

École polytechnique de Louvain

Étude de l'effet de la densification THM du peuplier sur son comportement au vissage

Auteur: **Louka COMPÈRE**

Promoteur: **Thomas PARDOEN**

Lecteurs: **Laurent DELANNAY, Pierre LATTEUR, Vincent DEFAYS**

Année académique 2025–2026

Master [120] : ingénieur civil électromécanicien

Abstract

In the current climate context, it is necessary to diversify forest ecosystems that are under pressure. To make them more resilient, fast-growing and low-density tree species, such as poplar, are gaining interest and are emerging as a sustainable alternative to traditionally used woods. Thermo-hygro-mechanical (THM) densification improves their mechanical properties and promotes their use in comparison with naturally denser species. Whilst the effects of densification on properties such as hardness, bending strength or modulus of elasticity are relatively well documented, its influence on screw-in behaviour remains poorly studied.

This study explores the effect of THM densification on poplar's behaviour during screwing. Particular attention is given to insertion torque, internal damage and pull-out resistance. An instrumented screwing device was specially designed to measure torque during insertion. Tomographic analysis was used to characterise the internal cracks created during screwing, and pull-out tests were carried out to assess pull-out resistance. These tests were performed on non-densified poplar, densified poplar and birch of comparable natural density. Comparing these three types of wood allows the effects specific to densification to be distinguished from those related to density alone.

The results show that densification significantly increases the insertion torque and that the screw diameter is the most decisive factor. Tomographic analysis reveals a significant risk of internal cracking in the densified wood, attributed to the residual stresses introduced during the densification process. Despite this damage, densification considerably improves the resistance to extraction. An increase in the pull-out parameter of approximately 55 % and in the energy parameter of over 300 % is observed. This seemingly paradoxical result can be explained by the energy-dissipating effect of the cracks created by the screw during pull-out, and by a higher apparent tenacity. Furthermore, comparison with birch shows that density alone does not govern screw-in behaviour. The changes in internal structures induced by the THM process also play a decisive role.

Résumé

Dans le contexte climatique actuel, il est nécessaire de diversifier les écosystèmes forestiers qui sont sous pression. Pour les rendre plus résilients, les essences à croissance rapide et à faible densité, telles que le peuplier, suscitent un intérêt croissant et se présentent comme une alternative durable aux bois traditionnellement utilisés. La densification thermo-hygro-mécanique (THM) permet d'améliorer leurs propriétés mécaniques et de promouvoir leur utilisation face à des essences naturellement plus denses. Si les effets de la densification sur les propriétés telles que la dureté, la résistance à la flexion ou le module d'élasticité sont relativement bien documentés, son influence sur le comportement au vissage reste peu étudiée.

Ce travail étudie l'effet de la densification THM du peuplier sur son comportement face au vissage. Un intérêt particulier est donné au couple d'insertion, à l'endommagement interne et à la résistance à l'arrachement. Un dispositif de vissage instrumenté a été spécialement conçu pour mesurer le couple lors de l'insertion. Une analyse tomographique a permis de caractériser les fissurations internes créées lors du vissage, et des essais de traction ont été réalisés pour évaluer la résistance à l'arrachement. Ces essais ont été effectués sur du peuplier non densifié, du peuplier densifié et du bouleau de densité naturelle comparable. La comparaison entre ces trois types de bois permet de distinguer les effets propres à la densification de ceux liés à la densité seule.

Les résultats montrent que la densification augmente significativement le couple d'insertion et que le diamètre de la vis est le facteur le plus déterminant. L'analyse tomographique révèle un risque de fissuration interne important dans le bois densifié, attribué aux contraintes résiduelles introduites lors du procédé de densification. Malgré cet endommagement, la densification améliore considérablement la résistance à l'extraction. On observe une augmentation du paramètre d'arrachement d'environ 55 % et du paramètre énergétique de plus de 300 %. Ce résultat a priori paradoxal s'explique par le rôle dissipatif des fissures créées par le vissage lors de l'extraction de la vis, et par une ténacité apparente supérieure. Par ailleurs, la comparaison avec le bouleau montre que la densité seule ne gouverne pas le comportement au vissage. Les modifications des structures internes induites par le procédé THM jouent également un rôle déterminant.

Remerciements

Ce document représente l'aboutissement d'une année de travail, mais plus largement la conclusion de cinq magnifiques années d'études. Cependant, il n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien, les conseils et l'aide de nombreuses personnes. C'est pourquoi j'aimerais prendre quelques lignes pour remercier celles et ceux qui m'ont permis de le réaliser.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Thomas Pardoën pour m'avoir proposé ce sujet passionnant dont j'ignorais l'existence. Ce projet m'a permis d'approfondir mes connaissances et d'élargir ma formation à de nouveaux domaines. Merci pour votre suivi et vos précieux conseils tout au long de cette année.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe impliquée dans ce projet : Sophie Ryelandt pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils et sa formation au procédé de densification, Matthieu Gailliez pour ses remarques stimulantes qui encouragent la réflexion, Victor Hannecart pour son temps, son aide et sa relecture attentive de certains chapitres, ainsi que Sophie Vanpée pour ses commentaires constructifs lors de nos réunions.

Je souhaite aussi remercier Laurent Delannay, Pierre Latteur et Vincent Defays pour leur temps accordé en tant que lecteurs et membres du jury.

Mes remerciements s'adressent aussi aux équipes du LEMSC pour leur aide et leur bienveillance : Vincent Frozée pour l'usinage des échantillons, Justin Goosse pour son expertise sur le bois, ainsi que Quentin Mestrez et Justin Toussaint pour leur accompagnement et leur formation aux essais en traction.

Je remercie également le LACaMI, et plus particulièrement Armand Béché, pour son temps, sa bienveillance et ses nombreux conseils lors de la formation à l'utilisation du tomographe.

Une pensée particulière va à mes parents, qui m'ont permis de faire ces études et qui se sont toujours inquiétés de l'avancement de ce travail, ainsi qu'à l'atelier familial qui a su me dépanner lorsque cela était nécessaire.

Enfin, je souhaite remercier plus largement toutes les personnes rencontrées au cours de mon parcours universitaire. De près ou de loin, elles ont contribué à mon évolution, à mon apprentissage et à ces belles années d'études que je ne suis pas près d'oublier.

Table des matières

Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Nomenclature	xv
1 Introduction	1
1.1 Contexte climatique et enjeux forestiers	1
1.1.1 Situation forestière en Belgique	2
1.1.2 Importance de la diversité des essences	3
1.1.3 Dominance actuelle d'essences à forte densité	4
1.1.4 Rôle des essences à croissance rapide et à faible densité	4
1.1.5 La solution par densification	5
1.2 Objectifs de l'étude	5
2 État de l'art	7
2.1 Caractéristiques du bois	7
2.1.1 La structure du bois	7
2.1.2 Composition chimique du bois	11
2.1.3 Propriétés physiques et mécaniques du bois	12
2.1.4 Peuplier & bouleau	18
2.2 La densification du bois	21
2.2.1 Les différents procédés de densification	22
2.2.2 La densification thermo-hygro-mécanique	23
2.3 Le vissage du bois	24
2.3.1 Les enjeux du vissage	25
2.3.2 Typologie et caractéristiques techniques des vis	25
2.3.3 Dynamique du vissage et processus d'insertion	28
2.3.4 Résistance à l'arrachement des vis	29
2.4 Conclusion	30
3 Matériaux et méthodes	31
3.1 Échantillons et visserie	31

3.1.1	Échantillons de bois	31
3.1.2	Visserie	32
3.2	Densification du bois	33
3.2.1	Pré-traitement	33
3.2.2	Densification et relaxation	34
3.2.3	Retour aux conditions ambiantes	35
3.3	Conception d'un dispositif de vissage instrumenté	36
3.3.1	Objectifs du dispositif	36
3.3.2	Développement et caractérisation	36
3.3.3	Applications et limites	42
3.3.4	Méthode d'insertion des vis et mesure du couple	42
3.4	Tomographie	43
3.5	Extraction et résistance à l'arrachement	45
3.6	Plan d'expérience	47
3.7	Conclusion	48
4	Résultats expérimentaux	49
4.1	Résultats sur bois non densifié	49
4.1.1	Vissage et couple d'insertion	49
4.1.2	Tomographie et endommagement interne	52
4.1.3	Essais en traction et résistance à l'arrachement	53
4.2	Résultats sur bois densifié et comparatif	54
4.2.1	Vissage et couple d'insertion	54
4.2.2	Tomographie et endommagement interne	58
4.2.3	Essais en traction et résistance à l'arrachement	61
4.3	Conclusion	64
5	Discussion des résultats	65
5.1	Comportement face au vissage	65
5.1.1	Vissage dans la direction radiale	65
5.1.2	Vissage dans la direction longitudinale	67
5.2	Endommagement interne	68
5.3	Résistance à l'arrachement	69
5.4	Variabilité des résultats	70
5.5	Estimation de la ténacité par vissage	71
5.6	Comportement global et implications pratiques	73
5.7	Conclusion	74
6	Conclusion	75

Annexes	85
A Caractéristiques des échantillons	85
A.1 Origine et densité des échantillons	85
A.2 Paramètres de densification	87
B Dispositif de vissage expérimental	88
B.1 Version finale	88
B.2 Mesure de couple	88
B.3 Mesure de vitesse	90
C Validité des modèles d'analyse de couple	91
D Tomographie et principes de génération de rayons X	93
E Essais en traction	93
E.1 Analyse statistique	93
E.2 Épaisseur d'échantillon pour les essais en traction	94
F Ensemble des résultats par échantillons	96
F.1 Vissage dans la direction radiale	96
F.2 Vissage dans la direction longitudinale	97

Table des figures

1.1	Situation forestière en Belgique	3
2.1	Structure et composition du bois	8
2.2	Plans de coupe du bois	10
2.3	Microstructure du bois	10
2.4	Structure moléculaire du bois	12
2.5	Équilibre de teneur en eau en fonction de l'humidité relative et de la température	14
2.6	Évolution de la teneur en eau du bois	15
2.7	Courbe contrainte-déformation typique du bois soumis à une compression radiale	17
2.8	Mode de cisaillement	18
2.9	Bois de l'étude	19
2.10	Évolution typique des contraintes lors d'une densification THM	24
2.11	Caractéristiques d'une vis	25
2.12	Liste non exhaustive d'empreintes de vis	26
2.13	Types de vis	27
2.14	Évolution typique du couple lors du vissage dans le bois	29
3.1	Échantillons de bois et visserie utilisés pour la réalisation de ce travail . . .	32
3.2	Température de transition vitreuse des polymères en fonction du taux d'humidité	33
3.3	Dispositifs expérimentaux pour les densifications réalisées	34
3.4	Évolution de la force lors d'une densification complète réalisée	35
3.5	Conception du dispositif de vissage	37
3.6	Capteur de force sous forme de cellule de charge à poutre	39
3.7	Linéarité et erreur de la cellule de force	39
3.8	Évolution de la vitesse lors d'un vissage avec une vitesse de consigne de 60 rpm	41
3.9	Éléments d'aide à l'insertion des vis	43
3.10	Reconstruction par tomographie d'un échantillon présentant des fissures . .	45
3.11	Évolution de la force d'arrachement pour un échantillon de calibration . .	46
3.12	Dispositif expérimental d'essai en traction	47

4.1	Courbes typiques de couple d'insertion dans du peuplier non densifié dans différentes configurations	50
4.2	Évolution du couple dans du peuplier non densifié en fonction des différents diamètres de vis	51
4.3	Résumé des effets sur le couple pour le peuplier non densifié	52
4.4	Évolution du couple moyen en fonction de la vitesse de rotation lors du vissage dans les échantillons de peuplier non densifié	52
4.5	Courbe force-déplacement lors de l'extraction d'un échantillon de peuplier non densifié	53
4.6	Paramètre d'arrachement et énergétique des essais en traction du peuplier non densifié	54
4.7	Évolution des couples moyens en fonction du diamètre de vis pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau	55
4.8	Résumé des effets sur le couple pour les trois essences de bois	56
4.9	Évolution des couples moyens en fonction de la vitesse de rotation pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau	57
4.10	Différence de couple moyen entre un vissage dans la direction radiale et un vissage dans la direction longitudinale pour les trois bois étudiés	58
4.11	Schématisation des typologies de fissures observées par tomographie	59
4.12	Endommagements et fissures observés par tomographie pour les trois essences de bois	60
4.13	Évolution de la force lors d'essais en traction de vis dans du peuplier non densifié, du peuplier densifié et du bouleau	62
4.14	Paramètres d'arrachement obtenus lors d'essais en traction pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau	63
4.15	Paramètres énergétiques obtenus lors d'essais en traction pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau	64
5.1	Énergies d'extraction lors d'un essai d'arrachement de vis sur un échantillon de peuplier densifié	73
B.1	Dispositif de vissage expérimental	88
B.2	Cellule de charge et jauge de contrainte	89
B.3	Pont de Wheatstone	89
B.4	Évolution de la vitesse sous contrôle PID	91
C.1	Résidus studentisés externes des modèles	92
E.1	Comparaison statistique ANOVA et post-hoc de Tukey des paramètres d'arrachement et énergétique	94
E.2	Influence de l'épaisseur d'échantillon sur les paramètres d'arrachement et énergétique	95

Liste des tableaux

2.1	Composition chimique du bois	11
2.2	Masse volumique de différentes essences présentes en Belgique	13
2.3	Propriétés physiques et mécaniques moyennes du peuplier et du bouleau .	21
3.1	Erreurs de mesure de la cellule de force	40
3.2	Plan d'expérience	48
4.1	Comparaison des densités et couples moyens selon l'essence de bois	54
5.1	Estimation des valeurs moyennes de G_{Ic} pour les différents bois sur base d'une méthode expérimentale d'extraction de vis	72
A.1	Caractéristiques des échantillons utilisés	86
A.2	Paramètres et résultats de la densification	87
F.1	Résultats globaux de tous les essais	96
F.2	Résultats des tests de couple maximum lors du vissage longitudinal	97

Nomenclature

Généralités

N	Unité de force exercée en Newton
Pa	Unité de pression exercée en Pascal
T	Couple [Nm]
F	Force [N]
kV	Unité de tension en kilo volt
W	Unité de puissance en watt
mm	Unité de longueur exprimée en millimètre (diamètre de vis)
rpm	Vitesse de rotation en rotations par minute
$\varnothing$	Diamètre de vis

Propriétés du bois

ρ	Masse volumique du bois [kg/m^3]
m	masse du bois [kg]
V	Volume de bois [m^3]
E	Module d'élasticité du bois [MPa]
σ	Contrainte subie par le bois [MPa]
T_g	Température de transition vitreuse [$^{\circ}C$]
ϵ	Déformation subie par le bois

Matériaux et méthodes

F_{max}	Force maximale d'arrachement [N]
f_{ax}	Paramètre d'arrachement [N/mm^2]
l_d	Longueur réelle d'ancrage de la vis [mm]
W_{ex}	Énergie nécessaire à l'extraction de vis [J]

w_{ax}	Paramètre énergétique d'extraction de vis [mJ/mm^2]
d_{max}	Distance pour atteindre F_{max} [mm]
K_{Ic}	Ténacité à la rupture en mode I [$MPa\sqrt{m}$]
G_{Ic}	Taux critique de restitution d'énergie en mode I [J/m^2]
THM	Thermo-hygro-mécanique
CR	Ratio de compression [%]
t_i	Épaisseur initiale du bois [mm]
t_f	Épaisseur après compression du bois [mm]
d	Diamètre nominal de la vis [mm]
d_l	Diamètre du noyau de la vis [mm]
d_h	Diamètre de la tête de la vis [mm]
l	Longueur de la vis [mm]
l_g	Longueur du filetage de la vis [mm]

Dispositif de vissage

d	Distance de bras de levier [m]
Ω	Résistance électrique en Ohm
V_{exc}	Tension d'excitation du pont de Wheatstone [V]
V_{out}	Tension de sortie du pont de Wheatstone [V]

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte climatique et enjeux forestiers

Le bois est une ressource naturelle, renouvelable et issue du développement des arbres. Grâce à la photosynthèse, les arbres transforment le dioxyde de carbone en matière organique [1]. Ce processus permet aux forêts de jouer un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique. En effet, en accumulant le carbone dans leur biomasse et dans les sols, les forêts constituent, avec les océans, l'un des principaux réservoirs capables de limiter l'augmentation des gaz à effet de serre [2]. Il est donc nécessaire d'avoir une gestion responsable de cette ressource et de préserver la capacité des écosystèmes forestiers à se régénérer, à maintenir leur biodiversité et à répondre durablement aux besoins des générations à venir.

La protection des forêts est souvent associée à l'absence d'intervention humaine. Pourtant, avec un changement climatique bien réel, cette approche ne garantit plus toujours le rôle de puits de carbone attribué à ces espaces verts. Une gestion active et raisonnée peut s'avérer nécessaire pour éviter que certaines forêts ne deviennent des sources nettes d'émissions de CO_2 [3]. La forêt amazonienne est, par exemple, devenue émettrice de dioxyde de carbone depuis le milieu des années 1990, et les forêts tropicales africaines pourraient suivre une trajectoire similaire à court ou moyen terme [3, 4]. Ce basculement peut s'expliquer par plusieurs mécanismes biologiques et écologiques. La hausse de la mortalité naturelle des arbres, directement liée au réchauffement climatique, entraîne une augmentation des volumes de biomasse morte. Lors de la décomposition de cette biomasse, le carbone stocké dans le bois est progressivement libéré dans l'atmosphère sous forme de CO_2 . Par ailleurs, les épisodes de sécheresse réduisent la croissance des arbres survivants ainsi que leur capacité de photosynthèse, diminuant leur fonction de captation du carbone. À ces dynamiques naturelles s'ajoute la déforestation d'origine humaine, qui provoque des émissions directes de gaz à effet de serre. L'ensemble de ces facteurs contribue à transformer certaines forêts en sources d'émissions de CO_2 . Dès lors, préserver durablement les

écosystèmes forestiers suppose non seulement de limiter les activités humaines dans ces régions, mais aussi d’adopter des stratégies de gestion capables de renforcer leur résilience face aux dérèglements climatiques [3, 4, 5].

Dans ce contexte, le secteur forestier est confronté à plusieurs enjeux. D’une part, les effets croissants du réchauffement climatique, sécheresses répétées ou augmentation des températures, fragilisent les forêts déjà mises sous pression. D’autre part, la demande en bois reste importante dans le monde. Il faut donc repenser la manière dont cette ressource est exploitée et valorisée. L’introduction d’un plus grand nombre d’essences dans les forêts, notamment celles à croissance rapide et à plus faible densité, apparaît comme une stratégie pour accroître la résilience des écosystèmes et se diriger vers une exploitation du bois plus durable [6, 7].

1.1.1 Situation forestière en Belgique

À l’heure actuelle, les forêts couvrent environ 23 % du territoire belge. La répartition de cette surface forestière entre les trois régions du pays est présentée à la Figure 1.1a. Celle-ci met en évidence une forte prédominance de la Région wallonne, qui concentre la majorité de la surface forestière nationale, tandis que les Régions flamande et de Bruxelles-Capitale disposent de surfaces forestières nettement plus limitées [8, 9].

Comme le montre la Figure 1.1b, les feuillus sont majoritaires dans la composition forestière, mais cela reste équilibré avec la présence des résineux [8]. Les feuillus exploités sont principalement des essences à plus forte densité telles que le chêne et le hêtre. Pour ce qui est des résineux, on observe principalement des cultures d’épicéas et de douglas. Les essences à plus faible densité et à croissance rapide, telles que le peuplier ou le bouleau, sont nettement moins exploitées. La Wallonie ne compte que 1,2 % de peupleraies et 2,4 % de boulaies [9]. Cette faible représentation souligne le potentiel d’exploitation des essences à croissance rapide.

En 2018, en Wallonie, la majorité des peuplements (57 %) ne comprend qu’une ou deux essences, tandis qu’une minorité (43 %) en rassemble trois ou davantage, révélant une diversité régionale relativement faible [10]. Cette structuration, encore fortement influencée par les monocultures, augmente la vulnérabilité des forêts belges aux perturbations climatiques et aux risques biologiques. Dans ce contexte, diversifier les essences forestières constitue un enjeu majeur pour renforcer leur résilience.

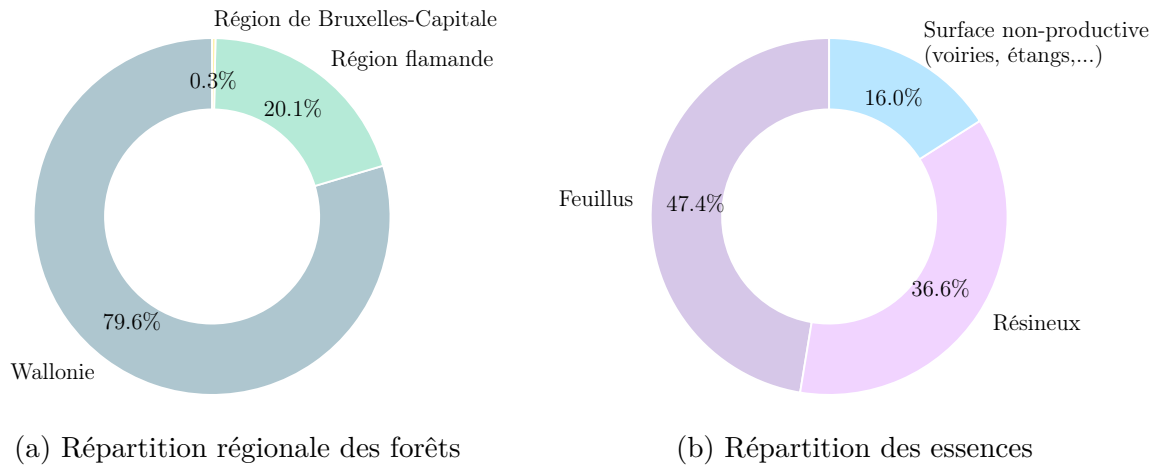


FIGURE 1.1 – Situation forestière en Belgique

1.1.2 Importance de la diversité des essences

La diversité des essences au sein d'un écosystème forestier constitue un pilier fondamental pour sa stabilité et sa résilience. En effet, une forêt composée de plusieurs espèces présente une meilleure capacité à résister et à s'adapter aux perturbations (sécheresses, tempêtes, attaques d'insectes ou maladies) [11]. Cette résistance peut s'expliquer par la complémentarité des essences : certaines tolèrent mieux la sécheresse, d'autres sont plus résistantes aux vents ou aux pathogènes, et d'autres possèdent des cycles de croissance différents. La combinaison de ces éléments permet de répartir les risques à long terme.

Cette diversité permet aussi une meilleure utilisation des ressources comme la lumière, l'eau ou les nutriments. Une telle complémentarité rend souvent la productivité plus stable et parfois plus élevée que dans les monocultures. De plus, les forêts diversifiées abritent une plus grande diversité animale, car elles offrent différents habitats, structures et ressources alimentaires [12]. Cette biodiversité est essentielle pour maintenir des systèmes naturels (pollinisation, régulation des insectes, décomposition de matière organique, etc.).

La diversité des essences joue aussi un rôle important dans la capture du carbone. Les forêts composées de plusieurs espèces peuvent en stocker plus sur la durée, car la combinaison d'espèces à croissance rapide et lente permet une accumulation régulière de biomasse. En outre, en étant moins vulnérables aux aléas, les forêts diversifiées réduisent le risque de pertes importantes de carbone lors d'événements extrêmes comme les tempêtes ou les longues sécheresses.

En résumé, la diversité des essences est un atout important pour rendre les forêts plus résistantes aux changements globaux. Elle améliore la stabilité écologique, soutient la biodiversité et les écosystèmes, et donne une base plus solide pour une gestion durable

de ces espaces. Une telle diversité nécessite également une adaptation des filières de transformation du bois afin de valoriser des matériaux présentant des densités et des propriétés mécaniques différentes.

1.1.3 Dominance actuelle d'essences à forte densité

En Belgique, la préférence pour les essences à forte densité s'explique surtout par des raisons économiques et industrielles. Le chêne et le hêtre, par exemple, sont appréciés depuis longtemps pour la qualité et la durabilité de leur bois, très utilisé dans la construction, la menuiserie, la charpente et l'ébénisterie [9]. Cette demande a poussé les propriétaires et gestionnaires forestiers à favoriser ces essences, jugées plus rentables sur le long terme. Ainsi, la filière bois s'est organisée autour de leur production, car elles assurent des revenus plus élevés et une stabilité de marché, au détriment d'espèces moins denses mais parfois plus rapides à produire.

Par ailleurs, la valorisation de ces bois ne se limite pas aux usages haut de gamme. Les essences à forte densité permettent aussi de fabriquer divers produits secondaires qui profitent à toute la filière bois (granulé de chauffage, poutre, contreplaqué, lamellé-collé, etc.) [13, 14]. Ces produits sont largement utilisés dans la construction, l'ameublement et l'industrie, et offrent des débouchés stables capables d'absorber d'importantes quantités de matière première.

L'approche économique qui privilégie les essences à forte densité favorise aussi le développement de monocultures ou de peuplements peu diversifiés. Les monocultures facilitent la production et la récolte, rendent les pratiques de gestion plus uniformes et répondent bien aux besoins de l'industrie. Pourtant, elles ont des limites importantes à moyen et long terme. Par exemple, un événement climatique ou sanitaire peut toucher tout un peuplement en même temps, ce qui entraîne des pertes économiques importantes et rend la filière bois moins stable.

1.1.4 Rôle des essences à croissance rapide et à faible densité

L'exploitation des essences à croissance rapide et plus faible densité, comme le peuplier qui sera abordé dans cette étude, représente une opportunité pour compléter les essences traditionnellement dominantes, diversifier la composition des forêts et augmenter leur résilience. Leur intégration aux côtés des essences à forte densité permettrait également de répondre à une demande croissante en matériaux durables, tout en réduisant la pression sur les monocultures d'essences avec des cycles de production plus longs.

Cependant, pour que ces essences puissent occuper une place plus importante dans

les usages industriels, il est nécessaire de renforcer leurs performances techniques. Par exemple, améliorer les propriétés mécaniques du peuplier est indispensable pour l'intégrer à des usages plus exigeants, comme la construction. Ainsi, la valorisation des essences locales à faible densité apparaît comme une condition essentielle pour concilier diversification forestière, compétitivité économique et développement durable.

1.1.5 La solution par densification

Parmi les techniques envisageables pour renforcer les performances du peuplier, la densification du bois apparaît comme une solution prometteuse. Il existe différentes méthodes qui permettent d'offrir à ces bois de meilleures propriétés. Cette valorisation favorise leur utilisation dans des applications plus exigeantes et peut également ouvrir la voie à une plus grande diversification des forêts.

Bien que la densification améliore les propriétés mécaniques du bois, elle modifie également sa structure interne. L'amélioration des performances constitue donc une première étape, mais son intégration dans des assemblages en est une autre tout aussi essentielle. Dans ce contexte, l'utilisation d'éléments de fixation joue un rôle central pour permettre l'emploi du bois densifié dans des assemblages plus variés et plus complexes. Si les effets de la densification sur des propriétés telles que la dureté, la résistance à la flexion ou le module d'élasticité sont aujourd'hui relativement bien documentés, son influence sur le comportement au vissage reste peu explorée.

1.2 Objectifs de l'étude

C'est précisément cette question liée au comportement du bois densifié face aux éléments de fixation qui motive cette étude, centrée sur le peuplier densifié par procédé thermo-hygro-mécanique. Plus spécifiquement, elle vise à analyser l'impact de la densification du bois sur son comportement face au vissage, ainsi qu'à déterminer dans quelle mesure la modification de la structure interne influence la tenue mécanique des vis. Une comparaison sera également réalisée entre le bois densifié et un bois présentant une densité similaire afin d'évaluer si les performances observées résultent uniquement de l'augmentation de densité ou également des transformations structurelles induites par le procédé de densification.

Cette étude s'organise en plusieurs chapitres. L'état de l'art présenté au chapitre 2 replacera ce travail dans son contexte scientifique et présentera les notions nécessaires à la bonne compréhension des résultats. Une attention particulière sera portée aux caractéristiques du bois, aux procédés de densification et à la technique de vissage. Le chapitre suivant décrira les matériaux et méthodes expérimentales utilisés pour obtenir

les résultats, en abordant notamment la densification, la mesure du couple au moyen d'un dispositif expérimental spécialement conçu, l'analyse de l'endommagement interne et les essais d'extraction. Les résultats des différents essais seront ensuite présentés au chapitre 4, avant d'être discutés et interprétés au chapitre 5.

Chapitre 2

État de l’art

Ce chapitre a pour objectif de présenter les connaissances nécessaires à la bonne compréhension de cette étude et de mieux situer ce travail dans son contexte scientifique. Les caractéristiques du bois seront d’abord passées en revue pour mieux comprendre ce matériau. Les méthodes de densification, et plus particulièrement la densification thermohygro-mécanique, seront ensuite abordées. Enfin, une attention particulière sera donnée au vissage dans le bois, qui constitue la partie centrale de cette étude.

2.1 Caractéristiques du bois

Pour pouvoir exploiter le bois et comprendre comment une vis peut s’y ancrer, il est important d’en comprendre la structure ainsi que les propriétés mécaniques. Cette section va aborder les différents aspects de ce matériau tels que sa constitution, sa composition chimique et son comportement face à différentes sollicitations. Les caractéristiques des bois utilisés dans cette étude seront ensuite présentées.

2.1.1 La structure du bois

Le bois est un matériau de construction d’origine naturelle, constitué d’un ensemble de tissus composés de cellules végétales et de polymères. Il est produit par l’arbre, dont le tronc assure trois fonctions essentielles : le soutien mécanique, le transport de l’eau et des substances nutritives absorbées par les racines et transportées jusqu’au feuillage, ainsi que le stockage des réserves nutritives [15]. Sa structure peut être abordée d’un point de vue macroscopique et microscopique.

Macrostructure

Le bois est organisé de manière concentrique, comme montré sur la Figure 2.1a.

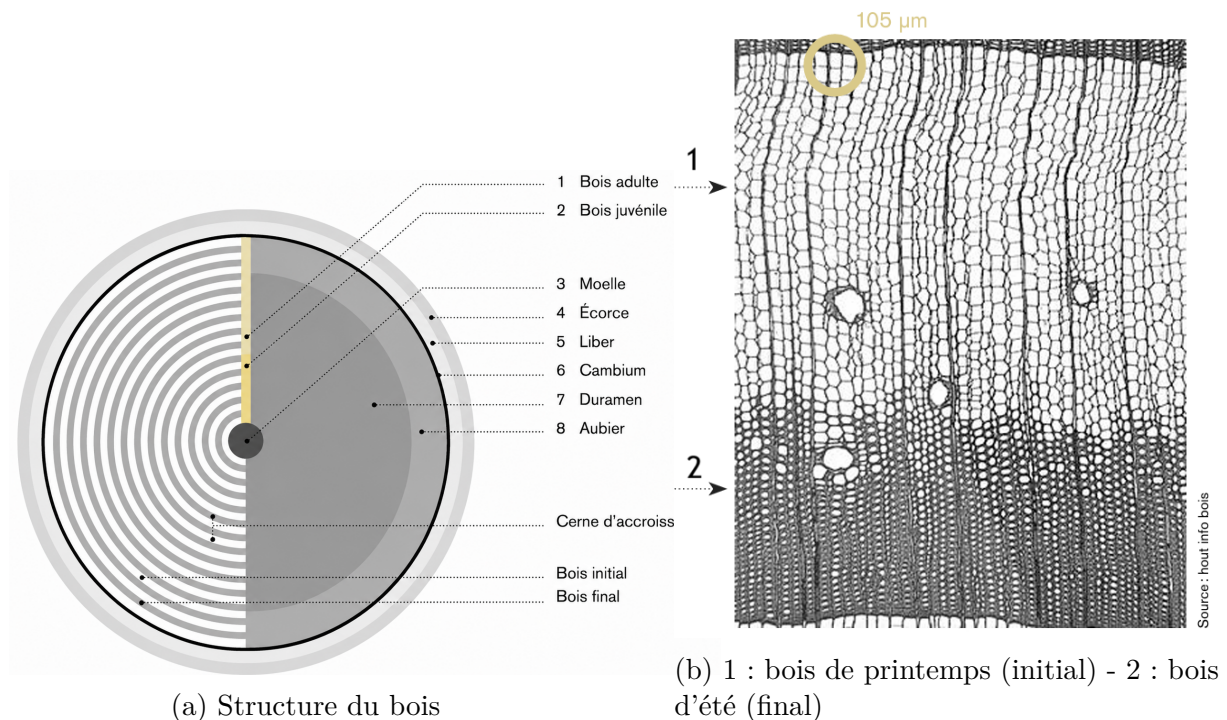


FIGURE 2.1 – Structure et composition du bois [15]

En partant de l'extérieur, il y a [15, 16] :

- L'écorce qui est la couche externe et protectrice de l'arbre.
- Le liber qui est une fine couche de tissu située entre l'écorce et le cambium. Il constitue la zone de circulation de la sève.
- Le cambium est une couche située sous l'écorce. Il s'agit d'un tissu générateur dont l'activité repose sur une division cellulaire continue. Cette activité produit, en faible quantité, des cellules orientées vers l'extérieur, qui constituent le liber, et de manière beaucoup plus abondante, des cellules dirigées vers l'intérieur, formant le tissu ligneux, c'est-à-dire le bois.
- L'aubier correspond au bois formé le plus récemment, situé en périphérie du tronc, à proximité du cambium.
- Le duramen, également désigné sous les termes de bois de cœur, correspond à la partie centrale du tronc. Il est constitué de cellules devenues non fonctionnelles à la suite du processus de duraminisation, au cours duquel l'aubier subit une transformation progressive de nature chimique et physiologique.
- La moelle est un tissu situé au centre du tronc, formé de cellules qui ne fonctionnent plus à maturité. Elle occupe la position centrale autour de laquelle s'organisent les cerne d'accroissement successifs du bois. La moelle correspond au vestige de la tige initiale formée lors des premiers stades de croissance de l'arbre et constitue ainsi le point d'origine du développement radial du tronc.

La structure du bois présente une organisation concentrique qui se développe autour

de la moelle, ce qui reflète la croissance radiale de l'arbre. Cette organisation résulte de la formation successive des cernes et permet de distinguer deux grands types de bois : le bois juvénile et le bois adulte. Ils se différencient par leur emplacement dans le tronc et par leurs caractéristiques.

Le bois juvénile se forme pendant les premières années de croissance de l'arbre et occupe la zone interne du tronc, à proximité de la moelle. Il correspond généralement aux 15 premiers cernes chez les résineux et aux 20 à 40 premiers cernes chez les feuillus. Ce bois est caractérisé par une masse volumique plus faible et des cernes souvent plus larges [16].

Le bois adulte quant à lui se forme après le bois juvénile et occupe les zones périphériques du tronc, au-delà de la zone juvénile, et présente une structure plus homogène [15].

Dans nos régions, les arbres poussent du printemps jusqu'à la fin de l'été. Chaque année, le cambium forme une nouvelle couche de bois autour du tronc, ce qui crée des anneaux concentriques visibles en coupe transversale. Ces anneaux sont appelés cernes d'accroissement. Un cerne peut comporter deux parties : le bois de printemps aussi appelé bois initial et le bois d'été ou bois final. Le bois initial favorise le transport rapide de grande quantité de sève brute tandis que le bois final est plus dense et offre de bonnes propriétés mécaniques. Dans les régions tropicales, ce sont les saisons sèches et humides qui influencent la croissance. Si la croissance ne s'interrompt jamais, les cernes ne se forment pas et ne sont donc pas visibles [15]. Cette distinction entre bois initial et bois final est représentée sur la Figure 2.1b.

Les différents tissus du bois s'organisent selon des orientations parallèles et perpendiculaires à l'axe de la moelle. On distingue ainsi trois directions principales, correspondant à trois plans de référence : axial, radial et tangentiel (Fig. 2.2). Une coupe dans ces trois plans permet d'observer les caractéristiques anatomiques du bois, propres à chaque essence et utilisées pour identifier les espèces.

- Le plan transversal correspond à une coupe perpendiculaire à l'axe longitudinal du tronc. On y observe les cernes d'accroissement ainsi que la distinction entre aubier et duramen.
- Le plan tangentiel correspond à une coupe tangentielle aux cernes et perpendiculaire aux rayons.
- Le plan radial correspond à une coupe parallèle à l'axe longitudinal du tronc et passant par son centre. Les cernes d'accroissement, l'aubier et le duramen sont également visibles, et les cernes apparaissent sous forme de lignes droites et parallèles [15].

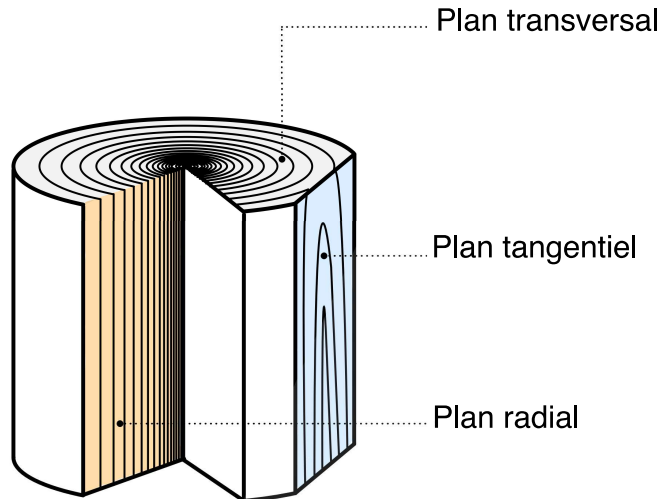


FIGURE 2.2 – Plans de coupe du bois (adapté de [15])

Microstructure

On retrouve au travers de ces plans deux grandes catégories de cellules. Les cellules orientées verticalement, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du tronc, sont constituées d'éléments longs et étroits. Ceux-ci assurent principalement des fonctions de conduction de sève, via les vaisseaux, ainsi que de soutien mécanique de l'arbre, grâce aux fibres.

À l'inverse, les tissus orientés horizontalement par rapport à l'axe de la tige (les rayons ligneux) sont formés de cellules plus courtes et assurent une fonction de stockage [15].

La longueur, le diamètre et l'épaisseur des parois de ces vaisseaux et fibres varient en fonction des essences. Ces différentes cellules et leur organisation au sein du bois sont visibles sur la Figure 2.3.

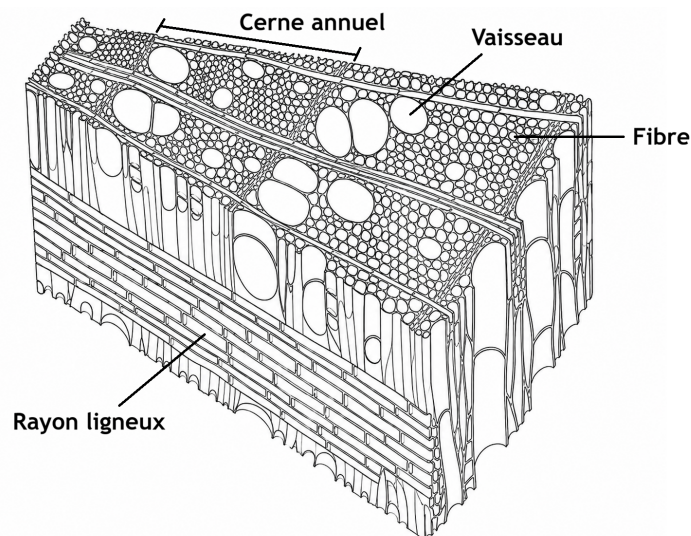


FIGURE 2.3 – Microstructure du bois (adapté de [15])

2.1.2 Composition chimique du bois

La composition chimique élémentaire du bois varie peu entre les essences. Quel que soit le type d'arbre ou les conditions de croissance, la proportion des éléments constitutifs du bois reste comparable. En pourcentage du poids sec, les éléments suivants se retrouvent dans des proportions variables selon l'essence, mais sans différences fondamentales d'une essence à l'autre [15, 17] :

Carbone C	Oxygène O	Hydrogène H	Azote N	cendres
50 %	43 %	6 %	1 %	<1 %

TABLE 2.1 – Composition chimique du bois

On retrouve ensuite les macromolécules du bois : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Ces molécules représentent 95 % de la composition chimique du bois et sont principalement présentes dans les parois cellulaires. Chez les essences tropicales, elles représentent 90 % et dans certains arbres des zones tempérées, elles représentent plus de 97 %. Le reste est composé de substances à faibles poids moléculaires appelées extractibles et de molécules organiques ou de composés minéraux. Ces extractibles sont responsables entre autres de la couleur et de l'odeur spécifiques à chaque essence [16, 18].

La cellulose est un polymère naturel omniprésent dans le règne végétal. Dans les tissus ligneux, elle se présente sous forme de microfibrilles, c'est-à-dire des structures allongées composées de longues chaînes de molécules de glucose alignées parallèlement. Ces microfibrilles s'associent à d'autres composants de la paroi cellulaire, tels que les hémicelluloses et la lignine. Dans le bois, la cellulose adopte une structure partiellement cristalline qui offre une rigidité et une résistance à la traction élevées. Elle joue un rôle d'armature dans la paroi cellulaire et assure la solidité et la stabilité structurelle du bois. La cellulose représente 40 à 50 % du bois.

Les hémicelluloses se distinguent de la cellulose par leur poids moléculaire nettement inférieur. Elles sont constituées de chaînes plus courtes. Dans la structure du bois, les hémicelluloses jouent un rôle de matrice liant : elles se situent entre les microfibrilles de cellulose et contribuent à la cohésion de la paroi cellulaire, tout en influençant les propriétés hygroscopiques et la stabilité dimensionnelle du matériau. L'hémicellulose représente 25 à 40 % du bois.

La lignine est une substance complexe qui remplit et rigidifie la paroi cellulaire du bois. Contrairement à la cellulose et aux hémicelluloses, elle n'est pas un sucre, mais un composé aromatique. Sa composition varie selon les essences, ce qui explique certaines différences de propriétés entre les bois. La lignine agit comme un "ciment" qui relie les fibres et renforce la structure du bois. La lignine représente 20 à 35 % du bois.[15, 16, 19]

La composition moléculaire est représentée sur la Figure 2.4. L'organisation et le comportement de ces polymères, notamment en présence d'humidité et de chaleur, joue un rôle clé dans les processus de densification. Ceux-ci seront abordés dans la section 2.2.

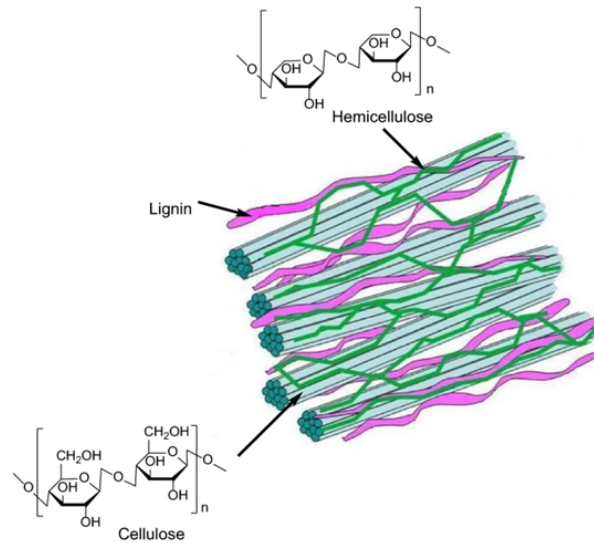


FIGURE 2.4 – Structure moléculaire du bois [19]

2.1.3 Propriétés physiques et mécaniques du bois

Comme tout matériau, le bois possède des propriétés physiques et mécaniques spécifiques. Pour comprendre son comportement lors de sa transformation ou de son utilisation, il convient de rappeler certaines notions liées à l'analyse et à la réaction du bois au visage. Cette section mettra l'accent sur la masse volumique, l'hygroscopie, l'anisotropie, la dureté et les différents modes de sollicitation.

La masse volumique

La masse volumique du bois (ρ) est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau (notée m , en kg) par unité de volume (notée V , en m^3). Cette propriété figure parmi les caractéristiques physiques les plus importantes du bois, car elle est corrélée à ses propriétés mécaniques [15]. Elle s'exprime selon la relation suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

En raison de sa microstructure interne et de sa porosité, la masse volumique du bois dépend de plusieurs facteurs, notamment la teneur en eau, l'essence considérée, les caractéristiques de croissance ainsi que la texture du bois, en particulier la proportion de bois final au sein des cernes d'accroissement. La masse volumique des parois cellulaires est, quant à elle, pratiquement constante pour l'ensemble des essences et s'élève à environ 1500 kg/m^3 [15].

L'humidité relative et la température de l'air ambiant peuvent provoquer des gonflements ou des retraits. Ces variations dimensionnelles s'arrêtent lorsque le point de saturation des fibres, situé autour de 30 % d'humidité, est atteint. Il est donc essentiel de spécifier la teneur en eau pour l'expression de la masse volumique. Elle est généralement rapportée à un taux d'humidité de 12 %, bien qu'elle puisse aussi être indiquée pour une teneur en eau de 0 ou 15 % [15].

En fonction de l'essence, la masse volumique du bois peut varier de 350 à 1 100 kg/m^3 . Par ailleurs, au sein d'une même espèce, des variations pouvant atteindre 15 % sont possibles. Cette variabilité s'explique, d'une part, par les fluctuations de la proportion de bois initial, moins dense, et de bois final, plus dense. Ce phénomène est lié au vieillissement de l'arbre, au cours duquel la densité du bois tend à augmenter [15]. À titre informatif, la masse volumique moyenne, rapportée à 12 % d'humidité, pour différentes essences présentes en Belgique est présentée dans le tableau 2.2.

Essence	Chêne	Hêtre	Douglas	Épicéas	Peuplier
$\rho [kg/m^3]$	710	680	540	450	400

TABLE 2.2 – Masse volumique de différentes essences présentes en Belgique [15]

L'hygroscopie

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il a une capacité à absorber ou restituer de l'humidité par rapport à l'air environnant. Une attention particulière doit être donnée à cette relation eau-bois, notamment dans le domaine de la construction. Une négligence de cet aspect peut engendrer des problèmes tels que des déformations imprévues, des réductions de propriétés mécaniques ou encore des attaques fongiques [15].

Au-delà des déformations du bois, l'humidité modifie également son comportement mécanique. Lorsque le bois absorbe de l'eau, celle-ci pénètre dans les parois cellulaires et interagit avec les différents polymères, notamment la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La présence d'eau réduit alors les interactions entre ces composants et facilite leur déplacement relatif. On observe ainsi un phénomène de plastification qui rend le bois plus souple et plus déformable. De ce fait, un bois humide résistera moins aux efforts mécaniques et se déformera plus facilement sous une charge. Les interactions entre les polymères deviennent à l'inverse plus fortes lorsque le bois est sec, ce qui augmente sa rigidité et sa résistance mécanique.

Beaucoup de propriétés physiques et mécaniques du bois dépendent donc de cette teneur en eau, aussi appelée taux d'humidité. Généralement exprimée en pourcentage,

elle peut s'exprimer comme

$$MC = \frac{m_{eau}}{m_{sec}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$= \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

où m_{eau} correspond à la masse d'eau dans le bois, m_{humide} à la masse de bois humide et m_{sec} à la masse de bois à l'état anhydre.

La teneur en eau existe sous deux formes. L'eau libre qui circule dans les cavités et l'eau liée tenue par les attractions intermoléculaires au sein des parois cellulaires. Par ailleurs, elle n'est pas seulement un paramètre qui dépend de l'humidité relative de l'air ambiant. Il s'agit d'un équilibre résultant d'une combinaison entre l'humidité relative et la température, comme le montre la Figure 2.5 [16].

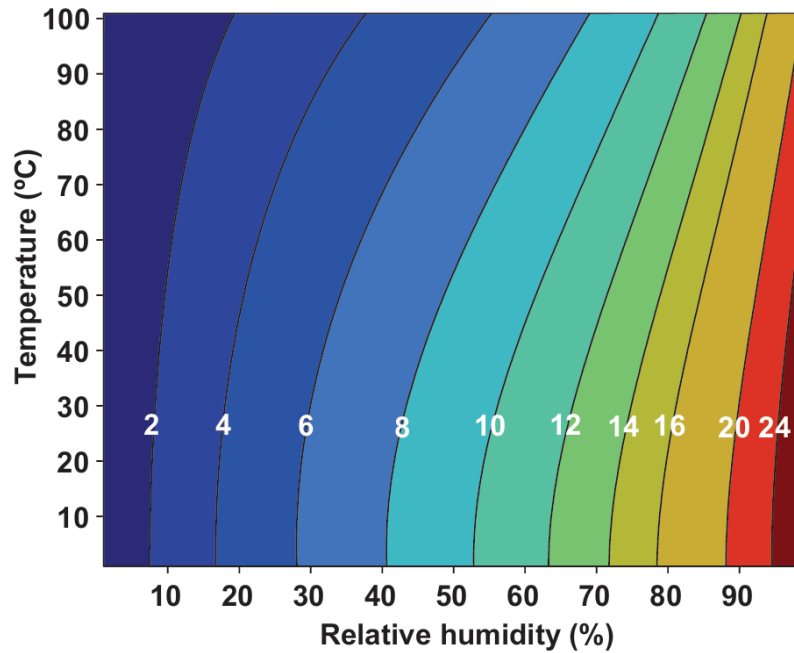


FIGURE 2.5 – Équilibre de teneur en eau en fonction de l'humidité relative et de la température [16]. Les valeurs sur les courbes indiquent la teneur en eau du bois pour une humidité relative et une température donnée.

Cette capacité d'absorption de l'eau provient des polymères de la paroi cellulaire des fibres, où l'eau s'y lie par la force des ponts hydrogènes. En dessous de 30 % d'humidité, le bois peut gonfler et se dégonfler suite à un changement de teneur en eau. On appelle cela le domaine hygroscopique. Au-delà de 30 % de teneur en eau, on observe une saturation des fibres et un arrêt de la variation volumique.

La Figure 2.6 montre l'évolution des états du bois en fonction de la teneur en eau [15]. On observe :

- 2.6a : l'état anhydre ($MC = 0 \%$). Il s'agit d'un état non naturel atteignable après plusieurs heures de séchage.
- 2.6b : l'état intermédiaire ($0 \% < MC < 30 \%$). À ce stade, les fibres n'ont pas encore atteint leur point de saturation et le bois ne contient que de l'eau liée. Les variations d'humidité entraînent des variations de volume.
- 2.6c : la saturation des parois cellulaires ($MC = 30 \%^1$). Le bois ne contient que de l'eau liée et les fibres sont à leur point de saturation.
- 2.6d : le bois frais ($30 \% < MC < 200 \%$ et plus). Il s'agit d'un arbre en forêt avec de l'eau liée dans les fibres et de l'eau libre dans les cavités qui circule facilement dans le bois. Lorsque l'arbre est abattu, l'eau libre s'évapore.
- 2.6e : la saturation ($MC > 250 \%$). Les cavités sont remplies d'eau suite à une immersion prolongée du bois.

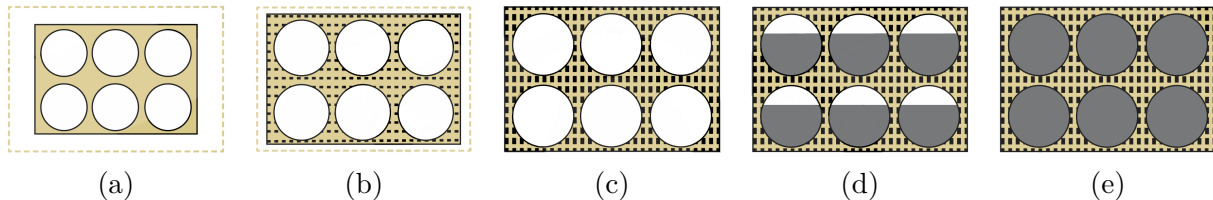


FIGURE 2.6 – Évolution de la teneur en eau du bois [15]

L'humidité relative de l'air, la température et la teneur en eau du bois sont donc liées. Elles jouent un rôle essentiel dans la densité et les propriétés physiques ou mécaniques du bois. Il est donc important de suivre ces paramètres tout le long des processus expérimentaux.

Au-delà des variations dimensionnelles liées à l'hygroscopie, l'eau influence également le comportement mécanique du bois dans le temps. En modifiant les interactions entre les polymères de la paroi cellulaire, l'humidité accentue le comportement viscoélastique du bois, c'est-à-dire qu'il présente une réponse mécanique intermédiaire entre un comportement élastique et visqueux. Ce comportement est fortement influencé par la teneur en eau et la température et sera utile pour les procédés de densification présentés dans la section 2.2.

L'anisotropie

L'anisotropie est la caractéristique d'un matériau dont les propriétés varient en fonction de la direction considérée. Dans le cas du bois, elle est directement liée à l'orientation de sa structure cellulaire qui influence ses propriétés mécaniques et physiques selon les différents axes.

1. En réalité, ce taux varie entre 22 et 35 % selon les essences

En raison de son anisotropie, le bois ne possède pas de propriétés mécaniques homogènes. Des caractéristiques telles que la résistance à la traction, à la compression et au cisaillement peuvent varier. Qu'elles soient mesurées perpendiculairement ou parallèlement au fil du bois, ces caractéristiques peuvent varier d'un facteur allant jusqu'à dix au sein d'une même essence. Les propriétés mécaniques sont généralement supérieures dans la direction parallèle aux fibres du bois [20].

La dureté

La dureté du bois reflète sa résistance à la pénétration par un corps métallique et peut être exprimée selon deux échelles [18, 21] :

- L'échelle de Monnin. Elle est spécifiquement utilisée pour le bois. La mesure consiste à enfoncer un cône métallique dans le bois et à mesurer la profondeur de pénétration. Plus le bois est dur, moins le cône pénètre, et plus la valeur Monnin est élevée.
- L'échelle de Brinell. C'est une méthode générale, utilisée pour tous types de matériaux, y compris les métaux. Elle consiste à presser une bille métallique de diamètre connu sur la surface du matériau sous une charge définie. La dureté Brinell est calculée à partir de la surface de l'empreinte laissée par la bille : plus l'empreinte est petite, plus le matériau est dur.

Cette propriété dépend du type de bois, de la largeur des cernes annuels et de la densité. La dureté est liée à la masse volumique : les bois denses sont plus durs, alors que les bois légers sont souvent plus tendres. Ce critère est important pour choisir le bois destiné aux parquets, aux escaliers ou à tout assemblage par vis, clous ou pointage, où il faut une bonne résistance à la pénétration des fixations métalliques [15].

Les modes de sollicitation mécanique

En mécanique du bois, les sollicitations peuvent se classer en plusieurs types : compression, traction et cisaillement, ainsi que flexion, qui correspond à une combinaison de ces trois efforts. Ces sollicitations peuvent être appliquées parallèlement ou perpendiculairement aux fibres, et la résistance du bois varie fortement selon la direction de l'effort en raison de son anisotropie.

La traction

La traction est la sollicitation la plus simple, consistant à allonger la pièce de bois sur laquelle une force s'exerce. Lorsque la force dépasse le point de rupture, caractérisé par un défibrage, les microfibrilles se rompent. La résistance à la traction se mesure par rapport à la section sollicitée, en MPa ou en N/mm^2 .

En raison de l'orientation de sa structure cellulaire, le bois offre une excellente résistance à la traction parallèle aux fibres, alors qu'elle est beaucoup plus faible lorsque la force est appliquée perpendiculairement. Globalement, la résistance à la traction dépasse celle à la compression, sauf en présence de défauts structurels tels que des nœuds ou fentes [15].

La compression

L'effort de compression longitudinale tend à réduire la longueur de la pièce de bois, c'est la sollicitation inverse de la traction. Dans ce cas-ci, le point de rupture est défini par une pliure des fibres. La force nécessaire pour atteindre ce point est généralement deux fois plus faible que celle en traction [15, 22].

La Figure 2.7 met en évidence une courbe typique de contrainte-déformation du bois lors d'une compression. On distingue une première zone élastique, où le bois peut se déformer de manière réversible jusqu'au point de rupture élastique σ_y . Le bois a un comportement linéaire dont la pente correspond au module de Young $E = \sigma/\epsilon$ tel que régit par la loi de Hooke, où σ et ϵ correspondent respectivement à la contrainte et la déformation. Après une courte zone de transition apparaît un plateau d'écrasement cellulaire qui est caractérisé par l'effondrement progressif des parois cellulaires sous une contrainte quasi constante. Enfin, la dernière zone correspond à une densification lorsque les parois cellulaires se compactent intégralement. Ce phénomène s'accompagne d'une forte augmentation des contraintes.

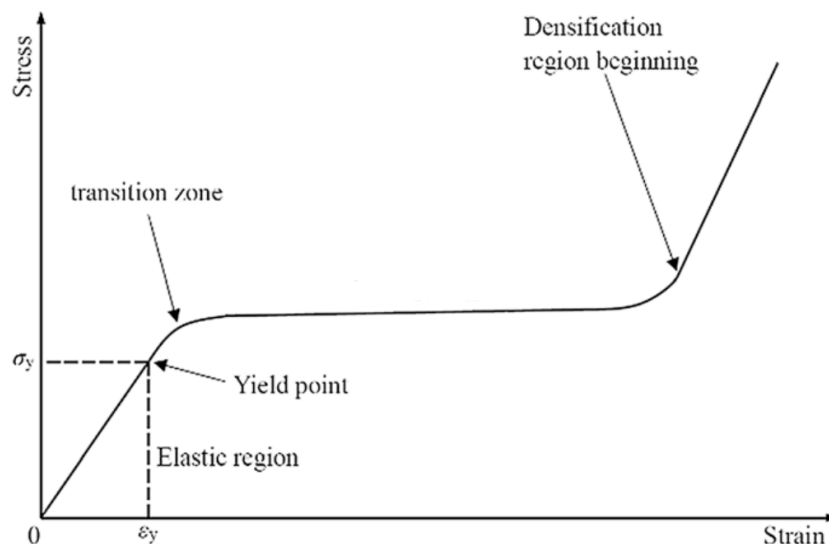


FIGURE 2.7 – Courbe contrainte-déformation typique du bois soumis à une compression radiale [23]

Le cisaillement

Le cisaillement se produit lorsque les fibres du bois glissent les unes par rapport aux autres sous l'effet d'une force appliquée dans un plan donné. Ce mouvement peut provoquer le sectionnement ou la rupture locale de la pièce, c'est pourquoi on parle également d'effort tranchant.

Selon l'orientation des fibres et le type de pièce, on distingue différents types de cisaillement :

- Cisaillement longitudinal : la force est appliquée parallèlement aux fibres, ce qui sollicite les liaisons entre les microfibrilles le long de l'axe de l'arbre.
- Cisaillement transversal : la force est appliquée perpendiculairement aux fibres, affectant principalement la cohésion entre les couches cellulaires.
- Rolling shear : phénomène particulier aux panneaux de bois reconstitué, comme le contreplaqué, où les couches superposées peuvent glisser les unes sur les autres.

La résistance au cisaillement se mesure en fonction de la section sur laquelle la force est appliquée, généralement exprimée en MPa ou en N/mm^2 . Cette caractéristique est essentielle pour dimensionner correctement les assemblages, les fixations et les éléments de structure soumis à des forces de glissement [15, 16].

Les modes de cisaillement sont représentés à la Figure 2.8, où T, A et R représentent respectivement les directions tangentielle, longitudinale (axiale) et radiale.

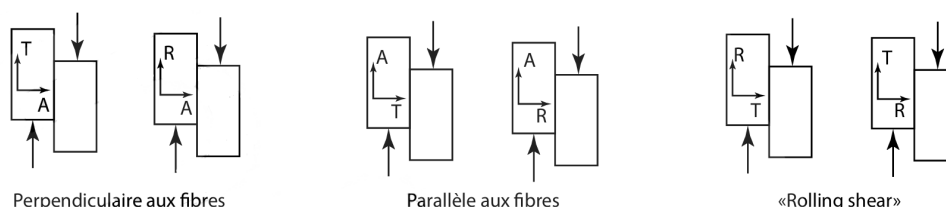


FIGURE 2.8 – Mode de cisaillement [15]

La notion de cisaillement est directement mobilisée lors du vissage. Nous y reviendrons dans la section dédiée au vissage du bois (section 2.3).

2.1.4 Peuplier & bouleau

Cette étude ayant pour objectif d'analyser l'impact de la densification du bois sur son comportement au vissage, mais aussi de le comparer à du bois brut de densité similaire, deux essences principales ont été retenues. Le bois densifié est obtenu à partir d'échantillons de peuplier, tandis que le matériau de comparaison est le bouleau. Cette section a donc pour objectif de présenter les principales caractéristiques de ces deux essences.



(a) Peuplier - *Populus nigra* [24]



(b) Bouleau - *Betula pendula* [25]

FIGURE 2.9 – Bois de l'étude

Le peuplier

Le peuplier (Fig. 2.9a) appartient au genre *Populus*, qui regroupe 39 espèces réparties dans les régions tempérées et froides de l'hémisphère Nord. En Europe occidentale, cinq espèces pures sont recensées. À celles-ci s'ajoutent de nombreux hybrides, particulièrement répandus en raison de leur facilité de propagation.

Le peuplier est un arbre feuillu, réputé pour sa croissance rapide et ses faibles exigences en matière de fertilité des sols. Ces atouts lui ont valu un intérêt par rapport à d'autres essences en sylviculture classique. Le cycle d'exploitation du peuplier est de l'ordre de 20 ans. Dans ces conditions, l'arbre peut atteindre une hauteur d'environ 40 mètres et un diamètre supérieur à 3 mètres [26].

Le bois du peuplier est tendre, léger et présente une structure homogène avec beaucoup de petits vaisseaux répartis régulièrement sur la largeur du cerne. Les fibres qui composent le tissu de soutien mesurent environ 1,5 mm. Les rayons ligneux sont unisérisés, c'est-à-dire qu'ils sont constitués d'une seule rangée de cellules en largeur [27]. Bien qu'il contienne une forte proportion d'humidité à l'état frais, son séchage à l'air libre reste relativement simple. Par ailleurs, il est réputé pour avoir une bonne aptitude à être usiné [26].

Cependant, l'utilisation du peuplier présente certaines limites. La morphologie parfois déséquilibrée de l'arbre favorise la formation de bois de tension. Ce phénomène engendre plusieurs inconvénients, tels que des contraintes de croissance élevées, l'apparition de fentes, des déformations, ainsi qu'un aspect pelucheux qui peut provoquer l'échauffement de la lame lors du sciage [26].

Non adapté à un usage extérieur, ses applications se répandent dans les domaines de la menuiserie intérieure, le contreplaqué, les emballages, les charpentes légères ou encore le lamellé-collé [15].

L'utilisation du peuplier dans ces domaines se justifie par ses propriétés mécaniques inférieures à d'autres essences utilisées dans des secteurs nécessitant de meilleures performances. Certaines de ses propriétés sont reprises dans la table 2.3 [15].

Le bouleau

Le bouleau (Fig. 2.9b) appartient au genre *Betula* et est adapté aux climats tempérés ou froids. En Europe, on retrouve 4 espèces de bouleau, dont deux largement répandues : le bouleau verruqueux (*Betula pendula*) et le bouleau pubescent (*Betula pubescens*). Les deux autres espèces européennes se trouvent dans les régions arctiques [25].

En Wallonie, le bouleau est le 3e feuillu en terme de volume. Il peut y vivre 30 à 40 ans et atteindre 30 mètres de haut. Il est également considéré comme une essence à croissance rapide et s'adapte à tout type de sol, bien qu'il ait une préférence pour les terrains légèrement acides. Les bouleaux sont des plantes pionnières et constituent généralement la première formation d'arbre lors de la conquête de terres vierges [25, 28].

Au niveau de sa microstructure, le bouleau présente des vaisseaux de taille uniforme et distribués de manière homogène au sein d'un cerne. Les fibres sont cylindriques et ont une longueur de 1,35 mm. Les rayons ligneux peuvent également être unisérisés, ou en groupe de 2, 3 ou 4 rayons. Les rayons ligneux occupent environ 12 % du cerne [29].

Dans le sud de l'Europe, les bouleaux ont une croissance rapide et sont jugés comme ayant peu de valeur. Dans les régions plus au nord, où sa croissance est plus lente, le bois obtenu est généralement de meilleure qualité. Il se caractérise par un aspect très blanc, une texture douce et soyeuse, ainsi qu'une facilité à être travaillé et imprégné. Il présente également de bonnes propriétés mécaniques, avec un grain fin et homogène. On le retrouve dans différents domaines tels que les meubles et la menuiserie intérieure, l'ébénisterie, les emballages légers, le contreplaqué ou les parquets [15, 30].

Bien qu'ayant des domaines d'applications similaires, le bouleau possède des propriétés physiques et mécaniques différentes de celles du peuplier à l'état brut. Celles-ci sont reprises dans la table 2.3 [15].

Ce tableau met en évidence l'écart de performances entre les deux essences. C'est précisément cet écart que la densification du peuplier vise à combler et à améliorer, comme le décrit la section suivante.

Catégorie	Propriété	Peuplier	Bouleau	Unité
Physique	Masse volumique moyenne à 12 % d'humidité	400	660	kg/m ³
	Dureté Brinell // aux fibres	29	48	N/mm ²
	Dureté Brinell ⊥ aux fibres	12	27	N/mm ²
Mécanique	Module d'élasticité	9	14	GPa
	Résistance moyenne compression	33	50	MPa
	Résistance moyenne traction	72	135	MPa
	Résistance moyenne cisaillement	6	13	MPa

TABLE 2.3 – Propriétés physiques et mécaniques moyennes du peuplier et du bouleau

2.2 La densification du bois

Certaines techniques de transformation permettent d'améliorer sensiblement les caractéristiques d'essences à faible densité, et notamment le peuplier. Cette section a pour objectif de décrire les procédés de densification, et plus particulièrement la densification thermo-hygro-mécanique. La densification fait partie des techniques de modification du bois, dont l'utilisation connaît un développement croissant dans l'industrie. Ces procédés permettent de valoriser les bois à faible densité et de leur offrir de meilleures propriétés adaptées à de nouveaux usages [31]. C'est la raison pour laquelle le peuplier sera densifié dans cette étude.

La densification du bois permet d'améliorer ses propriétés, telles que la dureté, la résistance à la flexion ou le module d'élasticité [32, 33]. Toutefois, ce procédé entraîne une modification de la structure cellulaire, que ce soit par compression mécanique ou par imprégnation chimique, selon la méthode employée. En réduisant les porosités et les vides présents dans le matériau, la densification augmente la densité du bois tout en modifiant sa structure interne [34].

Plusieurs paramètres permettent de caractériser un procédé de densification, parmi lesquels :

- la température
- le temps de compression
- la teneur en humidité
- le ratio de compression

Ce dernier, exprimé en pourcentage, est défini par la relation suivante :

$$CR = \left(\frac{t_i - t_f}{t_i} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

où t_i correspond à l'épaisseur initiale du bois et t_f à son épaisseur après compression.

Le procédé de densification peut reposer sur l'ajout de produits chimiques, ou sur le comportement viscoélastique du bois lorsqu'on combine chaleur et humidité. Une fois que le matériau atteint un état plus plastique, il devient possible de le comprimer et de le densifier de manière irréversible en conditions ambiantes [34].

2.2.1 Les différents procédés de densification

Les procédés de densification du bois existent depuis le début du XX^e siècle et ont depuis évolué et se sont diversifiés [34]. Les méthodes actuelles peuvent être regroupées en trois grandes catégories.

La première correspond à la modification chimique du bois. Celle-ci repose sur une réaction entre un agent chimique et les constituants polymères du bois (lignine, hémicelluloses ou cellulose), conduisant à la formation de liaisons covalentes stables au sein de la paroi cellulaire. Ce type de modification est qualifié d'“actif”, car il change directement les polymères de la paroi cellulaire. Il permet notamment de réduire la tendance du bois à reprendre sa forme initiale en conditions humides, ainsi que de réduire sa teneur en eau. Ceci permet de rendre le développement de champignons plus compliqué, et crée un blocage physique à l'entrée de nouveaux champignons.[31, 34, 35]

La deuxième catégorie regroupe les procédés de densification thermo-mécanique (TM), qui combinent chaleur et pression mécanique. Ces procédés sont généralement réalisés dans une presse ouverte, avec des plateaux chauffés entre 130 et 180 °C, sans contrôle direct de la teneur en eau ou de l'humidité relative. Par conséquent, le pré-traitement du bois est une étape essentielle afin qu'il puisse être déformé sans risquer de l'endommager. [31, 34, 35]

Enfin, la densification thermo-hygro-mécanique (THM) combine température, humidité et action mécanique. L'apport d'humidité permet la plastification du bois avec un ramollissement de la lignine et les hémicelluloses, qui améliore sa compressibilité, réduit les contraintes internes lors de la compression et favorise une meilleure stabilité dimensionnelle. Comparée aux procédés TM, cette méthode offre une meilleure stabilité, une réduction de l'hygroscopicité, ainsi que l'augmentation de la densité, des propriétés mécaniques et de la durabilité [34, 36, 37]. Toutefois, lorsqu'il est chauffé en présence de vapeur d'eau, le bois se dégrade plus vite. Des conditions trop sévères (température ou humidité trop élevée ou durée de traitement excessive) peuvent ainsi altérer les constituants du bois et entraîner une diminution de ses performances mécaniques [38].

Parmi ces différentes techniques, la densification thermo-hygro-mécanique a été retenue dans le cadre de cette étude. Lorsqu'elle est correctement paramétrée, elle s'avère plus performante que la densification thermo-mécanique, tout en évitant l'utilisation de produits chimiques potentiellement nocifs pour l'environnement, utilisés dans les modifications chimiques.

2.2.2 La densification thermo-hygro-mécanique

La densification thermo-hygro-mécanique (THM) est un procédé complexe où chacune des composantes joue un rôle spécifique dans la transformation du bois. La chaleur permet de ramollir la lignine et favorise l'hydrolyse des hémicelluloses, ce qui contribue à réduire la capacité du bois à absorber l'eau et à améliorer sa stabilité dimensionnelle [38, 39]. L'humidité, associée à la chaleur, facilite l'atteinte d'un comportement viscoélastique plus rapidement [39]. Enfin, l'action mécanique induit la déformation des parois cellulaires, entraînant une réduction des vides internes et, par conséquent, une augmentation de la densité.

Ces trois paramètres étant fortement interdépendants, il n'existe pas de combinaison optimale en toutes circonstances [34]. Ils doivent être ajustés en fonction de l'essence de bois considérée, des conditions opératoires et de la géométrie des échantillons. Néanmoins, le procédé suit généralement des étapes similaires, indépendamment des choix de paramètres. Un schéma typique de la courbe de charge lors d'une densification THM au sein des laboratoires de l'UCLouvain est présentée à la Figure 2.10 et comprend trois étapes principales, après une étape de prétraitement qui permet la plastification du bois.

La première phase correspond à la densification proprement dite, durant laquelle un déplacement contrôlé est appliqué à température constante afin de comprimer le bois et d'augmenter sa densité. La deuxième phase est une étape de relaxation avec un maintien de l'écartement des plateaux qui permet de relâcher progressivement les contraintes accumulées dans les microfibrilles de cellulose tout en conservant le ratio de compression imposé. La troisième phase est caractérisée par l'arrêt de la contrainte mécanique avec une ouverture de la presse à une vitesse contrôlée. Ces deux dernières étapes constituent un post-traitement, visant à permettre une relaxation progressive des contraintes internes et à limiter la reprise de forme du bois après densification [39].

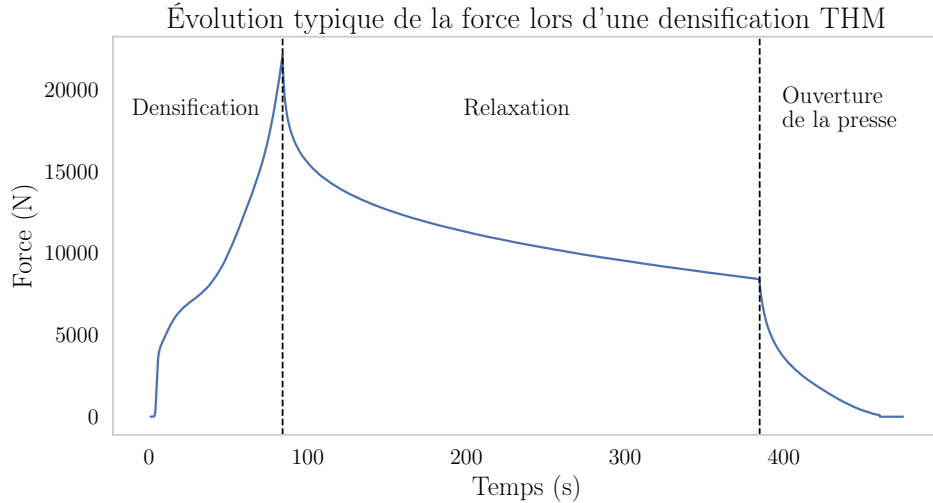


FIGURE 2.10 – Évolution typique des contraintes lors d’une densification THM

En effet, le bois présente une tendance à retrouver partiellement sa forme initiale après compression, phénomène aussi appelé *spring back* (SB). De plus, une reprise de forme peut également se produire lors d’une exposition à l’humidité ou à la chaleur après la densification, phénomène désigné par *set recovery* (SR) [34]. Ces effets indésirables peuvent être atténués de différentes manières.

Le *spring back* peut être limité en maintenant le bois sous contrainte après la phase de compression. Le caractère thermoplastique de la lignine joue ici un rôle clé : ramollie à haute température, elle se rigidifie lors du refroidissement, contribuant ainsi à stabiliser la structure et à réduire également le *set recovery*. Ce dernier peut être davantage atténué en maintenant l’écartement des plateaux plus longtemps durant le post-traitement. Toutefois, le temps de relaxation ne doit pas être excessif, au risque de brûler partiellement le bois. Enfin, l’hydrolyse des hémicelluloses, induite par la combinaison de chaleur et de vapeur, participe également à la réduction du *set recovery*, en diminuant les interactions avec les autres polymères et la capacité du bois à réabsorber l’humidité [38, 39].

Le bois densifié ainsi obtenu présente une structure interne modifiée, ce qui soulève la question de son comportement face aux éléments de fixation, et en particulier aux vis.

2.3 Le vissage du bois

La solidité et la stabilité d’une structure reposent en grande partie sur les fixations qui maintiennent ses éléments ensemble. L’un des grands avantages du bois comme matériau de construction est la facilité avec laquelle on peut assembler des éléments à l’aide d’une grande variété de fixations : clous, pointes, vis, boulons, vis à bois, goujons, agrafes et connecteurs métalliques de différents types.

Cette étude analyse l'impact de la densification du bois sur son vissage, notamment avec l'utilisation de vis à bois. Cette section a donc pour objectif d'aborder les différents aspects du vissage, de ses enjeux à la résistance d'arrachement, en passant par les caractéristiques des vis et la dynamique du vissage.

2.3.1 Les enjeux du vissage

Le vissage dans le bois constitue une technique d'assemblage couramment utilisée en construction et en menuiserie, en raison de sa rapidité, de sa flexibilité et de sa capacité à fournir des fixations démontables ou permanentes selon les besoins. Toutefois, maîtriser le vissage ne se limite pas à insérer une vis dans une pièce : il s'agit d'un processus mécanique complexe influencé par les propriétés du matériau ainsi que par la géométrie de la vis, ce qui a des répercussions directes sur la performance des assemblages.

L'un des principaux défis du vissage est de garantir que les connexions puissent supporter suffisamment de charge dans toutes les directions malgré l'anisotropie du bois. Une vis bien choisie et bien posée doit résister aux efforts de traction, de cisaillement ou de flexion sans s'arracher ou casser. Par exemple, la résistance à l'arrachement d'une vis dépend beaucoup de la forme du filet, de l'angle du pas et de la façon dont les fibres du bois s'organisent autour d'elle [40]. Ces éléments influencent directement la capacité à supporter de fortes charges axiales sans risque de défaillance.

2.3.2 Typologie et caractéristiques techniques des vis

Pour mieux appréhender la suite de cette section, il est important de faire un point sur la nomenclature et les dimensions d'une vis. On peut voir sur la Figure 2.11 les différents éléments constituant une vis.

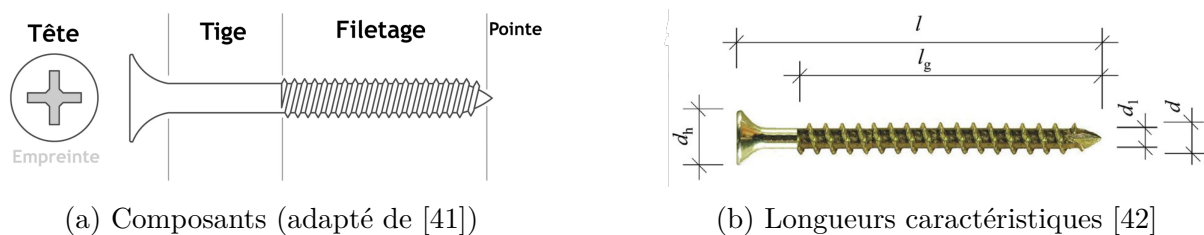


FIGURE 2.11 – Caractéristiques d'une vis

Parmi les différentes longueurs caractéristiques, d correspond au diamètre nominal, d_l est le diamètre du noyau de la vis, d_h le diamètre de la tête de vis, l la longueur de la vis et l_g la longueur du filetage.

Les empreintes de vis à bois ont aussi un rôle important pour transmettre le couple lors du vissage. Une représentation non exhaustive des principaux types d'empreintes

est présentée à la figure 2.12. Il y a eu historiquement plusieurs types d’empreintes de vis à bois, notamment la fente, le cruciforme de type Phillips et Pozidriv, ainsi que les empreintes carrées de type Robertson. Cependant, ces systèmes ont des limites, comme le phénomène de *cam-out*, où l’embout glisse hors de l’empreinte sous l’effet du couple, ce qui entraîne une usure de la tête de vis et une perte d’efficacité. Pour résoudre ces problèmes, l’empreinte Torx a été créée et améliore la surface de contact entre l’embout et la vis. Cette géométrie permet une transmission de couple plus élevée et réduit les risques de dérapage [43, 44]. L’empreinte Torx est donc très utilisée aujourd’hui dans les applications professionnelles comme la menuiserie, la construction bois et l’assemblage industriel, où la répétabilité et la fiabilité des fixations sont essentielles.



FIGURE 2.12 – Liste non exhaustive d’empreintes, de gauche à droite : fente, Phillips, Pozidriv, Robertson, Torx [43]

Les structures en bois évoluent depuis des années, et avec elles, les éléments de fixation tels que les vis évoluent aussi. On peut les classer en trois grandes catégories selon leur morphologie et leur mode d’action.

- Les vis à bois classiques (Fig. 2.13a) : Les vis à bois traditionnelles sont constituées d’une tige comprenant une partie filetée et une partie lisse, le diamètre extérieur du filetage étant généralement équivalent à celui de la tige. Elles sont définies par des normes nationales, telles que la norme *DIN 7998*. En pratique, la longueur de la partie filetée est inférieure à la longueur totale de la vis, représentant généralement environ 60 % de celle-ci. Pour des diamètres de tige supérieurs à 6 mm, un pré-perçage est souvent nécessaire, notamment en fonction de la densité du bois pour limiter les risques de fissuration. La capacité de charge axiale de ces vis est principalement limitée par la résistance à l’arrachement de la tête de la vis. [42]
- Les vis auto-taraudeuses (Fig. 2.13b) : Elles ont été développées pour repousser les limites de la capacité de charge des vis classiques. Contrairement à ces dernières, dont le filetage est obtenu en retirant de la matière à partir de la tige, les vis auto-taraudeuses sont fabriquées par laminage ou forgeage d’un fil-machine autour de la tige. Ce procédé permet d’obtenir une tige dont le diamètre est plus petit que celui du filetage extérieur. De plus, ces vis possèdent généralement un filetage sur toute leur longueur. Cela permet de mieux répartir les efforts entre la vis et le bois, et donc d’augmenter leur capacité de charge en traction axiale, qui est le type d’effort pour lequel elles sont conçues. On observe en général une augmentation de 10 %

de la résistance d'arrachement pour un même diamètre et une même longueur de filet. Le filetage est durci lors de la fabrication, ce qui améliore la résistance de la vis, notamment face à la flexion et à la torsion. Enfin, l'un des avantages des vis auto-taraudeuses est aussi qu'elles ne nécessitent pas de pré-perçage, à condition que la densité du bois ne soit pas trop élevée (550 kg/m^3). [16, 42]

- Les vis de structure (tirefond, Fig. 2.13c) : Elles sont destinées à des assemblages de plus grande dimension avec des sollicitations plus élevées. Elles présentent généralement un diamètre supérieur à celui des vis classiques, compris entre 5,1 et 25,4 mm. Ces vis ont une tête hexagonale et nécessitent un serrage à l'aide d'une clé ou d'une douille, contrairement aux vis traditionnelles qui nécessitent un tournevis. En raison de leur dimension, elles ont besoin d'un pré-perçage dont le diamètre varie généralement entre 40 et 85 % du diamètre nominal en fonction de la densité du bois afin de limiter les risques de fissuration lors de l'assemblage. [16, 45]

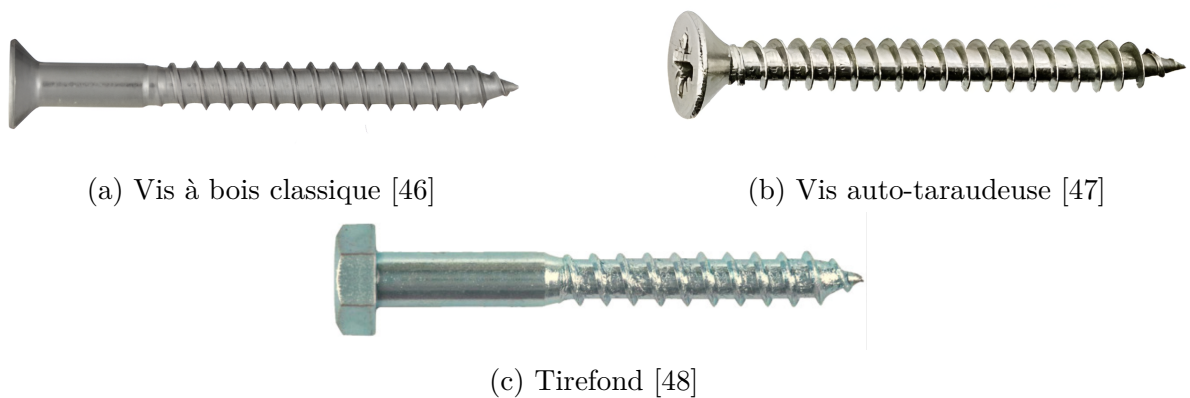


FIGURE 2.13 – Types de vis

Au-delà des dimensions et des types de vis, il est important de s'intéresser au matériau et au revêtement qui influencent la durabilité et les performances mécaniques. Parmi les solutions les plus courantes, on retrouve l'acier au carbone zingué, qui présente de bonnes propriétés mécaniques et un faible coût. Cependant, ce matériau est sensible à la corrosion. Deux types de corrosion peuvent être distingués : une corrosion atmosphérique, affectant la partie de la vis exposée à l'air, et une corrosion interne, se développant au sein du bois. Cette dernière peut être plus importante, notamment en conditions humides. En effet, certains constituants du bois, tels que les acides acétiques, contribuent à acidifier le bois en présence d'humidité (phénomène particulièrement marqué avec le chêne). À long terme, cette corrosion peut entraîner une dégradation des propriétés mécaniques des vis [49].

Pour pallier ces limitations, des vis en acier inoxydable sont également utilisées. Elles offrent une meilleure résistance à la corrosion, mais présentent en contrepartie une ductilité

plus élevée et un couple de rupture plus faible pour un diamètre donné. Ainsi, dans des bois de forte densité ou comportant des nœuds, ces vis sont plus susceptibles de se rompre [50].

Chaque matériau présente donc des avantages et des inconvénients, et le choix doit être effectué en fonction des conditions d'utilisation et des exigences de l'application.

2.3.3 Dynamique du vissage et processus d'insertion

Le vissage est un processus dynamique où le bois réagit en temps réel à l'insertion de la vis. La première interaction dépend de l'orientation de la structure cellulaire du bois, liée à son anisotropie. L'effort nécessaire pour insérer une vis et sa tenue finale varient selon l'angle des fibres. Un vissage à 90° , c'est-à-dire perpendiculaire aux fibres, est une référence de calcul. À mesure que la vis pénètre, elle cisaille localement les fibres et s'ancre dans le bois. On observe principalement un cisaillement longitudinal et, dans une moindre mesure, un cisaillement transversal. En revanche, pour un vissage à 0° (parallèle aux fibres), la vis tend davantage à écarter les fibres plutôt qu'à les cisailer [51, 52]. Ainsi, l'orientation des fibres détermine si la vis travaille principalement en cisaillement ou en écartement. Cette orientation joue également un rôle dans le couple d'insertion, celui-ci étant lié aux phénomènes de frottement, généralement plus élevés pour un vissage perpendiculaire aux fibres. Enfin, la résistance à l'arrachement diminue globalement avec la réduction de l'angle de vissage [16, 51, 52].

Une fois l'angle de vissage choisi, on peut s'intéresser au couple d'insertion. Ce couple correspond au moment de force nécessaire pour faire progresser la vis dans le matériau et dépend à la fois de la géométrie de la vis (diamètre, pas, angle de filet), des propriétés du bois (densité, humidité, orientation des fibres) et des conditions de contact. Le vissage peut être interprété en plusieurs phases successives. La première phase correspond à l'amorçage, durant lequel la pointe de la vis pénètre le bois. Cette phase est généralement associée à un pic initial de couple. La deuxième phase est celle de pénétration stable, où le couple tend à se stabiliser s'il n'y a pas de singularité. La vis progresse alors de manière quasi uniforme [53]. Enfin, une troisième phase apparaît lors de l'approche de la tête de vis au contact de la surface : le couple augmente fortement en raison de la compression des fibres et de l'augmentation des surfaces de contact. Au-delà de cette phase, les fibres se brisent et la vis perd en tenue mécanique [54]. L'évolution typique du couple lors d'un vissage est présentée à la Figure 2.14.

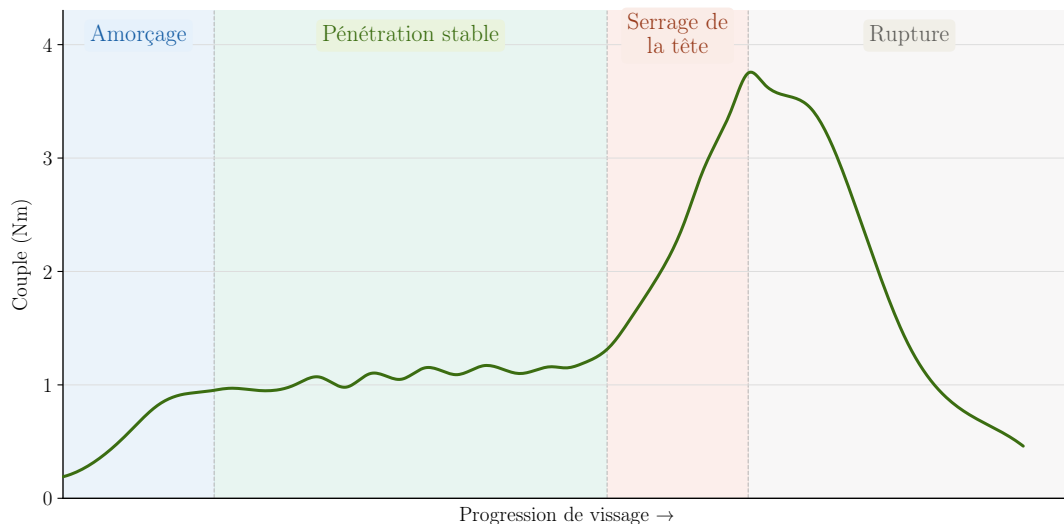


FIGURE 2.14 – Évolution typique du couple lors du vissage dans le bois (basé sur [53, 54]). La valeur du couple dépend de plusieurs paramètres tels que la densité ou le diamètre de la vis.

Le rôle du frottement est central dans ces différentes phases. Il intervient à deux niveaux principaux : d'une part entre les filets de la vis et les fibres du bois, et d'autre part sous la tête de la vis lors du serrage final. Le frottement le long des filets contribue de manière significative au couple d'insertion et dépend du coefficient de frottement bois-acier, influencé par l'humidité et la densité du bois.

La vitesse de rotation peut également influencer la dynamique du vissage. Le coefficient de frottement varie peu avec la vitesse pour des bois présentant un faible taux d'humidité ($< 20\%$). En revanche, lorsque cette teneur en eau est élevée, le coefficient de frottement diminue significativement avec l'augmentation de la vitesse de rotation [16, 18]. L'humidité agit comme un lubrifiant qui facilite l'insertion de la vis. D'un autre côté, une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une plus grande dissipation de chaleur au niveau de l'interface vis – bois. Cette élévation de température peut ramollir les polymères du bois, en particulier de la lignine, ce qui contribue également à réduire la résistance au vissage.

2.3.4 Résistance à l'arrachement des vis

La résistance à l'arrachement des vis dans le bois correspond à la capacité d'un assemblage à reprendre des efforts de traction axiale. Ce mécanisme repose principalement sur l'interaction combinée entre les filets de la vis et les fibres du bois et des phénomènes de cisaillement locaux. Elle est déterminée par les propriétés du bois, et principalement sa densité, mais aussi les paramètres géométriques du filetage (diamètre extérieur, diamètre intérieur, pas, angle de filetage et profondeur de filet) [16, 55].

Dans le cadre du dimensionnement, la résistance caractéristique à l'arrachement des vis est généralement évaluée à l'aide de formulations empiriques issues de l'Eurocode 5². Cette norme propose une expression de la résistance axiale basée sur la densité du bois, le diamètre de la vis et la longueur d'ancrage effective, pour un vissage à 90°. Cette force s'exprime comme

$$F_{max} = f_{ax} d l_d \quad (2.5)$$

où f_{ax} représente la résistance caractéristique à l'arrachement par unité de surface, d le diamètre de la vis et l_d la longueur d'ancrage dans le bois. La dépendance à la densité du bois est implicitement intégrée dans la valeur caractéristique f_{ax} , issue de calibrations expérimentales. Il existe des formules plus complètes, intégrant l'angle d'insertion de la vis s'il n'est pas perpendiculaire aux fibres.

Une fois l'arrachement effectué, plusieurs modes de rupture peuvent être observés. Le mode le plus courant correspond à une rupture progressive lors de l'extraction de la vis, associée à un cisaillement transversal des fibres le long des filets. Par ailleurs, une rupture peut également intervenir au niveau de la vis elle-même, par traction de l'acier dans la vis ou par arrachement au niveau de la tête. Ces modes de ruptures sont plus rares et généralement associés à des sollicitations excessives ou à des défauts matériels [56].

2.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'aborder point par point les différents éléments nécessaires pour placer cette étude dans son contexte scientifique.

Le bois apparaît comme un matériau assez complexe. Il est caractérisé par une structure anisotrope et des propriétés physiques et mécaniques fortement dépendantes de paramètres tels que la masse volumique, la teneur en humidité ou encore la température. Parmi les essences étudiées, le peuplier présente des propriétés mécaniques relativement faibles. Afin d'en améliorer les performances, il peut être densifié puis comparé à du bouleau présentant une densité équivalente.

Depuis plusieurs années, la densification du bois est étudiée et plusieurs procédés sont possibles. Après une revue des méthodes existantes, la densification thermo-hygro-mécanique constitue une approche pertinente, combinant chaleur, humidité et pression mécanique pour modifier durablement la structure du matériau tout en limitant des retours de forme.

Une fois le bois densifié, l'étude du vissage devient essentielle pour évaluer son aptitude à être utilisé dans des assemblages. Le vissage s'avère être un procédé complexe et dynamique qui dépend à la fois des caractéristiques de la vis et des propriétés intrinsèques du bois.

2. Norme européenne de dimensionnement des structures en bois (NF EN 1995).

Chapitre 3

Matériaux et méthodes

Le contexte scientifique ayant été présenté, ce chapitre vise désormais à décrire le matériel utilisé ainsi que les différents moyens et méthodes mis en œuvre pour réaliser les essais expérimentaux. Les résultats obtenus seront exposés et discutés dans les chapitres suivants. Afin d'étudier l'impact de la densification sur le comportement du bois face au vissage, ce chapitre abordera successivement la méthode de densification retenue, l'analyse du couple de vissage au moyen d'un dispositif expérimental spécialement conçu pour ce travail, ainsi que la méthode de tomographie et celle pour l'extraction de vis. Au préalable, une brève présentation des échantillons de bois et de la visserie utilisée sera proposée.

3.1 Échantillons et visserie

Cette section présente les caractéristiques des différentes éprouvettes de bois et de la visserie retenues.

3.1.1 Échantillons de bois

Pour les différents tests réalisés, des échantillons de peuplier et de bouleau ont été utilisés. Ces échantillons proviennent de poutres ayant préalablement été soumises à des essais en flexion. Seules les extrémités de ces poutres, non affectées par les sollicitations lors des essais initiaux, ont été utilisées pour la préparation des éprouvettes. Celles-ci ont été usinées aux dimensions de 100 x 50 x 50 mm (Fig. 3.1a). Ces dimensions ont été définies selon la norme *NBN EN 15737 - Force de torsion et résistance au vissage* [57], afin de permettre l'analyse du couple de vissage pour des vis d'un diamètre allant jusqu'à 5 mm.

Certains échantillons de peuplier ont ensuite été densifiés dans la direction radiale¹, avec les fibres orientées selon la longueur de l'éprouvette. Ces échantillons ont donc une épaisseur variable suite au procédé de densification (Fig. 3.1b). L'objectif de cette étape était d'obtenir une densité comparable à celle des échantillons de bouleau. La densité moyenne des échantillons de bouleau étudiés est de $640,09 (\pm 13,33) \text{ kg/m}^3$, tandis que celle des échantillons de peuplier densifiés est de $627,65 (\pm 28,3) \text{ kg/m}^3$. Les échantillons de peuplier non densifiés ont quant à eux une densité de $424,76 (\pm 39,9) \text{ kg/m}^3$.

L'ensemble des caractéristiques des échantillons étudiés est présenté en annexe A.1.

3.1.2 Visserie

Concernant la visserie, des vis auto-taraudeuses en acier inoxydable de type V2A ont été utilisées (Fig. 3.1c). Elles ont des diamètres de 3, 4 et 5 mm, avec un pas de 2 mm, excepté les vis d'un diamètre de 3 mm qui ont un pas de 1,2 mm.

Toutes les vis ont une longueur totale de 30 mm et sont filetées sur 20 mm. Cette partie filetée est destinée à être engagée dans le bois, tandis que la partie non filetée reste en dehors de l'échantillon, notamment pour les essais en traction. Les vis utilisées sont à tête fraisée et disposent d'un entraînement de type Torx, ce qui permet d'assurer une meilleure transmission du couple lors du vissage [44].

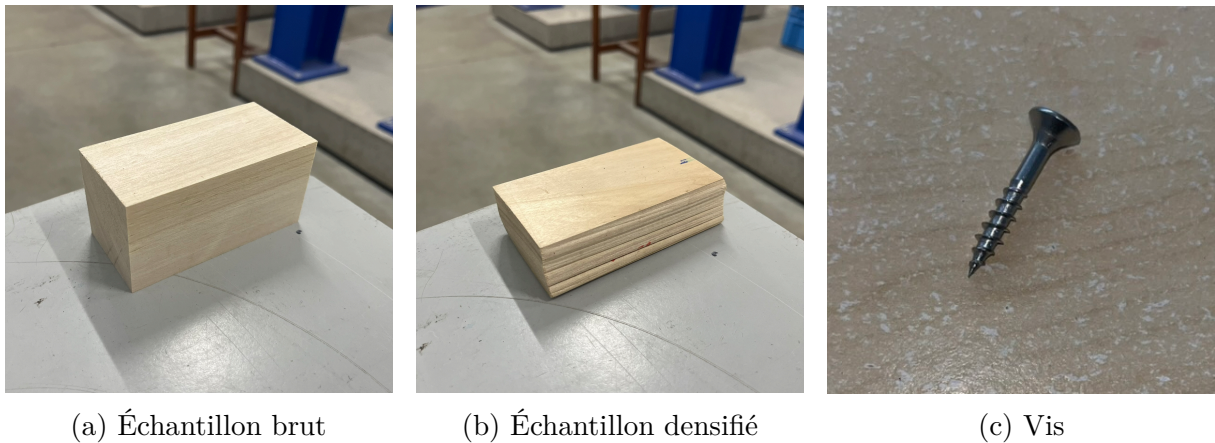


FIGURE 3.1 – Échantillons de bois et visserie utilisés pour la réalisation de ce travail

1. Les échantillons ont été sélectionnés de manière à ce que la direction de densification soit la plus proche possible de la direction radiale. Toutefois, en raison de l'hétérogénéité naturelle de la structure du bois, certains présentent un angle entre les cernes et l'axe de densification. Ces échantillons ne sont donc pas densifiés strictement selon la direction radiale. Les détails de ces angles de cerne sont repris dans l'annexe A.1

3.2 Densification du bois

Le procédé choisi pour la densification du bois combine vapeur d'eau, chaleur et contrainte mécanique. Il repose sur des techniques décrites dans la littérature et sur des précédents travaux réalisés à l'UCLouvain et se déroule en 4 phases : le pré-traitement, la densification, la relaxation et le retour aux conditions ambiantes. Cette section a pour but de décrire chacune des étapes de ce procédé de densification utilisé.

3.2.1 Pré-traitement

Avant l'étape de densification, le bois subit un pré-traitement. Les échantillons sont soumis à une température élevée combinée à un fort taux d'humidité. L'objectif de cette phase est d'amener le matériau à une température supérieure à sa température de transition vitreuse (T_g). Au-delà de cette température, qui dépend de l'humidité, le bois passe d'un état vitreux à un état plus caoutchouteux et élastique, ce qui modifie le module d'élasticité et ramollit la matière [34]. Ce comportement facilite sa mise en forme et limite les risques de fissuration lors de la densification.

La combinaison d'une température élevée à un haut taux d'humidité s'explique par le fait que la température de transition vitreuse des différents polymères du bois dépend de leur teneur en eau. Comme illustré à la Figure 3.2, un taux d'humidité plus élevé permet d'atteindre la transition vitreuse pour des températures plus faibles [34].

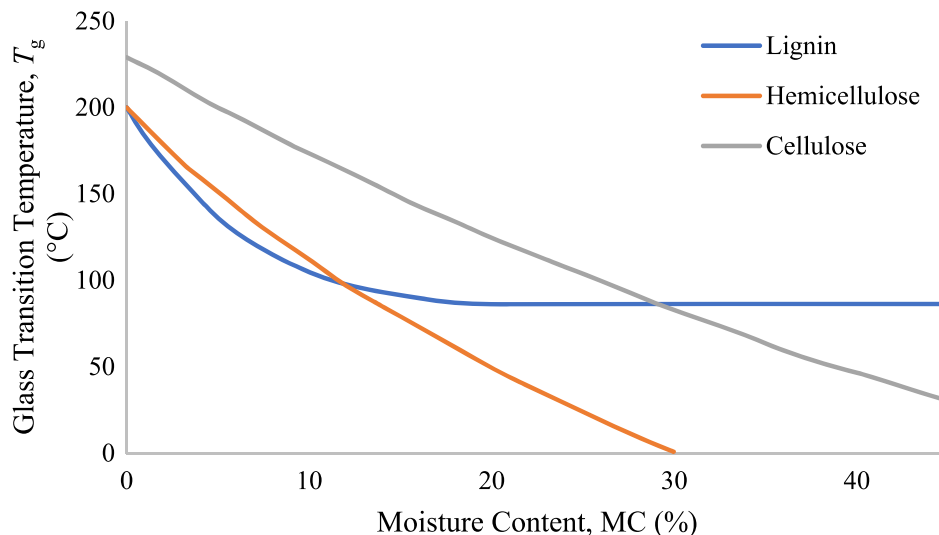


FIGURE 3.2 – Température de transition vitreuse des polymères du bois en fonction du taux d'humidité [34]

Concrètement, les échantillons ont été pré-traités dans une enceinte climatique *Weiss-Technik WKL 34L* (Figure 3.3a) à une température de 95 °C et une humidité relative

de 95 %. Afin d'assurer une teneur en eau homogène et stable, les échantillons ont été maintenus dans ces conditions pendant 24 heures. Par ailleurs, après chaque ouverture de l'enceinte pour extraire un échantillon en vue de sa densification, un délai de 45 minutes a été respecté afin de permettre le rétablissement des conditions climatiques initiales.

La teneur en eau des échantillons, disponible dans l'annexe A.2, a été déterminée immédiatement après leur sortie de l'enceinte climatique, en s'appuyant sur la différence de masse par rapport à leur état anhydre. Pour obtenir cette masse à sec, 3 échantillons de chaque essence ont été séchés à 103°C pendant 24 heures pour extraire leur teneur en eau. Ceci a permis de connaître l'humidité ambiante des échantillons après leur usinage, et donc d'estimer la masse à sec de tous les échantillons.

3.2.2 Densification et relaxation

Une fois le pré-traitement effectué, les échantillons peuvent être densifiés. Cette étape constitue la phase principale du procédé et est réalisée à l'aide de la machine *Zwick/Roell Z250*. Celle-ci est équipée de deux plateaux circulaires, dont le plateau supérieur est fixe tandis que le plateau inférieur est mobile et contrôlé avec précision. Une étuve climatique entoure l'ensemble afin de maintenir une température constante durant le procédé.



(a) Enceinte climatique



(b) Presse

FIGURE 3.3 – Dispositifs expérimentaux pour les densifications réalisées

Avant le traitement, l'étuve est préchauffée à 200 °C pour atteindre la température de transition vitreuse de tous les polymères du bois (Fig. 3.2). Cette température est maintenue tout au long des densifications. Les échantillons sont sortis un à un de leur enceinte de pré-traitement, rapidement pesés afin de déterminer leur teneur en eau, puis immédiatement placés dans la presse. Ils sont positionnés manuellement au centre des plateaux,

sans matrice pour les maintenir en position. L'étuve est ensuite refermée, les plateaux sont rapprochés manuellement jusqu'à une distance d'environ 1 mm de l'échantillon, puis la séquence de densification est lancée. Une fois le niveau de compression atteint, les plateaux maintiennent leur position pendant 300 secondes afin de permettre la relaxation des contraintes internes et de limiter le retour viscoélastique des échantillons.

Lors de la densification, le bois accumule des contraintes et peut claquer lorsque celles-ci deviennent trop importantes. Afin de limiter ce phénomène, la vitesse de compression a été ajustée au cours des essais. Tout échantillon présentant un claquage a été écarté de l'étude. Par ailleurs, l'écartement final des plateaux, impactant le ratio de compression, a été adapté afin d'obtenir des densités proches de celles du bouleau. L'ensemble des paramètres de densification utilisés est présenté en annexe A.2.

La Figure 3.4 illustre une courbe typique de l'évolution des contraintes lors d'une densification effectuée en laboratoire pour cette étude. Pour cet échantillon, la vitesse de compression a été fixée à 20 mm/min. Une fois le niveau de compression cible atteint, les plateaux maintiennent leur position et l'échantillon entre dans une phase de post-traitement pendant 300 secondes. Après ce délai, les plateaux s'écartent avec une vitesse de déchargement de 5 mm/min. et l'échantillon est libéré.

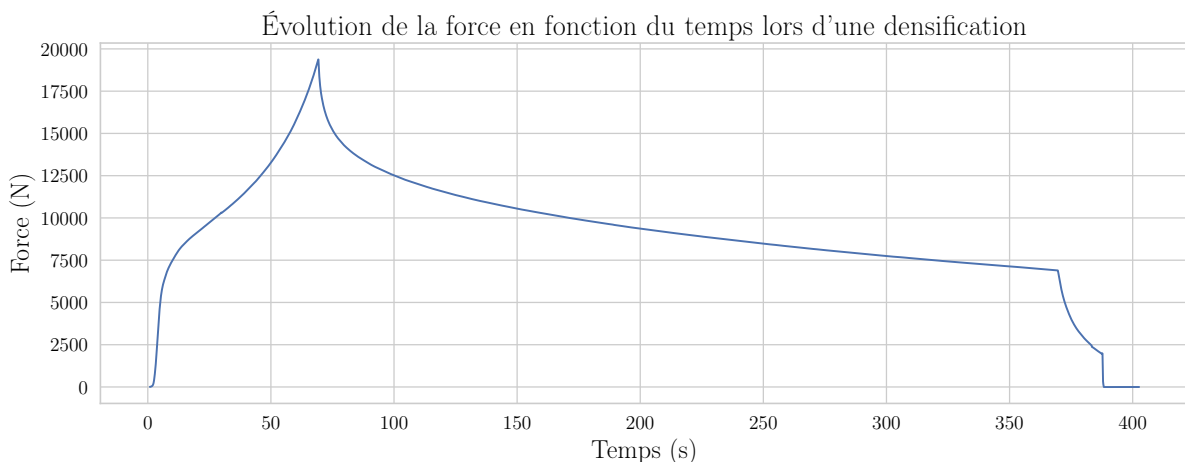


FIGURE 3.4 – Évolution de la force lors d'une densification complète réalisée pour ce travail, avec une vitesse de compression de 20 mm/min., un temps de relaxation de 300 secondes et une vitesse de déchargement de 5 mm/min.

3.2.3 Retour aux conditions ambiantes

Une fois sortis de la presse, les échantillons sont placés dans une chambre climatique afin d'atteindre un état d'équilibre proche des conditions standards, correspondant à une teneur en eau d'environ 12 %. Cette chambre est maintenue à une température de 20 °C et à une humidité relative de 70 (± 5) %.

Un suivi régulier de la masse a été réalisé afin de vérifier le bon conditionnement des échantillons après densification. Cette étape est essentielle pour assurer la reproductibilité, la normalisation et la comparabilité des essais réalisés par la suite dans cette étude.

Une fois les échantillons densifiés et conditionnés, les essais de vissage peuvent être menés. Ceux-ci nécessitent un dispositif spécifique, présenté dans la section suivante.

3.3 Conception d'un dispositif de vissage instrumenté

Parmi les différentes méthodes expérimentales, l'une d'entre elles consiste à mesurer le couple d'insertion. Pour ce faire, un dispositif expérimental spécifique a été développé. Cette section présente l'ensemble des aspects liés à ce dispositif, depuis sa conception jusqu'à sa caractérisation ainsi que la méthode d'insertion des vis et la mesure du couple.

3.3.1 Objectifs du dispositif

Afin d'analyser le couple d'insertion ainsi que les phénomènes d'endommagement, il est nécessaire de garantir des conditions de vissage strictement identiques. Ce besoin a conduit au développement du dispositif expérimental, dont l'objectif est d'assurer une méthode d'insertion reproductible, associée à une vitesse de rotation contrôlée et constante.

Par ailleurs, un capteur de couple a été intégré au dispositif pour mesurer la résistance à la rotation de la vis pendant le vissage. Cette grandeur constitue un indicateur intéressant sur les efforts internes développés dans le bois. Ceci permet ainsi de mieux caractériser le comportement mécanique et d'évaluer les différences entre les configurations étudiées.

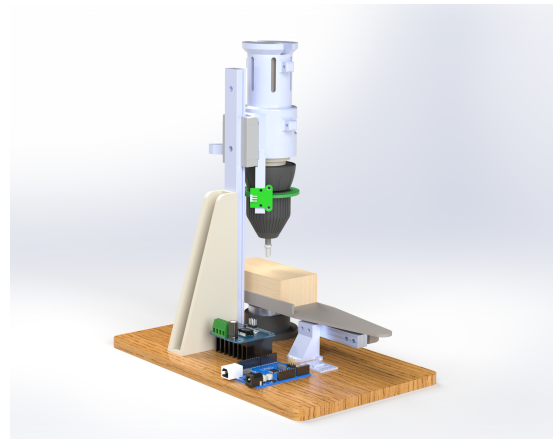
3.3.2 Développement et caractérisation

Le dispositif a été construit sur une base de visseuse existante (Bosch PSR 12 VES-2). Cette dernière a été démontée et adaptée pour ensuite s'assembler dans un montage qui respecte les besoins pour les différents vissages. La conception s'est basée sur la norme *NBN EN 15737 - Force de torsion et résistance au vissage* [57]. Quelques adaptations ont cependant été effectuées et seront détaillées dans les sections suivantes.

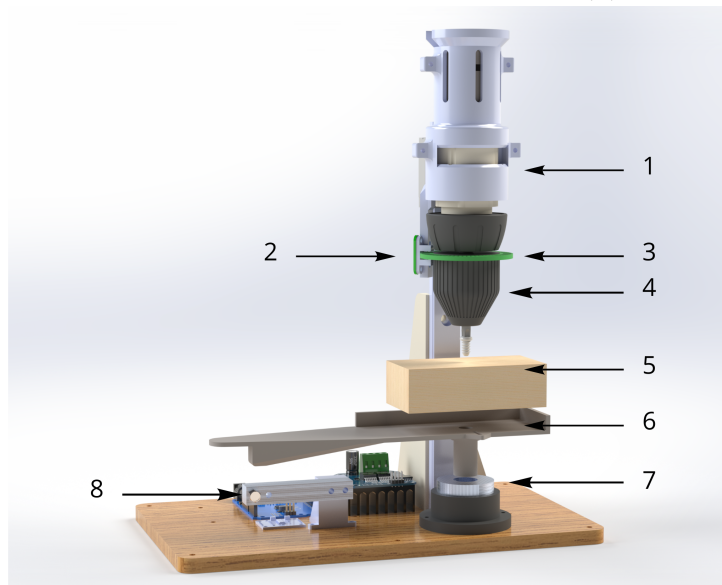
Différentes vues du dispositif sont détaillées sur la Figure 3.5. Par souci de clarté, seuls les rendus 3D sont présentés dans ce chapitre. Le dispositif de vissage expérimental réel est visible en annexe B.1.



(a) Vue de face



(b) Vue de derrière



(c) Vue éclatée

FIGURE 3.5 – Conception du dispositif de vissage

L'image 3.5c détaille les différents composants du dispositif. On y retrouve :

- 1 : le bloc moteur-réducteur de la visseuse d'origine
- 2 : un encodeur photoélectrique pour la mesure de la vitesse
- 3 : une roue codeuse nécessaire à l'encodeur photoélectrique pour compter les tours
- 4 : le mandrin de la visseuse d'origine
- 5 : l'échantillon de bois, surmonté de la vis
- 6 : un plateau tournant pour mesurer le couple de réaction
- 7 : roulements à rouleaux coniques pour assurer la rotation tout en supportant la force axiale lors du vissage
- 8 : le capteur de force qui permettra la mesure du couple

Mesure du couple

Le principal objectif du dispositif de vissage est de mesurer le couple lors de l'insertion de la vis dans l'échantillon. Cette mesure fournit un premier aperçu de l'influence de la densification du bois sur son comportement mécanique.

En effet, le couple enregistré traduit la résistance à la rotation de la vis, résultant de phénomènes de frottement entre le filet et les fibres, du serrage et du cisaillement des fibres, ainsi que de la compression locale du bois autour de la vis. Ainsi, l'évolution du couple au cours du vissage permet d'appréhender les efforts internes locaux dans le bois.

Pour la mise en place de cette mesure, la norme *NBN EN 15737* [57] recommande l'utilisation d'un capteur de couple intégré directement dans le mandrin de la visseuse afin de mesurer le couple appliqué. Toutefois, en raison du coût élevé de ce type d'équipement, il a été décidé d'opter pour une méthode alternative reposant sur l'utilisation d'un capteur de force permettant de déterminer le couple de réaction.

L'échantillon de bois est fixé sur un plateau avec un unique degré de liberté : une rotation autour d'un axe coaxial à celui de la vis. Lors du vissage, le plateau tend à pivoter sous l'effet du couple transmis. Il vient alors en appui contre un capteur de force positionné à une distance connue de l'axe de rotation. Le capteur de force étant rigide, le plateau est en pratique immobile et transmet au capteur une force proportionnelle au couple exercé.

Connaissant la distance entre l'axe de rotation et le point d'application de la force (0,15 m), le couple de réaction peut être déterminé à partir de la relation :

$$T = F \cdot d \quad (3.1)$$

où T représente le couple, F la force mesurée et d le bras de levier.

Afin d'assurer une rigidité mécanique suffisante du capteur de force, de limiter les mouvements parasites et de garantir une mesure continue avec une bonne précision, il a été choisi d'utiliser une cellule de charge à poutre de flexion munie de jauges de contrainte. Ce type de capteur est présenté à la Figure 3.6. Plus de détails techniques sur le fonctionnement et l'implémentation de ce capteur sont fournis dans l'annexe B.2.

Chaque capteur de force présente des variations intrinsèques dues à sa conception. Par conséquent, il n'existe pas de relation universelle pour convertir directement le signal électrique en force. Il est donc indispensable de faire une calibration dans la configuration expérimentale utilisée, afin d'établir une relation fiable entre le signal mesuré et la force

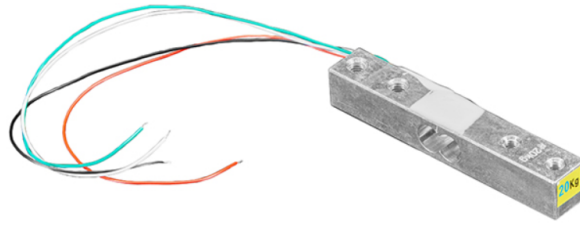


FIGURE 3.6 – Capteur de force sous forme de cellule de charge à poutre

appliquée.

La procédure de calibration s’est déroulée en deux étapes. D’abord, le signal de sortie a été mesuré à vide pour effectuer la tare et définir le niveau du signal de référence. Ensuite, une masse connue de 500g a été appliquée pour déterminer le coefficient permettant d’établir une relation linéaire entre la masse appliquée et le signal de sortie mesuré.

Une fois cette relation déterminée, elle a été validée à l’aide de plusieurs objets de masse connue, préalablement vérifiée à l’aide d’une balance de précision. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 3.7 et mettent en évidence une erreur de mesure de 0.175 % en moyenne avec une erreur maximale de 0.732 %. Le Tableau 3.1 détaille les valeurs exactes.

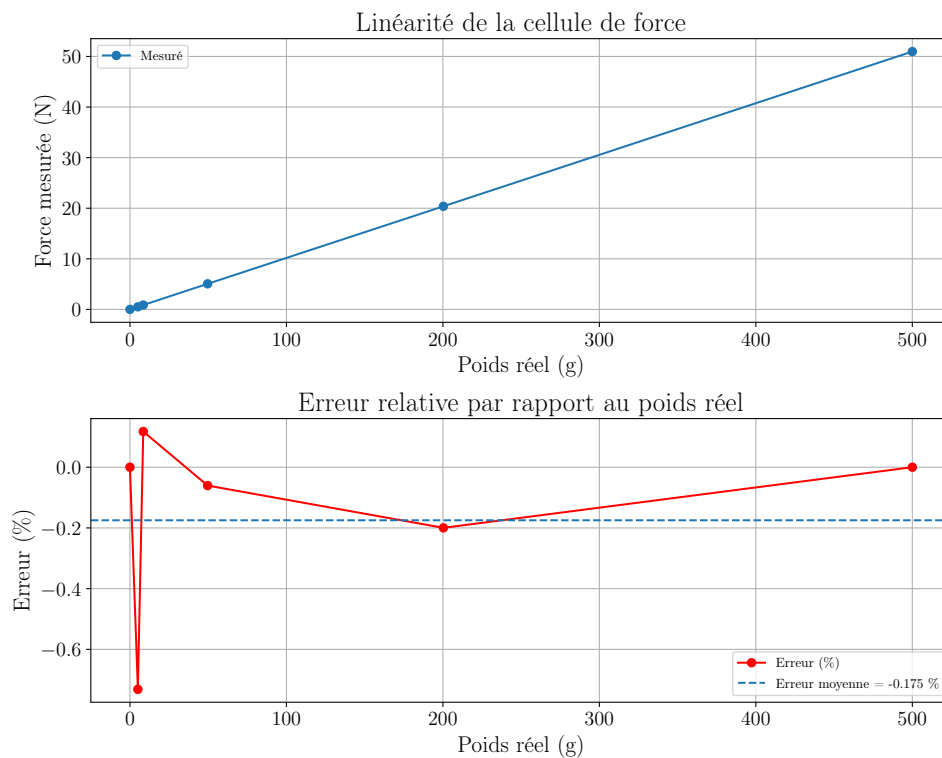


FIGURE 3.7 – Linéarité et erreur de la cellule de force

Réel (g)	Mesuré (g)	Erreur (g)	Erreur (%)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.057	5.020	-0.037	-0.732
8.500	8.510	0.010	0.118
49.630	49.600	-0.030	-0.060
200.320	199.920	-0.400	-0.200
500.000	500.000	0.000	0.000

TABLE 3.1 – Erreurs de mesure de la cellule de force

Bien que l’erreur relative sur la force mesurée soit inférieure à 1 %, conformément aux recommandations de la norme *NBN EN 15737* [57], il convient de rappeler que la détermination du couple repose également sur le bras de levier entre l’axe de rotation de la vis et le capteur. Dès lors, toute déformation des éléments mécaniques intervenant dans la transmission de l’effort est susceptible d’introduire une erreur supplémentaire sur le calcul du couple.

L’alignement des différentes pièces ainsi que la coaxialité entre l’axe de rotation du plateau et celui de la vis ont servi de point de départ lors de la conception assistée par ordinateur (CAO). De plus, les perçages destinés à l’assemblage des composants sur une base commune ont été réalisés à l’aide d’une découpeuse laser afin de limiter les imprécisions géométriques et de réduire les risques d’erreurs mécaniques. Néanmoins, malgré ces précautions, une déformation des pièces lors du vissage reste possible et peut affecter la précision globale de la mesure.

L’objectif du dispositif étant de permettre des comparaisons entre différents vissages dans différents échantillons, cette incertitude sur l’erreur n’est pas critique. L’erreur introduite par les déformations mécaniques sera identique pour chaque essai et n’influencera donc pas les résultats de la comparaison.

Contrôle de la vitesse

Un contrôle de la vitesse de vissage a également été mis en place afin de garantir des conditions expérimentales uniformes pour tous les échantillons, indépendamment de leur densité ou de leur structure interne.

La vitesse de référence lors de l’implémentation du système a été fixée arbitrairement à 60 rotations par minute, tout en respectant la norme *NBN EN 15737* [57], qui stipule que la vitesse de rotation ne doit pas excéder 100 rotations par minute.

Le dispositif de vissage reposant sur une visseuse démontée, aucun arbre de rota-

tion n'était directement accessible pour l'installation d'un encodeur conventionnel. Pour contourner cette contrainte, une roue codeuse a été conçue et imprimée en 3D, puis fixée sur le mandrin de la visseuse. Cette roue comporte 60 encoches régulièrement réparties.

La détection du mouvement est assurée par un encodeur photoélectrique de type HC-020K, composé d'un émetteur infrarouge et d'un récepteur. Lorsqu'une encoche se trouve entre l'émetteur et le récepteur, le faisceau infrarouge est transmis. En revanche, lorsqu'une portion pleine de la roue interrompt le faisceau, le signal reçu est coupé. Chaque passage d'encoche génère ainsi une variation du signal électrique.

Étant donné qu'il y a 60 encoches, un tour complet produit 120 changements d'état (passage lumière/obstruction), correspondant aux fronts montants et descendants du signal. En comptant le nombre de transitions sur un intervalle de temps donné, il est alors possible de déterminer la vitesse de rotation. Plus de détails sur la mise en place de la mesure et du contrôle de la vitesse sont présentés dans l'annexe B.3.

Un essai sur un vissage complet dans un échantillon de test de peuplier a été effectué pour analyser l'efficacité du système. L'évolution de la vitesse est visible sur la Figure 3.8. On peut observer que le système parvient à maintenir une vitesse de consigne quasi-constante autour de 60 rotations par minute. On observe également une petite erreur variable pendant le vissage. Cependant, la tendance du système est stable et parvient à trouver un équilibre autour de la vitesse de consigne.

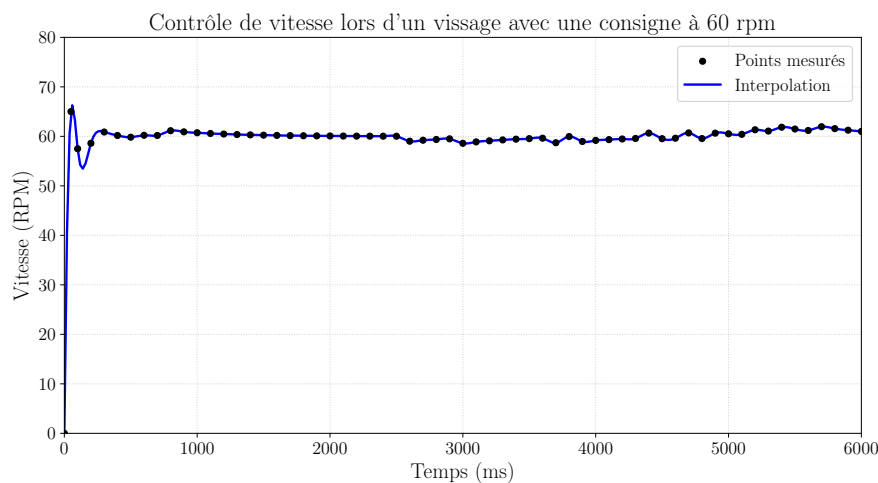


FIGURE 3.8 – Évolution de la vitesse lors d'un vissage avec une vitesse de consigne de 60 rpm

3.3.3 Applications et limites

Ce dispositif de vissage permet donc de mesurer le couple d'insertion avec une vitesse de rotation déterminée. La conception s'est basée sur la norme *NBN EN 15737* [57], tout en intégrant certaines adaptations imposées par des contraintes techniques. Ainsi, un capteur de force a été utilisé pour estimer le couple de réaction, en remplacement d'un capteur de moment directement intégré au mandrin. De plus, la mesure du déplacement vertical demandée par la norme n'a pas été implémentée en raison de la complexité associée à l'obtention de la précision requise. La profondeur de pénétration peut alors être approximée à partir du nombre de rotations et le pas de la vis.

Par ailleurs, le dispositif de vissage présente d'autres limites. Outre une possible incertitude sur la mesure du couple liée aux déformations mécaniques, une variation de la température lors de l'essai peut influencer le résultat. En effet, la variation de température peut entraîner la dilatation de la cellule de charge, affectant ainsi la réponse sur la mesure de la force (en particulier la réponse des jauges de contraintes, détaillées dans l'annexe B.2). Enfin, la puissance limitée de la visseuse ne permet pas d'atteindre simultanément des vitesses de rotation élevées et des couples importants. Pour garantir un couple suffisant, les tests réalisés dans le prochain chapitre seront limités à 150 rotations par minute.

3.3.4 Méthode d'insertion des vis et mesure du couple

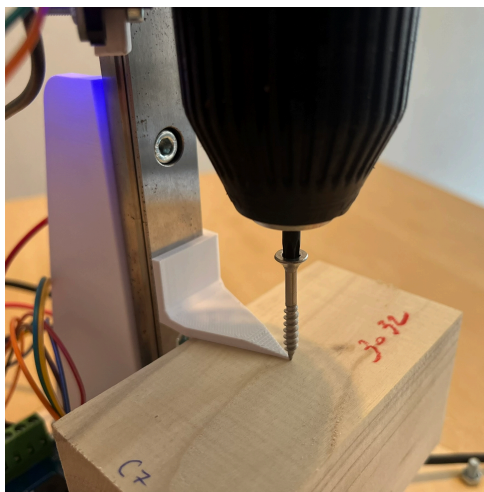
Avant de procéder à l'insertion des vis, il est nécessaire de conditionner les échantillons pour atteindre un équilibre hygroscopique dans des conditions connues. Comme expliqué dans la section 2.3.3, la teneur en eau du bois peut avoir une influence sur sa dynamique de vissage. Conditionner tous les échantillons de la même manière est donc essentiel pour garantir la comparabilité des résultats. La norme recommande un conditionnement à une température de $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 (\pm 5) \%$, correspondant à une teneur en eau d'environ 12 %. Dans cette étude, les échantillons ont été conservés plusieurs jours dans une chambre régulée à $20 ^\circ\text{C}$ et $70 (\pm 5) \%$ d'humidité relative. Un suivi de masse a été réalisé afin de vérifier l'atteinte du conditionnement, celui-ci étant considéré comme atteint lorsque deux pesées espacées de 6 heures ne diffèrent pas de plus de 0,1 % [57].

Au vu des vis sélectionnées (diamètre inférieur à 6mm et usage de vis auto-taraudeuses) aucun pré-perçage n'a été réalisé avant l'opération de vissage [16, 42]. Le protocole expérimental a privilégié l'utilisation de vis de différents diamètres pour évaluer les contraintes générées lors de l'insertion dans le bois. En effet, l'augmentation du diamètre de la vis entraîne un écartement plus important des fibres, phénomène pouvant être rapproché

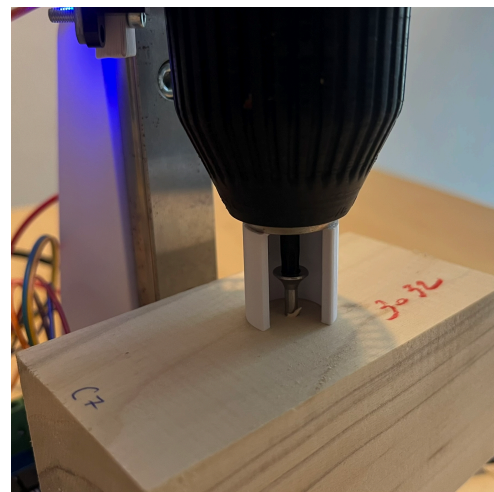
de l'effet observé lors d'un vissage sans pré-perçage. Ainsi, la variation du diamètre des vis a été choisie comme paramètre et permet d'explorer certaines contraintes mécaniques analogues à celles influencées par le pré-perçage.

Afin de garantir une insertion perpendiculaire aux fibres ainsi qu'un bon alignement avec le dispositif de vissage, un guide sur mesure amovible a été imprimé en 3D (Fig. 3.9a). Celui-ci permet de positionner précisément la pointe de la vis à l'endroit souhaité pour assurer un axe d'insertion optimal.

Concernant la gestion de la profondeur d'insertion, il n'est pas suffisant de se baser uniquement sur l'encodeur. En effet, quelques rotations « à vide » peuvent se produire avant que la pointe de la vis n'accroche le bois et ne commence réellement à pénétrer. Ce phénomène peut alors engendrer une erreur sur la profondeur finale souhaitée. Afin de pallier ce problème, une pièce simple (Fig. 3.9b) a été conçue pour créer une butée mécanique qui garantit une profondeur d'insertion constante de 20 mm pour l'ensemble des échantillons. Cette méthode a fourni des échantillons avec une profondeur d'insertion moyenne de $19,58 (\pm 0,31)$ mm.



(a) Guide d'insertion



(b) Butée mécanique

FIGURE 3.9 – Éléments d'aide à l'insertion des vis

Une fois tous les éléments en place, le programme peut être lancé. Le vissage démarre et enregistre simultanément le couple lors de l'insertion.

3.4 Tomographie

Dans le cadre de cette étude, l'endommagement interne du bois suite au vissage doit également être pris en considération. Afin de visualiser et d'analyser d'éventuelles fissures, un tomographe a été utilisé. Il s'agit de l'appareil *RX Solutions EasyTom S150*, fonction-

nant à l'aide de rayons X produits par une source de cuivre. La génération des rayons X dépend du choix de la source ainsi que des conditions d'accélération des électrons. Plus de détails sur les principes de génération de rayons X sont présentés dans l'annexe D.

Les échantillons de bois sont placés sur un axe rotatif, puis une acquisition aux rayons X est réalisée sous différents angles. Cette méthode permet ensuite de reconstruire numériquement l'échantillon en trois dimensions et d'en observer la structure interne dans toutes les directions. La distance entre l'axe de rotation et la source définit le champ de vue et la résolution. Un objet placé à proximité de la source aura une meilleure résolution mais le champ de vue observable sera alors plus limité. À l'inverse, lorsqu'il est positionné plus loin de la source, le champ de vue augmente au détriment de la résolution.

Pour toutes les acquisitions au tomographe, une tension d'accélération de 80 kV , un courant de 375 μA et un filtre en aluminium ont été utilisés. Les échantillons ont été placés de sorte à avoir une vision suffisante autour de la vis (~ 2 cm de part et d'autre de la tige) permettant d'obtenir une résolution de 22 μm par voxel². En raison de la différence importante de densité entre les vis en acier et le bois, de nombreux artefacts apparaissent autour de la vis lors de l'acquisition tomographique. Une correction numérique a donc été appliquée afin d'atténuer ces effets et d'améliorer la qualité des reconstructions obtenues.

Une fois l'acquisition réalisée par le tomographe, une reconstruction numérique en 3 dimensions de l'échantillon est effectuée. Il devient alors possible de naviguer au sein du volume reconstruit selon les différents plans (XY, XZ, YZ) afin d'identifier d'éventuelles fissures. Cette analyse repose sur une exploration dynamique du volume, où le déplacement virtuel à l'intérieur de l'échantillon facilite l'observation de sa structure interne. Par conséquent, la restitution de ces observations dans ce document écrit est limitée.

Les fissures sont identifiées grâce à des variations locales de densité, qui se traduisent par des contrastes distincts sur les images reconstruites. À titre d'exemple, trois coupes d'un échantillon présentant des fissures (échantillon densifié avec insertion d'une vis de 4mm à 50 rpm) sont présentées à la Figure 3.10, où une fissure est mise en évidence (entourée en rouge).

2. Équivalent tridimensionnel d'un pixel en 2D

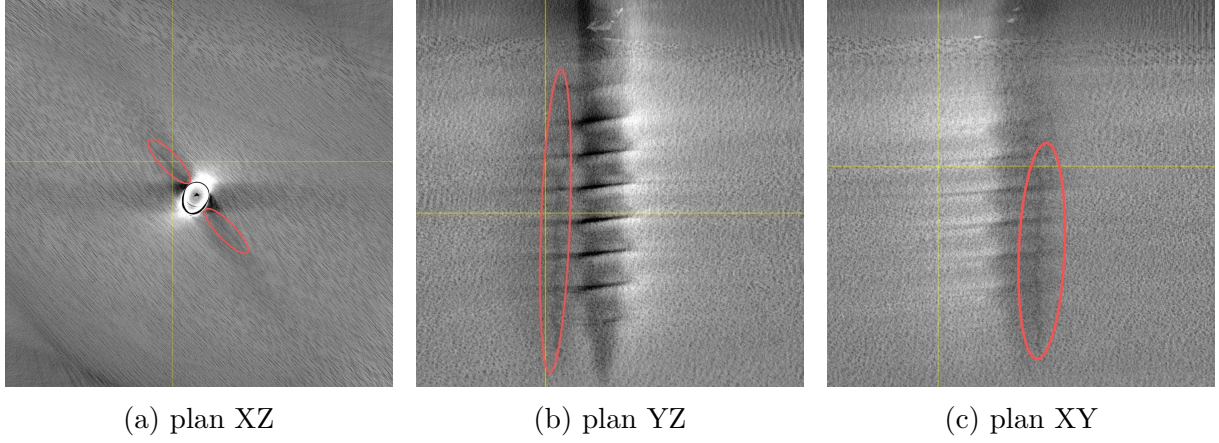


FIGURE 3.10 – Reconstruction par tomographie d’un échantillon présentant des fissures (échantillon densifié C4 avec insertion d’une vis de 4mm à 50 rpm)

3.5 Extraction et résistance à l’arrachement

Cette étude comprend également des essais en traction visant à déterminer la résistance à l’arrachement des vis dans le bois densifié, et à comparer ces résultats avec ceux obtenus sur du bois de densité équivalente et non densifié. Lier le couple de vissage, de l’endommagement et de la résistance à l’arrachement permet ainsi d’apporter une compréhension plus complète du comportement du bois densifié lors du vissage.

Ces essais ont été réalisés conformément à la norme *NBN EN 1382 :2016 - Résistance à l’arrachement dans le bois d’éléments de fixation* [58]. Comme pour les mesures de couple, les échantillons ont été préalablement conditionnés. Cette norme recommande un conditionnement d’une semaine à une température de $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 (\pm 5) \%$. Pour ces essais, les échantillons ont été conservés pendant une semaine dans une chambre régulée à $20 ^\circ\text{C}$ et $70 (\pm 5) \%$ d’humidité relative. De la même manière que pour les essais de vissage, un suivi de masse a été réalisé afin de vérifier l’atteinte du conditionnement.

Selon la norme, la résistance à l’arrachement correspond à la force maximale d’extraction F_{max} . On détermine également un paramètre d’arrachement f_{ax} tel que

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{dl_d} \quad (3.2)$$

où d est le diamètre nominal de la vis et l_d la longueur réelle de pénétration. Malgré le soin apporté lors du vissage, cette longueur présente des variations de l’ordre du millimètre d’un échantillon à l’autre. Elle a donc été mesurée individuellement en déduisant la longueur émergente de la vis de sa longueur totale.

Pour ces essais, la force d'arrachement doit être appliquée à une vitesse de chargement constante, de manière à atteindre F_{max} en 60 (± 15) secondes. Cette vitesse a été déterminée expérimentalement à partir de cinq échantillons tests en bouleau pour chaque diamètre de vis. Les vitesses retenues sont de 1,2 mm/min pour les vis de 3 mm de diamètre, de 1,4 mm/min pour les vis de 4 mm de diamètre et de 1,7 mm/min pour celles de 5 mm. Une courbe typique de l'extraction d'un échantillon de calibration est visible à la Figure 3.11. On peut y observer une augmentation de la force d'arrachement jusqu'à une rupture autour de 55 secondes.

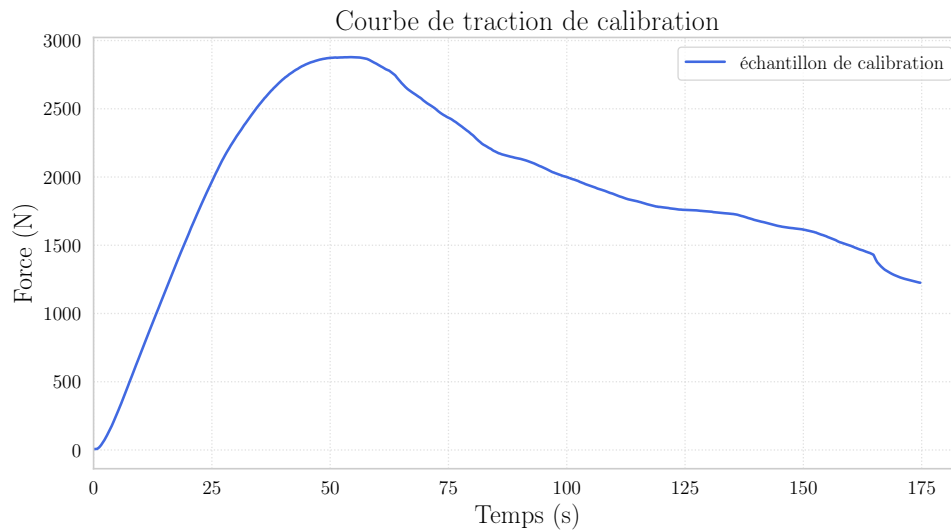


FIGURE 3.11 – Évolution de la force d'arrachement pour un échantillon de calibration (bouleau - $d = 4\text{mm}$ - $l_d = 20\text{mm}$) avec F_{max} atteint en 55 secondes

Le dispositif expérimental est présenté à la Figure 3.12. Les essais ont été réalisés à l'aide de la machine *Zwick/Roell Z250*, et une pièce spécifique a été usinée afin d'assurer le maintien de la vis. Conformément aux recommandations de la norme, la distance entre la vis testée et tout autre élément de fixation a été maintenue supérieure à trois fois le diamètre, afin d'éviter toute influence sur les résultats. Une précharge de 5 N a également été appliquée au début de chaque séquence d'extraction pour assurer des conditions initiales identiques.

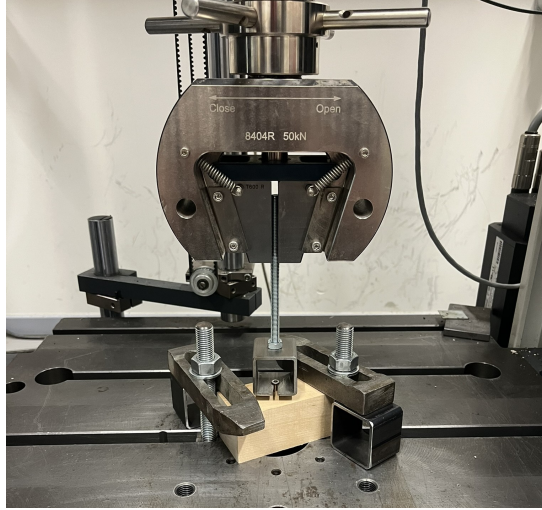


FIGURE 3.12 – Dispositif expérimental d’essai en traction

Le dispositif expérimental fournit également le déplacement réalisé par la traverse lors de l’essai. Il est alors possible de déterminer l’énergie ou travail nécessaire jusqu’à l’arrachement de la vis. Celui-ci s’exprime comme

$$W_{ex} = \int_0^{d_{max}} F(d) \delta d \quad (3.3)$$

où d_{max} correspond à la distance parcourue pour atteindre F_{max} . Cette énergie d’extraction, exprimée en Joules, dépend du diamètre de la vis et de la profondeur de pénétration. De la même manière que pour le paramètre d’arrachement, on définit un paramètre énergétique w_{ax} .

$$w_{ax} = \frac{W_{ex}}{d l_d} \quad (3.4)$$

Ce paramètre permettra de comprendre et de comparer l’énergie par unité de surface nécessaire à l’extraction d’une vis. Il permet de se concentrer sur la réponse intrinsèque de l’essence de bois sollicitée, notamment d’un point de vue mécanique et énergétique dans la zone d’ancrage.

3.6 Plan d’expérience

Les méthodes décrites dans les sections précédentes ont été appliquées selon un plan d’expérience visant à isoler l’effet du diamètre de vis et de la vitesse de rotation. Ce plan a été élaboré à l’aide du logiciel *JMP Student Edition 19*. Il permet d’analyser la réponse du couple de vissage en fonction de deux facteurs numériques discrets : le diamètre de la vis (3, 4 et 5 mm) et la vitesse de rotation (50, 100 et 150 rpm). Le logiciel *JMP* produit alors un modèle qui permet d’estimer les effets principaux, les interactions doubles et les effets quadratiques, en réalisant 12 essais.

L'ordre des essais est aléatoire afin de limiter l'influence de facteurs non contrôlés, tels que le temps, la température ou encore l'usure du matériel. Mélanger les essais permet de répartir ces effets parasites de manière aléatoire, évitant ainsi qu'ils ne biaisent certains résultats. Le plan d'expérience obtenu est présenté dans le tableau 3.2.

Essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vitesse (rpm)	150	100	150	100	100	100	50	50	50	150	100	100
Diamètre (mm)	4	4	3	4	3	4	3	4	5	5	5	4

TABLE 3.2 – Plan d'expérience

Ces essais ont été réalisés sur des échantillons non densifiés (peuplier), des échantillons densifiés (peuplier) et bruts de densité similaire (bouleau). Pour ce qui est des échantillons densifiés et bruts de densité similaire, un appariement a été effectué en sélectionnant des échantillons présentant des densités aussi proches que possible pour un même essai. Cette approche vise à réduire l'influence de la densité sur le résultat obtenu. La différence de densité est en moyenne de $15,47 (\pm 6,68) \text{ kg/m}^3$. Pour les échantillons non densifiés et densifiés, les mêmes planches d'origine ont été sélectionnées pour un même essai dans la mesure du possible. Quatre échantillons non densifiés proviennent cependant d'une planche qui ne correspond pas à celle des échantillons densifiés. Le détail des planches d'origine est disponible dans l'annexe A.1.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des matériaux et des méthodes expérimentales qui seront utilisés pour la suite de cette étude.

L'analyse du comportement du bois densifié face au vissage reposera ainsi sur l'utilisation de peuplier non densifié, de peuplier densifié, de bouleau et de vis auto-taraudeuses en acier inoxydable. Le peuplier sera densifié par procédé thermo-hygro-mécanique afin d'atteindre une densité similaire à celle du bouleau et permettre des comparaisons plus pertinentes.

Un plan d'expérience a été défini afin d'étudier l'influence du diamètre des vis et de la vitesse de rotation sur le couple d'insertion, mesuré grâce à un dispositif expérimental, et de comparer les résultats obtenus pour les différents bois.

Les échantillons seront ensuite analysés au tomographe pour observer d'éventuels endommagements internes causés par le vissage. Ils seront par après soumis à des essais en traction qui permettent de déterminer des paramètres d'arrachement et énergétique pour chaque essence.

L'ensemble des méthodes décrites dans ce chapitre constitue ainsi une base pour obtenir les résultats et en assurer une bonne compréhension dans les chapitres suivants.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents résultats obtenus lors des essais, notamment en ce qui concerne le vissage et l'insertion des vis, l'analyse tomographique de l'endommagement interne et les essais en traction. L'intégralité des résultats sera décrite dans ce chapitre tandis que l'analyse et la discussion de ceux-ci se feront dans le prochain chapitre.

4.1 Résultats sur bois non densifié

Cette section présentera d'abord les résultats obtenus sur des échantillons de peuplier non densifiés. La section suivante présentera les résultats du peuplier densifié et fera également la comparaison avec les résultats obtenus sur le bouleau.

4.1.1 Vissage et couple d'insertion

Les premiers essais de cette étude consistent à mesurer le couple de vissage lors de l'insertion de vis. Lors de ce processus, le dispositif de vissage enregistre en continu le couple mesuré. Pour les échantillons de peuplier non densifié, on obtient par exemple les deux courbes à la Figure 4.1. En fonction des conditions de vissage, on obtient des évolutions de couples différentes, mais qui suivent une même tendance. On peut y voir la phase d'amorçage et le début de la phase de pénétration stable décrites dans la section dédiée à la dynamique de vissage (section 2.3.3). Le couple maximal sera la variable retenue pour l'analyse des résultats. Ce couple est généralement observé à la fin du vissage, lorsqu'on entre dans la phase de pénétration stable.

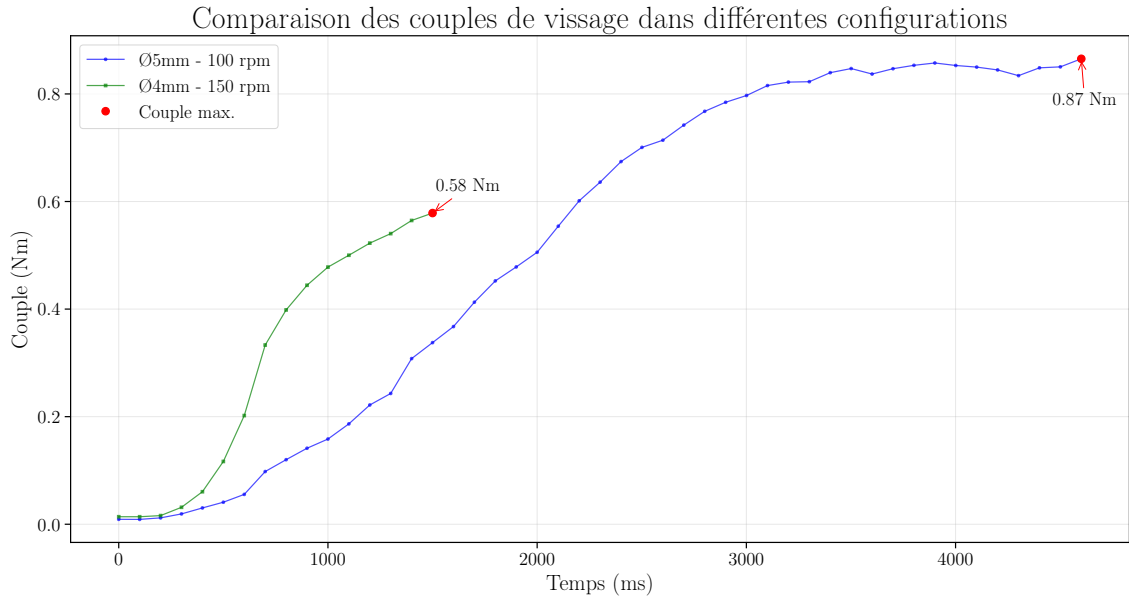


FIGURE 4.1 – Courbes typiques de couple d’insertion dans du peuplier non densifié dans différentes configurations ($\varnothing$ 5 mm à 100 rpm et $\varnothing$ 4 mm à 150 rpm)

Le plan d’expérience a été suivi pour l’ensemble des échantillons et permet d’estimer l’effet du diamètre de la vis (3, 4 et 5 mm), de la vitesse de rotation (50, 100 et 150 rpm) ainsi que de leurs interactions sur le couple de vissage.

L’évolution du couple en fonction des différents diamètres est présentée à la Figure 4.2. On observe un couple moyen de 0,71 Nm. De manière générale, le couple maximal moyen présente une augmentation linéaire avec le diamètre de la vis. Une valeur maximale de 1,1 Nm est toutefois observée pour une vis de 4 mm de diamètre qui s’écarte de la tendance globale formée par les autres résultats.

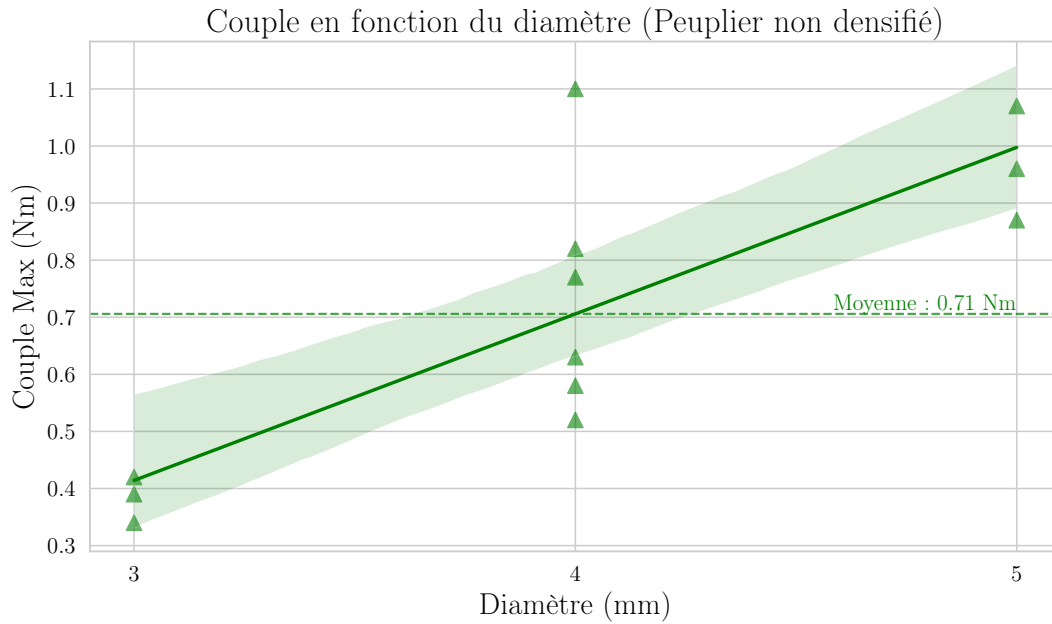


FIGURE 4.2 – Évolution du couple dans du peuplier non densifié en fonction des différents diamètres de vis

Le logiciel d'analyse du plan d'expérience *JMP* propose également le résumé des effets issu de la modélisation. Il reprend l'effet sur le couple de la covariable de densité, les effets linéaires (diamètre et vitesse), les effets quadratiques (diamètre*diamètre et vitesse*vitesse) ainsi que les effets d'interaction (vitesse*diamètre). Le résumé des effets sur le peuplier non densifié est disponible sur la Figure 4.3. Seul l'effet du diamètre est statistiquement significatif avec une valeur de logworth¹ de 2,67. Bien que non significatif, le second facteur présentant une tendance d'effet sur le couple est la densité des échantillons, pour laquelle on obtient une valeur de logworth de 0,84.

1. Le logworth est une transformation de la p -valeur qui permet une visualisation et interprétation plus aisées. Il s'exprime comme $-\log_{10}(p\text{-valeur})$. Un résultat statistiquement significatif est indiqué par une p -valeur $< 0,05$ soit un logworth $> 1,3$

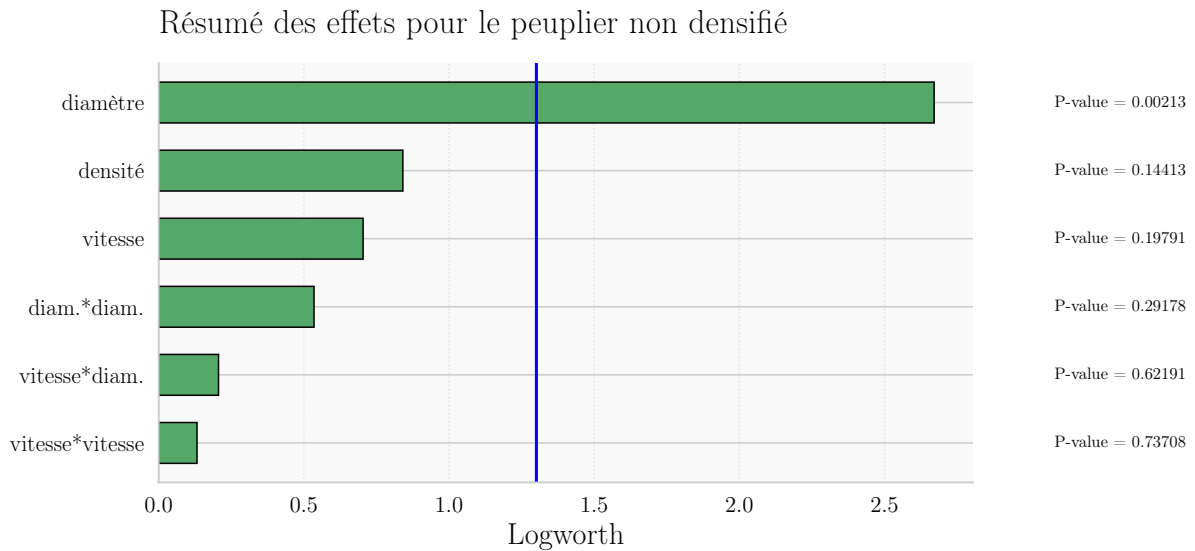


FIGURE 4.3 – Résumé des effets sur le couple pour le peuplier non densifié

L'évolution du couple en fonction des différentes vitesses de rotation appliquées est présentée à la Figure 4.4. Bien que la vitesse n'ait pas d'effet statistiquement significatif, on observe une tendance à la diminution du couple lorsque la vitesse de rotation augmente. En effet, le couple moyen passe de 0,86 Nm pour la vitesse la plus faible à 0,63 Nm pour la vitesse la plus élevée.

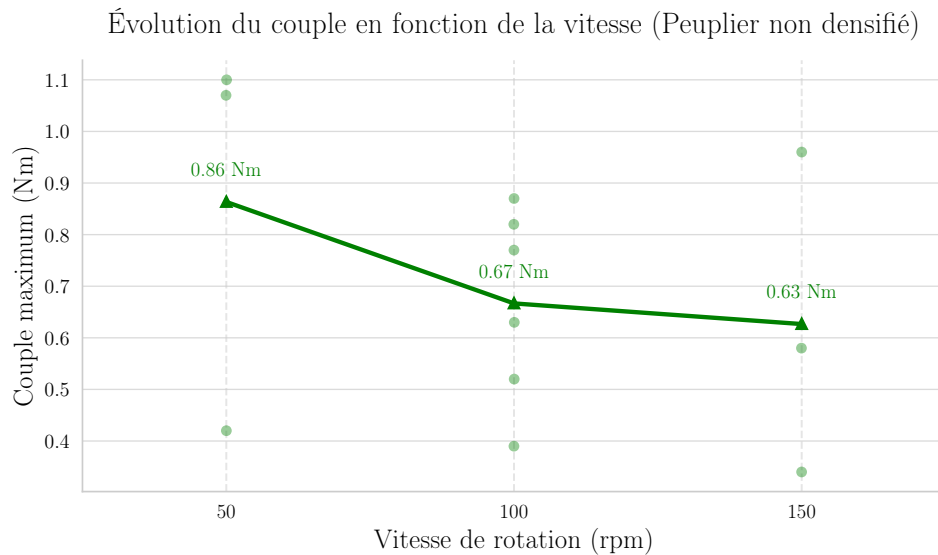


FIGURE 4.4 – Évolution du couple moyen en fonction de la vitesse de rotation lors du vissage dans les échantillons de peuplier non densifié

4.1.2 Tomographie et endommagement interne

Suite aux essais de vissage, une analyse tomographique a été réalisée afin d'observer l'endommagement interne produit au sein des échantillons.

De manière générale, le peuplier non densifié ne subit pas de dommage et ne se fissure pas lors du vissage. L'unique observation concerne un échantillon avec une vis de 4 mm de diamètre insérée avec une vitesse de rotation de 50 rpm. On observe un endommagement le long du filet, jusqu'à 2,18 mm du centre de la vis, sans fissure supplémentaire. Les observations issues de l'analyse tomographique sont reprises dans l'annexe F.1.

4.1.3 Essais en traction et résistance à l'arrachement

Les essais en traction fournissent des courbes de force en fonction du déplacement. Une courbe pour un échantillon de peuplier non densifié est présentée sur la Figure 4.5. On y distingue une montée rapide de la force jusqu'à un pic, suivi d'une descente progressive correspondant au décrochage de la vis.

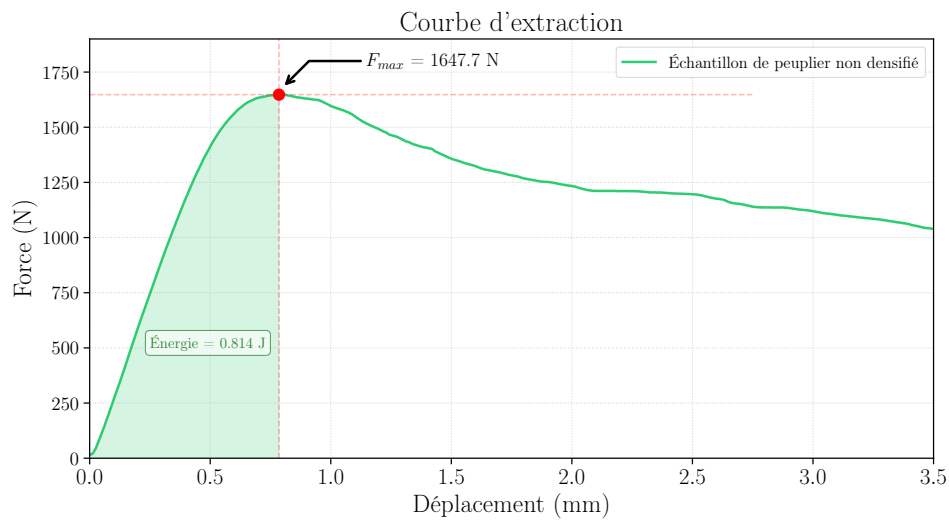


FIGURE 4.5 – Courbe force-déplacement lors de l'extraction d'un échantillon de peuplier non densifié

On peut en tirer la force maximale et l'énergie nécessaire à l'extraction. Ces valeurs sont ensuite normalisées sur base du diamètre de la vis et de la longueur réelle de pénétration, comme expliqué dans la section 3.5, pour obtenir les paramètres d'arrachement et énergétique. Cette normalisation permet de s'affranchir de l'effet du diamètre sur les résultats et de traiter toutes les valeurs conjointement. Les valeurs obtenues pour ces paramètres sont présentées dans la Figure 4.6 pour l'ensemble des échantillons de peuplier non densifié.

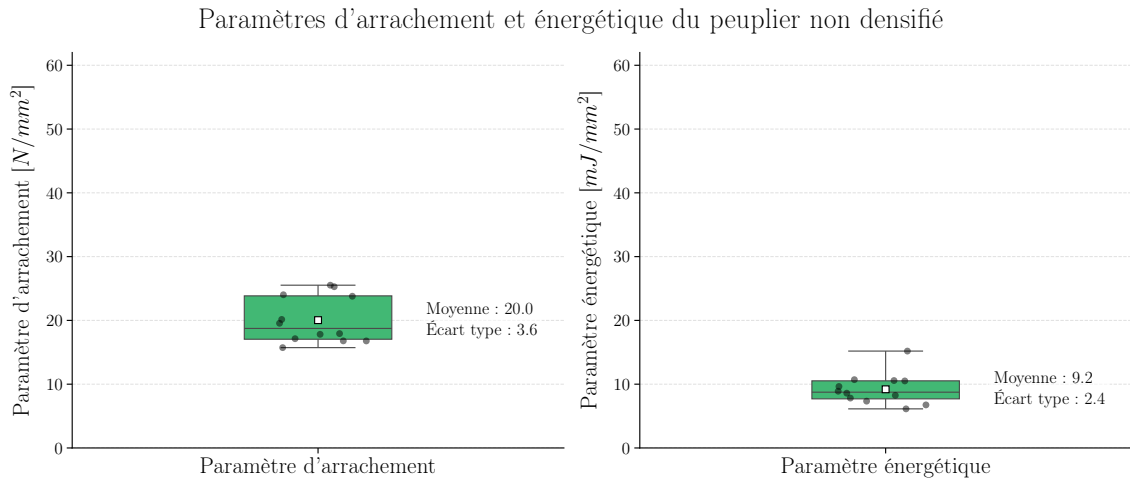


FIGURE 4.6 – Paramètre d'arrachement et énergétique des essais en traction du peuplier non densifié

Le peuplier non densifié présente un paramètre d'arrachement de $20 (\pm 3,6) \text{ N/mm}^2$ et un paramètre énergétique de $9,2 (\pm 2,4) \text{ mJ/mm}^2$.

4.2 Résultats sur bois densifié et comparatif

Cette section présente les résultats obtenus sur le peuplier densifié, ainsi que ceux mesurés sur du bouleau de densité équivalente. Pour chaque essai réalisé, une comparaison entre les trois bois étudiés sera proposée.

4.2.1 Vissage et couple d'insertion

Tout comme pour le peuplier non densifié, le plan d'expérience a été appliqué à l'ensemble des échantillons de peuplier densifié et de bouleau. Les mêmes variations de diamètre de vis et de vitesse de rotation ont été utilisées, et l'effet de ces facteurs sur le couple a été étudié de la même manière. Les couples moyens obtenus pour chaque essence sont récapitulés dans le tableau 4.1.

	Bouleau	Peuplier densifié	Peuplier non densifié
Densité moyenne $[\text{kg/m}^3]$	640,09	627,65	421,63
Couple moyen - vis 3 mm $[\text{Nm}]$	0,6	0,59	0,38
Couple moyen - vis 4 mm $[\text{Nm}]$	1,28	1,39	0,74
Couple moyen - vis 5 mm $[\text{Nm}]$	1,8	2	0,97
Couple moyen total $[\text{Nm}]$	1,24	1,34	0,71

TABLE 4.1 – Comparaison des densités et couples moyens selon l'essence de bois

Effet du diamètre

La Figure 4.7 présente l'évolution du couple maximal en fonction du diamètre de vis pour les trois essences. La densification du peuplier entraîne une augmentation importante du couple d'insertion. On observe une hausse du couple moyen de 88,7 %, passant de 0,71 Nm pour le peuplier non densifié à 1,34 Nm pour le peuplier densifié. De plus, la pente de la droite de régression associée au peuplier densifié est plus élevée, montrant une sensibilité au diamètre plus importante après densification.

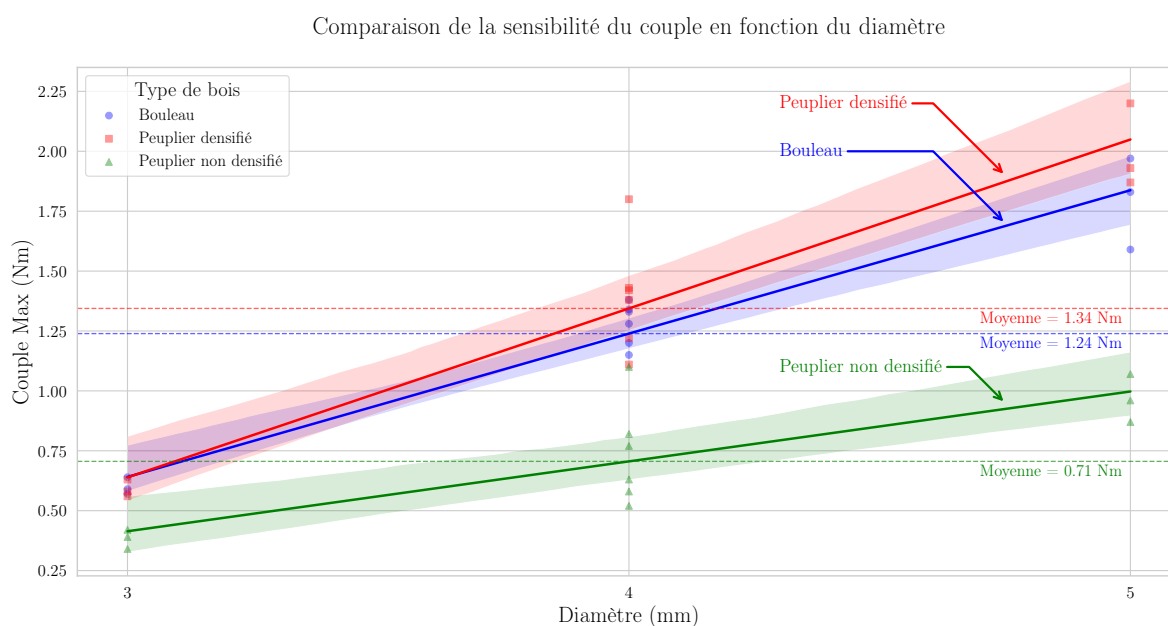


FIGURE 4.7 – Évolution des couples moyens en fonction du diamètre de vis pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau

À densité moyenne équivalente, la comparaison entre le peuplier densifié et le bouleau montre des comportements proches. Le peuplier densifié présente un couple moyen supérieur à celui du bouleau, avec une moyenne globale de 1,34 Nm contre 1,24 Nm pour le bouleau, soit un écart de 6,7 %. Ce résultat est à noter dans la mesure où le peuplier densifié présente une densité moyenne inférieure de 1,6 % à celle du bouleau. Les droites de régression de ces bois plus denses ont des pentes positives comparables, bien que celle du peuplier densifié soit légèrement plus prononcée.

Les résumés des effets issus de la modélisation, présentés à la Figure 4.8, confirment que le diamètre constitue le facteur le plus influent dans les trois modèles. Le diamètre présente une valeur de logworth largement supérieure au seuil de significativité de 1,3 pour les trois essences, avec des valeurs respectives de 2,67 pour le peuplier non densifié, 3,66 pour le peuplier densifié et de 4,06 pour le bouleau. Par ailleurs, le terme quadratique lié au diamètre présente, pour le peuplier densifié, une p-value de 0,141 et un logworth de 0,85. Bien que non significatives d'un point de vue statistique, ces valeurs sont les

plus élevées parmi les trois essences pour ce terme. Cette tendance suggère une possible courbure de la relation couple-diamètre pour le peuplier densifié. Aucun autre facteur n'atteint le seuil de significativité pour les différentes essences.

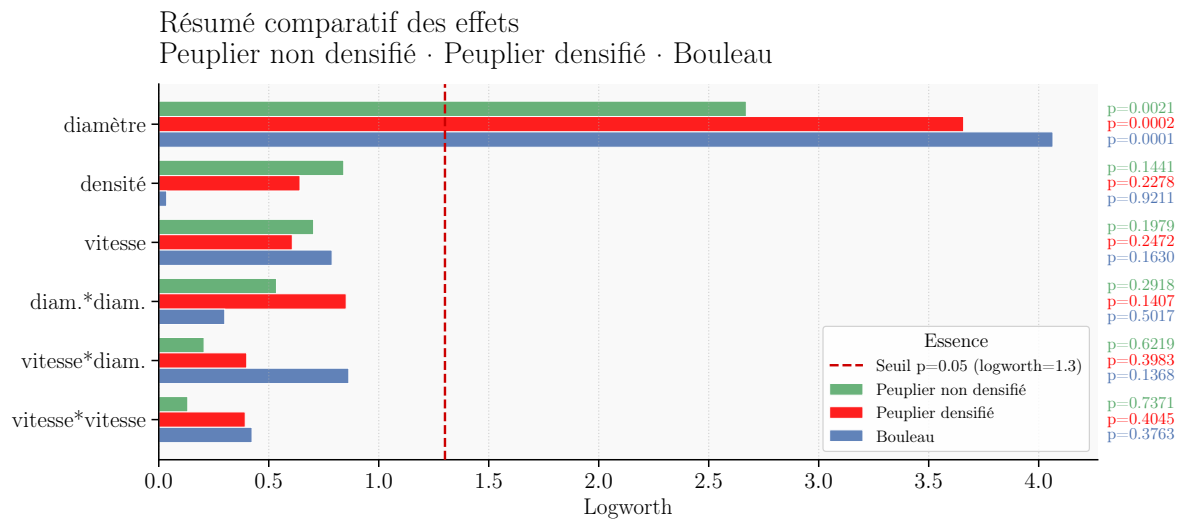


FIGURE 4.8 – Résumé des effets sur le couple pour les trois essences de bois

Effet de la vitesse de vissage

La Figure 4.9 présente les profils des moyennes de couple maximal en fonction de la vitesse de rotation pour les trois essences. Quelle que soit la vitesse considérée, le peuplier densifié présente des valeurs de couple supérieures au peuplier non densifié. Pour ces deux essences, une légère tendance décroissante du couple avec l'augmentation de la vitesse est observable. Cette tendance est plus prononcée pour le peuplier non densifié où on observe une diminution du couple de 27,39 % en passant de 50 à 150 rpm, tandis que cette diminution est de 16,88 % pour le peuplier densifié.

De son côté, le bouleau présente aussi une légère tendance décroissante du couple avec la vitesse, mais de manière plus modérée. Le couple diminue de 12,03 % entre 50 et 150 rpm. Le classement entre essences est toutefois conservé quelle que soit la vitesse. On retrouve le peuplier densifié avec un couple moyen plus élevé, suivi du bouleau, puis du peuplier non densifié.

Les termes relatifs à la vitesse de rotation, qu'ils soient linéaires (vitesse), quadratiques (vitesse*vitesse) ou d'interaction (vitesse*diam.), présentent des valeurs de logworth inférieures au seuil de 1,3 pour les trois essences. Sur la plage de vitesses testée, aucun effet significatif de la vitesse de rotation sur le couple maximal n'est donc mis en évidence statistiquement, malgré les tendances visuelles observées. Par ailleurs, les moyennes des vitesses extrêmes sont basées sur un nombre limité d'échantillons, en raison des besoins du plan d'expérience, ce qui invite à interpréter les profils de vitesse avec prudence.

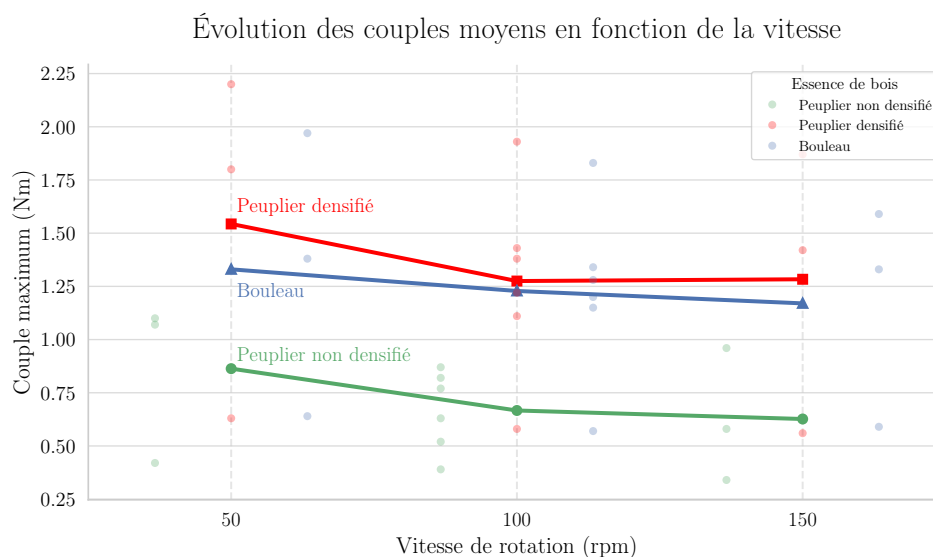


FIGURE 4.9 – Évolution des couples moyens en fonction de la vitesse de rotation pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau

Effet de la densité

La densité de chaque échantillon a été intégrée dans chacun des trois modèles pour tenir compte de la variabilité de densité au sein de chaque groupe. Elle n'atteint le seuil de significativité dans aucun des cas. Les valeurs de logworth obtenues sont de 0,84 pour le peuplier non densifié, de 0,64 pour le peuplier densifié et 0,04 pour le bouleau (Fig. 4.8). La densité mesurée des échantillons n'apparaît donc pas comme un facteur influençant significativement le couple maximal.

Toutefois, une nuance est à relever pour le peuplier non densifié. Le terme densité y occupe la deuxième position parmi les effets les plus influents du modèle, alors qu'il figure à la troisième position pour le peuplier densifié. Cette différence suggère que la variabilité de densité au sein des échantillons de peuplier non densifié pourrait influencer plus fortement le couple. Pour le bouleau, la densité arrive en dernière position parmi les effets du modèle, ce qui contraste avec la position observée pour les essences de peuplier.

Les modèles utilisés pour étudier l'effet des différents facteurs sur le couple ont été analysés dans l'annexe C. Sur base de l'analyse des résidus, aucune valeur problématique ou tendance observable ne se dégage, ce qui valide leur utilisation.

Exploration du vissage dans la direction longitudinale

Bien que ce ne soit pas recommandé, comme mentionné dans la section liée à la dynamique du vissage (section 2.3.3), quelques essais ont été réalisés en vissant dans la direction longitudinale pour évaluer dans quelle mesure la densification peut influencer le

comportement du bois dans cette direction.

L'analyse a été limitée aux vis de 3 mm de diamètre pour limiter les effets de bord possibles dans les échantillons densifiés, ceux-ci présentant une épaisseur d'environ 30 mm. Les valeurs moyennes ont été déterminées sur base de 8 échantillons par essence et sont comparées aux moyennes obtenues sur les échantillons analysés précédemment avec des vis de 3 mm de diamètre. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 4.10.

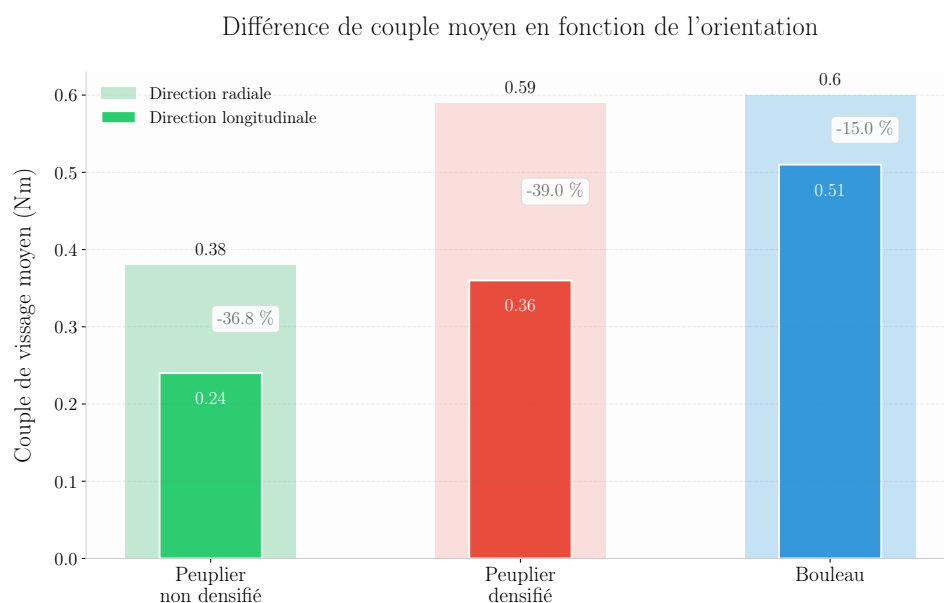


FIGURE 4.10 – Différence de couple moyen entre un vissage dans la direction radiale et un vissage dans la direction longitudinale pour les trois bois étudiés

De manière générale, le vissage dans la direction longitudinale nécessite un couple inférieur à celui mesuré en direction radiale, et ce pour l'ensemble des essences testées. Pour le peuplier non densifié, le couple moyen passe de 0,38 Nm en direction radiale à 0,24 Nm en direction longitudinale, soit une réduction de 36,8 %. Le peuplier densifié présente une différence encore plus marquée avec un couple qui diminue de 0,59 Nm à 0,36 Nm, correspondant à une baisse de 39,0 %. Enfin, le bouleau présente une réduction de couple plus modérée de 15 %. Parmi les essences testées, le peuplier densifié présente donc la réduction de couple la plus importante lorsqu'on passe d'un vissage radial à un vissage longitudinal.

4.2.2 Tomographie et endommagement interne

Lors de l'analyse des bois plus dense, des dégâts plus importants ont été observés au sein des échantillons. Les types d'endommagement et de fissuration ont été classés selon trois catégories et sont représentées à la Figure 4.11 :

- Endommagement le long du filet : un endommagement continu est observé tout le

long du filet de la vis, se propageant sur une distance L_e (Longueur Endommagement). Ce type d'endommagement est représenté en bleu sur la Figure 4.11.

- Localisée : une fissure localisée non visible en surface, qui ne s'étend pas sur toute la longueur du filet. Elle a une profondeur P_f (Profondeur Fissure) et s'étend sur une longueur L_f (Longueur Fissure). Elle peut coexister avec un endommagement le long du filet. Ce type de fissure est représenté en rouge sur la Figure 4.11.
- Non visible : aucune fissure ni endommagement n'a été détecté autour ou au-delà du filet de la vis sur les images reconstruites.

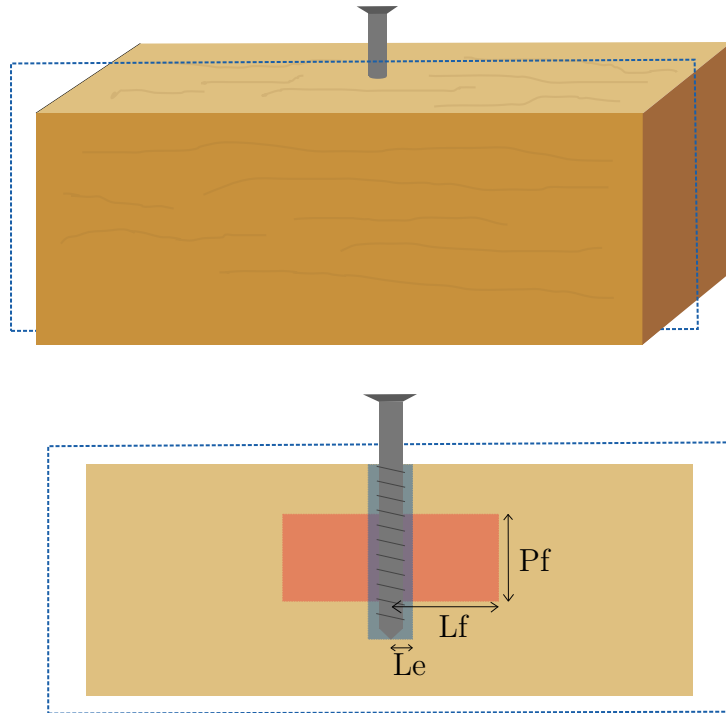


FIGURE 4.11 – Schématisation des typologies de fissures observées par tomographie

Les résultats de l'analyse tomographique pour le peuplier densifié et le bouleau sont présentées dans la Figure 4.12, qui regroupe l'ensemble des propagations mesurées pour les trois essences en fonction du diamètre de vis et de la vitesse de rotation utilisés.

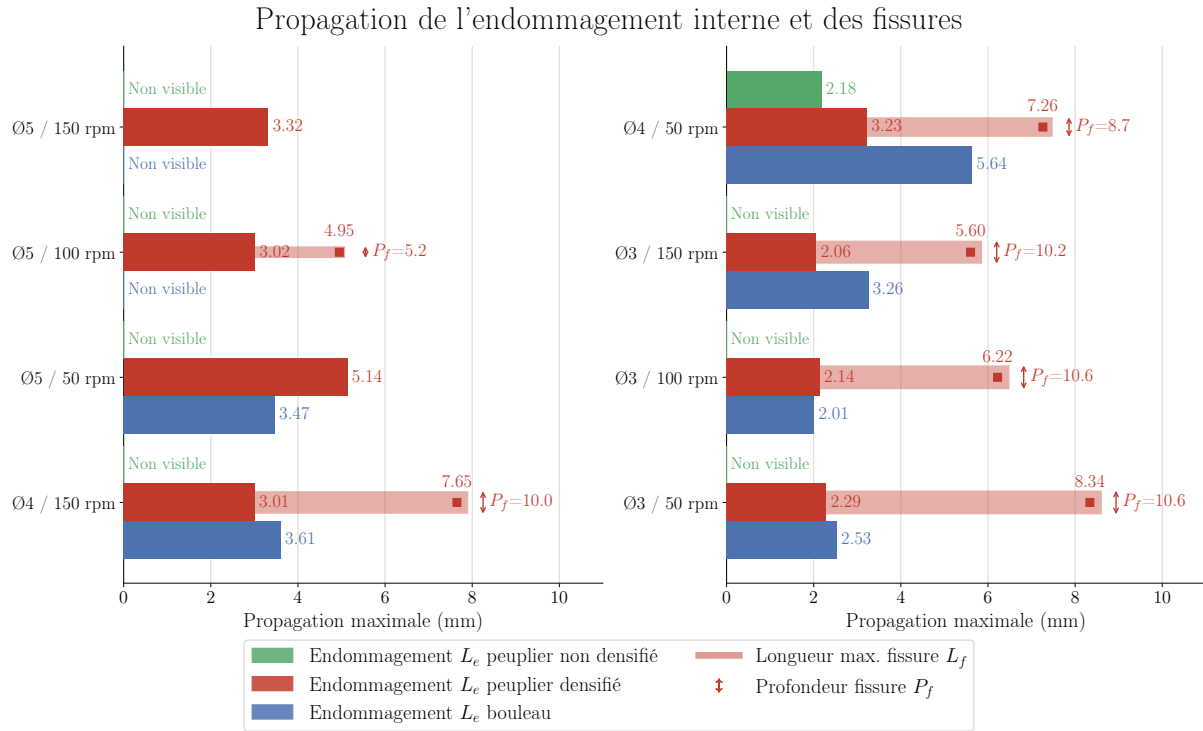


FIGURE 4.12 – Endommagements et fissures observés par tomographie pour les trois essences de bois

Type d'endommagement et ampleur de la propagation

Dans un premier temps, une distinction nette apparaît entre les deux états du peuplier. Comme présenté dans la section 4.1.2, le peuplier non densifié ne subit pratiquement aucun endommagement, à l'exception d'un endommagement le long du filet sur une longueur de 2,18 mm. En revanche, le peuplier densifié présente systématiquement un endommagement le long du filet avec une fissuration supplémentaire localisée dans 75 % des cas, avec des longueurs de propagation (L_f) allant jusqu'à 8,34 mm. Les profondeurs de fissure (P_f) excèdent par ailleurs systématiquement les longueurs L_f pour toutes les fissures observées. La densification semble donc modifier radicalement le comportement du peuplier face au vissage.

La comparaison est également effectuée avec le bouleau qui présente une densité similaire à celle du peuplier densifié. Le bouleau présente un endommagement le long du filet pour la plupart des configurations testées mais ne montre aucune fissure supplémentaire. Cette longueur d'endommagement L_e présente une tendance à être supérieure pour le bouleau lorsqu'elle est visible. L'absence de fissure supplémentaire indique que le bouleau est finalement moins affecté par le vissage.

Pour l'ensemble des observations, qu'il s'agisse d'un endommagement le long du filet ou d'une fissure localisée, la rupture se manifeste systématiquement dans le sens des fibres.

Effet du diamètre et de la vitesse de rotation

Le peuplier non densifié ne présentant pas d'endommagement significatif, les résultats portent principalement sur le bouleau et le peuplier densifié. Pour ce dernier, les grands diamètres de vis (5 mm) génèrent des propagations le long du filet plus importantes, mais produisent des fissures localisées moins étendues. Cet équilibre s'inverse à mesure que le diamètre de vis diminue, la fissuration maximale étant observée pour les vis de 3 mm insérées à la plus faible vitesse avec une longueur de fissure L_f de 8,34 mm. Pour le bouleau, on observe uniquement une tendance de réduction de l'endommagement avec une diminution du diamètre.

En ce qui concerne la vitesse, une tendance générale à l'augmentation de la propagation avec la diminution de la vitesse de rotation est observable sur le peuplier densifié. Pour les vis de 5 mm, la propagation maximale croît lorsque la vitesse diminue, pour les vis de 4 mm, c'est principalement l'endommagement le long du filet qui suit cette tendance et pour les vis de 3 mm, les deux types d'endommagement augmentent à mesure que la vitesse diminue.

4.2.3 Essais en traction et résistance à l'arrachement

Les essais en traction ont ensuite été réalisés sur le peuplier densifié et sur le bouleau, et comparés avec les résultats obtenus pour le peuplier non densifié. On observe un comportement différent pour les trois bois, que ce soit au niveau de leur courbe d'extraction, de leur paramètre d'arrachement ou de leur paramètre énergétique.

Courbes d'extraction

La Figure 4.13 présente les courbes force - temps obtenues lors des essais d'extraction pour les trois essences. On peut y observer une évolution différente pour chaque bois. Les courbes du peuplier non densifié présentent un pic de force rapide et de faible amplitude. Les courbes du peuplier densifié se distinguent par un profil nettement plus étalé dans le temps, avec un pic atteint plus tardivement. Le bouleau quant à lui présente un pic plus prononcé qui apparaît dans un intervalle de temps entre les essences de peuplier. Cette différence morphologique constitue un premier indicateur visuel d'un comportement en extraction distinct entre les trois bois.

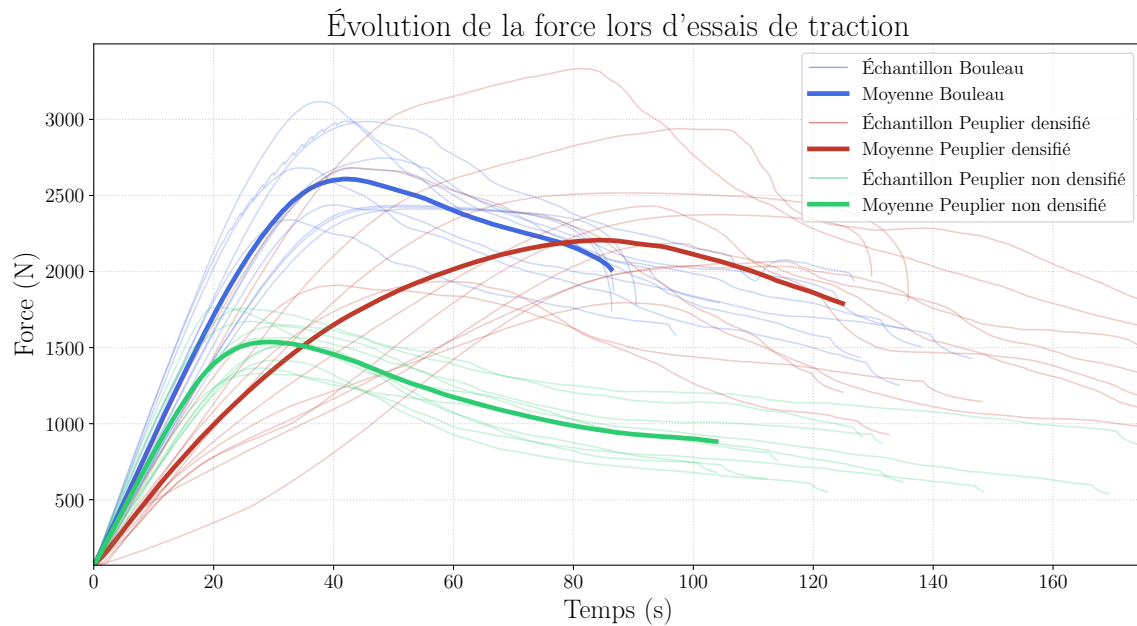


FIGURE 4.13 – Évolution de la force lors d’essais en traction de vis dans du peuplier non densifié, du peuplier densifié et du bouleau. Les courbes moyennes pour chaque essence sont mises en évidence par-dessus les courbes individuelles

Paramètre d’arrachement

La Figure 4.14 présente la distribution des paramètres d’arrachement pour les trois essences. La densification du peuplier implique une augmentation du paramètre d’arrachement qui passe de $20,0 (\pm 3,6) \text{ N/mm}^2$ pour le peuplier non densifié à $31,1 (\pm 7,4) \text{ N/mm}^2$ pour le peuplier densifié, soit une hausse de 55,5 %. L’écart-type du peuplier densifié est par ailleurs nettement plus élevé que celui du non densifié.

La comparaison entre le peuplier densifié et le bouleau révèle quant à elle un écart plus modéré. Le bouleau présente un paramètre d’arrachement moyen de $34,3 (\pm 4,5) \text{ N/mm}^2$, soit une valeur 10,3 % plus élevée que celle du peuplier densifié. Des analyses statistiques (ANOVA et post-hoc de Tukey, en annexe E.1) montrent que la différence de paramètre d’arrachement entre le peuplier densifié et le bouleau n’est pas significative.

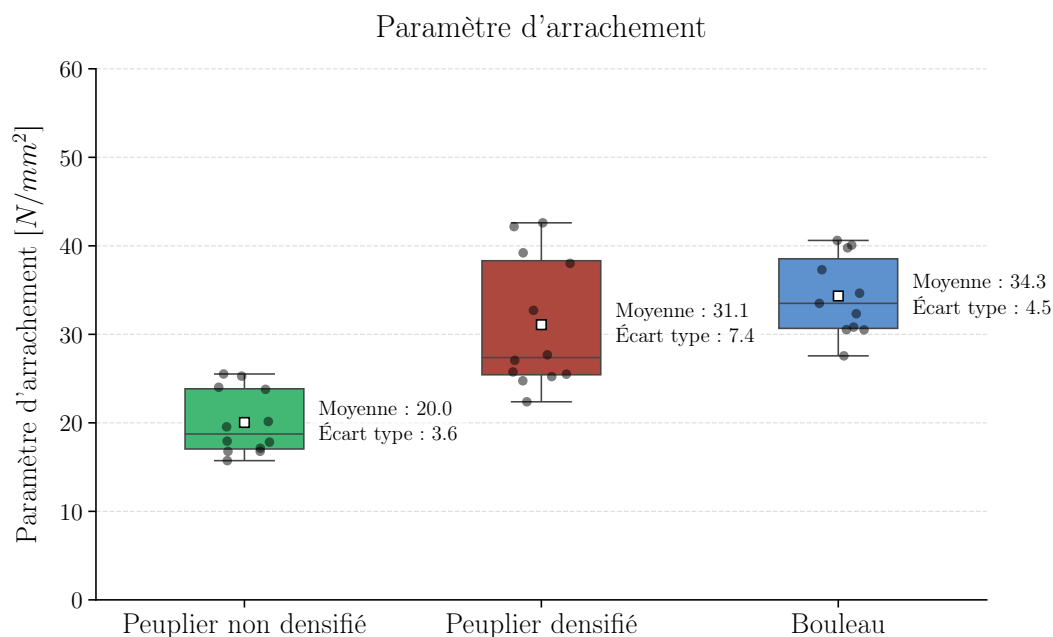


FIGURE 4.14 – Paramètres d'arrachement obtenus lors d'essais en traction pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau

Paramètre énergétique

La Figure 4.15 présente la distribution des paramètres énergétiques pour les trois groupes. L'effet de la densification est ici plus marqué. Le paramètre énergétique du peuplier densifié atteint $39,5 (\pm 13,8) \text{ mJ/mm}^2$, contre $9,2 (\pm 2,4) \text{ mJ/mm}^2$ pour le peuplier non densifié, soit une augmentation de 329 %. On observe à nouveau une dispersion des résultats plus élevée pour le peuplier densifié, ce qui contraste avec la distribution très resserrée du peuplier non densifié.

Le bouleau présente quant à lui un paramètre énergétique moyen de $22,7 (\pm 4,9) \text{ mJ/mm}^2$. On observe ici un vrai contraste avec le peuplier densifié. Ce dernier absorbe significativement plus d'énergie lors de l'extraction que le bouleau de densité équivalente, malgré un paramètre d'arrachement légèrement inférieur.

Les mêmes analyses statistiques (annexe E.1) confirment que chaque groupe se distingue statistiquement des autres.

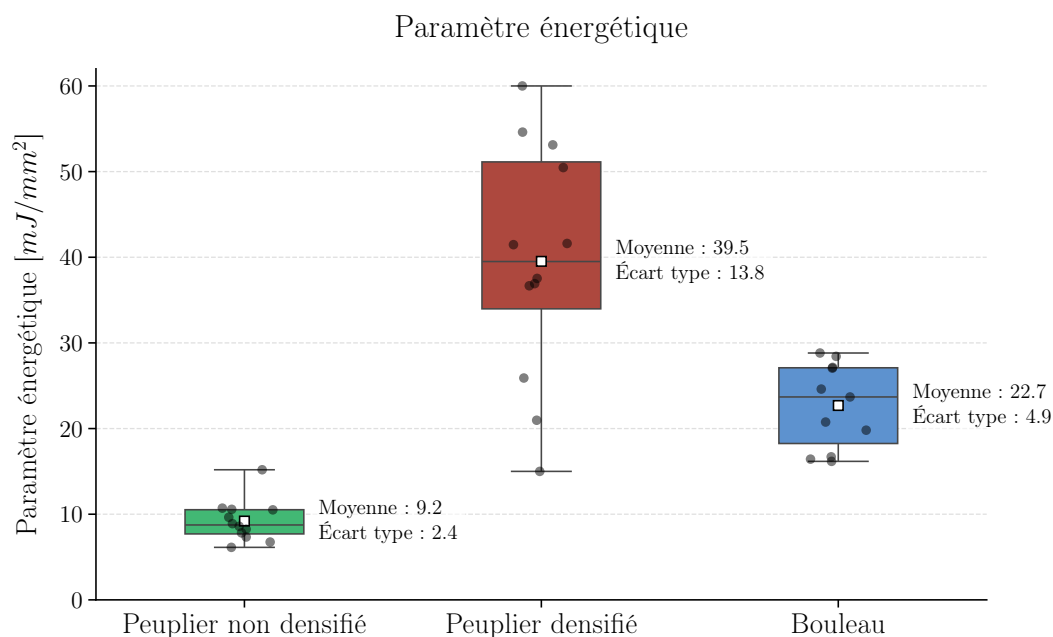


FIGURE 4.15 – Paramètres énergétiques obtenus lors d’essais en traction pour le peuplier non densifié, densifié et le bouleau

4.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté l’ensemble des résultats expérimentaux obtenus pour les trois essences étudiées. Ceux-ci sont entièrement repris dans l’annexe F.1 sous forme de tableau récapitulatif.

En ce qui concerne le couple d’insertion, le diamètre de vis constitue le seul facteur statistiquement significatif, avec un couple moyen plus élevé pour le peuplier densifié que pour le bouleau de densité équivalente.

L’analyse tomographique révèle un comportement très distinct entre les trois essences. Le peuplier non densifié ne présente pratiquement aucun endommagement. En revanche, le peuplier densifié présente systématiquement un endommagement le long du filet et des fissures supplémentaires dans la majorité des cas, tandis que le bouleau ne présente qu’un endommagement le long du filet lorsque des dégâts sont visibles.

Pour ce qui est des essais en traction, ils montrent que la densification améliore nettement le paramètre d’arrachement, et de façon encore plus marquée le paramètre énergétique. Ce dernier dépasse celui du bouleau malgré une densité légèrement inférieure. L’interprétation de ces résultats et leur mise en perspective feront l’objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Discussion des résultats

Ce chapitre vise à interpréter et à discuter les résultats expérimentaux présentés au chapitre précédent. L'objectif est de comprendre dans quelle mesure la densification du peuplier modifie son comportement face au vissage, en comparant les résultats obtenus pour le peuplier non densifié avec ceux du peuplier densifié et ceux du bouleau de densité équivalente. Ces résultats seront analysés en lien avec les caractéristiques des essences, le procédé de densification et les mécanismes de vissage décrits dans l'état de l'art, pour essayer de dégager une meilleure compréhension du comportement mécanique du bois après sa densification.

5.1 Comportement face au vissage

5.1.1 Vissage dans la direction radiale

La densification du peuplier produit une augmentation marquée du couple de vissage moyen, qui passe de 0,71 Nm à 1,34 Nm, soit une hausse de près de 89 %. Cet écart s'explique par la transformation de structure du bois lors de la densification. Le bois est naturellement un matériau poreux, composé de cavités cellulaires et de vides internes. Lors de la densification, la structure est comprimée mécaniquement, ce qui réduit fortement le volume de ces cavités. Le bois obtenu présente alors des parois cellulaires davantage rapprochées, compactées et plus rigides. Lors de l'insertion d'une vis, le filet doit refouler, comprimer et déplacer la matière au fur et à mesure de sa progression. Dans le peuplier densifié, les fibres déjà compactées s'opposent bien plus fortement à cette pénétration que dans le peuplier brut, dont la structure poreuse peut partiellement absorber la déformation induite par le filet.

La comparaison entre le peuplier densifié et le bouleau révèle un résultat plus subtil. Bien que le peuplier densifié présente une densité moyenne légèrement inférieure de 1,6 % à celle du bouleau, il nécessite un couple de vissage supérieur de 6,7 %. Ce résultat peut

s'avérer contre-intuitif si l'on considère la densité comme unique indicateur du comportement au vissage. Le bouleau qui a une structure cellulaire plus ouverte et homogène tend à se déformer plus facilement sous l'action de la vis. Le peuplier densifié, en revanche, oppose localement une résistance plus importante en raison de ses parois compactées et de l'absence de vides internes capables d'absorber la déformation. Cela se traduit par un couple de vissage supérieur malgré une densité globale moindre.

Au travers de l'analyse statistique, le diamètre de la vis apparaît comme le facteur dominant dans la mesure du couple de vissage pour les trois essences, avec des valeurs de logworth largement supérieures au seuil de 1,3. Ce résultat est cohérent avec les principes mécaniques du vissage : une augmentation du diamètre implique un volume de bois refoulé plus important, une surface de contact plus grande entre la vis et le bois, et donc des forces de frottement plus élevées. Ce phénomène conduit à une augmentation quasi linéaire du couple sur la plage de diamètres étudiée. Les pentes de régression diffèrent toutefois selon les essences avec une augmentation plus marquée pour le peuplier densifié. Cette observation rejoint l'interprétation expliquée précédemment concernant le couple plus élevé mesuré pour des conditions de vissage similaires. La pente plus importante observable pour le peuplier densifié pourrait aussi être liée à une contribution plus importante du terme quadratique associé au diamètre, même si celui-ci n'est pas statistiquement significatif. Cette tendance suggère une possible courbure de la relation entre couple et diamètre pour le peuplier densifié. L'augmentation du couple pourrait ainsi s'accroître avec le diamètre au fur et à mesure qu'il augmente. Une telle non-linéarité reste mécaniquement plausible. Lorsque le diamètre augmente, la quantité de matière déplacée par le filetage devient plus importante, tandis que la structure densifiée offre moins de vides cellulaires capables d'absorber cette déformation. Les contraintes de compression radiale induites autour de la vis augmenteraient alors plus fortement, ce qui amplifierait la résistance opposée au vissage. Ce phénomène mériterait toutefois d'être confirmé par des essais complémentaires portant sur une plage de diamètres plus étendue.

Aucun effet statistiquement significatif de la vitesse de rotation n'est mis en évidence pour les trois essences. On observe néanmoins pour chacune d'elles une tendance à la diminution du couple avec l'augmentation de la vitesse. Ce phénomène peut être expliqué par un ramollissement de la lignine sous l'effet de l'échauffement par frottement, qui réduit la résistance à l'insertion d'une vis. La diminution de couple la plus importante est observée pour le peuplier non densifié ($-27,4\%$). Cependant, ce résultat doit être interprété avec prudence. Les moyennes aux vitesses extrêmes reposent sur un nombre limité d'échantillons, et une valeur anormalement élevée du couple à 50 rpm pour le peuplier non densifié semble accentuer cette réduction apparente. La variabilité de ces résultats sera davantage discutée dans la section 5.4. La tendance décroissante est également présente

pour le peuplier densifié et le bouleau ($-16,9\%$ contre $-12,0\%$ pour le bouleau). Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse d'un frottement plus élevé dans le peuplier densifié, dont la structure compactée génère un échauffement plus important, amplifiant le ramollissement de la lignine et donc la réduction du couple.

Bien que non significative, la différence d'effet de la densité observée entre les essences peut s'expliquer par la variabilité au sein de chaque groupe. Le peuplier non densifié présente l'écart-type de densité le plus élevé. Il offre au modèle une plage plus importante pour observer une tendance, ce qui se traduit par le logworth le plus élevé parmi les trois essences. À l'inverse, le bouleau, dont les échantillons sont issus d'une seule planche, présente une densité très resserrée qui limite la capacité du modèle à établir un lien.

5.1.2 Vissage dans la direction longitudinale

Pour les trois types de bois testés, les essais réalisés dans la direction longitudinale montrent que le vissage nécessite un couple systématiquement inférieur à celui mesuré en direction radiale. Ce résultat est cohérent avec la structure anisotrope du bois. Dans la direction longitudinale, les fibres sont orientées parallèlement à l'axe de la vis, ce qui modifie les mécanismes d'interaction entre le filet et le bois. Comme discuté dans la section liée à la dynamique de vissage (section 2.3.3), le vissage dans la direction radiale cisaille les fibres. En direction longitudinale, en revanche, le filet tend à les écarter plutôt qu'à les sectionner. Ce mode de sollicitation requiert généralement moins d'énergie, ce qui est cohérent avec les réductions de couple observées.

La réduction de couple varie cependant selon les essences. Elle est la plus importante pour le peuplier densifié ($-39,0\%$), suivie du peuplier non densifié ($-36,8\%$), et nettement plus modérée pour le bouleau ($-15,0\%$). Ces différences peuvent s'expliquer au vu de la microstructure de chaque matériau décrite dans la section 2.1.4.

Pour les deux essences de peuplier, la réduction du couple lors du vissage dans la direction longitudinale peut s'expliquer par la structure cellulaire du peuplier, composée de fibres plus longues. Dans cette configuration, la résistance à la pénétration longitudinale est plus faible car les fibres s'écartent plus facilement sous l'action du filet. La densification accentue légèrement cet écart ($-39,0\%$ contre $-36,8\%$). Une hypothèse plausible est que la compression radiale lors de la densification crée des plans de rupture préférentiels. Le bois de printemps, moins dense, et le bois d'été plus dense, peuvent être affectés différemment. Cette hétérogénéité pourrait créer des interfaces fragilisées qui peuvent être mobilisées lors du vissage longitudinal.

Pour le bouleau, la réduction est moins importante ($-15,0\%$) et peut s'expliquer

par sa structure anatomique différente. Ses fibres sont plus courtes et associées à des rayons ligneux plus développés. Cette structure tend à réduire le caractère anisotrope et à limiter la différence de comportement entre les deux directions de vissage. Le couple dans la direction longitudinale du bouleau (0,51 Nm) reste d'ailleurs supérieur à celui du peuplier densifié (0,36 Nm). À densité équivalente, ce résultat confirme que la structure du bouleau s'oppose plus efficacement au vissage longitudinal.

5.2 Endommagement interne

Quelle que soit l'essence considérée, lorsqu'un endommagement est présent, il se propage systématiquement dans le sens des fibres. La densification réduit le volume des cavités cellulaires mais ne modifie ni la direction ni l'organisation longitudinale des fibres. Les contraintes de compression radiale générées lors du vissage se concentrent donc aux interfaces entre fibres, là où la résistance est la plus faible, ce qui favorise naturellement une propagation de fissure dans la direction longitudinale.

Ce mécanisme est d'autant plus marqué dans le bois densifié qui a accumulé des contraintes résiduelles internes lors du processus de densification. Ces contraintes peuvent abaisser le seuil de fissuration lors de l'insertion d'une vis. Ainsi, même pour des configurations de vissage qui n'endommagent pas le peuplier non densifié, le peuplier densifié peut développer une fissuration localisée.

Le bouleau, bien que de densité équivalente au peuplier densifié, ne présente aucune fissure localisée lors du vissage, uniquement un endommagement continu le long du filet. Cette différence fondamentale peut s'expliquer par la distinction entre une densité obtenue naturellement et une densité imposée mécaniquement.

Dans le bouleau, la densité élevée résulte d'une structure cellulaire naturelle composée de fibres courtes et d'un réseau de rayons ligneux plus développé. Cette organisation lui donne une résistance plus homogène et une meilleure capacité à distribuer les contraintes générées par le filet. Le bouleau absorbe ainsi la déformation de façon plus diffuse et réduit le risque d'amorçage d'une fissure localisée.

Le peuplier densifié, en revanche, a été comprimé mécaniquement jusqu'à la déformation plastique de ses cellules. Contrairement au bouleau, le peuplier densifié contient des contraintes résiduelles figées dans sa structure. Lors du vissage, ces zones précontraintes créent des sites préférentiels d'amorçage de fissure. Les contraintes induites par le filet s'y concentrent plutôt que de se distribuer et peuvent mener à l'ouverture de fissures localisées.

Concernant le diamètre, les grandes vis génèrent les propagations le long du filet les plus importantes, mais les fissures localisées les moins étendues. À l'inverse, les petites vis produisent les fissures localisées les plus longues. Ce comportement peut s'expliquer par deux mécanismes distincts. D'une part, les grandes vis déplacent un volume de matière important sur toute la longueur du filet, ce qui favorise un endommagement diffus le long du filet plutôt qu'une concentration de contrainte en un point. D'autre part, les petites vis concentrent davantage les contraintes localement autour du filet, favorisant l'amorçage et la propagation d'une fissure localisée dans les zones déjà fragilisées par la densification.

Concernant la vitesse, on observe une tendance générale à l'augmentation de l'endommagement avec la diminution de la vitesse pour tous les diamètres testés. À vitesse élevée, l'échauffement par frottement tend à nouveau à ramollir localement la lignine, ce qui permet une déformation plus ductile et limite la propagation de fissure.

Il est toutefois important d'aborder les cas où on observe l'absence d'endommagement, en particulier pour les échantillons avec un grand diamètre de vis. Lors de la reconstruction tomographique, un filtre numérique est appliqué afin de corriger les artefacts générés par la forte différence de densité entre le bois et la vis. Cette correction est nécessaire pour obtenir une reconstruction exploitable mais peut potentiellement masquer des endommagements de faible amplitude autour de la vis. Cependant, cette limite ne remet pas fondamentalement en cause les conclusions. En effet, des fissurations restent observables avec des vis de grand diamètre dans certaines configurations, prouvant ainsi que le filtre ne supprime pas les endommagements significatifs. Si des fissurations sont masquées dans les cas où aucun dommage n'est détecté, il est raisonnable de supposer qu'il s'agit de dommages de très faible ampleur.

5.3 Résistance à l'arrachement

La densification du peuplier améliore nettement sa résistance à l'extraction. Le paramètre d'arrachement progresse de 20,0 à 31,1 N/mm^2 , soit une hausse de 55,5 %, tandis que le paramètre énergétique augmente de manière bien plus importante avec une augmentation de 329 %. Ces deux indicateurs reflètent des mécanismes distincts que la densification influence.

L'augmentation du paramètre d'arrachement reflète la hausse de la résistance mécanique que le bois densifié oppose au glissement de la vis. Dans le peuplier non densifié, la structure poreuse offre moins de matière pour l'ancrage du filet. La densification entraîne une compaction des parois cellulaires et augmente la surface de contact effective entre le filet et le bois, mobilisant davantage de matière autour du filet. La résistance locale au

cisaillement des fibres est ainsi renforcée lors du glissement de la vis.

Pour ce qui est du paramètre énergétique, la différence observée s'explique en grande partie par les courbes d'extraction observées. Le peuplier densifié présente un profil force-déplacement nettement plus étalé que celui du peuplier non densifié, avec un pic de force atteint plus tardivement. Ce comportement est cohérent avec la présence de fissures pré-existantes observées par tomographie. Ces fissures constituent des sites de dissipation énergétique supplémentaires lors de l'arrachement. La propagation progressive de la rupture, au lieu d'une fracture nette, mobilise une plus grande quantité d'énergie. Ce comportement est lié à une ténacité qui semble supérieure. Ce concept sera discuté plus en détail dans la section 5.5.

La comparaison avec le bouleau éclaire davantage ce mécanisme. Bien que le bouleau présente un paramètre d'arrachement légèrement supérieur ($34,3 \text{ N/mm}^2$ contre $31,1 \text{ N/mm}^2$), son paramètre énergétique est inférieur à celui du peuplier densifié ($22,7 \text{ mJ/mm}^2$ contre $39,5 \text{ mJ/mm}^2$). L'absence de fissures localisées dans le bouleau se traduit par un comportement en extraction qui dissipe moins d'énergie. Paradoxalement, les fissures qui fragilisent le peuplier densifié lors de l'insertion de la vis deviennent un mécanisme de dissipation d'énergie favorable lors de son extraction. Ce résultat suggère que la présence de fissurations, liées à la densification, confère au peuplier densifié une ténacité apparente supérieure à celle du bouleau dans ce mode de sollicitation. Ces comparaisons sont toutefois faites sur des échantillons d'épaisseurs différentes (50 mm pour le peuplier non densifié et le bouleau contre environ 30 mm pour le peuplier densifié, en fonction du *set recovery*). Une analyse complémentaire présentée dans l'annexe E.2 confirme que cette variation d'épaisseur n'affecte pas les résultats obtenus.

5.4 Variabilité des résultats

La variabilité observée dans les résultats constitue une source d'incertitude et mérite d'être analysée en détail, tant pour les mesures de couple que pour les paramètres d'arrachement.

Une première cause peut être attribuée à la variabilité inter et intra-planche. Les échantillons de peuplier densifié proviennent de trois planches d'origine distinctes (A, B et C), tandis que les échantillons de bouleau sont tous issus d'une seule planche (D). Cette différence d'origine engendre une variabilité structurelle plus importante pour le peuplier densifié. La densité initiale, la largeur des cernes, l'angle des cernes et la proportion de bois de printemps et de bois d'été varient d'une planche à l'autre et influencent directement la réponse mécanique lors du vissage et de l'extraction. Au sein d'une même planche,

une variabilité intra-planche est également observable, comme l'illustrent les résultats de la planche C dans l'annexe F.1. Deux échantillons issus de la même planche peuvent présenter des couples d'insertion et des paramètres d'arrachement sensiblement différents.

La variabilité des résultats peut également être liée au procédé de densification. Le ratio de compression obtenu varie entre échantillons, même pour des paramètres de densification identiques (annexe A.2). Cette variabilité résulte de l'hétérogénéité initiale des planches mais aussi des taux d'humidité à la sortie du prétraitement qui varient entre 15 et 20 %. Un ratio de compression plus élevé mène à une densification plus importante qui se répercute directement sur les propriétés mécaniques. Cette dispersion du ratio de compression contribue à l'écart-type plus élevé observé pour le peuplier densifié dans les paramètres d'arrachement et énergétique.

Le dispositif de mesure de couple conçu pour cette étude introduit aussi une source de variabilité malgré sa calibration. La cellule de charge à jauges de contrainte est légèrement sensible aux variations thermiques de l'environnement. Des sessions de vissages prolongées ou réalisées à des moments différents peuvent être sujettes à des variations de température. Ceci peut introduire une légère dérive du zéro du capteur et apporter une source d'erreur sur la mesure de couple.

Enfin, pour limiter l'impact de ces sources de variabilité, un conditionnement strict et une vérification de l'équilibre hygroscopique ont été appliqués à l'ensemble des échantillons avant les essais. Cette précaution ne supprime pas la variabilité liée à la structure du bois mais permet de limiter les biais introduits par des causes extérieures.

5.5 Estimation de la ténacité par vissage

Les différentes fissurations observées sur le peuplier densifié lors du vissage ouvrent la voie à une étude de sa ténacité. Cette section vise à proposer une estimation de cette propriété, définie comme la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure [59].

Dans la configuration d'un vissage radial, la fissure est sollicitée en Mode I (ouverture). Le facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} peut être estimé par la relation :

$$K_{Ic} = \sqrt{G_{Ic}E} \quad (5.1)$$

où G_{Ic} représente le taux de restitution d'énergie, soit l'énergie nécessaire pour créer une unité de surface de fissure.

Une première approche consiste à isoler l'énergie liée à la fissuration lors du processus de vissage en intégrant le couple sur l'angle parcouru. En comparant deux essais de densités similaires, l'un présentant une fissure et l'autre non, le surplus énergétique pourrait, en théorie, correspondre à la fissuration observée par tomographie. Toutefois, le vissage est un processus mécanique complexe où le couple résulte aussi du frottement et de la déformation plastique locale. Le bruit de mesure et cette dépendance de différents paramètres rend l'isolement de l'énergie de rupture trop imprécis par cette méthode. On observe des énergies de l'ordre du Joule pour des surfaces de fissuration de moins de 200 mm², menant à des valeurs de G_{Ic} aberrantes.

Une alternative plus robuste repose sur l'analyse des courbes d'extraction. Cette méthode permet d'isoler le travail de rupture en calculant l'énergie totale jusqu'à la rupture et en y soustrayant l'énergie élastique (déterminée par la zone linéaire de la courbe force-déplacement mise en évidence sur la Figure 5.1). Bien que cette énergie résiduelle englobe encore une part de friction, elle offre une estimation plus précise du travail de séparation des fibres. En couplant cette mesure énergétique aux dimensions des fissures observées par tomographie avant extraction, il devient possible d'estimer une ténacité résiduelle. Le terme "résiduelle" traduit le fait que la surface de fissure est mesurée par tomographie avant l'extraction, ce qui se rapproche conceptuellement d'un essai sur éprouvette pré-fissurée. En raison des énergies parasites non liées à la fissure, cette approche fournit une borne supérieure de G_{Ic} , dont la valeur absolue reste discutable, mais qui constitue un indicateur comparatif cohérent entre échantillons. On obtient les valeurs moyennes présentées dans la Table 5.1. Ces valeurs semblent particulièrement élevées traduisant le fait que l'énergie considérée est trop importante. Le taux de restitution d'énergie du bois en mode I est typiquement de l'ordre de 10² J/m². À titre d'exemple, on obtient une valeur de G_{Ic} de 250-290 J/m² pour de l'épicéa [60]. Cette approche montre cependant qu'avec la même méthode de calcul, la densification semble améliorer la ténacité du peuplier. À densité équivalente, le peuplier densifié présente également une ténacité apparente supérieure à celle du bouleau. Il est à noter que pour le peuplier non densifié, la valeur obtenue se base sur une unique observation de fissuration. Ce résultat est donc à interpréter avec plus de précautions.

	Peuplier non densifié	Peuplier densifié	Bouleau
$\bar{G}_{Ic}$ [J/m ²]	2443,12	7726,34	3829,83

TABLE 5.1 – Estimation des valeurs moyennes de G_{Ic} pour les différents bois sur base d'une méthode expérimentale d'extraction de vis

Pour estimer une réelle ténacité, il serait nécessaire d'isoler l'énergie liée à la propagation de fissure, d'analyser à nouveau les fissurations par tomographie après l'extraction et de comparer les résultats avec ceux obtenus avant l'extraction.

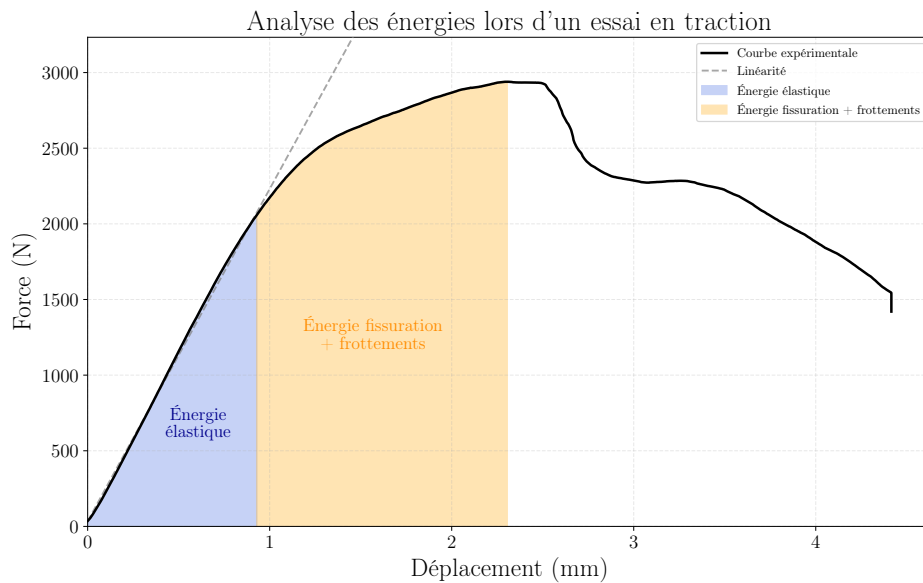


FIGURE 5.1 – Énergies d'extraction lors d'un essai d'arrachement de vis sur un échantillon de peuplier densifié

5.6 Comportement global et implications pratiques

La densification du peuplier produit un matériau avec des performances au vissage supérieures à celles du peuplier naturel. Le couple d'insertion est multiplié par près de deux, la résistance à l'arrachement augmente de 55 % et le paramètre énergétique est plus que triplé. Ces améliorations en font un candidat sérieux pour des applications structurales nécessitant des fixations fiables dans un bois initialement léger et à croissance rapide. Toutefois, la densification introduit un risque de fissuration lors de l'insertion de la vis qui est absent dans le peuplier non densifié.

Pour des applications industrielles où la densité est un paramètre important, la comparaison avec le bouleau permet de mieux positionner le peuplier densifié. Pour des applications soumises à des charges statiques (assemblages de charpente), le peuplier densifié présente un comportement globalement comparable à celui du bouleau. Son paramètre d'arrachement légèrement plus faible (31,1 contre 34,3 N/mm^2) reste dans le même ordre de grandeur et la différence n'est pas statistiquement significative. En revanche, le peuplier densifié se distingue dans les applications où la capacité à absorber de l'énergie est déterminante. C'est le cas notamment pour les assemblages soumis à des chargements dynamiques ou cycliques (chocs, vibrations, cycles de dilatation thermique). Dans ce contexte, le peuplier densifié possède un avantage concret avec un paramètre énergétique plus important que celui du bouleau.

Sur base des résultats obtenus, quelques recommandations pratiques peuvent être

formulées. L'utilisation de vis de petit diamètre (3 mm) doit être envisagée avec précaution car c'est dans cette configuration que les fissures localisées sont les plus étendues. Une vitesse de vissage plus élevée tend à réduire l'endommagement grâce au ramollissement thermique de la lignine. Enfin, le recours à un pré-perçage mériterait d'être évalué pour le peuplier densifié, notamment pour les grands diamètres de vis.

Les résultats obtenus montrent que la densification du peuplier améliore certaines de ses propriétés. Le peuplier densifié peut par ailleurs rivaliser avec des bois de densité équivalente, voire les surpasser dans certains contextes. Ceci constitue un résultat encourageant pour la valorisation des essences à faible densité.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus pour les trois essences étudiées. La densification du peuplier modifie son comportement face au vissage lors de chacun des essais effectués.

Elle augmente significativement le couple d'insertion en raison de la compaction des parois cellulaires qui s'opposent plus fortement à la pénétration du filet. Elle introduit cependant un risque de fissuration localisée lié aux contraintes résiduelles lors du procédé. Cette fragilisation contraste avec les performances en extraction, où le peuplier densifié surpasse le bouleau de densité équivalente, notamment grâce à un paramètre énergétique nettement supérieur. Ce résultat paradoxal s'explique par le rôle dissipatif des fissures lors de l'arrachement et par une ténacité qui semble supérieure.

La comparaison avec le bouleau illustre qu'à densité égale, ce paramètre seul ne détermine pas son comportement au vissage. La modification de la structure interne lors de la densification joue également un rôle déterminant.

Chapitre 6

Conclusion

Face au changement climatique et à la nécessité de diversifier nos forêts, le peuplier densifié représente une piste prometteuse en raison de sa croissance rapide malgré sa faible densité initiale. Sa densification par procédé thermo-hygro-mécanique permet d'en améliorer significativement les propriétés mécaniques, le rapprochant de bois naturellement plus denses comme le bouleau. Cependant, si les effets de la densification sur la dureté, les propriétés en flexion ou en compression sont relativement bien documentés, son effet sur le comportement au vissage restait peu exploré.

Pour y répondre, une démarche expérimentale en trois parties a été mise en place. Le couple d'insertion a été mesuré dans un premier temps à l'aide d'un dispositif instrumenté développé spécifiquement pour cette étude, suivi d'une analyse tomographique de l'endommagement interne généré par le vissage, puis d'essais de résistance à l'arrachement. Ces essais ont été menés sur du peuplier non densifié, du peuplier densifié, et du bouleau de densité naturelle comparable, afin de distinguer les effets propres à la densification de ceux liés à la densité seule.

Les résultats montrent que la densification modifie profondément le comportement du bois face au vissage. Le couple d'insertion augmente significativement avec la densité et le diamètre de vis est le facteur le plus déterminant parmi les paramètres testés. L'analyse tomographique révèle que la densification s'accompagne d'un risque accru de fissuration localisée. Ce comportement est lié aux contraintes résiduelles introduites lors du procédé de densification. La comparaison avec le bouleau qui présente une structure plus homogène montre que ce n'est pas la densité seule qui dicte l'endommagement. Enfin, la densification améliore considérablement la résistance à l'extraction. Le paramètre d'arrachement progresse d'environ 55 %, tandis que le paramètre énergétique augmente de plus de 300 %. Ce dernier résultat, a priori paradoxal au vu des fissurations créées lors du vissage et observées par tomographie, s'explique par le rôle dissipatif des fissures lors de l'extraction de la vis.

Cette étude comporte néanmoins certaines limites qu'il convient de souligner. Le plan d'expérience a mené à des essais réalisés sur un nombre d'échantillons restreint. Combiné à la variabilité naturelle de la structure du bois, cela limite la portée statistique de certains résultats. Le dispositif de vissage reste par ailleurs un prototype dont la répétabilité pourrait encore être améliorée. Des erreurs potentielles peuvent être liées à la déformation mécanique ou aux variations de température lors des essais. Les essais se sont également concentrés sur une gamme de vis relativement étroite et dans une direction de vissage principalement radiale, ce qui restreint la généralisation des conclusions à d'autres configurations.

Plusieurs perspectives se dégagent de ce travail pour en approfondir les résultats. La première concerne l'élargissement de la gamme de vis testées. Les essais ont mis en évidence une relation entre le diamètre, le couple et l'endommagement. La plage de diamètres explorés étant limitée, tester des vis de plus grand diamètre permettrait de mieux cerner l'existence d'un seuil au-delà duquel la fissuration devient critique pour les applications visées. Étendre les essais à d'autres types de vis, tels que des tirefonds, permettrait également de tirer des conclusions pour des applications plutôt structurelles. D'un autre côté, l'effet du pré-perçage mériterait aussi d'être étudié. En réduisant les contraintes lors de l'insertion, il pourrait limiter la fissuration tout en préservant ou améliorant la résistance à l'arrachement.

Une deuxième piste plutôt liée au comportement mécanique concerne la ténacité du bois densifié. Les résultats sur le paramètre énergétique suggèrent que la densification modifie la capacité du matériau à dissiper l'énergie en fonction des fissurations présentes. Une caractérisation rigoureuse de la ténacité avec des essais de mécanique de la rupture spécifiques permettrait de quantifier cet effet et d'établir des modèles prédictifs de fissurations lors du vissage.

Enfin, il serait pertinent d'étendre l'étude à d'autres essences densifiées, ainsi qu'à d'autres directions de vissage et configurations d'assemblage. Cela permettrait de construire une base de données plus complète et d'avoir une meilleure compréhension du comportement du bois densifié.

Ainsi, ce travail aura montré que le peuplier densifié est un matériau aux propriétés prometteuses, capable de rivaliser avec des essences naturellement plus denses. Il reste encore beaucoup à apprendre de lui pour exploiter pleinement son potentiel au service d'une filière bois plus diversifiée et plus durable.

Usage de l'Intelligence Artificielle

Des outils d'intelligence artificielle (ChatGPT, Gemini) ont été utilisés dans le cadre de la réalisation de ce travail. Leur usage s'est limité à des tâches de relecture et de reformulation visant à améliorer la fluidité et la clarté des propos, à la mise en forme de graphiques à partir des données obtenues, ainsi qu'à une assistance pour la mise en page L^AT_EX.

L'utilisation de ces outils avait pour objectif d'améliorer la lisibilité du document et la productivité lors de la réalisation de ce travail. L'ensemble du contenu retravaillé avec l'aide de l'IA a fait l'objet d'une vérification systématique, afin de garantir que le fond des propos reste entièrement sous contrôle et n'ait pas été modifié.

Bibliographie

- [1] HOUT INFO BOIS, “*Quel est le rôle de la forêt dans la lutte contre le changement climatique ?*” <https://www.houtinfobois.be/foret-changement-climatique/>.
- [2] FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, “*Changement du climat et aménagement durable des forêts,*” <https://www.fao.org/4/t0843f/t0843f08.htm>.
- [3] OSSABOIS, “*Prendre soin des forêts pour lutter contre le réchauffement climatique !*” <https://www.ossabois.fr/actualites/evenement/forets-lutter-contre-rechauffement-climatique/>.
- [4] NATURE, “*Warning from the tropics : rainforests are losing their ability to help humanity,*” <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00624-1>.
- [5] WWF, “*Comprendre l'impact de la forêt sur le climat,*” <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/comprendre-limpact-de-la-foret-sur-le-climat>.
- [6] WWF, “*Les forêts belges face au changement climatique,*” <https://wwf.be/fr/actualites/les-forets-belges-face-au-changement-climatique>.
- [7] S. Huuskonen, T. Domisch, L. Finér, J. Hantula, J. Hynynen, J. Matala, J. Miina, S. Neuvonen, S. Nevalainen, P. Niemistö, A. Nikula, T. Piri, J. Siitonen, A. Smolander, T. Tonteri, K. Uotila, and H. Viiri, “What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in fennoscandia ?” *Forest Ecology and Management*, vol. 479, 2021.
- [8] SRFB, “*Les forêts de Belgique,*” <https://srfb.be/informations-sur-les-forets/les-forets-de-belgique/>.
- [9] Filière Bois Wallonie, “*PanoraBois 2024,*” https://www.filiereboiswallonie.be/sites/default/files/media-documents/FBW%20-%20PanoraBois%202024_0.pdf.
- [10] Service Public de Wallonie Environnement, “*Forêts,*” https://etat.environnement.wallonie.be/files/Infographie_2021/PDF/10.For%C3%AAts.pdf, 2021.
- [11] H. Jactel, J. Bauhus, J. Boberg, D. Bonal, B. Castagneyrol, B. Gardiner, and M. H. M. Menz, “Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances,” *Current Forestry Reports*, vol. 3, no. 3, pp. 223–243, 2017.

- [12] A. Felton, M. Lindbladh, J. Brunet, and O. Fritz, “Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands : An assessment of the potential benefits for forest biodiversity in northern europe,” *Forest Ecology and Management*, vol. 260, pp. 939–947, 2010.
- [13] SPW Énergie – Wallonie, “*Bois et bioénergie*,” <https://energie.wallonie.be/home/energies-vertes/bioenergie/bois.html>.
- [14] Bois.com, “*Produits bois pour le bâtiment*,” <https://www.bois.com/bois/materiaux/transformes/produits-bois-batiment>.
- [15] Hout Info Bois, “*Bois : Guide pour le bon usage*,” <https://www.houtinfo Bois.be/wp-content/uploads/2023/02/Bois-Guide-pour-le-bon-usage-%C2%A9-Hout-Info-Bois.pdf>, 2023.
- [16] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material*, ser. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2021.
- [17] J. L. Lepetit N’Guessan, F. Niamké Bobelé, J. C. Yao N’Guessan, and N. Amusant, “Wood extractives : Main families, functional properties, fields of application and interest of wood waste,” *Forest products journal*, vol. 73, no. 3, pp. 194–208, 2023.
- [18] F. F. P. Kollmann, *Principles of Wood Science and Technology*. Berlin : Springer, 1968.
- [19] M. Erfani Jazi, G. Narayanan, and F. Aghabozorgi, “Structure, chemistry and physicochemistry of lignin for material functionalization,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, p. 1094, 2019.
- [20] A. André, “Fibres for strengthening of timber structures,” Luleå University of Technology, 2014.
- [21] G. Koczan, Z. Karwat, and P. Kozakiewicz, “An attempt to unify the brinell, janka and monnin hardness of wood on the basis of meyer law,” *Journal of Wood Science*, vol. 67, 2021.
- [22] F. Arriaga, X. Wang, G. Íñiguez González, D. F. Llana, M. Esteban, and P. Niemz, “Mechanical properties of wood : A review,” *Forests*, vol. 14, p. 1202, 2023.
- [23] S. Yan, S. Eichhorn, and E. Toumpanaki, “Numerical simulation of transverse compression and densification of wood,” *Wood Science and Technology*, vol. 56, pp. 1–21, 07 2022.
- [24] Wikipedia contributors, “*Peuplier*,” <https://fr.wikipedia.org/wiki/Peuplier>, 2026.
- [25] Wikipedia contributors, “*Birch*,” <https://en.wikipedia.org/wiki/Birch>, 2026.
- [26] Hout Info Bois, “*Peuplier*,” <https://www.houtinfo Bois.be/essences/peuplier/>.

- [27] J.-M. Leban, S. Boulouet, M. Lacarin, M.-C. Trouy *et al.*, “Xylodensmap : Les principales caractéristiques des bois des forêts françaises – peuplier cultivé,” February 2022.
- [28] Recherche Forestière, “*Le bouleau : une essence d’avenir*,” <https://www.rechercheforestiere.be/index.php/actions/30-le-bouleau-une-essence-d-avenir>.
- [29] A. Koubaa, W. Belhade, and S. Migneault, “Transformation des bois de trituration de feuillus durs : revue de littérature portant sur les produits et les marchés des essences de bouleau blanc,” Rapport final préparé pour Signature Bois Laurentides, May 2015.
- [30] EcoTree, “*Bouleau*,” <https://ecotree.green/offres/essence/bouleau>.
- [31] D. Sandberg, A. Kutnar, and G. Mantanis, “Wood modification technologies - a review,” *iForest - Biogeosciences and Forestry*, vol. 10, pp. 895–908, 12 2017.
- [32] L. Bosmans, “Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du bois densifié par procédé thermo-hydromécanique,” Master’s thesis, École polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain, 2023.
- [33] P. Franquin, “Étude expérimentale des paramètres opératoires de la densification thermo-hydromécanique sur les performances du peuplier belge : vers une valorisation durable du bois local de faible densité,” Master’s thesis, École polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain, 2025.
- [34] J. P. Cabral, B. Kafle, M. Subhani, J. Reiner, and M. Ashraf, “Densification of timber : a review on the process, material properties, and application,” *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [35] J. Brauns and K. Rocens, “Modification of wood : Mechanical properties and application,” *Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, pp. 1–9, 2007.
- [36] P. Navi and F. Girardet, “Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood,” *Holzforschung*, vol. 54, pp. 287–293, 01 2000.
- [37] X. Huang, M. Jiang, W. Yu, and Y. Yu, “Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*populus tomentosa*),” *Journal of Wood Science*, vol. 63, 09 2017.
- [38] P. Navi and A. Pizzi, “Property changes in thermo-hydro-mechanical processing,” *Holzforschung*, vol. 69, 09 2015.
- [39] D. Sandberg and P. Navi, “Introduction to thermo-hydro-mechanical (thm) wood processing,” 2007.
- [40] K. Hoelz, L. Kleinhans, and S. Matthiesen, “Wood screw design : influence of thread parameters on the withdrawal capacity,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 79, pp. 773–784, 2021.

- [41] Essentra Components, “*What are screws ? Heads, drives and threads,*”
<https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/solutions/fastening-components/what-are-screws-heads-drives-and-threads>.
- [42] P. Dietsch and R. Brandner, “Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – a state-of-the-art report,”
Construction and Building Materials, vol. 97, pp. 78–89, 2015, special Issue : Reinforcement of Timber Structures.
- [43] Wikipedia contributors, “*List of screw drives,*”
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_screw_drives, 2026.
- [44] Wikipedia contributors, “*Torx,*” <https://en.wikipedia.org/wiki/Torx>, 2026.
- [45] D. Rammer, *Wood : Mechanical Fasteners*, 12 2001, pp. 9665–9668.
- [46] ERIKS, “*DIN7997Z – Vis à bois tête fraisée empreinte cruciforme Pozidriv, acier inoxydable A2,*” <https://shop.eriks.be/fr/materiel-de-fixation-vis-vis-a-bois-vis-a-bois-a-tete-fraisee/din7997z-vis-bois-t-te-frais-e-empreinte-cruciforme-pozidriv-acier-inoxidable-a2-pr-ec000888-0020-csc/>.
- [47] Allen Brothers, “*Pozi Counter Sunk Self Tapping Screw,*”
<https://www.allenbrothers.co.uk/product/pozi-counter-sunk-self-tapping-screw/>.
- [48] Mr. Bricolage, “*Tirefond à tête hexagonale DIN571 Ø 8 x 110 mm – 50 pièces,*”
<https://www.mr-bricolage.be/vis/30489-tirefond-a-tete-hexagonale-din571-o-8-x-110-mm-50-pieces-5410439485029.html>.
- [49] U. Nürnberger and E. Köse, “Durability of galvanised fasteners in timber construction,” *Materials and Corrosion*, vol. 71, 02 2020.
- [50] European Organisation for Technical Assessment (EOTA), “European technical assessment eta-11/0030,” 2020.
- [51] T. Dang Khai and J. Gi Young, “Withdrawal capacity and strength of self-tapping screws on cross-laminated timber,” *Structures*, vol. 37, pp. 772–786, 2022.
- [52] M. A. H. Mirdad, A. Jucutan, R. Khan, J. Niederwestberg, and Y. H. Chui, “Embedment and withdrawal stiffness predictions of self-tapping screws in timber,”
Construction and Building Materials, vol. 345, p. 128394, 2022.
- [53] K. Jung, C. Zhang, R. Harris, and W.-S. Chang, “Drive-in torque for self-tapping screws into timber,” *Construction Materials*, vol. 175, 04 2019.
- [54] O. Tor, X. Yu, and J. Zhang, “Characteristics of torques for driving screws into wood-based composites,” *Wood and fiber science : journal of the Society of Wood Science and Technology*, vol. 47, pp. 2–16, 01 2015.
- [55] K. Hölz, P.-T. Dörner, J. Hohlweg, and S. Matthiesen, “Influence of thread parameters on the withdrawal capacity of wood screws to optimize the thread geometry,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 80, 06 2022.

- [56] D. Hoffmeyer and J. Munch-Andersen, “Withdrawal capacity of screws in plywood and manufacturer dependencies,” *Engineering Structures*, vol. 321, p. 118973, 2024.
- [57] Bureau de Normalisation (NBN), “*NBN EN 15737 : Structures en bois - Méthode d’essai - Force de torsion et résistance au vissage*,” Norme belge, 2009.
- [58] Bureau de Normalisation (NBN), “*NBN EN 1382 :2016 Structures en bois - Méthodes d’essai - Résistance à l’arrachement dans le bois d’éléments de fixation*,” Norme belge, 2016.
- [59] Wikipedia contributors, “*Ténacité*,” <https://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9nacit%C3%A9>, 2026.
- [60] S. Aicher, “Process zone length and fracture energy of spruce wood in mode-i from size effect,” *Wood and Fiber Science*, vol. 42, pp. 237–247, 2010.
- [61] Wikipedia contributors, “*Load cell*,” https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell, 2026.
- [62] FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc., “*How a Load Cell Works*,” <https://www.futek.com/how-a-load-cell-works>.
- [63] A. S. Prabuwno, H. Akbar, and W. Usino, “Pc based weight scale system with load cell for product inspection,” in *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Technology (IC CET)*, vol. 1, January 2009, pp. 343–346.
- [64] Harvard University, “*Bremsstrahlung and X-rays*,” <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/bremsstrahlung-and-x-rays>.
- [65] J. T. Bushberg, J. A. Seibert, E. M. Leidholdt, and J. M. Boone, *The Essential Physics of Medical Imaging*, 3rd ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

Annexes

A Caractéristiques des échantillons

A.1 Origine et densité des échantillons

Le tableau A.1 reprend les caractéristiques des différents échantillons testés dans cette étude. L'angle de cerne correspond à l'angle formé entre l'horizontale et la tangente au cerne. Un angle de 0° correspond donc à une direction de compression et de vissage parfaitement radiale. Selon l'essence, tous les échantillons ne proviennent pas de la même planche. Les numéros manquants dans les identifiants correspondent à des échantillons qui n'ont pas été retenus suite à un claquage lors de la densification, ou présentant un trop grand écart de densité avec les échantillons de bouleau, ou gardé comme échantillon de réserve. Les identifiants avec un "V" correspondent aux échantillons destinés au vissage longitudinal. Ces derniers ont été coupés en deux pour permettre un vissage sur chaque face latérale de l'échantillon initial.

ID	Densifié	Angle de cerne [°]	Planche d'origine	Essence	Densité finale [kg/m³]
A1	Oui	13	A	Peuplier	593,27
A2	Oui	6			617,86
A7	Oui	4			607,60
A12	Oui	5			595,25
A4V	Oui	/			580,15
A11V	Oui	/			575,60
A13	Non	11			359,52
A14	Non	13			393,67
A15	Non	15			382,34
A16	Non	14			363,94
B3	Oui	0	B		600,05
B4	Oui	4			661,93
B8	Oui	4			658,83
B10	Oui	10			662,72
B11	Oui	19			635,61
B9V	Oui	/			582,26
C1	Oui	0	C		623,75
C4	Oui	12			670,59
C6	Oui	1			624,38
C5V	Oui	/			668,03
C7	Non	16			624,38
C8	Non	13			624,38
C10	Non	6			624,38
C11	Non	12			624,38
C12	Non	6			624,38
C13	Non	14			624,38
C14	Non	11			624,38
C15	Non	6			624,38
D1	Non	19	D	Bouleau	657,31
D2	Non	12			642,32
D3	Non	32			649,10
D4	Non	12			633,39
D5	Non	9			651,25
D6	Non	13			626,46
D7	Non	13			652,46
D8	Non	6			650,70
D9	Non	10			647,99
D10	Non	19			618,36
D11	Non	2			619,50
D12	Non	1			622,11
DV1	Non	/			615,56
DV2	Non	/			638,97
DV3	Non	/			644,57
DV4	Non	/			642,63

TABLE A.1 – Caractéristiques des échantillons utilisés

A.2 Paramètres de densification

Plusieurs paramètres du procédé de densification ont été ajustés au cours du processus afin d'atteindre une densité comparable à celle du bouleau. Le tableau A.2 reprend l'ensemble des paramètres utilisés, ainsi que le taux d'humidité mesuré à la sortie de la cellule de pré-traitement et le ratio de compression obtenu. L'ensemble des échantillons densifiés produits n'a toutefois pas été retenu pour les différents essais. Certains ont été écartés en raison de claquage apparus lors de la relaxation, tandis que d'autres présentaient des densités trop éloignées de celle visée.

ID	Vitesse de compression [mm/min]	Écartement final des plateaux [mm]	Temps de relaxation [s]	Taux d'humidité [%]	Ratio de compression [%]	Claquage	Densité finale [kg/m ³]
A1	200	23,8	300	17,95	42,41	Non	593,27
A2	200	23,8	300	15,86	45,88	Non	617,56
A3	200	23,8	300	15,63	45,24	Oui	622,37
A4	200	24,8	300	16,58	41,59	Non	580,15
A5	200	24,8	300	17,76	39,24	Non	568,32
A6	200	24,8	300	19,45	38,12	Oui	549,72
A7	200	24,2	300	15,11	43,87	Non	607,60
A8	200	24,2	300	17,08	42,48	Non	591,41
A9	200	24,2	300	19,60	40,39	Oui	565,30
A10	200	23,8	300	18,25	41,55	Oui	565,00
A11	200	23,8	300	17,39	43,06	Non	575,60
A12	200	23,8	300	17,48	42,58	Non	594,25
B1	200	23,8	300	18,15	37,17	Oui	635,24
B2	200	23,8	300	15,63	40,54	Oui	681,62
B3	20	23,8	300	16,65	32,60	Non	600,05
B4	20	23,8	300	15,42	40,44	Non	661,93
B5	20	23,8	300	18,37	37,87	Oui	653,83
B6	20	24,2	300	17,04	41,88	Non	678,10
B7	20	24,7	300	17,81	40,88	Oui	674,98
B8	20	24,7	300	19,31	38,68	Non	652,10
B9	20	24,7	300	18,67	37,10	Non	582,26
B10	20	24,7	300	17,96	37,90	Non	662,72
B11	20	24,7	300	17,16	39,91	Non	635,61
C1	20	27,2	300	17,28	34,09	Non	623,75
C2	20	27,2	300	19,22	33,83	Non	706,45
C3	20	28,0	300	17,32	34,38	Oui	690,17
C4	20	29,5	300	21,03	31,31	Non	670,59
C5	20	27,2	300	18,18	36,43	Non	668,03
C6	20	27,2	300	18,44	32,60	Non	624,38

TABLE A.2 – Paramètres et résultats de la densification

B Dispositif de vissage expérimental

B.1 Version finale

Le dispositif de vissage dans sa version utilisée lors des différents essais de vissage et mesures de couple est présenté sur la Figure B.1.

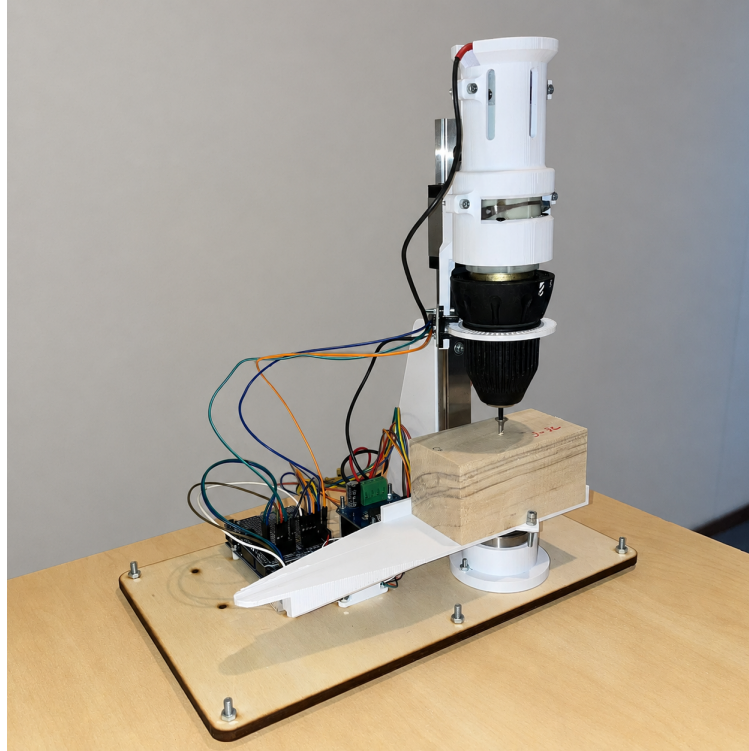


FIGURE B.1 – Dispositif de vissage expérimental

B.2 Mesure de couple

La cellule de charge est constituée d'une poutre en aluminium usinée de manière à concentrer les contraintes mécaniques dans une zone spécifique. Lorsqu'une force est appliquée, la poutre subit une déformation élastique par flexion. Cette déformation reste réversible tant que la force appliquée ne dépasse pas la charge maximale admissible du capteur. Dans ce domaine élastique, la structure reprend sa géométrie initiale lorsque la force est supprimée [61].

Sous l'effet de la flexion, une face de la poutre est soumise à une contrainte de traction tandis que la face opposée est soumise à une contrainte de compression. Les déformations maximales apparaissent dans la zone centrale de la poutre, où sont collées les jauges de contrainte (en blanc sur la Figure B.2a).

Une jauge de contrainte est constituée d'un conducteur métallique en forme de grille.

Lorsque le support se déforme, la jauge subit la même déformation : sa longueur et sa section varient légèrement, ce qui entraîne une modification de sa résistance électrique. Ce principe de déformation est visible sur la Figure B.2b. La variation de résistance électrique étant très faible (de l'ordre de quelques $m\Omega$), elle ne peut pas être mesurée directement avec précision. Pour cette raison, les jauges sont intégrées dans un pont de Wheatstone [62, 61].

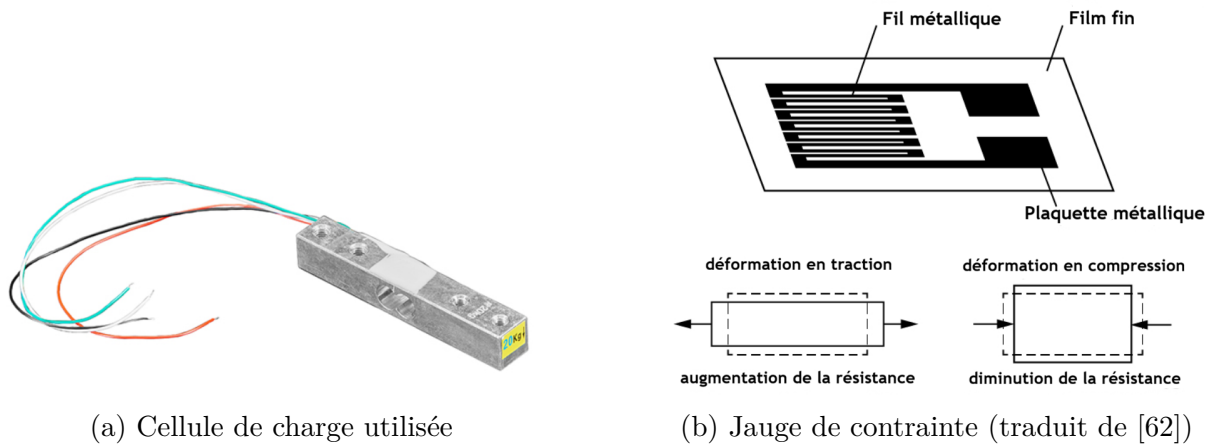


FIGURE B.2 – Cellule de charge et jauge de contrainte

Le pont de Wheatstone est un montage électrique constitué de quatre résistances disposées en pont. Il est représenté dans le schéma à la Figure B.3. Dans une cellule de charge classique, quatre jauges de contrainte sont utilisées : deux situées dans la zone en traction et deux dans la zone en compression. Cette disposition permet d'augmenter la sensibilité du capteur, de compenser automatiquement les effets de la température (qui influencent toutes les jauges de manière similaire) et d'améliorer la stabilité ainsi que la linéarité de la mesure [62, 61].

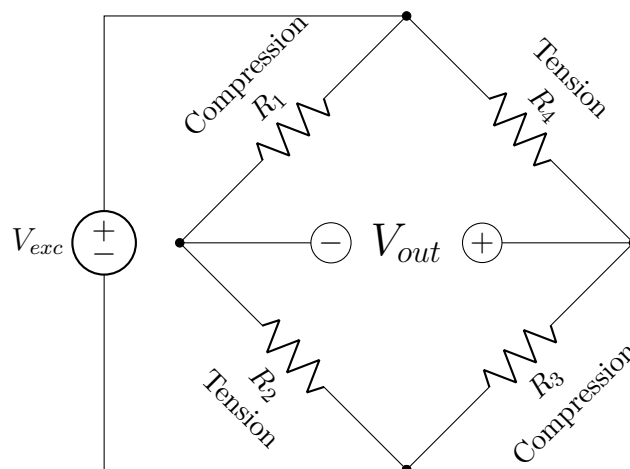
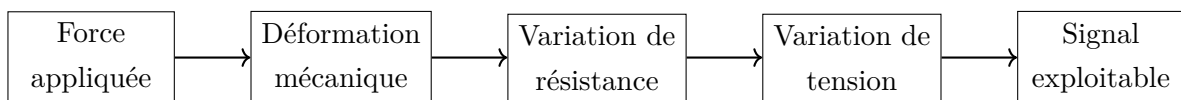


FIGURE B.3 – Pont de Wheatstone, adapté de [61]

Lorsque le pont est alimenté par une tension d'excitation V_{exc} , la déformation des jauges provoque un déséquilibre du pont. Ce déséquilibre génère une tension différentielle de sortie V_{out} , proportionnelle à la variation de résistance, donc à la déformation, et par conséquent à la force appliquée [62, 61, 63].

Dans le domaine élastique de fonctionnement, la relation entre la force appliquée et la tension de sortie est linéaire [63]. La tension de sortie étant généralement très faible (quelques millivolts par volt d'excitation), elle est ensuite amplifiée par un amplificateur d'instrumentation avant d'être convertie en signal numérique pour traitement.

Ainsi, la cellule de charge réalise la conversion électromécanique suivante :



Cette chaîne repose sur une cellule de force d'une capacité de 20 kg, équipée de jauges de contrainte et fournie par *Adafruit Industries LLC*, associée à un module amplificateur HX711. Ce module assure également la conversion analogique-numérique sur 24 bits, permettant ainsi d'amplifier et de numériser directement le signal issu de la cellule de charge avec une résolution élevée. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 10 Hz. À cette fréquence, le bruit électrique est significativement atténué, ce qui améliore la stabilité des mesures, tout en offrant un nombre suffisant de points pour suivre de manière fiable l'évolution de la force mesurée, et par conséquent du couple de réaction.

B.3 Mesure de vitesse

Du fait de la réalisation d'une roue codeuse spécifique, le nombre de pas par tour reste limité en comparaison avec celui d'un encodeur incrémental classique à haute résolution (jusqu'à plusieurs milliers de pas par tour). Cette résolution plus faible peut engendrer des fluctuations instantanées dans le calcul de la vitesse, notamment à faible régime. En effet, une erreur de comptage sur 120 pas entraînera une plus grosse erreur sur la vitesse en comparaison avec un comptage sur 1000 pas par tour. Afin d'obtenir une mesure plus stable et représentative, un lissage numérique de la vitesse calculée a été appliqué. Ce lissage a été réalisé avec une moyenne glissante sur plusieurs échantillons.

Une fois la vitesse connue, un contrôleur PID (proportionnel, intégral, dérivé) a été mis en place pour maintenir la vitesse au niveau de la consigne. Ce dernier est implémenté dans le code Arduino qui contrôle le dispositif de vissage. Les coefficients K_p , K_i et K_d ont été trouvés à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols utilisée en automatique linéaire. De plus, pour atteindre la consigne plus rapidement, un *Feed-Forward* a été appliqué. Au

lieu de laisser le PID “découvrir” la puissance nécessaire en partant de zéro, il reçoit tout de suite la puissance de base (PWM) connue et proche de la puissance requise, et le PID ne s’occupe plus que de corriger les petites erreurs.

Pour vérifier la réactivité du contrôleur, un premier essai, dont les résultats sont présentés à la Figure B.4, a été réalisé lors d’un vissage à vide. Un freinage manuel a été appliqué aux alentours de 5 700 ms afin d’évaluer la réactivité du système. Comme illustré sur le début du graphique, le contrôleur atteint 90 % de la consigne en moins de 200 ms. Ce délai correspond uniquement à la phase initiale d’engagement de la vis dans le matériau. Dès lors, la quasi-totalité du processus de vissage, incluant la formation du filet, s’effectue à vitesse stabilisée. Cette évolution de vitesse met aussi en évidence la capacité du système à maintenir une vitesse quasi constante malgré la perturbation introduite par le freinage manuel. Cela montre que le contrôle mis en place peut garantir des conditions de vissage similaires malgré certaines perturbations.

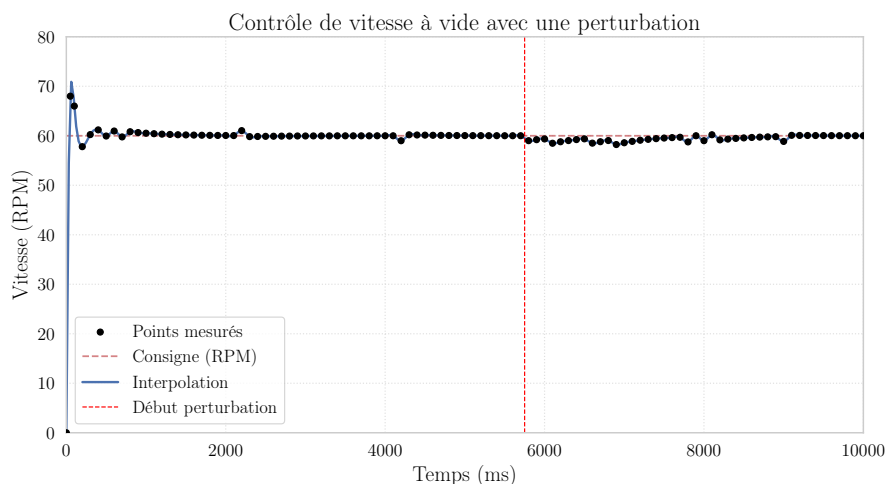


FIGURE B.4 – Évolution de la vitesse sous contrôle PID

C Validité des modèles d’analyse de couple

La validité des modèles utilisés pour l’analyse du couple a été étudiée pour approuver les résultats obtenus. Elle est analysée à l’aide des résidus studentisés, tracés en fonction de leur numéro dans le plan d’expérience. Ceci permet de vérifier l’absence de structures ou tendances systématiques. Ces résultats sont présentés à la Figure C.1.

Pour le peuplier non densifié, presque la totalité des résidus se situent à l’intérieur des limites vertes, correspondant à un intervalle de ± 3 écarts-types et aucun point ne s’approche des limites rouges fixées à ± 6 écarts-types. Aucune valeur aberrante n’est détectée, hormis le douzième résidu qui présente un écart un peu plus important. Il s’agit

du même échantillon qui s'écarte de la tendance d'évolution du couple en fonction du diamètre visible sur la Figure 4.2.

Pour le peuplier densifié et le bouleau, tous les résidus se situent à l'intérieur des limites vertes et aucun point ne s'approche des limites rouges. Tout comme pour le peuplier non densifié, aucune valeur aberrante n'est donc détectée. Les résidus sont distribués autour de zéro sans tendance directionnelle apparente suggérant qu'il n'y a pas de biais systématique dans les modèles. Le peuplier densifié présente la distribution de résidus la plus resserrée autour de zéro avec l'ensemble de ses points dans l'intervalle de ± 2 , ce qui traduit un bon ajustement du modèle pour cette essence.

De manière générale, ces graphiques de résidus ne révèlent pas de valeurs problématiques, ni de tendance observable, ce qui valide l'utilisation des modèles.

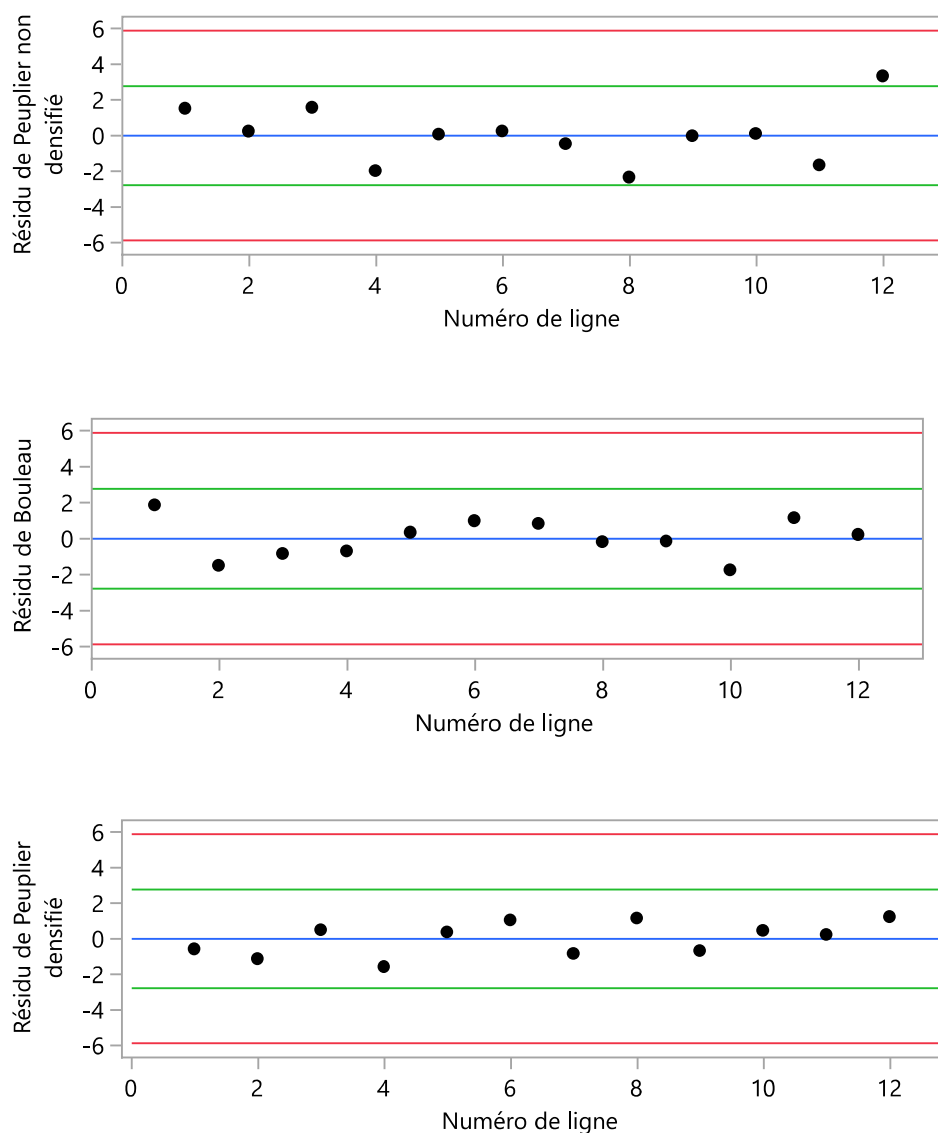


FIGURE C.1 – Résidus studentisés externes des modèles avec limite de 95 % (Bonferroni) en rouge et limites individuelles en vert

D Tomographie et principes de génération de rayons X

Les rayons X sont produits selon deux mécanismes principaux. Le premier repose sur le freinage des électrons, appelé *Bremsstrahlung*. Des électrons sont accélérés vers les atomes constituant la source en cuivre. Lors de leur interaction avec le champ électrique des noyaux de cuivre, ils sont déviés et ralentis, ce qui entraîne une perte d'énergie sous forme de photons X. Ce processus est à l'origine d'un spectre continu de rayonnement.[64, 65]

Le second phénomène apparaît lorsqu'un électron incident éjecte un électron de cuivre. L'atome de cuivre devient alors excité. Un électron d'une couche externe vient combler la lacune créée dans une couche interne, ce qui s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie bien définie. Ce photon correspond à un rayonnement X caractéristique du matériau.[65]

Lors de la reconstruction des images, on suppose généralement que le faisceau de rayons X est monochromatique. En réalité, le faisceau est polychromatique, composé de photons d'énergies variées. Lors de la traversée du matériau, les photons de faible énergie sont plus facilement absorbés que ceux de forte énergie. Ainsi, au fur et à mesure de la propagation, le faisceau perd en photons de basse énergie, ce qui augmente son énergie moyenne. Ce phénomène peut engendrer des artefacts lors de la reconstruction des images, connu sous le nom de *beam hardening*. Afin de limiter cet effet, des filtres sont utilisés pour atténuer les photons de basse énergie et rendre le faisceau plus proche d'un rayonnement monochromatique.[65]

La génération des rayons X dépend ainsi du choix de la source ainsi que des conditions d'accélération des électrons. Pour des échantillons à base de carbone, tel que le bois, les électrons sont typiquement accélérés sous une tension d'environ 80 *kV*, pour une puissance de l'ordre de 30 *W*.

E Essais en traction

E.1 Analyse statistique

Pour déterminer si les différences observées entre les trois essences sont statistiquement significatives, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée. L'analyse a été faite sur les paramètres d'arrachement, et sur les paramètres énergétiques. L'ANOVA teste si au moins un des trois groupes présente une moyenne significativement différente des autres. Lorsque c'est le cas, un test post-hoc de Tukey est appliqué pour identifier précisément

quelles paires d'essences se distinguent. Les résultats sont présentés à la Figure E.1.

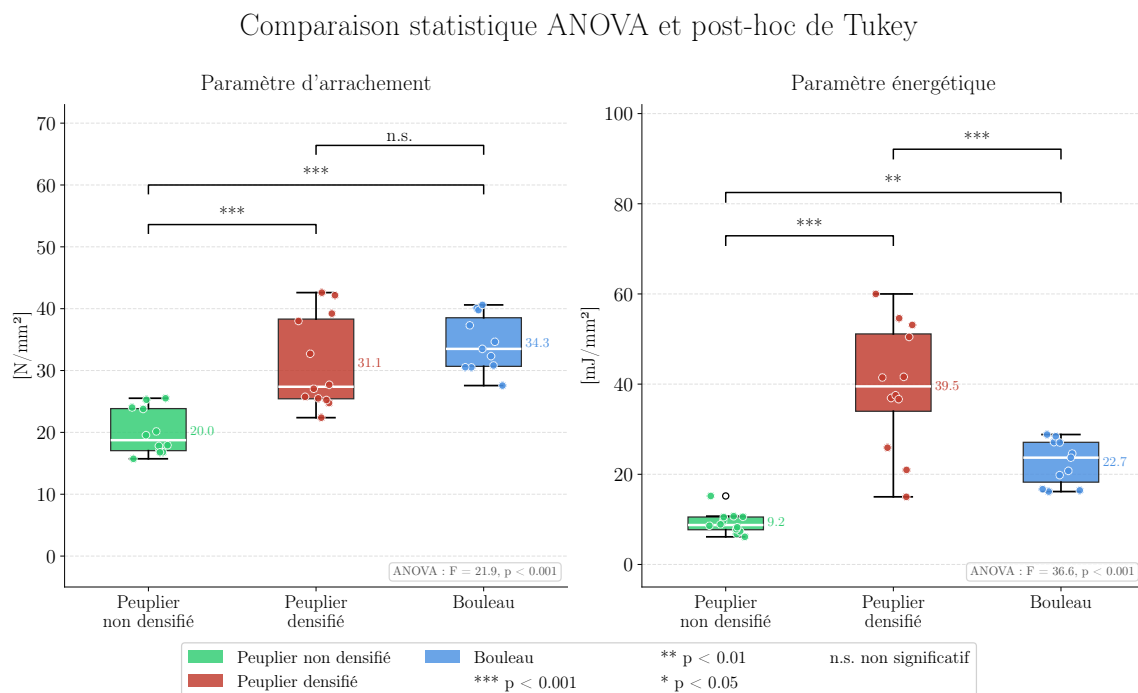


FIGURE E.1 – Comparaison statistique ANOVA et post-hoc de Tukey des paramètres d'arrachement et énergétique sur les trois groupes de bois

Pour le paramètre d'arrachement, l'ANOVA révèle une différence significative entre les trois essences ($F = 21,9$ - $p < 0,001$). Les moyennes ne sont donc pas toutes égales. Le test de Tukey précise ensuite d'où provient cette différence. Le peuplier non densifié et le peuplier densifié présentent une différence significative ($p < 0,001$). On observe le même résultat pour le peuplier non densifié et le bouleau ($p < 0,001$). Cependant, le peuplier densifié et le bouleau ne présente pas une différence de moyenne significative ($p = 0,34$). Ces paramètres d'arrachement sont statistiquement comparables, malgré un écart de 10 % en valeur absolue.

Concernant le paramètre énergétique, l'ANOVA révèle également une différence significative entre les trois essences ($F = 36,7$ - $p < 0,001$). Le test de Tukey indique cette fois que les trois groupes se distinguent significativement les uns des autres. Contrairement au paramètre d'arrachement, le peuplier densifié se distingue donc significativement du bouleau et du peuplier non densifié sur le plan énergétique.

E.2 Épaisseur d'échantillon pour les essais en traction

Pour analyser l'influence de l'épaisseur des échantillons sur les résultats obtenus lors des essais en traction, une comparaison a été réalisée entre des échantillons de bouleau d'une épaisseur de 50 mm et des échantillons de bouleau rabotés à 25 mm d'épaisseur.

Les résultats sont présentés dans la Figure E.2.

Pour le paramètre d'arrachement, aucun effet notable de l'épaisseur n'est observé. Les moyennes des deux groupes sont quasi-identiques, à $32,2 \text{ N/mm}^2$ pour le bouleau 50 mm et $31,7 \text{ N/mm}^2$ pour le bouleau raboté à 25 mm. Un test t de Student montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes ($t = 0,28$ - $p = 0,79$).

Pour le paramètre énergétique, une légère différence de moyenne apparaît entre les deux groupes ($20,9 \text{ mJ/mm}^2$ contre $25,6 \text{ mJ/mm}^2$). Cette différence n'est cependant pas statistiquement significative ($t = -1,33$ - $p = 0,20$). Elle peut être attribuée à la variabilité expérimentale.

Ces observations permettent de conclure que l'épaisseur des échantillons n'a pas d'influence significative sur les paramètres d'arrachement et énergétique mesurés.

Comparaison statistique des paramètres d'arrachement et énergétique et influence de l'épaisseur sur ces paramètres

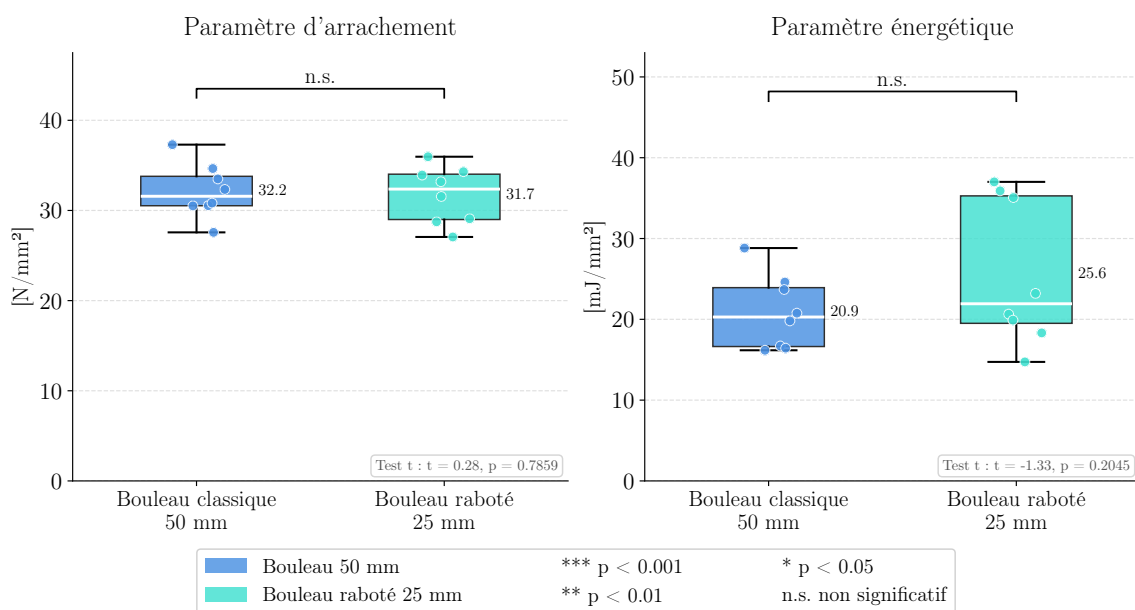


FIGURE E.2 – Comparaison statistique des paramètres d'arrachement et énergétique et influence de l'épaisseur sur ces paramètres

F Ensemble des résultats par échantillons

F.1 Vissage dans la direction radiale

La Table F.1 reprend tous les résultats obtenus pour chaque échantillon avec un rappel de certaines caractéristiques clés telles que la densité, l'angle de cerne ou le ratio de compression pour les échantillons de peuplier densifié. L'énergie de vissage est obtenue en intégrant le couple sur l'angle parcouru (en radian) jusqu'au couple maximum. La première partie est dédiée au peuplier non densifié, la seconde au peuplier densifié et la dernière au bouleau.

ID	Densité [kg/m ³]	CR	Diamètre [mm]	Vitesse [rpm]	Couple max [Nm]	Énergie de vissage [J]	Dommages long filet [mm]	Hauteur fissure sup [mm]	Propag. fissure sup [mm]	Coef. arrachement [N/mm ²]	Coef. énergétique [mJ/mm ²]
C12	446,41	/	3	50	0,42	15,73	0	0	0	25,52	10,57
C10	450,84	/	3	100	0,39	14,58	0	0	0	23,79	8,90
C15	445,13	/	3	150	0,34	6,51	0	0	0	25,28	10,51
C13	456,7	/	4	50	1,1	35,41	2,18	0	0	24,02	8,59
C8	450,9	/	4	100	0,82	17,89	/	/	/	19,55	9,64
A13	359,52	/	4	100	0,52	13,70	/	/	/	16,79	7,34
C11	442,37	/	4	100	0,77	23,60	/	/	/	20,15	10,71
A16	363,94	/	4	100	0,63	16,53	/	/	/	15,73	15,19
C7	443,73	/	4	150	0,58	7,59	0	0	0	17,13	6,75
C14	462,59	/	5	50	1,07	21,18	0	0	0	17,93	6,13
A15	382,34	/	5	100	0,87	24,27	0	0	0	16,78	8,25
A14	393,67	/	5	150	0,97	11,43	0	0	0	17,82	7,82
B10	662,72	37,9	3	50	0,63	26,30	2,29	10,56	8,34	39,21	50,47
B4	661,93	40,44	3	100	0,58	27,20	2,14	10,59	6,22	42,17	53,12
B11	635,61	39,91	3	150	0,56	11,55	2,06	10,22	5,6	32,71	25,90
C4	670,59	31,31	4	50	1,80	32,21	3,23	8,68	7,26	42,60	54,61
C1	623,75	34,09	4	100	1,22	33,31	/	/	/	24,75	15,00
A2	617,86	45,88	4	100	1,11	32,47	/	/	/	27,06	36,92
B3	600,05	32,6	4	100	1,38	38,53	/	/	/	25,75	41,47
A7	607,60	43,87	4	100	1,43	42,30	/	/	/	25,50	37,53
B8	658,83	38,68	4	150	1,42	21,69	3,01	10,01	7,65	38,02	60,00
C6	624,38	32,6	5	50	2,20	53,57	5,14	0	0	27,69	20,97
A1	593,27	42,41	5	100	1,93	41,70	3,02	5,19	4,96	22,38	36,67
A12	595,25	42,58	5	150	1,87	20,97	3,32	0	0	25,23	41,61
D7	652,46	/	3	50	0,64	24,20	2,53	0	0	40,61	27,05
D5	651,25	/	3	100	0,57	24,10	2,01	0	0	39,77	28,43
D3	649,10	/	3	150	0,59	11,74	3,26	0	0	40,08	27,14
D8	650,70	/	4	50	1,38	40,52	5,64	0	0	34,65	24,61
D2	642,32	/	4	100	1,15	32,23	/	/	/	NA	NA
D4	633,39	/	4	100	1,20	38,45	/	/	/	30,51	16,17
D6	626,46	/	4	100	1,34	43,72	/	/	/	33,50	19,81
D12	622,11	/	4	100	1,28	39,70	/	/	/	30,53	16,70
D1	657,31	/	4	150	1,33	21,28	3,61	0	0	37,30	28,82
D9	647,99	/	5	50	1,97	49,91	0	0	0	32,33	20,76
D11	619,50	/	5	100	1,83	45,24	0	0	0	30,82	23,69
D10	618,36	/	5	150	1,59	17,75	0	0	0	27,57	16,43

TABLE F.1 – Résultats globaux de tous les essais

F.2 Vissage dans la direction longitudinale

La Table F.2 reprend les résultats détaillés obtenus lors de la mesure de couple des vissages dans la direction longitudinale. Les échantillons originaux ont été coupés en deux pour permettre un vissage sur la face latérale dans la direction longitudinale.

Peuplier non densifié		Peuplier densifié		Bouleau	
ID	Couple max [Nm]	ID	Couple max [Nm]	ID	Couple max [Nm]
AV1-1	0,24	A4-1	0,33	DV1-1	0,5
AV1-2	0,2	A4-2	0,37	DV1-2	0,52
AV2-1	0,27	A11-1	0,34	DV2-1	0,55
AV2-2	0,24	A11-2	0,32	DV2-2	NA
CV1-1	0,26	B9-1	0,39	DV3-1	0,54
CV1-2	0,25	B9-2	0,35	DV3-2	0,49
CV2-1	0,19	C5-1	0,41	DV4-1	0,5
CV2-2	0,25	C5-2	0,36	DV4-2	0,52
<i>Moyenne</i>	0,24	<i>Moyenne</i>	0,36	<i>Moyenne</i>	0,51

TABLE F.2 – Résultats des tests de couple maximum lors du vissage longitudinal

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl