

École polytechnique de Louvain

# Optimisation des propriétés mécaniques du peuplier densifié par procédé THM

Vers une alternative durable pour les applications  
en bois de terrasse

Auteur: **Louis WODON**  
Promoteur: **Thomas PARDOEN**  
Lecteurs: **Marie-Stéphane COLLA, Pierre LATTEUR**  
Année académique 2024-2025  
Master [120] : ingénieur civil mécanicien



# Abstract

Belgian forests are predominantly composed of monocultures of species such as oak, beech, and spruce, selected for their industrial value. This homogeneity leads to a decline in biodiversity and increased vulnerability to climate change. Diversifying forests with less dense, faster-growing species like poplar could strengthen their resilience while supporting sustainable management. It is therefore crucial to enhance the value of these lower-density species to encourage their cultivation and integration into the industry.

In this context, this study investigates the thermo-hygro-mechanical (THM) densification of poplar to improve its mechanical properties and make it a competitive material for applications such as decking. The process involves three key steps : pre-treatment, compression, and post-treatment. It increases the wood's density and enhances its physical and mechanical properties.

This work examines the impact of specimen geometry and operational parameters (compression speed and temperature) on the properties of densified wood, with a particular focus on its use as decking material. Poplar samples of varying geometries were densified at different temperatures and compression speeds. They were then assessed for their mechanical properties (hardness and flexural strength) and analyzed under a microscope to study the effects of these parameters on their microstructure.

The results indicate that densification at higher temperatures and faster compression speeds leads to superior performance, yielding a more homogeneous microstructure and reduced internal damage. Rectangular samples demonstrated better stress distribution, providing greater mechanical efficiency compared to square samples. However, larger samples, closer in size to standard decking boards, exhibited lower mechanical performance due to internal thermal and hygrometric gradients. These findings confirm the potential of densified poplar as a material for decking, while highlighting the need for further optimization, particularly for larger format samples.

---

# Résumé

Les forêts belges sont majoritairement constituées de monocultures d'essences choisies pour leur valeur industrielle. Cette homogénéité entraîne une baisse de la biodiversité et une vulnérabilité accrue face au dérèglement climatique. Une diversification des forêts, notamment avec des espèces moins denses mais à croissance plus rapide, comme le peuplier, pourrait renforcer leur résilience tout en soutenant une gestion durable. Il est donc crucial de valoriser ces espèces à plus faible densité pour encourager leur culture et leur intégration dans l'industrie.

Dans ce contexte, cette étude explore la densification thermo-hygro-mécanique (THM) du peuplier afin d'améliorer ses propriétés mécaniques et d'en faire un matériau compétitif pour des applications telles que les terrasses. Ce procédé se déroule en trois étapes : le prétraitement, la compression et le post-traitement. Il permet d'augmenter la densité du bois et d'améliorer ses propriétés physiques et mécaniques.

Ce travail analyse l'impact de la géométrie des échantillons et des paramètres opératoires (vitesse de compression et température) sur les propriétés du bois densifié, spécifiquement pour une utilisation en tant que bois de terrasse. Des échantillons de peuplier aux géométries variées ont été densifiés à différentes températures et vitesses de compression. Ils ont ensuite été évalués pour leurs propriétés mécaniques (dureté et flexion) et analysés au microscope afin d'étudier les effets des paramètres sur leur microstructure.

Les résultats indiquent qu'une densification à plus haute température et à vitesse plus rapide conduit à des performances supérieures, avec une microstructure plus homogène et des dommages internes réduits. Les échantillons de section rectangulaire se distinguent par leur meilleure répartition des contraintes, offrant une efficacité mécanique supérieure à celle des sections carrées. Cependant, les échantillons de grandes dimensions, plus proches des formats standards pour les planches de terrasse, ont affiché des performances mécaniques moindres en raison de gradients thermiques et hygrométriques internes. Ces observations confirment le potentiel du peuplier densifié comme bois de terrasse, tout en soulignant la nécessité d'optimiser davantage le procédé, notamment pour les échantillons de plus grand format.



# Remerciements

Dans un premier temps, je souhaite exprimer ma gratitude envers les personnes qui m'ont encadré dans la réalisation de ce travail. Je remercie mon promoteur, Thomas Pardoën, pour avoir proposé ce sujet et pour ses conseils précieux lors de nos rencontres. Je remercie aussi tout particulièrement Marie-Stéphane Colla pour son accompagnement continu, sa disponibilité, ses nombreux conseils, ses encouragements lors des moments plus compliqués, et son aide dans la relecture de ce travail. Je tiens également à saluer Sophie Ryelandt pour son aide précieuse et ses conseils lors des différents essais en laboratoire. Enfin, merci à Pierre Latteur d' avoir accepté de siéger dans ce jury.

Je souhaite également remercier chaleureusement les membres du personnel des différentes plateformes où ce travail m'a conduit pour leur expertise et leur soutien lors des procédés expérimentaux. Je remercie Quentin Mestrez pour la préparation des machines de compression et de flexion, ainsi que pour son accompagnement dans leur utilisation, et Vincent Forzee pour son aide dans la confection des échantillons, ainsi que pour son expertise et ses conseils dans leur post-traitement. Un grand merci aussi à Bruno Dell'Aquila pour son assistance précieuse dans les essais de dureté, ainsi que pour sa grande sympathie, et à Armand Béché pour son expertise lors des observations au microscope. Merci enfin à tous les techniciens et autres membres du personnel, du LEMSC, du LACaMI et de l'institut en général, que j'ai pu croiser pour leur bienveillance.

Un immense merci va également à toute ma famille et à mes proches pour leur soutien tout au long de ce parcours. Je pense particulièrement à mes parents pour leur confiance et leurs encouragements constants durant mes études, ainsi qu'à ma copine, Aline, pour sa présence et son réconfort dans les moments difficiles.

Enfin, je souhaite adresser un dernier mot de remerciement à Paul Fisette, dont les paroles inspirantes lors d'une rencontre en septembre 2021 m'ont convaincu de persévérer dans ce domaine.



# Table des matières

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Table des abréviations</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 État de l’art</b>	<b>5</b>
1.1 La problématique des forêts belges . . . . .	5
1.1.1 Composition et structure des forêts belges . . . . .	5
1.1.2 Enjeux de la diversification des forêts . . . . .	7
1.1.3 Enjeux de densification . . . . .	8
1.2 Le bois de terrasse . . . . .	9
1.2.1 Critères de sélection des bois pour terrasses . . . . .	9
1.2.2 Essences usuelles pour les terrasses extérieures . . . . .	10
1.2.3 Le bois densifié comme alternative . . . . .	11
1.3 Le peuplier . . . . .	12
1.3.1 Atouts et limitations . . . . .	12

---

1.3.2	Caractéristiques physiques et mécaniques . . . . .	13
1.3.3	Le peuplier dans le bois de terrasse . . . . .	13
1.4	Anatomie du bois . . . . .	14
1.4.1	Anisotropie et plans directionnels . . . . .	14
1.4.2	Structure macroscopique . . . . .	16
1.4.3	Structure microscopique . . . . .	17
1.4.4	Structure moléculaire . . . . .	17
1.5	Propriétés physiques du bois . . . . .	21
1.5.1	Propriétés mécaniques et anisotropie . . . . .	21
1.5.2	Hygroscopie et stabilité dimensionnelle . . . . .	22
1.5.3	Masse volumique du bois . . . . .	25
1.5.4	Dureté . . . . .	26
1.5.5	Propriétés thermiques . . . . .	27
1.5.6	Durabilité . . . . .	28
1.6	Méthodes de densification du bois . . . . .	30
1.6.1	Méthodes de densification . . . . .	30
1.6.2	Procédé THM . . . . .	31
1.6.3	Revue de littérature . . . . .	35
1.7	Conclusion . . . . .	37
<b>2</b>	<b>Matériau utilisé et méthodes expérimentales</b>	<b>39</b>
2.1	Bois étudié . . . . .	39

---

2.2	Masse volumique . . . . .	40
2.3	Procédé de densification . . . . .	41
2.3.1	Prétraitement . . . . .	41
2.3.2	Densification par compression . . . . .	42
2.3.3	Post-traitement . . . . .	43
2.4	Observation de la microstructure . . . . .	44
2.5	Essais de flexion . . . . .	45
2.5.1	Préparation des échantillons . . . . .	45
2.5.2	Essais . . . . .	46
2.5.3	Calcul du Module d'élasticité . . . . .	47
2.5.4	Calcul du Module de rupture . . . . .	47
2.5.5	Obtention des courbes de contrainte-déformation . . . . .	48
2.6	Essais de dureté Brinell . . . . .	49
2.7	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>53</b>
3.1	Etude de la microstructure . . . . .	54
3.2	Compression et retour viscoélastique . . . . .	57
3.2.1	Allure générale des échantillons densifiés . . . . .	57
3.2.2	Contrainte maximale lors de la densification . . . . .	58
3.2.3	Contrainte résiduelle après 1800s . . . . .	59
3.3	Propriétés physiques et mécaniques . . . . .	60

---

3.3.1	Modules d'élasticité et de rupture . . . . .	61
3.3.2	grands carrés . . . . .	63
3.3.3	Dureté . . . . .	64
3.4	Conclusion . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>67</b>
4.1	Variabilité des résultats . . . . .	67
4.2	Influence de la température . . . . .	70
4.3	Influence de la géométrie de l'échantillon . . . . .	72
4.4	Influence de la vitesse de compression . . . . .	74
4.5	Le bois densifié comme bois de terrasse . . . . .	75
4.6	Conclusion . . . . .	76
	<b>Conclusion</b>	<b>77</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>82</b>
<b>A</b>	<b>Données des essais de flexion</b>	<b>89</b>

# Table des abréviations

Abréviation	Signification
THM	Thermo-Hygro-Mécanique
MOE	Module d'Élasticité
MOR	Module de Rupture
PSF	Point de Saturation des Fibres
HB	Dureté de Brinell
T <sub>g</sub>	Température de Transition Vitreuse
LM	Lamelle Mitoyenne
P	Paroi Primaire
S1, S2, S3	Couches secondaires de la paroi cellulaire
$\rho$	Masse volumique en $kg/m^3$
AMF	Angle des micro fibrilles (angle que les microfibrilles de cellulose font avec l'axe des fibres)

**TABLE 1** – *Table des abréviations utilisées dans ce travail.*



# Introduction

Les forêts belges se composent principalement de monocultures d'arbres feuillus à haute densité, tels que le chêne et le hêtre, prisés pour leur résistance et leur durabilité, ainsi que de résineux, comme l'épicéa, largement exploités pour leur polyvalence industrielle. Cette composition homogène pose des problèmes majeurs pour la santé des forêts, notamment une réduction de la biodiversité et une vulnérabilité accrue face au changement climatique. Diversifier les essences cultivées, en incluant des espèces à croissance rapide mais de densité plus faible, renforcerait la résilience des forêts belges et favoriserait une gestion plus durable.

Dans un contexte où la demande pour des matériaux durables et respectueux de l'environnement ne cesse de croître et où il est nécessaire d'encourager la diversification des forêts, les technologies de modification du bois, telles que la densification thermo-hygro-mécanique (THM), offrent une solution prometteuse. Ce procédé permet de densifier des essences peu valorisées grâce à l'utilisation de la chaleur, de la vapeur et de la compression, améliorant ainsi leurs propriétés mécaniques et augmentant leur valeur dans l'industrie.

Une application envisagée pour le bois densifié est son utilisation comme bois de terrasse. Cette application nécessite des propriétés spécifiques comme une bonne résistance mécanique et une grande durabilité. En valorisant le peuplier densifié pour cette utilisation, nous augmentons non seulement l'utilité de cette essence encore peu exploitée, mais nous contribuons également à une gestion forestière plus durable et diversifiée.

Cette étude se concentre sur l'optimisation des propriétés mécaniques du peuplier densifié par procédé THM, afin de le transformer en une alternative durable pour ces applications exigeantes. À travers des expérimentations variées, elle explore l'influence de paramètres clés tels que la température, la vitesse de compression et les dimensions initiales des échantillons sur les propriétés du bois densifié.

Dans un premier temps, l'état de l'art offre une vue d'ensemble des connaissances actuelles dans le domaine du bois, utile à la compréhension de ce travail. Ce chapitre aborde la problématique des forêts belges, qui constitue la genèse de ce travail, puis examine la composition du bois ainsi que les mécanismes et interactions entre ses principaux composants polymériques. Enfin, il traite

des propriétés physiques fondamentales telles que la densité, le comportement hygroscopique et la résistance mécanique, avant de présenter rapidement les différentes méthodes de densification existantes aujourd'hui et, finalement, le procédé THM ainsi que les différents paramètres qui s'y rapportent.

Les différentes étapes du processus expérimental sont ensuite détaillées dans le second chapitre, depuis la sélection des échantillons de peuplier jusqu'aux méthodes d'analyse, en passant par les protocoles de densification THM.

Les résultats obtenus à travers les différentes campagnes expérimentales sont ensuite présentés dans le chapitre 3. Il met en lumière les variations des propriétés mécaniques et physiques du peuplier densifié en fonction des paramètres étudiés, en s'appuyant sur des données chiffrées issues des essais et des observations réalisées sur les échantillons densifiés et leur microstructure.

Enfin, le chapitre 4 analyse en profondeur les résultats obtenus, en les mettant en relation avec les mécanismes étudiés dans l'état de l'art, afin de tirer des conclusions sur l'impact des paramètres de densification étudiés sur la performance finale du bois densifié. Ce chapitre se termine par une réflexion sur les perspectives de recherches futures pouvant être explorées dans le cadre de cette étude.

Cette étude vise à relever des défis écologiques, industriels et sociaux, en explorant le potentiel de valorisation des essences feuillues peu denses par densification THM. En s'appuyant sur une analyse rigoureuse des mécanismes physiques et chimiques sous-jacents, ce travail contribue à l'optimisation des propriétés mécaniques du peuplier et à la diversification de ses utilisations. Les conclusions de cette étude posent les bases de futurs développements dans la recherche sur la densification THM.

# 1. État de l'art

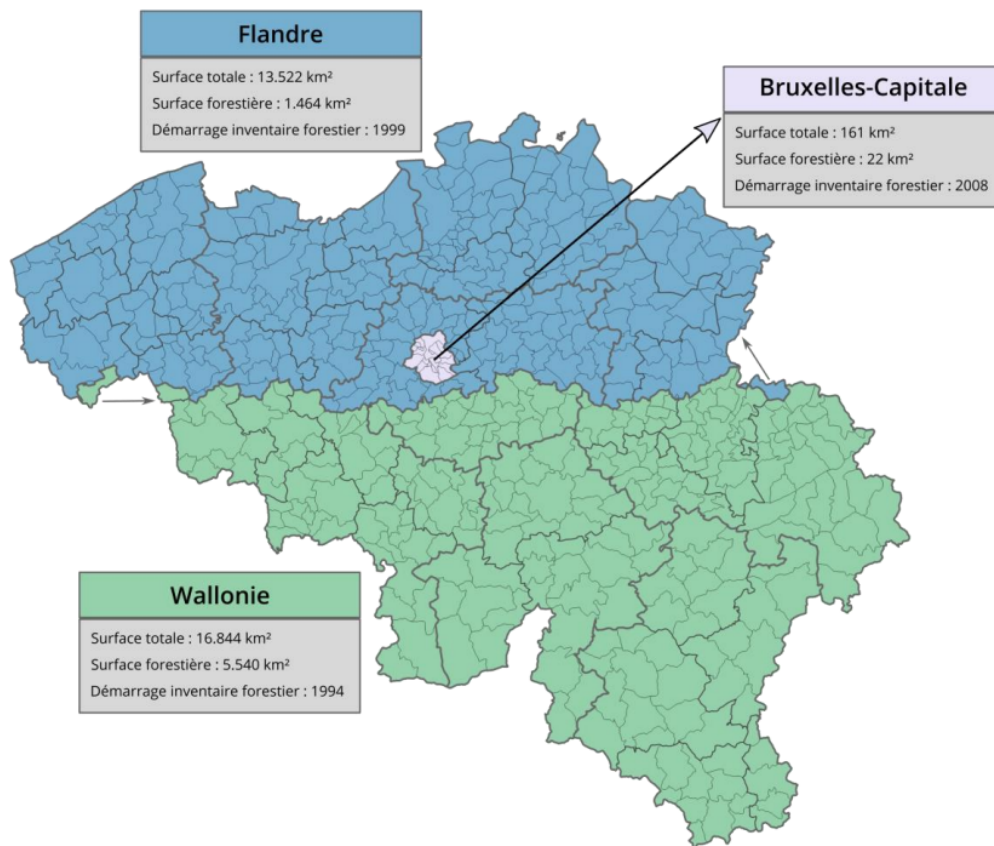
Cette revue de littérature offre une vue d'ensemble des connaissances nécessaires pour la bonne compréhension de la suite du travail. Elle se penche d'abord sur la problématique des forêts belges et leur vulnérabilité face au dérèglement climatique. Elle détaille ensuite les différentes caractéristiques physiques et mécaniques du bois et de ses composants, en mettant l'accent sur celles qui présentent un intérêt pour l'utilisation du bois densifié comme bois de terrasse. Enfin, elle explique brièvement les différents procédés de densification existants aujourd'hui et présente une synthèse des connaissances actuelles en matière de densification thermo-hygromécanique.

## 1.1 La problématique des forêts belges

Les forêts belges, représentant environ 23% du territoire national, jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité, le stockage de carbone et la production de bois. Ces forêts, principalement situées en Wallonie, 79,8% de la surface forestière belge contre 19,9% en région flamande et 0,3% en région de Bruxelles-Capitale (fig :1.1)[1], sont majoritairement productives (84%) et essentielles à l'économie régionale, avec plus de 9 000 entreprises et près de 20 000 emplois directs liés au secteur forestier et au bois [2]. Cependant, leur composition actuelle, marquée par une prédominance de monocultures, pose des défis écologiques et économiques. Dans un contexte de changement climatique et de pression anthropique croissante, ces forêts doivent évoluer pour répondre aux exigences croissantes de résilience et de durabilité [3].

### 1.1.1 Composition et structure des forêts belges

La majorité des forêts belges se situe en Wallonie, où elles couvrent environ 33% de la région. Ces forêts sont dominées par des essences feuillues telles que le chêne et le hêtre, ainsi que par des résineux comme l'épicéa (fig.1.2)[5]. Le chêne et le hêtre, en particulier, malgré une croissance relativement lente, sont prisés dans l'industrie pour leur densité élevée, qui leur confère une excellente résistance mécanique et une durabilité accrue. Ces qualités en font des matériaux de

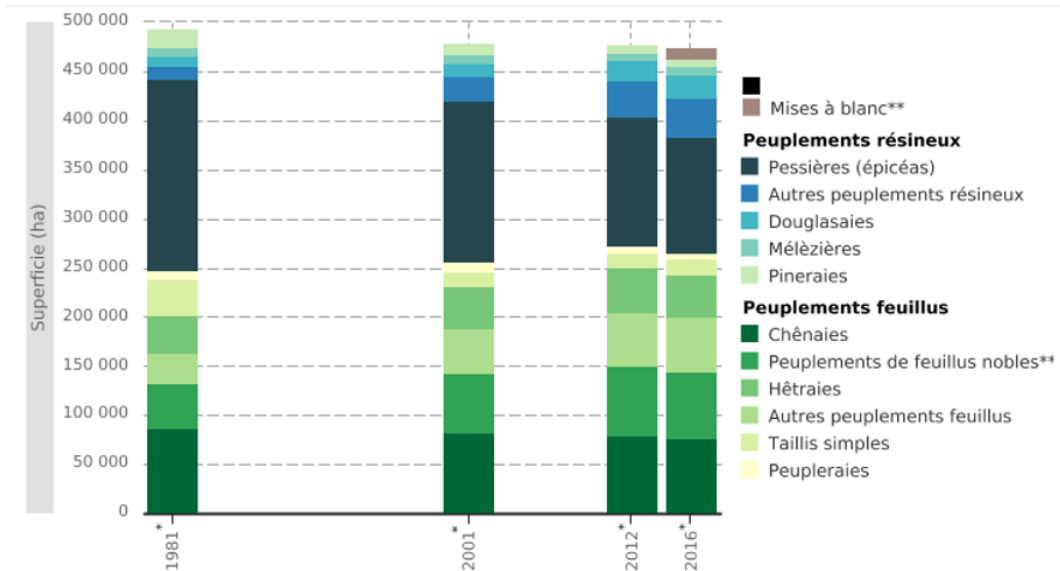


**FIGURE 1.1** – *Superficie forestière en Belgique [4]*

choix pour des applications haut de gamme, telles que le mobilier, les revêtements de sol intérieur et les charpentes.

Cette prédominance d'essences denses entraîne cependant une homogénéisation des forêts, limitant la diversité des habitats naturels et augmentant leur vulnérabilité face aux perturbations environnementales telles que les sécheresses ou les attaques d'insectes ravageurs comme *Ips typographus*, qui a causé des pertes massives depuis 2018 [2, 7].

Une autre particularité des forêts wallonnes réside dans leur gestion privée. Environ 51 % des forêts sont détenues par des particuliers, et 91 % de ces propriétés ont une surface inférieure à 5 hectares. Cette fragmentation pousse souvent les propriétaires à maximiser leurs profits en cultivant des essences à forte valeur économique, comme l'épicéa, au détriment de la diversité écologique et de la résilience face aux perturbations climatiques.



**FIGURE 1.2** – *Superficie des différents peuplements de la forêt productive en Wallonie [6]*

### 1.1.2 Enjeux de la diversification des forêts

Des études récentes, notamment celles du projet *Forêt résiliente 2024*, montrent que la diversification des essences est essentielle pour renforcer la résilience des forêts face aux défis climatiques. Une telle diversification permet une répartition des risques, une meilleure utilisation des ressources et une protection mutuelle entre les espèces contre les insectes, les maladies, les sécheresses, etc. [3]

Ces études insistent également sur l'importance de créer des forêts multifonctionnelles, capables de répondre simultanément à des besoins économiques, écologiques et sociaux. Les plantations diversifiées permettent non seulement de renforcer la résilience climatique, mais aussi d'améliorer la santé des sols, d'accroître la biodiversité et d'augmenter les services écosystémiques fournis, tels que la régulation des flux hydriques ou la séquestration du carbone [8].

En introduisant des essences feuillues à croissance rapide et plus tolérantes aux variations environnementales, comme le peuplier ou le bouleau, il est possible de :

- Répartir les risques face aux insectes ravageurs, maladies ou sécheresses ;
- Optimiser l'utilisation des ressources hydriques, lumineuses et nutritives ;
- Favoriser la biodiversité, avec une plus grande variété d'habitats.[3]

### 1.1.3 Enjeux de densification

Les essences feuillues peu denses, telles que le peuplier et le bouleau, sont souvent négligées en raison de leurs propriétés mécaniques limitées et de leur valeur économique perçue comme inférieure. Cependant, elles présentent des avantages significatifs, notamment une croissance rapide qui permet de réduire les cycles de production, ainsi qu'une meilleure tolérance aux variations de conditions environnementales.

Afin de maximiser leur intégration dans nos forêts, il est crucial d'améliorer leur valeur économique. C'est dans ce contexte que la densification THM entre en jeu. Elle offre une opportunité de transformer les essences feuillues peu denses en matériaux de haute performance en permettant :

- **Une amélioration des propriétés mécaniques** : La densification augmente la dureté, la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle des essences peu denses.
- **Une augmentation de la valeur marchande** : En rendant ces bois compétitifs pour des applications structurelles ou décoratives, elle favorise leur acceptation sur le marché.
- **Une contribution à la gestion durable** : En diversifiant les essences exploitées, la densification soutient une gestion forestière résiliente et respectueuse de l'environnement.

Une description plus approfondie de la problématique de la densification du bois, des différentes techniques de densification existantes aujourd'hui, ainsi que de leurs avantages et inconvénients, sera présentée plus loin dans la section 1.6. Une vue d'ensemble des connaissances actuelles sur la densification THM y sera aussi incluse.

### 1.2 Le bois de terrasse

Le choix du matériau pour les terrasses extérieures est un enjeu crucial dans l'industrie de la construction et de l'architecture. Un bon bois de terrasse doit répondre à des critères spécifiques, incluant une haute durabilité biologique, une bonne stabilité dimensionnelle, une résistance mécanique suffisante et une esthétique attrayante. Les terrasses extérieures étant exposées à des conditions climatiques sévères (humidité, UV, variations thermiques), elles imposent des exigences strictes sur les matériaux utilisés [9, 10]. En outre, les normes telles que la NF DTU 51.4 précisent les critères techniques et les conditions de mise en œuvre pour garantir la durabilité et la sécurité des ouvrages [11].

Une explication plus approfondie de la notion de durabilité du bois mentionnée dans cette section est fournie dans la section 1.5.1

#### 1.2.1 Critères de sélection des bois pour terrasses

Le bois est souvent choisi comme matériau pour l'aménagement de terrasses grâce à son faible coût, son impact environnemental réduit, son esthétique et sa durabilité dans le temps. Cependant, plusieurs critères doivent être pris en compte pour la sélection de l'essence de bois utilisée :

- **Durabilité biologique** : La capacité à résister aux attaques de champignons, insectes et moisissures sans traitement chimique est essentielle (voir la section 1.5.6). Les normes comme la NF EN 335 classifient les bois selon leur durabilité naturelle (par exemple, classe 1-2 pour l'ipé et le teck). Un bois de terrasse exposé doit idéalement être conforme à la classe 3b ou 4 selon la NF DTU 51.4, garantissant une résistance aux environnements humides et au contact prolongé avec le sol [11].
- **Stabilité dimensionnelle** : La capacité à maintenir des dimensions constantes malgré les variations d'humidité et de température est cruciale. Les bois doivent être peu sujets au gonflement et au retrait, avec un retrait tangentiel idéalement inférieur à 10%.
- **Résistance mécanique** : Les normes définissent des seuils pour la résistance mécanique. Par exemple, les lames doivent atteindre une classe minimale D24 ou D30 pour les essences feuillues, ce qui correspond à un module d'élasticité supérieur à  $10\text{GPa}$  et une résistance en flexion autour de  $60 - 100\text{MPa}$  [12].
- **Esthétique** : Le grain, la couleur et l'homogénéité de la texture influencent la perception de qualité et l'intégration architecturale.

Ces critères permettent d'évaluer différents types de bois et d'identifier les essences les mieux adaptées aux besoins spécifiques de chaque projet.

### 1.2.2 Essences usuelles pour les terrasses extérieures

Trois catégories principales de bois sont couramment utilisées pour les terrasses extérieures : les bois tropicaux, les bois locaux et les bois modifiés thermiquement.

#### **Bois tropicaux**

Les bois tropicaux, tels que l'ipé, le cumaru et le teck, sont réputés pour leur durabilité exceptionnelle et leur résistance naturelle aux insectes et aux champignons [10]. Avec une masse volumique anhydre souvent supérieure à  $900 \text{ kg/m}^3$ , ces bois présentent une stabilité dimensionnelle remarquable et un retrait limité. Par exemple, l'ipé affiche une résistance en flexion proche de 120 MPa et une durabilité de classe 1 [13]. Cependant, leur extraction massive pose des enjeux écologiques et éthiques, car elle contribue à la déforestation et au déséquilibre des écosystèmes tropicaux.

#### **Bois locaux européens**

Les essences locales comme le chêne, le mélèze et le douglas constituent des alternatives plus écologiques. Bien qu'elles présentent une durabilité inférieure à celle des bois tropicaux (classe 3-4 pour le mélèze et le douglas), leur empreinte carbone est réduite en raison des distances de transport plus courtes [9]. Leur utilisation est souvent associée à des traitements chimiques pour améliorer leur résistance biologique, bien que cela puisse soulever des questions environnementales.

#### **Bois modifiés thermiquement**

Les bois modifiés thermiquement (comme le frêne ou le pin thermotraités) offrent une solution intéressante. Le traitement thermique améliore leur stabilité dimensionnelle et leur durabilité en réduisant la quantité de groupes hydroxyles hydrophiles dans les hémicelluloses [12]. Toutefois, ces bois ne répondent généralement qu'à la classe 3b, ce qui limite leur utilisation dans des environnements très humides ou au contact du sol [11].

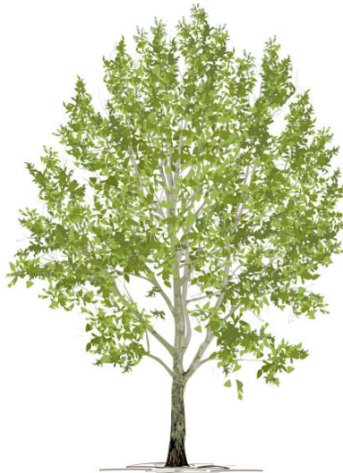
### 1.2.3 Le bois densifié comme alternative

Le bois densifié thermo-hygromécaniquement se présente comme une solution innovante pour répondre aux besoins des terrasses extérieures. Ce procédé permet d'augmenter la masse volumique des bois peu denses (de 400 – 500 à 800 – 1000  $kg/m^3$ ), tout en améliorant considérablement leur résistance mécanique, leur stabilité dimensionnelle et leur durabilité biologique [14].

Les essences comme le peuplier densifié atteignent des performances proches de celles des bois tropicaux, avec une résistance en flexion de 90 – 100  $MPa$  et un module d'élasticité supérieur à 12  $GPa$  [15]. La densification THM réduit également l'hygroscopicité, diminuant ainsi les cycles de gonflement et de retrait. En valorisant des bois locaux, ce procédé soutient une gestion forestière durable et réduit l'empreinte carbone. Il permet également de répondre aux exigences des normes (classe 3b ou 4) pour des applications en extérieur, tout en offrant une alternative compétitive aux bois exotiques [16].

### 1.3 Le peuplier

Le peuplier (fig.1.3) est un arbre feuillu à croissance rapide, appartenant à la famille des *Salicaceae*. Il est largement cultivé en Europe et en Belgique, où il est particulièrement présent dans les plaines alluviales et les sols humides [17]. Apprécié pour ses qualités sylvicoles et industrielles, le peuplier joue un rôle économique et écologique essentiel, mais présente certaines limitations qui freinent son utilisation dans des applications exigeantes, comme le bois de terrasse.



**FIGURE 1.3** – *Peuplier tremble* [18]

#### 1.3.1 Atouts et limitations

Le peuplier est prisé pour sa croissance rapide, permettant une rotation sylvicole courte, généralement comprise entre 20 et 30 ans [19]. Cette caractéristique en fait une essence idéale pour répondre à la demande croissante de bois dans une logique de gestion forestière durable. De plus, il présente un bois homogène et facile à travailler. Il est utilisé dans divers domaines, notamment dans l'industrie du contreplaqué, de l'emballage et du mobilier d'intérieur.

Le peuplier présente néanmoins plusieurs limitations significatives :

- **Durabilité naturelle faible** : Le peuplier est classé comme non durable (classe 5 selon les normes européennes) en raison de sa faible résistance aux attaques biologiques (insectes et champignons) [20].
- **Faible densité** : Avec une masse volumique moyenne à l'état sec d'environ  $450 \text{ kg/m}^3$ , le peuplier est relativement léger, ce qui limite sa résistance mécanique et son utilisation pour des applications structurelles ou extérieures [17].

- **Hygroscopicité élevée** : Son comportement hygroscopique accentue son instabilité dimensionnelle en présence d'humidité, le rendant inadapté aux conditions extérieures sans traitement préalable [19].

### 1.3.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques du peuplier sont détaillées dans le tableau ci-dessous, mettant en avant les propriétés pertinentes pour cette étude :

Caractéristique	Valeur	Unité
Masse volumique anhydre	400 – 450	kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à 12% d'humidité	450 – 470	kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité longitudinal	6,5 – 11,3	GPa
Résistance en flexion	45 – 76	MPa
Dureté Brinell (parallèle aux fibres)	12 – 15	MPa
Dureté Brinell (perpendiculaire aux fibres)	8 – 10	MPa

**TABLE 1.1** – *Caractéristiques physiques et mécaniques typiques du peuplier ([17, 19, 20]).*

### 1.3.3 Le peuplier dans le bois de terrasse

À l'état brut, le peuplier est inadapté à une utilisation en bois de terrasse. Sa faible densité, son manque de durabilité biologique et sa grande sensibilité à l'humidité le rendent peu compétitif par rapport aux essences actuellement utilisées. Cependant, le procédé de densification THM offre une opportunité de surmonter ces limitations. En augmentant sa résistance mécanique et sa stabilité dimensionnelle, tout en réduisant son hygroscopicité, le peuplier densifié peut devenir un matériau compétitif pour des applications extérieures. Ces améliorations ciblées répondent aux exigences spécifiques des bois de terrasse, notamment dans des conditions climatiques variables.

La section 1.5 examinera en détail les mécanismes physiques et chimiques impliqués dans la densification THM, ainsi que leurs effets sur les propriétés du peuplier densifié.

## 1.4 Anatomie du bois

Le bois est un matériau organique complexe, caractérisé par une structure multi-échelle et une anisotropie marquée. Ses propriétés varient considérablement en fonction de l'essence, de l'origine du bois dans le tronc et de l'échelle d'observation (fig.1.4). Divers facteurs, tels que le lieu de croissance, la durée de développement et les conditions environnementales, influencent également ses propriétés et son comportement. Une compréhension approfondie de sa structure, à l'échelle macroscopique, microscopique et moléculaire, est essentielle pour caractériser et optimiser les processus de densification [21]. Cette section décrit la structure interne du bois à travers ces différentes échelles, de la structure macroscopique à la structure moléculaire.

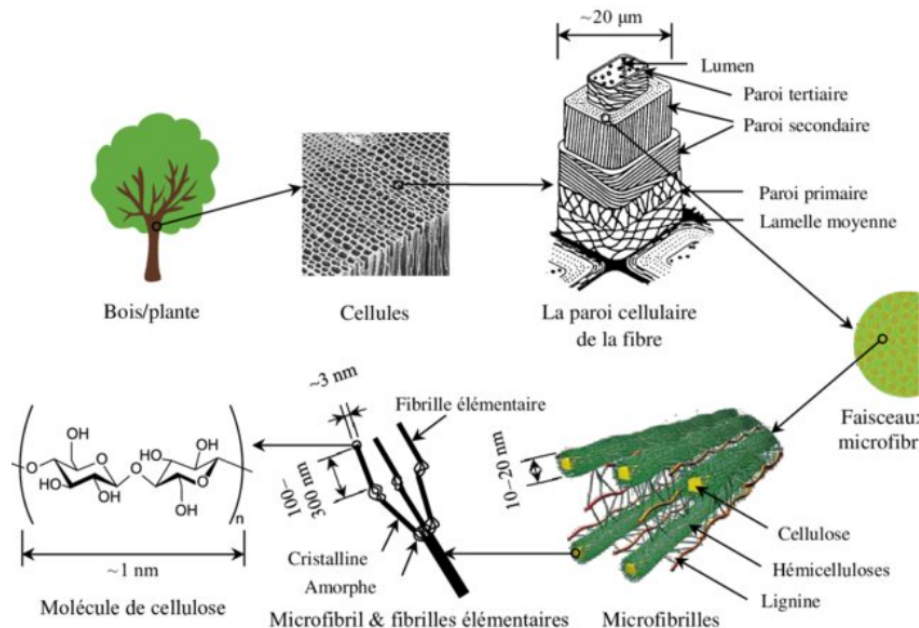
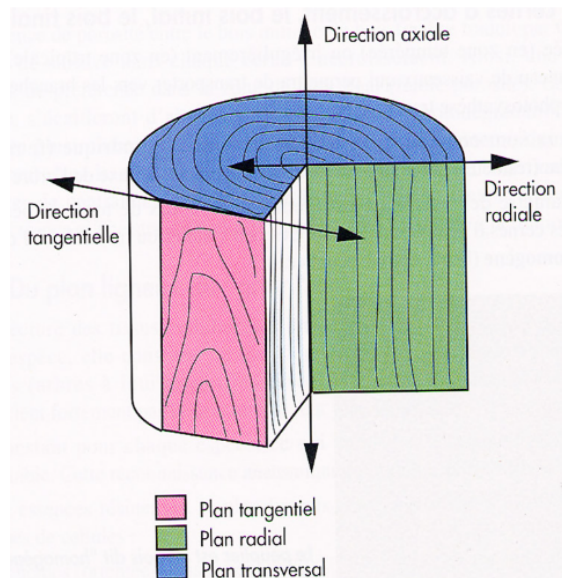


FIGURE 1.4 – Schéma de la structure multi-échelle d'un arbre [22]

### 1.4.1 Anisotropie et plans directionnels

Le bois est un matériau anisotrope, ce qui signifie que ses propriétés mécaniques, physiques et hygroscopiques varient selon la direction observée. Cette anisotropie est principalement due à l'organisation des fibres et des cellules dans trois plans distincts : longitudinal, radial et tangentiel (fig. 1.5) [23].

**Le plan transversal, ou longitudinal :** Le bois est constitué de fibres longitudinales, représentant



**FIGURE 1.5** – Plans directionnels du bois [23]

environ 90% des cellules [24]. Ces fibres, formées de trachéides dans les résineux ou de fibres et vaisseaux dans les feuillus, assurent le transport de la sève brute et contribuent à la stabilité mécanique. Cette orientation longitudinale confère au bois une résistance accrue à la traction et à la flexion dans le sens des fibres, ce qui en fait la direction mécanique la plus performante.

**Plan radial** : Le plan radial, perpendiculaire aux cernes de croissance, présente des rayons ligneux, petites cellules. Ces rayons sont essentiels pour le transport de nutriments et la dissipation des contraintes mécaniques. Les propriétés mécaniques dans cette direction sont nettement inférieures à celles du plan longitudinal, mais elles sont essentielles pour assurer une homogénéité dans le comportement global du bois.

**Plan tangentiel** : Le plan tangentiel, parallèle aux cernes de croissance, a les plus faibles propriétés mécaniques. Cette direction est particulièrement sensible aux déformations induites par les variations hygroscopiques, car elle reflète directement les contraintes liées à la croissance inégale des cernes. La compression dans ce plan est donc plus susceptible de provoquer des déformations différentielles.

Cette organisation tripartite des fibres et des cellules explique la variation des propriétés mécaniques du bois selon la direction. Dans le cadre des traitements mécaniques tels que la densification, ces propriétés directionnelles sont exploitées de manière stratégique. La compression est généralement appliquée perpendiculairement au plan longitudinal, le plus souvent dans le plan radial, afin de maximiser les gains en densité et en résistance. Cela permet de réduire les espaces intercellulaires

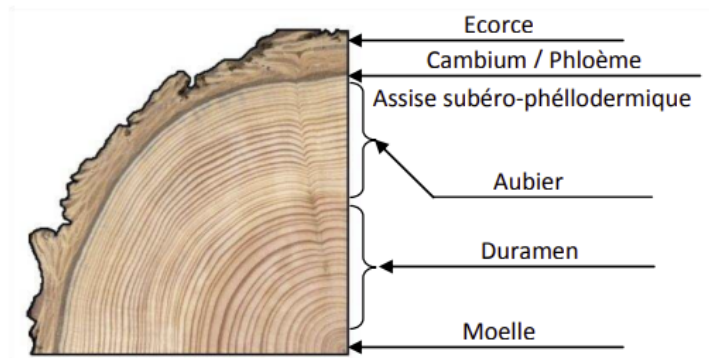
et d'améliorer les performances mécaniques globales du matériau.

### 1.4.2 Structure macroscopique

En observant la coupe transversale d'un tronc d'arbre ou d'une branche, il est possible de voir les différentes parties de l'anatomie du bois (fig.1.6). On distingue, en partant du centre [5] :

1. **La moelle** : C'est une petite zone centrale de tissus tendres qui se trouve au cœur du tronc, des branches et des racines. Elle est essentielle durant les premières phases de croissance de l'arbre, car elle sert à stocker et à transporter les nutriments (comme les sucres) pour soutenir le développement des tissus environnants. Au fil du temps, elle devient souvent inerte ou non fonctionnelle, elle peut se dessécher ou être remplacée par du bois secondaire plus dense et dur.
2. **Le duramen** : Appelé aussi "bois de cœur" ou "bois parfait", il s'agit de la partie de l'arbre ayant les meilleures caractéristiques de durabilité. Il s'agit d'un bois dur, compact, sec et imputrescible de par le fait qu'il ne comporte plus de cellules vivantes. Il évolue progressivement avec la transformation de l'aubier (appelée duraminisation) qui résulte du dépôt de composés tels que les tanins et phénols, augmentant sa résistance à la dégradation biologique. Il se différencie, plus ou moins facilement en fonction de l'espèce d'arbre, de l'aubier par une couleur plus sombre.
3. **L'aubier** : Il s'agit ici du bois vivant, plus poreux, tendre et clair que le duramen et qui véhicule la sève ascendante (constituée d'eau et de sels minéraux) des racines vers les feuilles. Le fait qu'il soit encore vivant le rend aussi plus humide et riche en nutriment donc plus sensible aux insectes, champignons, etc.
4. **Le cambium** : Le cambium est un tissu très fin responsable de la croissance de l'arbre, vers l'intérieur en produisant l'aubier et vers l'extérieur en produisant le libier.
5. **Le libier** : Appelé aussi écorce intérieure, c'est par là que circule la sève descendante, ou sève élaborée (constituée d'eau et de sucres synthétisés par photosynthèse), depuis les feuilles jusqu'aux racines.
6. **L'écorce** : Constituée de bois mort, il s'agit d'une couche de protection.

Dans nos régions, la croissance de l'arbre s'effectue de manière saisonnière, du début du printemps, à l'apparition des feuilles, jusqu'à l'automne, à leur disparition. Dans le duramen et l'aubier, il est possible d'observer les cernes, ou anneaux de croissance (fig.1.6), sur l'arbre, qui sont liés aux variations saisonnières. Au printemps, le bois pousse plus rapidement, ce qui engendre une microstructure moins dense et plus claire (bois initial). À l'inverse, durant l'été et jusqu'à l'arrivée



**FIGURE 1.6** – *Structure macroscopique d'un tronc d'arbre* [25]

de l'automne, sa croissance se ralentit, ce qui produit une structure plus dense et sombre (bois final) (fig.1.7) [26].

### 1.4.3 Structure microscopique

La microstructure du bois influence ses propriétés mécaniques et physiques. Elle varie entre résineux et feuillus (fig.1.7), ce qui explique les différences de propriétés entre les espèces.

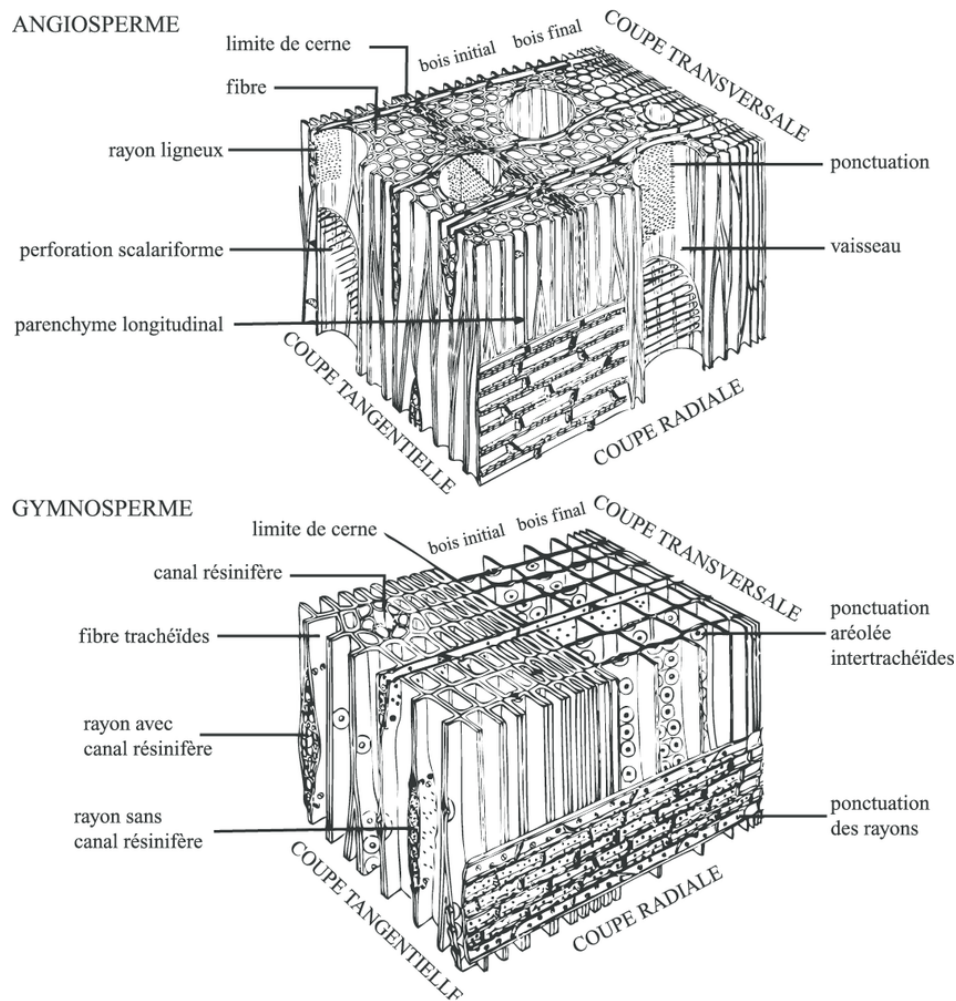
Les conifères, ou résineux, se caractérisent par une structure uniforme composée essentiellement de trachéides, cellules allongées assurant la conduction de sève brute et le soutien mécanique. Ces trachéides, disposées longitudinalement, possèdent des parois épaisses avec des ponctuations auréolées, facilitant le transfert de fluides entre cellules adjacentes [27].

Les feuillus ont une microstructure complexe. La conduction de la sève brute se fait par des vaisseaux ou pores de grand diamètre. La taille et la disposition des vaisseaux varient selon les espèces, avec des zones poreuses distinctes chez certaines. Le soutien mécanique est assuré par des fibres, des cellules allongées à parois épaisses. Les rayons ligneux, plus larges et plus nombreux que chez les conifères, sont essentiels pour le stockage et le transport radial des nutriments, ainsi que pour dissiper les contraintes mécaniques.[28]

### 1.4.4 Structure moléculaire

La structure moléculaire du bois repose sur trois principaux polymères : la cellulose, la lignine et les hémicelluloses. Ces composants interagissent pour former une matrice complexe qui confère au bois ses propriétés mécaniques, thermiques et hygroscopiques [29]. À l'échelle cellulaire (fig. 1.8),

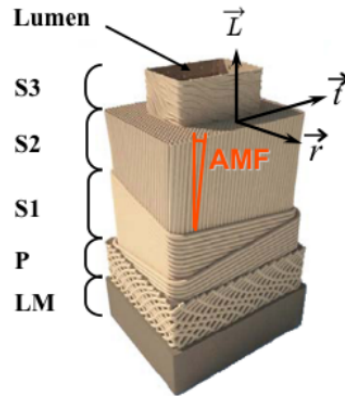
## 1. ÉTAT DE L'ART



**FIGURE 1.7** – Schéma des trois plans anatomiques d'observation de la structure cellulaire chez les angiospermes (feuillus) et les gymnospermes (résineux) [28]

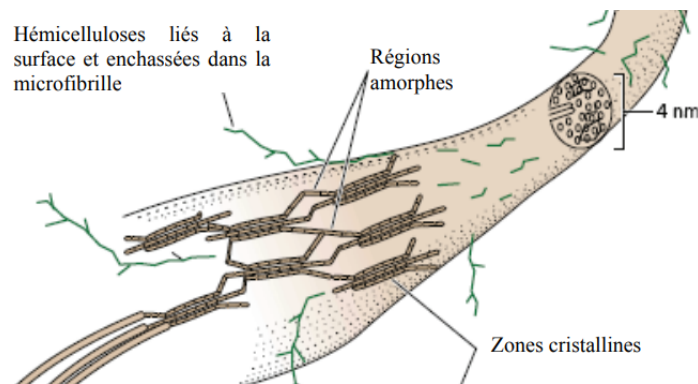
ces polymères sont disposés en couches successives autour du lumen (cavité centrale de la cellule). La lamelle mitoyenne (*LM*), composée principalement de lignine, relie les cellules entre elles. Elle est suivie par la paroi primaire (*P*), une fine couche où les microfibrilles de cellulose sont agencées aléatoirement. Enfin, les parois secondaires (*S1*, *S2*, *S3*) présentent des microfibrilles orientées différemment, la couche *S2* étant la plus épaisse et déterminante pour les propriétés mécaniques du bois. Cette organisation hiérarchique est essentielle à la compréhension du rôle des polymères dans la structure globale du bois.

**La cellulose**, représentant environ 40 à 50 % de la masse sèche du bois, est un polymère linéaire de  $\beta$ -D-glucopyranose. Ses chaînes s'organisent en microfibrilles orientées principalement dans la direction longitudinale, comprenant des régions hautement ordonnées (zones cristallines) et des zones moins structurées (zones amorphes) (fig. 1.9). Les zones cristallines sont stabilisées par un



**FIGURE 1.8** – Illustration d'une cellule de bois avec l'organisation des différentes couches de la paroi cellulaire [30]

réseau dense de liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires [31], ce qui leur confère des propriétés remarquables, telles qu'une excellente résistance à la chaleur et une faible réactivité chimique. Ainsi, la cellulose est l'élément principal responsable de la résistance à la traction dans le sens des fibres [25, 32].



**FIGURE 1.9** – Modèle de structure des microfibrilles de cellulose [30]

**La lignine** constitue environ 20 à 30% de la masse sèche du bois. Il s'agit d'un polymère tridimensionnel complexe, principalement composé de monolignols. Contrairement à la cellulose, la lignine n'a pas de structure fibrillaire, mais forme une matrice tridimensionnelle amorphe qui remplit les espaces entre les microfibrilles de cellulose et les hémicelluloses. Elle agit comme un « ciment » moléculaire, offrant au bois sa rigidité transversale et sa résistance à la compression. Ses caractéristiques hydrophobes lui permettent également de jouer un rôle protecteur contre la dégradation chimique et biologique, notamment dans des environnements humides ou soumis à une forte exposition aux UV [32].

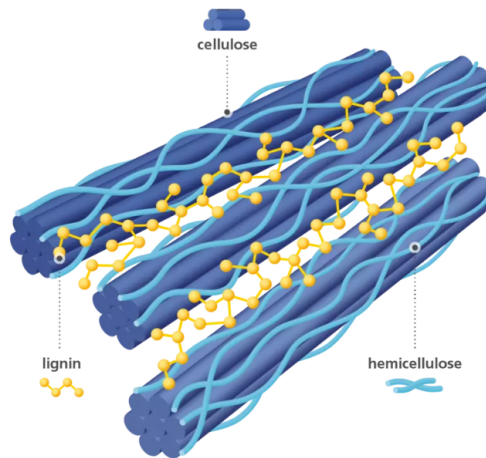
**Les hémicelluloses**, représentant 15-25% de la masse sèche, sont des polymères amorphes ramifiés

## 1. ÉTAT DE L'ART

---

constitués de différents sucres (xylose, mannose, arabinose, glucose, etc.). Elles servent de liant entre la cellulose et la lignine, contribuant à la flexibilité de la paroi cellulaire et à la gestion des variations hygroscopiques. Leur nature hydrophile les rend particulièrement sensibles à l'humidité, ce qui contribue au gonflement et au retrait du bois [33, 32].

L'organisation de la matrice lignocellulosique peut être observée à la figure 1.10



**FIGURE 1.10** – *Composition de la paroi d'une cellule de bois [34]*

Les interactions entre cellulose, lignine et hémicelluloses sont fondamentales dans le comportement global du bois sous contrainte. Ces interactions peuvent être décrites comme suit [35] :

- Sous traction longitudinale, les microfibrilles de cellulose supportent la majeure partie de la charge, tandis que les hémicelluloses agissent comme un liant flexible, évitant la rupture des liaisons entre les microfibrilles.
- Sous compression longitudinale, la lignine empêche les parois cellulaires de s'effondrer complètement, tout en redistribuant les contraintes dans toutes les directions. Les hémicelluloses contribuent en amortissant les déformations.
- Sous flexion, la combinaison des propriétés de traction de la cellulose, de compression de la lignine et de flexibilité des hémicelluloses permet au bois de résister aux forces de flexion tout en maintenant son intégrité structurelle.

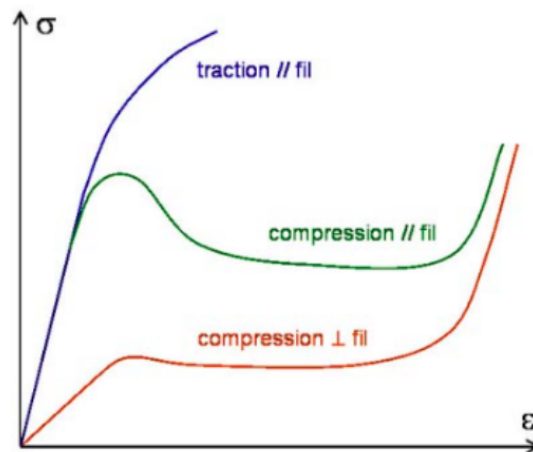
Cette organisation est fondamentale pour les propriétés mécaniques du bois et est directement affectée par les traitements thermiques ou mécaniques, tels que la densification.

## 1.5 Propriétés physiques du bois

Le bois, en tant que matériau naturel, présente une variété de propriétés physiques qui influencent directement son comportement mécanique, thermique et hygroscopique. Ces propriétés sont déterminées par sa structure multi-échelle, ses principaux composants polymériques (cellulose, lignine, hémicelluloses) et les interactions complexes entre eux. Comprendre ces propriétés est essentiel pour optimiser les procédés tels que la densification THM.

### 1.5.1 Propriétés mécaniques et anisotropie

Comme expliqué plus haut, le bois est un matériau anisotrope ; ses propriétés mécaniques et physiques varient selon les trois directions : longitudinale, radiale et tangentielle (fig.1.11). Cette anisotropie résulte de sa structure cellulaire complexe, décrite précédemment.



**FIGURE 1.11** – *Comportement du bois en fonction du type et de la direction de sollicitation [36]*

La résistance à la traction du bois est bien meilleure dans la direction longitudinale que dans les autres directions. Les microfibrilles de cellulose, orientées parallèlement aux fibres, offrent une résistance très élevée. En revanche, dans les directions radiale et tangentielle, il n'existe pas de structure continue le long du matériau, ce qui entraîne une résistance significativement plus faible.

En compression, la résistance est une fois de plus meilleure dans le sens longitudinal. Les contraintes sont réparties sur les microfibrilles de cellulose, et la lignine empêche les parois de s'effondrer. Dans les directions radiale et tangentielle, la compression entraîne des déformations plus importantes, principalement dues au réarrangement des parois cellulaires.

### **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité (MOE) est une mesure de la raideur d'un matériau soumis à une flexion. Il est conceptuellement lié au module de Young ( $E$ ), qui caractérise la raideur intrinsèque d'un matériau. Cependant, il existe une distinction importante entre ces deux notions. Le module de Young est une propriété fondamentale, indépendante de la géométrie, mesurée dans des conditions de sollicitation pure, comme la traction ou la compression uniaxiale, où les déformations sont homogènes sur toute la section. En revanche, le MOE est calculé lors d'un essai de flexion, où les efforts et les déformations ne sont pas uniformes : les fibres supérieures subissent une compression, tandis que les fibres inférieures sont en traction. Ce contexte introduit des effets liés à la géométrie et à la distribution des contraintes au sein de la section transversale. Dans des conditions bien contrôlées et pour des matériaux isotropes et homogènes, le MOE peut néanmoins être utilisé pour estimer le module de Young.

### **Module de rupture**

La résistance à la flexion (MOR) est une mesure de la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant la rupture lors d'un essai de flexion [37]. Elle prend en compte non seulement la résistance intrinsèque du matériau, mais aussi les effets géométriques et les distributions de contraintes spécifiques à la configuration de l'essai.

Dans le cas du bois, et du bois densifié en particulier, le MOR est un indicateur clé pour évaluer la capacité du matériau à résister aux charges jusqu'à la rupture. En raison de sa structure cellulaire anisotrope et de la rigidité de ses parois lignocellulosiques, il ne présente généralement pas de comportement plastique bien défini. Au lieu de subir une déformation permanente sous une contrainte croissante, le bois tend à se fissurer ou à rompre brusquement après avoir atteint sa résistance maximale. Ainsi, le MOR permet d'appréhender de manière plus réaliste les performances mécaniques du bois dans des conditions de chargement pratiques.

## **1.5.2 Hygroscopie et stabilité dimensionnelle**

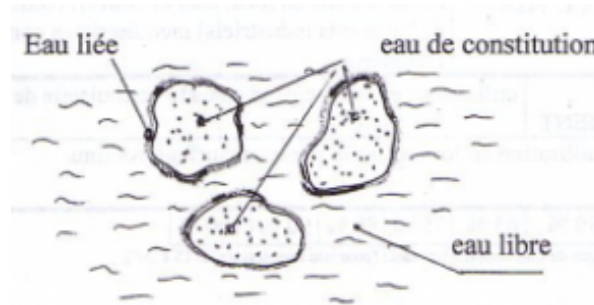
### **Les types d'eau dans le bois**

L'eau dans le bois peut se présenter sous trois formes principales (fig. 1.12) [29] :

## 1. ÉTAT DE L'ART

---

1. **Eau libre** ou eau capillaire : Elle se trouve dans les cavités cellulaires et les vaisseaux. Lorsqu'elle est présente, elle n'affecte pas directement les dimensions ou les propriétés mécaniques du bois, car elle ne pénètre pas la structure polymérique.
2. **Eau liée** : Elle est fixée par des liaisons hydrogène aux groupes hydroxyles des polymères. L'eau liée se trouve principalement dans la cellulose, les hémicelluloses et, dans une moindre mesure, dans la lignine. C'est l'adsorption et la désorption de cette eau qui provoquent des variations dimensionnelles du bois.
3. **Eau chimique** : Elle est intégrée dans la structure chimique des polymères du bois (par exemple, sous forme d'eau de constitution) et ne participe pas aux échanges hygroscopiques.



**FIGURE 1.12** – Répartition des différents types d'eau dans le bois [38]

La quantité d'eau présente dans le bois peut être mesurée par le taux d'humidité du bois  $h$  qui se calcule en comparant la masse initiale d'un échantillon à sa masse sèche selon la formule [39] :

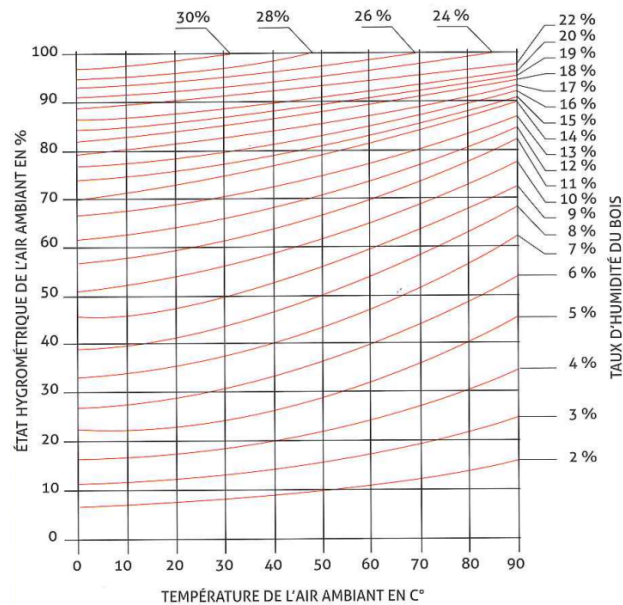
$$h = \frac{m_{humide} - m_{anh}}{m_{anh}} \times 100$$

Où  $m_{humide}$  représente la masse du bois à son état d'équilibre avec l'environnement et  $m_{anh}$  la masse du bois à l'état anhydre. Cette masse anhydre se mesure après l'avoir séché dans une étuve à haute température (typiquement  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) jusqu'à stabilisation de sa masse [40].

Dans le cas du bois utilisé en construction et ayant été séché, l'eau présente dans le bois se trouve principalement sous forme d'eau liée.

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il échange continuellement de l'humidité avec son environnement pour atteindre un état d'équilibre. Cette propriété découle de la présence de groupes hydroxyles (-OH) sur les polymères constitutifs du bois, principalement la cellulose et les hémicelluloses, qui peuvent former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau [41]. Le taux d'humidité de stabilisation, appelé équilibre hygroscopique, varie selon la température et l'humidité relative de l'air dans l'environnement où le bois est entreposé (fig. 1.13).

Le point de saturation des fibres (PSF) correspond au taux d'humidité auquel les parois cellulaires



**FIGURE 1.13** – Exemple d'abaque d'équilibre hygroscopique du bois [42]

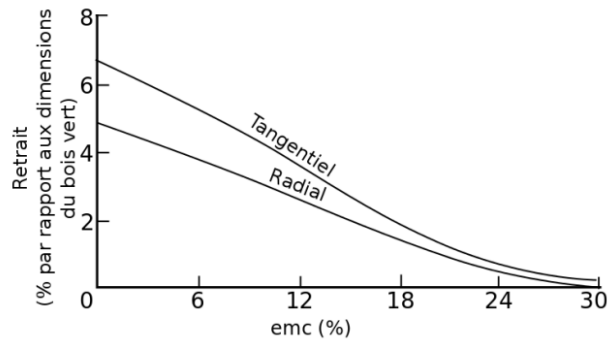
sont saturées en eau liée et les cavités cellulaires sont vides. En dessous de ce point, une variation du taux d'humidité entraîne un gonflement ou un retrait du bois dans les directions radiales et tangentielles.

### Influence de l'humidité sur les dimensions

L'adsorption ou la désorption d'eau liée provoque des variations dimensionnelles dans le bois, souvent appelées gonflement ou retrait. Ces phénomènes résultent principalement de l'interaction de l'eau avec la cellulose et les hémicelluloses. L'eau s'insère dans les parois cellulaires, se fixant aux groupes hydroxyles présents sur ces polymères par des liaisons hydrogène. La cellulose, bien qu'hydrophile, présente une organisation en microfibrilles partiellement cristallines qui limite la quantité d'eau pouvant être adsorbée dans ses zones ordonnées. En revanche, les hémicelluloses, plus amorphes et très hydrophiles, jouent un rôle majeur dans le gonflement des parois cellulaires, car elles adsorbent une plus grande quantité d'eau.

Ces variations dimensionnelles sont particulièrement marquées dans les directions radiale et tangentielle (fig. 1.14, où la structure moins organisée des polymères favorise une déformation accrue. La direction longitudinale, en revanche, est relativement stable en raison de l'alignement des microfibrilles de cellulose, qui limitent les mouvements induits par l'adsorption d'eau. Ce comportement différentiel entre les directions peut être à l'origine de contraintes internes et de déformations lorsque

l'humidité varie de manière non uniforme au sein du matériau.



**FIGURE 1.14** – *Retrait tangential et radial en fonction de l'humidité interne d'équilibre par rapport aux dimensions du bois vert [43]*

### Impact de l'humidité sur la résistance mécanique

L'humidité influence également les propriétés mécaniques du bois en augmentant la mobilité des chaînes moléculaires de cellulose et d'hémicellulose, ce qui réduit sa rigidité et sa résistance [39].

### 1.5.3 Masse volumique du bois

La masse volumique du bois est définie comme le rapport entre la masse et le volume du bois, et s'exprime généralement en  $kg/m^3$ . En raison de sa nature, elle peut varier considérablement selon son taux d'humidité.

En effet, comme expliqué plus haut, l'adsorption ou la désorption de l'eau liée entraîne un gonflement ou un retrait des parois cellulaires, modifiant ainsi le volume du bois et, par conséquent, sa masse volumique. Elle augmente proportionnellement au taux d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres (PSF), au-delà duquel l'eau ajoutée reste dans les cavités cellulaires sans modifier le volume des parois.

La masse volumique anhydre ( $\rho_{anh}$ ) est mesurée lorsque le bois est complètement sec, après avoir été placé dans une étuve à  $105 \pm 2^\circ C$  jusqu'à ce que son poids se stabilise [40]. Elle se calcule avec la formule suivante :

$$\rho_{anh} = \frac{m_{anh}}{V_{anh}}$$

## 1. ÉTAT DE L'ART

---

où  $m_{anh}$  est la masse anhydre et  $V_{anh}$  est le volume anhydre.

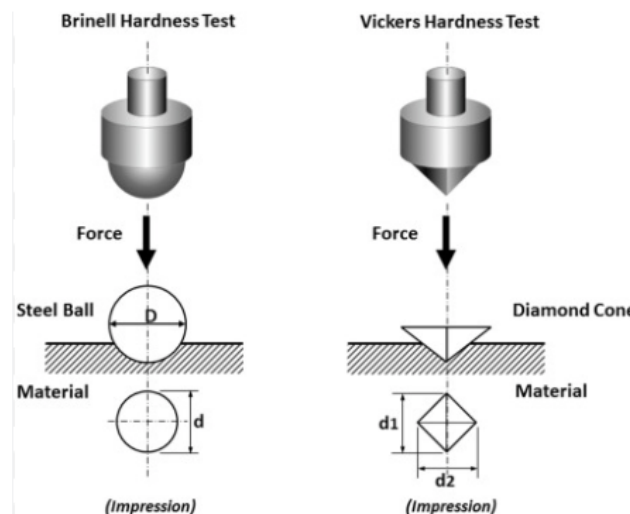
La masse volumique à l'équilibre ( $\rho_{eq}$ ) est mesurée à un taux d'humidité stable, généralement de 12%, correspondant à des conditions standards (20 °C et 65% d'humidité relative) [5]. Elle se calcule comme suit :

$$\rho_{eq} = \frac{m_{eq}}{V_{eq}}$$

où  $m_{eq}$  est la masse à l'équilibre et  $V_{eq}$  le volume correspondant.

### 1.5.4 Dureté

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance mécanique à la pénétration d'un corps plus dur [44]. Elle est mesurée à l'aide de tests normalisés dans lesquels une pointe de forme et de dimensions spécifiques est enfoncée dans le matériau testé avec une charge donnée. L'empreinte laissée sur la surface du matériau peut ensuite être mesurée, permettant ainsi de calculer la dureté [15]. Différents essais existent, comme la dureté de Vickers (HV) où la pointe a une forme pyramidale, ou encore la dureté de Brinell (HB) où la pointe est une bille sphérique (fig. 1.15).



**FIGURE 1.15** – Pointes d'essai de micro-dureté Brinell (gauche) et Vickers (droite) [45]

Pour l'étude d'échantillons en bois, l'essai de dureté Brinell est souvent préféré pour différentes raisons. Il est notamment bien adapté aux essais sur des matériaux non homogènes et laisse des empreintes plus grandes et plus faciles à mesurer que l'essai de Vickers [46]. La dureté du bois

varie en fonction de la densité, de l'espèce, de l'humidité relative, mais aussi de l'orientation dans laquelle elle est mesurée. En effet, tout comme la résistance à la compression, le bois présente une plus grande dureté parallèlement aux fibres qu'en perpendiculaire.

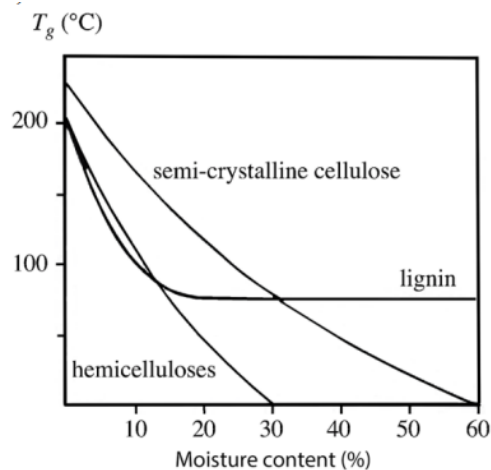
Bien que cette dureté ne soit pas très pertinente dans l'étude des structures en bois, elle convient parfaitement à des applications au sol telles que les parquets, les escaliers ou encore les terrasses.

### 1.5.5 Propriétés thermiques

Le bois est un matériau dont les propriétés mécaniques et physiques évoluent considérablement sous l'effet de la température. Ces variations résultent de mécanismes spécifiques impliquant ses principaux composants : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Ces mécanismes sont particulièrement importants dans les procédés THM, où la maîtrise des effets thermiques est essentielle.

L'augmentation de la température modifie la rigidité, la résistance, la stabilité dimensionnelle ainsi que la durabilité du bois à travers plusieurs phénomènes :

**Température de transition vitreuse ( $T_g$ ) :** La  $T_g$  est la température à laquelle un polymère passe d'un état rigide et vitreux à un état plus malléable et caoutchouteux, réduisant son module d'élasticité de plusieurs ordres de grandeur [47]. Dans le bois, la lignine, les hémicelluloses et les zones semi-cristallines de cellulose sont particulièrement sensibles à ce phénomène (fig.1.16). En conditions sèches, leur  $T_g$  est typiquement supérieure à  $170^\circ\text{C}$ , mais elle peut descendre entre  $80^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  en présence d'humidité [48, 14].



**FIGURE 1.16** – température de transition vitreuse des composants du bois en fonction de leur teneur en humidité [49]

**Dégradation thermique :** À partir de 180°C, les hémicelluloses commencent à se dégrader, entraînant une réduction de leurs composants hydrophiles [50].

**Effet de la température sur les liaisons hydrogène :** Les liaisons hydrogène, qui stabilisent notamment les polymères du bois, se réorganisent sous l'effet de la chaleur. Ce phénomène facilite les déformations homogènes dans la matrice polymérique et réduit les contraintes internes lors de la compression [41].

**Réactions de la lignine :** La lignine subit des réactions de réticulation, ("création de nouvelles liaisons entre plusieurs chaînes dans une même chaîne" [51]) sous l'effet de la chaleur, renforçant la rigidité des parois cellulaires et stabilisant la microstructure du bois densifié [50].

Ces mécanismes thermiques jouent un rôle central dans la densification THM. Le prétraitement tire parti de la transition vitreuse pour rendre la lignine et les hémicelluloses malléables, facilitant ainsi la compression sans endommager la structure cellulaire. Pendant le post-traitement, la dégradation thermique contrôlée et les réactions de fixation thermique stabilisent le bois densifié, améliorant ses propriétés mécaniques et sa durabilité biologique [52]. Ces phénomènes expliquent pourquoi la température est un paramètre critique dans les traitements THM [15, 33].

### 1.5.6 Durabilité

La durabilité du bois fait référence à sa capacité à résister aux dégradations biologiques causées par des agents extérieurs tels que les champignons, les insectes xylophages et les moisissures. Cette propriété est essentielle pour évaluer l'adéquation d'une essence à des applications extérieures, comme les terrasses ou les bardages, où les bois sont exposés à des conditions d'humidité et de ventilation variables [11].

La norme européenne *EN 350* définit cinq classes de durabilité biologique [53] :

- **Classe 1** : Très durable, avec une durée de vie supérieure à 25 ans en classe d'emploi 3-4 (ex : ipé, teck).
- **Classe 2** : Durable (15-25 ans).
- **Classe 3** : Modérément durable (10-15 ans), souvent renforcé par des traitements.
- **Classe 4** : Peu durable (5-10 ans).
- **Classe 5** : Non durable, avec une durée de vie inférieure à 5 ans sans traitement(ex : peuplier brut).

**Méthodes de mesure :** La durabilité est déterminée par des tests normalisés consistant à exposer des échantillons de bois à des agents biologiques dans des conditions simulées (en laboratoire) ou naturelles (en plein air). Ces essais mesurent notamment le pourcentage de perte de masse, la résistance résiduelle et la sensibilité à l'humidité. De plus, pour des applications comme les terrasses, la conception structurelle et la ventilation influencent également la durabilité réelle [11].

**Facteurs influençant la durabilité :** La durabilité naturelle dépend principalement de la composition chimique du bois. Les bois riches en tanins ou phénols, comme l'ipé ou le cumaru, offrent une résistance accrue aux champignons et insectes (classes 1-2). En revanche, les essences comme le peuplier, riches en hémicelluloses hydrophiles, sont plus vulnérables (classe 5). La rétention d'humidité joue également un rôle clé : les bois ayant un bon drainage et une faible absorption d'eau présentent une meilleure longévité en extérieur [17, 10].

**Impact de la densification THM :** Le procédé THM améliore la durabilité des bois peu résistants en réduisant leur hygroscopicité et en rendant leurs parois cellulaires moins accessibles aux agents biologiques. Ce traitement permet au peuplier densifié d'atteindre une classe de durabilité proche de celle des bois tropicaux (classe 1-2) [14].

### 1.6 Méthodes de densification du bois

La densification du bois est un processus visant à améliorer ses propriétés mécaniques et physiques, notamment son module d'élasticité, sa dureté et sa stabilité dimensionnelle [50]. Ces modifications valorisent des essences à faible densité en les rendant mieux adaptées à des applications plus exigeantes, comme le mobilier, les revêtements ou, dans notre cas, le bois de terrasse.

Cette section présente les principales méthodes de densification, en mettant un accent particulier sur la densification thermo-hygro-mécanique (THM), qui allie performance, coût et respect de l'environnement.

#### 1.6.1 Méthodes de densification

Les méthodes de densification se divisent en plusieurs catégories principales : chimique, mécanique, thermo-hygro-mécanique (THM) et méthodes hybrides.

##### **Densification par voie chimique**

La densification par voie chimique consiste à remplir les porosités du bois avec des polymères ou des résines, ce qui améliore considérablement ses propriétés physiques, telles que la dureté et la stabilité dimensionnelle, tout en réduisant sa sensibilité à l'humidité [14]. Différents moyens d'imprégnation, comme l'utilisation de pompes à vide ou la polymérisation in situ par chaleur ou rayons UV, sont employés pour appliquer cette méthode [54].

Bien que très efficace, cette approche est coûteuse, réduit la biodégradabilité du bois et soulève des préoccupations environnementales [55].

##### **Densification mécanique et thermo-mécanique**

La densification mécanique repose uniquement sur la compression du bois afin de réduire les vides cellulaires. Elle se fait dans des conditions ambiantes ou à température relativement haute (180 – 220°C). Bien que cette méthode soit simple et économique, elle présente un retour viscoélastique important (spring-back) qui pousse le bois à retrouver partiellement sa forme d'origine après la compression, limitant ainsi l'augmentation de la densité et la stabilité dimensionnelle [55].

### **Méthodes hybrides**

Les méthodes hybrides combinent les approches chimique et mécanique. Par exemple, l'imprégnation de résines avant compression permet d'améliorer la stabilité dimensionnelle et la résistance mécanique, tout en réduisant le retour viscoélastique. Ces méthodes offrent un compromis entre des performances élevées et la complexité du procédé [14].

### **Densification de surface**

Une approche récente consiste à densifier uniquement les couches superficielles du bois. Cela augmente la dureté et la résistance à l'abrasion, tout en conservant une faible densité au cœur du matériau. Cette technique est particulièrement intéressante pour des applications où seule la surface est sollicitée, comme les planchers ou les meubles [16].

### **Densification thermo-hygro-mécanique**

La méthode THM, ou densification thermo-hygro-mécanique<sup>1</sup>, combine chaleur, vapeur et compression mécanique pour restructurer la matrice cellulaire. Ce procédé exploite la réduction de la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) de la lignine en présence d'humidité, permettant une déformation plastique contrôlée avec un retour viscoélastique minimal. Il offre une approche équilibrée entre performance, coût et respect de l'environnement [16, 55].

La densification THM est particulièrement adaptée au bois de terrasse pour plusieurs raisons : elle augmente la résistance mécanique et la dureté du bois, réduit les effets de gonflement et de retrait liés aux variations d'humidité, et améliore sa durabilité. De plus, elle est moins coûteuse et plus respectueuse de l'environnement que les méthodes chimiques.

#### **1.6.2 Procédé THM**

Il existe différentes variantes du procédé de densification THM, qui adaptent les paramètres du traitement en fonction des objectifs recherchés et utilisent diverses méthodes d'humidification des

---

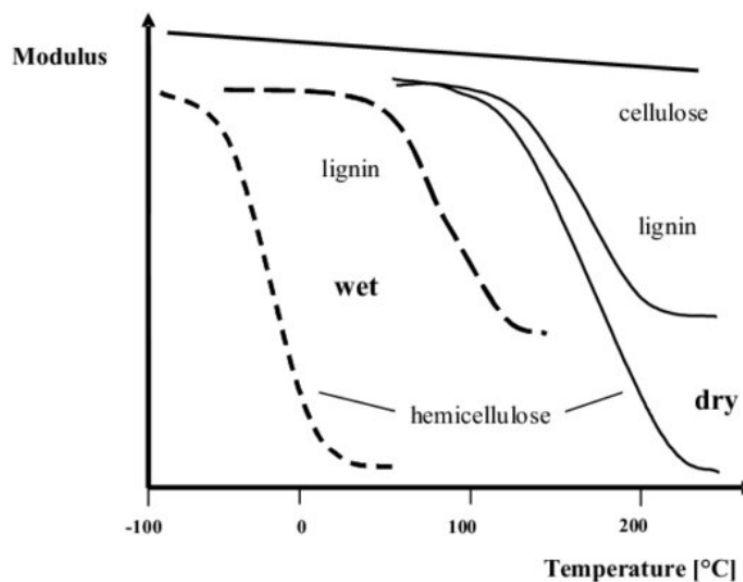
1. La littérature utilise parfois les termes "thermo-hydro-mécanique" et "thermo-hygro-mécanique" de manière interchangeable. Dans ce travail, le terme "thermo-hygro-mécanique" est préféré car il insiste sur le rôle critique de l'humidité dans le processus.

échantillons, de compression et différents paramètres de post-traitement [48]. Cette section décrit la méthode spécifique utilisée dans le cadre de cette étude.

### 1. Pré-traitement

Le prétraitement vise à préparer les échantillons pour la densification en maximisant leur déformabilité. Cela implique une exposition à de hautes températures ( $80 - 100^{\circ}\text{C}$ ) et à une humidité relative élevée ( $95 - 100\%$ ). Ces conditions permettent d'atteindre le point de saturation des fibres, assurant une plastification adéquate des polymères du bois, en particulier de la lignine, qui est la principale responsable de la résistance à la compression radiale et tangentielle. Dans le cas du peuplier utilisé dans cette étude, la teneur en eau atteinte est d'environ  $24\%$  [15]

La lignine, les hémicelluloses et les zones amorphes de cellulose possèdent des groupements hydroxyles, les rendant hygroscopiques. L'eau agit comme plastifiant, facilitant les déformations dans la matrice lignocellulosique. Ainsi, la lignine voit sa température de transition vitreuse  $T_g$  réduire significativement sous l'effet de l'humidité (fig.1.17)[48]. La  $T_g$  des hémicelluloses et de la lignine se situe autour des  $170^{\circ}\text{C}$  en conditions sèches et peut descendre à  $80 - 100^{\circ}\text{C}$  en conditions saturées [14]. C'est cette transition vitreuse de la lignine et, dans une moindre mesure, des hémicelluloses, qui permet une déformation sans fracturation ainsi qu'une déformation contrôlée. La cellulose cristalline n'est pas affectée par l'humidité.



**FIGURE 1.17** – Diagramme d'impact de la température sur le module d'élasticité des celluloses, hémicelluloses et lignine dans un état sec et au PSF [56]

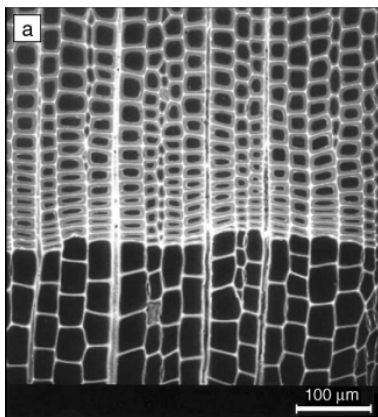
## 1. ÉTAT DE L'ART

---

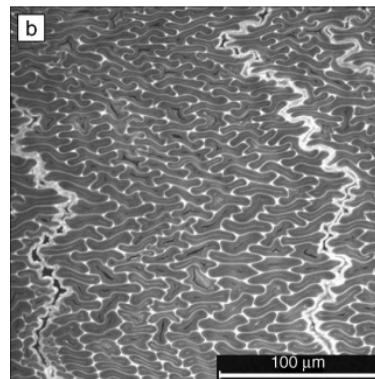
Une méthode alternative de prétraitement, telle que l'immersion du bois dans l'eau chaude, bien qu'elle puisse sembler plus rapide que l'enceinte climatique, n'est pas envisageable. Des essais ont été réalisés, par *de Crombrughe*[36] dans le cadre d'un précédent mémoire, comparant la densification avec un prétraitement en enceinte climatique et avec une immersion dans de l'eau bouillante, et ont révélé les limitations de cette méthode. En plus de saturer les échantillons en eau libre, l'immersion a causé une saturation en eau liée, ce qui entrave les déformations lors de la compression et accentue le retour de forme pendant et après le post-traitement, menant à des performances nettement inférieures.

## 2. Compression

Elle repose sur l'application d'une pression mécanique à des températures élevées (140 – 220°C [57]), ce qui entraîne une déformation permanente de la structure cellulaire (fig.1.18).



(a) *Microstructure avant compression*



(b) *Microstructure après compression*

**FIGURE 1.18** – *Structure microscopique d'un échantillon d'épicéa avant et après densification [58]*

La densification commence par une compression à vitesse constante jusqu'à atteindre un taux de densification de 60% (ce qui correspond à un écartement des plateaux égal à 40% de l'écartement initial). Cette compression progressive réduit les vides intercellulaires et réorganise la matrice lignocellulosique. Les hémicelluloses, les microfibrilles de cellulose amorphes et la lignine sont soumises à des contraintes mécaniques qui modifient leur agencement interne. La haute température rend la lignine suffisamment malléable pour permettre une déformation contrôlée sans fracture [14].

Une fois la compression initiale atteinte, les plateaux de compression sont maintenus à distance constante pendant une certaine durée (qui fut de 1800s, 30 minutes pour l'ensemble de cette

## 1. ÉTAT DE L'ART

étude). Cette étape permet une relaxation partielle des contraintes internes accumulées pendant la compression. La chaleur et l'humidité facilitent la redistribution des charges au sein de la matrice polymérique, limitant ainsi le retour viscoélastique après le relâchement de la pression. Ce temps d'attente favorise une meilleure stabilité dimensionnelle et une densité plus uniforme des échantillons.

La compression du bois peut être représentée par une courbe contrainte-déformation typique (fig 1.19), qui met en évidence plusieurs zones correspondant à différents comportements mécaniques du matériau : une première zone élastique où le matériau se déforme de manière réversible, une courte transition élasto-plastique marquant le début des déformations permanentes, jusqu'à atteindre le point de rupture élastique ( $\sigma_y$ ). La zone plastique qui suit est caractérisée par une déformation permanente accrue sous contrainte presque constante. Enfin, lorsque les parois cellulaires se compactent complètement, le bois entre dans une phase de densification, marquée par une augmentation rapide de la contrainte, jusqu'à ce que l'écartement des plateaux de compression limite la déformation.

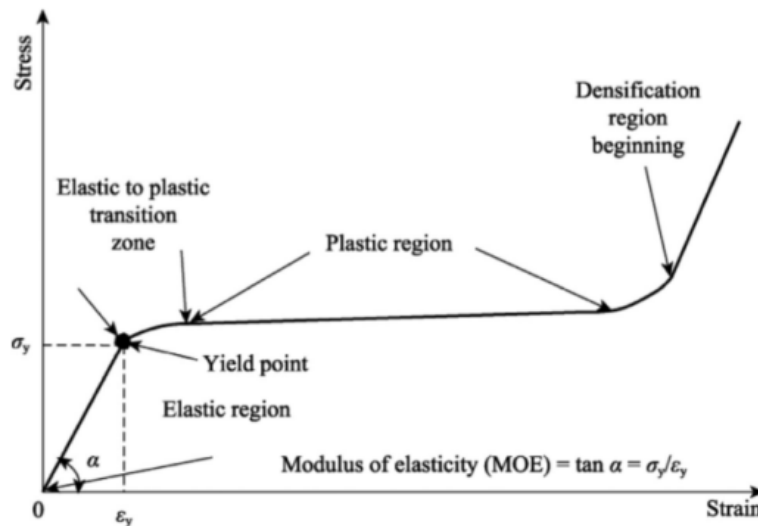


FIGURE 1.19 – Comportement du bois sous compression radiale [59]

### 3. Post-traitement

Le post-traitement consiste à placer les échantillons sortis de la compression directement dans une étuve à une température d'environ  $180^\circ\text{C}$  pendant 45 minutes [33].

Elle a pour but de figer la microstructure du bois densifié en réduisant les phénomènes de retour élastique et en améliorant sa durabilité dimensionnelle et biologique. Elle repose sur différents

mécanismes :

- **Fixation thermique** : La chaleur induit des réactions de dégradation légère des hémicelluloses et élimine les groupes fonctionnels hydrophiles, qui sont responsables des variations dimensionnelles. Cela réduit la capacité du bois à absorber de l'eau et améliore sa stabilité face aux variations d'humidité [58]. Ce phénomène est particulièrement intéressant dans une application en bois de terrasse où des cycles d'humidité répétés causeraient des cycles de gonflement retrait qui pourraient compromettre les performances du bois.
- **Réactions de la lignine** : Sous l'effet de températures élevées, la lignine subit des réactions de recombinaison moléculaire (ex : réticulation). Ces modifications augmentent sa rigidité et renforcent les liaisons entre les parois cellulaires, ce qui contribue à stabiliser la microstructure densifiée. Par ailleurs, ces transformations chimiques renforcent la résistance biologique du bois en rendant les parois cellulaires moins accessibles aux enzymes de dégradation produites par les champignons ou les insectes. À des températures de  $180^{\circ}\text{C}$ , ces réactions restent modérées, évitant une dégradation excessive qui pourrait compromettre les propriétés mécaniques du bois [33, 50].
- **Pyrolyse partielle** : Les températures sont volontairement limitées à  $180^{\circ}\text{C}$  afin d'éviter des processus de pyrolyse partielle, qui se produisent à des températures plus élevées et entraîneraient une dégradation excessive des composants du bois, compromettant ses propriétés mécaniques et sa durabilité [58].

En résumé, le post-traitement à  $180^{\circ}\text{C}$  remplit trois objectifs principaux : (i) stabiliser la microstructure en réduisant les groupes fonctionnels hydrophiles présents dans les hémicelluloses, (ii) améliorer la durabilité biologique et la rigidité des parois cellulaires par la réticulation de la lignine, et (iii) conférer une meilleure résistance aux cycles hygroscopiques, un aspect clé pour des applications extérieures telles que les terrasses.

### 1.6.3 Revue de littérature

Les recherches sur la densification THM ont permis de mieux comprendre les mécanismes influençant le processus et les propriétés finales du bois densifié. Cette section explore les avancées clés dans ce domaine, en mettant en lumière les contributions de la température, des vitesses de compression et des traitements post-densification.

### **Compression et paramètres influents**

**Température :** La température joue un rôle central dans la densification, car elle influence la malléabilité des polymères du bois. La lignine et les hémicelluloses atteignent leur état caoutchouteux lorsque leur température de transition vitreuse ( $T_g$ ) est dépassée, ce qui facilite la compression sans fissuration. La littérature rapporte des températures optimales comprises entre  $140^{\circ}\text{C}$  et  $220^{\circ}\text{C}$  pour la compression THM [50, 55]. Cependant, dans cette étude, une température maximale de  $170^{\circ}\text{C}$  a été utilisée pour éviter une pyrolyse précoce, susceptible d'altérer les propriétés mécaniques et esthétiques du bois [33]. Une analyse des données montre que des températures élevées, bien qu'avantageuses pour réduire les retours élastiques, accélèrent également la dégradation thermique des hémicelluloses [57].

**Vitesse de compression :** La vitesse de compression influence également la distribution des contraintes et la qualité de la densification. Une compression lente ( $4\text{ mm/min}$ ) permet une redistribution progressive des contraintes, réduisant le risque de fissuration interne [14]. Une vitesse rapide ( $200\text{ mm/min}$ ) peut introduire des effets dynamiques, modifiant les mécanismes de déformation et augmentant le confinement des contraintes. Cependant, ces dernières restent peu étudiées pour des vitesses aussi élevées.

**Confinement des contraintes :** Le confinement des contraintes se réfère à la redistribution des efforts internes dans la matrice lignocellulosique pendant et après la compression. Lorsque les contraintes ne sont pas uniformément dissipées, elles peuvent provoquer des retours élastiques, des dommages dans la microstructure du bois ou des déformations résiduelles. Des études montrent que le maintien sous pression à haute température (typiquement 30 minutes) favorise la relaxation des contraintes internes, améliorant ainsi la stabilité dimensionnelle du bois densifié [14, 48].

**Dimension des échantillons :** Les dimensions des échantillons utilisés dans les études sur la densification THM varient en fonction des objectifs des travaux et des équipements disponibles. Les études de laboratoire privilégient généralement des spécimens relativement petits, ce qui facilite leur manipulation et permet une évaluation rapide des traitements ( $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times$  épaisseur variable). À plus grande échelle, certains travaux simulent des applications industrielles avec des échantillons mesurant jusqu'à  $46\text{mm}$  d'épaisseur avant compression [60]. Cependant, malgré cette diversité de formats, nous n'avons pas trouvé d'étude explorant directement l'impact des dimensions des échantillons sur les résultats de densification et sur les propriétés finales du bois.

Cependant, malgré cette diversité de formats, nous n'avons pas trouvé d'étude explorant directement l'impact des dimensions des échantillons sur les résultats de densification et sur les propriétés finales du bois. Cette lacune est notable, car la géométrie des échantillons pourrait potentiellement influencer des phénomènes tels que le confinement des contraintes, les gradients thermiques et hydriques, ou encore l'homogénéité de la densité après compression. Cette question mérite donc une attention particulière dans de futures recherches.

### **Post-traitement et stabilisation dimensionnelle**

Des températures comprises entre 160°C et 200°C sont couramment utilisées pour réduire l'hygroscopie et améliorer la résistance biologique du bois densifié. À 180°C, des réactions de réticulation de la lignine renforcent les parois cellulaires, augmentant leur rigidité et leur résistance aux enzymes dégradantes [50, 33]. Simultanément, les hémicelluloses amorphes subissent une légère dégradation thermique, ce qui réduit les groupes hydroxyles disponibles et, par conséquent, la capacité du bois à absorber l'eau [14].

Le post-traitement favorise également des modifications chimiques, telles que la recombinaison moléculaire de la lignine et la stabilisation thermique des parois cellulaires. Ces transformations réduisent la sensibilité du bois densifié aux variations dimensionnelles et aux cycles d'humidité, ce qui est essentiel pour des applications extérieures telles que les terrasses [55].

## **1.7 Conclusion**

Cette revue de la littérature met en évidence les enjeux écologiques, économiques et industriels associés à la densification d'essences peu denses de feuillus, comme le peuplier. Les forêts belges, largement dominées par des monocultures d'essences denses ou de résineux, souffrent d'une faible résilience face aux changements climatiques et aux attaques biologiques. Diversifier ces forêts en intégrant des espèces à croissance rapide et moins exigeantes, comme le peuplier, constitue une stratégie essentielle pour renforcer leur durabilité et leur fonctionnalité.

Ces bois à faible densité, bien qu'écologiquement intéressants, présentent des limitations intrinsèques, notamment en termes de propriétés mécaniques, de durabilité et de stabilité dimensionnelle. Ces caractéristiques limitent leur adoption dans des applications exigeantes, telles que le bois de terrasse ou les structures extérieures. Dans ce contexte, les procédés de densification, et plus

---

particulièrement le procédé thermo-hygro-mécanique (THM), apparaissent comme une solution technologiquement clé.

Le procédé THM, en modifiant la structure interne du bois par l'action combinée de la chaleur, de l'eau et de la compression mécanique, permet d'améliorer significativement ses propriétés mécaniques et physiques. Cette technique offre la possibilité de transformer des essences peu valorisées en matériaux compétitifs, comparables aux bois tropicaux, tout en réduisant leur hygroscopicité et en augmentant leur durabilité biologique. En outre, le procédé THM s'inscrit dans une démarche environnementale et économique viable, favorisant l'exploitation locale et durable des ressources forestières.

Cet état de l'art souligne également que, bien que prometteuse, la densification THM reste un domaine de recherche en plein développement. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre l'influence des paramètres opératoires (température, vitesse de compression, géométrie des échantillons) sur les propriétés finales du bois densifié, ainsi que pour optimiser le procédé en vue d'applications spécifiques.

En conclusion, la densification THM constitue une réponse concrète et innovante aux enjeux écologiques et industriels liés à la valorisation des bois à faible densité. Ce procédé ouvre des perspectives intéressantes pour une gestion forestière plus résiliente et diversifiée, tout en répondant aux besoins croissants en matériaux durables et performants.

## 2. Matériau utilisé et méthodes expérimentales

Ce chapitre détaille les matériaux utilisés ainsi que les procédés expérimentaux mis en œuvre dans cette étude, visant à caractériser les propriétés mécaniques et microstructurales du bois densifié. Les différentes étapes expérimentales, incluant la préparation des échantillons, leur densification par compression thermo-hygro-mécanique et les essais mécaniques réalisés pour déterminer les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR), sont décrites avec précision. Enfin, des techniques complémentaires telles que la microscopie optique et les essais de dureté Brinell sont présentées pour une analyse approfondie des propriétés structurelles et fonctionnelles du matériau densifié.

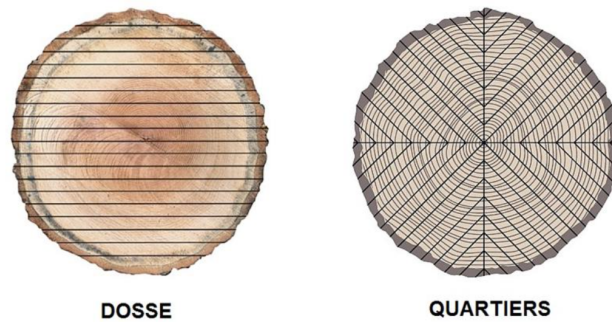
### 2.1 Bois étudié

Le matériau principal utilisé dans cette étude est le peuplier tremble (*Populus tremula*), provenant de Belgique. Ce bois a été initialement transformé (écorçage, sciage, séchage et triage) à la scierie Bourguignon Bois, située à Tourinnes-Saint-Lambert, dans le Brabant wallon.

Les troncs bruts ont été débités selon un procédé de sciage longitudinal afin d'obtenir des planches d'une épaisseur initiale de  $54\text{mm}$ . Ces planches ont ensuite été débitées sur quartier (fig.2.1), ce qui permet d'orienter les cernes de croissance presque perpendiculairement à la surface des planches. Après un rabotage minutieux, les éléments obtenus mesuraient environ  $2500 \times 50 \times 50$ .

Le choix du débit sur quartier, contrairement au débit sur dosse, est justifié par son impact sur le comportement mécanique du bois lors de la densification. Cette technique oriente les cernes de croissance de manière à ce que la compression soit appliquée perpendiculairement à celles-ci. Dans cette configuration, les efforts générés lors de la densification sont mieux répartis dans la structure du bois, réduisant ainsi les risques de cisaillement transversal au niveau des parois cellulaires. Contrairement au débit sur dosse, où les cernes orientés tangentiellement favorisent la formation de plans de faiblesse, le débit sur quartier permet une déformation plus régulière et contrôle mieux les défaillances mécaniques potentielles. Cette orientation optimale améliore donc la résistance du

bois densifié en minimisant les ruptures localisées et les contraintes indésirables.



**FIGURE 2.1** – *Différence de coupe entre le débit sur dosse et débits sur quartier [61]*

Les échantillons bruts, d'une longueur uniforme de  $220\text{mm}$ , ont été préparés avec des sections de  $20\text{mm} * 20\text{mm}$  (échantillons dits *Carrés*),  $50\text{mm} * 50\text{mm}$  (dits *Carrés*) et  $20\text{mm} * 50\text{mm}$  (dits *Carrés*). Pour garantir la précision et la cohérence des résultats, une attention particulière a été portée à l'orientation des cernes de croissance, qui ont été alignés aussi parallèlement que possible aux faces supérieures et inférieures. Les échantillons ont également été soigneusement sélectionnés pour exclure toute présence de nœuds et minimiser les défauts visibles susceptibles d'altérer les propriétés mécaniques ou les résultats des analyses. La sélection des dimensions des échantillons *rectangles* et *grands carrés* a été limitée par les dimensions initiales des chevrons disponibles au laboratoire.

## 2.2 Masse volumique

La masse volumique des échantillons a été mesurée avant et après densification, une première fois à l'équilibre hygroscopique dans le laboratoire, et une seconde fois à l'état anhydre. Pour cela, les échantillons ont été pesés à l'aide d'une balance de précision *Sartorius CP Analytical* et leurs dimensions ont été mesurées avec des pieds à coulisse *Mitutoyo 150 mm* et *300mm*. Les dimensions ont été relevées de manière précise en prenant une mesure pour la longueur et trois mesures pour la hauteur et la largeur, dont la moyenne a ensuite été calculée.

Pour déterminer leur masse à l'état anhydre, les échantillons ont été entreposés dans une étuve à  $105^{\circ}\text{C}$  jusqu'à stabilisation de leur masse [62].

## 2.3 Procédé de densification

Comme détaillé précédemment, la densification par procédé THM comprend trois étapes principales : le prétraitement, la compression et le post-traitement. Une explication plus détaillée des différents paramètres a déjà été fournie dans la revue de littérature.

### 2.3.1 Prétraitement

Le prétraitement a pour but de faire passer les différents composants polymériques du bois, plus particulièrement la lignine et, dans une moindre mesure, les hémicelluloses et les zones amorphes de cellulose, d'un état vitreux (cassant) à un état caoutchouteux (déformable). Cette transition est obtenue en augmentant la teneur en eau des échantillons jusqu'au PSF. Cette humidification permet de réduire significativement la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) des polymères hygroscopiques du bois.

Ainsi, les échantillons ont été soumis à un prétraitement dans une enceinte climatique *vötsch-technik VC3 4018* (fig.2.2) maintenue à  $98^{\circ}\text{C}$  et 95% d'humidité relative pendant environ 24 heures. Cette durée est justifiée par la nécessité de permettre une diffusion uniforme de l'eau à travers le matériau, un processus relativement lent en raison de la structure poreuse du bois et de la faible mobilité de l'eau dans ses parois cellulaires, ce qui garantit une stabilisation de la masse des échantillons. À la fin de ce prétraitement, les échantillons ont atteint leur PSF et une teneur en eau uniforme de  $24 \pm 1\%$  [15]. Comme expliqué dans la revue de littérature, cette teneur en eau permet une réduction suffisante de la température de transition vitreuse  $T_g$  de la lignine et des hémicelluloses [36, 47, 63].



**FIGURE 2.2** – *vötsch-technik VC3 4018*

### 2.3.2 Densification par compression

La compression constitue l'étape clé du processus de densification thermo-hygro-mécanique (THM). Elle repose sur l'application simultanée de chaleur et de pression mécanique pour modifier la structure interne du bois. L'objectif de cette étape est de réduire les espaces intercellulaires et de compacter la matrice lignocellulosique.

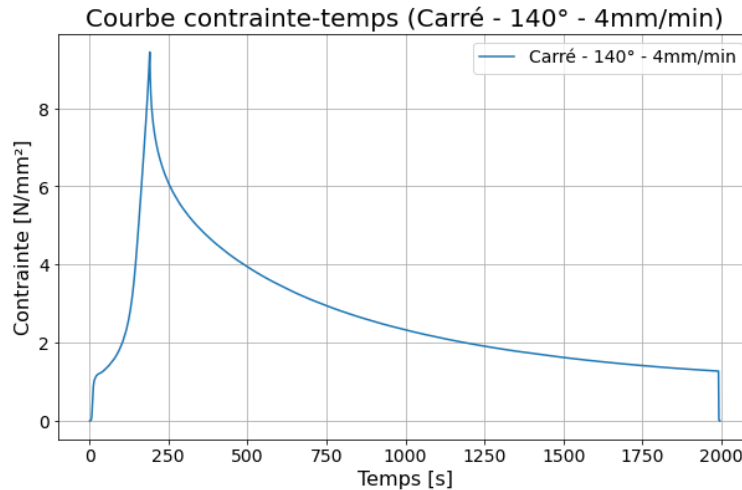


**FIGURE 2.3** – *Machine de compression ZwickRoell Z250 montée avec étuve [36]*

Pour ce faire, les échantillons préalablement saturés ont été placés dans une presse mécanique *Zwick/Roell Z250* équipée d'une étuve (fig.2.3), où la compression a été réalisée selon des paramètres soigneusement contrôlés :

La température de l'étuve (et des plateaux de compression) a été fixée à  $140^{\circ}\text{C}$  ou  $170^{\circ}\text{C}$  en fonction des échantillons. Avant de commencer les essais de compression, une durée de 2 heures a été respectée pour permettre à la machine le temps d'atteindre la température cible. Après cette période, la position de contact des plateaux, modifiée par la dilatation thermique des pièces, a été réinitialisée et une première compression à blanc a été effectuée pour garantir la bonne mise en place des plateaux de compression sur leur rotule.

Une fois la température stabilisée et les derniers réglages effectués (remise à zéro de la cellule de force), la compression a été appliquée aux échantillons dans la direction radiale afin de minimiser les risques de cisaillement transversal et maximiser l'homogénéité de la déformation. Dans un premier temps, les plateaux se sont rapprochés jusqu'à atteindre une compression de 60% avec des vitesses de déplacement de  $4\text{mm}/\text{min}$  ou de  $200\text{mm}/\text{min}$ . Une fois la compression atteinte, les plateaux ont été maintenus à cette distance pendant une durée de 1800s afin de permettre la relaxation



**FIGURE 2.4** – Evolution de la contrainte en fonction du temps lors de la compression

des contraintes internes accumulées lors de la compression et ainsi limiter le retour viscoélastique (fig.2.4) [15].

La compression de 60% a été fixée à une distance entre les plateaux de 7,5mm pour les échantillons *Carré* et *Rectangles* et de 20mm pour les échantillons *grand rectangles*

Les températures de 140°C et 170°C ont été sélectionnées pour s'aligner sur les travaux de *Bosmans* et de *Crombrugghe* [36, 15], qui ont montré que ces plages de température permettent de réduire la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) de la lignine et des hémicelluloses, facilitant ainsi la plasticité des composants lignocellulosiques. De même, la vitesse de compression de 4mm/min a été adoptée en continuité avec leurs protocoles, assurant une déformation contrôlée et homogène des échantillons. À titre d'exploration, une vitesse plus élevée de 200mm/min a été étudiée pour déterminer si des mécanismes supplémentaires, tels que des contraintes dynamiques ou des effets de friction interne, pouvaient intervenir lors d'une compression plus rapide.

### 2.3.3 Post-traitement

Les échantillons compressés sont placés dans une étuve à 180°C pendant 45 minutes. Ce post-traitement a pour but de fixer la microstructure du bois densifié en réduisant les phénomènes de retour élastique, tout en améliorant sa stabilité dimensionnelle et sa durabilité.

Une description approfondie des mécanismes physiques et chimiques qui se produisent dans la structure lignocellulosique du bois a déjà été faite à la section 1.6.2

## 2.4 Observation de la microstructure

Une observation de la microstructure du bois densifié, effectuée sur sa section transversale, a été réalisée à l'aide du microscope numérique 3D *Keyence VHX-7000*. Contrairement aux microscopes optiques traditionnels, ce type de microscope est équipé d'une caméra numérique qui capture les images et les affiche directement sur un écran.

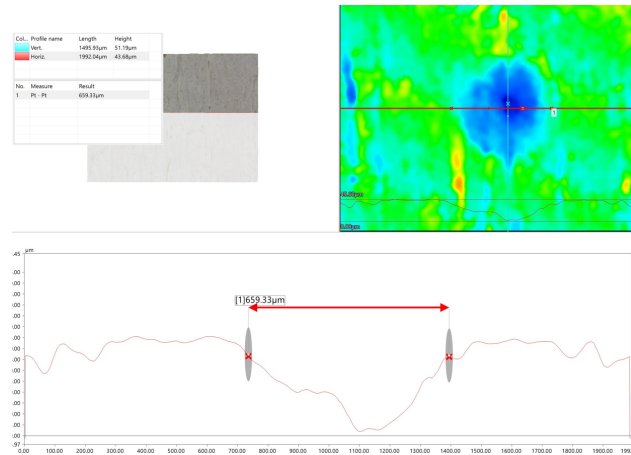


**FIGURE 2.5** – *Microscope 3D Keyence VHX 7000 [64]*

L'utilisation d'un microscope numérique présente plusieurs avantages notables. Il permet d'observer différentes zones de l'échantillon de manière très précise, grâce à sa capacité à ajuster facilement le grossissement et à repositionner rapidement l'échantillon. Il est également doté d'une fonction de composition d'images, ce qui permet d'assembler automatiquement plusieurs prises de vue (stitching) pour obtenir une image détaillée et nette sur de très grandes zones, au-delà du champ de vision, ainsi que d'assembler plusieurs images d'une même zone sous différents niveaux de mise au point afin d'obtenir une image nette sur toute la gamme de hauteur.

En outre, ce microscope offre des fonctionnalités avancées pour l'analyse des échantillons. Ainsi, une fonction de détermination des profils permet d'extraire des informations sur la topographie de la surface en traçant des profils d'altitude sur les structures observées (fig.2.6) et pour mesurer la taille des indentations effectuées lors des essais de dureté.

Afin de prévenir toute imperfection et d'obtenir une observation de la microstructure la plus nette possible, les échantillons ont tout d'abord été polis à l'aide d'une polisseuse *Metkon Forcipol 102* et de papiers abrasifs SiC, avec des tailles de grains décroissantes de P80 ( $\approx 200\mu\text{m}$ ) à P1200 ( $\approx 15\mu\text{m}$ ).



**FIGURE 2.6** – Exemple de profil topographique réalisé pour vérifier les dimensions d'un indenteur

## 2.5 Essais de flexion

### 2.5.1 Préparation des échantillons

Après la densification, les échantillons présentent une géométrie irrégulière. Les faces supérieure et inférieure peuvent être légèrement bombées en raison du retour viscoélastique, tandis que les surfaces latérales montrent des déformations compressives. Il est donc nécessaire de les usiner afin de garantir leur planéité et la régularité des dimensions (fig.2.7). Pour ce faire, les échantillons sont placés dans la fraiseuse, où des passes de 0,5 à 1 mm sont progressivement réalisées jusqu'à obtenir des faces planes et parallèles.



**FIGURE 2.7** – Echantillons Carrés densifiés à 170°C et 200mm/min après usinage (gauche) et avant usinage (droite)

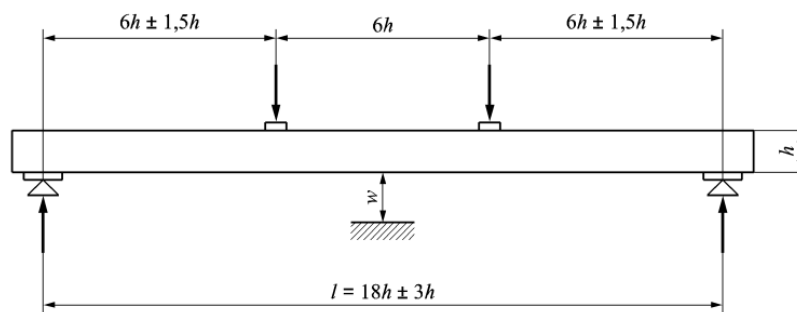
Une fois usinés, les échantillons sont séchés dans une étuve à 105°C pendant 12 heures afin de

déterminer leur masse et leurs dimensions anhydres. Ils sont ensuite entreposés dans le laboratoire jusqu'à atteindre leur humidité d'équilibre avant de subir les essais de flexion.

### 2.5.2 Essais

Des essais de flexion 4 points sont réalisés conformément à la norme *NBN EN 408+A1*<sup>1</sup> afin de déterminer les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) des échantillons densifiés. Une explication de la signification physique des modules d'élasticité et de rupture a déjà été fournie dans la section 1.5.1.

L'essai de flexion 4 points est l'essai principalement utilisée pour déterminer le module d'élasticité en flexion de matériaux fragiles comme le bois [65]. Il permet d'obtenir un moment pur au centre de l'échantillon sans efforts tranchants [66].



**FIGURE 2.8** – Représentation des dimensions utilisées lors de l'essai de flexion [67]

Les échantillons sont disposés sur la machine d'essai *Zwick Roell Z250*, initialement conçue pour des essais de compression, mais adaptée ici pour des essais de flexion (Fig.2.9). Cette configuration spécifique comprend deux appuis parallèles et deux points d'application de la force. L'espacement entre les deux appuis est défini par la norme et correspond à  $18 \pm 3h$  (où  $h$  est la hauteur de l'échantillon), et l'espacement entre les appuis et les points d'application est de  $6 \pm 1,5h$  (fig.2.8). Une vitesse de déplacement constante est appliquée de manière à ce que l'essai dure entre 300 et 600 secondes, conformément à la norme *NBN EN 408+A1*. Pour l'ensemble de ce travail, cette vitesse a été fixée à  $1\text{mm}/\text{min}$  afin d'assurer une meilleure comparabilité des résultats. Bien qu'elle ait pu varier considérablement en fonction des échantillons, tous les essais effectués ont respecté cette contrainte de temps.

Les données enregistrées par *testXpert*, le logiciel associé à la machine, incluent la durée de l'essai, la

1. norme relative à la détermination des propriétés physiques et mécaniques du bois de structure et du lamellé-collé.



(a) ZwickRoell Z250



(b) Configuration des appuis

**FIGURE 2.9** – Configuration de l'essai de Flexion

flèche au centre de l'échantillon (mesurée par un extensomètre de déplacement) et la force appliquée.

### 2.5.3 Calcul du Module d'élasticité

La détermination du module d'élasticité des échantillons de bois selon la norme *NBN EN 408+A1* est donnée par :

$$MOE = \frac{3aL^3 - 4a^3}{4bh^3} \cdot \frac{F_{0.4} - F_{0.1}}{w_{0.4} - w_{0.1}}$$

avec :

- $a$  : Distance entre le support et le point de charge (en mm).
- $L$  : Distance entre les supports (en mm).
- $F_{0.1}$  et  $F_{0.4}$  : Forces correspondant à 10% et 40% de la force maximale  $F_{\max}$  (en N).
- $w_{0.1}$  et  $w_{0.4}$  : Déplacements correspondants aux forces  $F_{0.1}$  et  $F_{0.4}$  (en mm).

### 2.5.4 Calcul du Module de rupture

La détermination du module de rupture des échantillons de bois selon la norme *NBN EN 408+A1* est donnée par :

$$MOR = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

avec :

- $F_{\max}$  : Force maximale avant rupture (en N).

- $L$  : Distance entre les supports (en mm).
- $b$  : Largeur de l'échantillon (en mm).
- $h$  : Hauteur de l'échantillon (en mm).

### 2.5.5 Obtention des courbes de contrainte-déformation

Les courbes de contrainte-déformation sont obtenues à partir des données enregistrées lors des essais de flexion 4 points et permettent de mieux comprendre le comportement mécanique des échantillons densifiés sous charge. Elles représentent la contrainte et la déformation dans la fibre inférieure au milieu de la poutre, où les contraintes en flexion sont maximales. Pour passer des courbes force-déplacement, issues de la machine d'essai, aux courbes contrainte-déformation, des calculs basés sur les dimensions des échantillons et les paramètres de l'essai sont nécessaires.

#### Calculs pour la contrainte

La contrainte ( $\sigma$ ) dans la fibre inférieure est calculée à partir du moment fléchissant ( $M$ ) selon la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

avec :

- $M = F \cdot a$  : Moment fléchissant, avec  $F$  la force appliquée (en  $N$ ) et  $a$  la distance entre les points d'application de la charge et les appuis (en  $mm$ ).
- $y = \frac{h}{2}$  : Distance entre la fibre neutre et la fibre inférieure de l'échantillon (en  $mm$ ),  $h$  étant la hauteur de l'échantillon.
- $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$  : Moment d'inertie de la section transversale (en  $mm^4$ ), où  $b$  est la largeur de l'échantillon (en  $mm$ ).

Les valeurs obtenues représentent directement la contrainte maximale dans la fibre inférieure au centre de la poutre.

#### Calculs pour la déformation

La déformation ( $\varepsilon$ ) dans la fibre inférieure est calculée à partir du déplacement central mesuré ( $w$ ) en utilisant la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot w \cdot h}{L^2}$$

où :

- $w$  : Déplacement (en mm) mesuré au centre de l'échantillon.
- $L$  : Distance entre les supports (en mm).
- $h$  : Hauteur de l'échantillon (en mm).

Ces valeurs de déformation décrivent le comportement mécanique de la fibre inférieure soumise aux efforts de flexion maximale.

### Méthodologie d'analyse

1. **Préparation des données** : Les données brutes de force et de déplacement sont extraites pour chaque échantillon, et les dimensions des échantillons ( $b$ ,  $h$ , et  $L$ ) sont récupérées.
2. **Filtrage des données** : Les données sont limitées jusqu'au point où la force appliquée redescend à moins de 30 % de la force maximale ( $F_{\max}$ ) pour se concentrer sur la phase de charge utile.
3. **Calcul des contraintes et déformations** : Les formules mentionnées ci-dessus sont appliquées pour convertir les données force-déplacement en courbes contrainte-déformation.
4. **Génération des graphiques** : Les courbes sont tracées pour chaque groupe d'échantillons, offrant une visualisation claire de leur comportement mécanique.

Cette méthodologie garantit que les courbes obtenues représentent précisément les contraintes et déformations de la fibre inférieure, conformément aux normes et aux conditions expérimentales.

## 2.6 Essais de dureté Brinell

Des essais de micro-dureté de Brinell ont été réalisés parallèlement et perpendiculairement aux fibres à l'aide de la machine de test *Emco-Test DuraScan G5* (Fig. 2.10). Ces essais consistent à appliquer progressivement une charge sur le matériau avec une bille métallique, à maintenir cette charge pendant une durée déterminée, à relâcher la charge, puis à mesurer la taille de l'indentation laissée par la bille sur la surface du matériau. En utilisant le diamètre de la bille, la charge appliquée (exprimée en kilogrammes-force *kgf*) et le diamètre de l'empreinte laissée sur la surface du

## 2. Matériau utilisé et méthodes expérimentales

matériau, il est ensuite possible de calculer la valeur de dureté de Brinell ( $HB$ ) selon la formule suivante :

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi * D^2 * (1 - \sqrt{1 - d^2/D^2})}$$

où :

- $0,102$  = Constante de calcul de Brinell
- $F$  = Charge appliquée (en N)
- $D$  = Diamètre de la bille (en mm)
- $d$  = Diamètre moyen de l'indentation (en mm)

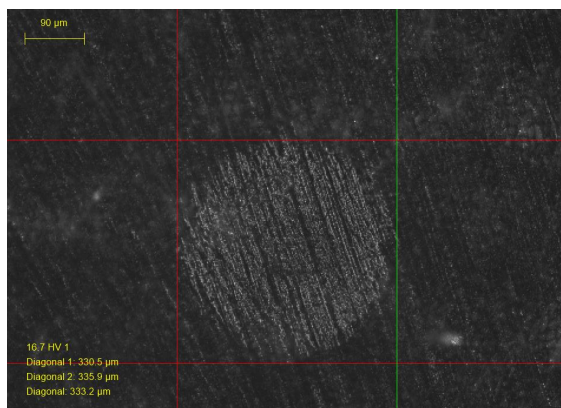
La dureté de Brinell est définie comme le rapport de la charge appliquée à la surface arrondie de l'indentation.

Les essais ont été réalisés avec une pointe de  $2,5\text{mm}$  de diamètre, un temps d'application de la force de  $10\text{s}$  et une charge de  $1\text{kgf}$ . Pour les essais parallèles aux fibres et  $6,25\text{kgf}$  pour les essais perpendiculaires aux fibres.

Afin de mieux distinguer les indentations laissées par la machine, les échantillons ont été polis au préalable avec la polisseuse *Metkon Forcipol 102* en utilisant du papier abrasif avec un grain allant de P80 à P800. Pour améliorer la visibilité de l'indentation laissée par la machine pendant l'essai, une lampe a été utilisée pour créer une lumière rasante sur la surface, augmentant ainsi le contraste de l'image (fig. 2.10).



(a) *Emco-test DuraScanG5*



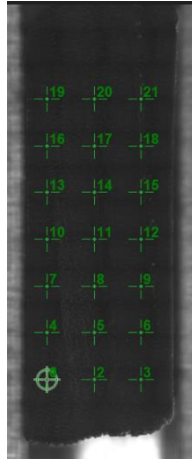
(b) *Indentation laissée par la machine Emco-test DuraScanG5*

**FIGURE 2.10** – *présentation de la machine de dureté et exemple de trace*

Lors des essais parallèles aux fibres, les indentations ont été réparties sur différentes lignes à travers

---

la section transversale des échantillons, afin de permettre l'observation des variations de dureté au sein de l'échantillon. Cette répartition a été réalisée de manière systématique pour capturer des tendances entre les zones centrales et périphériques (fig. 2.11). Ces observations ont été intégrées à l'analyse pour mieux comprendre l'influence des paramètres de densification sur la répartition des propriétés mécaniques au sein des échantillons.



**FIGURE 2.11** – Répartition des indentations lors des essais de dureté d'essais lors

Un problème rencontré lors des essais perpendiculaires aux fibres est que les empreintes étaient particulièrement difficiles à distinguer, en raison de l'orientation de la microstructure qui complique leur observation. Pour contourner ce problème, plusieurs approches ont été testées. Une première tentative a consisté à intercaler une feuille de papier carbone entre la bille et l'échantillon pour marquer l'empreinte. Cependant, cette méthode a révélé un biais important, car l'empreinte imprimée était plus grande que l'empreinte réelle, ne tenant pas compte du retour élastique du matériau.

Une seconde méthode, plus efficace, a été d'appliquer une fine couche de peinture blanche à l'aide d'un feutre sur la surface de l'échantillon avant les essais. Cette couche contrastante a permis une meilleure observation et une délimitation plus claire des empreintes, facilitant ainsi la mesure précise de leur diamètre.

## 2.7 Conclusion

Les méthodes décrites dans ce chapitre garantissent une approche rigoureuse pour évaluer les effets des différents paramètres de densification sur les propriétés physiques et mécaniques du peuplier densifié. Elles établissent une base solide pour obtenir et interpréter les résultats présentés dans les chapitres suivants.

---

### 3. Résultats

Ce chapitre vise à observer les changements de propriétés physiques et mécaniques du peuplier densifié par le procédé THM en fonction de différents paramètres opératoires. Pour rappel, les échantillons ont été densifiés en faisant varier trois paramètres principaux : les dimensions initiales, la température et la vitesse de compression.

Les échantillons de bois brut mesuraient 220 mm de longueur et avaient trois sections différentes :

- Carrés de  $20 \times 20$  mm,
- Rectangles de  $20 \times 50$  mm,
- Grands carrés de  $50 \times 50$  mm.

Ces échantillons ont été soigneusement sélectionnés pour exclure toute présence de nœuds ou d'autres défauts visibles susceptibles de perturber les résultats.

Dans une première campagne de densification, des échantillons *carrés* et *rectangles* ont été densifiés à des températures de  $170^{\circ}\text{C}$  et  $140^{\circ}\text{C}$ , avec une vitesse de compression de  $4\text{mm}/\text{min}$ , ainsi qu'à  $170^{\circ}\text{C}$  avec une vitesse plus élevée de  $200\text{mm}/\text{min}$ . L'objectif principal était d'évaluer l'influence de la température et de la vitesse de densification sur les propriétés mécaniques du bois densifié.

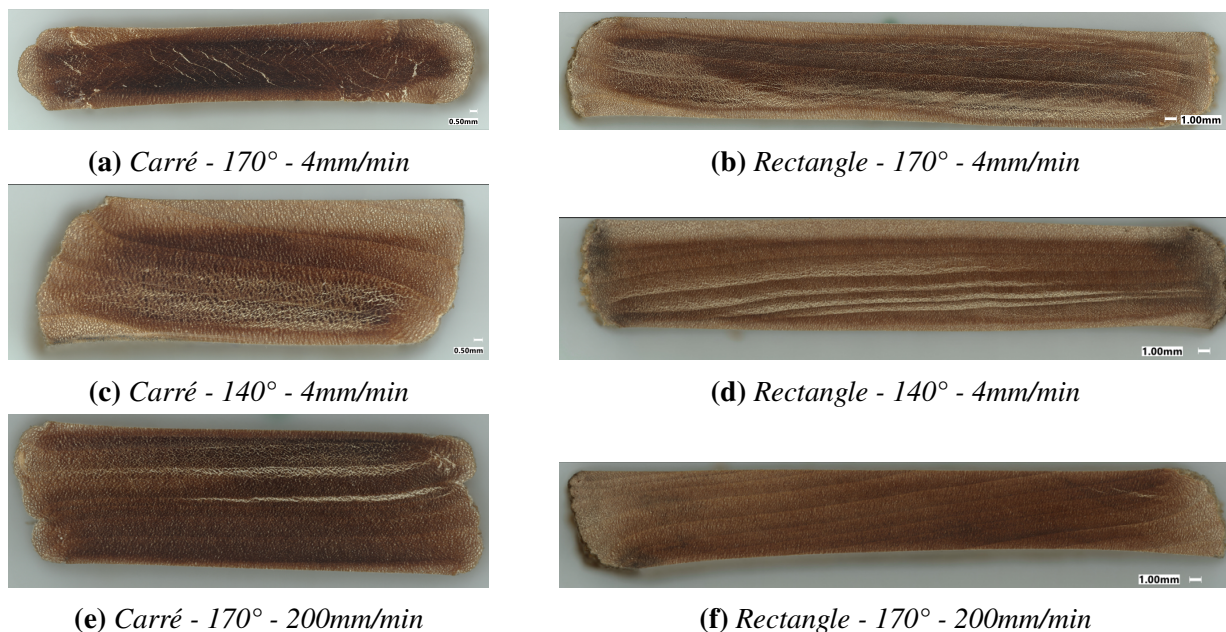
Dans une seconde campagne, des échantillons *carrés*, *rectangles* et *grands carrés* furent densifiés à  $170^{\circ}\text{C}$  à des vitesses de  $4\text{mm}/\text{min}$  et  $200\text{mm}/\text{min}$ . En plus de fournir davantage d'informations sur l'impact de la vitesse de densification, cette étude visait à vérifier si les résultats obtenus sur les échantillons carrés étaient extrapolables aux grands échantillons ou si d'autres mécanismes intervenaient.

## 3.1 Etude de la microstructure

Comme attendu d'après la littérature, la densification THM entraîne des changements significatifs dans la microstructure du bois. Ces modifications sont visibles à travers des variations de teinte et des observations microscopiques, mettant en évidence les interactions entre température, vitesse de compression et structure du matériau.

### Teinte et densité structurelle

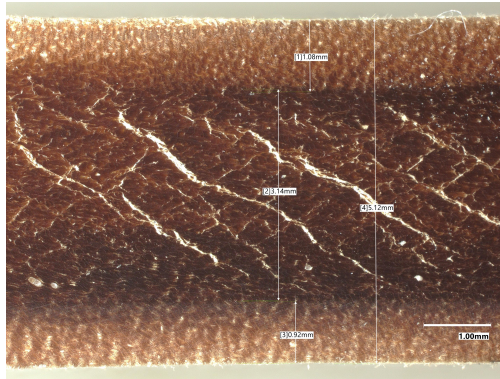
L'observation au microscope révèle une variation de la teinte des échantillons en fonction des paramètres de densification. Les échantillons densifiés à  $170^{\circ}\text{C}$  présentent une teinte globalement plus sombre que ceux densifiés à  $140^{\circ}\text{C}$  (fig.3.1), confirmant que la température est un facteur clé de la modification de la couleur du bois. Ce phénomène peut être attribué à la dégradation thermique des hémicelluloses et à la diminution des lumens, ce qui réduit la réflectance de la lumière.



**FIGURE 3.1** – Allure de différents échantillons

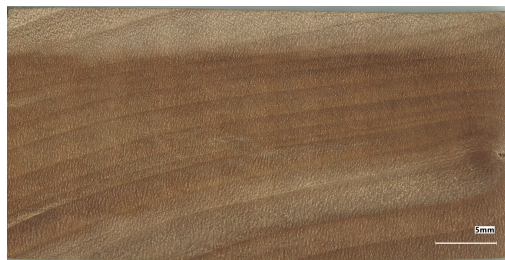
La rapidité de compression influence également la teinte et la régularité du bois densifié. Les échantillons carrés et rectangles densifiés rapidement ( $200\text{mm}/\text{min}$ ) à  $170^{\circ}\text{C}$  présentent une teinte relativement uniforme, tandis que les échantillons densifiés plus lentement ( $4\text{mm}/\text{min}$ ) montrent des variations de couleur : la teinte au centre de la section est plus foncée, tandis que les extrémités supérieures et inférieures sont plus claires (fig.3.2).

### 3. RÉSULTATS



**FIGURE 3.2** – Variation de teinte dans les échantillons Carrés densifiés à 170°C et 4mm.min

Les échantillons *grand carrés* (fig.3.3) présentent une teinte globalement similaire à celle des *carrés* et *rectangles*, mais avec un plus grand nombre de défauts (zones plus claires). Il est également possible d’observer une différence notable de microstructure en fonction de la vitesse de compression. Comme pour les autres dimensions, les *grands carrés* densifiés à 170°C et 4mm/min affichent une teinte plus claire près des extrémités supérieures et inférieures par rapport au reste de la section. Les échantillons densifiés plus rapidement, en revanche, montrent une teinte plus sombre au niveau des extrémités (fig :3.3).



(a) *grand carré* densifié à 4mm/min



(b) *grand carré* densifié à 170°C et 200mm/min

**FIGURE 3.3** – Variation de teinte dans les échantillons grands carrés densifiés à 170°C

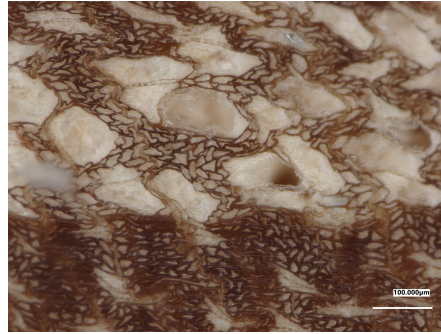
Enfin, des lignes horizontales plus claires suivant les cernes de croissance du bois peuvent être observées dans certains échantillons (fig. 3.4) ; elles sont liées à des variations de densité. Ces lignes représentent des zones où la structure est moins compacte et où les lumens sont encore présents, comme l’ont confirmé des observations microscopiques de zones spécifiques.

#### Autres observations

L’analyse microscopique révèle également des signes d’endommagement structurel dans certains cas. Ces dommages se manifestent principalement sous forme de lignes obliques blanches dans les

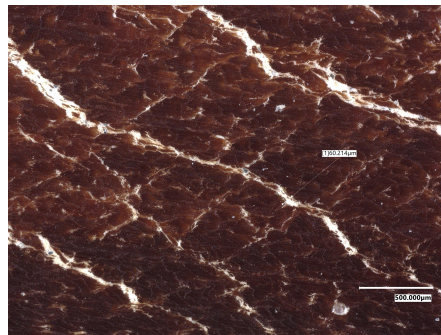
### 3. RÉSULTATS

---



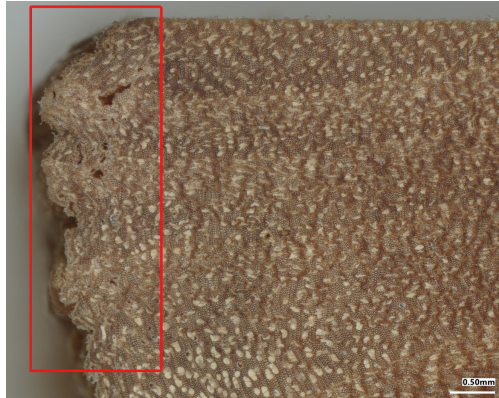
**FIGURE 3.4** – *Différence de densité au niveau des zones plus claires*

échantillons les plus petits (*Carrés*) densifiés lentement ( $4\text{mm}/\text{min}$ ) à  $170^{\circ}\text{C}$ . Ces lignes, visibles à la figure 3.5, traduisent probablement des plans de glissement de la microstructure.



**FIGURE 3.5** – *Illustration des lignes obliques observables sur les petits échantillons densifiés lentement*

Une autre caractéristique, déjà observée dans les travaux de *Bosmans* [15] et de *Crombrughe* [36] est la présence d'une zone "non utilisable" (fig 3.6) aux extrémités gauche et droite des échantillons. Cette zone, marquée par une densité plus faible, une teinte plus claire et une structure présentant davantage de porosité, est le résultat direct de l'écrasement subi lors de la compression. Elle doit être retirée dans le cadre d'une utilisation en bois de terrasse, car elle compromettrait les performances mécaniques et esthétiques de l'échantillon. Fait intéressant, la taille de cette zone demeure constante, indépendamment de la largeur ou de la hauteur des échantillons, ce qui indique un comportement mécanique intrinsèque lié au confinement des contraintes.



**FIGURE 3.6** – *Zone non-utilisable des échantillons densifiés*

## 3.2 Compression et retour viscoélastique

Une analyse des données obtenues lors des essais de compression et des observations effectuées sur les échantillons après post-traitement met en évidence plusieurs comportements intéressants du peuplier densifié, en fonction de la géométrie des échantillons, de la température et de la vitesse de compression.

### 3.2.1 Allure générale des échantillons densifiés

Deux caractéristiques principales sont observables sur les échantillons densifiés après post-traitement : la hauteur des échantillons et leur variation de couleur. Ces phénomènes dépendent des paramètres opératoires, notamment de la température et de la vitesse de compression.

La reprise de forme est relativement uniforme sur la section pour les échantillons densifiés à  $140^{\circ}\text{C}$  et à  $170^{\circ}\text{C}$  à une vitesse de compression de  $4\text{mm}/\text{min}$ . Cependant, pour les échantillons densifiés à  $170^{\circ}\text{C}$  avec une vitesse de compression de  $200\text{mm}/\text{min}$ , une différence notable apparaît : le gonflement est plus prononcé au centre de la section que sur les côtés. Ce comportement est particulièrement visible dans le cas des échantillons *grands carrés*, où le gonflement est si marqué qu'il a provoqué des fissures sur les faces supérieures et latérales (3.7).

Concernant la couleur, une tache noire apparaît au centre des échantillons densifiés à  $170^{\circ}\text{C}$  (fig.3.8). Ce phénomène est systématique pour ceux densifiés à une vitesse de compression de  $200\text{mm}/\text{min}$ , et occasionnel pour ceux compressés à  $4\text{mm}/\text{min}$ . Il semble être plus marqué dans les échantillons de grande dimension. Cependant, ces taches ne sont présentes qu'en surface et ne sont plus visibles

### 3. RÉSULTATS

---



(a) *Endommagement sur la surface latérale*



(b) *Endommagement sur la surface supérieure*

**FIGURE 3.7** – *Endommagement du au retour viscoélastique des échantillons grands carrés densifiés à 170°C et 200mm/min*

une fois que les surfaces ont été ponçées.



**FIGURE 3.8** – *Noircissement sur la surface d'échantillons densifiés à 170°C à 4mm/min (gauche) et 200mm/min (droite)*

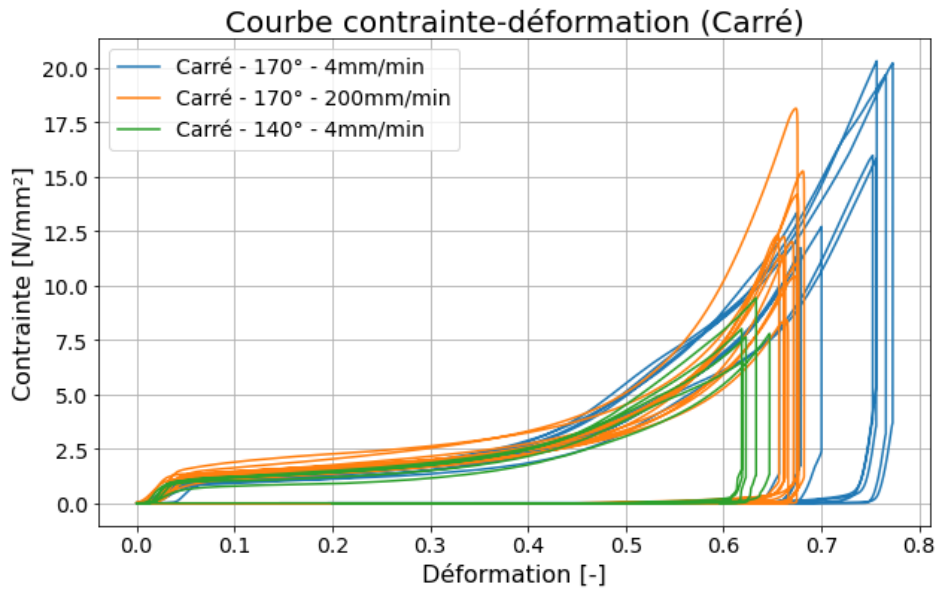
#### 3.2.2 Contrainte maximale lors de la densification

Les contraintes maximales observées lors de la densification varient considérablement en fonction de la température, de la vitesse de compression et de la géométrie des échantillons.

Les échantillons compressés à 170°C présentent globalement des contraintes maximales plus élevées par rapport à ceux densifiés à 140°C, indépendamment de leur géométrie. Par exemple, pour les échantillons *carrés* compressés à 4 mm/min, la contrainte maximale moyenne passe de 7.9 MPa

### 3. RÉSULTATS

à 14.9 MPa en augmentant la température de 140°C à 170°C (fig.3.9). Une tendance similaire s'observe pour les échantillons *rectangulaires* et *grands carrés*.



**FIGURE 3.9** – Courbe contrainte-déformation de la densification des échantillons carrés

La vitesse de compression influence également les contraintes maximales, mais dans une moindre mesure. À 170°C, les groupes d'échantillons compressés à 200mm/min atteignent des contraintes maximales moyennes légèrement plus élevées qu'à 4 mm/min, comme le montrent les résultats pour les *rectangles* (de 8.2 MPa à 13.8 MPa). Cette augmentation peut être attribuée à une énergie appliquée plus importante sur une durée plus courte, entraînant une réponse mécanique plus marquée.

En revanche, la géométrie semble jouer un rôle plus nuancé. Les échantillons *rectangles* affichent en moyenne des contraintes maximales légèrement inférieures à celles des *carrés* à conditions équivalentes, tandis que les *rectangles grands carrés* montrent les valeurs les plus faibles, probablement en raison de leur plus grande section, qui répartit mieux les contraintes.

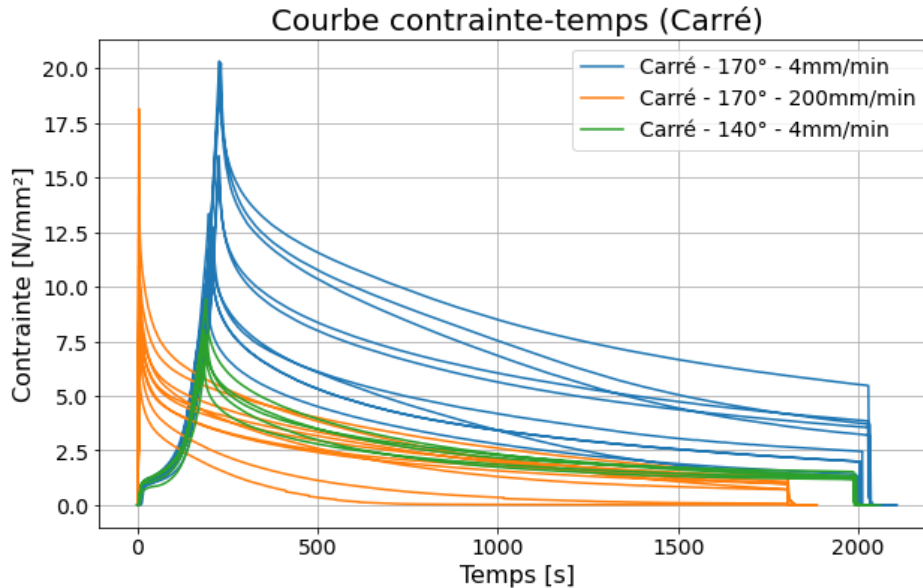
#### 3.2.3 Contrainte résiduelle après 1800s

Les contraintes résiduelles mesurées après 1800 secondes révèlent une relaxation significative des contraintes dans tous les échantillons. Cependant, des différences importantes subsistent entre les groupes selon les paramètres expérimentaux.

À 170°C et 4mm/min, les échantillons carrés présentent une contrainte résiduelle moyenne de 3.1

### 3. RÉSULTATS

MPa, ce qui représente une réduction notable par rapport à leur contrainte maximale (14.9 MPa) (fig.3.10. Les échantillons compressés à 200 mm/min, bien qu'ayant des contraintes maximales plus élevées, affichent des valeurs résiduelles inférieures (par exemple, 0.8 MPa pour les *carrés* et 3.9 MPa pour les *rectangles*), ce qui pourrait être dû à un retour viscoélastique plus marqué.



**FIGURE 3.10** – Courbe contrainte-temps de la densification des échantillons carrés

Les échantillons densifiés à 140°C montrent des contraintes résiduelles systématiquement plus faibles que ceux à 170°C densifiés à la même vitesse. Par exemple, les *rectangles* à 140°C présentent une contrainte résiduelle moyenne de 1.9 MPa, contre 2.7 MPa pour ceux à 170°C. Cela suggère une relaxation accrue à température plus basse, où les effets thermiques sur la structure du matériau sont moins prononcés.

Enfin, les *grands carrés* montrent des contraintes résiduelles relativement faibles, avec une moyenne de 1.8 MPa à 4 mm/min et 1.6 MPa à 200 mm/min. Cette tendance reflète une relaxation significative dans les échantillons volumineux, où les contraintes internes sont mieux réparties. Cela montre aussi que la contrainte en fin de densification n'est pas liée au spring-back.

### 3.3 Propriétés physiques et mécaniques

Un résumé des propriétés mécaniques des échantillons selon leurs paramètres de densification peut être observé dans le tableau 3.1. La suite des résultats détaille plus en profondeur les tendances observées dans les sections suivantes.

### 3. RÉSULTATS

Échantillon	$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	MOE [ $GPa$ ]	MOR [ $MPa$ ]	Dureté // [ $HB$ ]	Dureté $\perp$ [ $HB$ ]
Bois brut	455	10,3	87	4,2	2
C – 170 – 4	1075	20,7	154	12,2	9,4
C – 140 – 4	898	16,1	126	17,8	6,8
C – 170 – 200	1006	19,9	164	14,9	10,6
R – 170 – 4	885	20,8	146	11,4	4,9
R – 140 – 4	763	16,1	125	15,6	7,3
R – 170 – 200	927	20,5	147	11,4	8
GC – 170 – 4	824	15,1	116	9,5	4,7
GC – 170 – 200	736	12,9	87	10,9	6,4

TABLE 3.1 – Résumé des propriétés mécaniques des échantillons de bois brut et densifié.

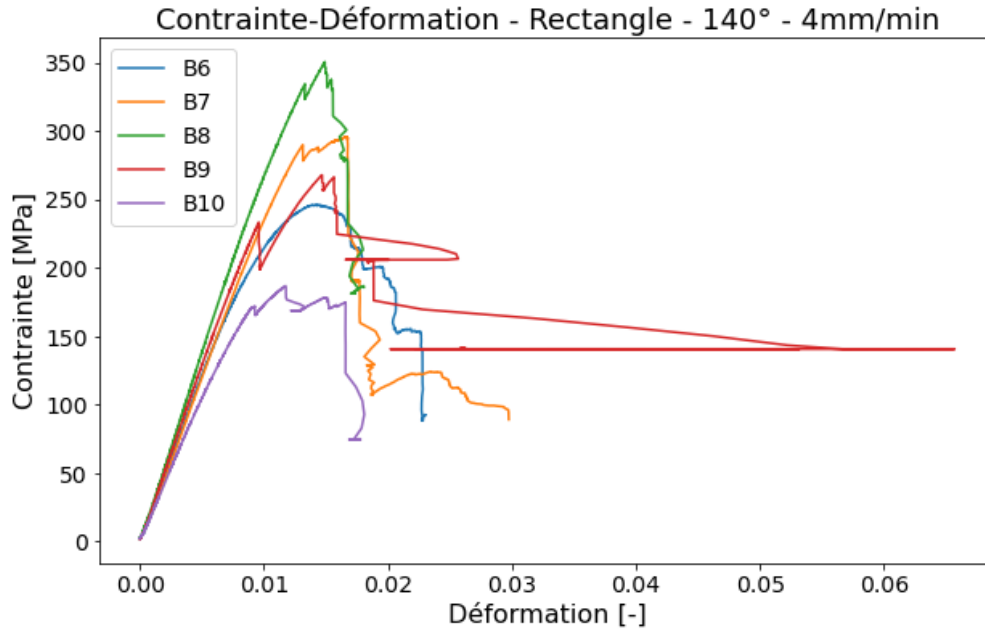
#### 3.3.1 Modules d'élasticité et de rupture

Avant d'aborder les valeurs spécifiques des MOE et MOR, il est utile d'examiner l'allure générale des courbes de contrainte-déformation obtenues lors des essais de flexion. La figure 3.11 présente cette courbe pour les échantillons *rectangles* densifiés à 140°C. Les courbes contrainte-déformation de tous les échantillons peuvent être observées dans l'annexe A. Ces courbes soulignent une rupture systématiquement fragile pour tous les échantillons, y compris pour le bois brut. Cependant, l'intensité de cette rupture varie selon les échantillons, certains présentant une défaillance plus brutale que d'autres. Les échantillons densifiés à 140°C et les *grands carrés* (particulièrement à 200mm/min) montrent des ruptures particulièrement marquées, traduisant une fragilité structurelle plus prononcée.

Il est important de noter que, bien que ces courbes soient instructives pour décrire le comportement global des échantillons, elles ne permettent pas de tirer de conclusions définitives sur leurs performances mécaniques. Les résultats spécifiques de MOE et MOR, analysés plus en détail ci-dessous, offrent une vision plus précise des propriétés des échantillons.

Les graphiques des figures 3.12 et 3.13 présentent les valeurs de MOE et MOR des différents groupes d'échantillons étudiés. Ces données illustrent à la fois les tendances générales et les variabilités des résultats en fonction des paramètres de densification. Les échantillons densifiés à 140°C et les *grand carré* montrent une dispersion plus faible des valeurs, ce qui peut être attribué au nombre limité d'échantillons (cinq contre au moins dix pour les autres groupes). À noter également que les valeurs de MOR du bois brut observées dans cette étude sont plus élevées que celles généralement rapportées dans la littérature (ligne horizontale rouge). Cela peut s'expliquer par une sélection rigoureuse des échantillons, exempts de défauts significatifs.

### 3. RÉSULTATS



**FIGURE 3.11** – Courbes de contrainte-déformation obtenues en flexion sur les échantillons rectangulaires densifiés à 140°C

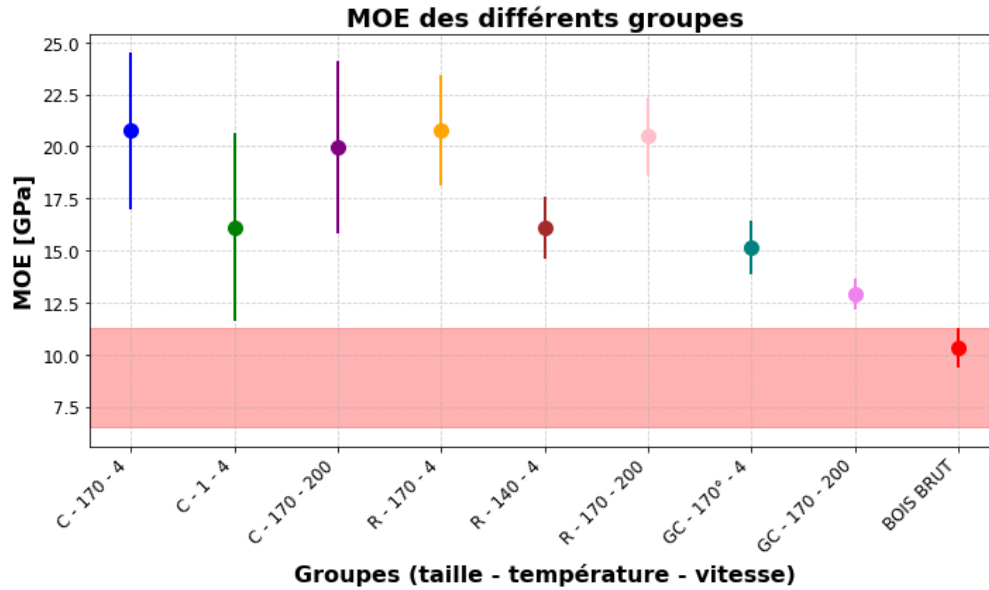
#### MOE

Les valeurs de MOE, représentées sur la figure 3.12, montrent une nette amélioration pour les échantillons densifiés, particulièrement pour les échantillons *carrés* et *rectangles* densifiés à 170°C. Chez ces derniers, l'augmentation du MOE par rapport à celui du bois brut est presque proportionnelle au rapport de masse volumique.

Cette tendance de proportionnalité n'est pas observable chez les échantillons densifiés à 140°C, qui conservent malgré tout des valeurs similaires chez les *carrés rectangles*, ou chez les échantillons *grands carrés* qui présentent un MOE plus bas en cas de vitesse de compression plus élevée. Une analyse approfondie de cette tendance sera abordée dans la discussion afin de proposer des explications possibles à ces performances plus modestes.

#### MOR

Les valeurs de MOR, illustrées sur la figure 3.13, confirment une amélioration générale des échantillons densifiés par rapport au bois brut, bien que ces derniers présentent des valeurs initiales relativement élevées. Les échantillons *carrés* et *rectangles* densifiés à 140°C montrent des valeurs de MOR globalement alignées avec leur masse volumique, bien que légèrement inférieures aux



**FIGURE 3.12** – Modules d'élasticité des différents groupes d'échantillons (La bande rouge correspond au MOE du peuplé brut tiré de la littérature)

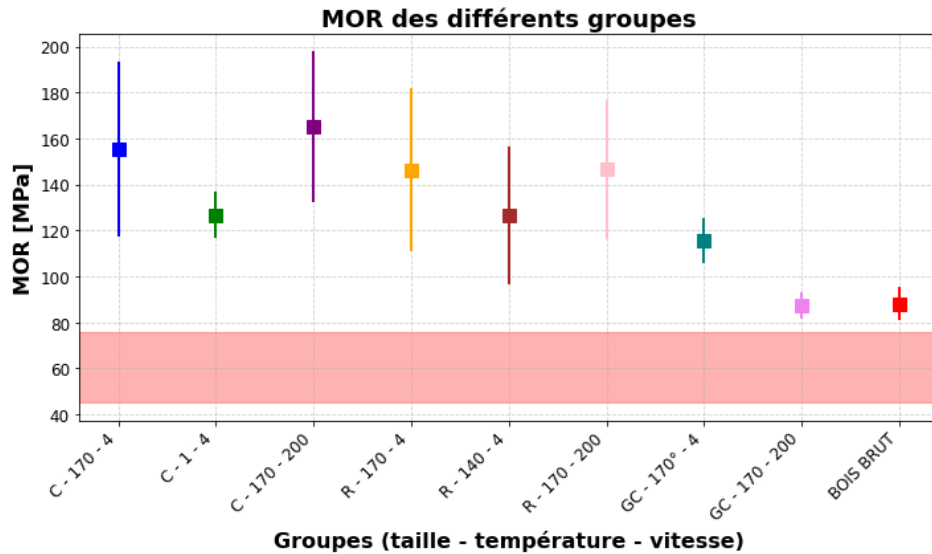
ratios observés pour les MOE. Les

### 3.3.2 grands carrés

, quant à eux, présentent des performances nettement plus faibles, étant parfois inférieures à celles du bois brut, indépendamment de la vitesse de compression appliquée, ce qui souligne une disparité marquée entre les formats. Cette tendance peut néanmoins s'expliquer par une différence lors du post-traitement, comme discuté dans le chapitre suivant.

Les échantillons densifiés à 140°C, bien que systématiquement inférieurs aux échantillons à 170°C, montrent une dispersion réduite des valeurs, ce qui est cohérent avec le nombre limité d'échantillons testés. Cette homogénéité apparente reflète davantage la méthodologie expérimentale que les propriétés intrinsèques du matériau.

### 3. RÉSULTATS



**FIGURE 3.13** – Modules de rupture des différents groupes d'échantillons (La bande rouge correspond au MOR du peuplé brut tiré de la littérature)

#### 3.3.3 Dureté

##### Dureté parallèle aux fibres

Les résultats des essais de dureté parallèle aux fibres, résumés dans le tableau 3.1, mettent en évidence une amélioration notable de cette propriété dans les échantillons densifiés par rapport au bois brut. La dureté parallèle au grain passe de 4,2 *HB* pour le bois brut à des valeurs atteignant jusqu'à 17,8 *HB* pour les échantillons densifiés à 140°C (C – 140 – 4). Les échantillons densifiés à 170°C présentent également une dureté accrue, avec des valeurs légèrement inférieures mais homogènes, oscillant entre 9,5 et 12,2 *HB* pour les échantillons densifiés à 4mm/min, et entre 10,9 et 14,9 *HB* pour les échantillons densifiés à 200mm/min.

Une observation intéressante concerne la variation de dureté au sein même des échantillons. Les échantillons densifiés présentent des duretés plus importantes au centre qu'en périphérie (fig. ??), où la densité est généralement plus faible. Cependant, aucune différence significative de cette variation n'a été observée entre les différentes conditions de densification, suggérant que ce phénomène est largement indépendant des paramètres opératoires étudiés.

Ces résultats soulignent l'importance de la densité dans l'amélioration des propriétés mécaniques. Une densification plus homogène dans l'ensemble de la section transversale pourrait encore optimiser les performances mécaniques globales, notamment pour des applications où la résistance à la

### 3. RÉSULTATS

---

compression est cruciale.

#### **Dureté perpendiculaire aux fibres**

Les mesures de dureté perpendiculaire aux fibres ont également montré une augmentation significative dans les échantillons densifiés par rapport au bois brut, tout en restant inférieures aux mesures parallèles aux fibres, comme attendu. Le bois brut présente une dureté perpendiculaire de 2 *HB*, contre des valeurs atteignant jusqu'à 10,6 *HB* pour les échantillons densifiés à 170°C avec une vitesse de compression de 200mm/min (C-170-200).

Cependant, ces essais ont été particulièrement complexes à réaliser en raison de la disparition rapide des empreintes après chargement. Comme détaillé dans la section 2.6, une fine couche de peinture a été appliquée sur la surface des échantillons afin de faciliter la distinction des empreintes. L'épaisseur de cette couche de peinture était difficile à contrôler. Cette variation a pu introduire des différences, bien que mineures, dans les résultats.

Enfin, la tendance générale montre que les échantillons densifiés à 140°C présentent des valeurs légèrement plus élevées que ceux densifiés à 170°C. Ce phénomène pourrait s'expliquer par une plus grande rigidité dans les échantillons à 140°C, où les transformations chimiques des polymères du bois, notamment les hémicelluloses, sont moins avancées, maintenant ainsi une structure plus rigide mais légèrement moins homogène.

### **3.4 Conclusion**

Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact significatif des paramètres de densification sur les propriétés physiques et mécaniques du peuplier. La température, la vitesse de compression et la géométrie des échantillons ont montré une influence notable sur la microstructure, la répartition des contraintes internes, les propriétés mécaniques et les zones exploitables des échantillons densifiés.

Tout d'abord, les observations microscopiques ont révélé des changements significatifs dans la microstructure, notamment en termes de teinte et de densité structurelle. Ces changements s'expliquent par les mécanismes physiques et chimiques sous-jacents décrits dans l'état de l'art, tels que la dégradation thermique des hémicelluloses du bois et la redistribution des contraintes lors de la compression.

---

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, une amélioration générale a été observée dans les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR), ainsi que dans la dureté, tant parallèle que perpendiculaire aux fibres. Cependant, des disparités significatives ont été relevées, notamment pour les *grands carrés*, qui présentent des performances parfois inférieures à celles du bois brut en raison d'une répartition asymétrique de la densité (expliquée plus en profondeur dans la section 4.3.

Enfin, l'analyse des zones non utilisables, des contraintes résiduelles et du regonflement met en lumière l'importance des paramètres de densification pour optimiser les propriétés du bois densifié. Ces résultats constituent une base solide pour les discussions suivantes, qui visent à approfondir la compréhension des mécanismes observés et à explorer les applications potentielles du bois densifié en tant que matériau de construction, notamment en tant que bois de terrasse.

## **4. Discussion**

Le but de ce chapitre est de mettre en relation les résultats et les observations expérimentales avec les mécanismes physiques et chimiques identifiés dans l'état de l'art, afin de définir l'impact des différents paramètres de densification sur les propriétés du peuplier densifié et son utilisation en tant que bois de terrasse.

### **4.1 Variabilité des résultats**

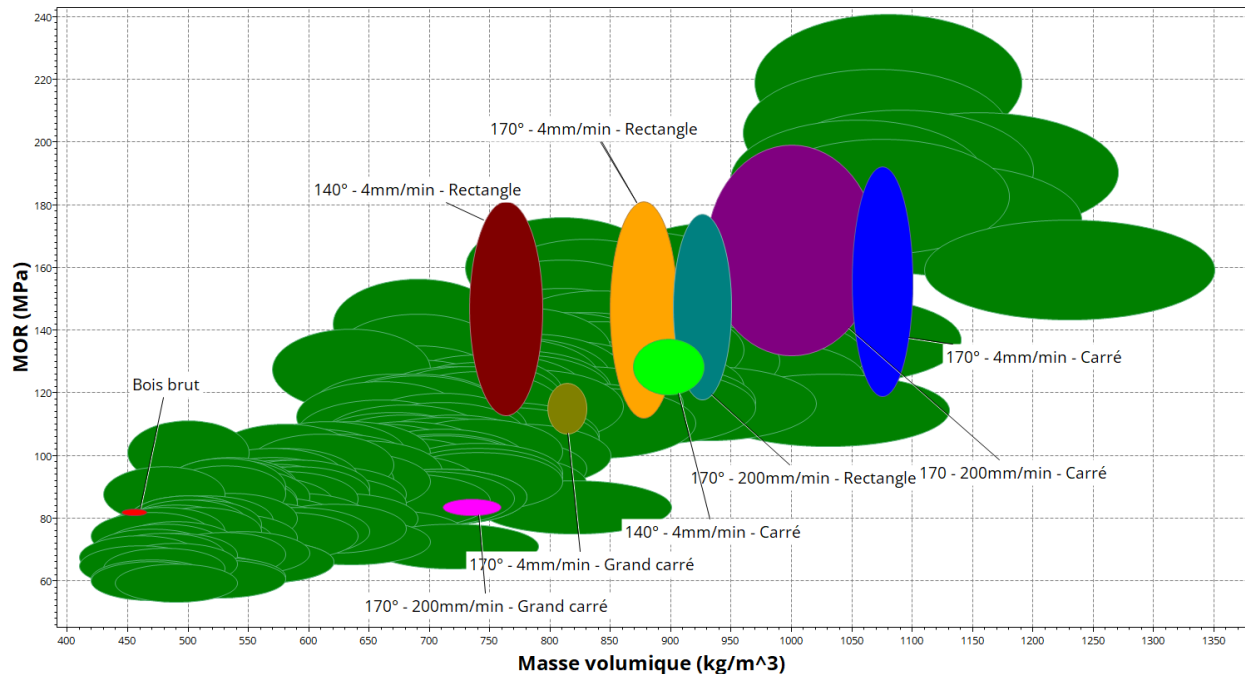
Bien que les propriétés physiques, telles que la densité et la teinte, soient relativement homogènes au sein d'un même groupe d'échantillons, une variabilité significative est observée dans les résultats des essais mécaniques (fig.4.1). Cette dispersion, parfois surprenante, peut s'expliquer par divers facteurs techniques, naturels ou environnementaux.

#### **Facteurs techniques et méthodologies**

Tout d'abord, il y a eu de légères variations opératoires dues au fait que la densification et les essais n'ont pas toujours été réalisés avec le même technicien ou la même personne encadrante, ce qui pourrait avoir conduit à de petits écarts dans la manipulation des échantillons. Une première mise en charge différente des plateaux de compression, un temps de séchage variable avant les essais de flexion, ou encore une interprétation différente des images lors des essais de dureté peuvent influencer la densification ou les résultats des essais, et par conséquent, les résultats finaux.

De plus, il est important de noter que toutes les mesures et observations n'ont pas été effectuées sur l'intégralité des échantillons. Par manque de temps et de ressources, notamment pour la préparation des échantillons et les essais, une sélection d'échantillons représentatifs a été réalisée pour les tests de dureté et les observations microscopiques. Cette méthode, bien que pragmatique, peut introduire une variabilité supplémentaire, car les résultats obtenus ne reflètent pas toujours l'ensemble des échantillons.

## 4. DISCUSSION



**FIGURE 4.1** – Diagramme des Modules de résistance en fonction de la Masse volumique des groupes d'échantillons densifiés (couleur) et des essences de bois denses et moyennement denses [Granta EduPack]

### Hétérogénéité du matériau bois

L'hétérogénéité intrinsèque du bois peut également jouer un rôle dans cette variabilité. Comme expliqué dans l'état de l'art, le bois présente des propriétés qui varient selon sa zone d'origine dans le tronc, notamment entre le duramen et l'aubier (difficilement dissociables à l'œil nu dans le peuplier [17]). Ces différences peuvent influencer sa densité, sa rigidité et même sa réponse viscoélastique. De plus, une légère inclinaison des fibres par rapport à la direction de compression peut engendrer une déformation asymétrique, exacerbant ainsi la dispersion des résultats.

Comme expliqué dans les méthodes expérimentales, les mesures de dureté et les observations microscopiques ont principalement été réalisées sur les extrémités des échantillons densifiés. Il est probable que ces caractéristiques varient légèrement à travers le matériau en raison de la non-uniformité induite par la densification. Les différences de densité et de microstructure entre le centre et les extrémités des échantillons, où les contraintes et la dissipation thermique ne sont pas homogènes, pourraient expliquer ces variations. Ainsi, les valeurs mesurées en surface ou près des extrémités pourraient ne pas refléter complètement les propriétés du matériau sur l'ensemble de sa longueur.

### **Facteurs environnementaux et préparation des échantillons**

Enfin, des facteurs environnementaux peuvent entrer en jeu. Les échantillons ont été densifiés et testés entre les mois de février et novembre dans un laboratoire sans air conditionné, et ont donc été soumis à de larges gammes de température et de taux d'humidité. Ces variations de conditions environnementales peuvent accentuer certaines divergences observées, tant lors de la densification que lors de la préparation des essais.

Ces différents facteurs montrent que cette variabilité des résultats, bien qu'intrinsèque à la nature du matériau bois, peut en partie être attribuée aux conditions expérimentales. Une standardisation accrue des protocoles et un contrôle rigoureux des paramètres opératoires pourraient réduire cette dispersion dans de futures études.

### **Essais de flexion des *grands carrés***

Les valeurs de MOE et MOR observées pour les *grands carrés* sont largement en deçà des attentes, mais elles ne doivent pas être interprétées comme représentatives, car ces résultats sont biaisés par des contraintes méthodologiques. Ces échantillons présentaient une hauteur trop importante par rapport à leur longueur pour satisfaire les normes d'essai ( $l = 18h \pm 3h$ ) et ont donc été coupés dans le sens de la longueur. Les demi-échantillons résultants ont été testés avec la face correspondant à l'intérieur des échantillons orientée vers le dessus.

Cette configuration est problématique, car les échantillons, comme observé, ne présentent pas une microstructure symétrique. Les zones internes et externes, qui présentent différents taux de densification, ont des modules de Young différents. Cette "non-uniformité" des modules de Young concentre les déformations sur les zones moins denses, ce qui peut entraîner des valeurs globales de MOE plus faibles et une rupture prématurée lors des essais. Cette hypothèse est soutenue par le fait que la rupture lors des essais de flexion de ces échantillons s'est produite au point d'appui des forces et non au centre de la section. Ces observations soulignent l'importance de respecter les normes d'essai pour garantir la représentativité des résultats.

### Résultats des essais de dureté

Les valeurs de dureté mesurées dans ce travail, bien qu'elles soient cohérentes et comparables entre les différents groupes d'échantillons étudiés, sont significativement inférieures aux données rapportées dans la littérature. Ainsi, la dureté parallèle aux fibres du bois brut est mesurée ici à  $4,2HB$ , contre des valeurs typiquement comprises entre 12 et  $14HB$  pour des bois similaires dans des études antérieures.

Cette différence pourrait être attribuée à des variations méthodologiques entre cette étude et les protocoles standardisés. La pointe utilisée dans le cadre de ce travail a un diamètre de  $2,5mm$  contre  $10mm$  dans la plupart des travaux de référence [68], notamment ceux de *Welzbacher et al.* (2008) [69] et *Kutnar et al.* (2015)[60]. Une pointe plus petite entraîne une pression plus localisée, biaisant ainsi les valeurs mesurées. Cette limitation technique doit être prise en compte pour interpréter les résultats et pourrait expliquer l'écart par rapport aux normes de la littérature.

Malgré ces limitations, les valeurs de dureté mesurées dans cette étude offrent un aperçu utile des améliorations mécaniques du bois densifié et de son homogénéité relative entre les différents groupes d'échantillons.

## 4.2 Influence de la température

La température est un paramètre essentiel du procédé de densification, influençant la microstructure, les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle des échantillons. Les différences observées entre les échantillons *carrés* et *rectangles* densifiés à  $140^{\circ}C$  et  $170^{\circ}C$  mettent en évidence son rôle crucial dans les transformations physiques et chimiques du matériau.

### Impact sur la microstructure

Les résultats confirment les attentes concernant l'influence de la température sur la microstructure du bois densifié. À  $170^{\circ}C$ , les échantillons présentent une teinte plus sombre, une densité plus homogène et une stabilité dimensionnelle accrue par rapport à ceux densifiés à  $140^{\circ}C$ . Ces observations sont cohérentes avec la littérature, qui associe les températures élevées à une meilleure consolidation de la structure du bois, notamment grâce à la réduction des lumens et à la formation de nouvelles liaisons chimiques dans la matrice du matériau.

## 4. DISCUSSION

---

Ces caractéristiques de densité et de microstructure contribuent à une meilleure stabilité dimensionnelle des échantillons densifiés à 170°C [15]. La réduction des lumen et la formation de liaisons chimiques empêchent un retour significatif aux dimensions initiales après la levée des contraintes. À 140°C, où ces mécanismes sont moins avancés, la structure cellulaire reste plus flexible, ce qui limite la stabilité dimensionnelle et favorise le regonflement.

### **Impact sur la résistance mécanique**

Cependant, il existe une divergence notable avec les résultats de *Bosmans* (2022) concernant les propriétés mécaniques [15]. Alors qu'il observe des valeurs de MOE et MOR plus élevées à 140°C, nos résultats montrent des valeurs supérieures à 170°C. Cette différence pourrait être attribuée à des variations dans les protocoles expérimentaux ou à des caractéristiques spécifiques des échantillons de bois utilisés. À 170°C, une dégradation thermique plus avancée des hémicelluloses rigidifie les parois cellulaires, ce qui pourrait expliquer ces performances améliorées. En revanche, à 140°C, la transformation chimique est moins complète, ce qui peut limiter la consolidation des fibres et, par conséquent, les performances mécaniques dans nos essais.

Il est intéressant de noter que les tendances observées pour la dureté ne correspondent pas à celles des MOE et MOR. En effet, les échantillons densifiés à 140°C présentent des valeurs de dureté légèrement supérieures, notamment dans les échantillons *rectangles* (deux directions) et *carrés* (parallèle aux fibres). Une explication possible est que la dégradation thermique des hémicelluloses à 170°C, bien qu'elle améliore la rigidité globale du matériau, affaiblit localement la structure lignocellulosique du bois. Cela pourrait entraîner une légère diminution de la résistance à l'indentation tout en maintenant une densité et une élasticité accrues. Cependant, cette hypothèse ne repose pas sur une étude précise et nécessite une validation complémentaire pour évaluer l'impact exact des dégradations thermiques locales. Ces résultats confirment que les propriétés mécaniques ne dépendent pas seulement de la densité, mais également des transformations chimiques induites par la température.

### **Explications du regonflement**

Les échantillons densifiés à 140°C présentent un regonflement globalement plus marqué que ceux densifiés à 170°C, ce qui se confirme par une masse volumique moins importante (pour les *Carrés* entre 1000 et 1100kg/m<sup>3</sup> à 170°C contre moins de 900kg/m<sup>3</sup> à 140°C). Cela peut s'expliquer

par une rigidification moindre des parois cellulaires à température plus basse, où la transformation chimique des hémicelluloses reste incomplète. Cette absence de fixation chimique complète dans la matrice du bois laisse davantage de liberté aux parois cellulaires pour retrouver leur forme initiale une fois les contraintes levées.

En revanche, à 170°C, la dégradation thermique avancée des hémicelluloses favorise une fixation plus stable de la structure déformée, réduisant ainsi l'ampleur du regonflement. Cette différence de comportement confirme que des températures élevées optimisent non seulement la densité du bois, mais aussi sa stabilité dimensionnelle après traitement.

Cependant, il est important de noter que, quel que soit le niveau de température, le regonflement est systématiquement plus prononcé au centre des sections transversales des échantillons. Ce phénomène, observé même à 170°C, traduit une répartition inhomogène des contraintes et des gradients de chaleur au cours du processus de densification. À des températures plus basses, cet effet est amplifié par une dissipation thermique moins homogène, ce qui accentue la déformation au centre.

### 4.3 Influence de la géométrie de l'échantillon

Comme le montrent les différences observées entre les propriétés physiques et mécaniques des échantillons *carrés*, *rectangles* et *grands carrés* densifiés, la géométrie influence de manière significative les propriétés physiques et mécaniques des bois densifiés.

#### **Echantillons *carrés* et *rectangles***

Les échantillons *carrés* et *rectangles* présentent des propriétés globalement similaires, avec toutefois quelques différences notables. La microstructure des échantillons et leur apparence en sortie de densification sont très semblables. Les modules d'élasticité et de rupture sont également très proches, mais les *rectangles* montrent une masse volumique plus faible (d'environ 10%), les *carrés* présentent des dommages notables sur leur microstructure (fig.3.7).

La dureté semble varier proportionnellement à la densité. Cependant, le fait que les *rectangles* présentent des MOE et MOR similaires à ceux des *carrés* malgré leur densité plus faible, montre qu'ils sont mécaniquement plus efficaces. Ce constat peut s'expliquer par une microstructure intacte dans les *rectangles*, ce qui permet une meilleure répartition des contraintes lors des essais.

## 4. DISCUSSION

---

Les dommages microstructuraux observés dans les *carrés* limitent leur retour élastique et contribuent probablement à des valeurs de MOE et MOR plus faibles par rapport à leur masse volumique. Les *rectangles*, grâce à leur géométrie allongée et à une répartition plus uniforme des contraintes, bénéficient d'un meilleur confinement, ce qui explique leur comportement mécanique supérieur.

Un autre avantage des *rectangles* réside dans leur géométrie plus vaste. Bien que les *rectangles* et les *carrés* présentent une zone non utilisable similaire au niveau de leurs bords latéraux (fig.3.6), les *rectangles* génèrent proportionnellement moins de pertes. Leur largeur accrue permet d'exploiter une surface utile plus importante, ce qui constitue un atout pour des applications nécessitant une optimisation du matériau.

### **Echantillons *grands carrés***

Les échantillons *grands carrés* présentent des propriétés sensiblement différentes de celles des *carrés* et *rectangles* en raison de leur géométrie et de leurs conditions de densification. Leur densité est nettement plus faible, et leur retour viscoélastique est beaucoup plus prononcé. Cette densité réduite peut être attribuée à différents facteurs :

1. **Gradients thermiques migration de l'humidité** : En raison de leur grande section, les *grands carrés* présentent des gradients internes plus marqués, liés à une dissipation inégale de la chaleur et à une migration non homogène de l'humidité vers l'extérieur. Ces gradients peuvent entraîner une densification partielle, où certaines zones atteignent difficilement les conditions thermiques et mécaniques optimales pour une consolidation efficace de la structure cellulaire.
2. **Confinement des contraintes** : Contrairement aux *rectangles*, où une géométrie allongée favorise un confinement efficace des contraintes, les *grands carrés* souffrent de leur grande section qui limite la transmission uniforme des efforts internes. Cela entraîne des zones moins densifiées et des microstructures inégales, réduisant ainsi l'efficacité globale de la densification.

La dureté des *grands carrés* suit une relation approximativement proportionnelle à leur densité, ce qui confirme l'importance de la densité dans les propriétés mécaniques. Cependant, leur microstructure présente davantage de zones claires (moins denses), ce qui reflète une densification partielle et inégale.

### 4.4 Influence de la vitesse de compression

La vitesse de compression joue un rôle important dans les propriétés mécaniques et microstructurales des échantillons de peuplier densifié, bien que ses effets varient selon les propriétés étudiées.

#### Propriétés mécaniques

Les résultats montrent que la dureté perpendiculaire aux fibres est nettement supérieure dans les échantillons densifiés à  $200\text{mm}/\text{min}$  par rapport à ceux compressés à  $4\text{mm}/\text{min}$ . Cette différence pourrait être liée à une microstructure plus compacte observée aux extrémités des échantillons densifiés plus rapidement, comme l'a observé *Navi* (2000) [50].

En revanche, les valeurs de MOE, MOR et de dureté parallèle aux fibres restent relativement constantes entre les deux vitesses, avec peu de variations significatives. Ces résultats ne permettent pas de conclure clairement sur l'impact de la vitesse de compression. Un MOR légèrement supérieur a cependant été observé dans les échantillons *carrés* densifiés à  $200\text{mm}/\text{min}$ . Ce résultat, combiné à l'absence de ruptures ou de défauts dans leur microstructure, suggère que la compression rapide pourrait limiter les dommages internes.

#### Microstructure et teinte

Les échantillons densifiés à  $200\text{mm}/\text{min}$  présentent une teinte globalement plus sombre et plus homogène par rapport à ceux densifiés plus lentement. Dans les *grands carrés*, cette homogénéité s'accompagne d'extrémités encore plus sombres que le centre, probablement en raison d'un échauffement plus important dans ces zones. Ces différences de teinte pourraient expliquer, en partie, les variations observées dans la dureté perpendiculaire.

À  $4\text{mm}/\text{min}$ , la teinte est moins uniforme, et des zones claires, correspondant à des densifications moins abouties, apparaissent plus fréquemment. Cela reflète une compression moins homogène et pourrait être liée aux ruptures microstructurales observées précédemment dans les *carrés*, qui sont absentes lorsque la vitesse augmente.

### 4.5 Le bois densifié comme bois de terrasse

Malgré certaines incertitudes soulevées précédemment, les résultats et les discussions montrent que le procédé THM représente un matériau prometteur pour les applications en bois de terrasse. Ses propriétés mécaniques améliorées, sa durabilité accrue et ses avantages environnementaux en font une alternative intéressante aux essences tropicales et aux bois traités.

#### Optimisation des paramètres pour le bois de terrasse

Les analyses précédentes suggèrent des configurations optimales pour l'utilisation du peuplier densifié en tant que bois de terrasse.

Les échantillons densifiés à des températures élevées ( $170^{\circ}\text{C}$ ) se distinguent par des modules de résistance et de rupture significativement supérieurs, ainsi qu'une microstructure plus sombre. Ces propriétés mécaniques sont essentielles pour garantir la durabilité et la résistance des planches de terrasse face aux charges dynamiques et statiques. La teinte plus sombre des échantillons est également mentionnée dans la littérature comme étant liée à une meilleure stabilité dimensionnelle et à une durabilité biologique accrue, notamment dans les travaux de *Kutnar et al. (2022)*[60] ou *Navi (2000)*[50].

Une vitesse de compression plus élevée ( $200\text{mm}/\text{min}$ ) s'est également révélée bénéfique pour limiter les dommages internes à la microstructure, tout en augmentant la dureté perpendiculaire aux fibres. Ces caractéristiques sont particulièrement importantes dans les applications où la résistance aux impacts et à l'abrasion de surface est cruciale.

Enfin, les échantillons *grands carrés*, bien qu'ils soient les plus proches des dimensions standards des planches de terrasse, affichent des propriétés mécaniques inférieures. Par ailleurs, bien que les dimensions rectangulaires semblent favoriser un meilleur confinement des contraintes, cela constitue un point positif. Les résultats obtenus révèlent encore des incertitudes concernant les mécanismes de diffusion de l'humidité et de la chaleur au sein des échantillons, particulièrement pour les formats plus grands, qui nécessitent encore une étude approfondie.

### 4.6 Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'impact significatif des paramètres de densification THM sur les propriétés mécaniques, physiques et microstructurales du peuplier, soulignant ainsi leur potentiel pour des applications telles que le bois de terrasse.

**Variabilité des résultats :** La dispersion observée dans les données s'explique par une combinaison de facteurs techniques, méthodologiques et environnementaux, ainsi que par l'hétérogénéité naturelle du bois. La standardisation des protocoles expérimentaux est essentielle pour réduire cette variabilité et garantir la comparabilité des résultats.

**Influence de la température :** Les échantillons densifiés à  $170^{\circ}\text{C}$  se distinguent par une meilleure consolidation microstructurale et des propriétés mécaniques supérieures, tout en affichant une teinte plus sombre, associée dans la littérature à une meilleure durabilité biologique et stabilité dimensionnelle. À l'inverse, les échantillons à  $140^{\circ}\text{C}$  présentent une légère supériorité en dureté parallèle, mettant en évidence de possibles compromis à envisager entre certaines propriétés spécifiques.

**Impact de la géométrie :** Les échantillons *rectangles* ont montré une efficacité mécanique supérieure, attribuable à un meilleur confinement des contraintes et à l'absence de dommages microstructuraux significatifs. Cependant, les échantillons de grandes dimensions (*grands carrés*) ont affiché des performances mécaniques inférieures, probablement en raison de gradients internes de chaleur et d'humidité, nécessitant une optimisation des procédés pour ces formats.

**Influence de la vitesse de compression :** Une compression rapide ( $200\text{mm}/\text{min}$ ) a permis de limiter les dommages internes tout en augmentant la dureté perpendiculaire aux fibres. En revanche, les propriétés globales, telles que le MOE et le MOR, semblent peu affectées par la vitesse.

Malgré certaines incertitudes, cette étude démontre que le procédé de densification THM améliore significativement les propriétés du peuplier, rendant ce matériau compétitif par rapport aux essences tropicales et aux bois plus denses pour une utilisation en terrasse. Les résultats les plus prometteurs incluent des températures élevées et une compression rapide. Toutefois, l'optimisation des procédés pour des formats plus grands et l'étude approfondie des mécanismes de diffusion thermique et hygrométrique demeurent des défis à relever.

---

## Perspectives

Bien que cette étude ait démontré le potentiel de la densification THM pour améliorer les propriétés du peuplier et en faire un matériau compétitif pour une utilisation comme bois de terrasse, plusieurs questions restent ouvertes pour les travaux futurs. Parmi celles-ci :

- L'optimisation des procédés pour les échantillons de grandes dimensions, en particulier pour surmonter les gradients thermiques et d'humidité internes.
- L'étude des propriétés à long terme, notamment la stabilité dimensionnelle et la durabilité biologique en conditions réelles d'utilisation.
- Une exploration approfondie des paramètres opératoires, tels que les variations de température, vitesse de compression et post-traitement, pour affiner les performances globales à différentes dimensions d'échantillons.

Ces axes de recherche permettraient de consolider les bases établies dans le domaine de la densification THM et d'optimiser l'utilisation du bois densifié en tant que matériau pour des applications extérieures.

---

# Conclusion

Pour favoriser une gestion durable des forêts belges et répondre aux défis du dérèglement climatique, il est essentiel de diversifier les essences cultivées. Intégrer des espèces à croissance rapide et sous-valorisées peut renforcer la résilience des forêts et améliorer la biodiversité. Le peuplier se distingue par sa croissance rapide, mais ses propriétés mécaniques limitées freinent son exploitation. Valoriser ces essences peu denses par des procédés innovants est indispensable pour encourager leur culture et les intégrer dans des filières industrielles. La densification THM offre une solution prometteuse à ce problème en transformant le bois de faible densité en un matériau compétitif pour des applications exigeantes, telles que les terrasses.

Ce travail visait à étudier l'influence des paramètres de densification – température de compression, vitesse de compression et géométrie des échantillons – sur les performances du peuplier densifié. Dans cette perspective, le premier chapitre a synthétisé les connaissances scientifiques nécessaires à la réalisation de cette étude. Il a d'abord exploré en détail la problématique des forêts belges, les enjeux liés à leur diversification, et les caractéristiques requises pour un bois destiné à des applications en terrasse. Les propriétés du peuplier brut ont ensuite été examinées avant d'élargir la discussion aux spécificités du matériau bois : sa composition, ses caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi que son comportement sous contrainte. Enfin, les différentes méthodes de densification, avec un accent particulier sur le procédé THM, ont été présentées pour situer ce travail dans le cadre des avancées technologiques existantes.

Le deuxième chapitre a décrit les méthodes expérimentales mises en œuvre dans cette étude. Il a présenté le procédé de densification, appliqué à des spécimens de géométries variées, traités à des températures de 140 et 170°C avec des vitesses de compression allant de 4 à 200mm/min. Il a ensuite exposé les essais réalisés sur ces échantillons, incluant des tests de dureté et de flexion ainsi que des observations microscopiques. Il a enfin détaillé les méthodes de préparation des échantillons pour les différentes manipulations, les hypothèses utilisées pour guider l'analyse et les approches de calcul employées pour obtenir les résultats nécessaires pour évaluer l'influence des paramètres de densification sur leurs performances mécaniques et physiques.

Le troisième chapitre a présenté de manière systématique les résultats de la densification du peuplier, des essais mécaniques, et des observations microscopiques. Les données collectées incluent les

---

propriétés mécaniques (dureté, MOE, MOR) et les caractéristiques physiques (densité, teinte) des échantillons, ainsi que des descriptions des modifications dans leur microstructure. Ce chapitre a également mis en lumière certaines tendances, telles que l'influence potentielle de la température, de la vitesse de compression, et de la géométrie des échantillons sur leurs performances. Ces résultats fournissent une base claire et structurée pour les analyses approfondies menées dans le chapitre suivant.

Enfin, le chapitre de discussion a émis certaines hypothèses quant aux raisons des variations des résultats et a établi des liens entre les observations expérimentales et les mécanismes physiques et chimiques décrits dans la littérature. Cette analyse a permis de tirer des conclusions sur l'influence des paramètres de densification, tels que la température, la vitesse de compression et la géométrie des échantillons, sur les propriétés du peuplier densifié, tout en gardant en perspective son utilisation comme bois de terrasse. Ce chapitre a également mis en évidence certaines questions en suspens, notamment les gradients de chaleur et d'humidité observés dans les échantillons de grande taille, qui nécessitent des investigations plus approfondies.

## **Enseignements principaux**

Les analyses ont montré que la température de densification influence les performances du bois densifié, avec des implications pour son utilisation en bois de terrasse. Les échantillons densifiés à 170°C présentent une microstructure plus dense, des propriétés mécaniques supérieures et une teinte plus sombre. Cette teinte est associée à une durabilité biologique accrue et une meilleure stabilité dimensionnelle, deux qualités essentielles pour des applications extérieures. Les échantillons densifiés à 140°C offrent quant à eux une légère supériorité en dureté parallèle aux fibres, qui n'est pas particulièrement intéressante pour notre application.

La géométrie des échantillons a également montré un impact notable. Les sections rectangulaires, grâce à une meilleure distribution des contraintes internes et l'absence de dommages microstructuraux, se sont avérées mécaniquement plus efficaces. Ces caractéristiques sont particulièrement intéressantes pour la fabrication de planches de terrasse. En revanche, les échantillons de grandes dimensions (*grands carrés*), plus proches des formats standard, ont affiché des performances moindres. Cela est attribué à des gradients internes de chaleur et d'humidité, qui compromettent leur densification uniforme. Ces observations mettent en lumière la nécessité d'optimiser les procédés pour les grands formats afin de garantir des propriétés fiables.

Enfin, la vitesse de compression a principalement influencé la microstructure et la dureté perpen-

---

diculaire aux fibres des échantillons, des critères clés pour les terrasses, souvent soumises à des impacts et à une forte usure de surface. Une compression rapide ( $200\text{mm}/\text{min}$ ) a réduit les dommages internes tout en améliorant cette dureté. Les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) semblent peu affectés par la vitesse, offrant une certaine flexibilité pour maximiser la productivité sans compromettre les performances globales.

## Perspectives

Malgré ces avancées, beaucoup de questions restent ouvertes appelant à des recherches futures :

- **Optimisation des grands formats :** La majorité des travaux sur la densification se concentrent sur des échantillons de taille relativement réduite ou sur des densifications de surface. Les gradients thermiques et hygrométriques, plus marqués dans les échantillons de grande taille, nécessitent une étude approfondie des mécanismes internes afin d'optimiser ces formats pour des applications industrielles.
- **Durabilité à long terme :** Si des études ont déjà exploré la sensibilité du bois densifié aux cycles d'humidité et de regonflement, il serait intéressant d'élargir ces travaux pour inclure la durabilité biologique des échantillons dans des conditions réelles d'utilisation, notamment leur résistance aux agents pathogènes et aux intempéries.
- **affinement des paramètres opératoires** Une exploration plus approfondie des variations de température, de vitesse de compression, et des conditions de post-traitement pourrait permettre d'ajuster ces paramètres en fonction des dimensions et des propriétés spécifiques des échantillons, afin d'optimiser leur performance globale.
- **Viabilité industrielle :** Le développement de procédés de densification plus efficaces et leur intégration dans des chaînes de production industrielles restent des défis à relever. L'analyse des aspects économiques, écologiques, énergétiques et sociaux du procédé serait cruciale pour garantir sa viabilité à grande échelle et son adoption dans les secteurs concernés.

Cette étude confirme que la densification THM est une méthode efficace pour transformer le peuplier en un matériau compétitif pour le bois de terrasse. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des températures élevées et des vitesses de compression rapides, tandis que les sections rectangulaires se sont démarquées par leur efficacité mécanique. Cependant, des défis subsistent, notamment pour les échantillons de plus grandes dimensions, où la gestion des gradients internes de chaleur et d'humidité nécessite des optimisations supplémentaires.

---

Malgré ces limitations, le bois densifié apparaît comme une alternative crédible et durable aux essences tropicales et aux bois plus denses, en particulier dans le contexte d'une gestion forestière responsable et d'un développement économique local. Cette technologie représente une opportunité de valoriser les essences peu denses, tout en répondant aux impératifs écologiques et industriels actuels.

# Bibliographie

- [1] Société royale forestière de BELGIQUE. *Les forêts de Belgique*. <https://srfb.be/informations-sur-les-forets/les-forets-de-belgique>. Date de consultation : 20/12/2024.
- [2] Filière Bois WALLONIE. *Panorabois 2024*. 2024.
- [3] Filière bois WALLONIE. *Reconstituer une forêt plus résiliente avec la Wallonie*. <https://foretresiliente.be/>. Date de consultation : 12/12/2024.
- [4] Biomass Consult (revu par CLIMACT). *Évaluation fondée sur les risques établissant la conformité de la gestion des forêts avec les critères d'exploitation de la directive RED II au niveau national ou infranational : la Région wallonne*. Rapp. tech. SPW, 2023.
- [5] Info BOIS. *La forêt belge*. <https://www.houtinfobois.be/la-foret-et-le-bois/les-forets-dans-le-monde-et-en-belgique/la-foret/>. Date de consultation : 12/04/2024.
- [6] SPW. *Ressources forestières*. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/RESS%204.html>. Date de consultation : 10/12/2024.
- [7] Bastien CASTAGNEYROL. “Effet McDo : l’homogénéisation menace aussi les forêts”. In : *The conversation* (2016).
- [8] Christian Messier et AL. “For the sake of resilience and multifunctionality, let’s diversify planted forests”. In : *Conservation Letters* (2021).
- [9] La maison ÉCOLOGIQUE. *Bois exotique ou bois européen*. <https://materiaux-namur.com/magazine/459/terrasse-bois-exotique-local-europ%C3%A9enne>. Date de consultation : 22/12/2024.
- [10] TROPICAL-WOOD. *Guide des bois de terrasse et bois de bardage*. <https://www.tropical-woods.fr/catalogue/content/le-guide-tropical-woods-des-bois-de-terrasses-et-de-bardage.html>. Date de consultation : 22/12/2024.
- [11] Centre scientifique et technique du BATIMENT. *norme NF DTU 51.4 P1-1 Plaletage extérieur en bois*. Rapp. tech. Groupe Afnor, 2010.

- 
- [12] Joris Van Acker et MARC STEVENS. *Le traitement thermique du bois*. <https://www.houtinfo Bois.be/informations-techniques/materiaux/le-bois-modifie-thermiquement/>. Date de consultation : 11/12/2024.
- [13] OWATROL. *Quel bois choisir pour une terrasse*. <https://www.owatrol.com/blog/article/quel-bois-choisir-pour-une-terrasse>. Publié le 15/05/2020.
- [14] Qilan FU. “Comportement physique, chimique et mécanique du bois suite à la compression sous l’effet de la chaleur et de l’humidité”. Thèse de doct. Université Laval, 2019.
- [15] Lucas BOSMANS. “Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du bois densifié par procédé thermo-hydrromécanique”. Mém. de mast. UCLouvain, 2023.
- [16] Reza Hajihassani et AL. “INFLUENCE OF COMBINED HYGRO-THERMOMECHANICAL TREATMENT ON TECHNICAL CHARACTERISTICS OF POPLAR WOOD”. In : *Maderas Ciencia y tecnologia* (2018).
- [17] HOUTINFOBOIS. *Le Peuplier*. <https://www.houtinfo Bois.be/essences/peuplier/>. Date de consultation : 22/12/2024.
- [18] Olga ROZHNOVA. *Peuplier*. <https://www.istockphoto.com/fr/vectorel/peuplier-avec-le-feuillage-vert-sur-un-fond-blanc-gm1283700910-381056442>. Date de consultation : 1/01/2025.
- [19] GROUAZEL-GROUP. *FICHE TECHNIQUE PEUPLIER*. [https://www.grouazel-group.com/media/documents/essence/essence\\_6.pdf](https://www.grouazel-group.com/media/documents/essence/essence_6.pdf). Date de consultation : 22/12/2024.
- [20] LIGNUM. *Propriétés mécaniques du bois*. [https://www.lignum.ch/files/\\_migrated/content\\_uploads/Propri%C3%A9t%C3%A9s\\_m%C3%A9caniques\\_du\\_bois\\_01.pdf](https://www.lignum.ch/files/_migrated/content_uploads/Propri%C3%A9t%C3%A9s_m%C3%A9caniques_du_bois_01.pdf). Date de consultation : 22/12/2024.
- [21] Fengel D. et Wegener G. *Wood : Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Wiley, 1989.
- [22] Vandiem THI. “Modélisation du comportement au feu des structures en bois”. Thèse de doct. Université de Lorraine, 2017.
- [23] Mecoba T. *Les caractéristiques du matériau bois*. <https://mecobat.com/caracteristiques-du-materiau-bois/>. Date de consultation : 11/12/2024.
- [24] Philippe BERGER. *Le matériau bois*. [http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Labo/materiau\\_bois/Le%20bois.htm](http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Labo/materiau_bois/Le%20bois.htm). Date de consultation : 11/12/2024.
- [25] Arnaud JEHL. “Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser”. Thèse de doct. Arts et Métiers ParisTech, 2012.

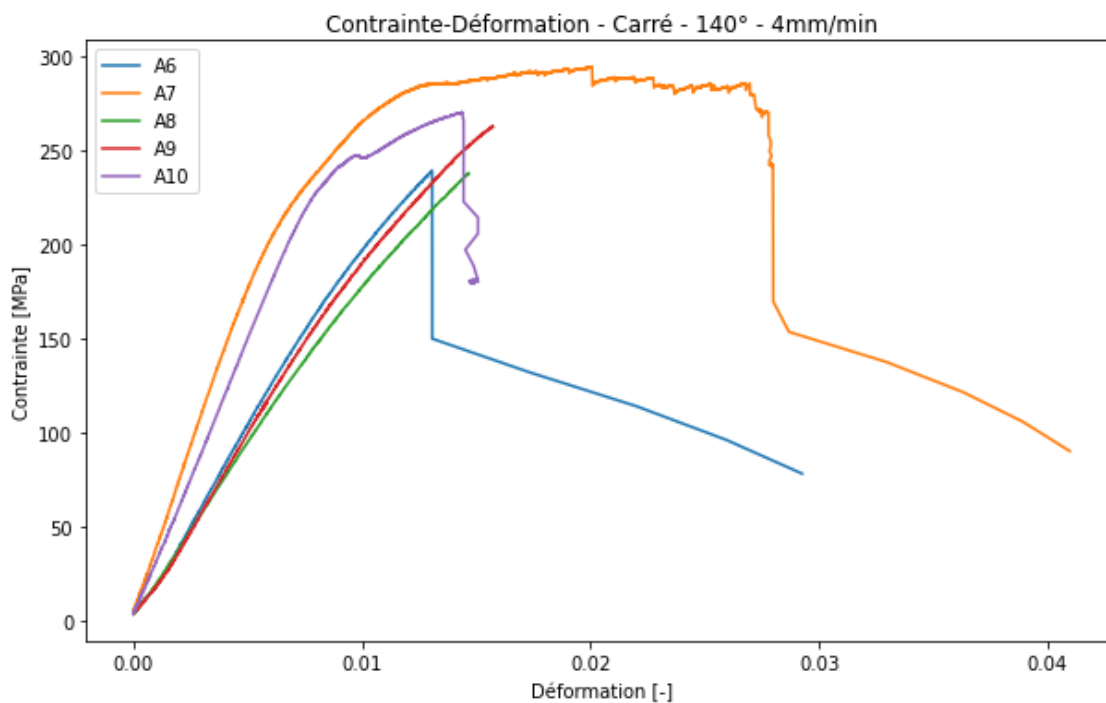
- 
- [26] Aleksandra Liszka et AL. “Structural differences of cell walls in earlywood and latewood of *Pinus sylvestris* and their contribution to biomass recalcitrance”. In : *Frontiers in Plant Science* (2023).
- [27] SIKa. *Structure des bois de conifères*. <https://wolman.de/fr/infocenter-bois/de-larbre-au-bois/structure-des-bois-de-coniferes>. Date de consultation : 04/12/2024.
- [28] Yves Bégin et Jean-Frédéric Terral DOMINIQUE MARGUERIE Vincent Bernard. “Anthracologie et dendrologie”. In : *La dendroécologie (pp.311-347)*. Serge Payette et Louise Filion, 2010.
- [29] David Fedullo et THIERRY GALLAUZIAUX. *Le grand livre de la menuiserie*. Eyrolles, 2018.
- [30] Cédric MONTERO. “Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois”. Thèse de doct. Université de Montpellier, 2010.
- [31] INRS. *Fibres de cellulose*. <https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html> . . Date de consultation : 16/12/2024.
- [32] Toumpanaki Eleni et AL. “Beyond What Meets the Eye : Imaging and Imagining Wood Mechanical–Structural Properties”. In : *Wiley* (2021). ISSN : 09359648.
- [33] Nicolas MARIOTTI. “Caractérisation des propriétés physico-mécaniques de bois densifié thermo-hygro-mécaniquement”. Mém. de mast. Université Laval, 2010.
- [34] Hosokawa Alpine GROUP. *Lignine : Procédés individuels de compactage et de broyage*. <https://www.hosokawa-alpine.fr/procede-de-traitement-des-poudres/industries/chimie/lignine/>. Date de consultation : 11/12/2024.
- [35] C. A. S. HILL. “Wood Modification : Chemical, Thermal and Other Processes”. In : *Wiley* (2006).
- [36] Diego de CROMBRUGHE. “Densification viscoplastique du bois pour applications à performances structurale”. Mém. de mast. Uclouvain, 2022.
- [37] Reeve R. “Modulus of rupture”. In : *Methods of Soil Analysis, Part 1 : Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling (pp.466-471)*. wiley, 2015.
- [38] Nicolas GCVL. *Initiation au calcul des structures en bois CB-71 (partie 1/5)*. <https://www.geniecvl.com/introduction-au-calcul-bois-cb71-partie-1-caracteristiques-du-materiau/>. Date de consultation : 22/12/2024.
- [39] Emil Engelund Thybring et AL. “Water in Wood : A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps”. In : *Forests* (2022).

- 
- [40] Méline WILMART. *ANHYDRE*. <https://www.houtinfo Bois.be/glossaire/anhydre/>. Date de consultation : 04/12/2017.
- [41] Alfred Teischinger PETER NIEMZ et Dick SANDBERG. “Wood and Moisture”. In : *Springer Handbook of Wood Science and Technology* (pp.355-397). Springer, 2023.
- [42] Bernard LÉBOUCHER. “Fabriquer en bois massif : Anticiper les variations”. In : *Le Bouvet* (2014).
- [43] Cécilia GAUVIN. “Étude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d’un panneau de bois”. Thèse de doct. Université Montpellier, 2015.
- [44] Drevaska Fakulta et AL. “The hardness of ringporous wood of chosen tree species”. In : *Acta Facultatis Xylogologiae* (2007).
- [45] D. RUAN. *Indentation Hardness Testing*. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/indentation-hardness-testing>. Date de consultation : 11/12/2024.
- [46] ZWICK-ROELL. *Connaissances sur la méthode d’essai Brinell (détermination de la dureté Brinell HBW)*. <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/metal/normes-metal/essai-brinell-iso-6506/>. Date de consultation : 04/12/2017.
- [47] Parviz NAVI et Frédéric HEGER. “Comportement thermo-hydrromécanique du bois - Application technologiques et dans les structures”. In : *Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne* (2005).
- [48] Parviz NAVI et Frédéric HEGER. “Combined Densification and Thermo-HydroMechanical Processing of Wood”. In : *Cambridge University Press* (2004).
- [49] Seyed Hamzeh Sadatnezhad et AL. “Continuous surface densification of wood : a new concept for large scale industrial processing”. In : *BioResources* (2017).
- [50] Parviz NAVI et Fred GIRARDET. “Effects of Thermo-Hydro-Mechanical Treatment on the Structure and Properties of Wood”. In : *Holzforschung* (2000).
- [51] Benjamin BATIOU. “Étude expérimentale et numérique de la décomposition thermique du bois résineux”. Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique - Poitiers, 2015.
- [52] Li Lamei et AL. “Color Change and Timber Property Prediction of *Castanopsis hystrix* Wood After Steam Heat Treatment”. In : *Forest Engineering* (2023).
- [53] Fédération Nationale du Bois. *Fiche Comprendre - LA DURABILITÉ DU BOIS : NATURELLE ou CONFÉRÉE*. Rapp. tech. FNB, 2016.

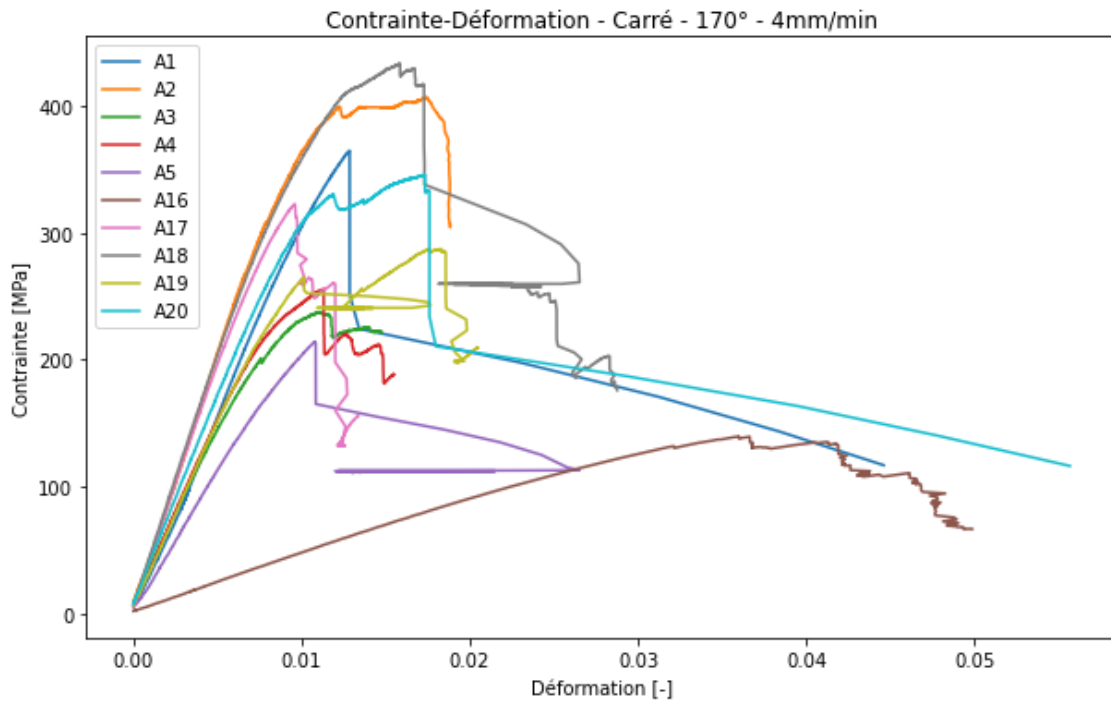
- 
- [54] Clémentine Triquet et AL. “Chemical surface densification of hardwood through lateral monomer impregnation and in situ electron beam polymerization”. In : *Journal of materials science* (2011).
- [55] Yu LUAN. “Wood mechanical densification : a review on processing”. In : *Materials and manufacturing processes* (2022).
- [56] Andreja Kutnar et MILAN SERNEK. “Densification of wood”. In : *Researchgate* (2007).
- [57] Alain Cloutier QILAN FU et Aziz LAGHDIR. “Effect of Heat and Steam on the Mechanical Properties and Dimensional Stability of Thermo-Hygromechanically-densified Sugar Maple Wood”. In : *Bioresources* (2017).
- [58] Praviz NAVI et Antonio PIZZI. “Property changes in thermo-hydro-mechanical processing”. In : *De Gruyter* (2015).
- [59] ABAQUS. *Hyperelastic behavior in elastomeric foams*. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-hyperfoam.htm>. Date de consultation : 22/12/2024.
- [60] Andreja Kutnar et George Mantanis DICK SANDBERG. “Wood modification technologies - a review”. In : *iForest Biogeosciences and forestry* (2017).
- [61] PMG. *Débats sur dosse ou sur quartier*. [https://www.pmg.be/fr/dossier/EDBbe2028W01\\_011](https://www.pmg.be/fr/dossier/EDBbe2028W01_011). Date de consultation : 10/12/2024.
- [62] Aboltins A et Kic P. “Determination of the mass diffusion coefficient of wood by thin-layer drying kinetics”. In : *Agronomy Research* (2019).
- [63] Kong Lulu; Zhao Zijian; He ZHENGBIN et Yi SONGLIN. “Effects of steaming treatment on crystallinity and glass transition temperature of *Eucalyptus grandis*”. In : *Elsevier* (2017). ISSN : 22113797.
- [64] KEYENCE. *Microscope numérique - Série VHX7000*. <https://www.keyence.eu/frfr/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/>. Date de consultation : 11/12/2024.
- [65] ZWICK-ROELL. *Essai de flexion*. <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-flexion/>. Date de consultation : 04/12/2017.
- [66] Zheng WANG. “Study on the four-point bending beam method to improve the testing accuracy for the elastic constants of wood”. In : *European Journal of Wood and Wood Products* (2023).

- 
- [67] Christophe BAYART. *norme belge enregistrée NBN EN 408+A1 : Structure en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. Rapp. tech. NBN, 2012.
- [68] Maciej Sydor et AL. “Indentation hardness and elastic recovery of some hardwood species”. In : *Applied Sciences* (2022).
- [69] C. R. WELZBACHER et al. “Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce : Dimensional stability and durability aspects”. In : *Springer-Verlag* (2007).

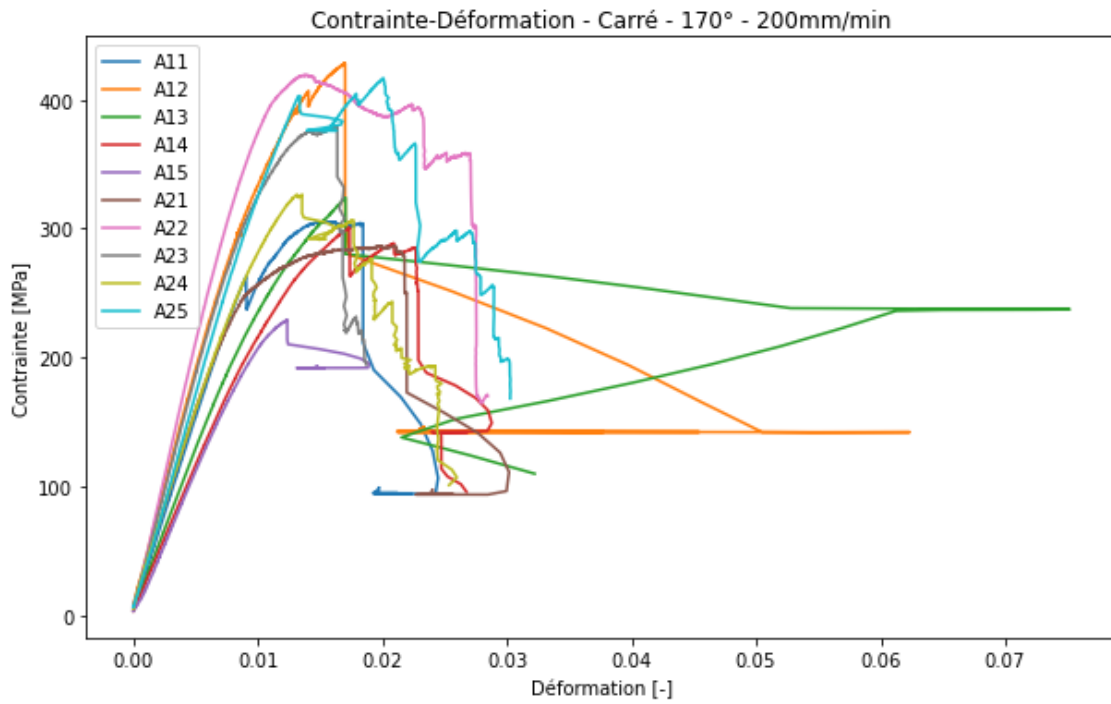
## A. Données des essais de flexion



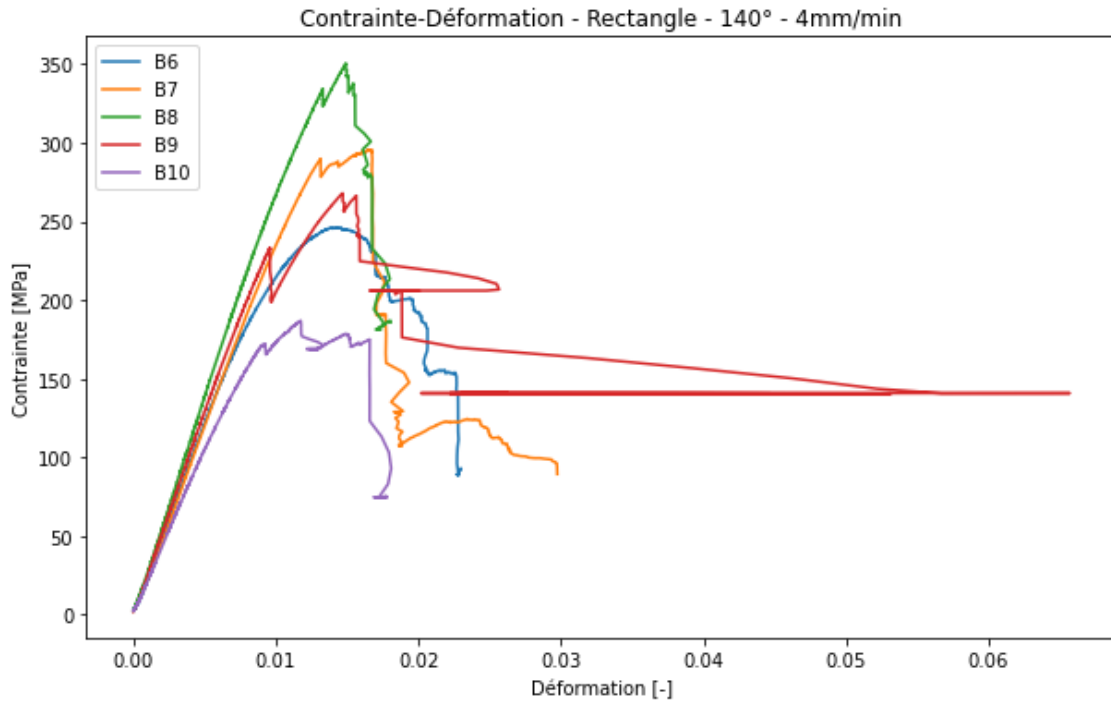
**FIGURE A.1** – *Echantillons Carrés - 140°C - 4mm/min*



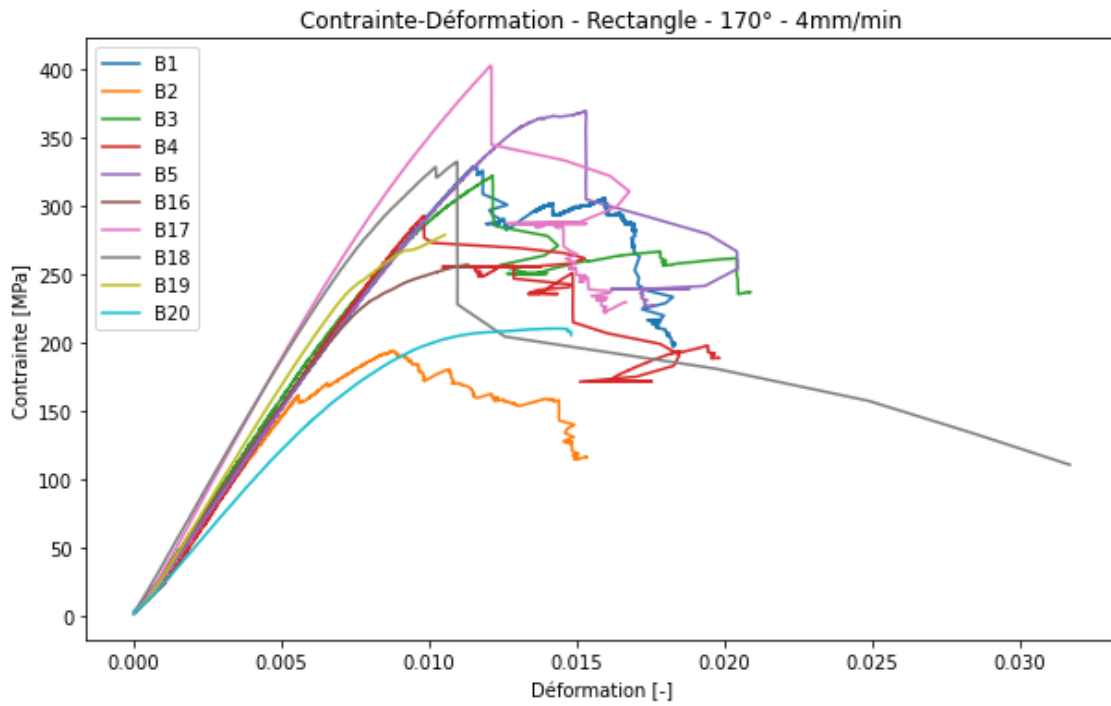
**FIGURE A.2** – *Echantillons Carrés - 170°C - 4mm/min*



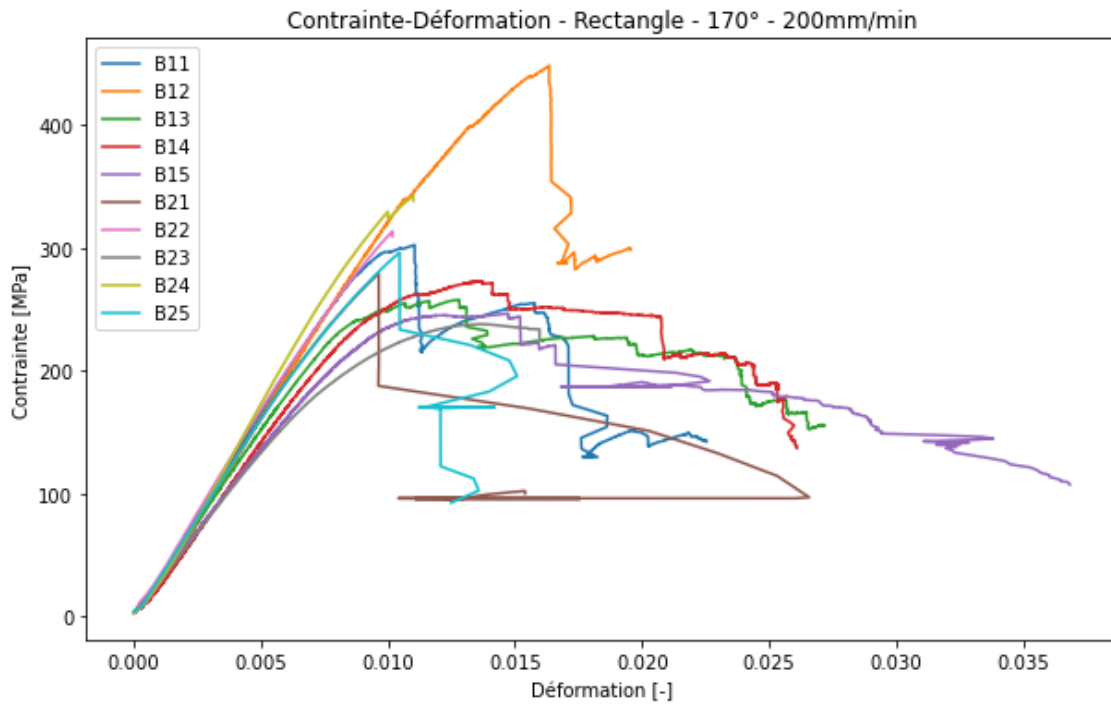
**FIGURE A.3** – *Echantillons Carrés - 170°C - 200mm/min*



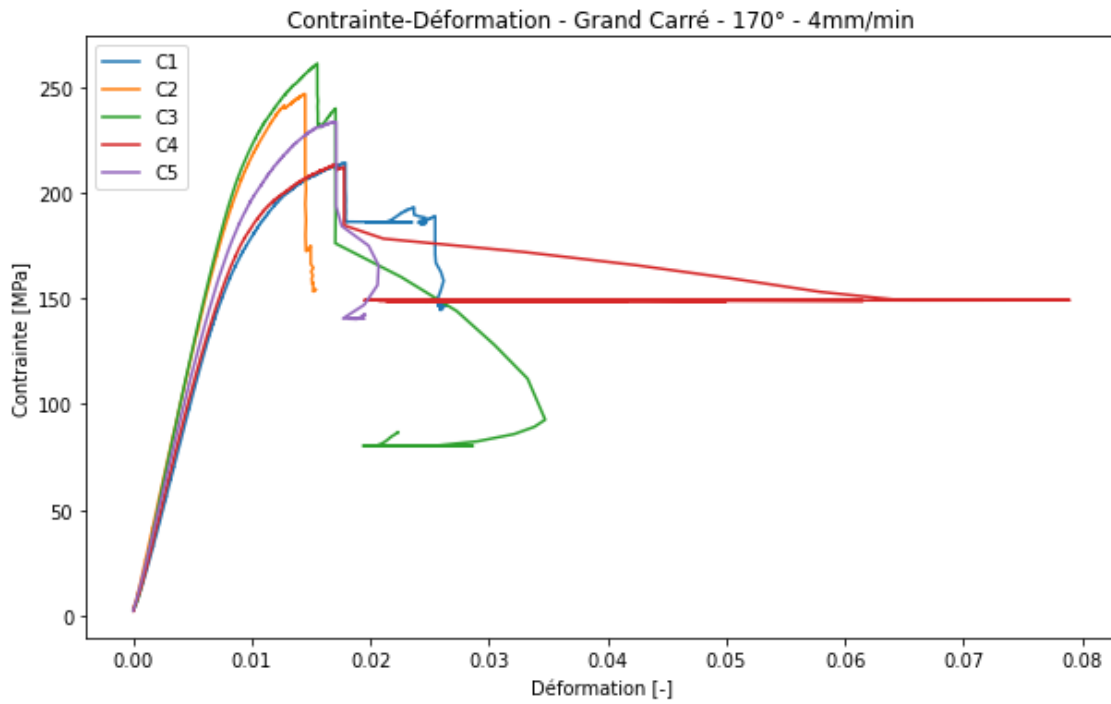
**FIGURE A.4** – *Echantillons Rectangles - 140°C - 4mm/min*



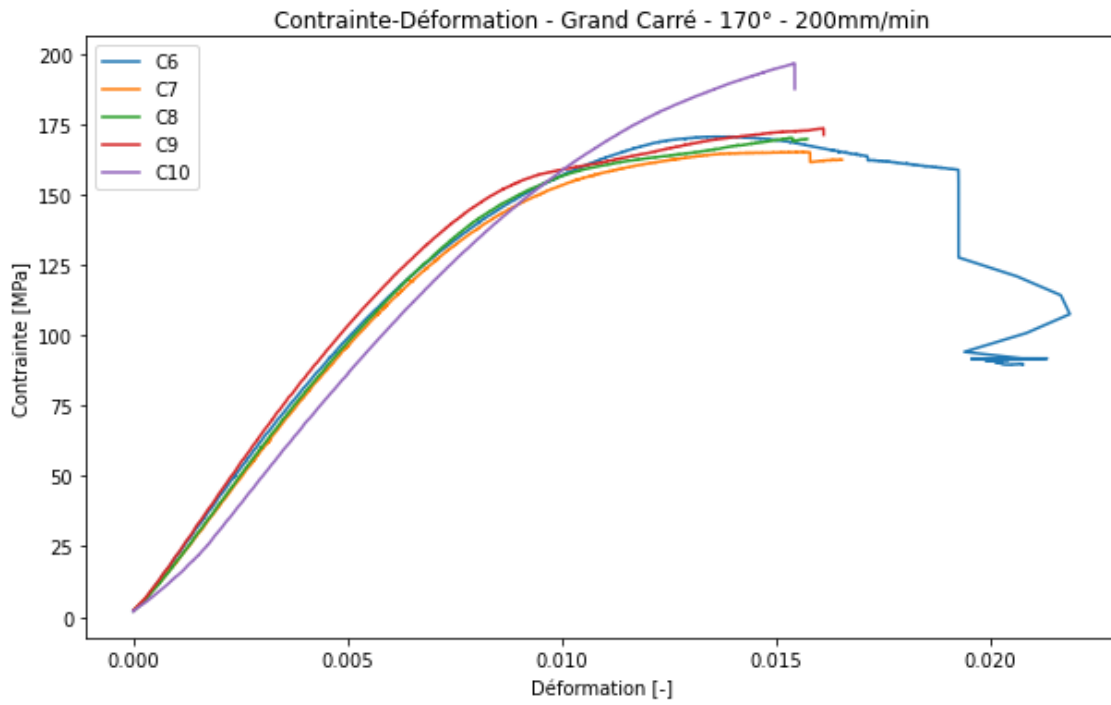
**FIGURE A.5** – *Echantillons Rectangles - 170°C - 4mm/min*



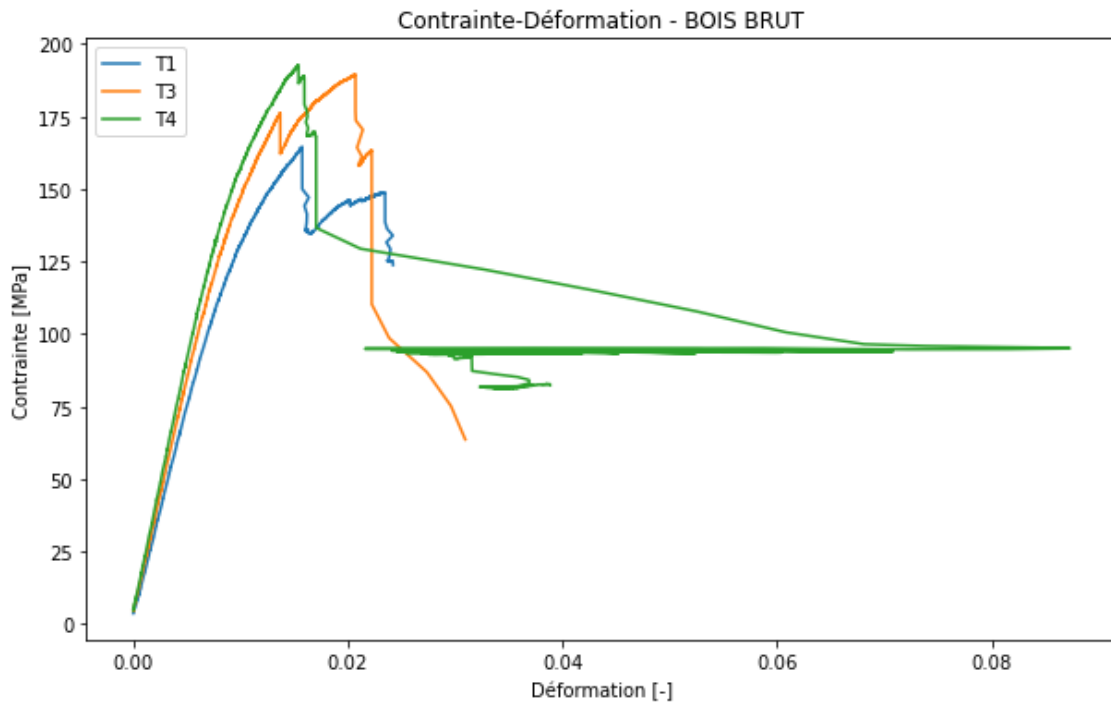
**FIGURE A.6** – *Echantillons Rectangles - 170°C - 200mm/min*



**FIGURE A.7** – *Echantillons Grands carrés - 170°C - 4mm/min*



**FIGURE A.8** – *Echantillons Grands carrés - 170°C - 200mm/min*



**FIGURE A.9** – *Bois brut*

---



UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN  
École polytechnique de Louvain

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