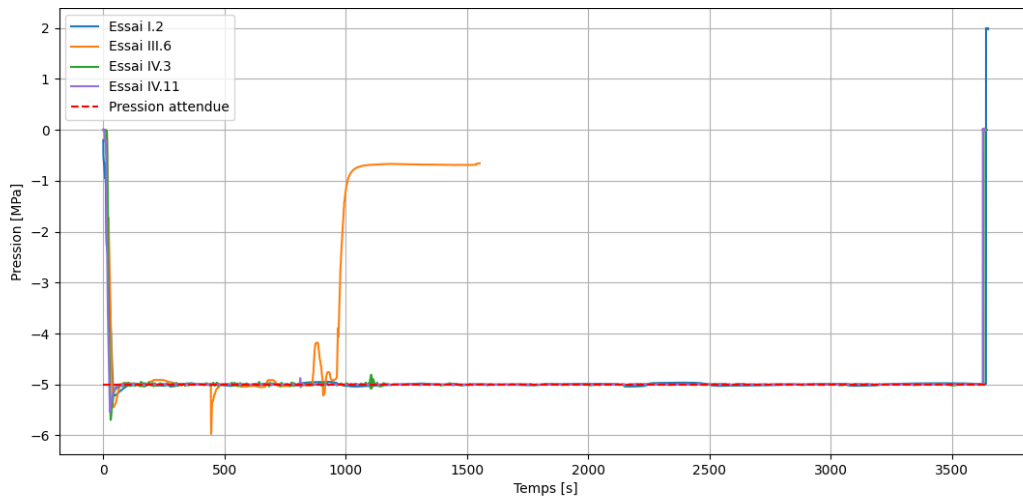


FIGURE 11.6 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe E : 5 MPa pendant 1 heure.

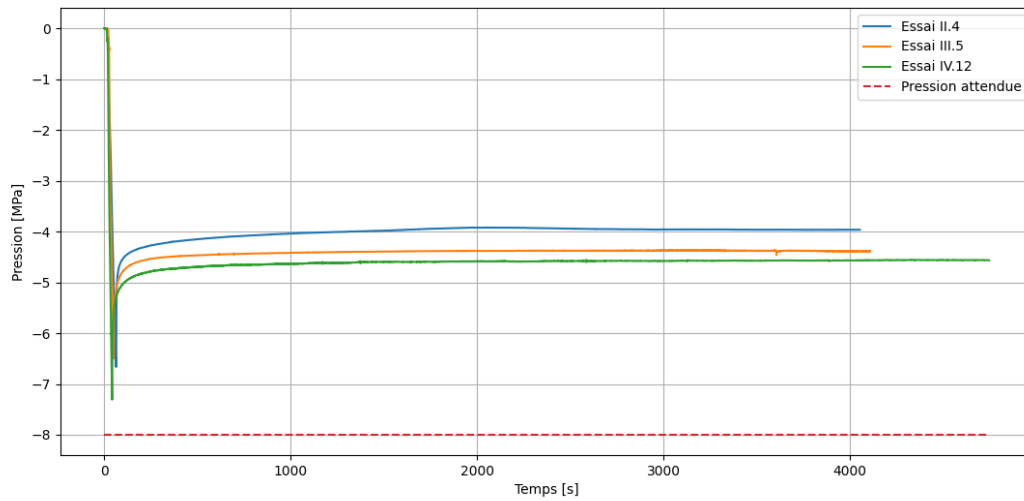


FIGURE 11.7 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe F : 8 MPa pendant 1 heure.

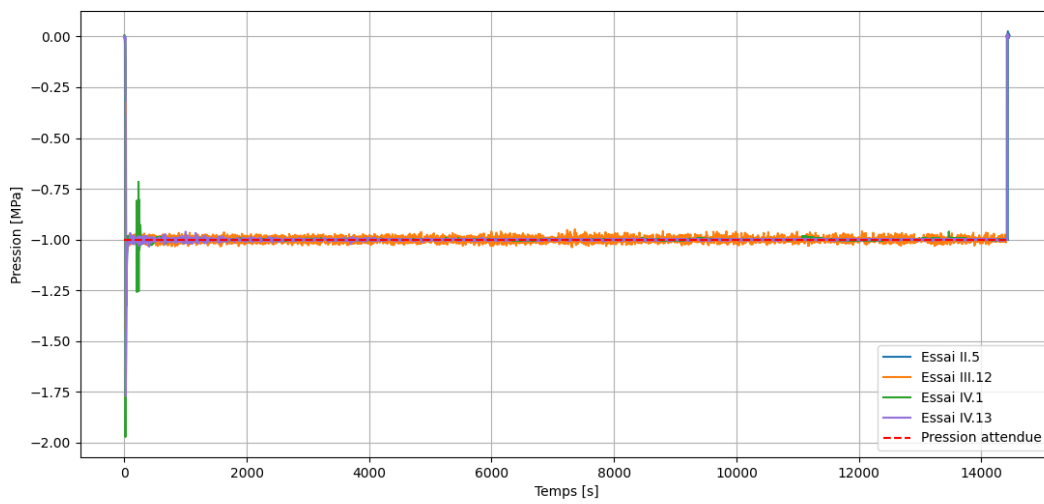


FIGURE 11.8 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe G : 1 MPa pendant 4 heures.

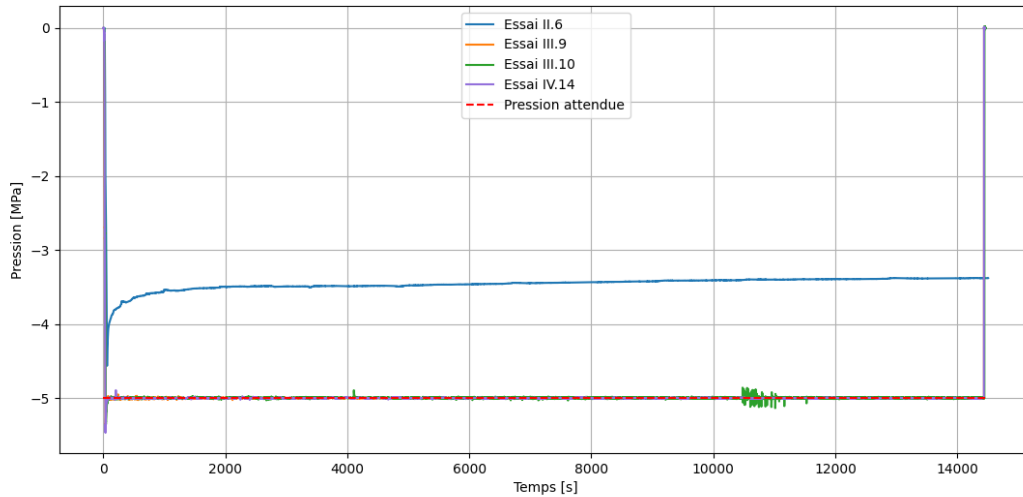


FIGURE 11.9 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe H : 5 MPa pendant 4 heures.

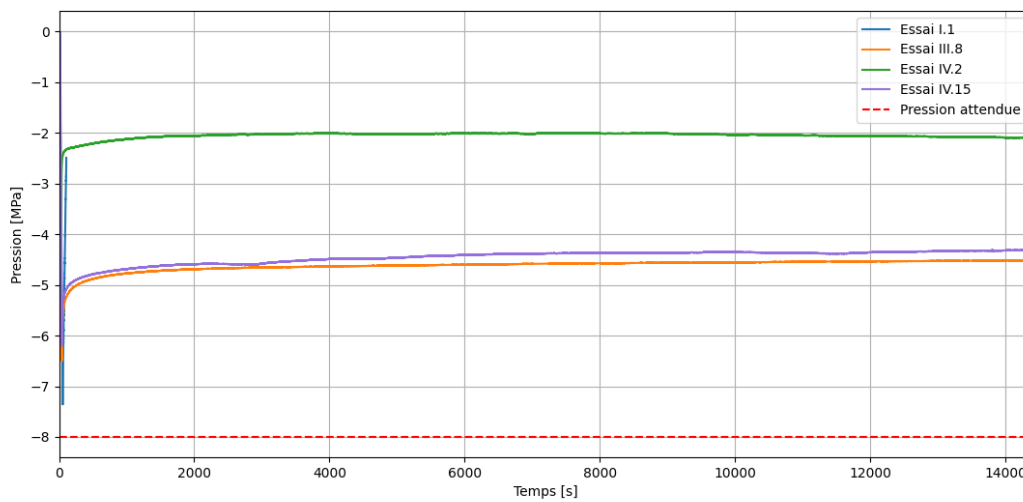


FIGURE 11.10 – Évolution de la pression en fonction du temps lors du serrage des essais d'optimisation : Groupe I : 8 MPa pendant 4 heures.

Les essais des groupes A, D et G, devant atteindre et maintenir une pression de 1 MPa, se sont déroulés comme prévu, excepté pour l'essai I.3 de la classe A. Ce dernier n'a pas maintenu la pression attendue durant toute la durée de l'essai en raison d'un déplacement dépassant les 15 mm maximum fixés. La pression durant la majeure partie du temps de l'essai était légèrement supérieure à 0.5 MPa.

Pour les groupes B, E et H devant atteindre et maintenir une pression de 5 MPa, 7 essais sur 12 se sont déroulés comme prévu, 4 ont eu un déplacement trop important, mais ont tout de même atteint la pression attendue sans la maintenir et 1 essai a eu un problème technique majeur. Il s'agit de l'essai III.6, la pompe permettant de faire fonctionner le vérin s'est arrêtée après 25 minutes d'essai en raison d'un problème de surchauffe. Elle n'a fonctionné à nouveau que 2 jours plus tard ce qui a empêché de sortir les grumes reconstituées avant ce moment-là comme le vérin était immobilisé. L'essai III.6 ne peut par conséquent pas être utilisé pour analyser le temps de

serrage.

Finalement, les essais des groupes C, F et I qui devaient atteindre et maintenir une pression de 8 *MPa*, ne sont pas parvenus à atteindre cette valeur. Le déplacement maximal de 15 mm a été systématiquement un facteur limitant. Pour le groupe de sections de plus faible diamètre, les deux premiers essais effectués n'ont pas atteint 8 *MPa* car leur déplacement était plus grand que 15 mm mais malgré ces limites, des fissures dans le prolongement des entures sont apparues. Ces déformations sont illustrées aux Figures 11.11 et 11.12. Ces dégradations au niveau des entures situées aux extrémités des sections s'expliquent par le principe de décomposition des forces. La force appliquée sur les entures est presque perpendiculaire à l'axe des grumes reconstituées. Au niveau de la dernière enture, une enture reprend toute cette force, ce qui cause son fléchissement et des fissures dans la prolongation de celle-ci. À la suite de ces fissures, le déplacement maximal des essais de ce groupe de diamètres devant atteindre une pression de 8 *MPa* a été diminué de 10 à 15 mm pour éviter de telles dégradations une troisième fois. Il s'agit des essais IV.12 et IV.15.



FIGURE 11.11 – Déformations au niveau de l'aboutage de l'essai IV.2 suite au serrage.

Le temps de serrage a été respecté pour une majorité des essais. Quelques essais ont cependant été plus longs que prévu en raison d'une erreur de réglage dans le logiciel qui ne provoquait pas l'arrêt systématique des essais lorsque ceux-ci atteignaient le déplacement maximum. C'est le cas de l'essai III.8 qui n'a pas duré 4 heures comme prévu, mais 15 heures. Pour les autres essais qui ont fait face à cette problématique, la différence entre le temps prévu et le temps réel est négligeable. Comme expliqué précédemment, l'essai III.6 ayant subi un problème technique n'a également pas respecté le temps prévu.



FIGURE 11.12 – Déformations au niveau de l'aboutage de l'essai IV.9 suite au serrage.

## 11.3 Essais non-destructifs en flexion

Pour l'analyse des résultats des essais non-destructifs en flexion, nous allons d'abord aborder les différents critères de rejet. Ensuite, les résultats des propriétés mécaniques seront présentés.

### 11.3.1 Critères de rejet

Le respect des critères de rejet est illustré dans le Tableau 11.1. Sur les 36 essais, 3 essais d'entre eux (les essais I.2, III.1 et IV.4) ne sont pas interprétables en raison d'un problème technique durant le collage qui a empêché d'obtenir des grumes reconstituées à tester en flexion non-destruction et 2 essais (les essais III.6 et III.7) n'ont pas toutes leurs données interprétables en raison de données surprenantes ne correspondant pas avec la réalité. Ces données coïncident avec le fait que ce sont les deux seuls essais qui avaient déjà une flèche apparue durant le collage au niveau de l'aboutage. Ils ont par conséquent été effectués avec les entures verticales et non horizontales comme les autres essais. De ce fait, la plaquette métallique permettant la mesure du laser n'a pas été fixée sur la face dégauchie, mais sur la surface naturelle des grumes reconstituées. Cette situation a très probablement contribué à une partie des imprécisions.

	Critère 1 : sauts	Critère 2 : absence de convergence	Critère 3 : Écart > 10%	Résumé
I.1	✓	✓	✓	✓
I.2	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
I.3	✓	✓	✓	✓
II.1	✓	✓	✗	✗
II.2	✓	✓	✓	✓
II.3	✓	✓	✗	✗
II.4	✗	✓	✗	✗
II.5	✗	✓	✓	✗
II.6	✓	✓	✓	✓
III.1	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
III.2	✗	✓	✗	✗
III.3	✓	✓	✗	✗
III.4	✓	✓	✓	✓
III.5	✗	✓	✗	✗
III.6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
III.7	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
III.8	✗	✓	✗	✗
III.9	✓	✓	✓	✓
III.10	✗	✓	✗	✗
III.11	✓	✓	✗	✗
III.12	✓	✓	✓	✓
IV.1	✗	✗	✓	✗
IV.2	✗	✓	✗	✗
IV.3	✗	✓	✗	✗
IV.4	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
IV.5	✗	✓	✗	✗
IV.6	✗	✓	✓	✗
IV.7	✗	✓	✗	✗
IV.8	✓	✓	✗	✗
IV.9	✓	✓	✗	✗
IV.10	✓	✓	✓	✓
IV.11	✗	✓	✗	✗
IV.12	✗	✓	✗	✗
IV.13	✓	✓	✗	✗
IV.14	✗	✓	✗	✗
IV.15	✗	✓	✗	✗

TABLEAU 11.1 – Résumé du respect des critères de rejet des 36 essais de flexion non-destructive (critère 1 : sauts marqués dans la courbe force- déplacement, critère 2 : absence de convergence de la raideur pendant le deuxième set de cycles ELS et critère 3 : écart de plus de 10% entre les raideurs ELS).

En résumé, on peut remarquer :

- 8 essais sur 31 respectant les critères de rejet et pouvant être interprétés ;
- 23 essais sur 31 ne respectant pas les critères de rejet, parmi lesquels :
  - 16 ne respectant pas le critère de sauts marqués dans la courbe force-déplacement ;
  - 1 ne respectant pas le critère d'absence de convergence de la raideur pendant le deuxième set de cycles ELS ;
  - 22 ne respectant pas le critère de l'écart de plus de 10% entre les raideurs ELS.

Le critère de l'écart de plus de 10% entre les raideurs dans les cycles de chargement-déchargement est donc le plus limitant.

Le premier critère des sauts dans la courbe force-déplacement a été sujet à interprétation étant donné que des irrégularités se trouvaient dans la courbe alors que des droites étaient attendues avec éventuellement quelques sauts. En analysant plus en détail les courbes de la force en fonction du temps et du déplacement en fonction du temps, on constate que ce n'est pas la force qui comporte des irrégularités, mais le déplacement. Un exemple de la force en fonction du temps et du déplacement en fonction du temps de l'essai III.12 est illustré aux Figures 11.13 et 11.14. Comme le déplacement comporte des irrégularités même lorsque les grumes reconstituées sont au repos, correspondant au déplacement avant 80 secondes sur la Figure 11.14, des petites irrégularités ont été considérées comme des défauts liés à la mesure du laser. Ces irrégularités ont par conséquent été prises en compte dans une moindre mesure. Les plus faibles sauts de courbe n'ont pas été pris en compte.

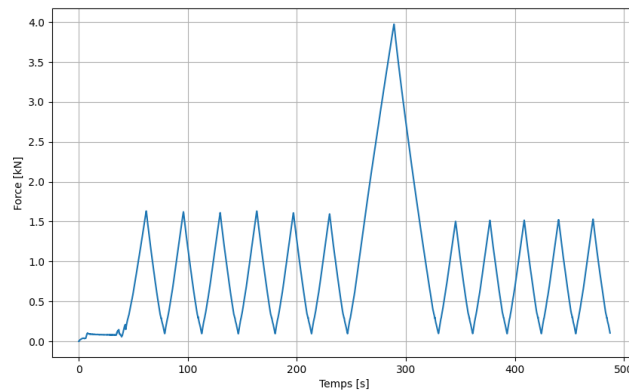


FIGURE 11.13 – Force en fonction du temps de l'essai non-destructif en flexion III.12.

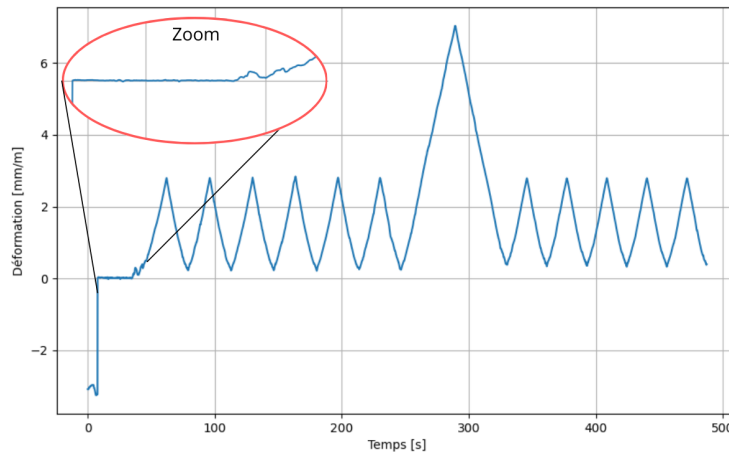


FIGURE 11.14 – Déplacement en fonction du temps de l'essai non-destructif en flexion III.12.

Par exemple, les graphiques illustrant les essais II.1 et III.4 représentés sur les Figures 11.15 et 11.16 ont été considérés comme respectant le critère des sauts dans la courbe et les graphiques illustrant les essais IV.12 et IV.15 sur les Figures 11.17 et 11.18 ont été considérés comme ne respectant pas le critère et devant donc être rejetés.

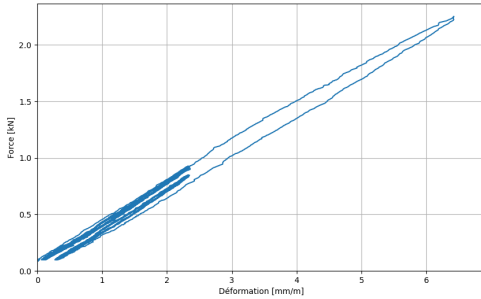


FIGURE 11.15 – Force en fonction de la déformation de l'essai non-destructif en flexion III.4 - Critère de rejet de sauts dans la courbe force-déplacement non rencontré.

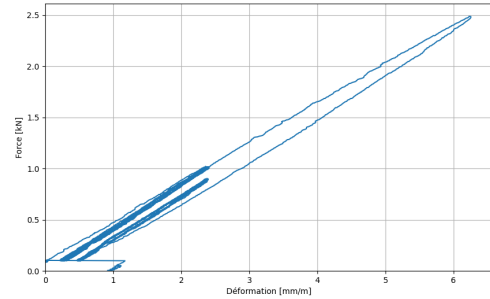


FIGURE 11.16 – Force en fonction de la déformation de l'essai non-destructif en flexion II.1 - Critère de rejet de sauts dans la courbe force-déplacement non rencontré.

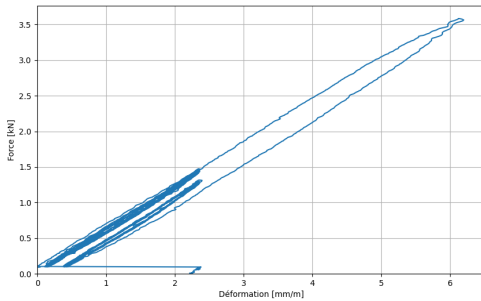


FIGURE 11.17 – Force en fonction de la déformation de l'essai non-destructif en flexion IV.12 - Critère de rejet de sauts dans la courbe force-déplacement rencontré.

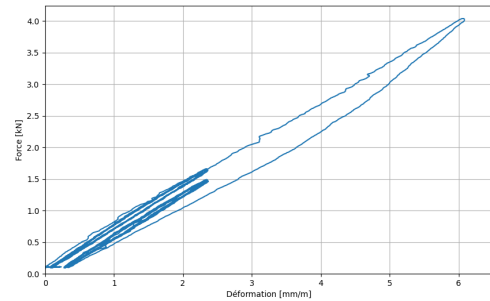


FIGURE 11.18 – Force en fonction de la déformation de l'essai non-destructif en flexion IV.15 - Critère de rejet de sauts dans la courbe force-déplacement rencontré.

Le critère d'absence de convergence de la raideur pendant le deuxième set de cycles ELS est respecté par 30 essais sur 31. Cela montre que dans presque tous les cas, la raideur ne semble pas avoir été modifiée de manière irréversible. La convergence est le fait de tendre vers un même point [85]. Elle a été interprétée en considérant que les pics de force convergent s'il est possible de faire passer par tous les points une courbe du premier ou du second degré, tout en ayant toutes les valeurs croissantes ou décroissantes. Un exemple de raideur qui a été considérée comme convergente et un autre cas, considéré comme ne convergeant pas, sont illustrés aux Figures 11.19 et 11.20.

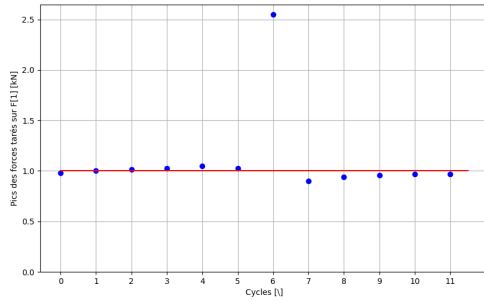


FIGURE 11.19 – Pics de force de l'essai non-destructif en flexion III.3 - Critère d'absence de convergence de la raideur dans le deuxième cycle ELS non rencontré.

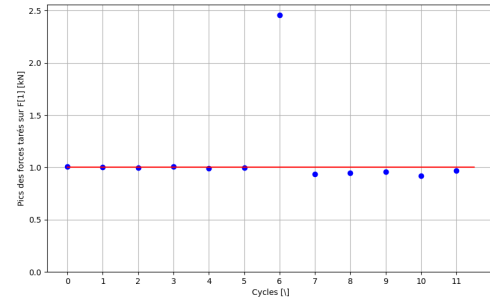


FIGURE 11.20 – Pics de force de l'essai non-destructif en flexion IV.1 - Critère d'absence de convergence de la raideur dans le deuxième cycle ELS rencontré.

Le critère de rejet d'écart de plus de 10% dans la raideur des cycles ELS est plus facilement identifiable étant donné qu'il ne laisse pas de liberté à l'interprétation.

Le critère de rejet de sauts dans la courbe force-déplacement coïncide 15 fois sur 18 avec le critère de rejet d'écart de plus de 10% dans la raideur des cycles ELS. Cela est effectivement cohérent étant donné que les deux critères sont signe d'un endommagement des grumes reconstituées après le chargement ELU.

Le rejet d'un tel nombre d'essais soulève des interrogations concernant le protocole employé. Une des explications à cette situation pourrait être une flèche imposée trop grande pour ce cas qui implique une  $F_{ELU}$  trop importante par rapport à la résistance en flexion des grumes reconstituées.

### 11.3.2 Résistance en flexion

Tout d'abord, une analyse statistique a été effectuée afin de vérifier que les grumes reconstituées de différentes tailles n'avaient pas de différence significative. Cette analyse a été réalisée avec le test de Kruskal-Wallis car les données n'ont pas une répartition normale. Cette hypothèse, déjà confirmée lors des essais préliminaires a été confirmée (Kruskal-Wallis :  $U = 0,083$  ;  $p > 0.05$ ).

Comme les essais sont non-destructifs, il n'est pas possible de calculer la résistance en flexion à la rupture. Les résistances maximales obtenues durant le chargement  $F_{ELU}$  et durant les cycles de chargement-déchargement ELS sont reprises dans le Tableau 11.2.

Il peut tout d'abord être remarqué que certaines résistances obtenues à l'ELU sont supérieures à la résistance en flexion obtenue lors des essais préliminaires. De plus, la résistance caractéristique à la rupture des essais préliminaires et celle de la force à l'ELU des essais d'optimisation sont proches, respectivement,  $10,92 MPa$  et  $10,67 MPa$ . Ce qui signifie que la résistance caractéristique à la rupture des essais d'optimisation aurait été très probablement supérieure à celle obtenue pour les essais préliminaires. Les améliorations apportées ont eu un impact positif sur la résistance en flexion.

Il peut également être constaté que globalement la résistance en flexion à l'ELU est plus grande dans le cas des essais rejetés. Cela implique que la valeur de  $MAX(F_{verin}^{\delta CT})$  est également plus grande que pour les essais non rejetés, comme  $F_{ELU} = 2,4375 \cdot MAX(F_{verin}^{\delta CT})$ . Cela signifie probablement que les grumes reconstituées avaient une plus grande rigidité dans le cas des essais rejetés, car une force plus importante a dû être appliquée pour atteindre la même flèche que pour les essais non rejetés.

	Moyenne [MPa]	Écart-type [MPa]	Valeur caractéristique [MPa]
$F_{ELU}$ de tous les essais	16,68	3,25	10,67
$F_{ELU}$ des essais non rejetés	14,65	1,52	11,34
$F_{ELU}$ des essais rejetés	17,32	3,40	10,92
$MAX(F_{verin}^{\delta CT})$ de tous les essais	6,71	1,85	4,18
$MAX(F_{verin}^{\delta CT})$ des essais non rejetés	5,99	0,59	4,70
$MAX(F_{verin}^{\delta CT})$ des essais rejetés	6,94	1,47	4,17

TABLEAU 11.2 – Pression maximale appliquée en flexion par le vérin dans les grumes reconstituées durant le chargement ELU et durant les cycles de chargement-déchargement ELS en prenant en compte tous les essais, uniquement les essais non rejetés et uniquement les essais rejetés.

Cette hypothèse est confirmée par les modules globaux d'élasticité en flexion, repris dans le Tableau 11.3. Ceux-ci ont été calculés selon la méthode de calcul du module local d'élasticité en flexion recommandée par la norme EN 408, mais en prenant en compte la longueur entre les deux appuis des grumes reconstituées ainsi que la flèche globale [69].

	Module d'élasticité en flexion [MPa]	Écart-type [MPa]
Tous les essais	9.599,98	2.016,41
Essais non rejetés	8.743,21	2.221,84
Essais rejetés	10.046,11	1.916,24

TABLEAU 11.3 – Module d'élasticité en flexion des essais d'optimisation en prenant en compte tous les essais, uniquement les essais non rejetés et uniquement les essais rejetés.

### 11.3.3 Module local d'élasticité en flexion

Les différents modules locaux d'élasticité en flexion ainsi que leurs écarts-types sont repris dans le Tableau 11.4.

	Module local d'élasticité en flexion [MPa]	Écart-type [MPa]
Tous les essais	8.0765,02	3.551,61
Essais non rejetés	9.035,23	3.765,75
Essais rejetés	8.671,03	3.557,10

TABLEAU 11.4 – Module local d'élasticité en flexion des essais d'optimisation en prenant en compte tous les essais, les essais non rejetés et les essais rejetés.

Le module local moyen d'élasticité est plus faible que le module calculé sur la distance entre les deux appuis. C'est également le cas pour les essais rejetés, ce qui signifie que l'aboutage est moins rigide que les billons. Par contre, c'est l'effet inverse qui se produit dans le cas des essais non rejetés, mais dans une moindre mesure et avec un écart-type conséquent. Les différences n'étant pas significatives, il est délicat de tirer des conclusions pertinentes.

## 11.4 Influence des paramètres de serrage

Pour analyser les paramètres de serrage, nous avons tout d'abord analysé la force moyenne appliquée par le vérin à l'ELU ainsi que son écart-type en fonction des différents paramètres de temps et de pression appliqués lors du collage. Ces données n'ont pas permis de mettre en évidence des conclusions vis-à-vis du temps ou de la pression optimales étant donné que les différences ne sont pas statistiquement significatives. Pour la pression, le test t de Student a été utilisé, car la variance est homogène et la distribution des données est normale (Student :  $U=-0,625$  ;  $p > 0,05$ ). Pour le temps, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé puisque les données n'ont pas une répartition normale (Kruskal :  $U=2,657$  ;  $p > 0,05$ ). D'autres résultats ont donc été comparés.

Il est possible de comparer le nombre d'essais rejetés et non rejetés en fonction des paramètres de serrage. Ces résultats sont illustrés dans le Tableau 11.5 qui reprend les 2 pressions réellement appliquées (1 *MPa* et 5 *MPa*) ainsi que les 3 temps réels (5 minutes, 1 heure et 4 heures). Les résultats obtenus pour tous les essais effectués réellement avec une pression d'environ 5 *MPa* sont repris. Les résultats des essais qui ont été soumis à une pression de 5 *MPa* comme initialement prévue et les résultats des essais qui étaient censés être soumis à une pression de 8 *MPa* mais qui n'a pas été atteinte et dont la pression est restée à environ 5 *MPa* sont également repris dans le Tableau 11.5.

Paramètres de serrage	Nombre d'essais [/]	Pourcentage d'essais rejetés [%]	Pourcentage d'essais non rejetés [%]
5 minutes	11	100	0
1 heure	9	66,67	33,33
4 heures	10	70	30
1 <i>MPa</i>	11	54,55	45,45
5 <i>MPa</i>	20	90	10
5 <i>MPa</i> (prévus)	11	81,82	18,18
5 <i>MPa</i> (anciens 8 <i>MPa</i> )	9	100	0

TABLEAU 11.5 – Pourcentage d'essais rejetés et non rejetés en fonction des paramètres de temps et de pression utilisés lors du collage des essais d'optimisation.

Avec le Tableau 11.5, nous pouvons déduire que les essais effectués avec un temps de serrage de 5 minutes ne sont pas concluants. En effet, 100% de ces essais ont rencontré au moins un critère de rejet et ne pourraient par conséquent pas être utilisés dans le cas où ceux-ci auraient été testés dans le cadre d'un processus industriel. Les essais effectués avec un temps de serrage de 1 heure et de 4 heures ont des résultats relativement similaires entre eux au niveau du pourcentage d'essais rejetés et non-rejetés. Il est alors raisonnable de considérer que les temps de pression les plus optimaux sont ceux de 1 heure et de 4 heures, même si le nombre d'essais est assez faible. Des essais supplémentaires devraient être effectués pour valider cette hypothèse.

Au niveau de la pression, la pression de 8 *MPa* peut être écartée étant donné qu'aucun des essais n'a pu atteindre cette pression sans subir de déformations trop importantes, correspondant à un déplacement de plus de 15 mm, ou de 10 mm dans le cas des essais IV.12 et IV.15. De plus, les essais devant atteindre 8 *MPa* lors du serrage ont tous atteint le déplacement maximum et ils ont tous été rejetés. Notre hypothèse est que le déplacement maximal imposé est déjà trop grand et qu'il implique par conséquent des déformations trop importantes qui fragilisent les grumes reconstituées, ce qui provoque le rejet de ces essais. Cette hypothèse est vérifiée pour 14 essais sur 17.

En comparant les essais ayant subi une pression de 1 *MPa* et ceux ayant subi une pression de 5 *MPa*, on remarque que la pression de 1 *MPa* rejette moins d'essais que celle de 5 *MPa*. Cela peut être expliqué par le fait qu'elle a moins de risque de provoquer des déformations irréversibles aux grumes reconstituées. Ces deux pressions mériteraient une analyse plus approfondie avec des essais supplémentaires afin de déterminer l'influence réelle de chacune sur la résistance et la pression la plus optimale.

## 11.5 Influence du classement visuel

La Figure 11.21 illustre, pour les essais non-rejetés et rejetés, le nombre d'essais, ramené en pourcentage, par classe de qualité des deux billons composant chaque essai. Le nombre d'essais rejetés et non-rejetés dans chaque classe de qualité a été ramené en pourcentage, respectivement, par rapport au nombre d'essais rejetés et non-rejetés puisque les nombres d'essais rejetés et non-rejetés diffèrent grandement (28 et 8 essais).

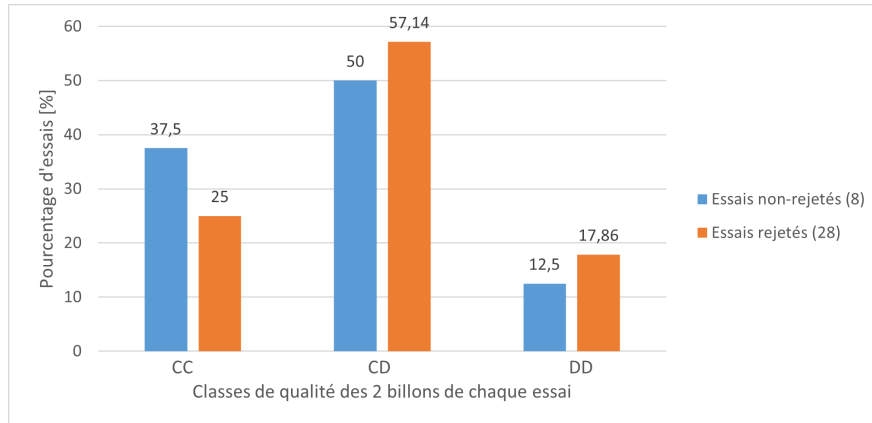


FIGURE 11.21 – Nombre d'essais rejetés en pourcentage par classe de qualité des deux billons de chaque essai en fonction du rejet ou de l'acceptation des essais.

La meilleure configuration de qualité des grumes reconstituées consiste en deux billons de qualité "C". Cette dernière comporte un plus grand pourcentage d'essais non rejetés que de rejetés, mais la faible différence entre les pourcentages ne permet malheureusement pas d'en faire une généralité.

## 11.6 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, les pistes d'amélioration mises en place se sont avérées efficaces. Les résultats finaux ont montré de meilleures performances par rapport à la deuxième campagne d'essais. Toutefois, il est à noter que près de deux tiers des essais ont été rejetés en raison de signes de faiblesse détectés.

Les paramètres de serrage ont été analysés lors de ces essais pour tenter d'optimiser le processus d'aboutage. Les résultats ont démontré que la pression de 8 MPa pouvait être écartée. Les temps de 1 heure et de 4 heures ont donné des résultats similaires.

Cinquième partie

Discussion

# Chapitre 12

## Discussion

### 12.1 Analyse des pistes d'amélioration appliquées

En premier lieu, nous nous sommes focalisés sur les différentes pistes d'amélioration en analysant comment optimiser, corriger ou améliorer certains des paramètres du processus d'usinage et d'aboutage. Ceux-ci peuvent avoir chacun des petits impacts non négligeables, mais en les additionnant, ils peuvent avoir des conséquences importantes.

#### 12.1.1 Usinage

Lors de l'usinage, les billons ont tout d'abord été tous dégauchis légèrement sur une face pour obtenir une surface de référence pour l'usinage des entures malgré la volonté de moindres transformations. Cette technique s'est montrée très efficace. Il pourrait tout de même être intéressant d'envisager de ne pas dégauchir les billons, mais de trouver un autre élément de référence. Par exemple, des traits verticaux aux extrémités des billons permettant l'alignement d'un laser tout en ayant un meilleur système de maintien du billon lors du passage des couteaux.

Le système de maintien des billons est représenté sur la Figure 12.1. Bien que très pratique, ce dispositif peut engendrer des imprécisions et provoquer de légers mouvements dans les billons qui pourraient être la cause de défauts dans les entures, même minimes. Il serait intéressant de réfléchir à un système permettant un plus grand maintien de la stabilité.



FIGURE 12.1 – Système de maintien des billons lors de l'usinage des entures.

Les techniques développées pour permettre un meilleur alignement tout au long du processus d'usinage et d'aboutage se sont montrées plutôt performantes. La première technique consistait à utiliser un laser assurant le rafraîchissement des surfaces perpendiculairement à l'axe du billon ainsi que pour la découpe des entures. Ensuite, le laser a également été utilisé pour s'assurer de l'alignement parfait des billons lors du serrage.

### 12.1.2 Humidité

Les taux d'humidité dans les entures selon les différents essais et les moments où ceux-ci ont été effectués sont repris dans le Tableau 12.1.

Méthodes d'essai	Nbre de jours avant les essais de flexion	Taux d'humidité [%]	Écart-type [%]
Valeur théorique	/	12	1,0
<b>Essais non-aboutés</b>			
Dessiccation	4 à 8	80,38	16,43
Humidimètre	0	43,38	9,74
<b>Essais préliminaires</b>			
Dessiccation	12 à 42	36,33	10,32
Humidimètre dans les entures	5 à 9	18,08	6,11
Dessiccation	0	37,39	12,97
<b>Essais d'optimisation</b>			
Dessiccation	15 à 28	89,28	9,17
Humidimètre dans les entures	5 à 9	26,43	1,51

TABLEAU 12.1 – Taux d'humidité dans les billons en fonction des campagnes d'essais et du temps par rapport aux essais de flexion.

Ces taux d'humidité montrent une évolution notable entre les essais préliminaires et les essais d'optimisation. Cela confirme que le temps plus court entre l'exploitation des boudeaux et le début des essais a eu un impact positif sur le taux d'humidité et que, dans le cas des essais d'optimisation, ce temps maximum de 35 jours entre l'exploitation et l'usinage, était suffisant pour obtenir un taux d'humidité entre 25 et 75%, correspondant aux recommandations du fabricant de la colle [73].

### 12.1.3 Dispositif de serrage

Les critères du dispositif de serrage étaient les suivants :

- Contrôle visuel constant sur l'aboutage durant le collage
- Flexibilité du dispositif vis-à-vis des différentes gammes de longueurs, de diamètres et des défauts des billons, tels que les courbures et les nœuds, tout en conservant un bon alignement des éléments
- Résistance à la force maximale à appliquer, c'est-à-dire 100 *kN*
- Maintien de la pression durant 4 heures
- Dispositif utilisable par une seule opératrice et facile à mettre en place

Le premier dispositif, illustré à la Figure 12.2, n'a pas pu remplir les trois derniers critères. Le remplacement de celui-ci par un deuxième dispositif utilisé lors des essais d'optimisation, illustré à la Figure 12.3, a permis une nette amélioration. Le dispositif remplissait cette fois tous les critères. De plus, le deuxième dispositif permettait de limiter le déplacement des billons grâce à des systèmes de blocage plus développés de chaque côté des billons ainsi que sur le haut. Les déplacements se sont développés en compression dans la grume reconstituée, ce qui a pu causer des déformations au niveau de l'aboutage avec des fissures dans le prolongement des entures. Cela a permis

de déterminer que la pression de 8 MPa était également une pression trop importante. Le deuxième dispositif était également plus facile à mettre en place et la pression fixée pouvait être atteinte plus facilement et maintenue sans nécessiter la présence constante d'une personne.



FIGURE 12.2 – Dispositif de serrage des essais préliminaires.



FIGURE 12.3 – Dispositif de serrage des essais d'optimisation.

Malgré ces améliorations, des défauts persistent et mériteraient des perfectionnements. Tout d'abord, l'ajustement de la hauteur des grumes reconstituées pour permettre l'application de la force au centre des grumes reconstituées était imprécis. Celui-ci consistait en des planches de différentes hauteurs superposées sous la grume reconstituée à ajuster en fonction du groupe de taille des grumes reconstituées. Il pourrait être intéressant de trouver d'autres techniques pour permettre des ajustements de la hauteur plus précis et plus faciles à appliquer afin de les adapter à chaque essai. Pour ce faire, il est possible de jouer sur la fixation du vérin via un système amovible ou sur la hauteur des grumes reconstituées.

Finalement, lors des essais, la personne lançant les essais n'avait pas une vision directe sur le dispositif. Cela a causé la dégradation de plusieurs essais par manque de réactivité lors de l'apparition de problèmes techniques, car il n'était pas possible de voir le vérin avancer et l'évolution de l'état de l'aboutage depuis le poste de pilotage. Il serait intéressant d'utiliser un poste de pilotage de l'essai plus proche ou d'installer une caméra permettant une vision constante sur l'essai.

#### 12.1.4 Paramètres de serrage

Plusieurs paramètres de serrage ont été testés au cours de cette étude :

- le temps : 5 minutes, 1 heure et 4 heures ;
- la pression : 1 MPa, 5 MPa, 8 MP et 10 MPa.

Les pressions de 8 MPa et de 10 MPa ont dû être écartées comme ces dernières impliquaient des déformations trop importantes dans les grumes reconstituées. Pour les autres valeurs, il a été compliqué de déterminer leur impact étant donné que les valeurs de comparaison de pressions dans le vérin à l'ELU des différentes combinaisons

n'étaient pas statistiquement significatives.

Par contre, en comparant les pourcentages d'essais rejetés ou gardés en fonction des paramètres de serrage, les paramètres de 1 heure, 4 heures et 1  $MPa$  ont donné de meilleurs résultats. Cependant, au vu du faible nombre d'essais en partie en raison des problèmes rencontrés lors de l'aboutage, il est difficile d'obtenir des données significatives. Une amélioration du processus d'aboutage serait nécessaire avant d'effectuer des essais complémentaires qui pourraient déterminer les paramètres permettant la meilleure optimisation du processus.

### 12.1.5 Essais mécaniques

Toutes les améliorations effectuées après les essais préliminaires ont permis d'obtenir de meilleurs résultats pour les essais d'optimisation. Ceux-ci vont être comparés dans cette section et mis en parallèle avec les résultats de la première campagne d'essai ayant permis de déterminer la résistance en flexion du bouleau de faible diamètre.

Pour la comparaison des résultats des campagnes d'essais, nous avons uniquement pris en considération les essais non-rejetés issus des essais d'optimisation.

#### Résistance en flexion

Un tableau récapitulatif des résultats de la résistance en flexion est présenté à la Figure 12.2.

	Résistance en flexion du bouleau [ $MPa$ ]
Moyenne théorique [5]	130
Moyenne des 15 essais de flexion non-aboutés	53,32
Caractéristique des 15 essais de flexion non-aboutés	42,14
Moyenne des 17 essais préliminaires	25,65
Caractéristique des 17 essais préliminaires	10,92
Moyenne à l'ELU des 8 essais non-destructifs	14,65
Percentile 5% à l'ELU des 8 essais non-destructifs	11,34

TABLEAU 12.2 – Récapitulatif des résultats obtenus pour la résistance en flexion du bouleau

La première campagne d'essais en flexion de bouleau non-aboutés a permis de déterminer la résistance moyenne, 53,32 $MPa$  et caractéristique, 42,14 $MPa$  du bouleau de faible diamètre. Ces valeurs sont éloignées de la résistance moyenne théorique de 130  $MPa$ , ce qui est assez surprenant. Ces valeurs faibles s'expliquent par la présence abondante de nœuds et de bois juvénile selon Alpo (1999) [25]. Cependant, ces valeurs ne sont pas démesurément faibles en les comparant avec les valeurs des classes de résistance de la norme EN 338. Pour les feuillus, 6 classes de résistance principales sont déterminées allant de D30 à D70, ce qui correspond à une résistance caractéristique en flexion allant de 30 à 70  $MPa$ . La résistance du bouleau obtenue correspond à une classe D40, ce qui se situe dans la moyenne [81, 86].

Ensuite, lors de la deuxième campagne d'essais sur 17 essais en flexion de billons de bouleau aboutés, une résistance moyenne de 25,65 $MPa$  et une résistance caractéristique de 10,92 $MPa$  ont été obtenues. Ces valeurs correspondent respectivement à la moitié et au quart des valeurs obtenues pour les essais non-aboutés. En conséquence, toutes les ruptures se sont déroulées dans l'aboutage et plus précisément le long de la ligne de colle.

Des améliorations ont été apportées sur la dernière campagne d'essai. Comme les essais étaient non-destructifs, il est plus compliqué de les comparer avec les campagnes d'essais précédentes. Plusieurs constatations peuvent néanmoins être faites. Tout d'abord, en calculant quelle aurait été la force appliquée à l'ELU sur base du protocole d'essais non-destructifs pour les essais préliminaires, nous constatons que cette force est inférieure à la résistance en flexion à la rupture pour 6 essais sur 17. Ensuite, la résistance caractéristique des 17 essais préliminaires est plus faible que le percentile 5% de la force appliquée à l'ELU des 8 essais non-destructifs ayant respecté les critères de

rejet. En conséquence, la résistance caractéristique à la rupture qui aurait été obtenue pour les essais d'optimisation s'il s'agissait d'un essai destructif aurait été plus grande que celle des essais préliminaires.

Dans l'analyse de ces résultats, il faut également prendre en compte le taux d'humidité dont l'augmentation, entre autres, diminue la résistance à la rupture en flexion [70, 78, 87]. Le Tableau 12.1 reprend les taux d'humidité dans les entures selon les différents essais et les moments où ceux-ci ont été effectués. Il permet de mettre en avant les différences de taux d'humidité entre les campagnes d'essais lors de la flexion. La première campagne d'essai est clairement celle effectuée avec le plus grand taux d'humidité. Les essais d'optimisation en flexion ont été effectués avec une teneur en humidité plus élevée que les essais préliminaires. Suite à cela, la différence de résistance entre les deux campagnes d'essais est en réalité très probablement plus grande que celle visible dans les résultats. Cela signifie que les améliorations apportées suite aux essais préliminaires ont eu un impact positif plus important que ce que les résistances en flexion témoignent. Pour cette raison, il serait intéressant de comparer ces valeurs avec celles de la résistance en flexion après le séchage pour les essais d'optimisation afin de pouvoir quantifier l'influence de l'humidité. D'autres essais pourraient également être réalisés avec cet objectif.

Dans l'analyse de ces résultats, il est nécessaire de garder en tête la perplexité exprimée par certains auteurs d'obtenir une résistance dans l'aboutage supérieure à celle du bois dans le cas de feuillus [37]. D'autres auteurs ne sont pas allés jusqu'à confirmer ce propos, mais ont constaté que la résistance des aboutages était meilleure dans le cas de résineux que de feuillus [37, 40].

### Module d'élasticité en flexion

Le module d'élasticité en flexion est également impacté par la teneur en humidité, plus le bois est humide, plus ce module est faible et par conséquent, plus le bois est flexible [70, 78]. Les modules d'élasticité en flexion mesurés à chaque campagne d'essais sont repris dans le Tableau 12.3.

	Essais non-abouté (global)	Essais préliminaires (local)	Essais d'optimisation (local)
Module d'élasticité en flexion [ $MPa$ ]	9.013	12.751	9.035
Écart-type [ $MPa$ ]	2.114	4.125	3.766

TABLEAU 12.3 – Module d'élasticité en flexion.

Les modules d'élasticité en flexion correspondent aux taux d'humidité mesurés. La première et la troisième campagne d'essais ont des valeurs du même ordre et les essais préliminaires ont une rigidité plus importante ainsi qu'un taux d'humidité plus faible de manière statistiquement significative (Kruskal-Wallis :  $U=8,482$  ;  $p < 0.05$ ).

### Influence de la longueur et du diamètre des billons

Lors des essais préliminaires, le test de Kruskal-Wallis a prouvé qu'il n'y avait pas de différence significative entre les groupes de longueurs et diamètres différents. Cette hypothèse a également été confirmée avec la résistance à l'ELU des essais d'optimisation qui n'ont eux aussi pas montré de différence significative entre les groupes. En conséquence, les différents groupes de longueur et de diamètre des billons peuvent être considérés de la même manière dans cette étude.

### Orientation des entures

Comme développé dans la section 8.4.1, les entures verticales, ayant la force appliquée parallèlement aux entures, ont montré une significativement meilleure résistance en flexion que les entures horizontales, ayant la force appliquée perpendiculairement aux entures. Pour les essais d'optimisation, les entures ont été positionnées horizontalement, ce qui implique que la résistance en flexion obtenue à l'ELU est probablement plus faible que

celle qui aurait été obtenue en positionnant les entures verticalement. Ces résultats sont en accord avec Avila (2003) et Ong et al. (2019) qui affirment que les entures verticales impliquent une meilleure résistance [39, 40]. Par conséquent, il conviendrait de conserver l'orientation verticale pour de futurs essais.

## 12.2 Perspectives d'utilisation

Il ne serait pas pertinent d'étudier l'aboutage de billons de faible diamètre sans envisager à tout le moins une utilisation dans la construction. Pour cette raison, une brève analyse d'une utilisation concrète possible accompagnée d'une estimation très grossière des coûts est présentée dans cette section.

### 12.2.1 Plancher

Une des utilisations envisagées de billons de bouleau aboutés à l'état vert pourrait par exemple être des solives d'un plancher. Un dimensionnement hypothétique ainsi qu'un schéma de principe ont dès lors été effectués afin d'analyser la faisabilité de cette utilisation.

Le plancher a été dimensionné en se basant sur les résultats de 8 essais non-destructifs ayant respecté les critères de rejet.

En utilisant la formule,

$$F_{ELU} = \frac{\gamma_m}{k_{mod}} \cdot \alpha \cdot q_{ELU} \cdot L, \quad (12.1)$$

avec :

- $F_{ELU}$ , la force moyenne appliquée par le vérin à l'ELU pour les 8 essais qui ont respecté les critères de rejet ;
- $\gamma_m$ , un coefficient de sécurité égal à 1,3 dans le cas de calcul ELU de bois massif [/];
- $k_{mod}$ , un coefficient réducteur qui dépend de la classe de service et du temps d'application de la charge [/];
- $\alpha$ , un coefficient permettant de considérer la force appliquée lors des essais comme une charge répartie uniformément [/];
- $q_{ELU,moy}$ , la combinaison de charge moyenne à l'ELU pour les 8 essais qui ont respecté les critères de rejet [ $kN/m$ ];
- $L$ , la longueur moyenne des billons aboutés [ $m$ ].

on obtient,

$$q_{ELU,moy} = 1,54kN/m. \quad (12.2)$$

En négligeant le poids propre et en considérant une charge d'exploitation de l'ordre de  $3 kN/m^2$ , un plancher de 2 mètres de long qui supporterait  $3,08 kN/m^2$  pourrait être construit avec un entraxe de 50 cm. Deux vues en coupe du principe du plancher ont été effectuées sur les Figures 12.4 et 12.5.

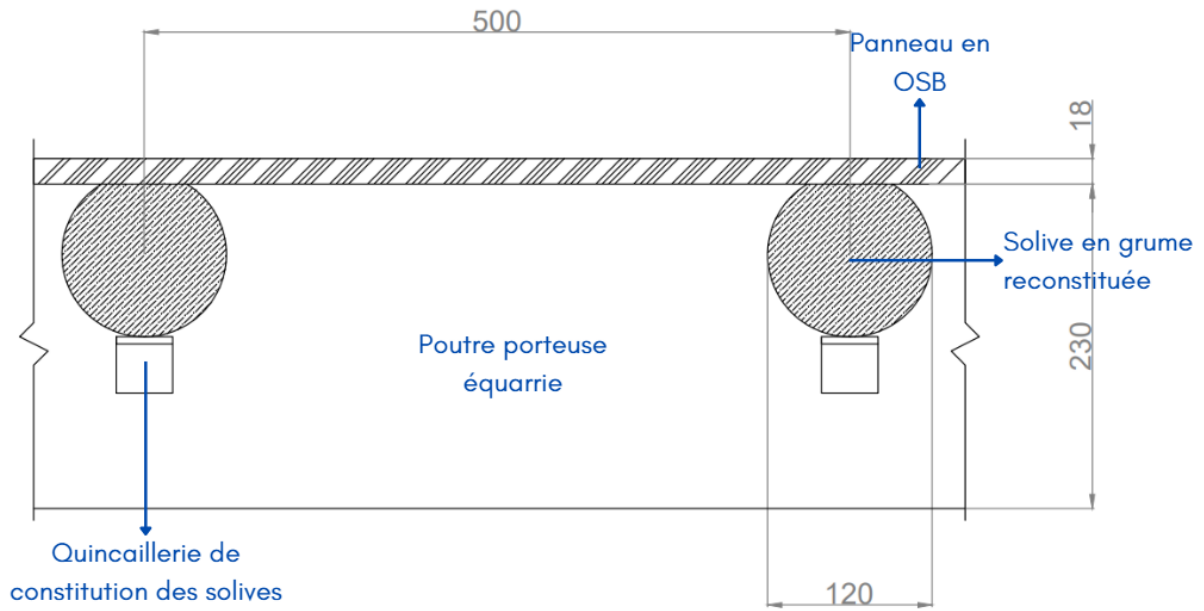


FIGURE 12.4 – Vue en coupe transversale.

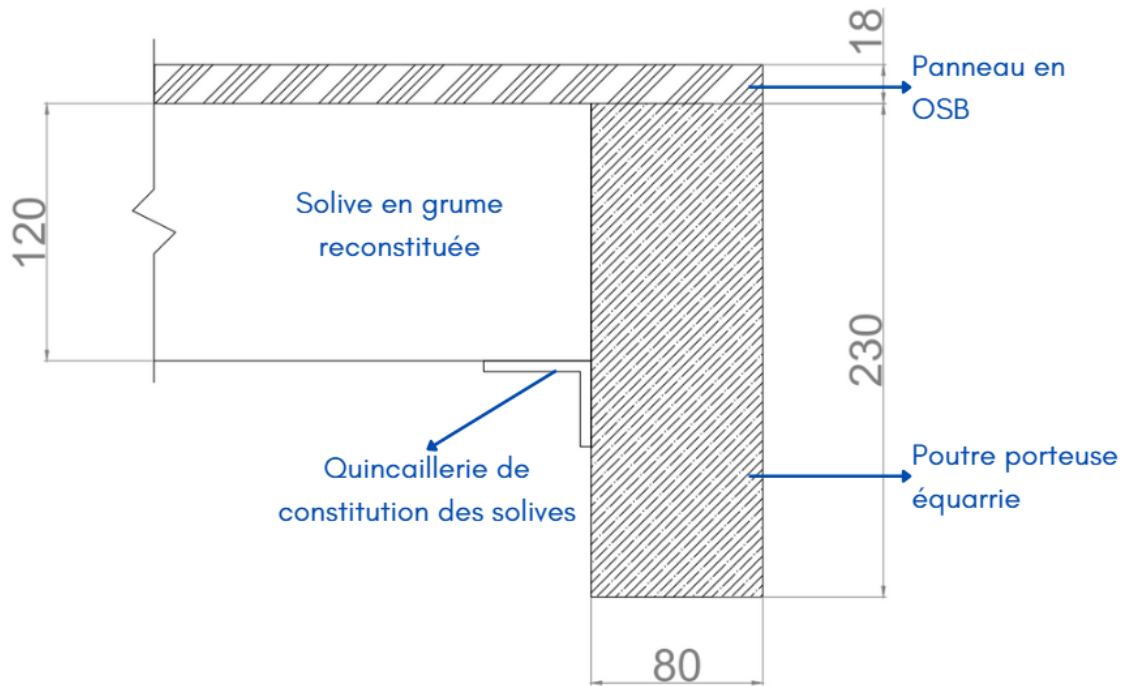


FIGURE 12.5 – Vue en coupe longitudinale du plancher (extrémité).

Pour conclure, cette utilisation semble être une bonne solution mais mériterait une analyse plus approfondie ainsi que la création d'un prototype pour une étude plus complète.

## 12.2.2 Analyse succincte des coûts

Selon Antoine Braibant, exploitant forestier chez Braibant Bois, il est complexe d'estimer un prix pour du bouleau de faible diamètre au vu de l'utilisation actuelle de cette ressource. C'est en effet de nos jours un bois de trituration, c'est-à-dire qu'il est utilisé pour la fabrication de pâte à papier ou de panneaux de contreplaqués, qu'il est compliqué de trouver en quantités industrielles actuellement. Cependant, Dubois (2023) a mis en avant le développement du bouleau dans nos régions en évoquant l'augmentation de 20% du volume total du bouleau en Wallonie [7]. Antoine Braibant a tout de même donné un prix d'achat de 15 à 25€ par tonne pour un bouleau frais qui a poussé dans de bonnes conditions, comme par exemple, sur un terrain plat. En sachant qu'un bouleau frais pèse environ  $800 \text{ kg/m}^3$ , cela donne entre 12 et 20 €/m<sup>3</sup>.

Il est possible de comparer ce prix avec celui de solives constituées de bois équarri telles que majoritairement utilisées présentement. En prenant des chevrons de 38x150mm chez Bourguignon par exemple, le prix est de 560€/m<sup>3</sup>. En comptant que pour une même charge, il faut trois fois moins de chevrons que de billons aboutés, on obtient la valeur de 186,55€/m<sup>3</sup> [88].

Ces valeurs sont présentées à titre indicatif étant donné que les coûts liés à l'aboutage et au transport ne sont pas connus, que la mise en œuvre de billons aboutés pourrait être plus complexe et coûter plus cher ou encore que les traitements nécessaires à la durabilité ne sont pas connus. Ces deux valeurs étant très différentes, il reste donc une marge relativement importante au bouleau de faible diamètre pour trouver une utilisation avec le moins de coûts possible pour faire concurrence aux bois équarris habituellement utilisés dans la construction en bois.

## 12.3 Explorations futures

### 12.3.1 Classement visuel

Pour rappel, un classement visuel de bouleau de faible diamètre n'existe pas actuellement. Dans le cadre de cette étude, un classement visuel basé sur le classement visuel du hêtre et du peuplier a été mis en place, mais celui-ci n'a pas apporté d'éléments propres au bouleau.

Par exemple, selon Alpo (1999), les bois juvéniles possèdent plus de nœuds. Il est donc raisonnable de penser que les critères liés aux nœuds appliqués aux billons n'ont pas eu le même impact qu'ils auraient eu sur des grumes de plus gros diamètres. Cet impact a été important comme il a été expliqué dans le Chapitre ?? où il a pu être remarqué que le classement visuel des 15 billons non-aboutés testés en flexion reste identique en prenant en compte l'ensemble des critères ou en ne prenant en compte que les critères liés aux nœuds. Ces critères liés aux nœuds classent plus de 95% des billons dans la classe de qualité visuelle "C" ou "D" comme illustré sur la Figure 12.6.

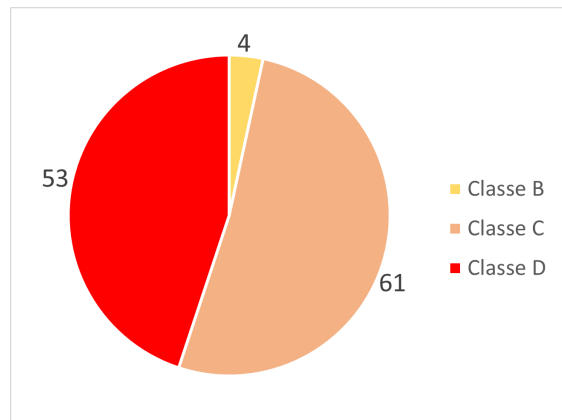


FIGURE 12.6 – Classes de qualité visuelle des 108 billons utilisés.

Les critères liés aux nœuds impliquent aussi une répartition très peu homogène parmi les 4 classes de qualité visuelle. Cela peut provenir simplement à des grumes réceptionnées de mauvaise qualité, mais cela pourrait aussi démontrer que le classement visuel utilisé n'était pas adapté au bouleau de faible diamètre. En effet, peut-être qu'en prenant en compte les nœuds avec une plus grande tolérance pour les classes de meilleure qualité, cela permettrait d'estimer plus correctement la qualité relative des boudeaux de faible diamètre. Mais cette hypothèse se doit d'être vérifiée car il est possible que, même s'ils sont très restrictifs, ces critères soient bien représentatifs de la qualité. Il serait alors intéressant d'analyser s'il est possible que l'aboutage purge les zones comportant une trop grande quantité de nœuds ou des nœuds de trop gros diamètre.

En conclusion, le classement visuel utilisé n'était sûrement pas le mieux adapté. Une étude approfondie de l'impact des défauts retrouvés chez le bouleau sur sa résistance serait pertinente afin de développer un classement visuel propre à cette essence. Cela permettrait d'écarter les grumes possédant des défauts ayant une influence trop importante sur la résistance afin d'obtenir des aboutages uniquement composés de billons de meilleure qualité.

### 12.3.2 Différents diamètres

Les essais ont été réalisés sur des billons de diamètres compris entre 50 et 120 mm. Dans le Chapitre 8, la différence de résistance en fonction du diamètre a été analysée et considérée comme négligeable. Il pourrait être intéressant d'étendre la gamme de diamètres pour analyser si des diamètres plus fins ou plus gros ont un impact sur la résistance en flexion. Si cet impact est positif ou neutre, cela permettrait une plus large utilisation de cette technique.

### 12.3.3 Comportement au séchage d'un aboutage de bois vert

Pour assurer une bonne conception des structures, il est nécessaire de mettre en oeuvre des bois secs, c'est-à-dire avec une teneur en humidité comprise entre 8 et 12%. Lors de l'aboutage du bois vert, les bois ont par définition une teneur en humidité au-dessus du point de saturation des fibres (PSF). Par conséquent, il est nécessaire de les sécher de manière artificielle avant de les mettre en oeuvre car le séchage naturel ne permet pas d'atteindre des teneurs en humidité aussi faibles. Cependant, le séchage peut impliquer quelques problèmes.

Lors du séchage artificiel, trois phénomènes ont lieu dans le bois. Le premier est le transfert thermique, puisque le bois est non uniformément chauffé. Le deuxième est le mouvement de l'eau dans le bois, car l'eau doit forcément s'évaporer pour que le bois puisse sécher. Le troisième phénomène est le changement volumétrique. À partir d'une teneur en humidité inférieure au PSF, le séchage provoque l'évacuation de l'eau liée, l'eau située dans les parois cellulaires, ce qui implique le gonflement ou le retrait du bois, qui diffère en fonction de l'orientation considérée dans le bois. Ces phénomènes font en sorte que le bois ne sèche pas de la même manière dans le centre ou en surface et provoquent un retrait non uniforme dans le bois et créent des contraintes de séchage qui peuvent être à l'origine de fentes dans le bois [5, 70].

Ces fentes sont généralement à éviter le plus possible. Selon les techniques, des fentes plus au moins nombreuses et plus au moins grosses se développent. Dans le cas de l'aboutage du bois vert, le comportement au séchage est peu référencé dans la littérature, mais ces fentes pourraient être problématiques. En effet, si celles-ci se développent au niveau de l'aboutage, elles pourraient impacter l'aboutage, voir le traverser, ce qui aurait forcément un impact sur sa résistance. De plus, Clouet (2014) affirme que, comme le bois est collé, une partie du retrait est empêché, ce qui implique un développement de contraintes dans l'aboutage [56].

Le comportement de l'aboutage au séchage sera analysé une première fois dans la suite de cette étude puisque les essais non-destructifs permettent d'effectuer des essais ultérieurs sur ces grumes reconstituées.

Si le développement de contraintes est trop important dans le cas d'aboutage à l'état vert, il sera peut-être nécessaire d'effectuer une fente de soulagement pour permettre la libération des contraintes. Cependant, la position

de cette fente devra être soigneusement réfléchi par rapport à l'aboutage car celle-ci pourrait avoir un impact sur sa résistance.

### 12.3.4 Durabilité des billons de bouleau

Un des points qui mériteraient également de l'attention est la durabilité des billons de bouleau non fraisés. L'écorce, ainsi que l'aubier (la partie périphérique du tronc située entre le duramen et l'écorce qui est la plus récente) ne garantissent pas une bonne durabilité. La durabilité de l'aubier de bouleau est située dans la classe V, c'est-à-dire la plus mauvaise. Par ailleurs, si de l'eau parvient à pénétrer le bois, ne pas écorcer les billons implique une plus grande probabilité de rétention de l'humidité, car l'écorce du bouleau est imperméable, et, par la suite, d'attaques de champignons. Il faudrait par conséquent analyser s'il est nécessaire d'enlever l'écorce avant la mise en œuvre ou d'appliquer un traitement de préservation.

### 12.3.5 Système vibratoire

Des améliorations pourraient également s'inspirer par analogie d'autres domaines techniques. Par exemple, pour enfoncer un pieu dans le sol, il existe une technique consistant à faire vibrer le sol par l'intermédiaire du pieu. Ce dernier s'enfonce alors sous son propre poids. Il s'agit du vibrofonçage. Cette technique est, la plupart du temps, la plus rapide que le fonçage par battage, qui consiste à enfoncer les pieux par martèlement. Dans le cas du fonçage par battage, la force appliquée sur le pieu peut le détériorer. Ce n'est pas le cas du vibrofonçage, car la pénétration se déroule sous un effort permanent appliqué au pieu [89].

Ce principe pourrait être appliqué à l'aboutage. En combinant cette méthode avec une meilleure souplesse des entures, cela permettrait aux entures de s'enfoncer plus facilement et d'ainsi diminuer le jeu de fond d'entures. Afin d'analyser la plus-value de cette technique, une étude plus poussée de ce type de dispositif devrait être effectuée pour que celui-ci comprenne une cellule vibrante permettant de faire vibrer les éléments en bois.

### 12.3.6 Exploration d'autres assemblages

Si la résistance de l'aboutage ne parvient pas à s'approcher suffisamment de celle du bouleau, il pourrait être envisagé d'étudier d'autres types d'assemblages. Par exemple, le biseau plat et le mi-bois sont deux types d'assemblages qui ont été écartés de cette étude car ils impliquent une grande perte de longueur. Cependant, si ces assemblages permettent d'obtenir une meilleure résistance, cela pourrait contrebalancer la perte de longueur plus importante.

### 12.3.7 Industrialisation

D'autres essais devront être effectués selon la norme EN 15497, en complément à l'amélioration de la résistance de l'aboutage, pour pouvoir envisager une industrialisation de cette méthode. Cette norme préconise une série d'essais à effectuer pour vérifier les performances et exigences minimales de fabrication d'un aboutage.

Plusieurs éléments devraient par ailleurs être améliorés pour développer un processus industriel.

- Les nœuds : La norme EN 15497 préconise que l'aboutage ait lieu à une distance d'au moins 3 fois le diamètre du plus gros nœud le plus proche de la zone d'aboutage [42]. Cette contrainte ne pourra pas facilement être respectée dans un processus industriel. Il serait par conséquent pertinent d'analyser l'influence de la présence de nœuds proches de l'aboutage ou dans celui-ci sur la qualité du collage et sur la résistance de l'aboutage. Cela permettrait de savoir s'il est possible de négliger ou non ce critère très contraignant en raison de la quantité de nœuds présente dans les grumes de faible diamètre. Si ce critère n'est pas négligeable, il faudra développer une technique permettant de détecter les nœuds et d'effectuer la découpe des billons selon la recommandation de la norme EN 15497.

- Le pressage : Dans un processus industriel, comme par exemple lors des aboutages effectués par la scierie Hoffman, le pressage des éléments en bois pour les abouter s'effectue en 2 secondes et la pression n'est pas maintenue par la suite. Pourtant, les essais d'optimisation ont montré que les temps de serrage donnant les meilleurs résultats sont de 1 heure et de 4 heures. Des essais supplémentaires devraient être effectués afin de confirmer ces données. De plus, il est possible qu'en améliorant le processus d'aboutage, des résultats suffisants soient obtenus avec des temps de serrage plus faibles que celui permettant d'obtenir la meilleure résistance.

# Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'analyser la faisabilité de l'aboutage de grumes à l'état vert de bouleau de faible diamètre. Ce sujet s'inscrit dans les enjeux environnementaux actuels à travers le choix d'optimiser la ressource de bouleau de faible diamètre. En effet, cette essence est abondante dans les régions d'Europe occidentale, car elle est pionnière et possède une grande adaptabilité à divers climats et sols. De plus, cette importante adaptabilité lui permet une grande résilience, un atout qui sera probablement très utile avec le changement climatique. Le bouleau est également une essence qui se développe actuellement en raison de la préoccupation croissante de diversification des forêts liée à une gestion forestière plus durable.

Le bouleau de faible diamètre, considéré dans ce travail comme étant compris entre 50 et 120 mm de diamètre, est actuellement principalement utilisé dans l'industrie du papier. Or, ouvrir son champ des possibles à l'utilisation en structure serait une grande valorisation à la fois écologique et économique. Cela répondrait également aux demandes croissantes d'utilisation du bois, liées à la conscience environnementale grandissante, dans le secteur de la construction en permettant d'optimiser au mieux toutes les ressources disponibles. Pour ces raisons, trouver une utilisation en construction du bouleau de faible diamètre est d'un réel intérêt pour le futur.

Un autre enjeu de la construction est l'accessibilité économique des produits issus de l'industrie du bois. Or, ce qui coûte généralement le plus cher, c'est la transformation du bois brut en un produit utilisable. Sur base de cette réflexion, une volonté de ce projet a été d'effectuer le moins de transformations possible en partant de la grume de bouleau. Pour ces raisons, lors de la réflexion autour de la fabrication de l'aboutage, il a été décidé de ne dégauchir que légèrement une seule face des billons. Ce dégauchissement était néanmoins nécessaire, car il a permis d'avoir une surface de référence lors de l'usinage des entures.

Cette étude s'est divisée en trois campagnes d'essais. La première a concerné la résistance en flexion de 15 billons de bouleau de faible diamètre et avait comme objectif de déterminer la résistance en flexion du bouleau non-abouté pour obtenir une valeur de référence pour les comparaisons. La deuxième s'est concentrée sur 17 essais préliminaires de billons de bouleau aboutés à l'état vert qui ont permis d'analyser la faisabilité de cette technique. Enfin, la dernière partie a porté sur 36 essais d'optimisation d'aboutage de bouleau à l'état vert pour tenter d'améliorer le processus d'aboutage ainsi que les résultats obtenus lors de la deuxième campagne d'essai.

Lors de la première campagne d'essais (15 billons de bouleau de faible diamètre testés en flexion), des résultats surprenants ont été obtenus. En effet, la résistance caractéristique obtenue est de  $42,1 \text{ MPa}$  et la résistance moyenne est de  $53,3 \text{ MPa}$ , ce qui est faible comparé à la valeur de  $130 \text{ MPa}$  donnée par la littérature [90]. L'impact de la présence de bois juvénile ainsi que de la présence de nœuds, parfois de grandes tailles, peuvent être considérés comme les principaux effets jouant sur la résistance en flexion du bois de faible diamètre.

La deuxième campagne d'essais (effectuée sur 17 billons de bouleau aboutés à l'état vert) a permis de montrer la faisabilité de cette nouvelle technique. Elle a aussi permis de prouver que les différents groupes de longueur et de diamètres conservant un élancement similaire n'avaient pas d'influence sur la résistance et que tous les essais pouvaient être comparés ensemble, ce qui a été confirmé par la troisième campagne. Les essais préliminaires ont obtenu une résistance moyenne en flexion de  $25,6 \text{ MPa}$ , ce qui correspond au quart de la résistance du bouleau. De plus, les ruptures de tous les essais se sont déroulées dans la ligne de colle avec moins de 70% de bris dans la

fibre de bois. Ces essais ont également permis de montrer que la résistance en flexion du bouleau abouté dépend de l'orientation des entures. Les entures verticales ont une résistance en flexion significativement plus importante que les entures horizontales.

Plusieurs facteurs ont probablement influencé la qualité des essais préliminaires, dont les principaux étant la teneur en humidité des billons, la pression trop importante et les imperfections dans l'alignement des billons entre eux.

Suite à la deuxième campagne, des pistes d'amélioration ont été réfléchies et apportées à la troisième campagne d'essais (36 essais de bouleau de faible diamètre abouté vert) qui a été réalisée en flexion non-destructive. Les résultats obtenus se sont montrés plus performants que ceux des essais préliminaires. Par contre, lors de ces derniers essais, près de deux tiers des essais ont été rejetés suite à des signes de faiblesses ce qui soulève des interrogations sur le protocole employé. Une des explications à cela pourrait être une flèche imposée trop grande pour ce cas qui implique une force appliquée par le vérin lors du chargement à l'ELU trop importante par rapport à la résistance en flexion des billons.

Une des appréhensions de l'aboutage de billons portait sur l'esthétique du visuel obtenu avec des circonférences et diamètres différents. Cependant, lors des essais, cette différence ne s'est pas marquée significativement alors que le nombre de billons restreints ne permettait pas une grande quantité de combinaisons possibles.

Pour améliorer et optimiser encore le processus d'aboutage et sa résistance, plus d'essais mériteraient d'être effectués afin de vérifier les hypothèses avancées dans ce travail. Les paramètres de serrage pourraient être testés avec plus de variations pour obtenir des valeurs de temps et de pression optimales avec davantage de précision. D'autres explorations pourraient également être effectuées :

- la mise en place d'un système de vibration dans le dispositif de serrage pour s'assurer d'un emboîtement parfait des entures ;
- la variation de la géométrie des entures ;
- le comportement au séchage de l'aboutage à l'état vert ;
- la mise en place d'un classement visuel permettant d'effectuer un premier tri lors de la découpe des billons pour écarter les grumes comportant des défauts ayant un impact trop important sur leur résistance ;
- des essais de durabilité permettant de déterminer la possibilité d'utiliser les bouleaux non écorcés en structure.

D'autres propriétés telles que la résistance à d'autres modes de sollicitations, la masse volumique du bois ou encore la résistance et la réaction au feu devraient également être testées avant d'envisager la commercialisation de ce produit selon la norme EN 15 497 concernant le bois massif à entures multiples [42]. Ces optimisations devront tenir compte du fait que, selon certains auteurs, la résistance d'un aboutage d'une essence feuillue n'atteint jamais la résistance du bois [41]. L'objectif est donc de tenter de s'en approcher le plus possible afin d'améliorer le plus possible ce produit et envisager une utilisation industrielle. Une application potentielle de ce produit qui a été envisagée est celle de la confection de solives de plancher. Il serait intéressant de la tester pour analyser sa faisabilité en pratique.

Pour conclure, même si de nombreuses améliorations et optimisations restent à effectuer avant d'envisager une fabrication et un usage industriel de billons de bouleau de faible diamètre aboutés à l'état vert, les résultats sont assez prometteurs et méritent une plus ample exploration. Cela permettrait de répondre favorablement à plusieurs enjeux présents dans la construction en bois actuellement, tel que l'optimisation de la ressource de bois et la recherche de moindre transformation des éléments en bois. Ces raisons démontrent l'intérêt de poursuivre les recherches sur ce produit pour faire évoluer le secteur de la construction, et plus particulièrement de la construction en bois, vers un avenir plus durable prenant en compte les enjeux environnementaux actuels.

Finalement, ce travail m'a fait découvrir les plaisirs, les contraintes et les soucis techniques d'une recherche expérimentale. Cette expérience a stimulé mon intérêt pour la recherche ayant un impact sur l'environnement. Elle vient compléter mon cursus universitaire dans un domaine qui me passionne et que je souhaiterais vivement continuer à explorer.

# Bibliographie

1. VOLZ, M., WINTER, W., HERZOG, T., NATTERER, J. & SCHWEITZER, R. *Construire en bois* ISBN : 978-2-88076-602-5 (Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012).
2. NATTERER, J. *Construction en bois* (EPFL Press, jan. 2004).
3. HOUT INFO BOIS. *La forêt est-elle le 'poumon' de la planète ?* (non-publié).
4. FRERE, H. État de la construction en bois en Belgique en 2011 et 2012. *Hout Info Bois* (2013).
5. HOUT INFO BOIS. *Bois - guide pour le bon usage* (2012).
6. *PanoraBois 2024 Wallonie* rapp. tech. (Filière Bois Wallonie, 2024).
7. DUBOIS, H., LAYON, J. & CLAESSENS, H. *Sylviculture du bouleau : l'essence montante de l'Europe occidentale* 142. ISBN : 9782931178157 (Forêt.Nature, 2023).
8. DUBOIS, H., VERKASALO, E. & CLAESSENS, H. Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests* **11**, 26p (2020).
9. *Fichier écologique des essences - Bouleau pubescent* rapp. tech. (ACRVF, SPW ARNE, ELIE-UCL, GXABT-ULG, FORÊT.NATURE).
10. VERKASALO, E. Birch As Sawn Timber and in Mechanical Further Processing in Finland. A Literature Study. *Silva Fennica Monographs*, 41p (2000).
11. FAO - ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Gestion durable des forêts* (Consulté le 15/05/2024). <https://www.fao.org/sustainable-forests-management/fr/>.
12. DUBOIS, H. *Le Bouleau, (Betula pendula ROTH et B. Pubescens EHRH.) essence d'avenir en Europe occidentale ?* 2022.
13. BERTHELON, C. Impact du changement climatique sur le hêtre et l'épicéa, le long d'un gradient altitudinal. *HAL open science*, 39-. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01869759> (sept. 2012).
14. LATTE, N., LEBOURGEOIS, F., KINT, V., DROUET, T. & CLAESSENS, H. Le Hêtre face au changement climatique : le cas de la Belgique. *Revue forestière française* **69**, pp.205-218. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01831383> (2017).
15. PIEDALLU, C., PÉREZ, V., GÉGOUT, J.-C., LEBOURGEOIS, F. & BERTRAND, R. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue forestière française* **LXI**. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-00835897> (2009).
16. *Fichier écologique des essences - Bouleau verruqueux* rapp. tech. (ACRVF, SPW ARNE, ELIE-UCL, GXABT-ULG, FORÊT.NATURE).
17. DUBOIS, H., LATTE, N., LECOMTE, H. & CLAESSENS, H. Le bouleau, une essence qui s'impose. *Forêt.Nature* **140**, 44-58p (2016).
18. KILPELÄINEN, H., LINDBLAD, J., HERÄJÄRVI, H. & VERKASALO, E. Saw log recovery and stem quality of birch from thinnings in southern Finland. *Silva Fennica* **45**. <https://doi.org/10.14214/sf.117> (jan. 2011).

- 
19. NBN EN 350. *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthodes d'essais et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2016).
  20. NBN EN 335. *Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi: définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2013).
  21. ALMEIDA, G. & HERNÁNDEZ, R. E. Changes in Physical Properties of Yellow Birch Below and Above the Fiber Saturation Point. *Wood and Fiber Science* **38**, 74-83. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/download/2013/2013> (jan. 2006).
  22. TIEMANN, H. D. *Effect of Moisture Upon the Strength and Stiffness of Wood* 144p (U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1906).
  23. PENSIS, Z., HEBERT, J. & JOUREZ, B. *Potentiel du bois de bouleau (Betula pendula Roth B. pubescent Enrh) produit en Région wallonne et en Europe - Application à l'entreprise belge Kewlox* mém. de mast. (ULiège, 2020).
  24. IGN - INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE. *Dimension des bois (4 classes)* (Consulté le 17/08/2024). 2022.
  25. RANTA-MAUNUS, A. *Round-small-diameter timber for construction. Final report of project FAIR CT 95-0091* rapp. tech. (Technical Research Centre of Finland, 1999).
  26. WOLFE, R. Research challenges for structural use of small-diameter round timbers. *Forest products journal* **50**, 21-29. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/wolfe00a.pdf> (fév. 2000).
  27. BUKAUSKAS, A. *New structural systems in small-diameter round timber* jan. 2015. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/99241>.
  28. DE MORAES PEREIRA, M. C., NETO, C. C., ICIMOTO, F. H. & CALIL Junior, C. Evaluation of Tensile Strength of a Eucalyptus grandis and Eucalyptus urophylla Hybrid in Wood Beams Bonded Together by Means of Finger Joints and Polyurethane-Based Glue. *Materials research* **19**, 1270-1275. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0072> (sept. 2016).
  29. DYNAMIQUE ENVIRONNEMENT. *Projets* <https://www.dynamique-environnement.com/projets/>.
  30. HUET BOIS. *Wooden garden chalet, log cabin - wooden cottage* <https://www.huetbois.be/en/wooden-garden-chalet-log-cabin-wooden-cottage>.
  31. ARCHITECTS, P. B. *Hooke Park* 2015. <https://www.prewettbizley.com/graham-bizley-blog/2015/6/19/hooke-park>.
  32. ARCHITECTURAL ASSOCIATION. *Hooke Park* <https://hookepark.aaschool.ac.uk/biomass-boiler-house/>.
  33. FICUS, M. & MUSSIER, J. *Construire avec le bois* (Le Moniteur, 2019).
  34. DAGENAIS, C. *Aboutage de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux* 2007.
  35. DERBAL, W., ZERIZER, A., GERARD, J. & GUIBAL, D. Caractérisation d'aboutages à entures multiples pour trois essences d'Algérie. *Bois et forêts des tropiques* **3**, 59-70p (2015).
  36. GONZÁLEZ-PRieto, O., MIRÁS, J. M. C. & TORRES, L. O. Finger-jointing of green Eucalyptus globulus L. wood with one-component polyurethane adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff* **80**, 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01770-7> (nov. 2021).
  37. MUTHUMALA, C. K., DE SILVA, S., ALWIS, P. L. A. G. & ARUNAKUMARA, K. K. I. U. Identification of the best finger joint configuration for Sri Lankan wood species based on the flexural strength. *Journal of the Indian Academy of Wood Science* **18**, 89-96. <https://doi.org/10.1007/s13196-021-00284-2> (sept. 2021).

- 
38. ROSALES, V. *et al.* Feasibility of Bonding High-Moisture-Content Wood Using *Nothofagus chilean* Species. *Forests* **14**, 2386. <https://doi.org/10.3390/f14122386> (déc. 2023).
  39. AVILA, C. B. *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire* thèse de doct. (Université Laval, 2003).
  40. DE SOUZA NOGUEIRA, R., MORITANI, F. Y., ICIMOTO, F. H., DIAS, A. A. & CALIL, C. Performance of one-component polyurethane (1C-PUR) adhesives in the production of finger-joints fabricated from four planted forest species. *Holz als Roh- und Werkstoff* **80**, 1421-1431. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01870-y> (août 2022).
  41. LARA-BOCANEGRA, A. J., MAJANO-MAJANO, A., CRESPO, J. & GUAITA, M. Finger-jointed *Eucalyptus globulus* with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. *Construction building materials* **135**, 529-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004> (mars 2017).
  42. NBN EN 15497. *Bois massif de structure à entures multiples - Exigences de performances et exigences minimales de fabrication* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2014).
  43. VRAZEL, M. & SELLERS, T. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint. *Forest products journal* **54**, 66-75. <http://fwrc.msstate.edu/pubs/9540.pdf> (jan. 2004).
  44. MANTANIS, G., KARASTERGIU, S. & BARBOUITIS, I. Finger jointing of green Black pine wood (*Pinus nigra* L.) *Eur. J. Wood. Prod.* **69**, 155-157 (2011).
  45. BUSTOS, C., HERNÁNDEZ, R. E., BEAUREGARD, R. & MOHAMMAD, M. Effects of end-pressure on the finger-joint quality of black spruce lumber: a microscopic analysis. *Maderas. Ciencia y tecnología* **13**, 319-328. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2011000300007> (jan. 2011).
  46. LUKOWSKY, D. & NGUYEN, H. Analysis of Wood Bonding Failures that Initiated Before Adhesive Solidification: Air Fingers and Cavitation. *Journal of Failure Analysis and Prevention* **23**, 1059-1067p (2023).
  47. JUVONEN, R. in *Production, Marketing and Use of Finger-Jointed Sawnwood: Proceedings of an International Seminar organized by the Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe Held at Hamar, Norway, at the invitation of the Government of Norway, 15 to 19 September 1980* (éd. PRINS, C. F. L.) 181-189 (Springer Netherlands, Dordrecht, 1982). ISBN : 978-94-015-3859-6. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-3859-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-015-3859-6_19).
  48. MORLIER, P. & BESNARD, S. *Si nous parlions du projet ABOVE ?* in (2016).
  49. POMMIER, R. & ELBEZ, G. Finger-jointing green softwood: Evaluation of the interaction between polyurethane adhesive and wood. *Wood material science engineering* **1**, 127-137. <https://doi.org/10.1080/17480270701217269> (sept. 2006).
  50. BARDET, S. & CARÉ, S. *Projet GreenWood : Utilisation du bois vert dans la construction : Effet du séchage sur les propriétés rhéologiques et hydriques* in (2019).
  51. POMMIER, R. Compréhension de l'aboutage du bois vert : détermination du procédé et principes physico-mécaniques appliqués au Pin maritime. *XXVeme Rencontres Universitaires de Génie Civil 2007 - Prix Rene HOUVERT* (2007).
  52. STERLEY, M. *Green gluing of wood* jan. 2004. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:7702/FULLTEXT01>.
  53. LAVALETTE, A., POMMIER, R., COINTE, A., DELISEE, C. & DANIS, M. Analyse de l'influence des paramètres de collage d'un contreplaqué à l'état vert sur ses propriétés mécaniques. *21eme Congrès Français de Mécanique* (2013).
  54. BENKREIF, R., Z. BRAHMIA, F. & CSIHA, C. Influence of moisture content on the contact angle and surface tension measured on birch wood surfaces. *European Journal of Wood and Wood Products* **79**, 907-913 (2021).
  55. STERLEY, M. Characterisation of green-glued wood adhesive bonds. *Linnaeus University Dissertations* **85**. <http://lnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:525573> (2012).

- 
56. CLOUET, B. *Comportement hydromecanique d'assemblages collés à l'état vert - Approche expérimentale et numérique* thèse de doct. (Université de Bordeaux, 2014).
  57. KARASTERGIOU, S., MANTANIS, G. I. & SKOULARAKOS, K. Green gluing of oak wood (*Quercus conferta* L.) with a one-component polyurethane adhesive. *Wood material science engineering* **3**, 79-82. <https://doi.org/10.1080/17480270802605537> (sept. 2008).
  58. BUSTOS, C., MOHAMMAD, M., HERNANDEZ, R. E. & BEAUREGARD, R. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber. *Forest products journal* **53**, 85-89. <https://europemc.org/article/AGR/IND44644184> (jan. 2003).
  59. DIN 4074-2. *Building Timber for Wood Building Components - Quality Conditions for Building Logs (Sofwood)* rapp. tech. (Deutschen Normenausschusses, Berlin, 1958).
  60. MOENS, C. & NICLAES, J. *Caractérisation mécanique des grumes* Prom : P. Latteur. Mém. de mast. (Ecole Polytechnique de Louvain, Université Catholique de Louvain, 2021).
  61. DIN 1052. *Étude, calcul et dimensionnement des ouvrages en bois* rapp. tech. (Deutschen Normenausschusses, Berlin, 2012).
  62. NBN EN 1316-1. *Bois ronds feuillus - Classement qualitatif - Partie 1: Chêne et hêtre* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2012).
  63. NBN EN 1927. *Classement qualitatif des bois ronds résineux* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2008).
  64. HOUBEN, V. *Caractérisation mécanique non destructive des grumes à l'aide du GrindoSonic* mém. de mast. (Ecole Polytechnique de Louvain, Université Catholique de Louvain, 2022).
  65. LLANA, D. F., ÍÑIGUEZ-GONZÁLEZ, G., PLOS, M. & TURK, G. Grading of recovered Norway spruce (*Picea abies*) timber for structural purposes. *Construction and Building Materials* **398**, 132440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132440> (sept. 2023).
  66. MARTÍNEZ, R., CALVO, J., ARRIAGA, F. & BOBADILLA, I. In situ density estimation of timber pieces by drilling residue analysis. *European Journal of Wood and Wood Products* **76**, 509-515. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1214-7> (juin 2017).
  67. ROBERT, E. & EBY, P. E. in *Production, Marketing and Use of Finger-Jointed Sawntwood: Proceedings of an International Seminar organized by the Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe Held at Hamar, Norway, at the invitation of the Government of Norway, 15 to 19 September 1980* (éd. PRINS, C. F. L.) 115-120 (Springer Netherlands, Dordrecht, 1982). ISBN : 978-94-015-3859-6. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-3859-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-015-3859-6_14).
  68. BRUNIN, E., HEYNINCK, C. & ARNAL, D. *Carnet d'assistance pour l'évaluation qualitative des bois sur pied et abattus* 102 (Forêt Wallonne, 2012).
  69. NBN EN 408. *Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2010).
  70. MOUTEE, M. *Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage* thèse de doct. (Université Laval, Québec, 2006).
  71. BIDZO, C. H. N., PITTI, R. M., NZIENGUI, C. F. P., IKOGOU, S. & KAISER, B. Résistance au cisaillement des joints de colle de Bois Lamellé Collé d'origine tropicale. *Academic Journal of Civil Engineering* **38**, 145-148. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.35> (sept. 2020).
  72. PROTIMETER. *Professional Moisture Meters Accessories That Deliver* Consulté le 09/08/2024. <https://www.protimeter.com/>.
  73. EVERAD ADHESIVES SAS. *Everad RPM 1127 - Colle PUR technique pour collages bois* 2023.
  74. NBN EN 14080. *Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2013).

- 
75. NBN EN 13183-1. *Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : Détermination par la méthode de dessiccation (+AC:2003)* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2002).
  76. NBN EN 14251. *Bois de structure rond - Méthodes d'essai* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2004).
  77. NBN EN 14358. *Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2016).
  78. ARRIAGA, F. *et al.* Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forest* **1202** (2023).
  79. LATORRE, Z. S. *Variation des propriétés des bois de bouleau jaune et de hêtre à grandes feuilles en fonction de l'humidité d'équilibre à deux températures* mém. de mast. (Université Laval, Québec, 2007).
  80. LATTEUR, P. *LGCIV1022 : Mécanique des structures* Ecole Polytechnique de Louvain, Université Catholique de Louvain. 2017.
  81. LATTEUR, P. *LGCIV2043 : Cours de structure en bois* Ecole Polytechnique de Louvain, Université Catholique de Louvain. 2021.
  82. NBN EN 1990 :2002. *Basis of structural design* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2002).
  83. NBN EN 1995-1-1. *Eurocode 5: Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments (+ AC:2006)* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2005).
  84. NBN EN 13183-2. *Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : estimation par méthode électrique par résistance* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2002).
  85. LAROUSSE. *Convergence* (Consulté le 08/08/2024). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/convergence/18988>.
  86. NBN EN 338. *Bois de structure - Classes de résistance* rapp. tech. (Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2016).
  87. DAHER, H., CARÉ, S., FORÊT, G. & PAYET, L. Effet de la température et de la teneur en eau sur le comportement mécanique du bois. *Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique (MECAJ), France*. <https://mecaj2023.sciencesconf.org/resource/page/id/1> (2023).
  88. BOURGUIGNON BOIS. *Douglas 38x150 mm de 3.05 à 6.10 m* (Consulté le 17/08/2024). <https://www.bourguignonbois.be/fr/madriers-38-150-a-50-125/360-douglas-38x150-mm-de-305-a-610-m-1.html>.
  89. ROCHER-LACOSTE, F. *Full-scale experimental study and numerical analysis of vibratory driven piles : vibrations in the environment and bearing capacity* déc. 2008. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005507>.
  90. HOUT INFO BOIS. *Les essences* (Consulté le 15/05/2024). <https://www.houtinfobois.be/essences-applications/essences/>.

# Annexes

# Annexe A

## Classement visuel

### A.1 Classement visuel de la campagne de 15 essais de résistance en flexion du bouleau

Le classement visuel des 15 billons utilisés lors de la première campagne d'essais est détaillé dans les Figures A.3 et A.4

	Nombre de noeuds recouverts [nbre/m]	Noeuds sains [mm/m]	Noeuds pourris [mm/m]		Fentes de coeur [mm]			Fil tors [cm/m]	Coeur excentré [%]	Cannelure	Roulure
					Fin bout	Gros bout	Coeur étoilé				
F1	10,34482759	22,4137931	18,96551724	\	\	\	\	#N/A	12,06896552	\	\
F2	2,5	95	35	\	\	\	\	#N/A	2,083333333	\	\
F3	0,81300813	98,37398374	26,82926829	\	\	\	\	#N/A	1,724137931	\	\
F4	3,546099291	34,04255319	67,37588652	\	\	\	\	#N/A	14,70588235	\	\
F5	9,565217391	26,08695652	34,7826087	\	\	\	\	#N/A	6,896551724	\	\
F6	0	63,36633663	23,76237624	\	\	\	\	#N/A	0	\	\
F7	6,542056075	49,53271028	29,90654206	\	\	\	\	#N/A	4	\	\
F8	2,06185567	59,79381443	55,67010309	\	\	\	\	#N/A	3,191489362	\	\
F9	9,444444444	10	8,888888889	\	\	\	\	#N/A	9,139784946	\	\
F10	6,622516556	42,57332072	32,16650899	\	\	\	\	#N/A	9,574468085	\	\
F11	1,063829787	26,59574468	41,4893617	\	\	\	\	#N/A	7,777777778	\	\
F12	0	72,97297297	20,72072072	\	\	\	\	#N/A	4,166666667	\	\
F13	3,875968992	17,82945736	74,41860465	\	1;2	\	\	#N/A	1,851851852	\	\
F14	0	113,9130435	10,43478261	\	\	\	\	#N/A	2,631578947	\	\
F15	0,970873786	65,04854369	5,825242718	\	\	\	\	#N/A	4,166666667	\	\

FIGURE A.1 – Classement visuel des 15 billons de bouleau des essais de résistance en flexion non-aboutés (1/2)

	Fentes traversantes	Autres fentes	Gélivures	Attaques d'insectes	Discoloration	Pourriture	Pourriture de coeur	Courbure [cm/m]	Méplat [%]	Classe de qualité
F1	\	\	\	\	\	\	\	0,775862069	12,28070175	C
F2	\	\	\	\	\	\	\	1,416666667	11,29032258	C
F3	\	\	\	\	\	\	\	0,81300813	9,375	C
F4	\	\	\	\	\	\	\	1,205673759	10,66666667	D
F5	\	\	\	\	\	\	\	1,739130435	8,333333333	C
F6	\	\	\	\	\	\	\	0,297029703	11,36363636	C
F7	\	\	\	\	\	\	\	0,654205607	6,12244898	C
F8	\	\	\	\	\	\	\	1,714285714	8	D
F9	\	\	\	\	\	\	\	#N/A	7,291666667	C
F10	\	\	\	\	\	\	\	1,702932829	10,90909091	C
F11	\	\	\	\	\	\	\	1,595744681	6,25	D
F12	\	\	\	\	\	\	\	1,441441441	7,692307692	C
F13	\	\	\	\	\	\	\	2,333333333	10,34482759	D
F14	\	\	\	\	\	\	\	1,666666667	4	C
F15	\	\	\	\	\	\	\	1,875	9,615384615	B

FIGURE A.2 – Classement visuel des 15 billons de bouleau des essais de résistance en flexion non-aboutés (2/2)

## A.2 Classement visuel de la campagne de 17 essais d'aboutage préliminaire

Le classement visuel des 34 billons utilisés lors de la deuxième campagne d'essais est détaillé dans les Figures A.3 et A.4.

	Nombre de noeuds recouverts [nbre/m]	Sommes des noeuds sains	Somme des noeuds pourris	Fentes de coeur [mm]		Coeur étoilé	Fil tors [cm/m]	Coeur excentré [%]	Cannelure	Roulure
		[mm/m]	[mm/m]	Aboutage	Non-about					
B3-I	#N/A	56,4516129	0	27;28	12;6	\	0,627240143	6,41025641	\	\
B5-I	#N/A	107,617896	55,62273277	31;11;17	18;6	Oui	0,483675937	4,285714286	\	\
B5-II	#N/A	100,591716	73,37278107	28;8;7	10;25	Oui	0,828402367	7,971014493	\	\
B5-III	#N/A	50,54151625	34,8977136	34;9	32;22;16;20	Oui	0,601684717	0	\	\
B6-I	#N/A	14,55868972	74,6132848	9;3	1,5;1,5	\	2,3	5	\	\
B6-II	#N/A	41,40786749	16,563147	34;51;14	23;17	Oui	0,207039337	9,183673469	\	\
B7-I	#N/A	82,80828083	14,40144014	4;5	28;21	\	1,350135014	9	\	\
B7-II	#N/A	40,6278855	62,78855032	24;45	25;9	Oui	2,400738689	16,66666667	\	\
B8-I	#N/A	102,484472	0	1;14	8;11	\	1,138716356	1,923076923	\	\
B8-II	#N/A	104,3165468	8,09352518	6;7	35;40	\	0,35971223	2,727272727	\	\
B10-I	#N/A	56,85920578	13,53790614	\	\	\	2,166064982	0	\	\
B11-I	#N/A	72,11538462	0	27	\	\	1,802884615	5,714285714	\	\
B11-II	#N/A	26,5060241	21,68674699	\	\	\	0,843373494	0	\	\
B11-III	#N/A	1,325301205	2,409638554	\	27	\	0,240963855	3,03030303	\	\
B12-I	#N/A	98,89001009	0	12;22	9;6	\	0,605449041	12,3853211	\	\
B12-II	#N/A	46,02888087	40,61371841	38;13;32	33;25	\	0,902527076	6,637168142	\	\
B13-I	#N/A	108,3591331	0	36;14;14	46;15;9	Oui	1,341589267	6,842105263	\	\
B13-II	#N/A	105,7108141	10,93560146	32	12;35;25;14	Oui	0,607533414	4,054054054	\	\
B14-I	#N/A	38,85480573	76,68711656	26;27	12;22;42;16	Oui	2,147239264	3,488372093	\	Oui
B14-II	#N/A	57,97101449	0	41;37	34;9;45	Oui	0,621118012	6,140350877	\	\
B16-I	#N/A	37,39445115	42,21954162	25	31;17	Oui	0,361881785	6,338028169	\	\
B16-II	#N/A	42,47572816	97,08737864	34;35	\	\	0,485436893	4,794520548	\	\
B18-I	#N/A	15,83434836	87,69792935	\	26;16	\	2,557856273	6,976744186	\	Oui
B18-II	#N/A	256,6735113	0	23;22;31	10;13	Oui	3,18275154	5	\	\
B20-I	#N/A	34,77218225	61,15107914	\	\	\	0,959232614	7,777777778	\	\
B20-II	#N/A	31,40096618	47,10144928	\	\	\	2,777777778	4,945054945	\	\
B21-I	#N/A	58,7628866	36,08247423	5	5;5	\	1,855670103	5,238095238	\	\
B21-II	#N/A	16,15798923	20,64631957	10;14	23;26;27	\	3,321364452	5,238095238	\	\
B23-I	#N/A	47,61904762	0	11;17	24;31;16	\	0,82815735	5,208333333	\	\
B24-I	#N/A	87,17948718	4,102564103	3	7;5	\	0,615384615	8,510638298	\	\
B25-I	#N/A	53,11778291	53,11778291	14;6	5;6	\	1,732101617	3,333333333	\	\
B25-II	#N/A	67,06586826	70,65868263	\	\	Oui	1,19760479	2,702702703	\	\
B28-I	#N/A	10,96224117	41,41291108	11;17;30	10;7	\	0,243605359	1,19047619	\	\
B28-II	#N/A	22,53855279	30,84223013	11;9	24;14	Oui	3,440094899	5,555555556	\	\

FIGURE A.3 – Classement visuel des 34 billons de bouleau des essais préliminaires (1/2)

	Fente traversante	Autres fentes	Gélivures	Attaques d'insectes	Discoloration	Pourriture	Pourriture de cœur	Courbure [cm/m]	Méplat [%]	Classe de qualité
B3-I	\	\	\	\	\	\	\	2,164948454	6,956521739	B
B5-I	\	\	\	\	\	\	\	0	8,333333333	D
B5-II	10,35	\	\	\	\	\	\	0	10,81081081	D
B5-III	130	\	\	\	\	\	\	2,950819672	5,263157895	C
B6-I	\	\	\	\	\	\	\	3,058823529	14,16666667	D
B6-II	\	\	\	\	\	\	\	2,48447205	8,080808081	C
B7-I	\	\	\	\	\	\	\	0	6,12244898	C
B7-II	\	\	\	\	\	\	\	3,047091413	10,34482759	D
B8-I	\	\	\	\	\	\	\	0	12,5	C
B8-II	\	\	\	\	Oui	Oui	\	0	10,56910569	C
B10-I	\	\	\	\	\	\	\	1,797752809	7,894736842	C
B11-I	\	\	\	\	\	\	\	2,727272727	14,28571429	C
B11-II	185	\	\	\	Oui	Oui	\	1,796407186	22,58064516	D
B11-III	\	\	\	\	\	\	\	0,722891566	9,722222222	B
B12-I	\	\	\	\	\	\	<15%	2,82542886	15,45454545	C
B12-II	\	\	\	\	\	\	\	0	6,557377049	C
B13-I	32,45	\	\	\	\	\	\	2,373581011	13,68421053	D
B13-II	\	\	\	\	\	\	\	0,85054678	12,94117647	C
B14-I	\	\	\	\	\	\	\	1,904761905	11,34020619	D
B14-II	\	\	\	\	\	\	\	1,75	15,17857143	C
B16-I	\	\	\	\	\	\	\	0	15,6626506	D
B16-II	\	\	\	\	\	\	\	0	15,06849315	D
B18-I	\	\	\	\	\	\	\	1,827040195	6,818181818	D
B18-II	\	\	\	\	\	\	\	0	6,796116505	C
B20-I	\	\	\	\	\	\	\	0	8,791208791	D
B20-II	\	\	\	\	\	\	\	0	8,045977011	D
B21-I	\	\	\	\	\	\	<15%	2,098765432	11,42857143	C
B21-II	\	\	\	\	\	\	>25%	0	13,82113821	D
B23-I	\	\	\	\	\	\	\	1,138716356	15,625	B
B24-I	\	\	\	\	\	\	\	1,538461538	15,23809524	C
B25-I	2	\	\	\	\	\	\	1,066666667	10,12658228	D
B25-II	25;20;10;20	\	\	\	\	\	\	1,317365269	20	D
B28-I	\	\	\	\	\	\	\	1,194029851	10,22727273	D
B28-II	25;40;25;30;2	\	\	\	\	\	\	2,135231317	8,860759494	D

FIGURE A.4 – Classement visuel des 34 billons de bouleau des essais préliminaires (2/2)

### A.3 Classement visuel de la campagne de 36 essais d'optimisation de l'aboutage

Le classement visuel des 72 billons utilisés lors de la troisième campagne d'essais est détaillé dans les Figures A.5, A.6, A.7 et A.8.

	Nombre de noeuds recouverts [nbre/m]	Sommes des noeuds sains [mm/m]	Somme des noeuds pourris [mm/m]	Fentes de coeur [mm]		Coeur étoilé	Fil tors [cm/m]	Coeur excentré		Roulure
				Aboutage	Non-about			[%]	Cannelure	
1	10,46511628	10,46511628	32,55813953	\	\	\	#N/A	5,29412	\	\
2	6,140350877	9,649122807	6,140350877	\	\	\	#N/A	2,38095	\	\
3	3,488372093	8,139534884	69,76744186	2	\	\	#N/A	6	\	\
4	5,555555556	4,166666667	37,5	\	\	\	#N/A	2,30769	\	\
5	1,388888889	0	62,5	\	\	\	#N/A	4,28571	\	\
6	2,777777778	0	104,1666667	\	\	\	#N/A	2,30769	\	\
7	10,46511628	0	26,74418605	\	3;4	\	#N/A	5,40541	\	\
8	4	5	13	4;5	7	\	#N/A	7,14286	\	\
9	2,777777778	25	58,33333333	\	\	\	#N/A	0	\	\
10	1,162790698	68,60465116	46,51162791	6	5	\	#N/A	2,05479	\	\
11	2,325581395	101,1627907	30,23255814	7;6	4;5	\	#N/A	3,52113	\	\
12	3,488372093	111,627907	1,162790698	\	\	\	#N/A	10	\	\
13	2,777777778	12,5	38,88888889	\	\	\	#N/A	5,22388	\	\
14	1,388888889	31,94444444	22,22222222	\	\	\	#N/A	3,84615	\	\
15	0	93,05555556	51,38888889	\	\	\	#N/A	4,38596	\	\
16	4	34	51	3	\	\	#N/A	10,4938	\	\
17	0	86,04651163	20,93023256	3;2	3	\	#N/A	3,94737	\	\
18	5,555555556	23,61111111	6,944444444	\	\	\	#N/A	3,22581	\	\
19	6,976744186	0	53,48837209	5	5;2	\	#N/A	8,44156	\	\
20	4,651162791	25,58139535	40,69767442	\	3;2	\	#N/A	5,55556	\	\
21	1,388888889	5,555555556	18,05555556	\	\	\	#N/A	8,82353	\	\
22	0	97,22222222	23,61111111	\	\	\	#N/A	6,16438	\	\
23	0	72,22222222	65,27777778	\	\	\	#N/A	3,84615	\	\
24	6,976744186	45,34883721	40,69767442	2	\	\	#N/A	6,33803	\	\
25	2,325581395	30,23255814	65,11627907	5	\	\	#N/A	5,81395	\	\
26	5	51	40	3;7	\	\	#N/A	10,6383	\	1cm à 0,5cm du centre
27	6	0	20	\	\	\	#N/A	6,17978	\	\
28	2,631578947	50,87719298	71,05263158	10;8	20;22	\	#N/A	5,35714	\	\
29	3	51	41	9;7	8;4	\	#N/A	2,88462	\	\
30	0	67	70	11;8	3	\	#N/A	2,80899	\	\
31	6,944444444	16,66666667	19,44444444	\	\	\	#N/A	4,41176	\	\
32	12,79069767	0	5,813953488	\	\	\	#N/A	3,62319	\	\
33	5	68	22	\	\	\	#N/A	1,08696	\	\
34	9	20	18	\	\	\	#N/A	4,71698	\	\
35	3,488372093	10,46511628	76,74418605	\	\	\	#N/A	3,75	\	\
36	6,140350877	0	54,38596491	\	\	\	#N/A	5,9633	\	\

FIGURE A.5 – Classement visuel des 72 billons des essais d'optimisation (1/4)

	Fente traversante	Autres fentes	Gélivures	Attaques d'insectes	Discoloration	Pourriture	Pourriture de cœur	Courbure [cm/m]	Méplat [%]	Classe de qualité
1	\	\	\	\	\	\	\	0,81395349	4,59770115	C
2	\	\	\	\	\	\	\	2,10526316	5,45454545	C
3	\	\	\	\	\	\	\	0,96385542	12,7906977	D
4	\	\	\	\	\	\	\	0	5,63380282	C
5	\	\	\	\	\	\	\	1,66666667	8,45070423	D
6	\	\	\	\	1x1cm	\	\	1,66666667	6,4516129	D
7	\	\	\	\	\	\	\	2,90909091	6,25	C
8	\	\	\	\	\	\	\	2,6	5,12820513	C
9	\	\	\	\	\	\	\	0	11,11111111	D
10	\	\	\	\	\	\	\	2,30769231	9,33333333	D
11	\	\	\	\	\	\	\	2,3255814	16,8421053	C
12	\	\	\	\	\	\	\	0	7,89473684	C
13	\	\	\	\	\	\	\	0	7,24637681	C
14	\	\	\	\	\	\	\	1,11111111	8,06451613	C
15	\	\	\	\	\	\	\	0	6,55737705	D
16	\	\	\	\	\	\	\	1	9,27835052	D
17	\	\	\	\	\	\	\	0,83333333	11,3924051	C
18	\	\	\	\	\	\	\	0,97222222	3,27868852	C
19	\	\	\	\	\	\	\	0,69767442	8,33333333	D
20	\	\	\	\	\	\	\	0	8,86075949	D
21	\	\	\	\	\	\	\	0	7,14285714	C
22	\	\	\	\	\	\	\	1,81818182	12,3287671	C
23	\	\	\	\	\	\	\	0	8,45070423	D
24	\	\	\	\	\	\	<25%	0,71428571	6,66666667	D
25	\	\	\	\	\	\	\	1,51162791	8,04597701	D
26	\	\	\	\	\	\	\	2,1	6	C
27	\	\	\	\	\	\	\	1,38888889	7,77777778	C
28	\	\	\	\	\	\	\	1,75	8,94308943	D
29	\	\	\	\	\	\	\	0,3	8,65384615	D
30	\	\	\	\	\	\	\	2	9,18367347	D
31	\	\	\	\	\	\	\	0,27777778	5,97014925	C
32	\	\	\	\	\	\	\	1,74418605	5,88235294	C
33	\	\	\	\	\	\	\	1,6	5,31914894	C
34	\	\	\	\	\	\	\	0,5	9,34579439	C
35	\	\	\	\	\	\	\	0,8	10	D
36	\	\	\	\	\	\	\	1,57894737	7,07070707	D

FIGURE A.6 – Classement visuel des 72 billons des essais d'optimisation (2/4)

	Nombre de noeuds recouverts	Sommes des noeuds sains	Somme des noeuds pourris [mm/m]	Fentes de coeur [mm]		Coeur étoilé	Fil tors [cm/m]	Coeur		Roulure
				Aboutage	Non-about			excentré	Cannelure	
37	5,813953488	0	20,93023256	\	\	\	#N/A	9,74026	\	\
38	2,325581395	30,23255814	51,1627907	\	\	\	#N/A	5,71429	\	\
39	5,813953488	5,813953488	44,18604651	\	\	\	#N/A	4,11765	\	\
40	1,162790698	72,09302326	30,23255814	1;4	7;9	\	#N/A	5	\	\
41	1,388888889	126,3888889	9,722222222	7;8	6;12	\	#N/A	4,28571	\	\
42	2,777777778	2,777777778	50	\	\	\	#N/A	5,35714	\	\
43	5,555555556	18,05555556	44,44444444	\	\	\	#N/A	35,0746	\	\
44	9,649122807	7,894736842	35,0877193	\	\	\	#N/A	5,05618	\	\
45	4,166666667	54,16666667	41,66666667	\	\	\	#N/A	0	\	\
46	1,388888889	83,33333333	34,72222222	\	\	\	#N/A	9,72222	\	\
47	0	70	25	19;9	12;5	\	#N/A	5,91398	\	\
48	2,777777778	84,72222222	48,61111111	\	\	\	#N/A	5,35714	\	\
49	0	129,1666667	9,722222222	\	\	\	#N/A	3,22581	\	\
50	5,555555556	0	87,5	2	\	\	#N/A	2,05479	\	\
51	11,11111111	0	33,33333333	\	\	\	#N/A	2,77778	\	\
52	3,488372093	104,6511628	12,79069767	\	\	\	#N/A	7,31707	\	\
53	6	14	40	\	\	\	#N/A	6,84211	\	\
54	4,385964912	14,9122807	71,05263158	\	\	\	#N/A	6,38298	\	\
55	8	5	20	\	\	\	#N/A	4,08163	\	\
56	1,162790698	60,46511628	27,90697674	5	4	\	#N/A	8,33333	\	\
57	1,388888889	112,5	23,61111111	\	\	\	#N/A	5,7377	\	\
58	1,162790698	101,1627907	45,34883721	\	\	\	#N/A	3,24675	\	\
59	6,976744186	65,11627907	25,58139535	\	\	\	#N/A	5,55556	\	\
60	4	88	41	7;5	\	\	#N/A	6,17978	\	\
61	3,488372093	34,88372093	36,04651163	\	1;1	\	#N/A	4,41176	\	\
62	3,50877193	52,63157895	64,9122807	\	\	\	#N/A	7,42574	\	\
63	2,777777778	62,5	30,55555556	\	3;2	\	#N/A	2,30769	\	\
64	4,166666667	15,27777778	47,22222222	\	\	\	#N/A	4,41176	\	\
65	4,166666667	151,3888889	0	\	\	\	#N/A	2,23881	\	\
66	5,555555556	63,88888889	6,944444444	\	\	\	#N/A	5,55556	\	\
67	11,62790698	17,44186047	27,90697674	\	\	\	#N/A	7,97101	\	\
68	15,27777778	1,388888889	2,777777778	\	\	\	#N/A	10,3448	\	\
69	4,166666667	22,22222222	63,88888889	\	\	\	#N/A	7,14286	\	\
70	10,46511628	4,651162791	27,90697674	\	3	\	#N/A	3,24675	\	\
71	5,555555556	31,94444444	51,38888889	\	\	\	#N/A	2,30769	\	\
72	4,166666667	52,77777778	41,66666667	\	\	\	#N/A	2,72727	\	\

FIGURE A.7 – Classement visuel des 72 billons des essais d'optimisation (3/4)

	Fente traversante	Autres fentes	Gélivures	Attaques d'insectes	Discoloration	Pourriture	Pourriture de cœur	Courbure [cm/m]	Méplat [%]	Classe de qualité
37	\	\	\	\	\	\	\	1,53846154	7,31707317	C
38	\	\	\	\	\	\	\	0,72727273	11,11111111	D
39	\	\	\	\	\	\	\	2,46153846	7,31707317	D
40	\	\	\	\	\	\	\	0,81395349	8,75	C
41	\	\	\	\	\	\	\	0	14,084507	C
42	\	\	\	\	\	\	\	1,66666667	9,67741935	D
43	\	\	\	\	\	\	\	1,11111111	3,22580645	D
44	\	\	\	\	\	\	\	1,84210526	6,38297872	C
45	\	\	\	\	\	\	\	0,83333333	9,52380952	D
46	\	\	\	\	\	\	\	0,83333333	5,55555556	C
47	\	\	\	\	3,5x1,5cm	\	\	0	13,9784946	C
48	\	\	\	\	\	\	\	0	8,19672131	D
49	\	\	\	\	\	\	\	0	6,34920635	C
50	\	\	\	\	\	\	\	0	10,8108108	D
51	\	\	\	\	\	\	\	0	2,7027027	C
52	\	\	\	\	\	\	\	0	9,30232558	C
53	\	\	\	\	\	\	\	2,6	9,57446809	C
54	\	\	\	\	\	\	\	2,4	8,18181818	D
55	\	\	\	\	\	\	\	0,6	11,4583333	C
56	\	\	\	\	\	\	\	0,81395349	7,69230769	C
57	\	\	\	\	\	\	\	0	6,34920635	C
58	\	\	\	\	\	\	\	0	14,6341463	D
59	\	\	\	\	\	\	\	1,74418605	9,33333333	C
60	\	\	\	\	\	\	<25%	1	8,64197531	D
61	\	\	\	\	\	\	\	0,34883721	6,09756098	C
62	\	\	\	\	\	\	<15%	1,22807018	11,4035088	D
63	\	\	\	\	5x6cm	\	\	0	6,06060606	C
64	\	\	\	\	\	\	\	0	2,89855072	D
65	\	\	\	\	\	\	\	1,94444444	13,2352941	C
66	\	\	\	\	\	\	\	1,94444444	13,6363636	C
67	\	\	\	\	\	\	\	0,93023256	13,75	C
68	\	\	\	\	\	\	\	0	7,8125	C
69	\	\	\	\	\	\	\	0	9,83606557	D
70	\	\	\	\	\	\	<25%	1,1627907	8,43373494	C
71	\	\	\	\	\	\	\	0	7,14285714	D
72	\	\	\	\	\	\	\	1,5625	7,01754386	D

FIGURE A.8 – Classement visuel des 72 billons des essais d'optimisation (4/4)

## Annexe B

# Calcul du facteur 2.4375 pour le calcul de $F_{ELU}$ dans les essais de flexion non-destructive

Pour calculer la force à l'ELU lors de l'essai, la force maximale appliquée lors des cycles de chargement-déchargement à l'ELS,  $F_{ELS,CT}$ , est prise comme point de référence [83].

Par conséquent,

$$F_{ELS,CT} = q_{ELS,CT} \cdot L \quad (B.1)$$

Avec,

- $q_{ELS,CT}$ , la combinaison de charges à l'ELS court terme [ $kN/m$ ];
- $L$ , la longueur des billons aboutés [m].

Or, en considérant uniquement les charges variables,

$$q_{ELS,CT} = \frac{q_{ELU}}{1.5} \quad (B.2)$$

Avec,  $q_{ELU}$ , la combinaison de charge à l'ELU [ $kN/m$ ].

Car,

$$q_{ELU} = 1.35 \cdot Q_{permanente} + 1.5 \cdot Q_{variable} \quad (B.3)$$

$$q_{ELS,CT} = Q_{permanente} + Q_{variable} \quad (B.4)$$

Avec  $Q_{permanente}$  et  $Q_{variables}$ , respectivement, les charges permanentes et variables.

En sachant que,

$$F_{ELU} = q_{ELU} \cdot \frac{\gamma_m}{k_{mod}} \cdot L \quad (B.5)$$

Avec,

- $\gamma_m$ , un coefficient de sécurité égal à 1.3 dans le cas de calcul ELU de bois massif [/];
- $k_{mod}$ , un coefficient réducteur qui dépend de la classe de service et du temps d'application de la charge [/].

En reprenant l'équation B.2, on obtient :

$$\frac{F_{ELS,CT}}{L} = \frac{F_{ELU}}{1.5 \cdot \frac{\gamma_m}{k_{mod}} \cdot L} \quad (B.6)$$

$$F_{ELS,CT} \cdot \frac{1.5 \cdot \gamma_m}{k_{mod}} = F_{ELU} \quad (B.7)$$





UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN  
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | [www.uclouvain.be/epl](http://www.uclouvain.be/epl)