THÈSE DE DOCTORAT

de l'École des Ponts ParisTech

Comportement thermo-hygro-mécanique du bois soumis à des sollicitations accidentelles d'incendie

École doctorale Science, Ingénierie et Environnement

Structures et Matériaux

Thèse préparée au Laboratoire Navier et au CSTB

Soutenance prévue le 12/12/2024, par

Hussein DAHER

Composition du jury :

Jean-Christophe, MINDEGUIA Maître de conférences HDR, Université de Bordeaux	*Rapporteur*
Frédéric, DUBOIS Professeur des universités, Université de Limoges	*Rapporteur*
Gilles, PARENT Professeur des universités, Université de Lorraine	*Examinateur*
Gilles, FORÊT Directeur de recherche, ENPC	*Directeur de thèse*
Sabine, CARÉ Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel	*Co-encadrant de thèse*
Loïc, PAYET Ingénieur, CSTB	*Co-encadrant de thèse*
Thouraya, SALEM Ingénieure de recherche, Université Gustave Eiffel	*Invitée*
Stéphane, HAMEURY Docteur Ingénieur, CSTB	*Invité*

Résumé

Le bois, en tant que matériau de construction durable à faible empreinte carbone, présente des avantages environnementaux considérables. Cependant, en raison de son caractère hygroscopique, ses propriétés mécaniques sont fortement influencées par sa teneur en humidité. Bien que l'Eurocode 5 intègre certains aspects climatiques dans la conception des structures en bois, il néglige l'influence de l'humidité et des gradients hydriques pouvant se développer à l'intérieur du matériau, altérant ainsi ses performances mécaniques. Par ailleurs, le bois, en tant que matériau combustible, est particulièrement vulnérable aux incendies, ce qui représente une menace pour la sécurité des structures.

Cette thèse porte sur l'étude du comportement thermo-hygro-mécanique du bois exposé à des conditions d'incendie, avec une attention particulière sur l'impact de la température et de l'humidité sur ses propriétés mécaniques. Les effets des gradients thermiques et hydriques sur la résistance en compression et le module d'élasticité axial du bois sont examinés, tant à l'échelle du matériau qu'à l'échelle structurale.

Dans un premier temps, des essais expérimentaux sont menés afin d'analyser les propriétés mécaniques du bois sous diverses conditions de température et d'humidité, homogènes et hétérogènes. Les résultats montrent que les gradients thermo-hydriques ont une influence significative sur les performances mécaniques du bois, notamment sa résistance en compression en situation d'incendie. Ensuite, des essais à l'échelle structurale sur des poteaux en bois permettent de valider les conclusions obtenues à l'échelle du matériau et d'approfondir la compréhension des effets de la diffusion thermique et hydrique sur le comportement global des structures en bois.

Enfin, cette thèse propose un modèle prédictif du comportement du bois sous conditions d'incendie, apportant ainsi des perspectives pour améliorer la conception et la sécurité des bâtiments en bois face aux risques d'incendie, en s'appuyant sur des règles de dimensionnement adaptées.

Mots clés : Bois, Température, Humidité, Comportement mécanique, Eurocode 5, Résistance en compression, Module d'élasticité axial, Gradients thermo-hydriques.

Abstract

Wood is a sustainable, low-carbon construction material with substantial environmental benefits. However, as a hygroscopic material, its mechanical properties are significantly influenced by moisture content. Although Eurocode 5 considers certain climatic factors in the design of timber structures, it does not address the impact of moisture content or the development of moisture gradients within the material, both of which can alter its mechanical performance. Moreover, fire presents a serious risk to timber structures due to the combustible nature of wood.

This study investigates the thermo-hygro-mechanical behavior of wood when exposed to fire, with an emphasis on the effects of temperature and moisture on its mechanical properties. The research examines how thermal, and moisture gradients affect the compressive strength and axial modulus of elasticity of wood, both at the material and structural scales.

Initially, experimental tests are conducted to analyze the mechanical properties of wood under various homogeneous and heterogeneous temperature and moisture conditions. The results reveal that thermo-hygro gradients significantly influence the mechanical performance of wood, particularly its compressive strength during thermal exposure. Subsequently, structural-scale tests on timber columns validate the findings from the material scale and provide deeper insights into the effects of thermal and moisture diffusion on the behavior of timber structures.

Finally, this research presents a predictive model for the behavior of wood under fire conditions, providing a framework for enhancing the safety and design of timber structures exposed to fire, supported by adapted design guidelines.

Keywords: Wood, Temperature, Moisture content, Mechanical behavior, Eurocode 5, Compressive strength, Axial modulus of elasticity, Thermo-hygro gradients

Table des matières

Résumé 3

Abstract 4

Introduction Générale 10

Partie 1 13

Étude Bibliographique 13

Chapitre 1 15

Généralités sur le bois 15

1.1. Le bois : matériau naturel 15

1.2. Structure anatomique du bois 16

1.3. Structure et compositions chimiques des parois cellulaires du bois 18

1.4. Les défauts du bois 20

1.5. Utilisation du bois dans la construction 21

Chapitre 2 25

Comportement hygroscopique du bois 25

2.1. Introduction 25

2.2. Les phases de l'eau dans le bois 25

2.3. Teneur en eau du bois 26

2.4. Equilibre hygroscopique 27

2.5. Variations dimensionnelles 29

Chapitre 3 32

Propriétés mécaniques du bois 32

3.1. Introduction 32

3.2. Paramètres influençant les propriétés mécaniques du bois 32

3.3. Résistance du bois selon l'Eurocode 5 34

3.4. Comportement mécanique du bois sous sollicitations uniaxiales 37

3.5. Anisotropie des propriétés mécaniques 38

Chapitre 4 40

Comportement du bois en situation d'incendie 40

4.1. Phénomène de combustion du bois 40

4.2. Propriétés thermo-physiques du bois 42

4.3. Transfert de masse 45

4.4. Température de transition vitreuse des composants bois 48
4.5. Résistance des structures bois au feu selon l'Eurocode 5 50
Objectifs de la thèse 55
Partie 2 58
Etudes Expérimentales à l'échelle du matériau 58
Section A : Essais de compression sans gradients thermiques et hydriques 60
Chapitre 5 61
Matériaux et Méthodes 61
5.1. Matériaux d'étude 61
5.2. Méthodologie 63
Chapitre 6 68
Résultats des essais à température ambiante 68
6.1. Influence de la teneur en eau à température ambiante sur la densité 68
6.2. Influence de la teneur en eau à température ambiante sur les propriétés mécaniques du bois 70
Chapitre 7 77
Résultats des essais à différentes températures 77
7.1. Influence de la teneur en eau et de la température sur la densité 77
7.2. Influence de la teneur en eau et de la température sur les propriétés mécaniques du bois 78
Conclusion Partie 2 – Section A 89
Section B : Essais de compression avec gradient thermiques et hydriques 91
Chapitre 8 92
Matériaux et Méthodes 92
8.1. Matériaux d'étude 92
8.2. Protocoles expérimentaux 95
Chapitre 9 96
Résultats des essais des protocoles P_{1bis} et P_2 96
9.1. Données des Thermocouples 96
9.2. Impact du séchage de l'eau sur le profil thermique du bois 97
9.3. Perte de masse et teneur en eau finale 98
9.4. Propriétés mécaniques 100

9.5. Changement de couleurs des échantillons en fonction de la température. 106
9.6. Modes de Ruptures 106
Chapitre 10 108
Résultats des essais des protocoles P_3 et P_4 108
10.1. Données des Thermocouples 108
10.2. Perte de masse et teneur en eau 110
10.3. Propriétés mécaniques 112
10.4. Modes de Ruptures 116
10.5. Evaluation de l'influence du gradient hydrique 117
Conclusion Partie 2 – Section B 121
Partie 3 123
Etudes Expérimentales à l'échelle structurale 123
Chapitre 11 125
Matériaux et Méthodes 125
11.1. Matériaux : le bois lamellé-collé 125
11.2. Protocoles et dispositifs expérimentaux 126
Chapitre 12 131
Résultats des essais de compression à l'échelle structurale 131
12.1. Données des Thermocouples 131
12.2. Détermination de la section non carbonisée de la poutre S_5 136
12.3. Propriétés mécaniques 137
12.4. Modes de Ruptures 143
Conclusion Partie 3 144
Conclusion Générale et Perspectives 147
Références 151
Annexes 161
A.1 Bibliographie 163
A.2 Données des Thermocouples 165
A.3 Modes de rupture - Courbes force-déplacement 168
A.4 Evaluation du gradient hydrique 171
Tables des Figures 175
Liste des Tableaux 181

Introduction Générale

Ces dernières années, l'essor de la construction en bois à grande échelle a marqué une étape importante dans la promotion de pratiques de construction à faible empreinte carbone et dans l'utilisation durable des ressources forestières. Le bois, en tant que matériau de construction, présente de nombreux avantages. Il est renouvelable, recyclable et possède une empreinte carbone beaucoup plus faible que celle des matériaux de construction traditionnels tels que l'acier et le béton. De plus, le bois offre des performances thermiques naturelles, ce qui contribue à l'efficacité énergétique des bâtiments. Son utilisation permet également de soutenir l'industrie forestière, favorisant ainsi une gestion durable des forêts et contribuant à la séquestration du carbone.

Dans ce contexte, la construction de grands bâtiments en bois a connu une popularité croissante. Des structures emblématiques comme le Brock Commons Tallwood House à Vancouver et le Mjøstårnet en Norvège illustrent les capacités du bois en tant que matériau de construction pour des immeubles de grande hauteur. Ces projets démontrent non seulement la faisabilité technique de la construction en bois de grande échelle, mais aussi ses avantages environnementaux et esthétiques. Le succès de tels projets repose en partie sur une compréhension approfondie du comportement du bois sous différentes conditions, notamment en cas d'incendie.

Face à cette tendance, la prédiction de la résistance au feu des structures en bois devient une priorité essentielle pour garantir la sécurité à l'usage et leur performance en cas d'incendie. Une meilleure caractérisation de la résistance au feu des éléments en bois est nécessaire pour améliorer la crédibilité des bâtiments constitués de ce matériau et concevoir des éléments structuraux aux dimensions et aux performances appropriés. Parmi les facteurs influençant cette résistance, la température et la teneur en humidité jouent des rôles déterminants.

Les incendies représentent un risque majeur pour les structures en bois en raison de la nature combustible du matériau. Lorsqu'un incendie se déclenche, les températures élevées peuvent rapidement altérer les propriétés mécaniques du bois, entraînant une diminution de sa résistance structurale et potentiellement l'effondrement de la construction. La dégradation thermique du bois sous l'effet du feu est un phénomène complexe qui nécessite une compréhension approfondie pour concevoir des bâtiments en bois plus sûrs et mieux adaptés aux exigences de résistance au feu. En particulier, les propriétés mécaniques résiduelles de la section non carbonisée doivent être précisées. Ce sujet fait partie actuellement des questionnements de la profession, notamment pour des révisions des normes de dimensionnements.

La variation de la teneur en humidité, qui résulte des processus de vaporisation, de transfert et de recondensation de l'eau dans la section transversale résiduelle du bois, influence de manière significative ses propriétés mécaniques sous l'effet de la chaleur (Gerhards 1982, Guitard 1987, Li 2023, Wood Handbook 1987). Bien que l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2 : 2005) stipule que la résistance en compression à 100°C est inférieure de 25% par rapport à celle mesurée à 20°C, il ne précise pas la teneur en eau du bois dans ces conditions. Des essais préliminaires réalisés en 2020 au CSTB (Manthey 2020) ont montré que, dans une plage de température comprise entre 20 et 100°C, la résistance en compression du bois dépend principalement de sa teneur en eau au-delà d'un certain seuil thermique. Par exemple, à 100°C, la résistance en compression d'un bois sec est presque identique à celle mesurée à 20°C, tandis que pour un bois ayant une

teneur en eau d'environ 10%, cette résistance est réduite à environ 60% de la valeur à température ambiante.

Les propriétés hygrothermiques du bois, telles que sa capacité à absorber et à désorber l'humidité, influencent directement ses performances mécaniques. Lorsqu'il est exposé à la chaleur, le bois subit des transformations physiques et chimiques qui modifient sa résistance et sa rigidité. La dégradation thermique, par exemple, commence à des températures relativement basses (environ 100°C) et progresse avec l'augmentation de la température. Ce processus est accompagné par des variations dans la teneur en humidité, qui peuvent affecter les propriétés mécaniques du bois, notamment sa résistance à la compression et son module d'élasticité.

Dans cette optique, cette thèse a pour objectif principal de mieux comprendre le comportement thermo-hygro-mécanique du bois sous différentes conditions de température et d'humidité. Nous nous intéressons particulièrement à l'évolution des propriétés mécaniques du bois, telles que sa résistance en compression suivant le sens du fil et son module d'Young longitudinal, en fonction de ces paramètres.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont les suivants :

1. Analyser, à l'échelle du matériau, l'impact des variations thermiques et hydriques sur les propriétés mécaniques du bois, en prenant en compte la présence ou l'absence de gradients thermiques et hydriques.
2. Étudier, à l'échelle structurale (poteaux), l'influence des gradients thermiques et hydriques sur le comportement mécanique du bois.

Ce travail est composé de 12 chapitres regroupés en trois parties :

Dans la première partie (chapitre 1 à 4), nous explorerons la nature du matériau bois, en fournissant des informations générales sur ses caractéristiques et son utilisation dans la construction. Nous aborderons ensuite son comportement mécanique tant dans des conditions normales que lors d'un échauffement dû à un d'incendie, en mettant l'accent sur la façon dont ses propriétés hygroscopiques, thermiques et mécaniques interagissent. Une attention particulière sera portée à l'influence des gradients de température et d'humidité sur la dégradation de ses propriétés mécaniques et à leur impact sur la sécurité et la performance des structures en bois dans un contexte de protection contre le feu. Cette partie se terminera avec les objectifs de la thèse.

La deuxième partie de la thèse sera dédiée à l'étude expérimentale à l'échelle du matériau. Elle est constituée de 2 sections.

- La section A concernera des essais sans gradients thermiques et hydriques. Le chapitre 5 décrira en détail les matériaux sélectionnés ainsi que les méthodes mises en œuvre pour réaliser les essais sans gradients thermiques et hydriques. Le chapitre 6 présentera les résultats expérimentaux des essais de compression effectués sur du bois massif et du bois lamellé-collé, en tenant compte de différentes teneurs en humidité à température ambiante, tout en assurant une homogénéité de l'humidité à travers l'échantillon. Enfin, le chapitre 7 se concentrera sur les essais de compression du bois lamellé-collé sous l'influence de différentes températures et teneurs en eau, en mettant en évidence les

interactions entre la température et la teneur en humidité, ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques du bois.

- La section B concernera des essais avec gradients thermiques et hydriques. Le chapitre 8 introduira les matériaux et méthodes utilisés pour les essais impliquant des gradients thermiques et hydriques réalisés selon différents protocoles (P_{1bis}, P_2, P_3 et P_4). Les chapitres 9 et 10 seront dédiés à l'analyse expérimentale des résultats des différents protocoles par rapport aux essais de références (P_1). Le chapitre 9 se focalisera sur les résultats obtenus à partir des protocoles P_{1bis} et P_2, tandis que le chapitre 10 traitera des résultats des protocoles P_3 et P_4, avec une attention particulière portée à l'évaluation de l'influence du gradient hydrique sur les performances mécaniques du bois.

Enfin, la troisième partie de la thèse portera sur l'influence des gradients thermiques et hydriques sur le comportement mécanique du bois à l'échelle structurale, en particulier celle de poteaux. Le chapitre 11 exposera les matériaux et méthodes employés pour les essais à cette échelle, et le chapitre 12 présentera les résultats des essais de compression des poteaux en situation d'incendie, en intégrant les effets des gradients thermiques et hydriques.

Cette thèse contribuera à une meilleure compréhension du comportement du bois soumis à des conditions d'incendie, offrant ainsi des perspectives pour améliorer la conception et la sécurité des structures en bois lors de situations critiques telles que les incendies.

Partie 1

Étude Bibliographique

Cette partie constitue l'état de l'art de la thèse et explore la nature du matériau bois en fournissant des informations générales sur ses caractéristiques et son utilisation dans la construction. Elle aborde ensuite son comportement mécanique dans des conditions normales et en situation d'incendie, en caractérisant ses propriétés hygroscopiques, thermiques et mécaniques.

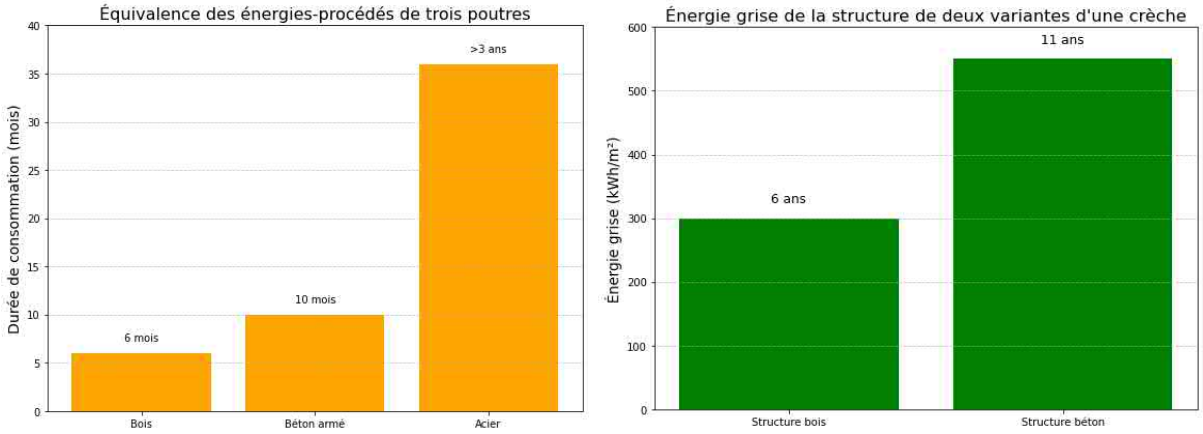
Chapitre 1

Généralités sur le bois

1.1. Le bois : matériau naturel

Le bois représente une ressource intéressante, tant pour sa durabilité que pour ses avantages écologiques. En tant que matériau naturel et renouvelable, il présente des bénéfices environnementaux considérables. Sa nature « bio-sourcée » lui confère une empreinte carbone négative, résultat de la photosynthèse qui permet la captation du CO_2, contribuant ainsi à atténuer l'effet de serre, tout en générant de l'oxygène (Trouy, Triboulot 2019). En effet, comparativement à d'autres matériaux de construction, le bois est considéré comme plus respectueux de l'environnement en termes d'énergie nécessaire à sa fabrication. La production d'une tonne de bois exige seulement 1 MJ (mégajoule), tandis que le béton, l'acier et l'aluminium nécessitent respectivement 4 MJ, 60 MJ et 130 MJ (Promobois 2012).

Par ailleurs, une équipe de l'Ecole Supérieure du Bois de Nantes (ESB) a évalué l'énergie nécessaire pour fabriquer trois poutres ayant la même capacité portante (bois lamellé-collé, béton et acier, voir Figure 1(a)). Selon leurs estimations, la production d'une poutre en acier nécessite l'équivalent de trois années de consommation énergétique d'un bâtiment de 50m^2. En comparaison, une poutre en béton requiert l'équivalent de dix mois, tandis qu'une poutre en bois n'utilise que l'équivalent de six mois, soit six fois moins que l'acier et 40% de moins que le béton armé (Leicher et al. 2014).



(a) (b)

Figure 1: (a) Equivalence des énergies-procédés de trois poutres (bois lamellé-collé, béton et acier) en durée de consommation théorique d'un bâtiment de 50m2 (Leicher et al. 2014). (b) Energie grise de la structure de deux variantes d'une crèche, en bois et en béton

À l'échelle d'une structure entière, le rapport entre l'énergie consommée pour construire en bois et en béton reste similaire. Dans la Figure 1(b), une comparaison de l'énergie non renouvelable est présentée entre deux variantes de la structure d'une crèche, en bois et en béton. La construction de l'ensemble de la structure en béton a utilisé, en termes d'énergie non renouvelable, ce que le bâtiment consommera en 11 ans. En revanche, la structure en bois n'a nécessité « que » l'équivalent de 6 années d'utilisation du bâtiment pour sa fabrication (Leicher et al. 2014).

Les exemples fournis soulignent, de manière évidente, les avantages et la pertinence d'encourager davantage l'emploi du bois dans le domaine de la construction, surtout en considérant les défis posés par le changement climatique. Cependant, l'utilisation du bois dans la construction s'avère complexe en raison de ses propriétés variables et de ses singularités plus ou moins prononcées (Plassat 2009).

1.2. Structure anatomique du bois

Avant de comprendre pourquoi le bois présente des propriétés plus variables et moins maitrisées que des matériaux comme le béton ou l'acier par exemple, il est essentiel de s'intéresser à la structure de l'arbre afin d'acquérir une meilleure compréhension de sa formation et des propriétés fondamentales du matériau bois.

Dans les arbres résineux ou feuillus, on peut distinguer trois principales parties en partant de l'extérieur vers l'intérieure. La première est l'écorce, qui se compose de deux éléments (Fig. 2). L'écorce externe, communément appelée « liège », agit comme une barrière protectrice contre les agressions extérieures tout en permettant à l'arbre de respirer. L'écorce interne, également connue sous le nom « liber », transporte la sève élaborée, contenant les sucres produit par la photosynthèse, de la feuille à la racine.

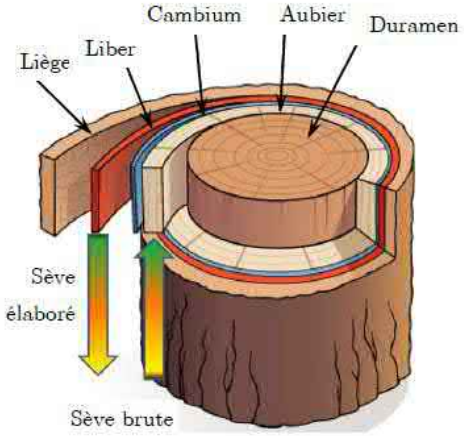


Figure 2: Coupe transversale d'un tronc d'arbre (THI, 2017)

La deuxième grande partie est le cambium, également appelé « assise génératrice ». Dans les régions tempérées, le cambium suit un cycle saisonnier, fonctionnant exclusivement pendant la période de végétation, du printemps jusqu'au début de l'automne. Chaque année, une nouvelle couche, appelée « cerne de croissance annuel », se forme, son épaisseur dépendant des conditions climatiques de l'année. Le cambium est composé de tissus végétaux dérivés de méristèmes, qui sont des cellules souches. Chez les résineux comme chez les feuillus, on distingue deux types de méristèmes : le méristème primaire, qui assure la croissance en longueur de l'arbre, et le méristème secondaire, qui favorise la croissance en diamètre. Ce dernier produit du liber vers l'extérieur et du bois vers l'intérieur, constituant ainsi la structure de l'arbre. Une différence notable entre les deux types de bois est que, chez les feuillus, le cambium produit des vaisseaux conducteurs, responsables du transport de l'eau et des nutriments, visibles sous forme de « grands » pores dans le bois, ainsi que des fibres qui assurent le soutien mécanique de l'arbre. Chez les résineux, les cellules principales sont les trachéides, de tailles plus petites qui assurent la condition de la sève et le soutien mécanique. Pour les résineux et les feuillus, on distingue 2 parties dans un cerne, le bois « initial » formé

au printemps et le bois « final » formé en été et au début de l'automne qui est plus dense car moins poreux et avec des parois plus épaisses. En fonction des conditions climatiques, la proportion entre les bois initial et final diffère. Ainsi, la dimension la dimension des pores (appelés lumens) et l'épaisseur des parois des cellules influencent les propriétés mécaniques du bois et ses usages, notamment en termes de densité et de porosité.

L'arbre est composé de deux parties distinctes en termes de structure ligneuse. La première, appelée « aubier » (Fig. 2), est un tissu conducteur transportant la sève brute, composée d'eau et de sels minéraux absorbés par les racines dans le sol et remontant jusqu'aux feuilles. En raison de sa fonction dans l'arbre, l'aubier, également connu sous le nom de « bois fonctionnel », fait partie des couches les plus récemment créées par le cambium. Les couches de bois plus anciennes constituent le duramen, ou bois parfait, qui se forme par un processus de duraminisation. Ce processus implique une modification progressive du bois fonctionnel, marquée par la mort des cellules et une accumulation de substances chimiques qui confèrent au bois une plus grande résistance et durabilité.

Plus précisément, à l'échelle microscopique, le bois des résineux présente une structure fondamentale commune à toutes les espèces. Les trachéides longitudinales, allongées donc préférentiellement selon l'axe principale de l'arbre (Fig. 3), qui représentent 90% du volume du bois résineux, jouent un rôle essentiel en tant qu'éléments conducteurs de la sève brute et de soutien mécanique. Ces trachéides sont dotées de ponctuations permettant la circulation de la sève brute entre elles (Lathuillière 2015). Leur forme allongée indique la direction des fibres du bois, formant des couches successives qui constituent la macrostructure. Ces trachéides sont donc responsables des propriétés mécaniques du matériau bois. Les 10% restants incluent des rayons ligneux, du parenchyme ligneux, et parfois des canaux résinifères, selon les espèces. Ces éléments contribuent à la circulation interne du bois et au stockage des réserves. Concernant les feuillus, les vaisseaux et fibres, qui sont majoritaires, présentent aussi une direction privilégiée selon l'axe principale de l'arbre.

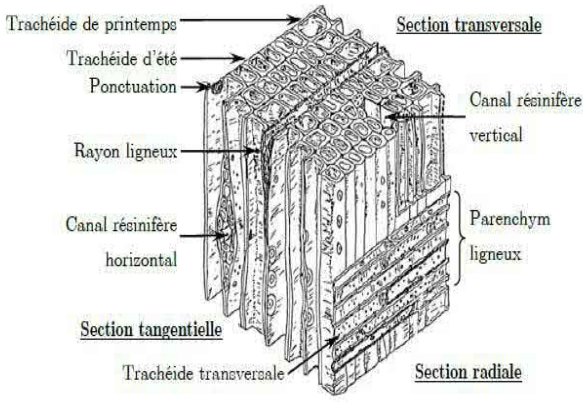


Figure 3 : Microstructure du bois résineux d'après (Lathuillière, 2015)

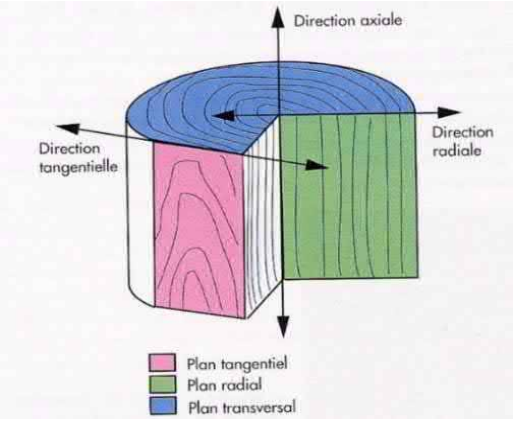


Figure 4 : Directions et plans principaux du bois (Mouras et al. 2007)

Ainsi, la manière dont le bois se forme naturellement nous permet d'anticiper ses propriétés mécaniques, qui seront particulièrement anisotropes en fonction de l'orientation par rapport aux fibres principales (à noter que, communément, les cellules « principales » orientées selon la direction axiale ou longitudinale, des résineux et des feuillus sont désignés par le terme « fibres »). Chaque point d'un tronc d'arbre révèle trois axes d'orientation principaux (Fig. 4). L'axe longitudinal revêt une importance primordiale, car les fibres sont principalement alignées

dans cette direction. La présence des rayons ligneux suggère la possibilité de dissocier les propriétés mécaniques selon les plans radial et tangentiel. Cependant, à l'échelle structurale, le mode de distribution des charges n'est pas entièrement contrôlé. Ainsi, on fait une distinction entre les propriétés mécaniques parallèles aux fibres et celles qui sont transversales.

1.3. Structure et compositions chimiques des parois cellulaires du bois

1.3.1. Structure des parois cellulaires

L'analyse de la structure fine des parois cellulaires est cruciale pour comprendre les caractéristiques physiques et mécaniques du bois. La majorité des cellules de bois est principalement composée de parois délimitant des espaces vides (lumens). Lors de la division des cellules de cambium, une couche intercellulaire contenant des composés pectiques sépare les nouvelles cellules, laquelle est fortement imprégnée de lignine lors de la lignification.

1.3.1.1. Parois primaire et secondaire

La paroi primaire, incluse dans la couche intercellulaire, est extensible pour permettre la différenciation cellulaire. Une fois cet allongement terminé, la paroi secondaire, rigide et composée de cellules de bois, se forme. Ces parois renferment des microfibrilles de cellulose entrelacée dans une matrice d'hémicellulose et de lignine, créant un réseau solide et complexe.

La paroi secondaire est divisée en plusieurs couches :

- Dans la couche S_1, les microfibrilles de cellulose adoptent une disposition en hélices, avec des orientations variables et alternées. L'angle formé par les microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule varie entre 60 et 80°.
- La couche S_2, la plus épaisse, joue un rôle prépondérant dans le comportement global de la paroi et contribue aux propriétés mécaniques du bois. Les microfibrilles y sont alignées parallèlement, formant un angle de 5 à 30°C par rapport à l'axe de la cellule, connu sous le nom d'angle des microfibrilles (AMF).
- La couche S_3, généralement considérée comme la troisième paroi, présente une structure similaire à la couche S_1 mais plus mince.

La Figure 5 présente une vue détaillée de l'organisation de la paroi cellulaire.

1.3.1.2. AMF ou Angle des microfibrilles

L'angle de microfibrilles (AMF) représente une caractéristique cruciale influençant le comportement physique et mécanique du bois. Une valeur élevée d'AMF est associée à une moindre rigidité du bois et à un retrait longitudinal plus prononcée. Cette tendance se manifeste particulièrement dans le bois juvénile (le bois des premières années de croissance). Ainsi, des planches ou poutres en bois constitués avec du bois juvénile (donc proche du cœur de l'arbre présentera des propriétés mécaniques différentes de celles débités loin du cœur.

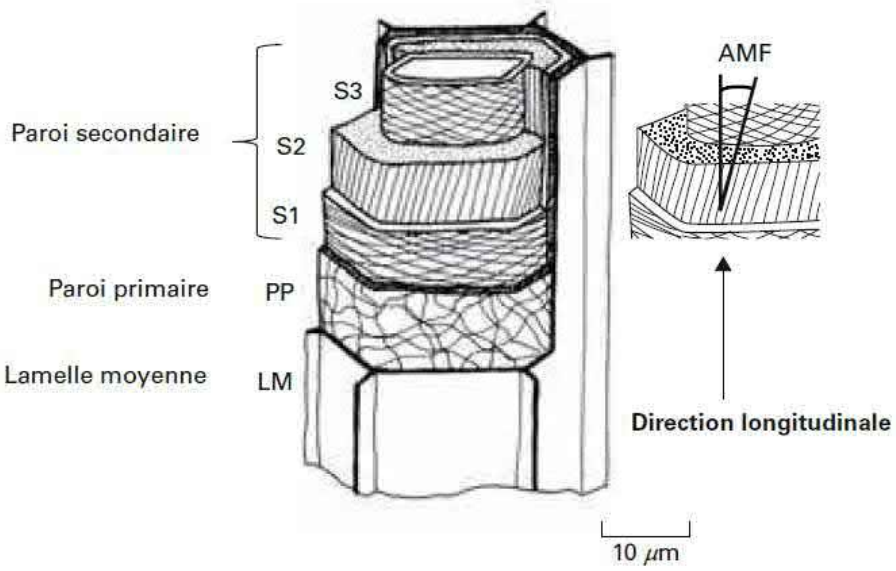


Figure 5 : Structure de la paroi d'une cellule de bois et mesure de l'AMF (Trouy, Triboulot 2019)

1.3.2. Constituants chimiques du bois

Le bois se compose principalement de trois éléments : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. En plus de cela, de petites quantités d'extractibles, des composés organiques à faible poids moléculaires situés principalement dans les parois cellulaires du bois de cœur (duramen), peuvent être présentes. Ces extractibles ont pour effet de réduire l'hygroscopicité et la perméabilité du bois (Siau 1995). La Figure 6 illustre ces proportions et distinctions entre le bois de résineux et le bois de feuillus, telles que décrites dans les recherches menées par Siau (1995) et les observations de Pettersen (1984).

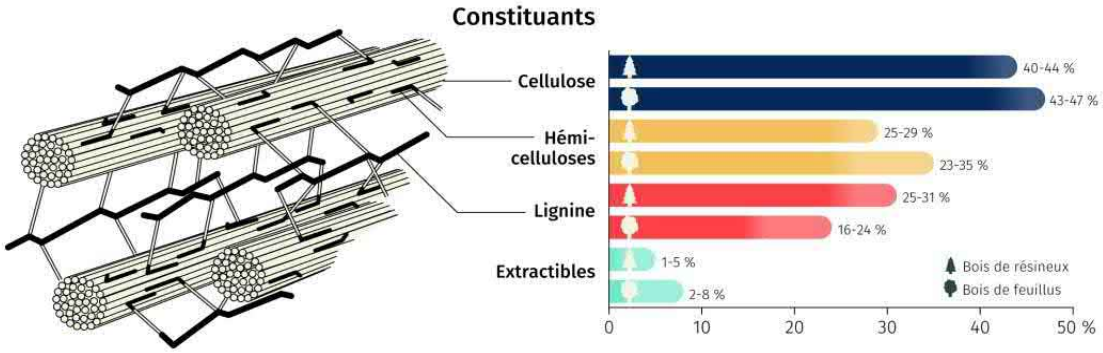


Figure 6: Proportions approximatives de la composition de la paroi cellulaire pour le bois de résineux et de feuillus (©Forêt.Nature, paru dans la revue trimestrielle d'avril-juin 2018)

1.3.2.1. La cellulose

Constituant principal des parois cellulaires, la cellulose représente environ 40 à 50% de la masse anhydre du bois. C'est un polymère linéaire de β-D-glucopyranose, formant des liaisons hydrogènes dans les zones amorphes, ce qui provoque le gonflement des parois cellulaires. Les liaisons internes de la cellulose confèrent au bois sa résistance à la traction axiale.

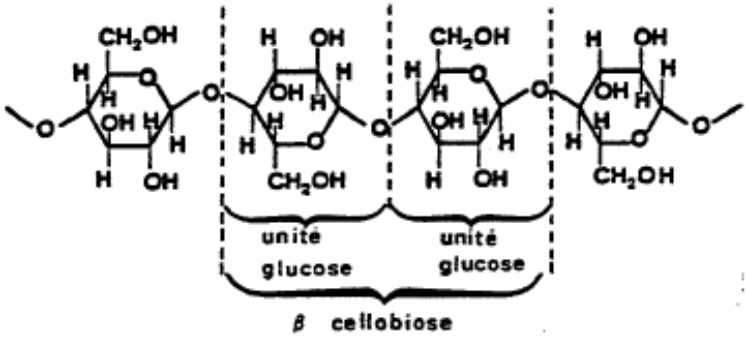


Figure 7: Motifs de la chaîne cellulosique d'après (Sjostrom, 1981)

1.3.2.2. Les hémicelluloses

Les polysaccharides hydrophiles, appelés hémicelluloses, ont des chaînes plus courtes et non linéaires comparées à la cellulose, ce qui provoque des variations dimensionnelles du bois en réaction à l'humidité. Les hémicelluloses diffèrent entre les résineux et les feuillus, étant dominées par le mannose dans les résineux et par la xylose dans les feuillus (Fengel et Wegener (1989)).

1.3.2.3. La lignine

Composant polyphénolique des parois cellulaires, la lignine a une structure amorphe et complexe. Chez les résineux, elle est principalement composée de lignine gaïacyl, tandis que chez les feuillus, c'est un copolymère gaïacyl-syringyl. La lignine forme des réseaux tridimensionnels variés selon les couches et les types de bois, influençant la rigidité et la résistance mécanique.

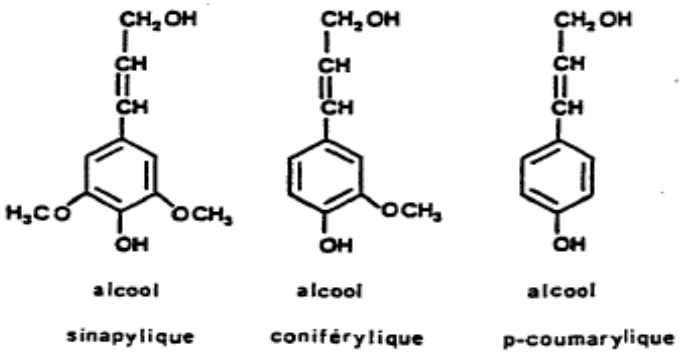


Figure 8: Motifs élémentaires de la lignine d'après (Sarkanen & Ludwig 1987)

1.3.2.4. Les extractibles

Les extractibles sont des composés organiques solubles présents principalement dans le bois de cœur, incluant polyphénols, terpènes, résines, sucres, tanins et acides gras. Ils influencent la couleur, l'odeur, la densité et réduisent la perméabilité et l'hygroscopicité du bois.

1.4. Les défauts du bois

Les défauts du bois, qu'ils soient d'origine naturelle ou qu'ils apparaissent lors des processus de transformation ou de mise en œuvre, ont des impacts significatifs sur ses propriétés

mécaniques et esthétiques. Les principaux défauts qui peuvent impacter les propriétés mécaniques du bois sont :

- Les nœuds sont des parties du tronc où les branches ont poussé, apparaissant comme des cercles ou des ovales de bois plus foncé sur les surfaces sciées. Esthétiquement, ils peuvent être perçus soit comme des imperfections, soit comme des éléments décoratifs, selon les préférences. Mécaniquement, les nœuds peuvent affaiblir la résistance du bois, surtout s'ils sont nombreux ou de grande taille, et peuvent entraîner des ruptures ou des fissures.

- Les fentes et gerçures sont des fissures longitudinales qui se produisent dans le bois. Elles peuvent se former lors du séchage du bois ou en raison de variations de température et d'humidité. Ces défauts réduisent la résistance mécanique du bois et peuvent affecter son apparence. Les fentes peuvent pénétrer profondément dans le bois, pouvant compromettre son intégrité structurale.

- La pente de fil se réfère à l'orientation des fibres du bois par rapport à son axe longitudinal. Une pente de fil excessive peut survenir lorsque les fibres ne sont pas parallèles aux faces ou aux bords de la pièce de bois. Cette condition peut affaiblir la résistance mécanique du bois et rendre plus difficile son usinage. Les pièces avec une pente de fil prononcée sont plus susceptibles de se fendre ou de se déformer sous contrainte.

En conclusion, le bois peut etre considéré, soit comme matériau, soit comme élément d'ingénierie. Cette différence se retrouve en anglais où il est fait la différence entre « Wood » et « Timber ». On propose les 2 définitions générales suivantes :

- Le bois matériau (ou bois clair) : le bois est considéré comme « parfait », fil droit et sans nœud (taille caractéristique, centimètre).
- Le bois élément d'ingénierie (ou bois de structure) : le bois est considéré comme ayant des « défauts » de construction ou de mise en œuvre (pente de fils, nœuds, …) (taille caractéristique, mètre). Les défauts peuvent donc influencer ses propriétés mécaniques. Le bois de structure sera ainsi défini selon les classes de résistances (Normes EN 14081-1) qui dépendent de la fréquence des défauts (mais aussi de la densité du bois).

1.5. Utilisation du bois dans la construction

1.5.1. Introduction

En France, le bois représente environ 10% des matériaux de construction, tandis qu'en Allemagne et en Autriche, il atteint 15%, et dans les pays scandinaves et en Amérique du Nord, il constitue 35% du total. Cela équivaut à 10 millions de mètre cubes de bois pour la France, dont 1 million provient de l'importation.

Le terme « bois de construction » ou « bois d'œuvre » englobe plusieurs utilisations :

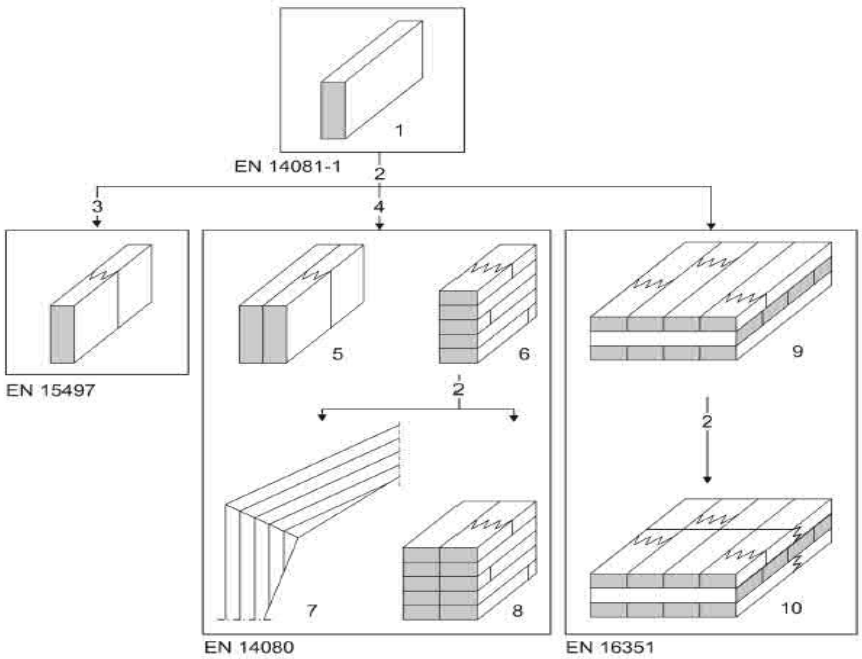
- Le bois utilisé pour construire des charpentes, des fermes et des supports de toiture.
- Le bois d'ossature des bâtiments industriels, d'habitation, de loisirs et scolaires.
- Le bois de structure pour les ouvrages d'art tels que les passerelles piétonnes et les ponts pour les cyclistes.

Ces volumes ne tiennent pas compte du bois utilisé pour l'ameublement ni pour le second œuvre (planchers, cloisons, escaliers, isolation, etc.). De plus, le bois n'est plus utilisé pour les fondations des ouvrages directement en contact avec le sol. Grâce à des recherches axées sur les bilans environnementaux et au développement de la filière, des bâtiments de plus grande hauteur commencent à émerger. Par exemple, le Stadthaus à Londres, construit en bois contrecollé-croisés (CLT), compte 29 appartements et s'élève jusqu'au R+8 (Techniker 2010).

Comme explicité précédemment, le bois présente des variabilités structurelles à différentes échelles qui peuvent impacter ses propriétés mécaniques. Ainsi depuis le début du 20ème siècle, de nombreuses innovations ont été réalisées pour améliorer la fiabilité des produits en bois et atténuer les variabilités intrinsèques du bois massif (BM). Ces produits sont conçus pour être plus uniformes et moins anisotropes, ce qui les rend plus fiables sur le plan mécanique. Ils utilisent divers types de colles, telles que les colles phénoliques, polyuréthanes, ou vinyliques, pour assembler différentes pièces de bois de tailles variées. L'aboutage de planches de bois permet aussi d'assurer des portées plus importantes pour les structures en bois. Ces produits peuvent être classés en deux grandes familles :

1. **Bois lamellé-collé (BLC) et Bois lamellé-croisé (CLT)** : Ces produits assemblent des éléments de type planche, avec des variantes spécifiées dans la Figure 9.
2. **Lamibois et OSB (Oriented Strand Board)** : La deuxième famille assemble des pièces de bois de plus petites dimensions, telles que les placages minces pour le Lamibois ou des lamelles orientées pour les OSB.

Nous détaillons ici seulement ce qui concerne le bois massif (BM) et le bois lamellé-collé (BLC) qui sont étudiées dans le cadre de la thèse.



Légende

1	planches	6	bois lamellé-collé (BLC)
2	est un composant pour	7	bois lamellé-collé avec aboutages à entures multiples de grandes dimensions
3	bois de structure avec aboutages à entures multiples	8	bois lamellé-collé en bloc
4	produits en bois lamellé-collé	9	bois lamellé croisé
5	bois massif reconstitué	10	bois lamellé croisé avec aboutages à entures multiples de grandes dimensions

Figure 9: Du bois massif aux BLC et CLT (d'après la Fig.1 de l'EN 16351)

1.5.2. Bois Massif : BM

Le Bois Massif (BM) provient du sciage de grumes ou de pièces de bois de plus grandes dimensions. Après le sciage, les pièces peuvent éventuellement être rabotées pour obtenir une finition plus lisse des faces. Les BM ont des dimensions typiques allant de 15 à 200mm en largeur, de 25 à 300mm en hauteur, et peuvent atteindre jusqu'à 7 mètres de longueur. En raison de ces dimensions, le bois massif est privilégié pour les pièces de petite et moyenne section ainsi que pour les éléments de structure d'une portée inférieure à 7 mètres. Les éléments tels que le liteau, le tasseau, le chevron, la volige et les éléments d'ossature bois sont fabriqués exclusivement à partir du bois massif.

1.5.3. Bois Lamellé-Collé : BLC

Les Bois Lamellé-Collé (BLC) constituent un matériau de construction élaboré à partir de lamelles de bois jointes et collées sur leur chant. Ces lamelles, généralement fabriquées à partir de résineux, peuvent également être produites à partir de feuillus. D'une épaisseur variant de 19 à 45 mm, ces lamelles sont liées entre elles et assemblées au moyen d'entures (aboutages), qui sont des surfaces de collage optimisées grâce à une disposition en dent de scie (voir Fig. 10). Les sections de BLC présentent des dimensions standard avec des hauteurs allant de 100 à 600 mm et des largeurs variant de 60 à 240 mm.

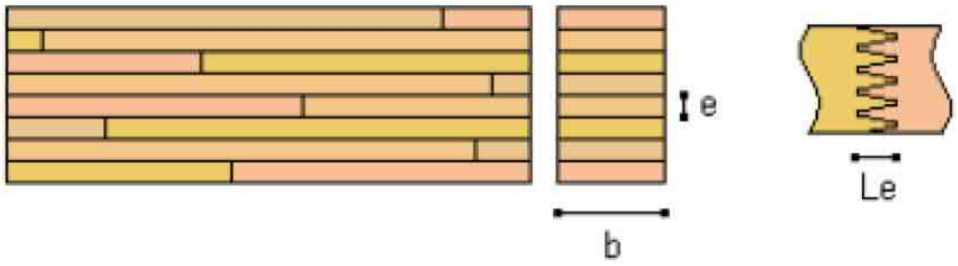


Figure 10: Schéma représentatif d'une poutre en bois lamellé-collé avec focus sur la jonction à enture de deux lamelles (Gagliardini 2021)

Les avantages essentiels du Bois Lamellé-Collé (BLC) par rapport au Bois Massif (BM) sont les suivants :

1. Grande portée : Le BLC offre une possibilité de réaliser des structures de grandes portées, allant jusqu'à 40 mètres.
2. Fiabilité accrue : Grâce à la petite taille des lamelles, le BLC élimine les parties de bois présentant des défauts, ce qui se traduit par un coefficient de sécurité partiel (Υ_M) pour le BLC de $\Upsilon_M = 1.25$ contre $\Upsilon_M = 1.3$ pour le BM (selon la norme NF EN 1995-1-1).
3. Meilleures caractéristiques mécaniques : Le BLC présente des propriétés mécaniques supérieures et plus homogènes que le bois massif, optimisant ainsi les performances structurales.
4. Flexibilité : Le BLC permet de créer des formes courbes en cintrant les lamelles avant le collage, ainsi que des poutres à inertie variable.

On distingue deux types de BLC :

- Bois Lamellé-Collé homogène : Toutes les lamelles sont de la même classe de résistance. Par exemple, un BLC homogène constitué de lamelles de classe de résistance C24 appartiendra à la classe de résistance GL24h (GL pour *Glued Laminated beam*, 24

représentant la contrainte caractéristique de flexion et h pour homogène). La classe de résistance C24 indique un bois résineux avec une résistance caractéristique à la flexion de 24 MPa.

- Bois Lamellé-Collé panaché : Dans ce cas, les lamelles des extrémités sont plus résistantes que celle du milieu, optimisant ainsi l'utilisation du bois. On parle alors de la classe de résistance GL24c, pour un BLC panaché composé de lamelles de résistance

Chapitre 2

Comportement hygroscopique du bois

2.1. Introduction

L'hygroscopie est l'une des caractéristiques essentielles du bois, mais elle complique son utilisation et sa caractérisation en raison des variations de son taux d'humidité. Lorsque le bois est encore sur pied, l'eau circule activement dans ses tissus pour soutenir ses fonctions biologiques. En tant que matériau de construction, le bois conserve une teneur en humidité qui s'ajuste constamment en fonction des conditions climatiques ambiantes, notamment la température et l'humidité relative de l'air.

L'eau interagit avec les chaînes polymériques présentes dans les parois cellulaires du bois, s'insérant entre elles et provoquant un gonflement du matériau. Cette interaction augmente la mobilité des chaînes polymériques en réduisant les forces de liaison entre elles, ce qui confère au bois une plus grande flexibilité et déformabilité.

Dans toute étude du bois, il est donc essentiel de tenir compte de son taux d'humidité et des phénomènes de transport d'humidité.

2.2. Les phases de l'eau dans le bois

Les relations entre l'eau et le bois sont d'une grande importance car elles entraînent des variations dimensionnelles, affectent les propriétés mécaniques et donnent lieu à des processus de dégradation du matériau bois, tels que les dégradations biologiques (attaques de champignons et d'insectes) et les dégradations physiques (fissuration et déformation). Ces interactions sont intrinsèquement liées à la structure et à la composition chimique du bois.

Dans le contexte du bois, l'eau peut se présenter sous trois états distincts : l'eau liée, l'eau liquide et l'eau vapeur.

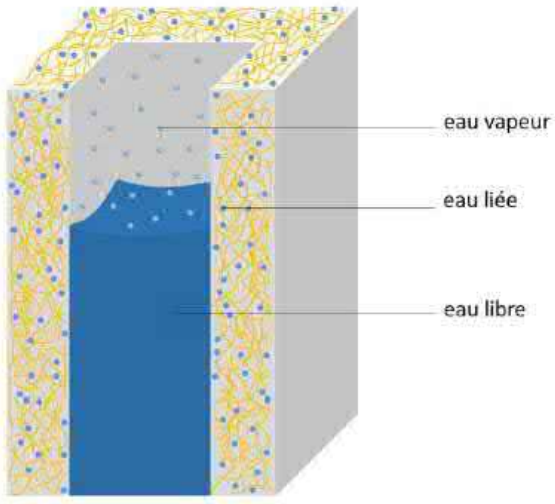


Figure 11: Illustration des différents états de l'eau dans le bois (Bonnet 2017)

2.2.1. Eau liée

La présence d'eau liée dans le bois se caractérise par l'absorption d'eau par les polymères constitutifs de la structure du bois. Cette eau est spécifiquement située au sein des parois cellulaires du bois et joue un rôle crucial dans les variations dimensionnelles du matériau en réaction aux fluctuations d'humidité, telles que le gonflement ou le retrait. Les principaux polymères du bois, notamment la cellulose et les hémicelluloses, comportent de multiples sites de sorption, en particulier des groupes hydroxyles (-OH). Ces groupes sont capables de former des liaisons hydrogènes avec des molécules polaires, dont l'eau. Les hémicelluloses présentent la plus forte affinité pour l'eau, suivies de la cellulose et de la lignine (Engelund et al. 2013). Malgré la présence abondante de groupes hydroxyles dans la cellulose, environ les deux tiers de ces sites sont déjà engagés dans des liaisons à l'intérieur et entre les chaînes de cellulose. Par ailleurs, l'interaction entre l'eau et les polymères du bois est influencée par d'autres composés présents, tels que les extraits naturels du bois et les minéraux, comme le montrent les travaux de recherches de Bossu et al. (2016).

2.2.2. Eau liquide

Lorsqu'elle est à l'état liquide, l'eau s'infiltre dans les canaux du bois, appelés lumens, et y circule par capillarité. Contrairement à la notion d'« eau libre », son état thermodynamique est inférieur à celui de l'eau pure dans un récipient suffisamment vaste pour négliger les interactions avec les parois (Skaar, 1988). Des recherches récentes au Laboratoire Navier ont montré que l'eau adsorbée dans les parois cellulaires du bois joue un rôle crucial en facilitant l'extraction de l'eau libre des lumens vers la surface, permettant ainsi son évaporation. Ces résultats permettent de mieux comprendre les mécanismes du séchage du bois et de développer des modèles physiques précis de ce processus (Penvern et al., 2020).

2.2.3. Eau vapeur

Même lorsque le bois est vert (c'est-à-dire dans un état juste après l'abattage de l'arbre), ses cavités cellulaires ne sont jamais entièrement saturées d'eau liquide. En l'absence d'eau liquide (présence seulement eau liée), les espaces « vides » à l'intérieur des lumens contiennent à la fois de l'air et de l'eau sous forme de vapeur.

2.3. Teneur en eau du bois

La mesure de la teneur en eau, notée MC (Moisture Content en anglais), indique la quantité d'eau présente dans un matériau, en particulier dans le bois. Elle est déterminée en comparant la masse d'eau dans le bois (exprimée m_{eau}) à la masse du bois complétement sec (anhydre), notée m_{sec} (conformément à la norme NF EN 16682, 2017). La masse d'eau dans le bois est obtenue en soustrayant la masse sèche (m_{sec}) de la masse totale du bois (m_{bois}).

Ainsi, la formule de la teneur en eau du bois est donnée par :

$$MC\ [\%] = \frac{m_{eau}}{m_{sec}}\ x\ 100 = \frac{m_{bois} - m_{sec}}{m_{sec}}\ x\ 100 \qquad (1)$$

La méthode de la « double pesée », qui consiste à peser le bois avant et après séchage pour déterminer son contenu en eau, est la seule méthode offrant une précision adéquate pour des applications techniques ou scientifiques. La majorité des appareils d'hygrométrie peuvent

évaluer la résistivité du bois avec une précision de 2% lorsque l'humidité se situe entre 7% et 30%. Cependant, en dehors de cette plage, la fiabilité des mesures diminue.

La détermination de la masse du bois séché peut être réalisée par divers procédés. Néanmoins, la méthode la plus couramment employée implique un séchage en étuve à une température de 103±2°C, poursuivi jusqu'à l'obtention d'une masse constante, conformément aux spécifications de la norme NF EN 13183-1 de 2002. Pour assurer une précision optimale, il est essentiel d'utiliser des échantillons de bois exempts de défauts. De plus, la taille des échantillons doit être adéquate afin de garantir que les mesures obtenues reflètent précisément les propriétés globales du matériau.

Lorsque l'eau libre est entièrement éliminée lors du séchage depuis l'état vert et que seule l'eau liée reste, on atteint le Point de Saturation des Fibres (PSF), plus précisément le point de saturation des parois cellulaires. Pour la plupart des types de bois, cette valeur est généralement comprise entre 25% et 30% (Paradis et al. 2015). En dessous du PSF, le comportement du bois est défini dans le domaine dit « hygroscopique » (HR compris entre 0% et 100%).

Pendant les différentes étapes de transformation du bois, depuis son état initial en bois vert (fraîchement coupé) jusqu'à son utilisation finale dans la construction, la teneur en eau varie comme illustré dans la Figure 12. Cette variation dépend non seulement des espèces, mais également de la densité du bois, que ce soit pour l'aubier ou le duramen. De plus, la teneur en eau du bois tend à s'équilibrer avec les conditions extérieures, notamment la température et l'humidité relative de l'air, en fonction des cycles de séchage ou d'exposition environnementale.

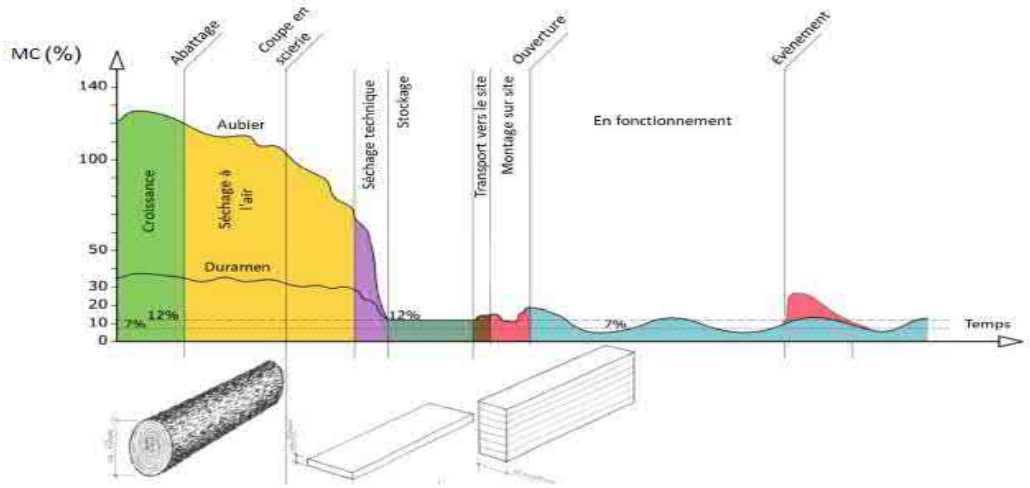


Figure 12: Évolution de la teneur en eau du bois lors des différentes étapes de transformation (Gamper et al 2014)

2.4. Equilibre hygroscopique

La courbe d'isotherme de sorption caractérise les états d'équilibre successifs d'un matériau en interaction avec son environnement, dans des conditions de température constante. Lors du processus d'humidification, allant de 0% à 100% d'humidité relative (HR), l'enveloppe d'adsorption est définie. En revanche, pour le processus de séchage, l'enveloppe de désorption s'étend de 100% à 0%.

La Figure 13-a met en évidence que l'équilibre hygroscopique en adsorption est inférieur à celui en désorption. Ce phénomène s'explique par la différence d'énergie requise pour la liaison des

molécules d'eau à la matrice solide, impliquant des liaisons hydrogènes ou des forces de Van Der Waals (Siau 1995). Cette différence d'énergie se manifeste non seulement entre les deux phases d'adsorption et de désorption, mais également entre deux essences différentes.

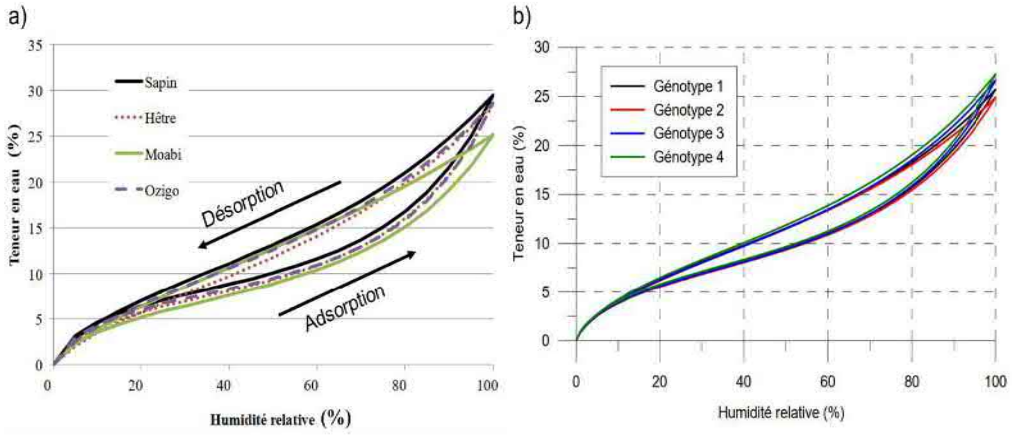


Figure 13: a) a) Comparaison des Isothermes de Sorption selon les essences (Manfoumbi Boussougou 2012)
b) Isothermes de Sorption de quatre génotypes de Douglas-fir (Jamaaoui 2017)

Actuellement, l'Eurocode 5 propose un abaque permettant d'évaluer l'équilibre hygroscopique (NF EN 1995-1-1/NA 2010) en fonction de la température et l'humidité relative (Fig. 14-a). Cet abaque, initialement élaboré par Keylwerth en 1964 pour résoudre des problématiques liées au séchage (phase de désorption) de diverses essences de résineux, a depuis fait l'objet de nouvelles études. Ces recherches, menées par Varnier en 2019, ont permis d'établir des liens entre l'équilibre hygroscopique, les cinétiques hydriques et la température. Les conclusions de ces études offrent la possibilité de classer les données en fonction des familles de résineux et de feuillus, tout en considérant la forme des hystérésis de sorption et le chemin de sorption (Fig. 14-b). À titre d'illustration, pour le bois résineux Douglas-fir (Fig. 13-b) : à une température de 20°C et une humidité relative de 65%, l'humidité d'équilibre varie entre 11,2% (enveloppe d'adsorption) et 14,5% (enveloppe de désorption) en prenant en compte les variations dues aux cycles d'absorption et de désorption. À titre de comparaison, l'humidité d'équilibre estimée par l'Eurocode 5 est de 12,5% (Fig. 14-a).

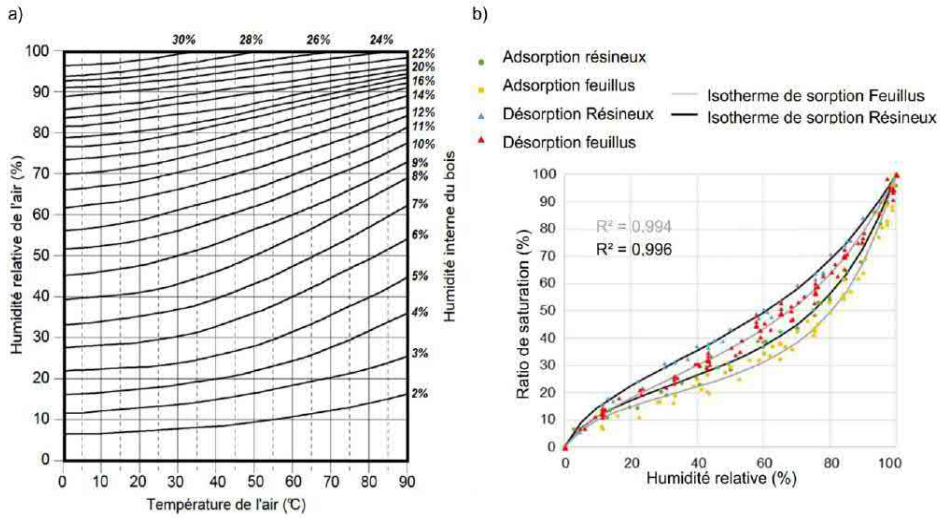


Figure 14: a) Abaque d'équilibre hygroscopique des bois en fonction de la température et de l'humidité relative (NF EN 1995-1-1/NA 2010)
b) Caractérisation des isothermes de sorption pour les feuillus et les résineux (Varnier 2019)

La caractérisation d'une pièce de bois dépend de sa teneur en eau, avec les distinctions suivantes (Glass et Zelinka 2010) :

1. Bois anhydre : Lorsque MC = 0%, le bois est considéré comme anhydre.
2. Bois desséché : Pour des valeurs de MC comprises entre 0% et 13%, on parle de bois desséché, obtenu uniquement par séchage artificiel.
3. Bois sec à l'air : Le bois est qualifié de sec à l'air lorsque MC se situe entre 13% et 17%.
4. Bois commercialement sec : Dans la plage MC = 17% à MC = 23%, on parle de bois commercialement sec.
5. Bois mi-sec : Lorsque MC varie entre 23% et 30%, on parle de bois mi-sec.
6. Point de saturation : Au-delà de MC = 30%, le bois atteint son point de saturation, ce qui signifie que l'eau commence à remplir les pores du bois et n'est plus simplement contenue dans ses fibres.
7. Humidité du bois vert : Avant abattage, l'humidité du bois vert peut atteindre MC = 85% pour les feuillus et jusqu'à 140% pour les résineux.

Il est important de noter que l'humidité peut varier au sein d'une pièce de bois, notamment entre la surface et le cœur, ainsi qu'entre les parties plus ou moins exposées aux variations d'humidité. Les éléments d'une structure en bois subissent des variations continues d'humidité en fonction des saisons. Par exemple, dans un hangar agricole ouvert sur l'extérieur, le taux d'humidité d'équilibre peut varier de MC = 6% en été (température de l'air de 25°C, humidité relative de l'air de 30%) à MC = 23% en hiver (température de l'air de 6°C, humidité relative de l'air de 90%), selon l'abaque de la Figure 14-a.

2.5. Variations dimensionnelles

Le retrait et le gonflement du bois sont des phénomènes liés aux variations de son taux d'humidité. Lorsque le bois perd de l'eau (passant en dessous de 30% d'humidité depuis l'état vert), il se rétracte et se déforme. Inversement, lorsqu'il absorbe de l'eau, il gonfle. Cette rétractibilité et ce gonflement du bois varient selon la direction considérée, le bois étant un matériau fortement anisotrope. Les caractéristiques varient selon les trois directions suivantes : la direction longitudinale (le long des fibres), la direction tangentielle (tangente aux cernes d'accroissement) et la direction radiale (perpendiculaire à la direction tangentielle).

Dans le domaine hygroscopique, les déformations dites hydriques, induites par l'adsorption ou la désorption de l'eau liée sont réversibles si elles sont exprimées en fonction de la teneur en eau (MC). Les déformations hydriques, mesurées communément sur du bois clair, présente des caractéristiques communes à toutes les espèces, selon :

- Une anisotropie entre la direction longitudinale et les directions transversales. Les déformations longitudinales sont très inférieures aux déformations radiales et tangentielles.
- Une anisotropie dans le plan transverse. Les déformations tangentielles sont environ deux fois plus élevées que les déformations radiales.

Typiquement, entre le PSF et l'état anhydre (et inversement), les déformations longitudinales sont de l'ordre de 0,1-0,3%, les déformations radiales de l'ordre de 3-6% et les déformations tangentielles de l'ordre de 6-12%. Ces variations dimensionnelles anisotropiques peuvent entraîner des déformations, notamment le tuilage des planches en bois massif (BM).

Expérimentalement, bien que les déformations de retrait ne soient pas strictement proportionnelles à la teneur en eau (MC), on admet que les déformations sont proportionnelles à MC sur toute la plage d'humidité relative (entre 0% et 100%). Ainsi, on définit les coefficients de retrait pour chaque direction privilégiée du bois : le retrait longitudinal (α_a), le retrait radial (α_r) et le retrait tangentiel (α_t). Ces coefficients sont généralement mesurés sur du bois clair. Entre un état de référence (noté Ref), qui correspond à l'état saturé en eau liée (noté *S* pour le retrait), ou à l'état anhydre (noté *A*, pour le gonflement) et un point du domaine hygroscopique (*MC < PSF)*, la déformation de retrait ou de gonflement peut être formulée selon l'équation (2) (Badel, 1999) :

$$\varepsilon_x(MC) = \pm \frac{l_{MC} - l_{Ref}}{l_{Ref}} \tag{2}$$

Où :

- $\varepsilon_x(MC)$ représente la déformation de retrait ou de gonflement le long de la direction x entre l'état de référence Ref et le taux d'humidité *MC*.
- l_{Ref} est la longueur de retrait ou de gonflement dans la direction x à l'état de référence.
- l_{MC} est la longueur de retrait ou de gonflement dans la direction x au taux d'humidité *MC*.

En supposant que le phénomène soit linéaire dans tout le domaine hygroscopique, le coefficient de retrait α_x dans la direction x peut être exprimé conformément à l'équation (3) :

$$\alpha_x(MC) = \left|\frac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta_{MC}}\right| \tag{3}$$

La rétractabilité volumétrique du bois est définie comme la somme des coefficients de retrait radial, tangentiel et longitudinal :

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_t + \alpha_a \tag{4}$$

La nervosité d'un bois est caractérisée en fonction de sa rétractabilité volumétrique, avec les classifications suivantes :

- Si $\alpha < 0{,}35$, le bois est considéré comme peu nerveux.
- Si $0{,}35 < \alpha < 0{,}55$, le bois est qualifié de nerveux.
- Si $\alpha > 0{,}55$, le bois est catégorisé comme très nerveux.

Le Tableau 1 donne quelques exemples de valeurs de coefficient de rétractibilité (%) dans les directions R et T, et fournit des informations sur la nervosité de différentes essences. Il est important de noter que plus le bois est nerveux, plus il réagit aux variations d'humidité, augmentant ainsi le risque de développer des désordres tels que des fentes. Les déformations résultant du retrait sont significatives dans les directions perpendiculaires aux fibres, c'est-à-dire dans le plan des sections de poutre ou de poteau.

Espèce	α_r	α_t	Nervosité
Peuplier	0.15	0.28	Nerveux
Red Cedar	0.08	0.22	Peu Nerveux
Sapin	0.14	0.31	Nerveux
Epicéa	0.17	0.32	Nerveux
Douglas	0.17	0.28	Nerveux
Pins	0.17	0.30	Nerveux
Hêtre	0.21	0.41	Très Nerveux
Mélèze	0.16	0.30	Nerveux
Chêne	0.20	0.32	Nerveux
Azobé	0.31	0.40	Très Nerveux
Ebène	0.27	0.30	Très Nerveux

Tableau 1: Coefficient de rétractibilité et nervosités correspondantes pour différentes essences de bois (Gagliardini 2021)

Chapitre 3

Propriétés mécaniques du bois

3.1. Introduction

Les propriétés mécaniques du bois présentent une forte anisotropie : elles sont significativement plus élevées dans le sens des fibres que dans les deux autres directions. De plus, dans les directions R (radiale) et T (tangentielle), les propriétés sont plus importantes dans le sens R que dans le sens T. En termes de comportement mécanique, le bois de structure se distingue par une excellente résistance à la flexion dans la direction longitudinale (axiale), qui constitue sa propriété mécanique prédominante, suivie de la compression et enfin la traction.

3.2.Paramètres influençant les propriétés mécaniques du bois

La résistance d'une pièce de bois est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

1. **Mode de sollicitation et orientation des fibres** : Le type de sollicitation (traction, compression, flexion simple, flexion composée, torsion, flexion déviée) ainsi que l'orientation par rapport aux fibres (anisotropie) jouent un rôle essentiel.
2. **Nature et qualité du bois** : La variété d'essence et la qualité du bois sont des éléments déterminants. La qualité du bois dépend des défauts tels que les nœuds, les fissures, les déformations et les variations de densité.
3. **Degré d'humidité** : L'humidité du bois a un impact significatif sur les propriétés mécaniques.
4. **Durée de chargement (fluage)** : La durée pendant laquelle une charge est appliquée influe également sur la résistance du bois.

La relation entre les propriétés mécaniques du bois et sa densité, mesurée à un taux d'humidité de 12%, est généralement bien établie. Comme le montre la Fig. 15, une densité plus élevée est généralement associée à de meilleures propriétés mécaniques, tel que le module d'élasticité longitudinal.

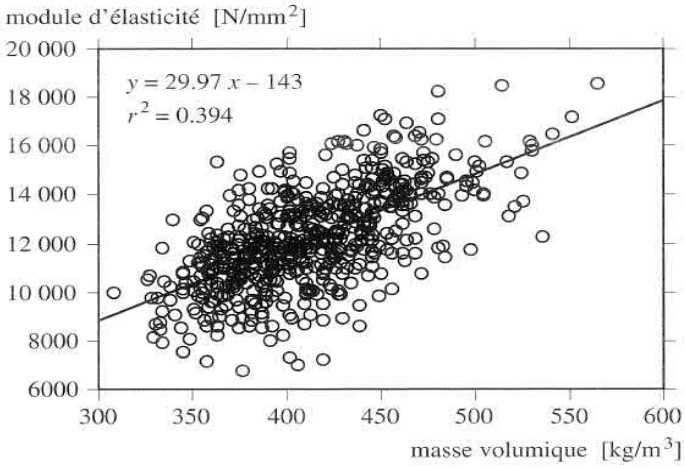


Figure 15: Corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa (Natterer et al., 1987)

Cependant, il est important de noter que la teneur en eau peut avoir un impact significatif sur la résistance en compression du bois, comme le montre la Fig. 16-a. Bien qu'il existe une

variabilité dans la résistance à la traction pour le même taux d'humidité, la résistance ne semble pas être corrélée à la teneur en eau du bois (Fig. 16-b).

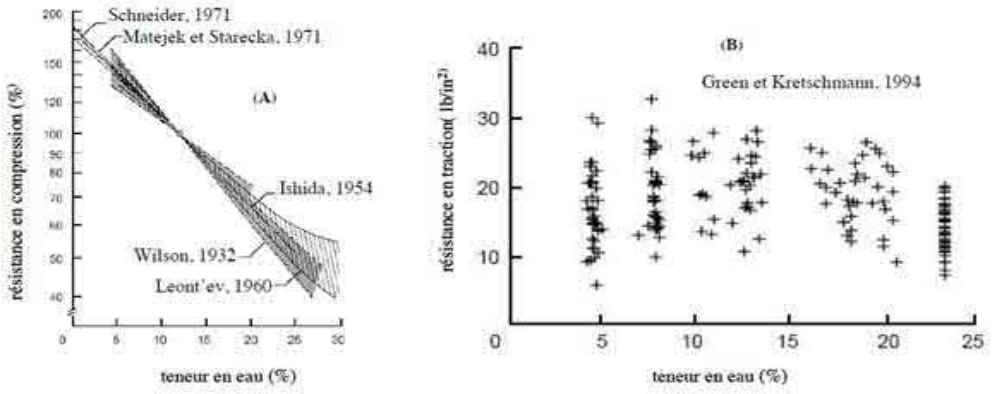


Figure 16: a) Résistance en compression en fonction de la teneur en eau du bois ; b) Résistance en traction en fonction de la teneur en du bois (Green et kretschmann, 1994)

Le module d'élasticité axial E varie en fonction du taux d'humidité (Fig. 17). Il augmente légèrement lorsque l'humidité passe de 0% à quelques pourcents, puis diminue de manière significative jusqu'à ce qu'elle atteigne le point de saturation des fibres PSF à $MC = 30\%$. Comme nous l'explorerons dans le paragraphe 3.3, les méthodes de dimensionnement en Europe (Eurocode) tiennent compte de l'influence de l'humidité et du fluage à travers les coefficients k_{mod} et k_{def}.

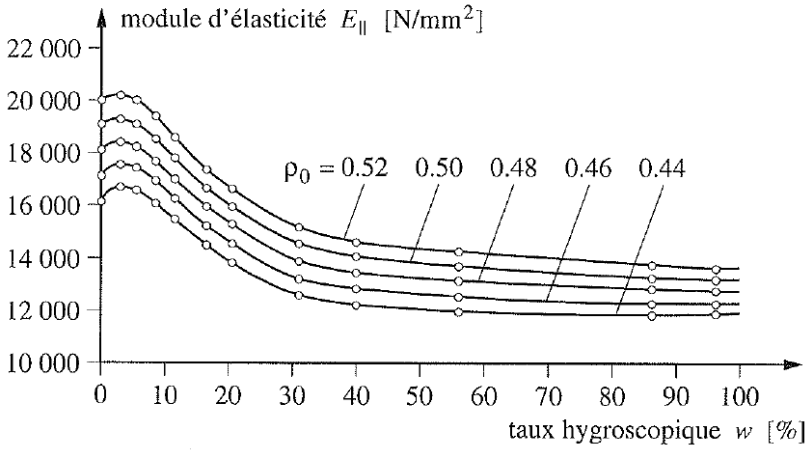


Figure 17: Variation du module d'élasticité axial en fonction du taux d'humidité pour des bois de différentes densités (ρ_0) (Kollmann et Côté, 1984)

Guitard (1987) a établi des formules de correction des modules d'élasticité pour un bois clair présentant une répartition uniforme de l'humidité. Ces formules sont applicables sur une plage d'humidité du bois MC allant de 6 à 20%. Les valeurs de correction sont définies à partir des données supposées connues à 12% d'humidité, et sont formulées comme suit :

$$E_L^{MC} = E_L^{12} \text{ x } [1 - 0{,}015 \text{ x } (\text{MC} - 12)] \quad (5)$$

$$E_{R,T}^{MC} = E_{R,T}^{12} \text{ x } [1 - 0{,}030 \text{ x } (\text{MC} - 12)] \quad (6)$$

$$G_v^{MC} = G_v^{12} \text{ x } [1 - 0{,}030 \text{ x } (\text{MC} - 12)] \quad (7)$$

Avec E et G les modules d'élasticité et de cisaillement longitudinaux (L) et transversaux (R ou T), MC la teneur en eau du bois et *v* le plan LR, TL ou RT.

3.3. Résistance du bois selon l'Eurocode 5

La résistance du bois et de ses dérivés est intrinsèquement liée à plusieurs facteurs, notamment la teneur en humidité, la durée de charge et la variabilité des propriétés mécaniques. Ces éléments sont pris en considération par les coefficients de modifications des résistances k_{mod} pour les États Limites Ultimes (ELU) et de déformation k_{def} pour les États Limites de Service (ELS). Les États Limites Ultimes (ELU) concernent la sécurité structurale et sont définis par des conditions au-delà desquelles la structure ne satisfait plus aux exigences de résistance. Les États Limites de Service (ELS) concernent la fonctionnalité et le confort d'utilisation de la structure, en tenant compte des déformations et vibrations acceptables. Ces coefficients sont déterminés en fonction de la classe de service et de la classe de durée (uniquement k_{mod}), définies ci-dessous.

3.3.1. Classe de service

L'Eurocode 5 établit trois classes de service pour les éléments en bois, en fonction de leur environnement d'utilisation :

- Classe de service 1 : Elle s'applique aux éléments situés à l'intérieur de bâtiments protégés. Dans ce cas, la température ambiante est d'environ 20°C, et l'humidité relative de l'air ne dépasse 65% que quelques semaines par an. Ces conditions correspondent à des pièces de bois dont l'humidité se situe entre 7% et 13%.
- Classe de service 2 : Elle concerne les éléments exposés à l'extérieur, mais sans être directement soumis aux intempéries. La température ambiante est d'environ 20°C et l'humidité de l'air ne dépasse 85% que quelques semaines par an. Dans ce cas, les pièces de bois ont une humidité comprise entre 13% et 20%
- Classe de service 3 : Cette classe s'applique aux éléments extérieurs exposés aux conditions climatiques, entraînant des niveaux d'humidité plus élevés que ceux de la classe 2, souvent au-delà de 20%.

L'abaque d'équilibre hygroscopique des bois en fonction de la température et de l'humidité relative (Fig. 14-a) fourni par l'annexe nationale, peut être utilisé pour déterminer la classe de service appropriée.

3.3.2. Classe de durée

Les classes de durée de chargement définies dans les paragraphes 2.1 de la norme NF EN 1995-1-1 sont utilisées pour spécifier la durée d'application des charges qui agissent sur une structure en bois. Effectivement, selon la NF EN 1995-1-1 section 2.3.1.1, la durée de chargement et l'humidité ont un impact sur les propriétés de résistances et de rigidité des éléments en bois. Par conséquent, ces facteurs doivent être considérés lors du calcul concernant la résistance mécanique et l'aptitude au service. Les cinq classes de durée de chargement sont définies dans le Tableau 2.

3.3.3. Facteur de modification des résistances k_{mod}

Le facteur de modification des résistances est utilisé pour ajuster la résistance caractéristique (correspondant à la capacité théorique d'un matériau à supporter des charges déterminées dans

des conditions idéales) d'un matériau en tenant compte de divers facteurs qui peuvent influencer sa performance dans des conditions réelles d'utilisation. Plus précisément, dans le cas de la résistance du bois (au sein d'une même classe de résistance), deux paramètres sont déterminants :

- La durée d'application des chargements : Un bois sec qui supporte une charge de courte durée sera plus résistant qu'un bois humide qui supporte une charge sur une longue durée, notamment à cause du fluage.
- L'humidité moyenne du bois lorsqu'il est mis en œuvre : Cette caractéristique joue également un rôle crucial dans la résistance du bois.

Ces deux paramètres permettent de définir le facteur modificatif k_{mod}. Lorsqu'une combinaison de charges inclut à la fois des charges de structure et des charges d'exploitation, le choix du facteur k_{mod} se fait en fonction de la charge la plus courte (charges d'exploitation). Le Tableau 2 indique les valeurs du facteur k_{mod} en fonction de la durée de la charge et de la classe de service pour différents types de matériaux.

Durée de chargement		**Classe de service**		
Classe de durée	Exemple	1 Hbois < 13 % (local chauffé)	2 13 % < Hbois < 20 % (sous abri)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
Permanente (> 10 ans)	Charge de structure	0,6	0,6	0,5
Long terme (6 mois à 10 ans)	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme (1 semaine à 6 mois)	Charges d'exploitation Neige Altitude > 1 000 m	0,8	0,8	0,65
Court terme (< 1 semaine)	Neige Altitude < 1 000 m	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Vent, neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9

Tableau 2 : Valeurs du facteur k_{mod} en fonction de la classe de service et de la classe de durée du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué (Yves Benoit et al., 2008)

3.3.4. Facteur de modification des déformations k_{def}

Le facteur de modification des déformations, noté k_{def}, est un paramètre essentiel dans l'étude des déformations de fluage. Il permet de considérer la sensibilité de ces déformations à l'humidité environnementale à laquelle l'élément sera exposé. Plus l'humidité est élevée, plus les déformations de fluage seront importantes (ce qui se traduit par une valeur élevée de k_{def}). Le Tableau 3 fournit les valeurs spécifiques de k_{def} en fonction de la classe de service pour différents types de bois.

Le facteur de modification des déformations k_{def} est employé dans les cas suivants :

1. Pour le calcul des déformations finales (ELS) $w_{fin,Q}$ en fonction de la flèche instantanée $w_{inst,Q}$, selon l'équation (8) :

$$w_{fin,Q} = w_{inst,Q}\ x\ (1 + \psi_2\ x\ k_{def}) \quad (8)$$

2. Pour ajuster les modules de déformations finaux (ELS et ELU), comme exprimé par :

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{1 + \psi_2 \, x \, k_{def}} \tag{9}$$

Dans ces expressions, ψ_2 représente le coefficient pour la valeur quasi-permanente de l'action ($\psi_2 = 1$ pour une action permanente ; pour les actions variables, se référer au Tableau 4).

Matériau / classe de durée de charge		Classe de service		
		1 Hbois < 13 % (local chauffé)	2 13 % < Hbois < 20 % (sous abris)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
Bois massif (1)	NF EN 14081-1 de mai 2006	0,60	0,80	2,00
Lamellé-collé	NF EN 14080 de décembre 2005	0,60	0,80	2,00
Lamibois (LVL)	NF EN 14374 de mars 2005	0,60	0,80	2,00
Contreplaqué	NF EN 636 de décembre 2003			
	Milieu sec	0,80	Sans objet	Sans objet
	Milieu humide	0,80	1,00	Sans objet
	Milieu extérieur	0,80	1,00	2,50
OSB	NF EN 300 d'octobre 2006			
	OSB/2	2,25	Sans objet	Sans objet
	OSB /3 /4	1,50	2,25	Sans objet
Panneau de particules	EN 312 de février 2004			
	Milieu sec (P4)	2,25	Sans objet	Sans objet
	Milieu humide (P5)	2,25	3,00	Sans objet
	Sous contrainte élevée, milieu sec (P6)	1,50	Sans objet	Sans objet
	Sous contrainte élevée, milieu humide (P7)	1,50	2,25	Sans objet

(1) – Pour les bois massifs placés à une humidité supérieure à 20 % et susceptibles de sécher sous charge (classe de service 2), k_{def} est augmenté de 1,00.

Tableau 3: Valeurs du facteur k_{def} en fonction de la classe de service (Yves Benoit et al., 2008)

Action	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charges d'exploitation des bâtiments			
- Catégorie A	0.7	0.5	0.3
- Catégorie B	0.7	0.5	0.3
- Catégorie C	0.7	0.7	0.6
- Catégorie D	0.7	0.7	0.6
- Catégorie E	1.0	0.9	0.8
Charges dues à la circulation dans les bâtiments			
- Catégorie F	0.7	0.7	0.6
- Catégorie G	0.7	0.5	0.3
- Catégorie H	0.0	0.0	0.0
Charges dues à la neige			
- si $h < 1000m$	0.5	0.2	0.0
- si $h > 1000m$ (et St-Pierre et Miquelon)	0.7	0.5	0.2
Charges dues au vent	0.6	0.2	0.0

Tableau 4: Valeurs des coefficients ψ pour les bâtiments (Tableau A1.1 de la norme NF EN 1990)

3.4. Comportement mécanique du bois sous sollicitations uniaxiales

Le comportement mécanique du bois lorsqu'il est soumis à des forces de traction uniaxiale dans la direction longitudinale, donc dans le sens des fibres, se caractérise par une nature élastique-fragile, comme le montre la Fig. 18. Lors de ce type d'essai, nous pouvons déterminer à la fois le module d'élasticité axial et la contrainte de rupture en traction.

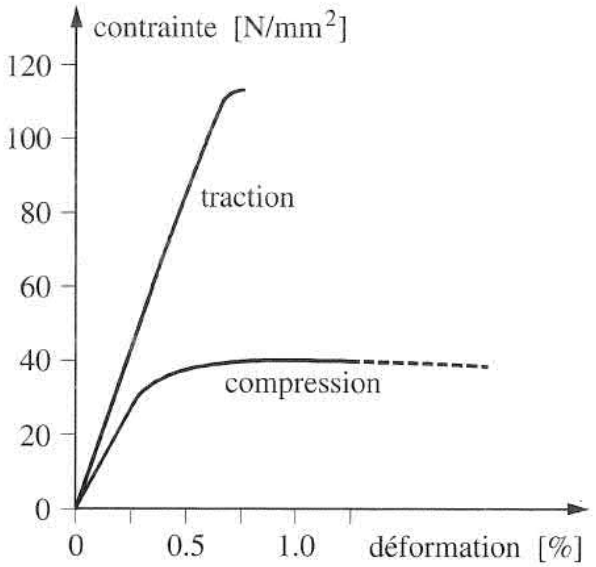


Figure 18: Courbes de contrainte-déformation pour le bois sans défauts sollicité uniaxialement le long des fibres (Natterer et al., 2004)

En revanche, lorsqu'il s'agit de compression uniaxiale, la réponse du bois est moins linéaire que celle observée en traction. Cela est principalement dû au flambement des fibres du bois, comme le montre la Fig. 18. Par conséquent, expérimentalement, la résistance en compression est généralement inférieure à celle en traction pour un échantillon de bois sans défaut.

Cependant, pour le bois de structure, l'hétérogénéité des résistances en traction est plus prononcée que celle en compression, notamment en raison de l'influence significative des nœuds sur la résistance en traction. En conséquence, les valeurs caractéristiques réglementaires de résistance en traction sont plus faibles que celles en compression (Tableau 6), sauf dans le cas des bois de très haute résistance (c.à.d. avec très peu de défauts).

Il est important de noter que le module d'élasticité axial en traction est généralement supérieur à celui en compression. Bodig et Jayne (1982), dans leur ouvrage "Mechanics of Wood and Wood Composites", attribuent cette différence à la structure cellulaire du bois, qui réagit de manière distincte sous des contraintes de traction et de compression. Toutefois, la norme NF EN 1995-1-1 (Eurocode 5) adopte une valeur unique pour le module d'élasticité axiale afin de simplifier les calculs de dimensionnement.

Les modes de rupture du bois peuvent être analysés en étudiant les courbes contraintes-déformations présentées dans la Fig. 18.

- **En traction** : La courbe de traction montre un comportement élastique suivi d'une rupture brusque, caractéristique d'un matériau fragile. Cette rupture se produit lorsque les contraintes maximales atteignent le seuil de rupture en traction. La courbe

ascendante indique que le bois se déforme de manière linéaire jusqu'à atteindre un point critique où la rupture se produit soudainement. Ce mode de rupture est souvent influencé par la présence de nœuds ou de fissures qui concentrent les contraintes et initient la rupture.

- **En compression** : La courbe de compression est moins linéaire que celle de traction et montre un plateau indiquant une déformation plastique avant la rupture. La déformation commence de manière élastique, mais à mesure que les contraintes augmentent, les fibres de bois commencent à flamber, ce qui entraîne une déformation plastique. La rupture en compression est moins soudaine et plus progressive que la rupture en traction, souvent marquée par l'écrasement ou le flambement des fibres.

Ces différences dans les modes de rupture sont cruciales pour le dimensionnement des structures en bois, car elles déterminent la réponse du matériau sous diverses sollicitations. En traction, le bois peut supporter des contraintes plus élevées, mais se rompra de manière abrupte. En revanche, en compression, le bois présente une déformation plus importante avant la rupture, offrant ainsi une certaine marge d'absorption des charges avant la défaillance structurale.

3.5. Anisotropie des propriétés mécaniques

La nature anisotrope du bois se manifeste par ses propriétés mécaniques qui diffèrent selon l'orientation des fibres par rapport à la direction de sollicitation. Par exemple, les contraintes mécaniques sont maximales lorsque la direction de sollicitation est parallèle aux fibres et minimales lorsqu'elle est perpendiculaire à celles-ci (Fig. 19).

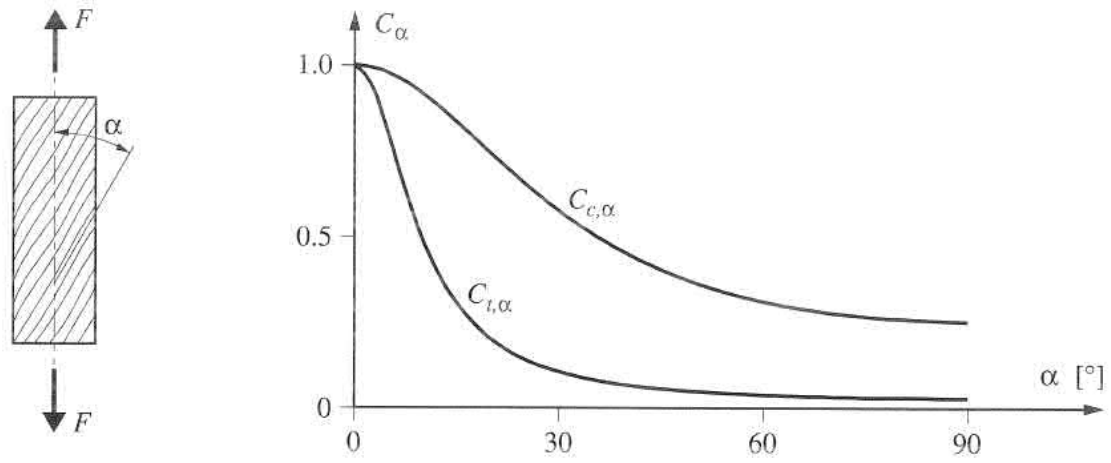


Figure 19: Variation de la résistance en traction ($C_{t,\alpha}$) et en compression ($C_{c,\alpha}$) en fonction de l'angle entre les fibres (α) et la sollicitation (F) (Natterer et al., 2004)

En traction, la résistance perpendiculaire aux fibres et significativement inférieure à celle parallèle aux fibres, avec une chute drastique de la résistance lorsque la sollicitation s'écarte même légèrement de l'orientation des fibres, comme le montre la Fig. 19. En compression, bien que la perte de résistance soit moindre que pour la traction lorsque la sollicitation est inclinée par rapport aux fibres, elle reste notable, surtout en cas de sollicitation perpendiculaire aux fibres.

Les normes produits, telles que la NF EN 14080 pour le bois lamellé-collé et la NF EN 14081 pour le bois massif, fournissent une gamme de valeurs de résistance mécanique et de module

d'élasticité pour chaque classe de résistance du bois. Ceci permet de considérer l'anisotropie du matériau dans toutes les configurations dans lesquelles les contraintes sont inclinées par rapport aux fibres (Tableau 5).

En raison des différences de comportement en fonction de l'orientation des fibres, il est préférable de minimiser autant que possible l'angle entre la direction de sollicitation et les fibres du bois. Cette pratique est couramment observée dans la conception des poteaux et des tirants en bois, dont les fibres sont généralement alignées selon l'axe de la plus grande dimension, correspondant souvent à la direction de la compression ou de traction. Pour les poutres, les contraintes normales induites par la flexion sont également alignées avec les fibres du bois.

	Classe	C14	**C16**	**C18**	C20	C22	**C24**	C27	**C30**	C35	C40	C45	C50
Propriétés de résistance en N/mm²													
Flexion	$f_{m,0,k}$	14	**16**	**18**	20	22	**24**	27	**30**	35	40	45	50
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	7,2	**8,5**	**10**	11,5	13	**14,5**	16,5	**19**	22,5	26	30	33,5
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,4	**0,4**	**0,4**	0,4	0,4	**0,4**	0,4	**0,4**	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	**17**	**18**	19	20	**21**	22	**24**	25	27	29	30
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	2,0	**2,2**	**2,2**	2,3	2,4	**2,5**	2,5	**2,7**	2,7	2,8	2,9	3,0
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,0	**3,2**	**3,4**	3,6	3,8	**4,0**	4,0	**4,0**	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriétés de rigidité en kN/mm²													
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	7,0	**8,0**	**9,0**	9,5	10,0	**11,0**	11,5	**12,0**	13,0	14,0	15,0	16,0
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	4,7	**5,4**	**6,0**	6,4	6,7	**7,4**	7,7	**8,0**	8,7	9,4	10,1	10,7
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,23	**0,27**	**0,30**	0,32	0,33	**0,37**	0,38	**0,40**	0,43	0,47	0,50	0,53
Module de cisaillement moyen	G_{mean}	0,44	**0,50**	**0,56**	0,59	0,63	**0,69**	0,72	**0,75**	0,81	0,88	0,94	1,00
Masse volumique en kg/m³													
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	ρ_k	290	**310**	**320**	330	340	**350**	360	**380**	390	400	410	430
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	350	**370**	**380**	400	410	**420**	430	**460**	470	480	490	520

NOTE 1 Les valeurs données ci-dessus pour la résistance à la traction, la résistance à la compression, la résistance au cisaillement, le module d'élasticité caractéristique en flexion, le module d'élasticité transversal moyen et le module de cisaillement moyen ont été calculées au moyen des équations données dans l'EN 384.

NOTE 2 Les valeurs de résistance à la traction sont estimées de façon sécuritaire dans la mesure où le classement est effectué à partir de la résistance en flexion.

NOTE 3 Les propriétés disposées dans le tableau sont compatibles avec des bois présentant une teneur en humidité correspondant à une température de 20 °C et une humidité relative de 65 %, ce qui correspond à une teneur en humidité de 12 % pour la plupart des essences.

NOTE 4 Les valeurs caractéristiques de résistance au cisaillement sont données pour du bois sans fissures, selon l'EN 408.

NOTE 5 Ces classes peuvent également être utilisées pour des bois feuillus présentant un profil de résistance et de masse volumique similaire, tels que par exemple le peuplier ou le châtaignier.

NOTE 6 La résistance de flexion à chant peut aussi être utilisée dans le cas de la flexion à plat.

Tableau 5: Propriétés caractéristiques du bois massif selon la norme NF EN 338 en termes de résistance (MPa), de rigidité (GPa) et de masse volumique (kg/m^3)

Chapitre 4

Comportement du bois en situation d'incendie

4.1. Phénomène de combustion du bois

Le bois est considéré comme un matériau « combustible » en raison de sa capacité à subir une décomposition thermique, libérant des réactifs qui entrent en jeu dans le processus de combustion. Cependant, il est important de noter que ce n'est pas le bois lui-même qui brûle, mais plutôt les produits issus de son échauffement tels que le charbon, les goudrons et les gaz. Le terme « inflammable » est également applicable car les produits dérivés du bois ont une propension variable à prendre feu. Bien que, dans le cas des liquides, une distinction formelle existe entre les termes « inflammable » et « combustible », pour les solides, notamment le bois, ces termes peuvent être utilisés de manière interchangeable.

La combustion du bois est un processus complexe qui se déroule en plusieurs étapes, impliquant des transformations physiques et chimiques (Laplanche, 2006) :

1. **Séchage** : Lorsque le bois entre en contact avec le feu, la phase de séchage commence. Elle se poursuit jusqu'à ce que toute l'eau libre (dans le cas de bois vert) et liée contenue dans le bois s'évapore, généralement à une température d'environ 105°C. A ce stade, le bois perd son humidité et se rétracte, entraînant l'apparition de fissures.
2. **Pyrolyse** : C'est la décomposition des composés organiques sous l'effet de la chaleur, en l'absence de l'oxygène. Cette deuxième étape de la combustion du bois se produit entre 105°C et 350°C. Pendant la pyrolyse, les constituants chimiques du bois se décomposent, produisant des gaz (comme l'acide acétique et l'acide méthanoïque) ainsi que d'autres matières qui ne font pas partie de leur composition d'origine. Un front de carbonisation se forme vers 300°C, ralentissant la montée en température dans le bois.
3. **Combustion** : Également appelée « deuxième étape de la pyrolyse », la combustion se produit entre 350°C et 550°C. Pendant cette étape, la lignine continue à se décomposer, produisant de grandes quantités de charbon de bois et d'autres composés aromatiques.
4. **Oxydation du résidu charbonneux** : C'est la dernière étape de la combustion du bois, se produisant entre 550°C et 1000°C. A ce stade, il ne reste qu'un résidu charbonneux rougeoyant qui continue à émettre une forte chaleur avec une température de surface pouvant atteindre 800°C. Théoriquement, seulement environ 1% de la masse initiale du bois se transformera en cendres à la fin de cette étape.

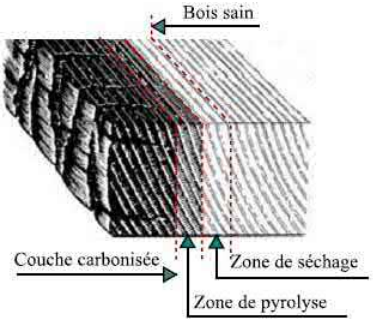


Figure 20: Front de pyrolyse dans le bois (THI, 2017)

En résumé, le phénomène de combustion du bois massif comprend quatre étapes essentielles, durant lesquelles le bois subit des modifications physico-chimiques et émet des gaz dans l'air, comme illustré dans la Fig. 21.

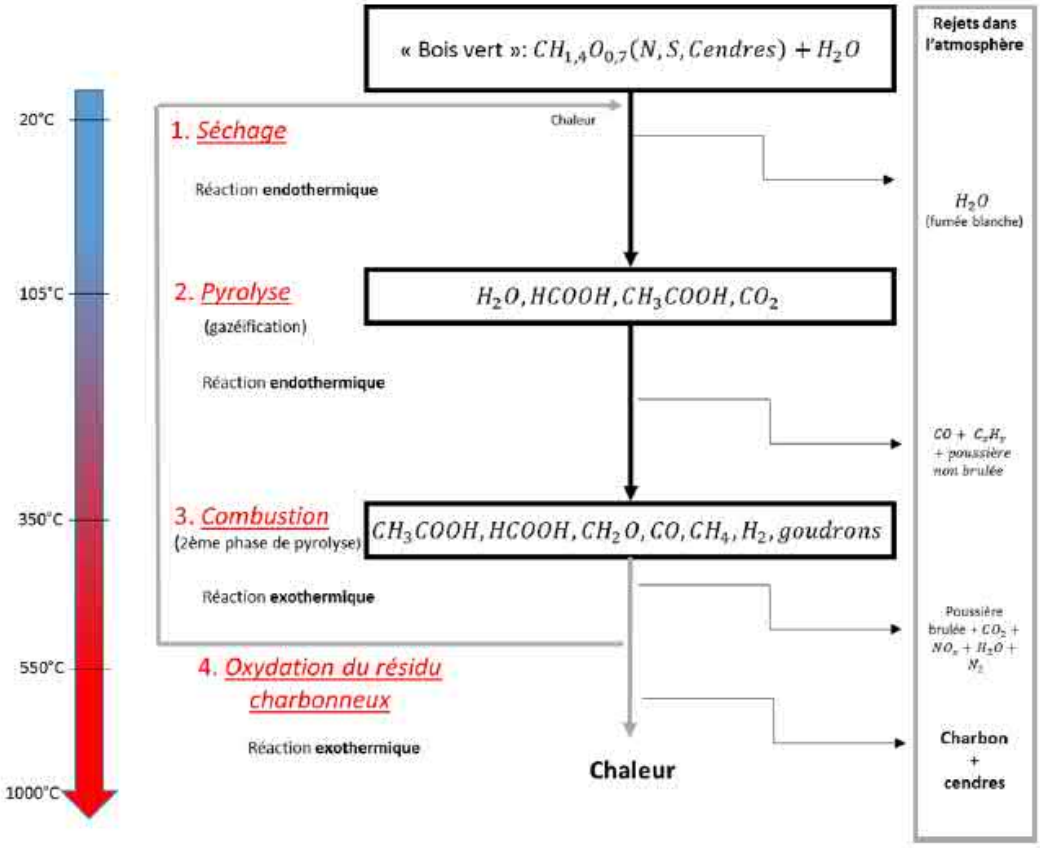


Figure 21: Schéma récapitulatif de combustion du bois massif (Lahouar et al., 2015)

Conformément aux observations présentées dans la Fig. 21, l'accroissement de la température induit une série de transformations physico-chimiques du bois, entraînant ainsi des altérations de ses propriétés mécaniques. Les études portant sur le comportement mécanique du bois à des températures élevées se concentrent généralement dans une plage de température allant de 0°C à 300°C, au-delà de laquelle le bois subit une carbonisation et perd toute résistance mécanique (Laplanche, 2006).

Il convient de noter que le bois est intrinsèquement combustible et peut s'auto-enflammer si la température dépasse un certain seuil critique, généralement autour de 300°C. À partir de cette température, le bois peut initier et alimenter un incendie sans nécessité d'une source de chaleur externe continue. Cependant, la formation d'une couche de charbon à partir de 300°C ralentit la transmission de la chaleur à l'intérieur du matériau, ce qui peut favoriser une certaine résistance au feu en retardant la propagation de la chaleur et la dégradation complète du bois.

Les recherches principales se focalisent sur l'analyse du comportement mécanique du bois à haute température lorsqu'il est sollicité dans le sens des fibres. Ces études ont démontré qu'une élévation de la température affaiblit le bois en traction (Buchanan, 2000) et entraîne une diminution du module d'élasticité ainsi que des résistances en traction et en compression (Fig. 22).

Des analyses approfondies menées par Gerhard (1982) concernant la variation du module d'élasticité du bois dans le sens des fibres révèlent une diminution significative du module d'élasticité au-delà de 200°C, attribuable à la dégradation de la lignine et de l'hémicellulose présentes dans le bois.

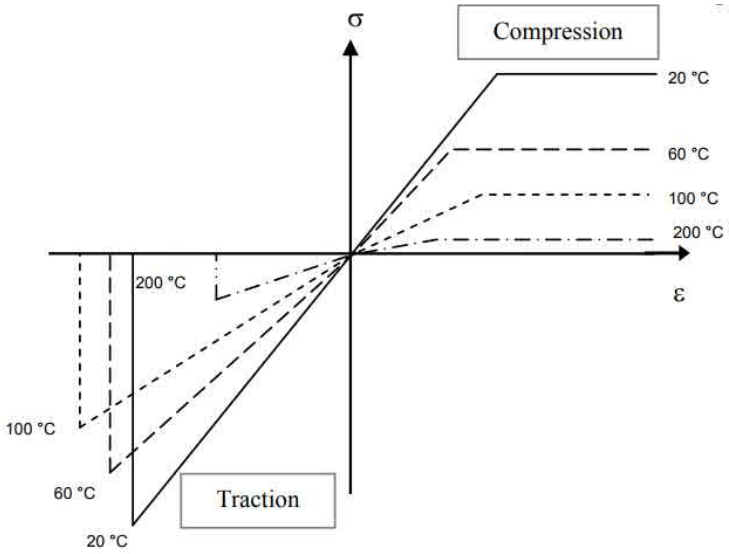


Figure 22: Variation des propriétés mécaniques du bois dans le sens des fibres en fonction de la température (Laplanche, 2006)

4.2. Propriétés thermo-physiques du bois

La combustion du bois engendre des changements significatifs dans ses propriétés thermiques et physiques. Comprendre les caractéristiques thermo-physiques du bois en relation avec la température est crucial pour évaluer la résistance des structures en bois en cas d'incendie. Plusieurs chercheurs, tels que Janssens (1994), Knudson (1975) et Fredlund (1993), ont étudié ces caractéristiques et ont développé des modèles pour décrire l'évolution des propriétés thermo-physiques du bois en fonction de la température.

4.2.1. Masse volumique

La masse volumique du bois subit des variations significatives en réponse à l'augmentation de la température, ce qui peut être caractérisé par des phases distinctes. Plusieurs chercheurs ont établi des courbes représentant la perte de masse du bois à différentes températures (Knudson (1975), Janssens (1994)). L'analyse de ces données révèle trois phases principales :

1. À des températures inférieures à 200°C, la modification de la masse volumique du bois est très faible, presque négligeable, indiquant une stabilité à cette gamme de température. Cela suggère que le retrait volumique dû à la déshydratation est compensé par la perte de masse, résultant en une masse volumique relativement stable.
2. Entre 200°C et 350°C, le bois subit une pyrolyse, entraînant une diminution d'environ 75% de la masse volumique en raison de la dégradation des constituants chimiques. Cette phase est marquée par une perte significative de matière, notamment de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, qui se décomposent sous l'effet de la chaleur.

3. Au-delà de 350°C, le bois se transforme en charbon, ce qui induit une variation minime de sa masse volumique jusqu'à des températures dépassant 1000°C. Dans cette phase, la structure restante est principalement constituée de carbone, qui ne subit plus de changements volumétriques importants.

Ces différentes phases correspondent respectivement à la libération de l'eau, à la formation des gaz combustibles et à la transformation du bois en charbon. La Fig. 23 illustre graphiquement ces évolutions de la masse volumique du bois en fonction de la température.

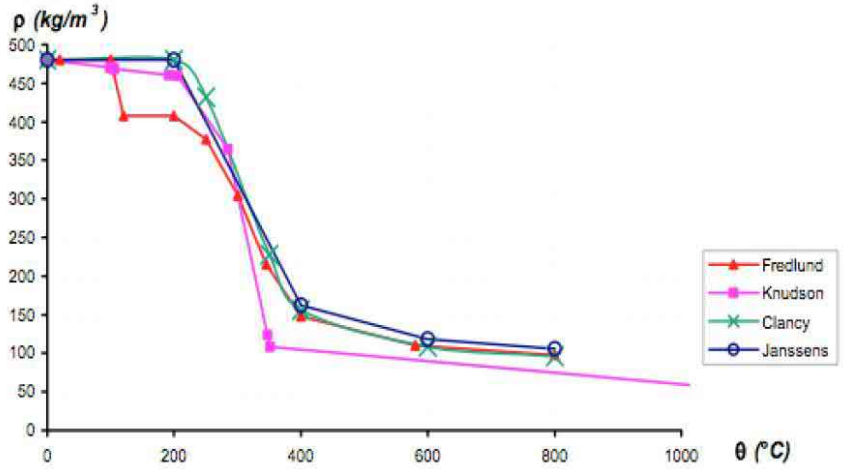


Figure 23: Evolution de la masse volumique du bois en fonction de la température (Audebert 2010)

4.2.2. Chaleur spécifique

Plusieurs études ont été menées pour déterminer la chaleur spécifique du bois dans diverses conditions, comme documenté par des chercheurs tels que Steinhagen (1977), Alves (1989), Fredlund (1993), Drysdale (1998), Simpson (1999), Incropera (2002) et Gupta et al. (2003). Une observation récurrente, faite notamment par Steinhagen (1977), est que la chaleur spécifique du bois augmente avec la température dans la plage de -40°C à +100°C. Il est également noté que le bois humide présente une chaleur spécifique supérieure à celle du bois sec en raison de la présence de l'eau.

Pour modéliser cette variation, Dunlap (1912) propose une équation reliant la chaleur spécifique du bois à la température pour des températures entre 0°C et 106°C, exprimée par l'équation (10) :

$$c_{pbois}\left(\frac{kJ}{kg}.K\right) = 4{,}187 \times (0{,}266 + 0{,}00116 \times T) \qquad (10)$$

Où *T* représente la température en °C.

Knudson (1975), dans ses travaux, utilise une méthode où la chaleur spécifique du bois est calculée comme la somme des valeurs pour un bois sec selon l'équation de Dunlap et pour un bois avec une humidité relative de 10%. Ainsi, pour des températures entre 20°C et 100°C, l'équation (11) est établie :

$$c_{pbois}(J/kg.K) = 1440 + 2{,}9 \times T \qquad (11)$$

Où *T* représente la température en K.

Pour des températures comprises entre 99,5°C et 104,4°C, deux approches sont possibles. La première consiste à intégrer le pic de chaleur dans les modèles numériques pour tenir compte de la vaporisation de l'eau. Cette plage de température est choisie car 99,5°C représente le point où l'eau dans le bois commence à vaporiser de manière significative sous des conditions de pression légèrement inférieures à la pression atmosphérique standard, et 104,4°C marque le point où la majorité de l'eau libre aurait vaporisé. Ce pic peut varier en fonction de l'humidité du bois, généralement considéré jusqu'à 41 kJ/kg.K (Knudson 1975). La deuxième approche consiste à ne pas considérer cette chaleur latente de vaporisation et à appliquer l'équation de Dunlap pour du bois sec après vaporisation de l'eau (entre 104,4°C et 200°C) :

$$c_{pbois}(J/kg.K) = 1080{,}3 + 5{,}285 \times T \quad (12)$$

Knudson propose ensuite une extrapolation linéaire de la chaleur spécifique pour des températures entre 200°C et 350°C :

$$c_{pbois}(J/kg.K) = 3820{,}5 - 8{,}99 \times T \quad (13)$$

À des températures supérieures à 350°C, au moment où le bois se transforme en charbon, la chaleur spécifique ne subit plus de variation avec la température et reste constante à 720 J/kg.K, tel que documenté par Landolt-Börnstein (1961). Les variations de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température sont présentées de manière synthétique dans la Fig. 24.

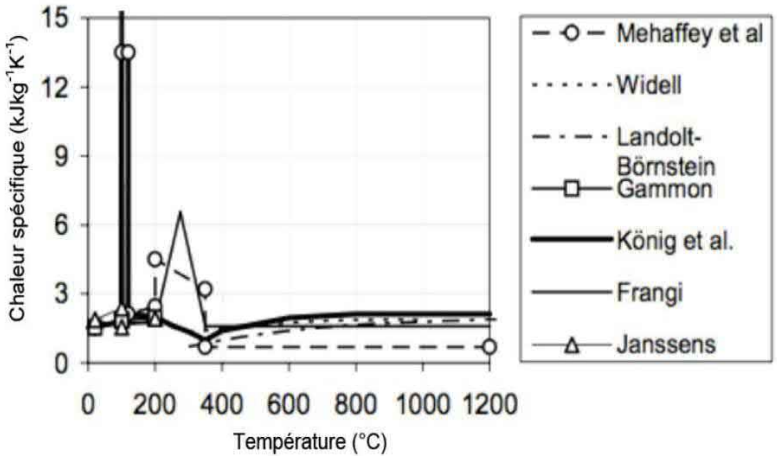


Figure 24: Evolution de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température (König 2004)

4.2.3. Conductivité thermique

La détermination de la conductivité thermique du bois est un défi technique. Lorsqu'un gradient de température se forme dans le bois, il entraîne la migration de l'eau (White et Schaffer 1981) et conduit à l'évaporation de l'eau à sa surface, provoquant des variations continues du taux d'humidité. Par ailleurs, comme l'a souligné Harmathy (1995), le transfert de chaleur dans les solides poreux résulte d'une combinaison de conduction, de rayonnement et de convection. Ce processus est influencé par la conductivité de la matrice solide, la porosité du matériau, ainsi que de la forme et de la taille des pores.

La conductivité thermique dans le bois est soumise à divers facteurs tels que la densité, l'humidité, la teneur en extractibles, l'orientation des fibres, la température et les particularités intrinsèques du matériau, telles que la porosité, la structure cellulaire et la composition chimique. Elle augmente proportionnellement avec la densité, l'humidité, la température et la

teneur en extractibles. Dans un même cerne, la conductivité thermique est presque identique dans les directions radiale et tangentielle, tandis qu'elle est de 1,5 à 2,8 fois supérieure dans la direction des fibres par rapport à la direction perpendiculaire à celles-ci. Pour les résineux ayant une humidité de 12%, la conductivité thermique se situe généralement entre 0,1 et 1,4 $W/m.K$ (Simpson 1999). Plusieurs chercheurs ont élaboré des modèles fondés sur des corrélations visant à estimer la conductivité thermique du bois, principalement en tenant compte de l'effet de la porosité, notamment la forme et la distribution des pores. La Fig. 25 illustre différentes variations de la conductivité thermique en fonction de la température, selon diverses sources, ainsi que celle proposée par l'Eurocode 5.

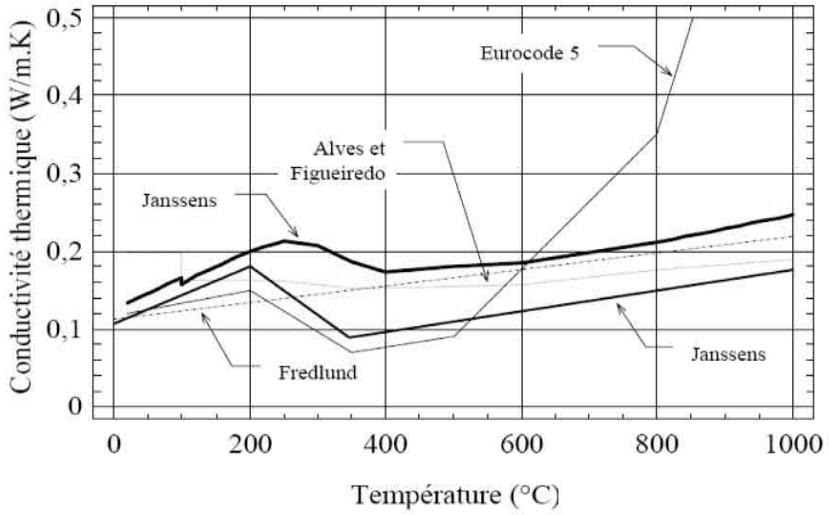


Figure 25: Evolution de la conductivité thermique du bois en relation avec la température (Moraes 2003)

4.3. Transfert de masse

Le bois, en tant que matériau hygroscopique et poreux, maintient une certaine teneur en eau, laquelle varie selon l'humidité relative et la température du milieu environnant. L'eau peut se présenter sous trois formes distinctes (voir section 2.2). Lorsque le bois est soumis à un processus de séchage contrôlé, l'eau se déplace depuis le cœur des pièces chauffées vers l'extérieur. Ce mouvement d'eau implique divers phénomènes tels que la migration capillaire de l'eau libre, la diffusion de la vapeur d'eau dans les vides cellulaires et la diffusion de l'eau adsorbée à travers les parois (Rémond 2004).

En cas d'incendie, les conditions thermiques sont considérablement plus sévères, entraînant un séchage rapide et l'activation d'autres mécanismes. Pour comprendre ces phénomènes, il est possible de s'inspirer des études sur le processus de séchage rapide du bois. Un exemple rapide notable est la « thermomigration » qui correspond au transport d'humidité induit par les gradients de température (Defo 1999). Ce processus conduit à un déplacement de l'eau des zones chaudes vers les zones froides, donc de la surface vers le cœur des pièces exposées au feu. Un lien étroit entre le transfert de masse et le transfert thermique se manifeste alors (thermophorèse). En effet, les transferts de masse peuvent engendrer de la chaleur par diffusion thermique (effet Dufour), et également par convection, dont l'intensité est influencée par la porosité du bois. Cette convection est provoquée par un gradient de pression de vapeur qui entraîne des surpressions et dépressions à l'intérieur du bois (Defo 1999). Ainsi, le transfert de masse est étroitement lié à la température et à la pression des gaz circulant dans le bois comme le montre la Fig. 26.

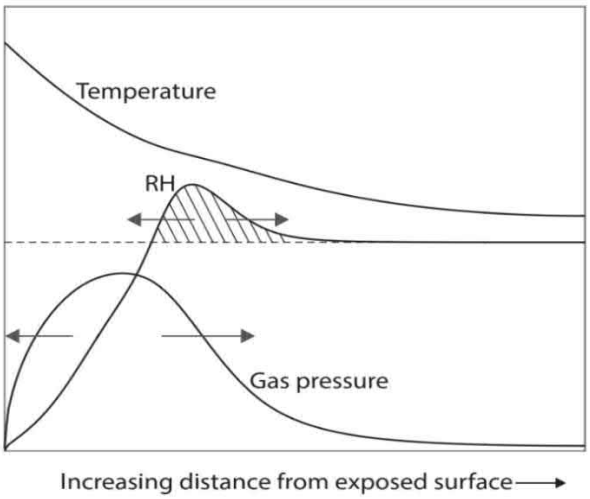


Figure 26: Processus de transfert de masse dans échantillon de bois exposé au feu, avec RH représentant l'humidité relative (Arends et al., 2018)

Ce processus de transfert de masse peut être expérimentalement observé dans divers scénarios d'incendie. La température du bois reste constante lorsqu'elle atteint 100°C, en raison de la forte enthalpie de vaporisation de l'eau qu'il contient. Cette observation, démontrée par différentes études, montre que le phénomène (Fig. 27) est observable sur les graphiques de température en fonction du temps, établis par divers auteurs (White et Schaffer 1981, Arends et al. 2018, Schaffer 1967, Sedighi Gilani et al. 2014, Terrei et al. 2021, Fredlund 1993, THI 2017, Tran et White 1992, Fahrni et al. 2018, König et Walleij 1999, Samaké 2014).

Samaké (2016) a observé que la durée de cette phase stable dépend de la distance initiale par rapport à la surface exposée au feu, ce qui suggère des mouvements d'eau et/ou de vapeur à travers le bois pendant la combustion (transfert de masse) :

« La présence d'eau dans le matériau entraîne un ralentissement de son chauffage autour de 100°C. La durée de cette phase stable dépend à la fois de la position du thermocouple et du taux d'humidité du bois. Plus le bois est humide, plus la phase stable est prolongée. De plus, à mesure que l'on s'éloigne de la source de chaleur, la durée de cette phase stable augmente en raison de la migration de l'eau. » (Samaké 2016)

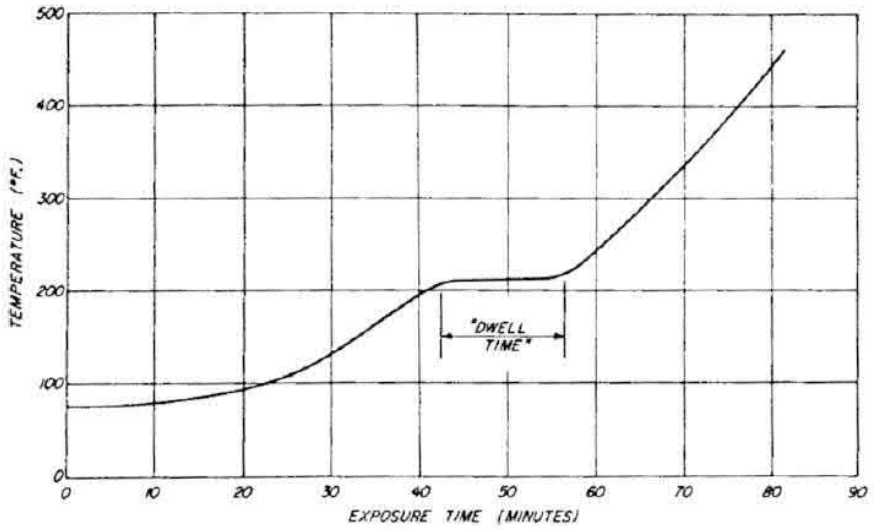
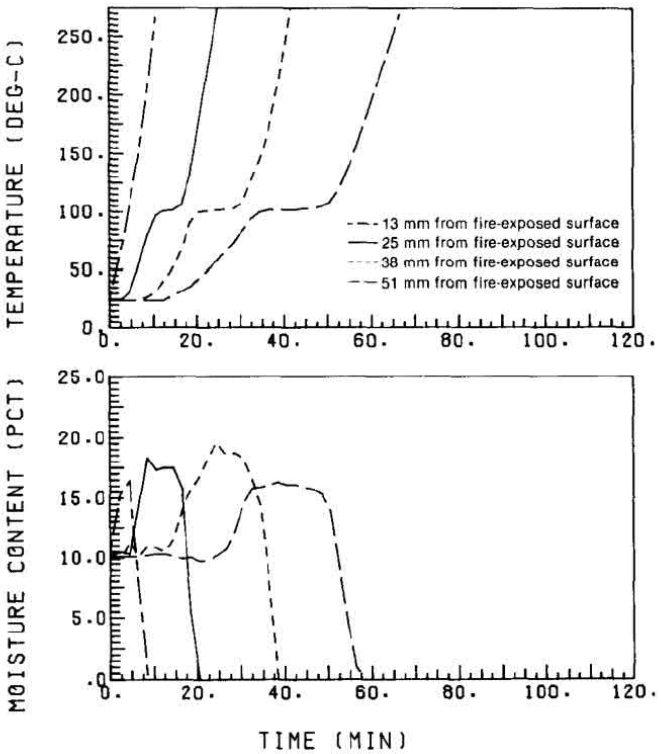


Figure 27: Illustration des plateaux observés à 100°C dans le bois soumis à l'incendie (Schaffer 1967)

White et Schaffer (1981) ont mené des recherches approfondies en mesurant simultanément la température du bois et l'évolution locale de sa teneur en eau à différentes profondeurs. Ils ont inséré des électrodes et des thermocouples dans des forages pratiqués dans les poutres qu'ils testaient. La température a été directement mesurée, tandis que la teneur en eau a été déduite de la résistance électrique mesurée entre les électrodes. Ils ont constaté que la durée de la phase stable à 100°C, qu'ils ont appelée « période thermostatique », est directement liée à l'aire sous la courbe de l'humidité en fonction du temps (Fig. 28). Ils ont également établi que la durée de cette période est proportionnelle à la distance par rapport à la surface exposée au feu, au taux d'humidité initial du bois et à la température du feu (White et Schaffer 1981).



Time-temperature and time-moisture content curves of southern pine wood slab (test No. 2) subjected to a more severe fire exposure than Standard E 119 (a temperature of 927 C). Slab conditioned to moisture equilibrium in 27 C, 65% RH room.

Figure 28: Exemple de résultat obtenu par White et Schaffer (1981)

Lors de l'évaporation de l'eau, la migration ne se limite pas uniquement vers l'extérieur de la section de bois ; une certaine quantité se déplace également vers l'intérieur. White et Schaffer ont réussi à évaluer la proportion d'eau qui pénètre à l'intérieur de la section, qui semble dépendre de divers paramètres, notamment de la perméabilité du bois. En effet, cette proportion varie entre 40 et 60% pour les poutres en Pin Taeda, 23% pour le douglas et 9% pour le chêne blanc d'Amérique. En fin de compte, les auteurs ont confirmé que le gradient de pression généré par l'évaporation de l'eau constitue le principal mécanisme de transfert de masse :

« Le principal mode de déplacement de l'humidité dans la plaque de bois exposée au feu semble donc être le transfert de vapeur d'eau dû à un gradient de pression total résultant de la vaporisation de l'eau à l'intérieur de la plaque de bois. Lorsque les vapeurs pénétraient dans la plaque, l'air dans le volume vide du bois devenait saturé, et la teneur en humidité des parois cellulaires augmentait. Cette augmentation de la teneur en humidité était régie par l'isotherme de sorption du bois » (White et Schaffer 1981).

4.4. Température de transition vitreuse des composants bois

La transition vitreuse est la plage de température à laquelle un polymère amorphe ou un matériau amorphe subit un changement d'état, passant de son état solide vitreux (caractérisé par sa dureté et sa fragilité) à un état caoutchouteux où le matériau devient plus souple et flexible (Fig. 29). Le plateau vitreux se caractérise par un module d'élasticité peu sensible aux propriétés chimiques du matériau et à la topologie du réseau polymérique, avec des mouvements moléculaires de faible amplitude. En revanche, la phase caoutchouteuse se distingue par un module d'élasticité de l'ordre du MPa, ce qui est environ 3000 à 4000 fois inférieur à celui observé dans le plateau vitreux. Les taux d'élongation à la rupture se situent entre 500 et 1000% dans cette phase, tandis qu'ils sont généralement compris entre 5 et 10% dans la phase vitreuse. Cette grande extensibilité résulte de l'activation thermique qui diminue les forces de cohésion intermoléculaires et intramoléculaires.

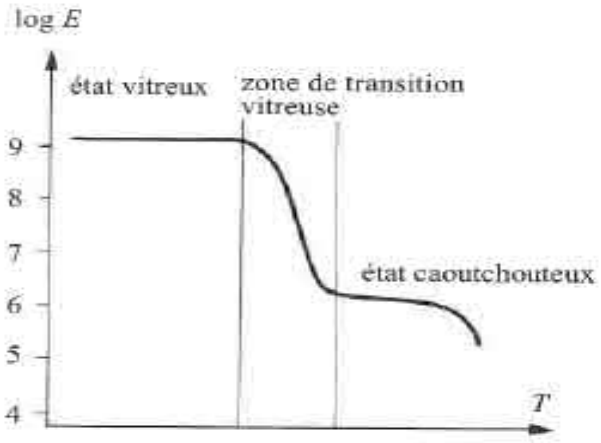


Figure 29: Variation du module d'élasticité en fonction de la température pour un polymère amorphe (Navi et Heger 2005)

Le comportement thermique du bois dépend de la vitesse de l'élévation de la température et des conditions de confinement. Une élévation rapide de la température dans un flux de gaz inerte entraîne des réactions globalement endothermiques, car les gaz de réaction sont rapidement éliminés, favorisant l'absorption de chaleur. En revanche, une montée plus lente de la température, combinée au confinement des produits de réaction, entraîne des réactions globalement exothermiques, où la chaleur produite par les réactions reste piégée dans le volume (Deglise et al., 1981). Par ailleurs, il est observé que la température de transition vitreuse croît proportionnellement à la vitesse de montée en température.

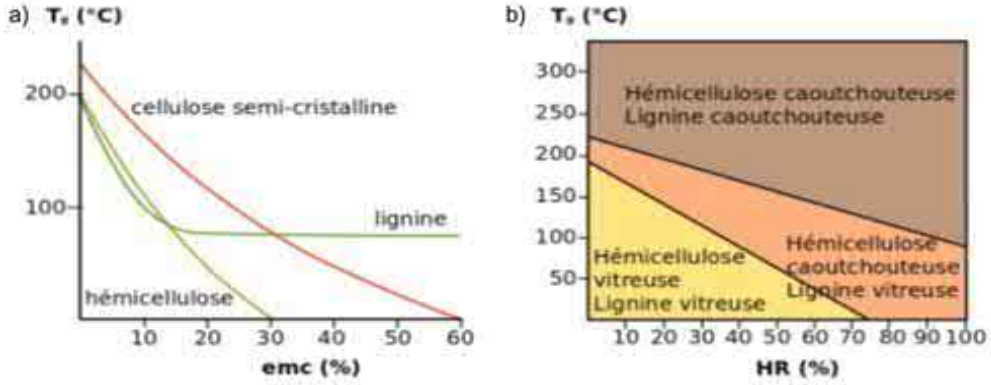


Figure 30: Température de transition vitreuse (T_g°C) : a) Corrélation entre l'humidité interne (emc%, teneur en eau à l'équilibre) et les composants polymériques du bois, ainsi que b) l'humidité relative (HR%) et la matrice hémicellulose-lignine (d'après les travaux de Salmén (1982, 1986) cités dans l'étude de Navi (2011))

La dégradation thermique du bois humide se produit à un rythme plus accéléré par rapport à celle du bois sec à une température donnée, comme démontré par Skaar (1976). La cinétique de réaction pendant le chauffage du bois humide est estimée être dix fois plus élevée que celle du bois sec, comme indiqué par Stamm (1956). Selon Back E.L. (1982), l'absorption d'eau par l'hémicellulose, la lignine et la fraction amorphe de la cellulose agit comme un plastifiant pour ces polymères, influençant ainsi leur transition vitreuse en fonction de leur teneur en eau. Cette plastification réduit la rigidité des polymères et abaisse leur température de transition vitreuse.

Plus précisément, pour la cellulose, la plage de température de transition vitreuse se situe entre 200°C et 250°C. Pour l'hémicellulose, les transitions vitreuses sont observées dans une plage allant de 150°C à 220°C, tandis que pour la lignine, une transition vitreuse est remarquée dans la plage de température entre 140°C et 190°C (Fig. 31).

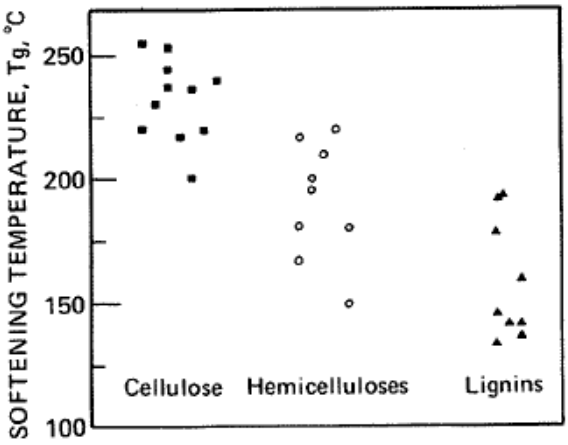


Figure 31: Température de transition vitreuse (T_g°C) des composants du bois dans des conditions complètement sèches (Back E.L., 1982)

La présence d'humidité a un impact significatif sur les réactions de décomposition en modifiant la transition vitreuse, un point critique où les composants deviennent plus réactifs et favorisent la mobilité des molécules. Plus précisément, l'humidité diminue le point de transition vitreuse de la lignine et des hémicelluloses. Par exemple, selon Rajohnson (1996), une teneur en eau de 7 à 13% diminue considérablement le point de ramollissement de la lignine dans une plage de température allant de 72 à 128°C. Les hémicelluloses présentant un taux d'humidité de 20 à

23% se plastifient entre 54 et 56°C. En revanche, la température de transition vitreuse de la cellulose semi-cristalline diminue également avec l'augmentation de l'humidité, comme illustré dans la Figure 30-a, passant de 200°C à environ 50°C lorsque la teneur en eau augmente jusqu'à 40%.

Pour du bois sec, la transition vitreuse survient à environ 180°C. En revanche, pour un bois humide, elle apparaît à des températures inférieures à 150°C, et son importance augmente proportionnellement à l'humidité du bois. Les interactions entre l'humidité, la température et la durée de séchage du bois sont des processus complexes.

Schaffer (1973) a synthétisé les étapes successives de la transformation physico-chimique d'un bois de feuillus sec sous atmosphère inerte en fonction de la température, comme exposé dans le Tableau 6.

Température	Transformation Physico-Chimique
55°C	La structure naturelle de la lignine est altérée; les hémicelluloses commencent à se plastifier.
70°C	Début du retrait transversal du bois à cause du séchage.
110°C	La perte de masse de la lignine démarre lentement.
120°C	Le taux d'hémicelluloses commence à décroître tandis que celui de la cellulose commence à augmenter et les lignines commencent à se plastifier.
140°C	Toute l'eau liée est libérée; le bois devient anhydre.
160°C	La lignine a fondu et commence à se durcir à nouveau.
180°C	La perte de masse des hémicelluloses s'accélère; la lignine s'écoule dans les ponctuations.
200°C	La masse du bois commence à décroître rapidement; des résines phénoliques se forment (thermocondensation). La cellulose se déshydrate au-dessus de cette température.
210°C	La lignine se durcit. La cellulose flue et commence à se dépolymériser et les réactions passent d'endothermiques à exothermiques.
225°C	La cristallinité de la cellulose décroît, puis réaugmente.
280°C	La perte de masse de la lignine atteint 10%; la décomposition de la cellulose commence.
288°C	Température supposée de carbonisation.
300°C	Les hémicelluloses sont complètement dégradées.

Tableau 6: Les différentes étapes de transformation des propriétés physico-chimique du Peuplier en fonction de la température (Schaffer, 1973)

4.5. Résistance des structures bois au feu selon l'Eurocode 5

L'interaction du bois avec le feu est abordée dans la norme NF EN 1995-1-2. Bien que le bois soit intrinsèquement combustible, les structures en bois présentent un comportement satisfaisant en cas d'incendie et ceci même si l'élévation de la température a un impact significatif sur les propriétés mécaniques du bois. L'Eurocode 5 fournit des coefficients de réduction pour les propriétés du bois en fonction de la température, mais la teneur en eau dans le bois n'est pas précisée. De plus, il n'est pas précisé si ces coefficients tiennent compte de la présence ou non de gradients thermiques à l'intérieur du bois.

La Fig. 32 illustre la variation du module d'élasticité longitudinal en fonction de la température, tandis que la Fig. 33 présente les variations de résistance en traction, compression et cisaillement. Il est observé que toutes ces propriétés diminuent de manière linéaire sur l'ensemble de la plage de température, avec une pente plus importante (à l'exception de la résistance en cisaillement) pour des températures comprises entre 20°C et 100°C. En outre, il est noté que ces propriétés atteignent toutes zéro à partir de 300°C. Ce phénomène est attribué

à la carbonisation du bois, où le charbon résultant est supposé avoir une résistance mécanique négligeable.

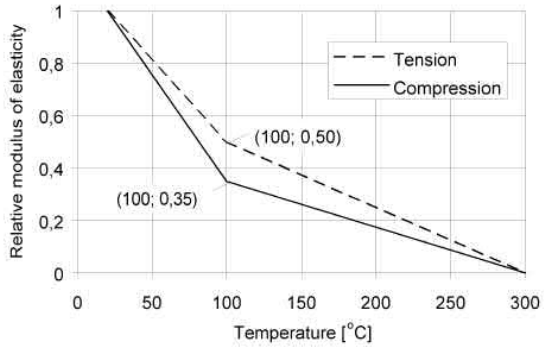


Figure 32: Variation du module d'élasticité longitudinal du bois en fonction de la température (NF EN 1995-1-2)

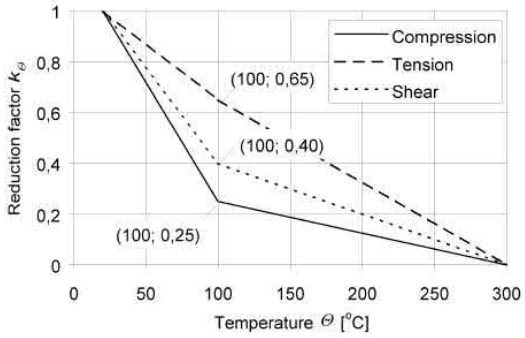


Figure 33: Variation des résistances du bois en fonction de la température (NF EN 1995-1-2)

- **Origine des courbes**

Les courbes de réduction des propriétés mécaniques du bois en fonction de la température (Fig. 32 et 33), telle que présentées dans l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2), sont issues de travaux expérimentaux et de modélisations détaillées. Ces recherches ont été menées afin de quantifier la diminution de la résistance du bois en compression, traction et cisaillement à mesure que la température augmente sous des conditions de feu. Les études clés qui ont contribué à l'élaboration de cette courbe incluent les travaux de Schaffer (1984), Glos et al. (1991), et Kollmann (1951), ainsi que ceux de König (1995) et Thomas (1997). Ces chercheurs ont mesuré la résistance résiduelle du bois à différentes températures en tenant compte du contenu en humidité et des conditions de charge. Les résultats expérimentaux, illustrés par des courbes de réduction de la résistance en fonction de la température, ont été ensuite simplifiés sous forme de relations bilinéaires pour des températures allant de 20 °C à 300 °C, avec un point de rupture notable à 100 °C. Ces données ont servi de base pour la modélisation des performances thermomécaniques du bois sous l'effet de la chaleur, permettant ainsi de formuler les recommandations de l'Eurocode 5 sur la conception des structures en bois soumises à des conditions d'incendie. La normalisation de ces résultats a permis l'intégration de ces courbes dans les règles de conception structurale pour assurer la sécurité des bâtiments en bois face au feu.

La diminution de la résistance d'un élément en bois enflammé est principalement due à la perte de section et non à des altérations physico-mécaniques de la section non brûlée. Par conséquent, la méthode de calcul de la résistance des structures en bois face au feu repose sur l'évaluation des sections résiduelles. L'Annexe Nationale de l'Eurocode 5 en France stipule que la méthode alternative utilisant les propriétés mécaniques réduites n'est pas applicable. Autrement dit, le calcul doit se baser sur la section résiduelle non carbonisée et non sur une réduction des propriétés mécaniques de la section initiale.

Suite à la demande de la société ARBONIS en 2020, des essais ont été réalisés au CSTB sur des éléments de bois en épicéa (Manthey 2020). Cette campagne d'essais s'intéresse à la question des propriétés physico-thermo-mécaniques du bois en fonction de la température.

Un total de 96 échantillons de bois en épicéa, dont les dimensions étaient de 40x40x80 mm, ont été testés en compression. Ces essais ont révélé que, dans la plage de température de 20 à 100°C,

la résistance en compression est principalement affectée par la teneur en eau du bois au-delà de la température critique. À 100°C, la résistance en compression, pour une masse sèche, est presque identique à la résistance initiale à 20°C, représentant environ 60% de celle-ci pour une éprouvette avec une teneur en eau d'environ 10% (Fig. 34).

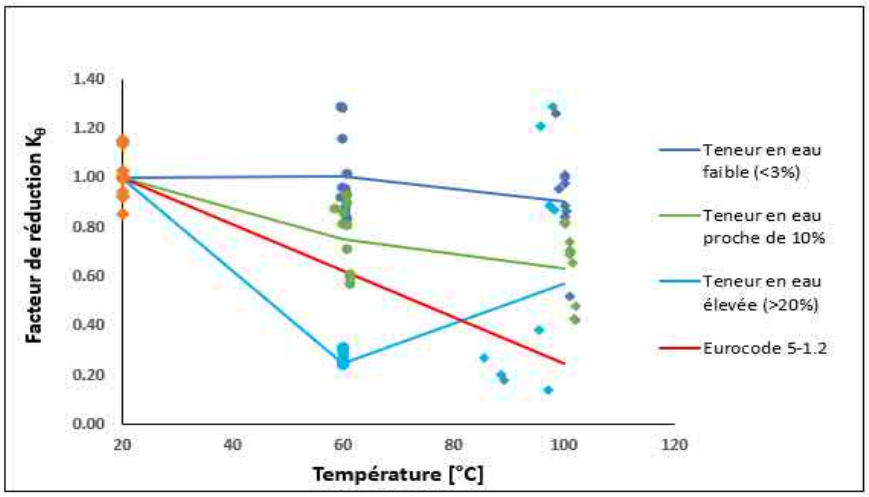


Figure 34 : Evolution de la résistance en compression en fonction de la température et de la teneur en eau (Manthey 2020)

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la teneur en eau du bois sur sa résistance en compression à des températures élevées. Ils suggèrent également que les propriétés mécaniques réduites doivent être évaluées en tenant compte de la teneur en eau et de la température, afin de fournir des données plus précises pour le calcul des structures en bois exposées au feu.

- **Principe de la méthode des sections résiduelles**

La méthode des sections résiduelles est utilisée pour évaluer la perte de matière dans une section de bois exposée à un incendie pendant une durée donnée.

Cette perte de matière est directement liée à la profondeur de carbonisation.

Lorsqu'il s'agit d'éléments en bois, on distingue deux types de combustion :

1. Combustion unidirectionnelle : Elle concerne les éléments n'ayant qu'une seule face exposée à l'incendie. Par exemple, une poutre encastrée dans un mur ne présente généralement qu'une seule face exposée aux flammes. Dans ce cas, la chaleur et les flammes n'attaquent qu'un seul côté de la poutre, provoquant une carbonisation progressive de la surface exposée tandis que les autres côtés restent protégés par le mur.
2. Combustion multidirectionnelle : Elle s'applique aux éléments ayant plusieurs faces en contact avec l'incendie. Un exemple typique serait un poteau en bois située au centre d'une pièce, où toutes les faces sont susceptibles d'être exposées aux flammes en cas d'incendie. De même, les planchers et les plafonds en bois peuvent être soumis à une combustion multidirectionnelle si le feu se propage à travers les étages, touchant ainsi le bois de plusieurs côtés simultanément.

La profondeur de carbonisation pour une durée d'incendie t (en minutes) est définie comme suit :

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \qquad si\ carbonisation\ uni-directionnelle \qquad (14)$$

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \qquad si\ plusieurs\ faces \qquad (15)$$

Avec β_0 la vitesse de combustion unidirectionnelle et β_n la vitesse de combustion fictive. La "vitesse de combustion fictive" (β_n) est une approximation utilisée pour modéliser la vitesse de carbonisation lorsque plusieurs faces du bois sont exposées au feu. Elle tient compte de la complexité des conditions réelles de l'incendie où la chaleur et les flammes attaquent le bois de plusieurs directions simultanément, créant un schéma de combustion plus compliqué que dans le cas unidirectionnel.

Le Tableau 7 présente les valeurs de calcul des vitesses de combustion β_0 et β_n pour différentes essences de bois et de type de produits.

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Résineux et hêtre		
Bois lamellé collé avec une masse volumique caractéristique ≥ 290 kg/m^3	0,65	0,7
Bois massif avec une masse volumique caractéristique ≥ 290 kg/m^3	0,65	0,8
b) Bois feuillu		
Feuillu massif ou lamellé collé avec une masse volumique caractéristique ≥ 290 kg/m^3	0,65	0,7
Feuillu massif ou lamellé collé avec une masse volumique caractéristique ≥ 450 kg/m^3	0,50	0,55
c) LVL avec une masse volumique caractéristique ≥ 480 kg/m^3	0,65	0,7
d) Panneaux		
Panneautage bois	0,9 a)	—
Contreplaqué	1,0 a)	—
Panneaux à base de bois autres que contreplaqué	0,9 a)	—
a) Les valeurs s'appliquent pour une masse volumique caractéristique de 450 kg/m^3 et une épaisseur de panneau de 20 mm ou plus, voir 3.4.2(8) pour d'autres valeurs d'épaisseur et de masse volumique.		

Tableau 7: Valeurs de calcul des vitesses de combustion β_0 et β_n pour différentes essences de bois (NF EN 1995-1-2)

En utilisant la profondeur de carbonisation, nous pouvons déterminer deux paramètres importants :

1. La section réduite qui est la section initiale diminuée de la profondeur de carbonisation (voir Fig. 35)
2. La section efficace, calculée comme la section initiale diminuée de la profondeur de carbonisation efficace d_{ef} :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \qquad (16)$$

Avec $d_0 = 7mm$; k_0 est un coefficient qui dépend de la durée de l'incendie et de la protection (ou non) des surfaces de l'élément :

- Pour une surface d'élément non protégée :

$$k_0 = Min[1.0\ ;\ t/20] \qquad (17)$$

- Pour des éléments protégés, si le retard au démarrage de la carbonisation dû à la protection (t_{ch}) est supérieur à 20 minutes, alors :

$$k_0 = Min[1.0\,;\, t/t_{ch}] \tag{18}$$

  Sinon ($t_{ch} < 20\ min$), la formule (17) sans protection s'applique.

La couche d'épaisseur $k_0 d_0$ est supposée sans rigidité ni résistance. Ainsi, le calcul de résistance au feu selon la méthode des sections résiduelles se base sur la section efficace.

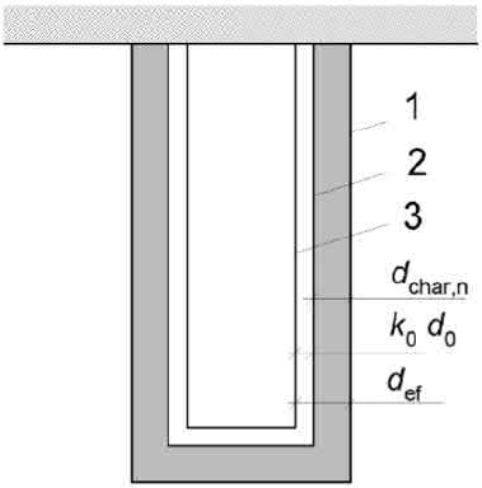


Figure 35: Définition de la section résiduelle (2) et efficace (3) à partir de la section initiale (1) de l'élément (NF EN 1995-1-2)

Il est important de noter que ces calculs diffèrent de ceux effectués dans le cadre d'une analyse classique aux états limites ultimes (ELU). La détermination de la valeur de calcul d'une résistance au feu est exprimée par l'équation (19) :

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \times \frac{k_{fi} f_k}{\gamma_{M,fi}} \tag{19}$$

Avec :

- $\gamma_{M,fi} = 1$ est le coefficient de sécurité partiel en situation accidentelle d'incendie,
- $k_{mod,fi} = 1$ en situation d'incendie,
- $k_{fi} f_k = f_{20}$ représente le fractile à 20% de la résistance considérée ($k_{fi} = 1{,}25$ pour le bois massif, $k_{fi} = 1{,}15$ pour le bois lamellé-collé et $k_{fi} = 1{,}10$ pour le LVL.

Les sollicitations sont calculées en adoptant la combinaison accidentelle des actions (ELU) en situation d'incendie, qui est définie par l'équation (20) :

$$G + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \tag{20}$$

Où l'action variable dominante est à sa valeur fréquente ($\psi_{1,1} Q_{k,1}$) et toutes les autres actions variables sont à leur valeur quasi-permanente ($\psi_{2,i} Q_{k,i}$). La valeur du coefficient ψ_i est donnée dans le Tableau 4.

Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de comprendre de manière approfondie le comportement thermo-hygro-mécanique du bois lorsqu'il est soumis à des conditions d'incendie. Cette compréhension est essentielle pour améliorer la conception, la sécurité et la performance des structures en bois exposées à des températures élevées et à des variations d'humidité. Pour atteindre cet objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis, chacun visant à répondre à des aspects clés du comportement du bois sous l'action de la chaleur et de l'humidité.

1. **Analyser, à l'échelle du matériau, l'impact de la variabilité thermohydrique sur les propriétés mécaniques du bois :**

    - **Caractériser les propriétés mécaniques du bois sous différentes conditions de températures et d'humidité** : Cette analyse vise à mesurer et comprendre comment la résistance en compression et le module d'élasticité longitudinal varie en fonction de la température et de la teneur en humidité.

    - **Examiner l'effet de la présence ou l'absence de gradients thermiques et hydriques** : Étudier comment des conditions homogènes et hétérogènes de température et d'humidité influencent les propriétés mécaniques du bois, en prenant en compte les processus de vaporisation, transfert et recondensation de l'eau.

    - **Examiner les différents modes de rupture du bois sous conditions thermohydriques variées** : Analyser les mécanismes de défaillance du bois (fissuration, délamination, etc.) sous l'effet de la chaleur et de l'humidité, et comment ces modes de rupture dépendent des gradients thermiques et hydriques, afin de mieux comprendre les modes de rupture prédominants en situation d'incendie.

2. **Étudier la réversibilité des propriétés mécaniques du bois vis-à-vis de la température** :

    - **Évaluer la capacité du bois à retrouver ses propriétés mécaniques après exposition à des températures élevées** : Examiner dans quelle mesure les propriétés mécaniques du bois, telles que la résistance en compression et le module d'élasticité longitudinal, peuvent se rétablir après une période de refroidissement, et identifier les conditions qui favorisent ou empêchent cette réversibilité. Cet aspect est plus prospectif car il ne faisait pas partie des objectifs initiaux de la thèse.

3. **Établir une relation reliant les propriétés mécaniques à la température et à l'humidité dans le cas de conditions homogènes** :

    - **Développer un modèle prédictif** : Créer une relation mathématique ou un modèle empirique qui relie les propriétés mécaniques du bois (telles que la résistance en compression et le module d'élasticité longitudinal) à la température et à l'humidité lorsque ces paramètres sont homogènes.

    - **Valider le modèle avec des données expérimentales** : Utiliser les résultats expérimentaux obtenus pour vérifier et affiner la relation établie, assurant ainsi la précision et la fiabilité du modèle pour des applications pratiques.

4. **Valider les résultats des essais à l'échelle du matériau par des études à l'échelle structurale :**

   - **Réaliser des essais expérimentaux sur des poteaux** : Mettre en place des essais de compression pour observer et analyser le comportement des poteaux en bois lorsqu'ils sont soumis à des gradients de température et d'humidité, simulant ainsi les conditions réelles d'incendie.

   - **Comparer les résultats à l'échelle du matériau avec ceux obtenus à l'échelle structurale** : Valider les observations faites à l'échelle du matériau en les confrontant aux résultats expérimentaux obtenus à l'échelle des structures.

Partie 2

Etudes Expérimentales à l'échelle du matériau

Cette partie présente les travaux effectués au cours de la thèse à l'échelle du matériau. Elle se divise en 2 sections. La première section (A) porte sur l'étude du comportement mécanique du bois de différents types en fonction de la température et de l'humidité, en assurant l'homogénéité de 2 conditions, c'est-à-dire, sans gradients thermiques et hydriques. Les bois utilisés dans cette section sont le bois de sapin (bois massif) et le bois d'épicéa (lamellé-collé). La deuxième section (B) aborde l'étude du comportement mécanique du lamellé-collé de différentes sections en fonction de la température et de l'humidité, cette fois-ci en considérant des gradients thermiques et hydriques.
Les essais de la section A ont été réalisés à l'ENPC (Laboratoire Navier) et ceux de la section B au CSTB. Les protocoles expérimentaux ont été ajustés en fonction des moyens propres à chaque organisme, mais aussi pour tenir compte du nombre conséquent d'essais réaliser (500 essais au total).

Section A : Essais de compression sans gradients thermiques et hydriques

Nous présentons dans un premier temps les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés au cours des essais de la section (A) (chapitre 5). Le chapitre 6 est dédié à la présentation des résultats de compression sur du bois massif à température ambiante et en tenant compte de différentes teneurs en humidité, tout en garantissant son homogénéité dans le bois. Le chapitre 7 exposera quant à lui les résultats des essais de compression sur le bois lamellé-collé à différentes températures et à différentes teneurs en humidité sans gradients thermiques et hydriques. Ce dernier chapitre permettra de proposer un modèle prédictif des propriétés mécaniques (résistance et module d'élasticité) en fonction de la température et la teneur en eau du bois. L'ensemble des résultats sera comparé et discuté avec des formules données par les normes des matériaux ou de dimensionnement.

Chapitre 5

Matériaux et Méthodes

Ce chapitre présente les essences de bois sélectionnées, ainsi que les méthodes de prélèvement des éprouvettes à partir des tasseaux pour le bois massif et des poutres pour le lamellé-collé. Il décrit également le protocole expérimental adopté pour les essais.

5.1. Matériaux d'étude

5.1.1. Les essences de bois utilisées

Pour cette étude, une sélection de résineux a été privilégiée, étant donné que les bois de résineux sont ceux les plus fréquemment utilisés actuellement en construction. Dans cette optique, une étude préliminaire a été menée sur du bois de sapin sans défauts visibles, afin de vérifier la faisabilité du protocole expérimental à différentes teneurs en eau.

Par la suite, la majorité des expériences ont été réalisées avec de l'épicéa provenant de poutres en lamellé-collé. L'épicéa (Picea abies) constitue une espèce de bois résineux largement répandue en Amérique du Nord, en Europe et en Russie. Caractérisé par une densité relativement faible et une bonne résistance mécanique, le bois d'épicéa est particulièrement adapté aux applications de charpente grâce à la régularité de son tronc. De plus, il présente une grande facilité de mise en œuvre, ce qui en fait un matériau prisé dans divers domaines de construction, tels que la charpente, les ossatures de bâtiments, les menuiseries intérieures, et les revêtements extérieurs.

5.1.2. Prélèvements des éprouvettes

Les éprouvettes du bois de sapin, mesurant 35x35x80 mm^3, notées S_0 (voir Fig. 36), ont été prélevées à partir de tasseaux de dimensions 35x35x3000 mm^3, provenant de diverses sources et présentant une variabilité de densité entre eux (en lien avec des largeurs de cernes et des proportions entre le bois initial et le bois final différentes). La découpe des éprouvettes a été effectuée à l'aide d'une scie à onglet, comme illustré dans la Figure 37.

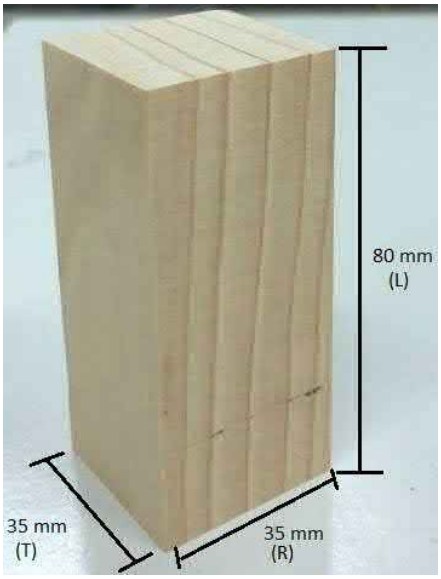


Figure 36 : Dimensions des éprouvettes S_0 de bois de Sapin

Figure 37 : Scie à onglet utilisée pour la découpe des éprouvettes S_0 de bois de sapin

Les éprouvettes de lamellé-collé, de dimensions 50x50x100 mm^3 et désignées par S_1 (voir Fig. 38), ont été prélevées dans des poutres de bois lamellé-collé de classe GL24h. Ces poutres, de dimensions 187x198x3000 mm^3, ont été élaborées à partir de bois d'épicéa avec des plans de collage parallèles à la direction longitudinale du bois. La colle utilisée pour l'assemblage des lamelles est une colle phénol-formaldéhyde, connue pour ses bonnes propriétés de résistance à l'humidité et à la chaleur. La découpe des éprouvettes a été réalisée à l'aide d'une scie électrique de taille supérieure à celle employée pour le bois de sapin, en raison du volume considérable de la poutre, comme représenté dans la Figure 39.

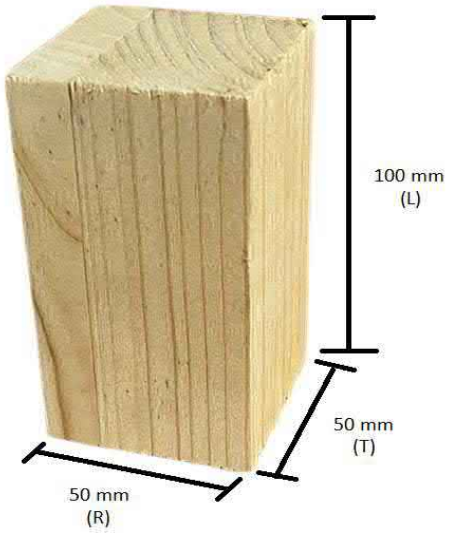


Figure 38 : Dimensions des éprouvettes S_1 du lamellé-collé

Figure 39 : Découpe des poutres lamellé-collé à l'aide d'une scie électrique

Afin d'obtenir une teneur en humidité d'environ 12% dans les éléments, les éprouvettes découpées ont été stockées dans une chambre climatique maintenue à une température de 20 (±1) °C et à une humidité relative (HR) de 65 (±5) %.

5.1.3. Caractéristiques des éprouvettes

Les éprouvettes S_0 de bois de sapin ont été prélevées à partir de 3 tasseaux différents, désignés respectivement par Tass 1, Tass 2 et Tass 3, tandis que les éprouvettes S_1 de lamellé-collé ont été extraites dans une seule poutre (Tableau 8). Les tasseaux de bois de sapin se distinguent par leur densité, qui est liée à la largeur des cernes et de la proportion entre le bois initial et le bois final, ainsi que par leur teneur en eau désigné par MC (Moisture content). Lors de la sélection des éprouvettes, nous avons pris soin de minimiser les défauts en privilégiant les zones de bois sans défauts. Cependant, concernant les éprouvettes S_1, il était difficile d'éviter les défauts en raison des dimensions des poutres découpées et du grand nombre de nœuds et de fissures présents dans la poutre. Pour l'ensemble des éprouvettes, les écarts-types relatifs à la teneur en eau du bois varient entre 0 et 0,1, tandis que ceux concernant les densités, mesurées à une humidité relative de 65%, demeurent inférieurs à 0,01.

	S_0 Tass 1	**S_0 Tass 2**	**S_0 Tass 3**	**S_1**
Bois	Sapin	Sapin	Sapin	Lamellé-collé
Densité (g/cm^3)	0,49 +/- 0,01	0,41 +/- 0,01	0,39 +/- 0,01	0,41 +/- 0,01
Teneur en eau MC (%)	10,8 +/- 0,1	11,15 +/- 0,1	11,5 +/- 0,0	12,0 +/- 0,0

Tableau 8 : Densités et teneurs en eau (MC) déterminées pour les éprouvettes S_0 et S_1 à 20°C

5.1.4. Mesure de la teneur en eau du bois

La mesure de la teneur en du bois (MC) a été initialement réalisée à l'aide d'un hygromètre à pointe (Fig. 40). L'appareil utilisé permet de déterminer des teneurs en eau comprises entre 8% et 30%, avec une précision de ± 2%. En dehors de cette plage, l'hygromètre ne fournit aucune valeur exploitable.

Figure 40 : Mesure de la teneur en eau des éprouvettes à l'aide d'un hygromètre à pointe (Testo 606-2)

Afin de valider la fiabilité de cet appareil et d'obtenir des mesures de la teneur en eau en dehors de la plage de 8% et 30%, la méthode de la « double pesée » (voir section 2.3) a été employée. Nous avons déterminé la masse sèche du bois à la fin des essais mécaniques en soumettant les échantillons à un processus de séchage pendant 24 heures à une température de 103,5°C. Le Tableau 10 présente les teneurs en eau initiales des éprouvettes S_0 et S_1, telles que mesurées par l'hygromètre à pointe, ainsi que les valeurs calculées à partir des masses sèches obtenues. Les résultats recueillis montrent une bonne concordance entre les 2 méthodes, avec un écart relatif de seulement 1%.

Teneur en eau MC (%)	S_0 Tass 1	S_0 Tass 2	S_0 Tass 3	S_1
Hygromètre à pointe	10,4 +/- 0,1	10,9 +/- 0,4	11,1 +/- 0,2	11,6 +/- 0,01
Séchage à 103,5°C	10,8 +/- 0,1	11,15 +/- 0,1	11,5 +/- 0,0	12,0 +/- 0,0

Tableau 9 : Tableau comparatif des teneurs en eau initiales des éprouvettes S_0 et S_1, obtenues par mesure directe à l'aide de l'hygromètre à pointe et par calcul à partir des masses sèches déterminées après séchage à 103,5°C

5.2. Méthodologie

5.2.1. Protocole expérimental

Le protocole expérimental mis en place consiste en un contrôle simultané de l'humidité et de la température sur les échantillons de bois massif de sapin et de lamellé-collé d'épicéa. Il permet d'assurer l'absence de gradients hydrique et thermique au moment des essais mécanique ; ce qui sera discuté dans la suite de cette section A.

Les échantillons désignés S_0 et S_1, ont été placés dans des dessiccateurs distincts contenant une solution saline saturée ou du gel de silice. Ce choix vise à maintenir une humidité relative contrôlée et distincte pour chaque échantillon. Les essais ont été réalisés à température ambiante (20°C) pour 5 niveaux de teneurs en eau différents pour le bois massif. Pour le lamellé-collé, les essais ont été conduits à 3 températures différentes (20°C, 60°C et 90°C) pour 5 niveaux de teneurs en eau distincts (détaillés dans Tableau 10).

Les échantillons ont été considérés comme ayant « atteint » l'équilibre hygroscopique lorsque la variation de leur masse relative était inférieure à 0,1 % sur une période de 24 heures. Des essais réalisés au préalable à température ambiante (non présentés dans le cadre de ce mémoire) ont permis de montrer que le profil d'humidité peut être considéré comme homogène selon la direction axiale lors d'une variation d'humidité du bois. Une fois cet équilibre hygroscopique atteint, la masse de chaque échantillon a été déterminée. À partir de cette mesure, la teneur en eau (MC) a été déduite pour une humidité relative (HR) et une température donnée. En ce qui concerne les essais à différentes températures, étant donné la durée des conditionnements à différentes humidités relatives et températures, il peut être « raisonnablement » considéré qu'il n'y a pas de gradients thermiques au sein des échantillons. Ces affirmations pourront être étayées dans de prochaines études par des expérimentations, voire des modélisations, mais les essais réalisés dans la section B en présence de thermocouples nous permettent de valider nos hypothèses.

	20°C	**60°C**	**90°C**
Gel de silice	4%	4%	4%
Chlorure de lithium	12%	10%	10%
Carbonate de potassium	44%	36%	34%
Chlorure de sodium	76%	76%	75%
Sulfate de potassium	97%	96%	95%

Tableau 10 : Humidité Relative théorique en fonction de la température pour chaque solution saline utilisée (Greenspan 1977)

Cinq dessiccateurs (Fig. 41) ont été utilisés. Au fond de chaque dessiccateur, des solutions salines saturées spécifiques ou du gel de silice ont été placés, sélectionnés en fonction des conditions d'équilibre hygrométrique souhaitées. Ces conditions ont été obtenues pour une plage de température allant de 20°C jusqu'à 90°C, en se basant sur la courbe des valeurs de l'humidité relative au-dessus des solutions salines saturées en fonction de la température (Fig. 42). Le choix des solutions salines saturées a été guidé par leur relative stabilité en fonction de la température. Pour chaque teneur en eau (et température), cinq échantillons ont été préparés.

Les conditions d'essais à température ambiante et avec une teneur en eau d'environ 12% ont servi de référence pour les autres teneurs en eau. Les données acquises ont ensuite été normalisées par rapport à cette référence si besoin (Fig. 61).

Figure 41 : Echantillons de bois de sapin de section S_0 dans les dessiccateurs contenant différentes solutions à température ambiante

Pour les essais à 60°C et 90°C, les dessiccateurs ont été placés dans une étuve à température contrôlée (Fig. 43).

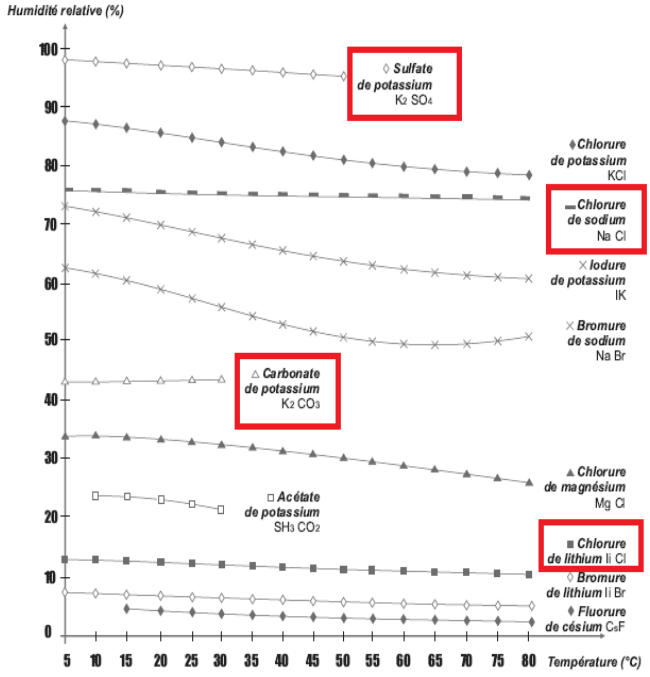


Figure 42 : Courbe des valeurs de l'humidité relative au-dessus des solutions salines saturées en fonction de la température (NF X15-119

Figure 43 : Conditionnement des échantillons du bois lamellé-collé à 60°C dans un étuve à température contrôlée

5.2.2. Essais de compression

Les essais de compression ont été réalisés sur une machine électromécanique de traction-compression de marque 3R (Fig. 44), au laboratoire Navier. Cette machine, d'une capacité de 300 KN, a été utilisée en mode compression avec des plateaux en acier inoxydable. L'un des deux plateaux est rotulé tandis que l'autre est fixe. La vitesse de déplacement de la traverse de la machine est de 0,02 mm/s. La machine est connectée à un ordinateur équipé d'un logiciel dédié. Ce logiciel permet de piloter la machine et d'acquérir les données brutes des essais. A noter qu'un soin particulier a été pris en compte par rapport à la rectification des éprouvettes

(faces parallèles) et leur mise en place (éviter les effets parasites dus à un mauvais alignement avec l'axe de la machine d'essais).

Figure 44 : Essais de compression sur le bois de sapin (section S_0) réalisé à l'aide d'une presse électromécanique de marque 3R, d'une capacité de 300KN.

On mesure la force en fonction du déplacement de la traverse. À partir de ces données, on peut déterminer plusieurs paramètres importants : la résistance maximale en compression, qui correspond à la force maximale que l'échantillon peut supporter avant de céder, et le module d'élasticité longitudinal, qui est calculé en analysant la relation entre la force appliquée et le déplacement de la traverse dans la phase élastique de la compression. Il est toutefois important de souligner que les valeurs de E_L mesurées sont inférieures aux valeurs réelles, car elles sont dérivées des déplacements enregistrés par la traverse de la machine d'essai. Le déplacement de la traverse résulte de la déformation de la machine et de l'échantillon. Ainsi, les modules d'élasticité obtenus ne correspondent pas aux valeurs intrinsèques du matériau, mais représentent une approximation influencée par la méthode de mesure. Il est considéré dans la suite que l'effet de la rigidité de la machine d'essai est le même pour tous les échantillons quelles que soit les conditions (humidité du bois et température d'essais) ; ce qui permet d'établir des comparaisons entre les modules d'élasticité pour les différents cas d'études.

Une fois que les échantillons ont atteint l'équilibre hygroscopique et que leur teneur en eau a été déterminée par pesée, les essais de compression ont été réalisés. Afin de minimiser le refroidissement des échantillons à leur sortie de l'étuve, celle-ci et la balance ont été placées à proximité immédiate de la presse. Le délai entre le retrait des échantillons de l'étuve et le début des essais mécaniques était environ 15 secondes. La durée des essais mécaniques variait en fonction de la température des échantillons et de leur teneur en eau, les échantillons plus humides nécessitant des essais plus longs. Le temps maximum pour atteindre la force maximale (F_{max}) était de 75 secondes. Immédiatement après les essais, les échantillons ont été pesés et chauffés à 103,5°C pendant 24 heures afin de déterminer leur teneur en eau.

Ainsi, au regard des durées des essais mécaniques (depuis la sortie de l'étuve notamment pour les essais à 60°C et 90°C et jusqu'à la détermination de la contrainte de rupture, ainsi que la détermination du module d'Young axial), des évolutions des masses avant et après essais mécaniques et des évolutions des températures (déduites des essais avec des thermocouples pour les essais de la section B), ce protocole assure une homogénéité de la teneur en eau et de la température très acceptable pour les résultats et interprétation proposées dans la suite.

Chapitre 6

Résultats des essais à température ambiante

Ce chapitre présente l'influence de la teneur en eau sur la densité et les propriétés mécaniques du bois, telles que la résistance en compression et le module d'élasticité axial, à température ambiante, en les comparant aux données issues de la littérature.

6.1. Influence de la teneur en eau à température ambiante sur la densité

La densité des éprouvettes en bois massif (sapin) et en lamellé-collé (épicéa) a été mesurée juste avant le conditionnement. Les valeurs moyennes de densité pour chaque série (par exemple, le lamellé-collé de classe GL 24h) présentaient une faible dispersion, avec des écarts relatifs inférieurs à 3% entre les 5 éprouvettes. Ceci indique une bonne homogénéité du matériau au sein de chaque groupe.

La densité de l'ensemble des éprouvettes a été déterminée une seconde fois juste avant l'essai de compression. A ce stade, les éprouvettes avaient été conditionnées avec des solutions salines (ou gel de silice), ce qui a modifié leur teneur en en eau ainsi que leur volume du fait des variations dimensionnelles. Cette mesure finale de la densité a été réalisée en utilisant la formule 21, qui prend en compte la densité initiale (ρ_{ref}), le coefficient de retrait (α), la teneur en eau initiale (MC_{ref}, mesurée à l'aide de l'hygromètre à pointe) et finale (MC_u, mesurée à l'aide de la méthode de la double pesée), ainsi que la variation de la teneur en eau ($\Delta MC = MC_u - MC_{ref}$).

$$\rho_u = \frac{\rho_{ref}}{1 + \frac{\alpha}{100} \times \Delta MC} \times \frac{1 + \frac{MC_u}{100}}{1 + \frac{MC_{ref}}{100}} \tag{21}$$

Cette formule permet de calculer la densité finale (ρ_u) en tenant compte des variations de volume dues aux changements de teneur en eau. Lorsque la teneur en eau du bois change, son volume change en proportion au coefficient de retrait (α). La relation entre la teneur en eau et le volume est donnée par $V_u = V_{ref}(1 + \frac{\alpha}{100} x\, \Delta MC)$, où V_u est le volume final et V_{ref} est le volume initial. En substituant ce changement de volume dans l'équation de densité, on obtient la densité finale en fonction de la densité initiale et des variations de teneur en eau. Le terme $\frac{1+\frac{MC_u}{100}}{1+\frac{MC_{ref}}{100}}$ ajuste la densité pour la quantité en eau du bois avant et après conditionnement.

Avec $\alpha = 0.44\%$ pour le bois massif et $\alpha = 0.39\%$ pour le lamellé-collé (Fiche Tropix éditées par le CIRAD pour le bois de sapin et le bois d'épicéa, Paradis et al. 2015).

La validité de la formule 21 a été vérifiée en comparant les résultats obtenus avec ceux d'une mesure directe de la densité basée sur la masse réelle après conditionnement (m_u) et les dimensions réelles après conditionnement ($b_{1,u}$; $b_{2,u}$; l_u) (formule 22). Cette comparaison a confirmé la précision de la formule 21 pour la détermination de la densité des éprouvettes après conditionnement. Il est à noter que la masse et le volume augmentent et diminuent tous les deux en raison des effets des variations dimensionnelles, respectivement.

$$\rho_u = \frac{m_u}{b_{1,u} \times b_{2,u} \times l_u} \quad (22)$$

Avec $b_{1,u}$ et $b_{2,u}$ les dimensions réelles après conditionnement et l_u la hauteur de l'éprouvette.

Par ailleurs, selon la norme française NF EN 384, il est recommandé d'adapter les valeurs d'essais de la masse volumique en conformité avec la formule 23 :

$$\rho = \rho_u \left(1 - 0{,}005(u - u_{ref})\right) \quad (23)$$

Avec :

- ρ est la masse volumique ajustée à la teneur en eau de référence
- ρ_u est la masse volumique mesurée des éprouvettes après conditionnement
- u est la teneur en humidité au moment de l'essai ($8\% \leq u \leq 18\%$)
- u_{ref} est la teneur en humidité de référence, habituellement $u_{ref} = 12\%$.

La densité de référence à 12% est celle mesurée pour les échantillons à l'état initial avant le conditionnement des échantillons pour lesquels MC est proche de 12%. Cet ajustement prend en compte l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques du bois et permet de comparer les résultats d'essais réalisés sur des bois présentant des taux d'humidité différents.

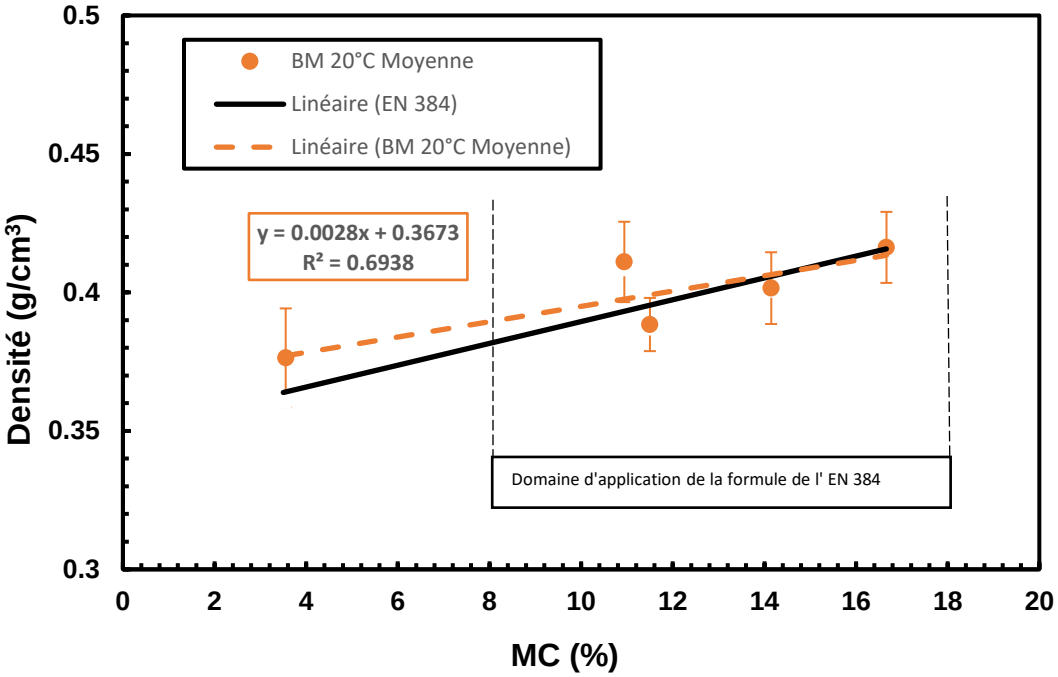


Figure 45 : Evolution de la densité du bois massif en fonction de la teneur en eau à température ambiante

Les Figures 45 et 46 illustrent l'évolution de la densité en fonction de la teneur en eau (MC) du bois massif (sapin) et du lamellé-collé (épicéa) à température ambiante. On observe une influence significative de la teneur en eau sur la densité, cette dernière augmentant avec la teneur en eau croissante. L'analyse du carré de corrélation (R^2) confirme une relation linéaire entre les deux variables. Les équations des droites de régression pour le bois massif et le lamellé-collé sont respectivement :

Bois Massif (Sapin) :

$$\rho_u = 0{,}0028MC(\%) + 0{,}37\ (g/\ cm^3) \quad (24)$$

Bois Lamellé-collé (Epicéa) :

$$\rho_u = 0{,}0035MC(\%) + 0{,}35\ (g/\ cm^3) \quad (25)$$

Conformément à la norme NF EN 384, il est nécessaire de corriger la densité de 0,5% pour chaque variation de 1% de la teneur en eau, pour une teneur en eau comprise entre 8% et 18%. Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que cette corrélation peut être appliquée au bois massif et au lamellé-collé dans une plage de teneur en eau étendue de 4% à 20%.

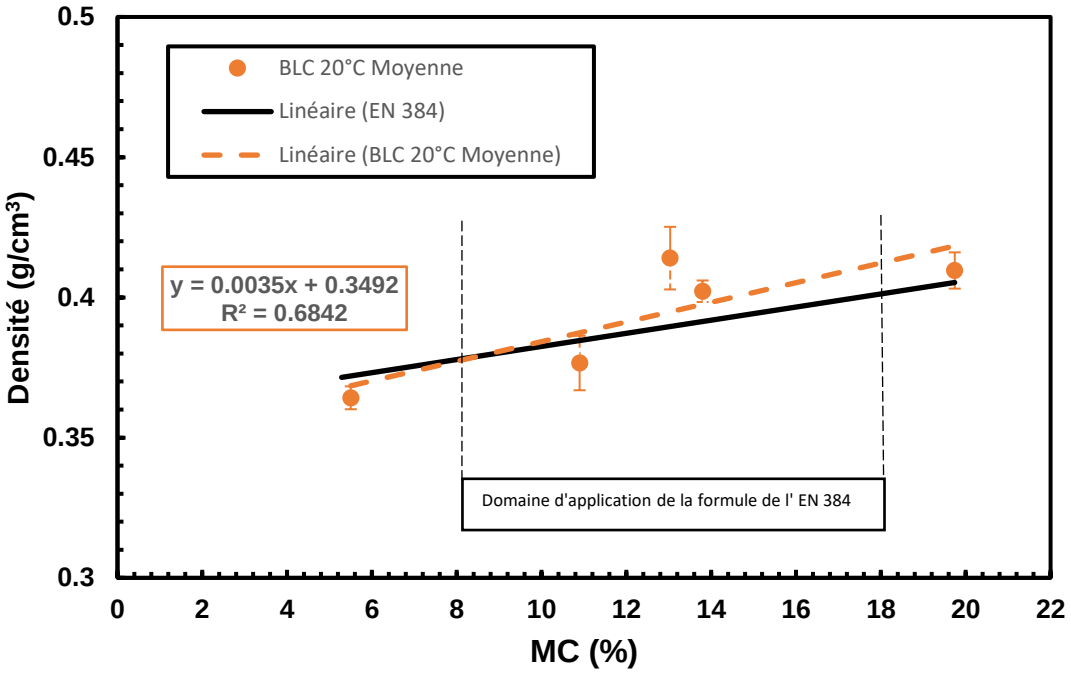


Figure 46 : Evolution de la densité du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau à température ambiante

6.2. Influence de la teneur en eau à température ambiante sur les propriétés mécaniques du bois

Conformément aux références bibliographiques (Wood Handbook 1987, Guitard 1987a et Guitard 1987b), une corrélation positive a été observée entre la densité et la résistance en compression ainsi que le module d'Young pour une teneur en eau donnée (Tableau 11). Lorsque la densité du bois augmente, la résistance en compression et le module d'Young augmentent également.

	BM TASS 1	**BM TASS 2**	**BM TASS 3**
Densité (g/cm³)	0,49 +/- 0,01	0,41 +/- 0,01	0,39 +/- 0,01
Teneur en eau MC (%)	10,8 +/- 0,1	11,15 +/- 0,1	11,5 +/- 0,0
Résistance (MPa)	51 +/- 1	42 +/- 2	36 +/- 1
Module E (MPa)	6002 +/- 70	5221 +/- 200	4833 +/- 100

Tableau 11 : Evolution des propriétés mécaniques du bois de Sapin section S_0 en fonction de la densité (MC ≈ 11%)

Il est important de rappeler que les modules d'Young E sont obtenus à partir du déplacement de la traverse de la machine d'essais (voir section 5.2.2). Les résistances et les modules sont par ailleurs déterminés à l'aide des sections effectives calculées à partir des coefficients de retrait ou de rétractibilité (Fiche Tropix du CIRAD, Paradis et al. 2015) afin de tenir compte des variations dimensionnelles au niveau des sections. Ces coefficients permettent de corriger les effets des variations de teneur en eau des échantillons. Il est à noter que, dans ce cas, les essais ont été réalisés à température ambiante, ce qui signifie que l'effet de la température n'a pas été pris en compte.

6.2.1. Résistance en compression

Les Figures 47 et 48 montrent l'évolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante pour le bois de sapin et le lamellé-collé. On observe une diminution significative de la résistance pour les deux types de bois avec l'augmentation de la teneur en eau. La résistance en compression du bois de sapin diminue de 34% lorsque la teneur en eau atteint 17%, tandis que celle du le bois lamellé-collé diminue de 39% pour un MC de 20%. Lorsque l'humidité pénètre dans la paroi cellulaire, elle forme des liaisons secondaires avec les groupes polaires des molécules de polymère. Ce remplacement des liaisons hydrogène au sein du réseau polymère par des liaisons entre l'eau-hémicelluloses, l'eau-lignine et l'eau-cellulose paracristalline augmente la flexibilité des polymères (Fu 2021), ramollissant ainsi la paroi cellulaire du bois ce qui réduit la résistance du bois à mesure que la teneur en eau augmente.

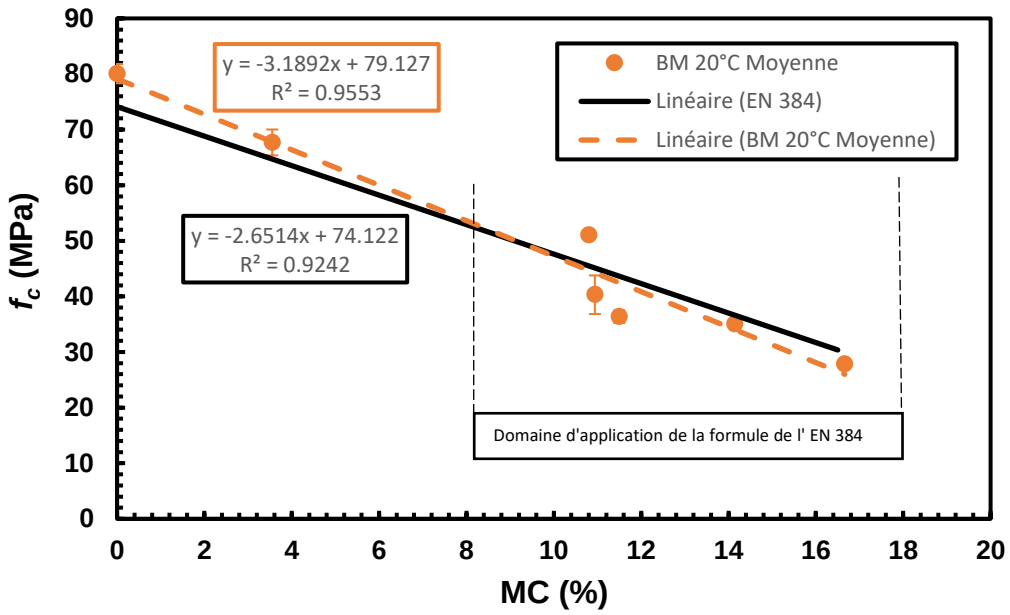


Figure 47 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois massif en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante

Par ailleurs, selon la norme française NF EN 384, il est recommandé d'adapter les valeurs d'essais pour la résistance en compression axiale conformément à la formule 26 :

$$f_{c,0} = f_{c,0,u}\left(1 + 0{,}03\left(u - u_{ref}\right)\right) \quad (26)$$

Avec :

- $f_{c,0}$ est la résistance en compression axiale
- u est la teneur en humidité au moment de l'essai ($8\% \leq u \leq 18\%$)
- u_{ref} est la teneur en humidité de référence, habituellement $u_{ref} = 12\%$.

La résistance en compression $f_{c,0}$ de référence à 12 % est la moyenne des résistances en compression mesurées pour les échantillons de référence à température ambiante (20°C) dont le MC est proche de 12%. Selon la norme NF EN 384, il est nécessaire de corriger la résistance de 3% pour chaque variation de 1% de la teneur en eau, pour une teneur en eau comprise entre 8% et 18%.

Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que la corrélation proposée par la norme NF EN 384 peut être appliquée au bois de sapin et au lamellé-collé dans les limites de son domaine d'application, c'est-à-dire pour des teneurs en eau comprise entre 8% et 18%. Cependant, il est important de noter que cette corrélation pourrait ne pas être aussi précise en dehors de ce domaine, c'est-à-dire pour des teneurs en eau inférieures à 8% et supérieures à 18%.

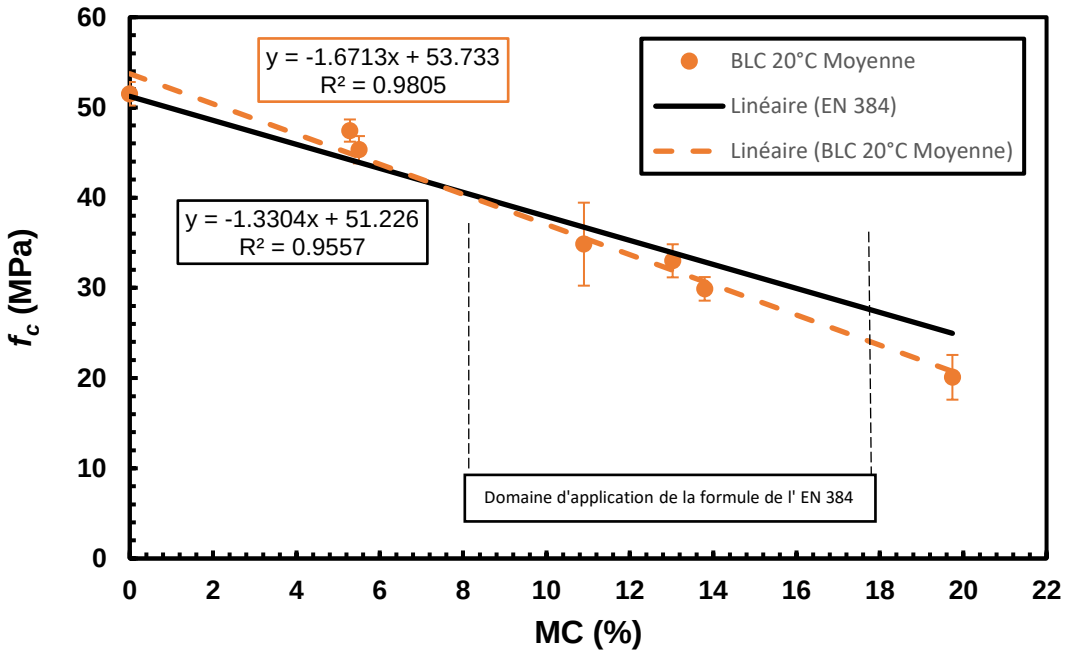


Figure 48 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante

La Figure 49 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux de la résistance relative à la compression (f_c^*) en fonction de la teneur en eau (MC) du bois suivant la direction longitudinale (L) et les données issues de la littérature. Sur la base des résultats, une teneur en eau de 12% a été choisie comme condition de référence pour calculer les variations relatives des résistances en compression.

Comme le montrent les Figures 47 et 48, la résistance en compression diminue pour les deux types de bois lorsque la teneur en eau augmente. Sur toute la plage de la teneur en eau étudiée, les échantillons de bois de sapin présentent des valeurs de résistance plus élevées que celles du lamellé-collé. Cette différence peut être attribuée aux défauts présents dans les échantillons S_1.

Il est important de noter que la tendance qualitative de la relation entre la résistance et la teneur en eau est similaire pour les deux essences de bois étudiées et les résultats de la littérature (Ozyhar et al. 2013 pour le hêtre européen, Fu 2021 pour le hêtre oriental et Al-musawi 2023 pour le hêtre). La résistance en compression maximale est atteinte à MC =0%, ce qui confirme les résultats de la littérature résumés par Gerhards (1982) (voir Annexe A.1).

L'analyse du carré de corrélation (R^2) de la moyenne des résultats obtenus avec la littérature (courbe rouge) confirme une relation linéaire entre les deux variables. L'équation de la droite de régression de la moyenne des résultats de la Figure 49 est représenté par l'équation (27) :

$$f_c^{\ *} = -0{,}063MC + 1{,}77 \qquad (27)$$

Où $f_c^{\ *}$ représente la résistance relative en compression normalisée par rapport à la densité et par rapport à la teneur en eau initiale de 12%.

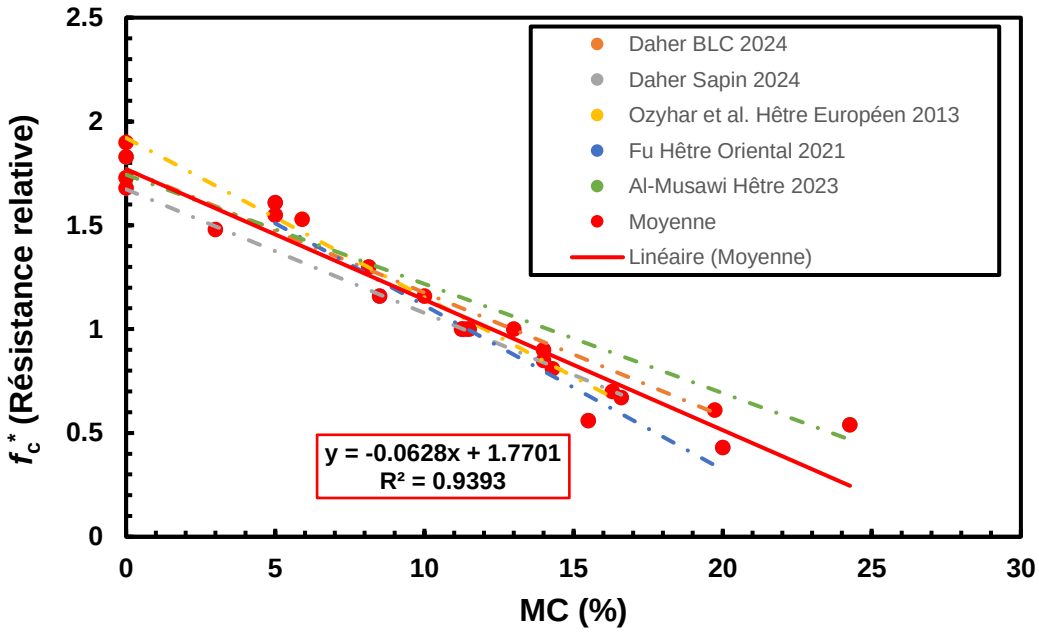


Figure 49 : Comparaison de la résistance relative à la compression à température ambiante, normalisée selon la densité et la teneur en eau initiale de 12%, en fonction de MC

6.2.2. Module d'élasticité axial

Le module d'élasticité axial présenté dans les Figures 50 et 51 indique clairement une tendance similaire à celle de la résistance en compression en fonction de l'augmentation de la teneur en eau (MC), ce qui corrobore les observations générales publiées pour le hêtre européen par Wommelsdorf (1966), Hering et al. (2012a), Ozyhar et al. (2012a) et les résultats de la littérature résumés par Gerhards (1982) (voir Annexe A. 1). Pour le bois massif et le lamellé-collé, les modules d'élasticité axiale diminuent avec l'augmentation de la teneur en eau, atteignant leurs valeurs minimales respectivement à MC=17% et MC=20%. Néanmoins, leurs valeurs maximales sont observées à MC=0%.

En comparant les deux Figures, on observe que :

- Le module d'élasticité axial du bois massif (Fig. 50) est plus élevé que celui du lamellé-collé (Fig. 51) pour des teneurs en eau comparables. Par exemple, à MC=0%, le module

d'élasticité du sapin est d'environ 6880 MPa, tandis que celui du lamellé-collé est d'environ 3280 MPa.

- Les pentes des courbes de régression linéaire montrent que la diminution du module d'élasticité en fonction de la teneur en eau est plus marquée pour le sapin ($y = -139.8x + 6854.6$) que pour le lamellé-collé ($y = -92.5x + 3620.2$). Cela signifie que le sapin perd plus rapidement de sa rigidité avec l'augmentation de la teneur en eau.

A noter que ces résultats sont calculés à partir du déplacement de la traverse de la machine d'essais.

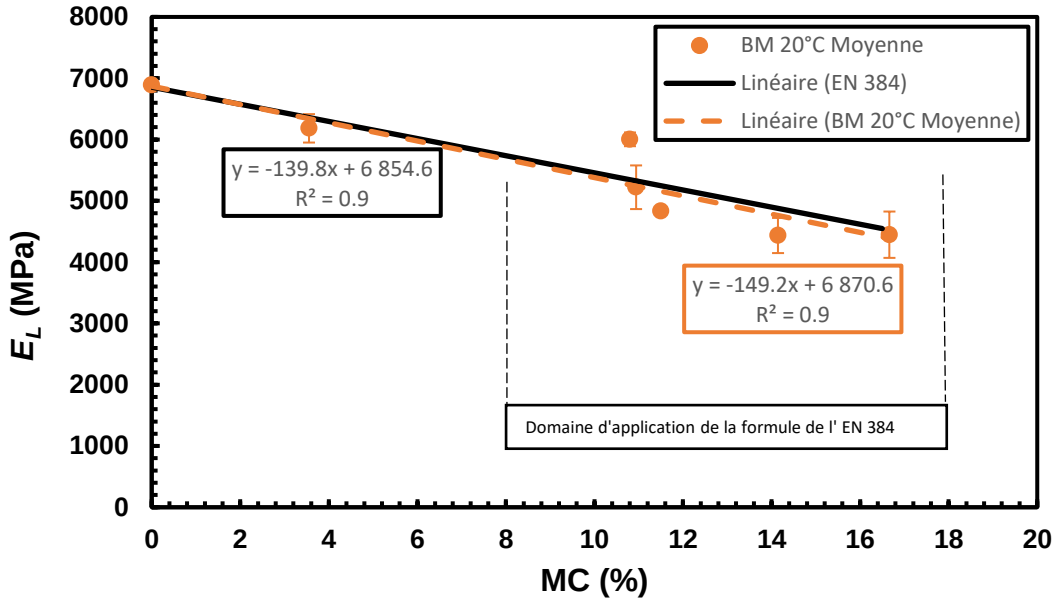


Figure 50 : Evolution du module d'élasticité axial du bois massif (sapin) en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante

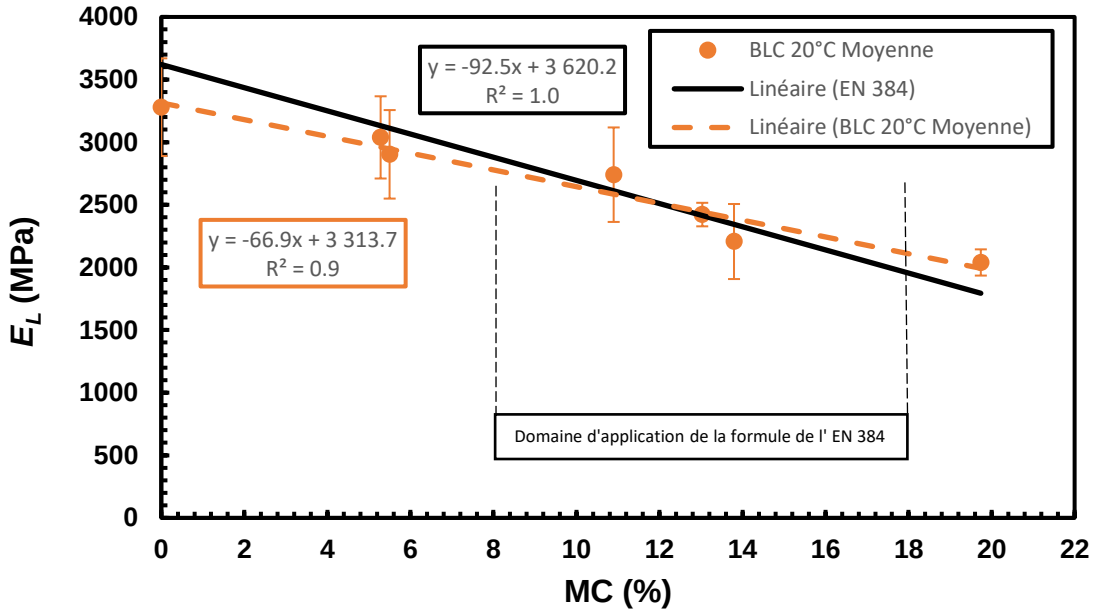


Figure 51 : Evolution du module d'élasticité axial du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante

Cette différence entre le bois massif (sapin) et le lamellé-collé (épicéa) peut être expliquée par plusieurs facteurs :

- **Nature et structure du matériau** : Le bois massif de sapin est un matériau homogène et naturel, sans adhésifs ni traitements additionnels. Sa structure cellulaire continue offre une rigidité et une résistance intrinsèques plus élevées. Les fibres du bois sont alignées de manière naturelle, ce qui contribue à une meilleure performance mécanique. En revanche, le bois lamellé-collé est composé de plusieurs lamelles collées ensemble avec des adhésifs, ce qui peut introduire des zones moins rigides entre les lamelles.
- **Présence de défauts visibles dans le lamellé-collé** : Le bois lamellé-collé contient des défauts visibles tels que des nœuds et des fissures. Ces défauts peuvent affaiblir la structure globale du matériau et réduire sa rigidité. Les imperfections dans les adhésifs et les variations dans la qualité des lamelles peuvent également contribuer à un module d'élasticité plus faible par rapport au bois massif de sapin.

Par ailleurs, la norme française NF EN 384 propose une méthode d'ajustement du module d'élasticité axial en fonction de la teneur en eau réelle (u) par rapport à une teneur en eau de référence (u_{ref}) habituellement fixée à 12%. Le module d'élasticité longitudinal de référence à 12 % est la moyenne des modules d'élasticité mesurés pour les échantillons de référence à température ambiante (20°C) dont MC est proche de 12%.

$$E_0 = E_{0,u}\left(1 + 0{,}01\left(u - u_{ref}\right)\right) \tag{28}$$

Avec :

- E_0 est le module d'élasticité ajusté à la teneur en eau de référence.
- $E_{0,u}$ est le module d'élasticité mesuré à la teneur en eau réelle (u)
- u est la teneur en humidité au moment de l'essai ($8\% \leq u \leq 18\%$)
- u_{ref} est la teneur en humidité de référence, habituellement $u_{ref} = 12\%$.

Cette formule s'applique pour une teneur en eau comprise entre 8% et 18% recommandant une correction de 1% du module d'élasticité pour chaque variation de 1% de la teneur en eau.

Les résultats obtenus dans cette étude révèlent une cohérence remarquable entre la corrélation proposée par la norme NF EN 384 et les données expérimentales obtenues pour le bois de sapin, même en dehors du domaine d'application de la formule (entre 0% et 17% de MC). En revanche, un écart est observé pour le BLC, ce qui peut s'expliquer par la présence de défauts dans ce type de matériau.

L'analyse des modules d'élasticité axial met en évidence une corrélation linéaire décroissante avec la teneur en eau (MC), comme observé pour les résistances en compression. Par ailleurs, si l'on exprime le rapport E_L/E_{L0} (sans normalisation par rapport à la densité) en fonction de MC, la régression linéaire appliquée au bois de sapin révèle une pente de 0,015 (Fig. 52). Ce résultat concorde avec la correction proposée par Guitard (1987) (voir section 3.2) pour tenir compte de l'influence de l'humidité sur le module d'élasticité axiale du bois (0,015 en compression longitudinale, pour un bois clair et une humidité homogène dans les échantillons entre 6% et 20% de MC).

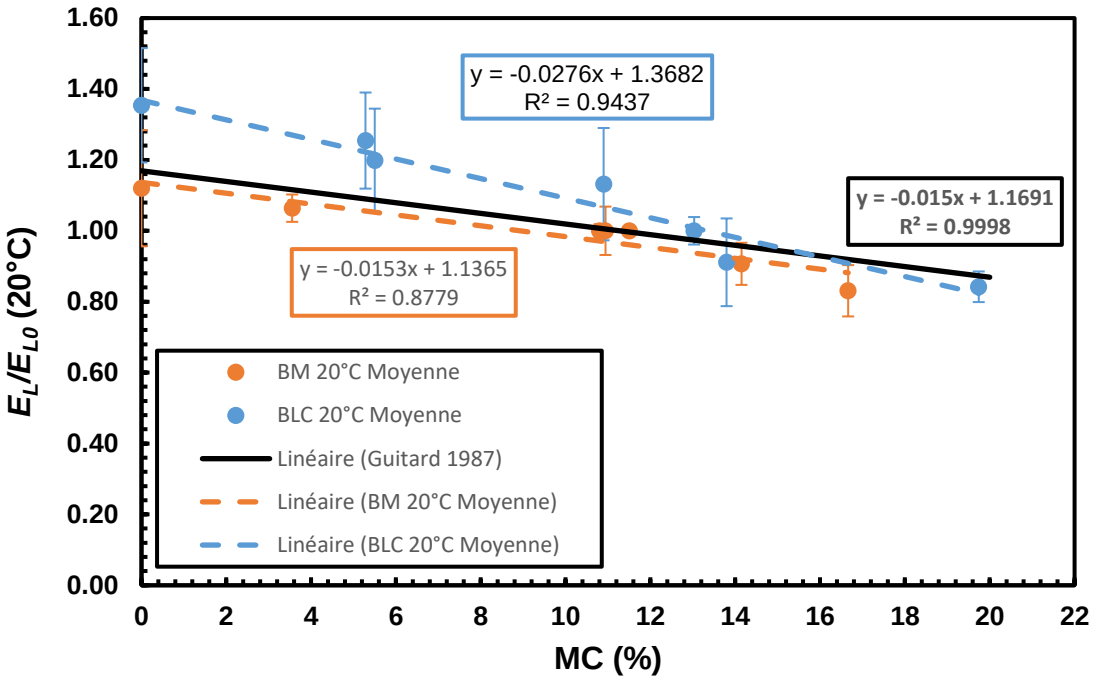


Figure 52 : Module d'élasticité axial relative à la compression à température ambiante, non normalisée par rapport à la densité, en fonction de MC

Chapitre 7

Résultats des essais à différentes températures

Ce chapitre présente l'influence de la teneur en eau et de la température sur la densité et les propriétés mécaniques du bois, en particulier la résistance en compression et le module d'élasticité axial. Il propose également le développement d'un modèle prédictif des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en eau et de la température et inclut une comparaison avec la norme NF EN 384 ainsi que les coefficients de réduction de l'EC5.

7.1. Influence de la teneur en eau et de la température sur la densité

Les Figures 53 et 54 montrent l'évolution de la densité finale normalisée par la densité initiale (ρ_u/ρ_{ref}) à trois températures différentes (20°C, 60°C et 90°C). Ces analyses permettent d'évaluer l'effet combiné de la teneur en eau, des déformations hydriques et des dilatations thermiques sur la densité du matériau.

Dans un premier temps, les densités ont été évaluées comme précédemment à partir de l'équation 21, sans tenir compte des dilatations thermiques qui sont considérées comme négligeable (Fig. 53). Ensuite pour vérifier cette hypothèse (à savoir que les dilatations thermiques sont négligeables au regard des variations dimensionnelles dues aux variations de la teneur en eau), un calcul plus complet a été réalisé en se plaçant dans un cas défavorable ; à savoir que le coefficient volumique de dilatation thermique est égal à trois fois celui selon la direction longitudinale. Ces résultats plus complets sont illustrés dans la Figure 54. Les densités ont été normalisées par rapport à la densité de référence pour s'affranchir des variabilités structurelles.

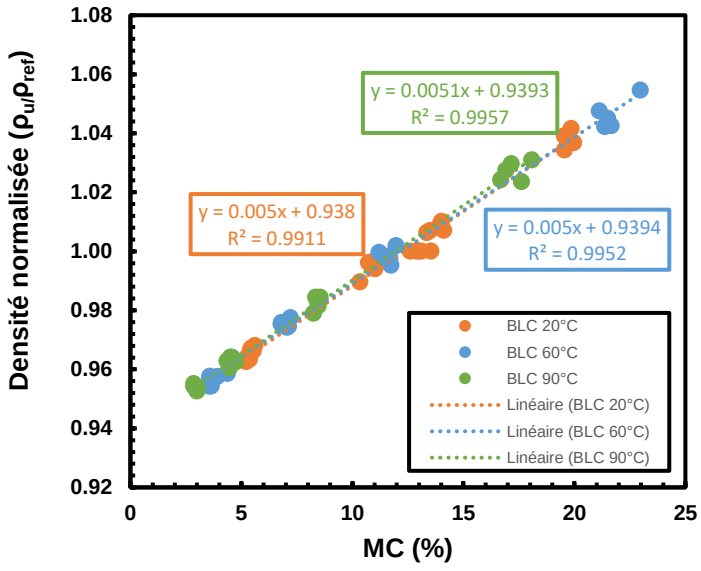


Figure 53 : Variation de la densité normalisée en fonction de MC à trois températures (20°C, 60°C et 90°C), sans prise en compte des dilatations thermiques

Les résultats de la Figure 53 montrent une relation linéaire claire entre ρ et MC pour les trois températures investiguées. Cette relation est confirmée par des coefficients de détermination (R^2) très élevés, supérieurs à 0.99 dans la majorité des cas, ce qui démontre que la teneur en eau

est le principal facteur influençant la densité normalisée. De plus, les pentes des équations linéaires obtenues sont quasi identiques et cohérentes avec celle donnée dans la norme NF EN 384 (équation 23). Ce résultat indique donc le même effet de MC sur ρ et ceci indépendamment de la température

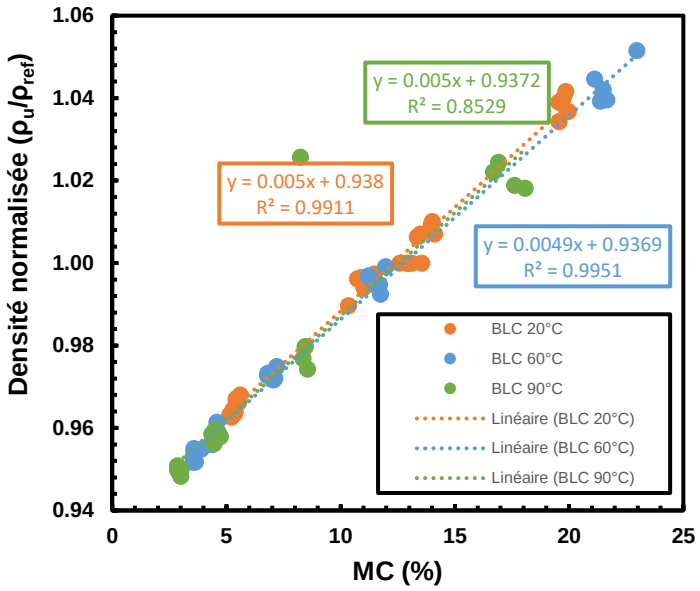


Figure 54 : Variation de la densité normalisée en fonction de MC à trois températures (20°C, 60°C et 90°C), en prenant en compte les dilatations thermiques et les déformations hydriques

Le calcul de la densité plus complet qui tient compte des dilatations thermiques confirme cette conclusion. En effet, la Figure 54, qui prend en compte les dilatations thermiques ($\alpha = 3{,}5.10^{-6}$ C^{-1}) en plus des déformations hydriques, montre que l'impact des dilatations thermiques reste globalement limité. À 20°C et 60°C, les coefficients de détermination ainsi que les équations linéaires sont pratiquement identiques à ceux présentés dans la Figure 53, suggérant une absence d'effet notable de la température sur la densité. Toutefois, à 90°C, une légère dispersion des données est observée, accompagnée d'une baisse du coefficient de détermination (R^2 = 0.853), ce qui pourrait indiquer une contribution modérée des dilatations thermiques à cette température. Ces résultats concordent avec les travaux de Bonoma et al. (2007), qui ont montré que des températures élevées (T > 80°C) peuvent influencer la densité. Cependant, ils ne sont pas en accord avec leurs observations concernant une augmentation de la densité avec l'humidité, suggérant que cet effet est moins prononcé dans nos essais.

Ces analyses confirment que, dans les conditions expérimentales de cette étude, la densité du matériau est largement dépendante de la teneur en eau et que l'effet de la température, même à 90°C, est faible. Il serait toutefois intéressant d'examiner l'effet de température plus importante (> 100°C) pour vérifier si cette tendance se maintient, comme cela a été indiqué dans l'étude bibliographique, et d'investiguer les effets des composés volatils ou des changements chimiques potentiels à des températures plus élevées.

7.2. Influence de la teneur en eau et de la température sur les propriétés mécaniques du bois

Les modèles linéaires de la norme NF EN 384 (chapitre 6) pour la correction de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en eau présentent des limitations

(Formule 26 et 27). Ils ne prennent pas en compte l'effet de la température et ne permettent pas de couvrir l'ensemble des plages de résistance. En effet, ces modèles peuvent donner des valeurs qui ne reflètent pas fidèlement la résistance réelle pour les faibles teneurs en eau et peuvent ne pas être valides pour des teneurs en eau élevées, particulièrement au-delà de 25% MC.

7.2.1. Résistance en compression

- **Etablissement d'un modèle en fonction de la teneur en eau et de la température**

L'étude présentée ici analyse l'évolution de la résistance en compression du bois lamellé-collé en fonction de la température (20-90°C) et de la teneur en eau (0-22%). Les résultats (Fig. 55) indiquent une diminution de la résistance en compression avec l'augmentation de la teneur en eau et/ou de la température. Cette tendance est observée pour toutes les températures étudiées, avec des coefficients de corrélation élevés (R^2 allant de 0,99 à 0,93).

Une relation exponentielle entre la résistance en compression et la teneur en eau est observée, avec un paramètre exponentiel (n) dépendant de la température. Ce paramètre augmente avec la température, passant de 0,048 à la température ambiante (20°C) à 0,06 à 60°C et 0,086 à 90°C. Ces résultats sont en accord avec la littérature (Al-Musawi 2023, Fu 2021 et Kollmann 1968).

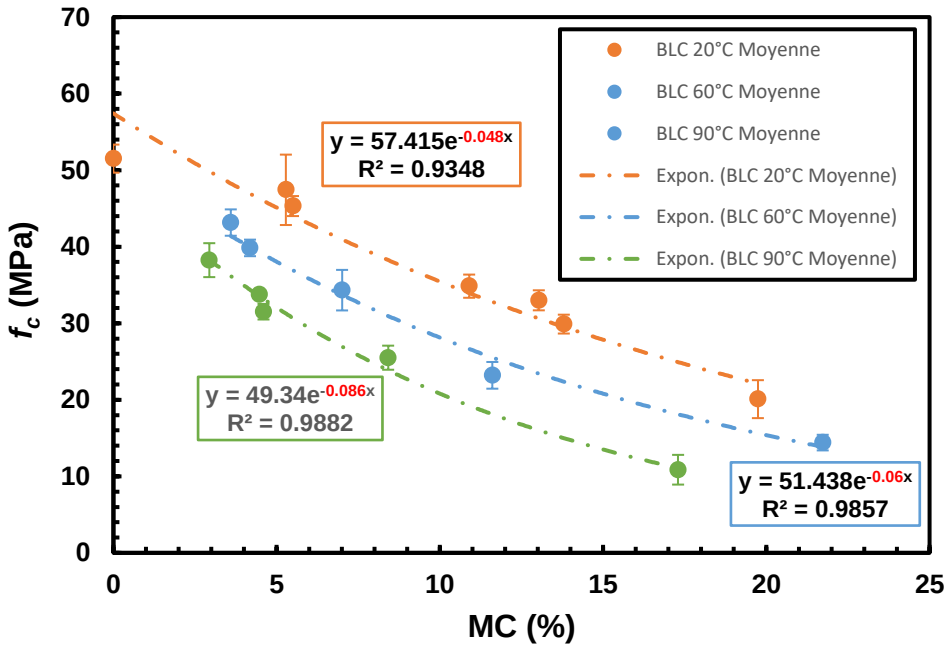


Figure 55 : Evolution de la résistance en compression du bois lamellé-collé de section S_1 en fonction de la température et de la teneur en eau

La Figure 56 illustre l'évolution du paramètre n en fonction de la température pour le BLC, bois de hêtre et le bois de bouleau (Al-Musawi 2023). La relation est quasiment linéaire, avec des coefficients de corrélation élevés (R^2 de 0,97 à 0,99). Cette relation permet d'estimer le paramètre n pour des températures non testées.

La diminution de la résistance en compression avec l'augmentation de la température s'explique par l'effet de ramollissement du bois (voir section 4).

D'après les résultats et discussions ci-dessus, et en s'appuyant sur la relation linéaire proposée par Sulzberger (1953) pour la résistance en compression de huit essences de feuillus et résineux, Al-Musawi (2023) a établi une relation exponentielle entre la résistance en compression (f_c) et la teneur en eau (MC) et la température (T) dans la plage de 0 à 150°C, exprimée par l'équation (29) :

$$f_c(MC,T) = f_c(0,T).e^{-n.MC} \quad (29)$$

Où :

- $f_c(MC,T)$ est la résistance en compression moyenne à la teneur en eau (MC) et température (T) dans la plage de 0 et 150°C.
- $f_c(0,T)$ est la résistance en compression moyenne à MC=0 à une température T spécifiée.
- n est un paramètre du matériau qui détermine le taux de diminution de la résistance en fonction de la teneur en eau (Fig. 56).
- MC est la teneur en eau du bois en pourcentage.
- T est la température d'essai du bois en °C.

Comme attendu, les paramètres matériaux, tels que le paramètre n, varient selon l'essence de bois utilisée. A l'instar de la relation entre n et la température observée pour le BLC dans cette étude, une relation linéaire semble exister entre n et la température pour le hêtre et le bouleau (Al-Musawi 2023), avec un excellent coefficient de détermination R^2 = 0,99 (Fig. 56).

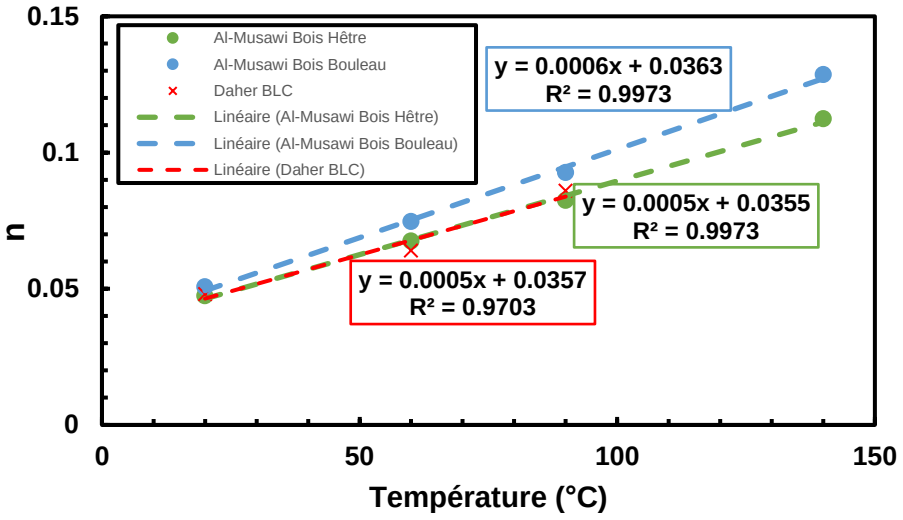


Figure 56 : Evolution du facteur n en fonction de la température

Il est important de noter que la résistance en compression (f_c) du bois sec à toute température peut être approximativement calculée à partir de sa f_c à la température de référence (20°C) en utilisant l'expression linéaire présentée dans l'équation (30) (Al-Musawi 2023) :

$$f_c(0,T) = f_c(0{,}20).[1 - P(T - 20)] \quad (30)$$

Où :

- $f_c(0{,}20)$ est la résistance en compression sèche moyenne à une température de 20°C.

- P est un paramètre du matériau qui détermine le taux de réduction de la résistance à mesure que la température augmente.

Selon Sulzberger (1953), le paramètre P peut être exprimé en fonction de la teneur en eau par l'équation suivante :

$$P_{MC} = 0{,}0033 + 0{,}04MC \quad o\grave{u} \ 0\% \leq MC \leq 16\% \tag{31}$$

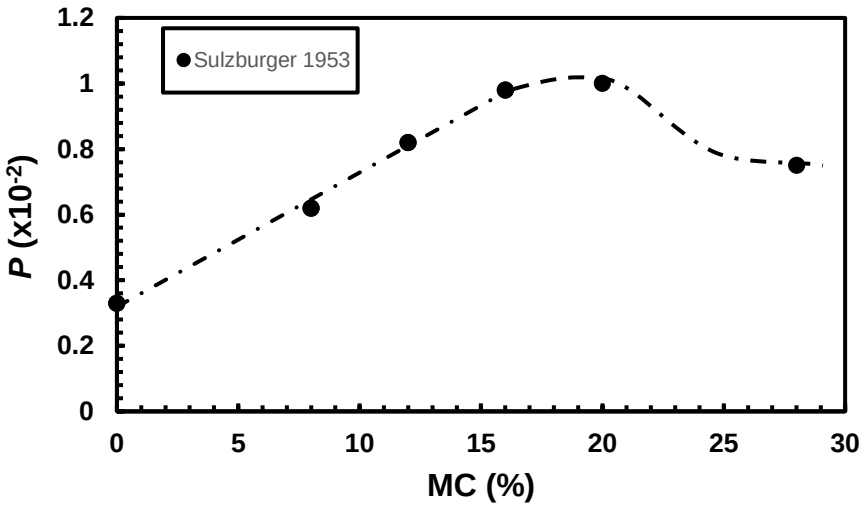


Figure 57 : Valeurs du paramètre P pour la résistance en compression des essences de bois moyennes signalées par Sulzberger (1953)

On peut observer sur la Figure 57 les valeurs de P de l'étude de Sulzberger (1953). Notamment, ce paramètre semble suivre une tendance linéaire avec des conditions d'humidité jusqu'à 16%. Ensuite, il diminue de façon curvilinéaire lorsque la teneur en eau atteint des conditions humides. Cela signifie que le taux de réduction de la résistance augmente avec la teneur en eau, puis ralentit après avoir atteint une teneur en eau de 25%.

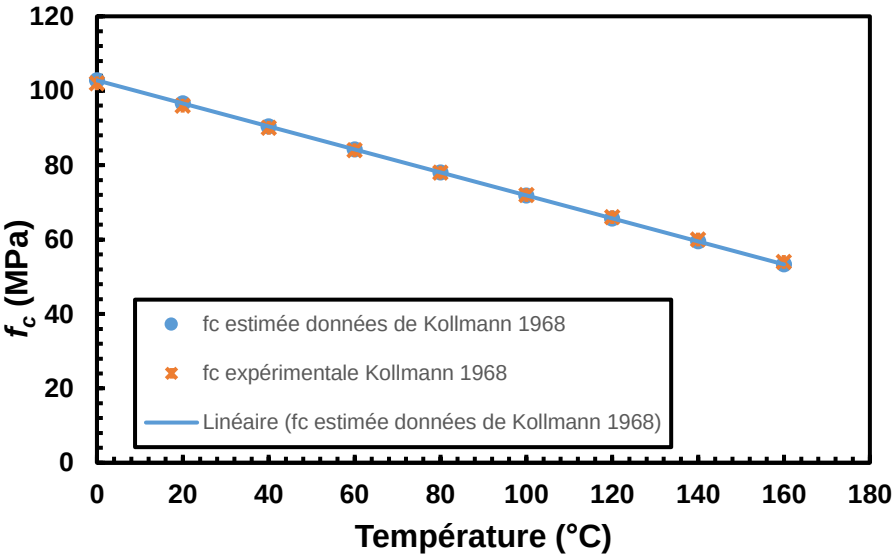


Figure 58 : Comparaison entre f_c mesurée par Kollmann (1968) et f_c estimée par l'équation 30

L'équation (30) a été appliquée aux données présentées par Kollmann (1968) pour des échantillons de hêtre sec testés en compression à des températures comprises entre 0 et 160°C.

Les résultats sont présentés sur la Figure 58 et comparés aux valeurs estimées, en utilisant P = 0,0032 et $f_c(0{,}20) = 96{,}6$ MPa (valeur interpolée à partir des données présentées par Kollmann). Comme le montre la Figure 58, la fonction linéaire (équation 30) permet de présenter les données mesurées avec une grande précision. En effet, l'écart moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées est de l'ordre de 0,41 MPa (erreur absolue moyenne, MAE), avec une erreur quadratique moyenne de 0,22 MPa² (MSE, qui est la moyenne des carrés des écarts) et une racine de l'erreur quadratique moyenne de 0,47 MPa (RMSE, qui est la racine carrée de la MSE), ce qui démontre la pertinence du modèle linéaire pour représenter les données expérimentales.

La Figure 59 montre une comparaison entre la résistance en compression f_c mesurée pour le BLC et la valeur estimée par la formule (29). La fonction exponentielle s'avère efficace pour modéliser l'influence de la teneur en eau sur la résistance en compression du BLC à toutes les températures étudiées. Pour obtenir ces estimations, la formule (29) est basée sur les valeurs de n et $f_c(0{,}20)$, déduites expérimentalement des Figures 55 et 56, ainsi que sur les valeurs estimées de P (Fig. 57). La résistance en compression $f_c(0{,}20)$ a été déterminée à partir de la formule (30), en utilisant les résultats expérimentaux obtenus sur les échantillons ayant subi un séchage à 103,5°C pendant 24 heures et mis en refroidissement ensuite jusqu'à une température de 20°C.

En appliquant ces valeurs dans la formule (29), la résistance en compression $f_c(11.6{,}60)$ est estimée à 22,3 MPa, ce qui est remarquablement proche de la valeur mesurée expérimentalement, soit 23,2 MPa. Pour les autres teneurs en eau et températures, les écarts sont cependant plus importants en lien avec la détermination de $f_c(0{,}20)$ comme discuté ci-dessous.

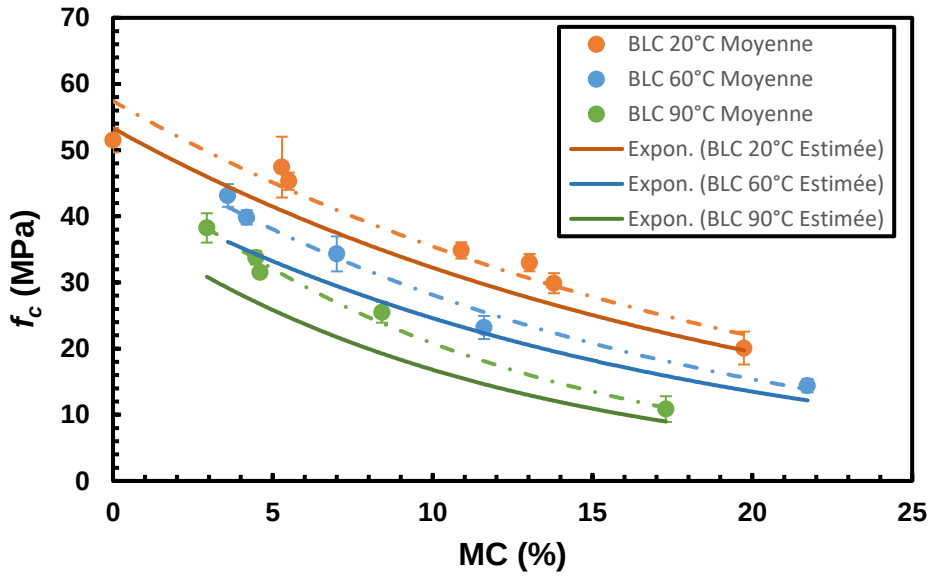


Figure 59 : Comparaison entre f_c mesurée pour le BLC et fc estimée par l'équation 29.

Pour quantifier la précision de cette estimation, nous observons les erreurs suivantes :

- À 20°C, l'erreur absolue moyenne (MAE) est de 4.04 MPa, la MSE est de 21.36 MPa², la RMSE est de 4.62 MPa, et l'erreur en pourcentage est de 10.58%.

- À 60°C, l'erreur absolue moyenne (MAE) est de 3.42 MPa, la MSE est de 14.16 MPa², la RMSE est de 3.76 MPa, et l'erreur en pourcentage est de 11.24%.
- À 90°C, l'erreur absolue moyenne (MAE) est de 4.26 MPa, la MSE est de 20.81 MPa², la RMSE est de 4.56 MPa, et l'erreur en pourcentage est de 15.52%.

Ces résultats montrent que la formule (29) offre une estimation raisonnablement précise de la résistance en compression, bien que les écarts absolus en pourcentage un décalage systématique de quelques MPa. Le décalage observé entre les valeurs mesurées et estimées peut être en effet expliqué par l'effet du séchage à 103,5°C, qui a provoqué la formation de microfissurations dans la structure du bois, entraînant ainsi une réduction de la résistance à l'état sec. Une meilleure estimation de $f_c(0{,}20)$ est donc nécessaire dans des essais futurs et pour des modélisations plus prédictives.

- **Comparaison avec la norme NF EN 384 et les coefficients de réduction de l'EC5**

Conformément à la norme NF EN 384, la résistance en compression parallèle au fil du bois déterminée par les essais doit être corrigée en fonction de la teneur en eau (MC) réelle par rapport à la MC de référence 12%. Cette correction implique une diminution de 3% de la résistance pour chaque point de pourcentage d'écart de MC.

Cependant, une comparaison entre la courbe de correction prescrite par la norme NF EN 384 et les résultats de la présente étude (Fig. 60) met en évidence une sous-estimation de l'influence réelle de la MC sur la résistance en compression parallèle au fil du bois. Autrement dit, la courbe de correction définie dans la norme NF EN 384 apparaît avec une pente trop faible et ceci en particulier pour des températures 60°C et 90°C.

Ainsi, la correction de la norme NF EN 384 s'applique uniquement pour une plage de MC comprise entre 8 et 18%, et ne prend pas en compte l'effet de la température, comme le montre clairement la Figure 60 pour les températures élevées (60°C et 90°C).

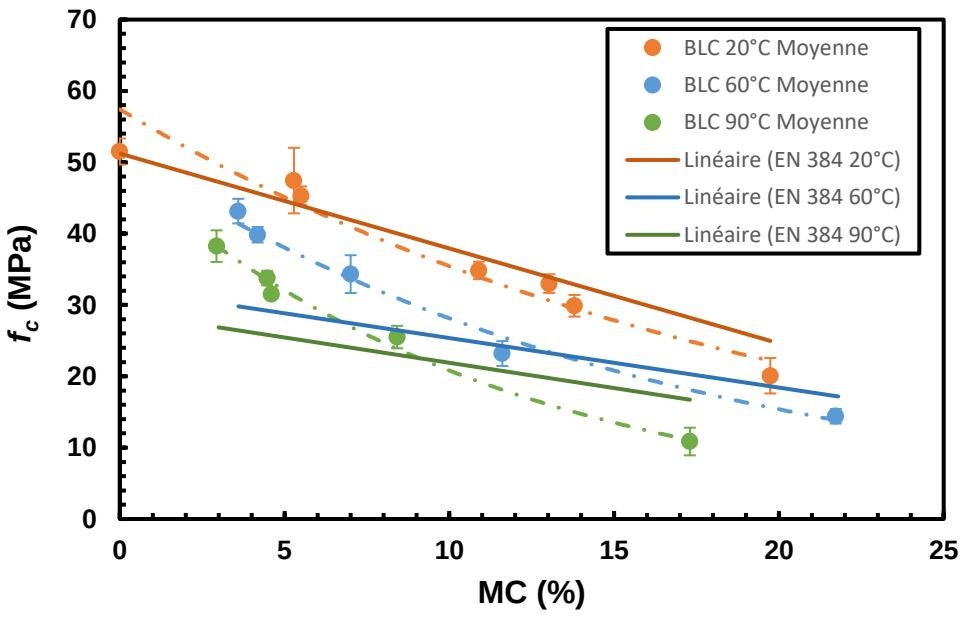


Figure 60 : Comparaison entre f_c mesurée pour le BLC et f_c estimée par la norme NF EN 384

Par ailleurs, l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2) établit des facteurs de réduction de la résistance en compression des bois résineux soumis à des températures élevées. Ces facteurs, dépendants de la température, permettent d'ajuster la résistance nominale du bois à sa résistance effective en cas d'incendie.

Dans cette étude, nous avons comparé les facteurs de réduction de l'Eurocode 5 avec ceux obtenus expérimentalement pour le bois lamellé-collé (BLC) à différentes teneurs en eau (MC) et aux trois températures d'étude (20°C, 60°C et 90°C). La comparaison s'est faite sur la base de la résistance normalisée à la température de référence (20°C). Cette normalisation permet de s'affranchir de la valeur de MC = 0% qui, si elle est mal estimée, comme précédemment expliqué, induit un décalage entre les mesures et les valeurs estimées par le modèle.

Les lignes continues présentent les données mesurées expérimentalement dans la gamme de température testée dans cette étude (jusqu'à 90°C), tandis que les lignes pointillés représentent les résistances estimées en utilisant les formules (29) et (30) et en extrapolant les valeurs de n pour des températures allant jusqu'à 200°C, en supposant que les valeurs de n continueraient à augmenter de manière linéaire avec la température.

Les résultats, présentés dans la Figure 61, indiquent donc que l'Eurocode 5 propose des facteurs de réduction généralement conservateurs et que ceux-ci sont influencés significativement par la teneur en eau des éprouvettes.

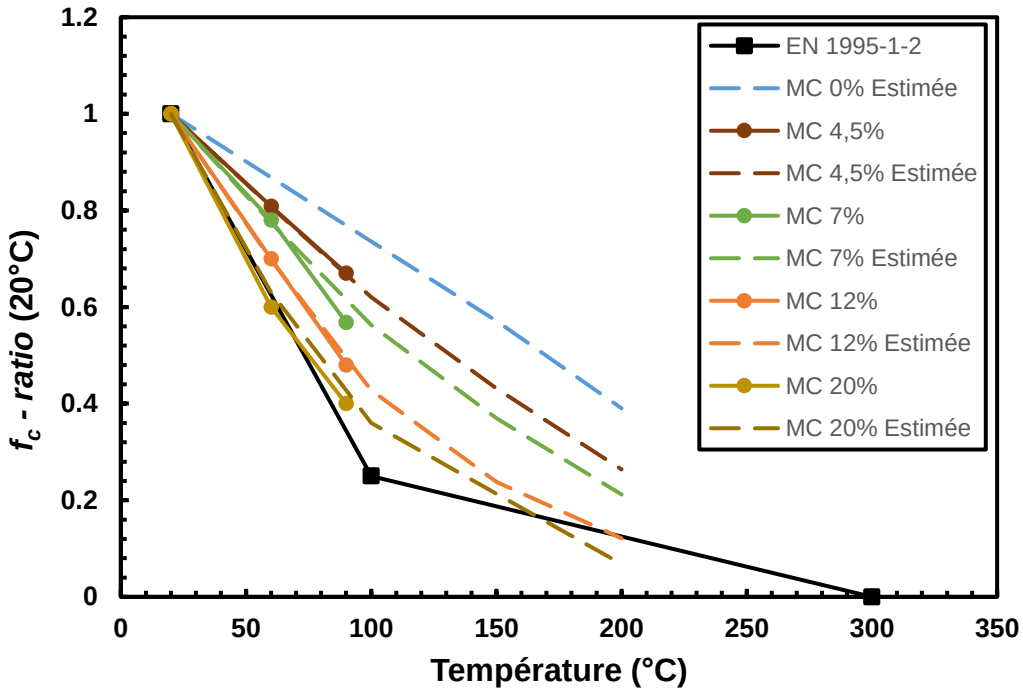


Figure 61 : Facteur de réduction pour la résistance en compression parallèle au fil des bois résineux à différentes MC

L'examen des courbes de la Figure 61 met en évidence la nécessité d'investigations supplémentaires pour :

1. Comprendre le comportement du paramètre n à des températures comprises entre 150°C et 300°C. Ce paramètre joue un rôle crucial dans la formule (29) et sa variation avec la température est encore mal comprise.

2. Etudier le comportement de la résistance en compression dans la plage de température de 150°C et 300°C. Des données expérimentales supplémentaires dans cette plage sont nécessaires pour affiner les modèles de comportement du bois à haute température.

Ces investigations permettront de tirer des conclusions définitives sur la pertinence des facteurs de réduction de l'Eurocode 5 pour le bois résineux à différentes teneurs en eau et dans une gamme de température étendue.

7.2.2. Module d'élasticité axial

- **Etablissement d'un modèle en fonction de la teneur en eau et de la température**

L'analyse de la Figure 62 révèle une relation exponentielle (similaire à celle de la résistance en compression) entre le module d'élasticité axial (E_L) du BLC et la teneur en eau (MC) et/ou la température (T). Cette tendance décroissante s'observe pour toutes les températures étudiées, comme le confirment les coefficients de corrélation élevés (R^2 entre 0,96 et 0,92).

L'effet de la température sur le module d'élasticité axial est faible pour des teneurs en eau basses, mais devient important aux teneurs en humidité plus élevées de la gamme hygroscopique. Par exemple, à 18% de MC, le module d'élasticité axial moyen à 90°C est de 51% de sa valeur à 20°C. Ces résultats sont en accord avec les données de Sulzberger (1953).

Le paramètre n, caractérisant cette relation exponentielle, augmente avec la température, passant de 0,026 à température ambiante (20°C) à 0,032 à 60°C et 0,072 à 90°C.

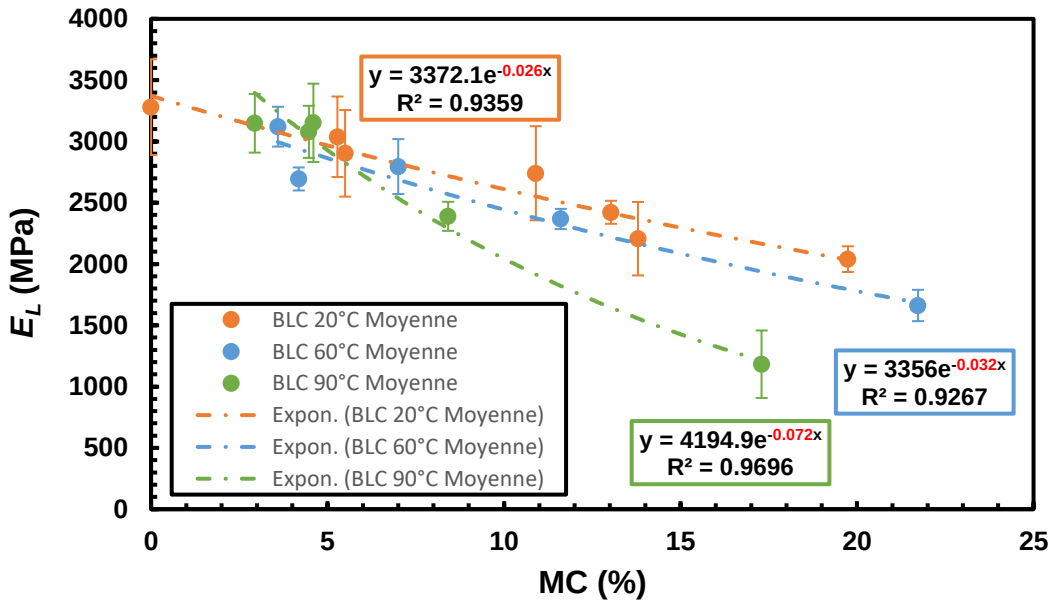


Figure 62 : Evolution du module d'élasticité axial du bois lamellé-collé de section S_1 en fonction de la température et de la teneur en eau

En s'appuyant sur les relations (29) et (30), et en substituant la résistance en compression (f_c) par le module d'élasticité axial (E_L), on obtient les équations (32) et (33) :

$$E_L(MC,T) = E_L(0,T).e^{-n.MC} \quad (32)$$

Où :

- $E_L(MC,T)$ est le module d'élasticité axial moyen à la teneur en eau (MC) et température (T) dans la plage de 0 et 150°C.
- $E_L(0,T)$ est le module d'élasticité axial moyen à MC=0 à une température T spécifiée.

$$E_L(0,T) = E_L(0{,}20).[1 - P(T-20)] \quad (33)$$

Où :

- $E_L(0{,}20)$ est le module d'élasticité axial à une teneur en eau de 0% et à une température de 20°C.

Sulzberger (1953) propose des valeurs de P pour le module d'élasticité axial exprimée par la formule (34) :

$$P_{MC} = 0{,}00176 + 0{,}036MC \quad \text{où } 8\% \leq MC \leq 20\% \quad (34)$$

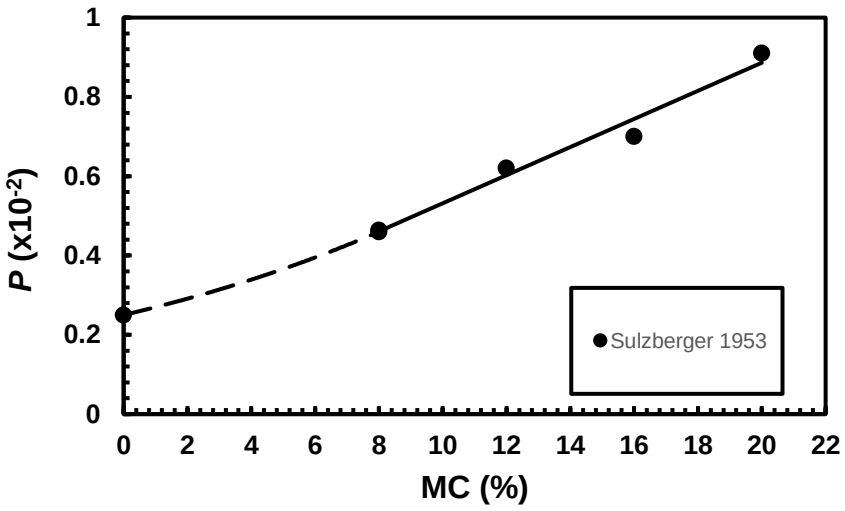


Figure 63 : Valeurs du paramètre P pour le module d'élasticité axial des essences de bois moyennes signalées par Sulzberger (1953)

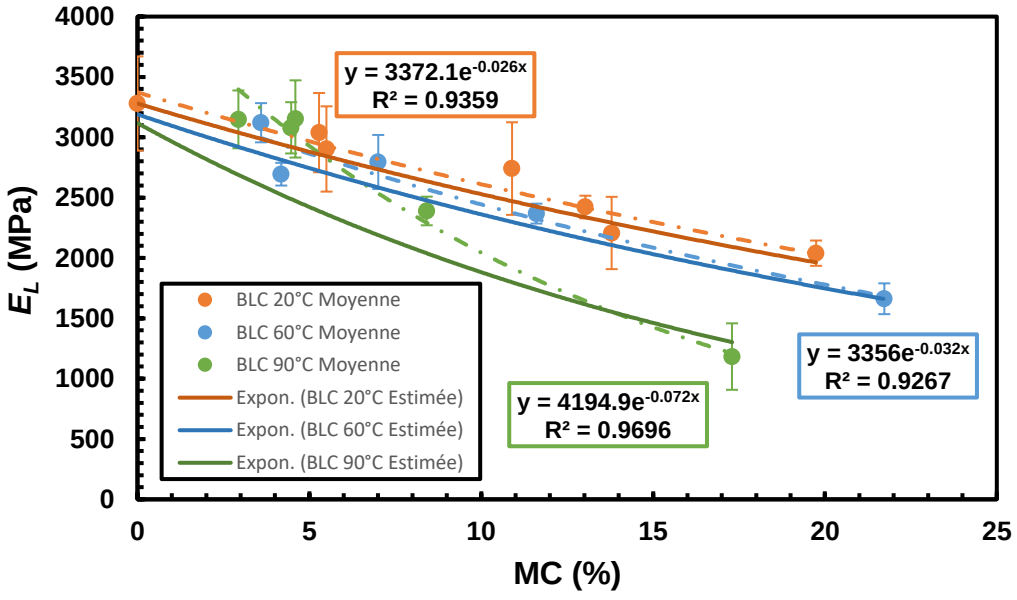


Figure 64 : Comparaison entre E_L mesurée pour le BLC et E_L estimée par l'équation 32

La Figure 64 compare les valeurs mesurées E_L pour le BLC à celles estimées par la relation proposée dans cette étude (Equation 32) et selon la même méthodologie que pour la résistance en compression. La fonction exponentielle de l'équation 32 s'avère efficace pour capturer l'effet de la teneur en eau sur le module d'élasticité axial du BLC à toutes les températures étudiées.

Cependant, à 90°C, un écart est observé entre les valeurs mesurées et estimées pour des teneurs en eau inférieures à 8%. Ce comportement peut s'expliquer par les limites du domaine d'application du paramètre P défini dans l'équation 34.

- **Comparaison avec les coefficients de réduction de l'EC5**

L'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2) donne des facteurs de réduction pour le module d'élasticité axial des bois résineux exposés à des températures élevées. Ces facteurs, dépendent de la température et permettent d'ajuster le module nominal du bois à son module effectif en cas d'incendie.

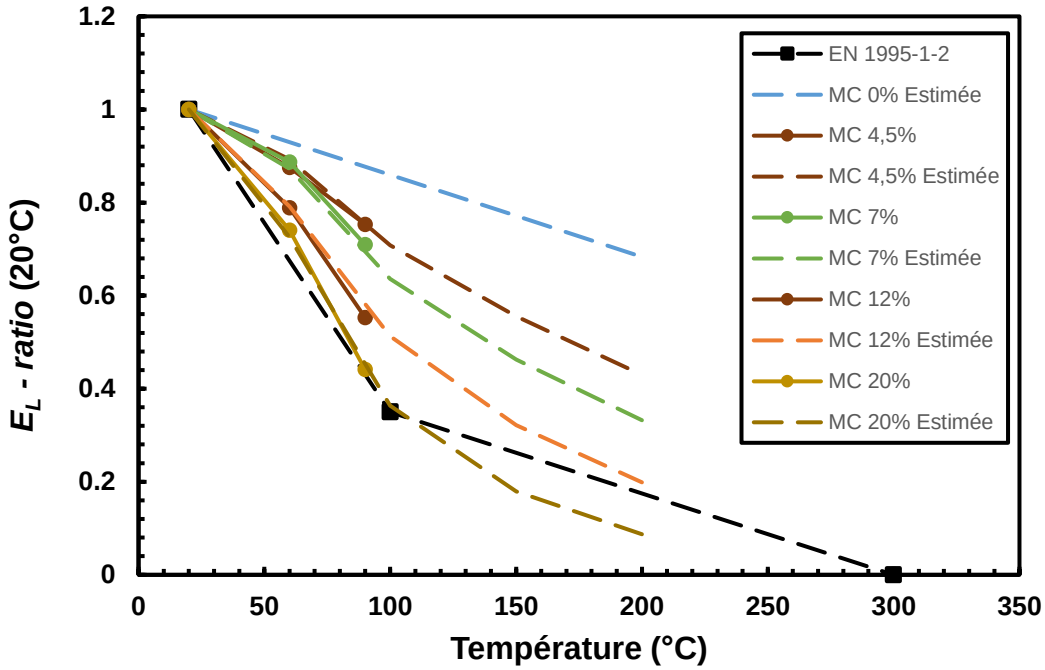


Figure 65 : Facteur de réduction pour le module d'élasticité axial parallèle au fil des bois résineux à différentes MC

La comparaison a été réalisée sur la base des modules normalisés à la température de référence (20°C). Les données expérimentales ont été obtenues pour des températures allant jusqu'à 90°C, tandis que les valeurs pour des températures plus élevées (jusqu'à 200°C) ont été estimées par extrapolation linéaire du paramètre n.

Les résultats, présentés dans la Figure 65, indiquent que l'Eurocode 5 propose généralement des facteurs de réduction conservateurs. Cependant, il est important de souligner que la dépendance du facteur de réduction vis-à-vis de la teneur en eau est notable. De plus, pour des températures supérieures à 100°C et des teneurs en eau supérieures à 20%, les facteurs de réduction de l'Eurocode 5 peuvent devenir non conservateurs.

L’observation d’une non-concordance entre les facteurs de réduction de l’Eurocode 5 et les données expérimentales pour des températures et des teneurs en eau élevées suggère que la formulation actuelle de l’Eurocode 5 pourrait nécessiter un ajustement pour mieux refléter le comportement réel du bois dans ces conditions. La prise en compte explicite de la teneur en eau dans les facteurs de réduction pourrait améliorer la précision de l’évaluation des propriétés mécaniques du bois en cas d’incendie.

Conclusion Partie 2 – Section A

Cette partie a permis d'explorer l'impact des variations de teneur en eau et de température sur les propriétés mécaniques et physiques du bois massif et du lamellé-collé (en absence de gradients hydrique et thermique). Les résultats obtenus à température ambiante et à des températures élevées ont fourni des informations précieuses sur l'évolution de la densité, de la résistance en compression et du module d'élasticité axial en fonction de ces deux paramètres critiques.

À température ambiante, une relation linéaire a été observée entre la densité et la teneur en eau pour les deux types de bois, soutenue par des coefficients de corrélation élevés. Ces résultats démontrent que la teneur en eau est un facteur déterminant de la densité du bois, tant pour le bois massif que pour le lamellé-collé, bien que ce dernier montre une sensibilité légèrement plus prononcée. Par ailleurs, la résistance à la compression et le module d'élasticité axial diminuent de manière significative avec l'augmentation de la teneur en eau, conformément aux tendances rapportées dans la littérature scientifique. Cette diminution est plus marquée pour le bois massif en raison de sa structure homogène, alors que les défauts présents dans les échantillons de lamellé-collé influencent ses performances mécaniques de façon plus variable.

Les essais réalisés à des températures plus élevées ont révélé des comportements similaires, avec une réduction continue des propriétés mécaniques à mesure que la température et la teneur en eau augmentent. La relation exponentielle observée entre la résistance en compression et la teneur en eau à des températures élevées met en lumière l'effet combiné de ces deux facteurs sur les performances du bois. En ce qui concerne la densité, les résultats ont montré une stabilité relative avec des variations thermiques modérées, bien que des légères diminutions aient été observées à des températures très élevées (90°C), en raison de l'effet de dilatation thermique. Cette évolution a toutefois confirmé que la densité reste principalement dépendante de la teneur en eau, même à des températures élevées, avec un effet marginal de la température elle-même dans les conditions testées. Les modèles proposés dans cette étude, notamment pour la prédiction des résistances en compression et des modules d'élasticité axial à différentes températures, montrent une bonne corrélation avec les données expérimentales.

Enfin, en comparant les résultats expérimentaux avec les facteurs de réduction de l'Eurocode 5, il est apparu que ces derniers, bien qu'établis de manière conservatrice, ne prennent pas en compte l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques du bois. Une correction explicite des facteurs de réduction en fonction de l'humidité pourrait améliorer la précision de l'évaluation des performances mécaniques en conditions de température élevée, notamment dans les scénarios d'incendie.

Section B : Essais de compression avec gradient thermiques et hydriques

Dans un premier temps, nous présentons les matériaux et les différents protocoles expérimentaux mis en place afin d'étudier l'effet des gradients thermiques et hydriques sur le comportement mécanique du bois (chapitre 8). Le chapitre 9 est consacré à la présentation des résultats d'une étude comparative portant sur le séchage du bois dans des conditions distinctes (protocoles P_{1bis} et P_2) en employant des techniques de séchage à basse et haute températures. Le chapitre 10 présente les résultats de compression sur le bois lamellé-collé pour étudier l'effet immédiat et l'effet permanent de la température avec différentes durées d'étuvage (protocoles P_3 et P_4). On terminera enfin cette section sur une conclusion générale synthétisant les différents résultats obtenus.

Chapitre 8

Matériaux et Méthodes

Dans ce chapitre nous présentons l'essence de bois utilisé pour étudier l'effet des gradients thermiques et hydriques sur le comportement mécanique du bois, les différentes sections avec leurs caractéristiques spécifiques, la méthode de mesure des profils thermiques, ainsi que les différents protocoles expérimentaux adoptés.

8.1. Matériaux d'étude

8.1.1. Prélèvement des éprouvettes

Parallèlement aux essais de compression sans gradients thermiques et hydriques (section A), des essais de compression avec gradients thermiques et hydriques sur du bois d'épicéa, et plus précisément sur du lamellé-collé GL24h, ont été menés. Les éprouvettes, de dimensions 50x50x100 mm^3, 97x92x200 mm^3 et 187x198x400 mm^3, désignées respectivement par S_1, S_2 et S_3 (Fig. 66), ont été prélevées à partir de poutres en lamellé-collé de dimensions 187x198x3000 mm^3. La découpe des éprouvettes a été réalisée à l'aide de la même scie électrique employée pour les essais de compression sans gradient thermiques et hydriques (Fig. 39).

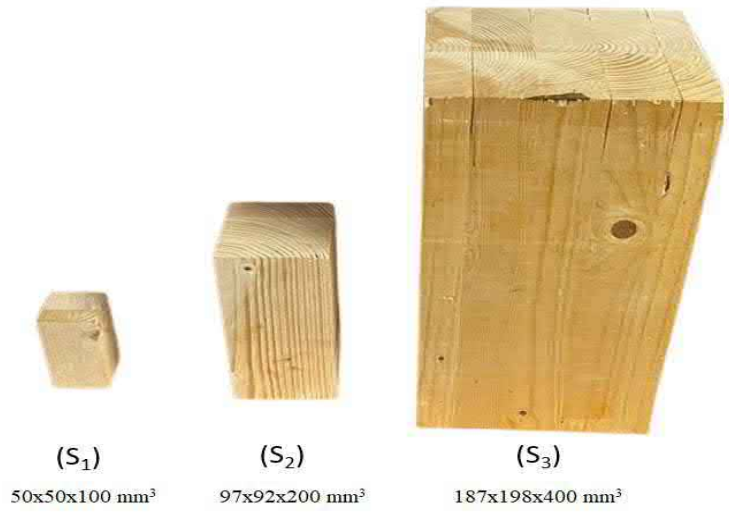


Figure 66 : Photos des différentes sections (S_1, S_2 et S_3) du lamellé-collé découpé

Des défauts, sous forme de fissures et de nœuds, ont été observés sur les éprouvettes découpées. Ces défauts sont clairement visibles sur la Figure 66. Plus la section des éprouvettes est grande, plus le nombre et la sévérité des fissures et des nœuds sont importants.

Les éprouvettes découpées ont ensuite été entreposées dans une chambre climatique à température contrôlée de 20 (±1) °C et à une humidité relative (HR) de 65 (±5) % afin d'obtenir une teneur en humidité homogène de 12% dans les échantillons.

8.1.2. Caractéristiques des éprouvettes

Le Tableau 12 présente les données de résistance, de densité et de teneur en eau initiales des échantillons de référence à 20°C pour les trois sections étudiées S_1, S_2 et S_3.

Les échantillons présentent des résistances en compression équivalentes à la température ambiante (Tableau 12), ce qui peut s'expliquer par une compensation entre les effets de la densité et de la teneur en eau et ceci malgré le nombre et la sévérité des défauts croissants avec la taille des échantillons. Les écarts-types relatifs de la teneur en eau du bois varient entre 0 et 0,7%, tandis que ceux concernant la densité, mesurées à une humidité relative de 65%, demeurent inférieures à 0,02%. La mesure de la teneur en eau du bois (MC) a été initialement déterminée à l'aide d'un hygromètre à pointe.

SECTION	MC%	DENSITE (g/cm3)	RESISTANCE (MPa)
S1	12 +/- 0,1	0,41 +/- 0,1	35 +/- 2
S2	11,7 +/- 0,7	0,43 +/- 0,2	35 +/- 2
S3	11,4 +/- 0,2	0,45 +/- 0,1	35 +/- 2

Tableau 12 : Données pour les essais de référence à température ambiante et pour les 3 sections étudiées dans les conditions initiales (65% HR)

8.1.3. Mesure des profils de température

La température au sein des échantillons a été mesurée à l'aide de thermocouples de type K d'un diamètre 1 mm. Ce type de thermocouple offre une large plage de mesure de température, allant jusqu'à 1000°C, avec une précision de ± 1,5°C, parfaitement adaptée à l'étude en cours. Le signal électrique délivré par les thermocouples a été traité par une unité d'acquisition de données reliée à un ordinateur, comme illustré sur la Figure 67.

Figure 67 : Acquisition des données des Thermocouples

Figure 68 : Positionnement des thermocouples à mi-épaisseur

Afin d'évaluer le profil de température dans les échantillons, trois thermocouples ont été positionnés le long de leur hauteur à mi-épaisseur, comme le montre la Figure 68. Deux thermocouples ont été placés aux extrémités des échantillons (à une distance de 1,5 cm du bord pour la section S_1, de 2 cm pour S_2 et de 5 cm pour S_3) , tandis qu'un troisième a été positionné en leur centre. Les trous percés pour l'insertion des thermocouples ont ensuite été soigneusement comblés avec de l'isolant Isofrax afin d'éliminer tout effet parasite potentiel lié à leur présence.

8.1.4. Essais mécaniques

Les essais de compressions ont été réalisés à l'aide d'une machine électromécanique de traction-compression d'une capacité de 5000 KN (Fig. 69). La machine a été utilisée en mode compression avec des plateaux en acier, l'un des plateaux étant rotulé et l'autre fixe. Le plateau rotulé permet de compenser les éventuelles imperfections de parallélisme des surfaces de contact des échantillons, assurant ainsi une distribution uniforme de la charge. La machine était connectée à un ordinateur équipé d'un logiciel dédié permettant de piloter la machine et d'acquérir les données brutes des essais. Il est important de souligner que la vitesse de déplacement de la traverse de la machine était de 0,02 mm/s, ce qui correspond à la vitesse utilisée pour les essais sans gradients thermiques et hydriques (section A).

On mesure la force en fonction du déplacement de la traverse. À partir de ces données, on peut déterminer plusieurs paramètres importants : la résistance maximale en compression, qui correspond à la force maximale que l'échantillon peut supporter avant de céder, et le module d'élasticité longitudinal, qui est calculé en analysant la relation entre la force appliquée et le déplacement de la traverse dans la phase élastique de la compression. Comme explicité pour les essais mécaniques dans la section A, les valeurs de E_L mesurées sont inférieures aux valeurs réelles, car elles sont dérivées des déplacements enregistrés par la traverse de la machine d'essai. Ainsi, les modules d'élasticité obtenus ne correspondent pas aux valeurs intrinsèques du matériau, mais représentent une approximation influencée par la méthode de mesure.

Une étuve à température contrôlée située à proximité de la presse a été utilisée pour chauffer les échantillons avant les essais de compression (Fig. 70). Cette étuve, de marque France Etuves série XUE686, peut atteindre des températures allant jusqu'à 250°C. Une fois chauffés selon les protocoles définis (voir section 8.2), les échantillons ont été transférés de l'étuve à la presse dans un délai maximum de 15 secondes afin de minimiser le refroidissement avant la réalisation des essais mécaniques.

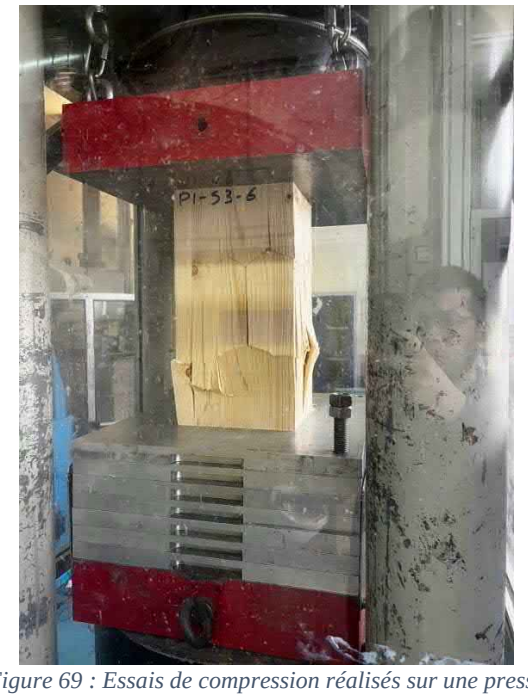


Figure 69 : Essais de compression réalisés sur une presse électromécanique de capacité 5000 KN

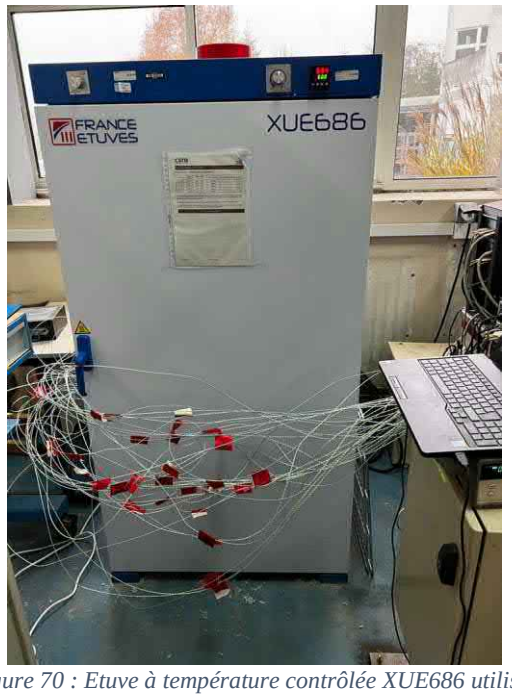


Figure 70 : Etuve à température contrôlée XUE686 utilisée pour l'échauffement des échantillons

8.2. Protocoles expérimentaux

Afin d'étudier le comportement mécanique du bois en compression dans des conditions variées de températures, d'humidité et de géométrie, plusieurs protocoles expérimentaux ont été élaborés. Ces protocoles visaient à analyser l'influence de gradients thermiques et/ou hydriques sur la résistance en compression du bois.

- Protocole P_1 : Essais initiaux à la température ambiante

Le protocole P_1 a servi de référence en réalisant des essais de compression à température ambiante (20°C) dans deux états hydriques distincts : l'état initial avec une teneur en eau d'environ 12% et l'état sec après étuvage à 103,5°C et refroidissement jusqu'à 20°C. Cinq essais ont été effectués pour chaque état hydrique afin de garantir la fiabilité des résultats.

- Protocole P_{1bis} : Essais pour une même perte de masse et différentes températures

Le protocole P_{1bis} vise à analyser l'effet de la température sur la résistance en compression en considérant une perte de masse relative constante de 10% pour les trois sections d'échantillons (S_1, S_2 et S3). Des pesées régulières ont été effectuées durant l'échauffement des échantillons jusqu'à atteindre la perte de masse cible. Cinq essais ont été réalisés par section et par température (60°C, 100°C, 150°C et 200°C) pour assurer la fiabilité des données. Deux essais par section et par température ont été instrumentés avec des thermocouples pour mesurer le profil de température au sein des échantillons.

- Protocole P_2 : Essais sans gradients thermiques et avec différentes pertes de masse

Le protocole P_2 explore l'influence de la perte de masse sur le comportement mécanique du bois à température homogène. Des essais de compression ont été réalisés à différentes températures (60°C, 100°C, 150°C et 200°C) pour chaque section (S_1, S_2 et S_3), en maintenant une température homogène tout le long de la hauteur de l'échantillon. La température homogène a été obtenue en suivant attentivement les données des thermocouples et en ajustant le temps d'étuvage. Cinq essais ont été réalisés par section et par température, dont trois équipés de thermocouples pour une validation précise de l'homogénéité de la température.

- Protocole P_3 : Essais à différentes températures et différentes durées d'échauffement

Le protocole P_3 examine l'effet de la durée d'échauffement sur le comportement mécanique du bois à différentes températures. Des essais de compression ont été effectués à des températures allant de 60°C à 250°C pour chaque section (S_1, S_2 et S_3), avec des durées d'échauffement variables (15, 25, 40, 50 et 60 minutes). Un seul essai a été réalisé par section, par température et par durée, équipé de thermocouples pour une mesure précise de la température.

- Protocole P_4 : Essais de réversibilité vis-à-vis de la température

Le protocole P_4 évalue la réversibilité du comportement mécanique du bois après un cycle de chauffage et de refroidissement. Cinq échantillons de section S_1 ont été chauffés à des températures spécifiques (60°C, 100°C, 150°C et 250°C) pendant 60 minutes, puis refroidis pendant 24 heures avant d'être soumis à des essais de compression. Cette procédure permet d'analyser la capacité du bois à retrouver ses propriétés mécaniques initiales après un changement de température.

Chapitre 9

Résultats des essais des protocoles P_{1bis} et P_2

Dans le cadre de ce chapitre, nous présentons les résultats d'une étude comparative portant sur le séchage du bois dans des conditions distinctes (P_{1bis} et P_2) en employant des techniques de séchage à basse et haute température. Les données expérimentales recueillies permettront d'analyser l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques du bois séché, en mettant l'accent sur sa teneur en eau finale, ses propriétés mécaniques et son aspect visuel.

9.1. Données des Thermocouples

Comme mentionné dans la section 9.2, le protocole P_{1bis} visait à fixer une perte de masse relative de 10% pour les trois sections d'échantillons (S_1, S_2 et S_3) en faisant varier la température (60°C, 100°C, 150°C et 200°C). En revanche, le protocole P_2 visait à maintenir une température homogène tout au long de la hauteur des échantillons. La Figure 71 illustre les données des thermocouples pour la section S_3 selon les protocoles P_{1bis} et P_2 à 150°C.

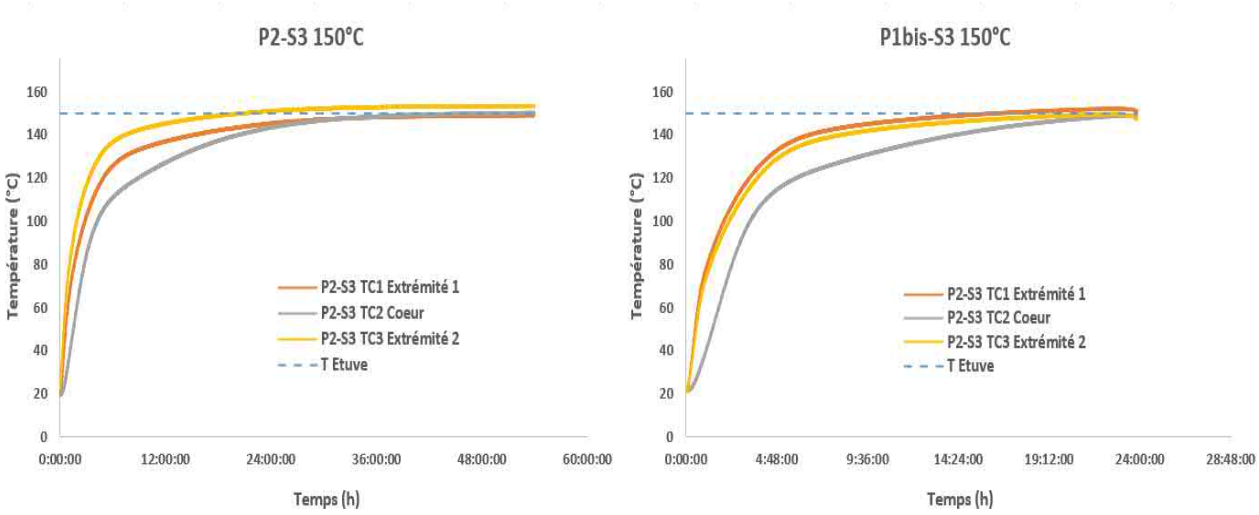


Figure 71 : Données TC pour les protocoles P_2 et P_{1bis} pour la section S_3 à 150°C

Les analyses ont révélé une distribution homogène de la température sur toute la hauteur des échantillons après 48 heures de traitement thermique pour le protocole P_2. En revanche, pour le protocole P_{1bis}, une durée de 24 heures a été suffisante pour atteindre une perte de masse relative de 10%, avec des températures qui peuvent être considérées comme homogènes sur toute la hauteur de la section. Des observations similaires ont été constatées pour les autres sections et pour chaque température (voir Annexe A. 2). En conséquence, l'absence de gradients thermiques a été confirmé pour les protocoles P_{1bis} et P_2.

Concernant les gradients hydriques, aucune mesure expérimentale directe n'a pu être réalisée en raison des difficultés liées à l'introduction de capteurs dans les échantillons, particulièrement à des températures élevées, la plupart des capteurs ne supportent pas de telles conditions. Par conséquent, les gradients hydriques ont été estimés à partir des masses des échantillons avant et après séchage, en corrélant les teneurs en eau initiales et finales avec les durées d'étuvage.

Il est important de noter que la résistance maximale des échantillons pour les 2 protocoles a été atteinte avec une température uniforme sur la toute hauteur de l'échantillon (Fig. 72). Cette

observation confirme le respect rigoureux des conditions expérimentales définies pour le protocole P_2. Des constatations similaires ont été faites pour les autres sections et pour chaque température appliquée.

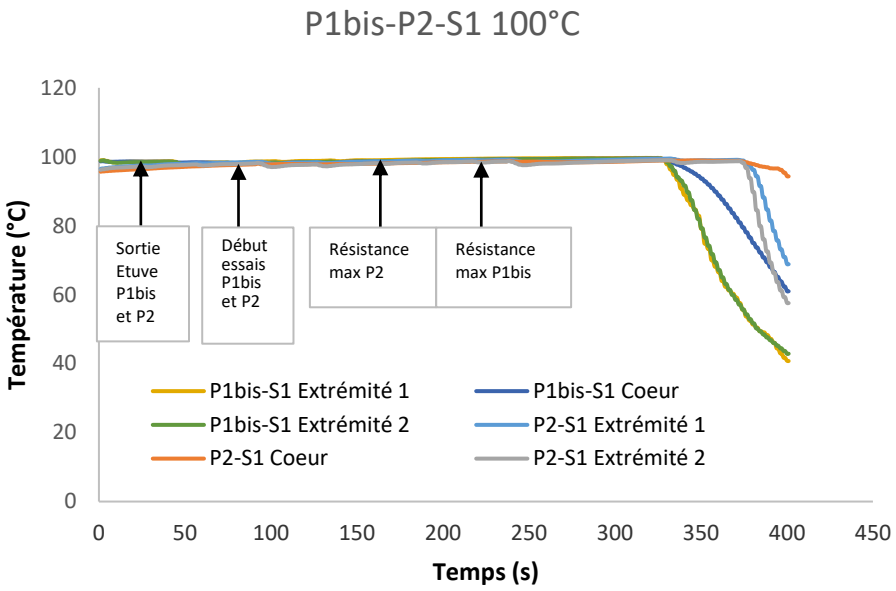


Figure 72 : Données des thermocouples lors de l'essais de compression pour le protocole P_{1bis} et P_2 pour la section S_1 à 100°C

9.2. Impact du séchage de l'eau sur le profil thermique du bois

L'analyse bibliographique a révélé que l'eau présente dans le bois se manifeste principalement sous deux formes : l'eau libre et l'eau liée. L'eau libre, contenue dans les cavités cellulaires, est la première à s'évaporer sous l'effet de la chaleur. En revanche, l'eau liée, adsorbée dans les parois cellulaires, commence à se libérer à des températures inférieures à 100°C. À ce stade, les liaisons hydrogènes qui retiennent l'eau dans les parois cellulaires se rompent de manière plus significative, facilitant l'évaporation (Siau, 1995). Ce phénomène ralentit l'élévation de la température du matériau, comme l'illustrent clairement les courbes des Figures 73 et 74 en réalisant un zoom sur les premières heures de l'étuvage. Ces courbes illustrent le ralentissement de la température au cœur des échantillons par rapport à leurs extrémités lors du chauffage des différentes sections à des températures élevées. On observe ici le phénomène de palier de température à 100°C dans le bois, déjà évoqué dans la partie 4.3 (Fig. 28). Les courbes indiquent également que le palier de température varie en fonction de la position des thermocouples et est d'autant plus marqué que l'épaisseur des échantillons est importante. L'observation d'un palier de température plus marqué pour les échantillons épais confirme l'effet indirect de l'épaisseur du bois sur sa teneur en eau et la répartition de la chaleur lors du séchage.

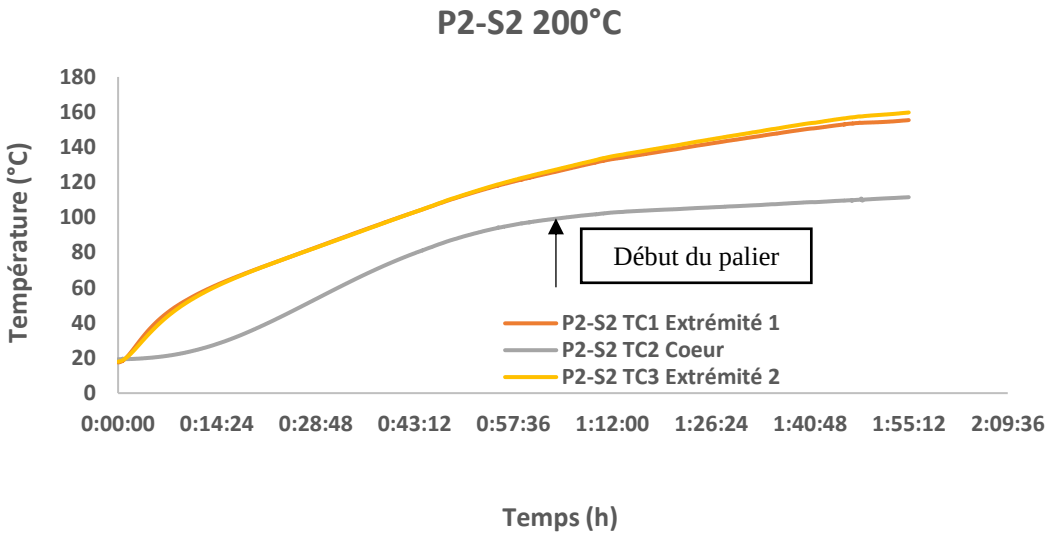


Figure 73 : Palier de température 100°C au cœur durant l'échauffement à 200°C des échantillons S_2 pour le protocole P_2

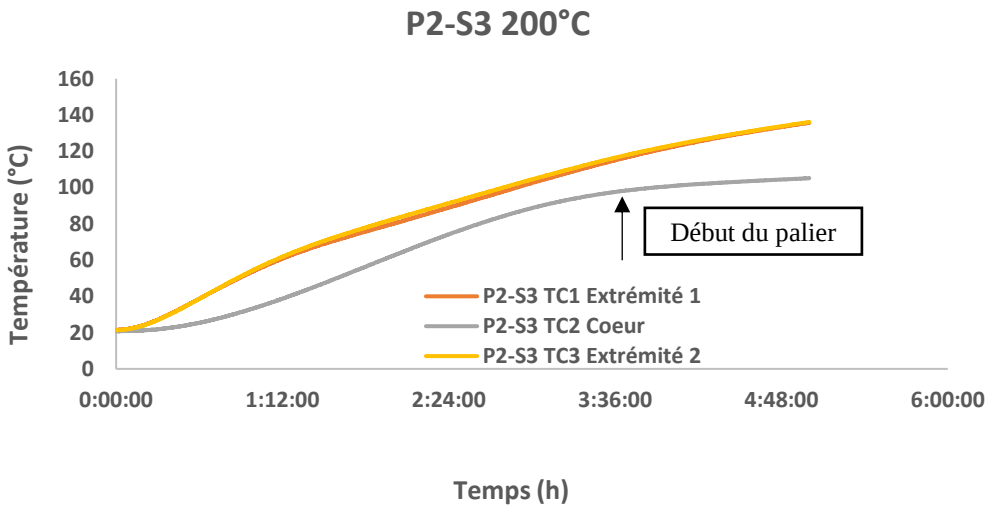


Figure 74 : Palier de température 100°C au cœur durant l'échauffement à 200°C des échantillons S_3 pour le protocole P_2

9.3. Perte de masse et teneur en eau finale

L'évolution des pertes de masse des échantillons de lamellé-collé d'épicéa de différentes sections a été étudiée en fonction de la température, de la durée d'étuvage et de la teneur en eau finale (Tableau 13). Dans le cadre du protocole P_{1bis}, une perte de masse de 10% ± 0,5 a été systématiquement obtenue pour les trois sections, avec des durées d'étuvage variables en fonction de l'épaisseur des échantillons (dépendance positive entre l'épaisseur et le temps de séchage). L'analyse comparative des résultats des deux protocoles pour la section S_1 (Fig. 75) révèle que la perte de masse et la durée d'étuvage, nécessaires pour atteindre une teneur en eau finale de 0%, sont du même ordre de grandeur. A noter qu'ici les teneurs en eau MC finales ont été calculées à partir du MC initial et de la perte de masse. Pour les températures élevées (150°C et 200°C), le résultat peut être biaisé car il prend en compte le départ de certains composés du bois (voir ci-dessous), mais l'on peut estimer que l'erreur sur la teneur en eau finale est négligeable au regard des incertitudes de mesure sur celle-ci.

		P1bis				P2			
		60°C	100°C	150°C	200°C	60°C	100°C	150°C	200°C
Perte de masse relative (%)	S1	10,5 +/- 0,2	10,5 +/- 0,5	10,4 +/- 0,1	10,2 +/- 0,1	9,3 +/- 0,1	11,3 +/- 0,4	11,0 +/- 0,3	10,6 +/- 0,3
	S2	9,7 +/- 0,3	10,3 +/- 0,3	10,5 +/- 0,1	10,3 +/- 0,3	5,3 +/- 0,6	10,2 +/- 0,2	13,8 +/- 0,2	12,3 +/- 0,2
	S3	9,8 +/- 0,1	9,7 +/- 0,3	10.4 +/- 0,1	9,9 +/- 0,3	7.1 +/- 0,1	10.4 +/- 0,1	13.0 +/- 0,1	15,2 +/- 0,3
Durée étuvage (h)	S1	27	15	2	1	24	18	2	2
	S2	144	48	23	3	28	24	20	7
	S3	336	51	24	7	168	89	48	19
MC final estimé (%)	S1	0	0	0	0	0	0	0	0
	S2	1,6	0,5	0,3	1,1	6,1	0,5	0	0
	S3	0.4	1.2	0.3	1,1	3.2	0.2	0	0

Tableau 13 : Données des essais des protocole P_{1bis} et P_2 à différentes températures pour les trois sections

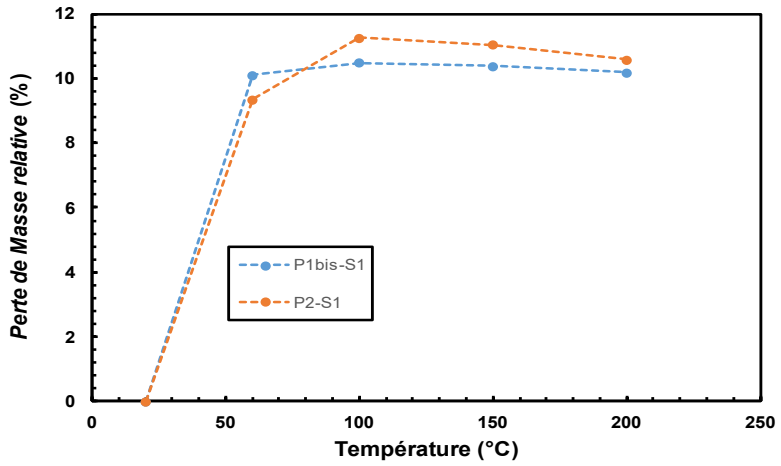


Figure 75 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_1 selon les protocoles P_{1bis} et P_2

En revanche, pour les sections S_2 et S_3 (Fig.76 et 77), une nette distinction apparait entre les deux protocoles.

A 60°C, le protocole P_{1bis} conduit à une perte de masse de 9,3% contre 5,3% pour le protocole P_2 pour la section S_2. De plus, le temps d'étuvage pour P_{1bis} s'élève à 144 heures, aboutissant à une teneur en eau finale 1,6%, tandis que le protocole P_2 requiert un étuvage de 28 heures seulement, pour une teneur en eau finale 6,1%. A 100°C, température proche de la température standard de séchage du bois, les deux protocoles permettent d'atteindre une teneur en eau nulle (MC = 0%) après des durées d'étuvage supérieures à 24 heures.

Pour la section S_3, à 60°C, le protocole P_{1bis} induit une perte de masse de 9,6% contre 7,1% pour le protocole P_2. Le temps d'étuvage pour P_{1bis} s'élève à 336 heures, aboutissant à une teneur en eau finale de 0,4%, alors que le protocole P_2 nécessite 168 heures de séchage pour une teneur en eau finale de 3,2%. A 100°C, les deux protocoles donnent une teneur en eau quasi-nulle, avec une durée de 51 heures pour le protocole P_{1bis} contre 89 heures pour le protocole P_2.

Au-delà de 100°C pour les sections S_2 et S_3, le protocole P_2 permet d'atteindre une teneur en eau nulle, tandis que pour le protocole P_{1bis}, MC varie entre 0,3% et 1,1% entre 150°C et 200°C.

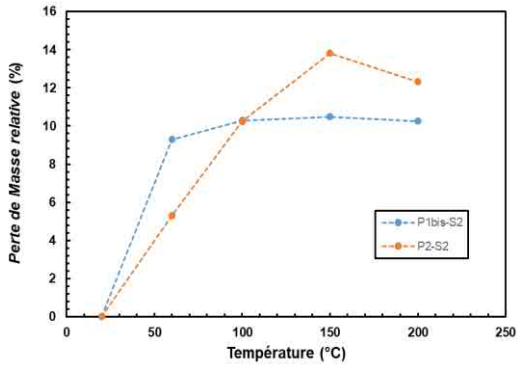


Figure 76 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_2 selon les protocoles P_{1bis} et P_2

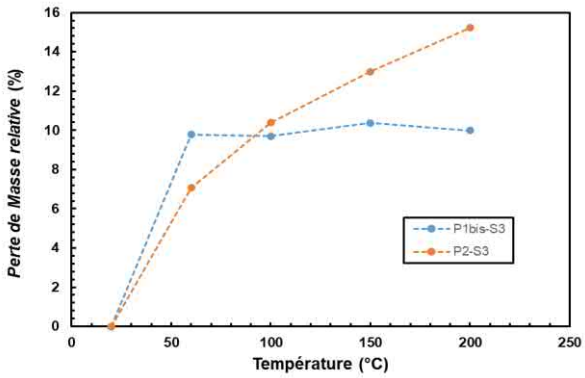


Figure 77 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_3 selon les protocoles P_{1bis} et P_2

9.4. Propriétés mécaniques

9.4.1. Résistance en compression

- **Section S_1**

La Figure 78 présente l'évolution de la résistance en compression moyenne du lamellé-collé pour la section S_1 en fonction de la température selon les protocoles P_{1bis} et P_2. L'augmentation de la résistance en compression à 60°C pour la section S_1 par rapport aux échantillons de référence est attribuée à la diminution de la teneur en eau du bois (comme indiqué dans le Tableau 13). Cette observation est cohérente avec les données obtenues pour les essais sans gradient thermiques et hydriques (section A). A 100°C, les résistances sont du même ordre de grandeur que celles des essais de référence à 20°C. Ce résultat est en accord avec des essais préliminaires réalisés au CSTB (Manthey 2020), qui ont montré des résistances à 100°C similaires à celles mesurées à 20°C pour des teneurs en eau de 0% et pour des échantillons de dimensions équivalentes (40x40x80 mm^3). Au-delà de 100°C, des dégradations chimiques peuvent survenir. En effet, à 150°C, la structure du bois peut subir une dégradation thermique significative (dégradation de la lignine (110-200°C, Rousset 2006). Cette dégradation potentielle impacte la résistance en compression du matériau, ainsi que d'autres propriétés, telles que la résistance en traction et la rigidité.

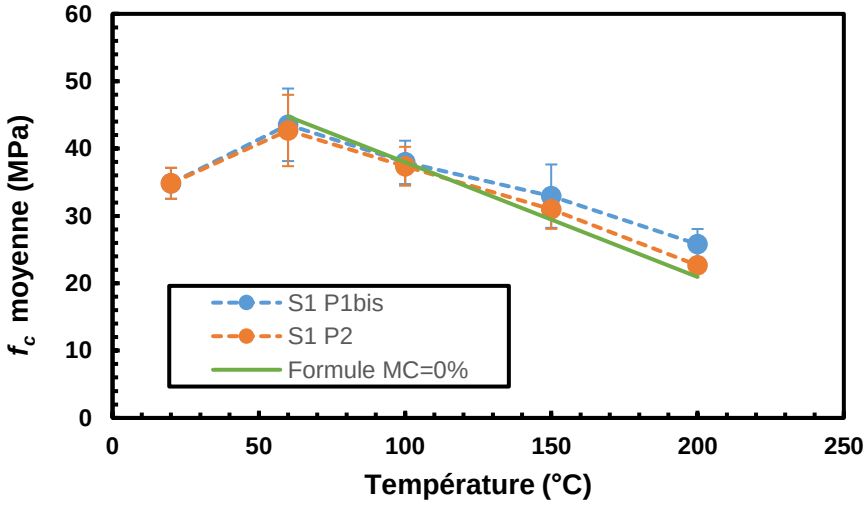


Figure 78 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_1 selon P_{1bis} et P_2

L'application de la relation linéaire décrite par l'équation (30) pour le calcul de la résistance en compression (f_c) du bois sec à une température quelconque à partir de f_c à la température de référence (20°C) révèle une concordance remarquable avec les données issues des deux protocoles expérimentaux, et ce, pour une teneur en eau de 0%. Cette observation corrobore la validité de la relation proposée et souligne son potentiel pour une estimation fiable de la f_c du bois sec sur une large plage de températures.

- **Sections S_2 et S_3**

L'analyse des pertes de masse en fonction de la température pour les sections S_2 et S_3 (Fig. 76 et 77), en association avec les données du Tableau 13, permet d'évaluer les résultats de résistance en compression obtenus pour ces deux sections.

Section S_2 (Fig. 79) : La différence de résistance observée à 60°C entre les deux protocoles s'explique par la teneur en eau finale des échantillons. Le protocole P_{1bis} induit une perte de masse de 9,3% pour une teneur en eau finale de 1.6% tandis que le protocole P_2 se traduit par une perte de masse de 5,3% et une teneur eau finale de 6,1% compte tenu des durées d'étuvage respectives.

A 100°C, les deux protocoles conduisent à une teneur en eau nulle, ce qui est en accord avec les résistances mécaniques quasi identiques enregistrées. Cependant, au-delà de 100°C, une diminution similaire de la résistance est observée pour les deux protocoles. Ce phénomène est attribué à la dégradation des constituants chimiques du bois sous l'effet de températures excessives.

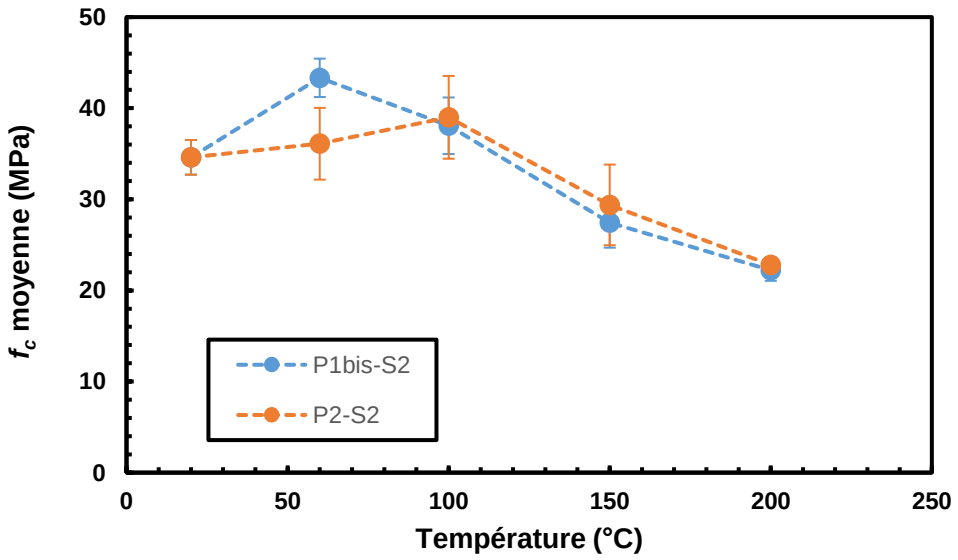


Figure 79 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_2 selon P_{1bis} et P_2

Section S_3 (Fig. 80) : A l'instar de la section S_2, l'écart de résistance observée à 60°C entre les deux protocoles s'explique par la teneur en eau finale des échantillons. Pour le protocole P_{1bis}, avec une durée d'étuvage de 336 heures, on observe une teneur en eau finale de 0,4%, tandis que le protocole P_2, grâce à une durée d'étuvage de 168 heures suffisante pour assurer une température homogène sur toute la hauteur de la section, on observe une teneur en eau finale de 3,2%.

A 100°C, les deux protocoles mènent à une teneur en eau finale quasi nulle, respectivement après 51 heures et 89 heures d'étuvage pour P_{1bis} et P_2. Les résistances mécaniques enregistrées sont très proches. Au-delà de 100°C, les pentes de diminution des résistances en compression se distinguent pour les deux protocoles. Les durées d'étuvage plus longues du protocole P_2 comparées à P_{1bis} pour les températures 150°C et 200°C lui confèrent un temps d'exposition accru à la chaleur, favorisant ainsi la dégradation des éprouvettes (fissuration) et l'altération des constituants chimiques, d'où une résistance mécanique plus faible.

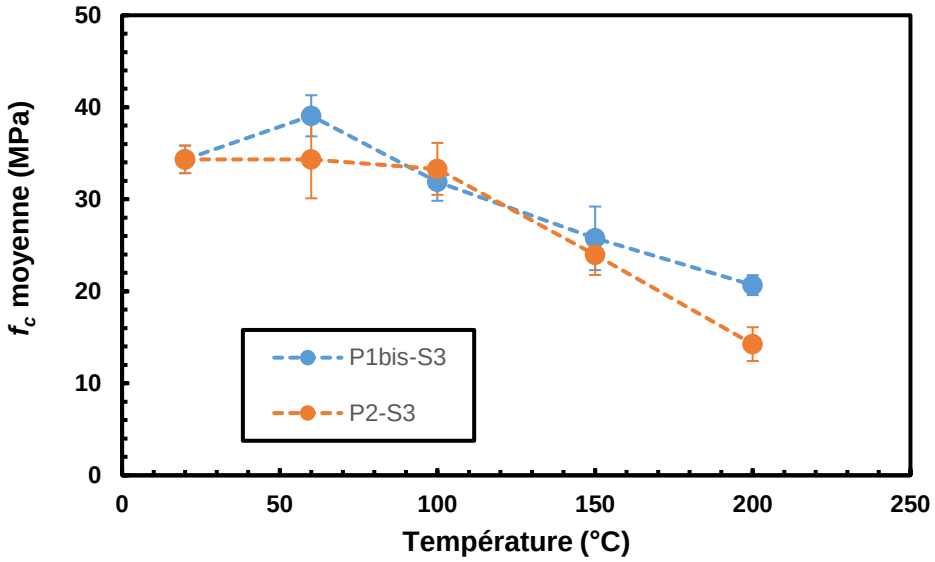


Figure 80 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_3 selon P_{1bis} et P_2

La Figure 81 présente les courbes exponentielles obtenues pour différentes teneurs en eau, à des températures allant jusqu'à 200°C. Ces courbes ont été générées en extrapolant les valeurs du paramètre « n » (Fig. 56) et en superposant les données expérimentales des sections S_2 et S_3.

La concordance observée entre la relation exponentielle reliant la résistance en compression (f_c), la teneur en eau (MC) et la température (T), telle qu'exprimée par les équations (29) et (30), et les données expérimentales issues des protocoles P_{1bis} et P_2 pour les sections S_2 et S_3, met en évidence la validité du modèle proposé. L'intégration des données de ces protocoles dans le modèle, développé à partir des essais sans gradients thermiques et hydriques et avec la section S_1, a confirmé l'absence de gradient thermique dans les conditions des protocoles P_{1bis} et P_2. De plus, les faibles teneurs en eau enregistrées suggèrent la présence de gradients hydriques négligeables.

La bonne concordance entre les données et le modèle démontre son aptitude à estimer de manière fiable la résistance en compression à différentes teneurs en eau sur une plage de températures allant jusqu'à 200°C.

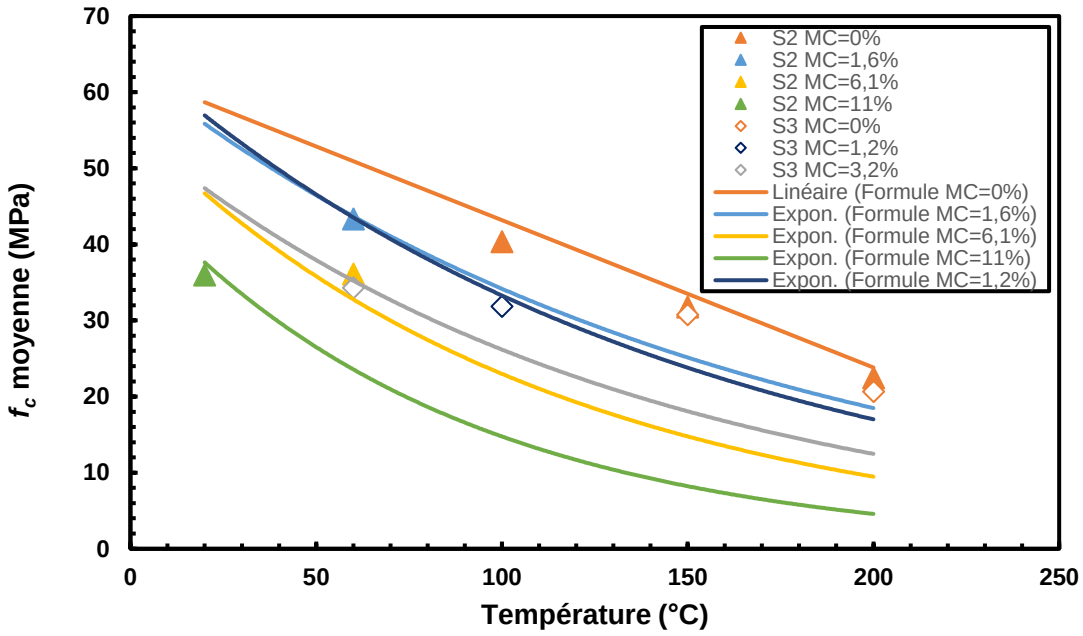


Figure 81 : Comparaison entre fc mesurée et fc estimée par les équations (29) et (30) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C

9.4.2. Module d'élasticité axial

- **Section S_1**

La Figure 82 révèle une tendance similaire à celle observée pour les résistances en compression pour la section S_1 (Fig. 78), montrant l'influence significative de la température et de la teneur en eau sur le module d'élasticité axial (E_L) du lamellé-collé de la section S_1.

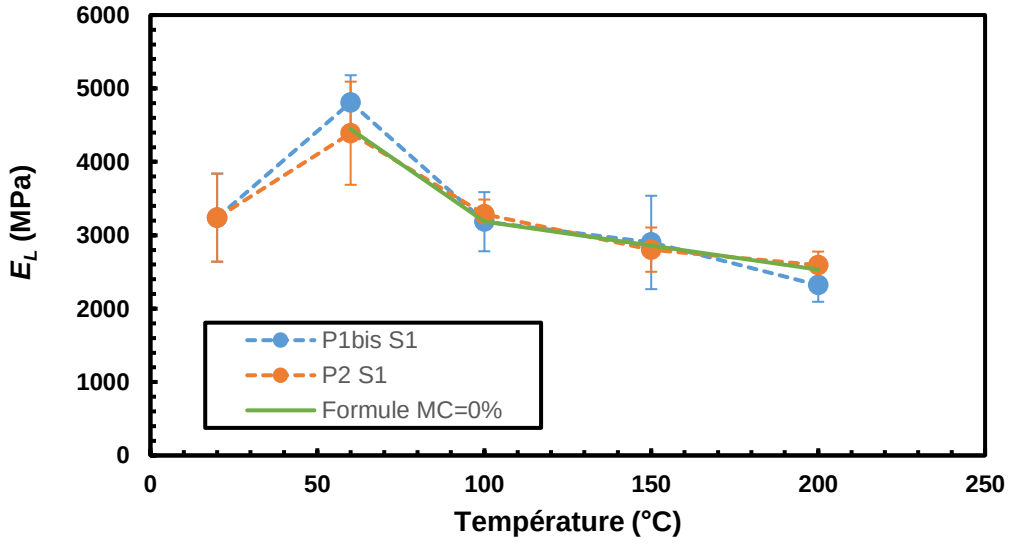


Figure 82 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé (section S_1) en fonction de la température, déterminé par la traverse de la machine, pour les protocoles P_{1bis} et P_2

L'application de la relation linéaire décrite par l'équation (33) pour le calcul du module d'élasticité axial (E_L) du bois sec à une température donnée, à partir de sa valeur de référence à

20°C, révèle une correspondance étroite avec les données expérimentales issues des deux protocoles, pour une teneur en eau de 0%. Cette concordance valide l'efficacité du modèle proposé et démontre sa pertinence pour estimer le module d'élasticité axial du bois sec sur une large gamme de températures.

- **Sections S_2 et S_3**

Les sections S_2 et S_3 (Fig. 83 et 84) mettent en évidence une variation du module d'élasticité axial à 60°C entre les deux protocoles, similaire aux différences observées dans les résistances mécaniques. Cette divergence est principalement attribuée aux variations des teneurs en eau finales des échantillons. À 100°C, les teneurs en eau des échantillons sont nulles pour les deux protocoles, aboutissant à des modules d'élasticité similaires. Au-delà de 100°C, le bois subit un ramollissement progressif, entraînant une perte de rigidité, comme le montrent les valeurs décroissantes du module d'élasticité.

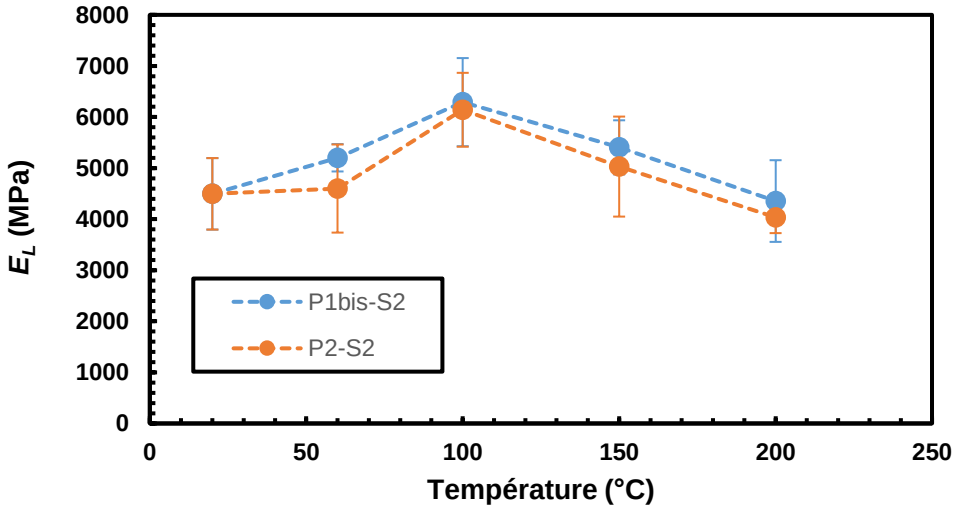


Figure 83 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé section S_2 en fonction de la température selon les protocoles P_{1bis} et P_2

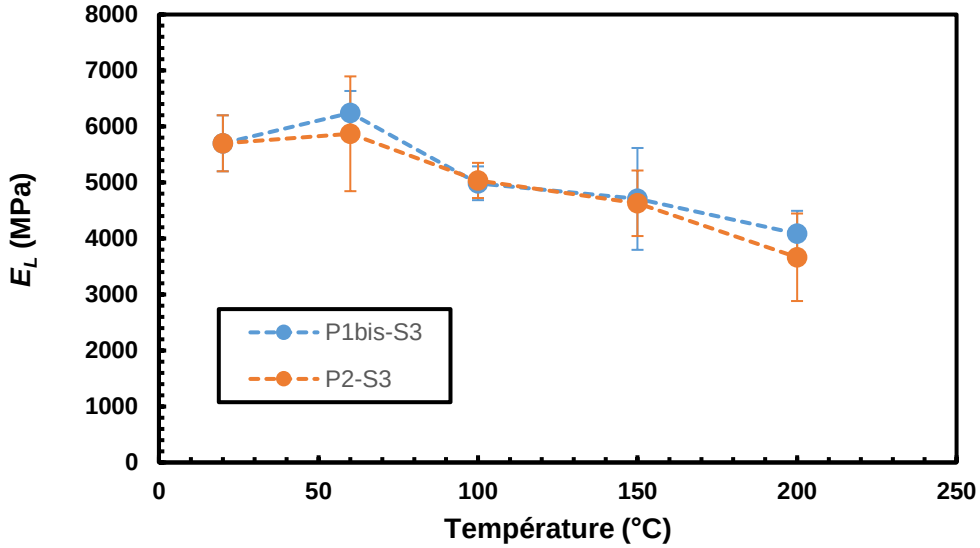


Figure 84 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé section S_3 en fonction de la température selon les protocoles P_{1bis} et P_2

Les Figures 85 et 86 présentent les relations exponentielles entre les modules d'élasticité axial et les températures allant jusqu'à 200°C (équations (32) et (33)) et ceci pour différentes teneurs en eau, respectivement pour les sections S_2 et S_3. Ces relations ont été obtenues par extrapolation des valeurs du paramètre « n » du module d'élasticité (Fig. 62).

La correspondance observée entre la relation exponentielle liant le module d'élasticité axial (E_L), la teneur en eau (MC) et la température (T), et les données expérimentales des deux protocoles pour les sections S_2 et S_3, confirme la pertinence du modèle proposé. L'intégration des données de ces protocoles dans le modèle, développé à partir des essais sans gradients thermiques et hydriques, permet également de confirmer l'absence de gradient thermique dans les conditions des protocoles P_{1bis} et P_2. En outre, les faibles teneurs en eau mesurées suggèrent la présence de gradients hydriques négligeables.

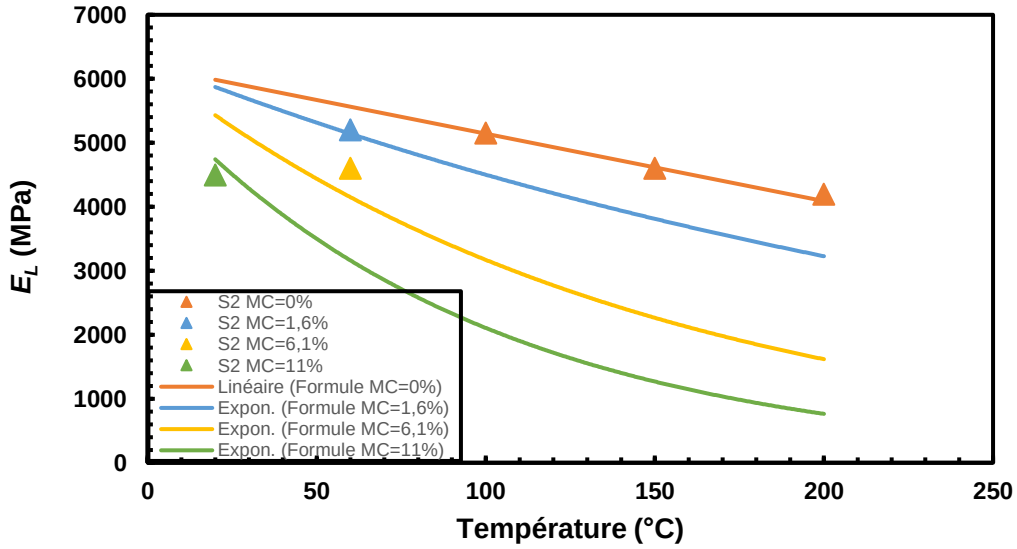


Figure 85 : Comparaison entre E_L mesuré et E_L estimé par les équations (32) et (33) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C pour la section S_2

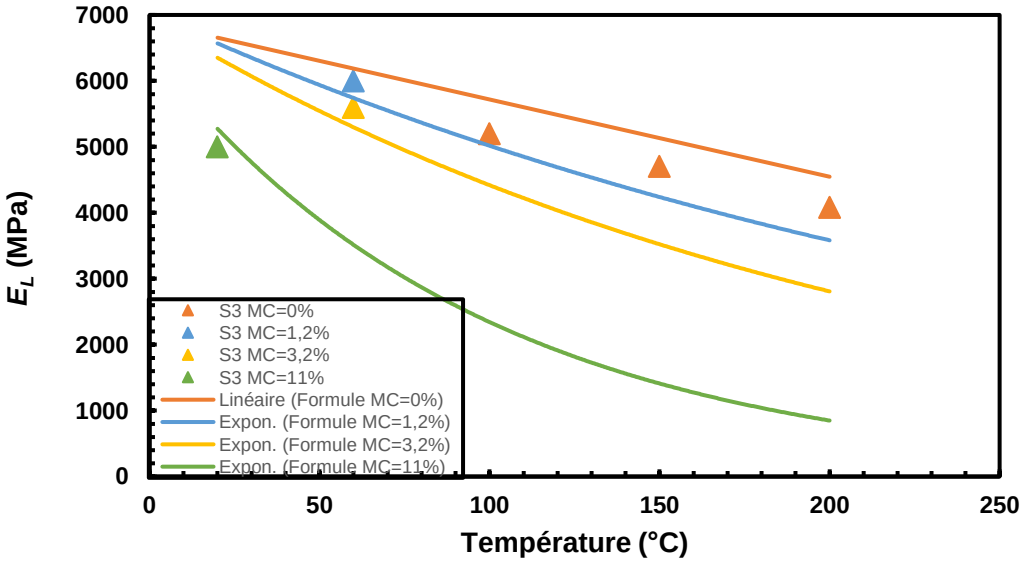


Figure 86 : Comparaison entre E_L mesuré et E_L estimé par les équations (32) et (33) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C pour la section S_3

Cependant, pour la section S_3, la concordance est moins prononcée notamment pour MC=0%, en raison de la taille des échantillons. En effet, plus la taille des échantillons augmente, plus les défauts inhérents au bois, tels que les nœuds et les fissures, deviennent significatifs, influençant ainsi la mesure du module d'élasticité.

Malgré cela, la fiabilité de cette relation souligne son efficacité pour une estimation précise du module d'élasticité axial à différentes teneurs en eau, sur une plage de températures allant jusqu'à 200°C.

9.5. Changement de couleurs des échantillons en fonction de la température

La Figure 87 présente l'évolution de la couleur du bois sur une plage de températures comprise entre 20°C et 200°C. La différence de couleur observée entre 20°C et 60°C n'est pas significative, ce qui indique que les variations chromatiques à ces températures sont négligeables

Ces modifications chromatiques, observées principalement à la surface des échantillons en raison de l'oxydation thermique, deviennent plus marquées à mesure que la température augmente, notamment au-delà de 150°C. Des signes de combustion et de fissuration apparaissent également aux extrémités des éprouvettes, où la dégradation thermique des composants chimiques du bois et l'émission de gaz sont facilitées par l'orientation des fibres (Marinquez et Moraes, 2010).

Les changements de couleur à haute température s'expliquent principalement par le transfert d'hydrates de carbone, de phénols et d'autres extraits de l'intérieur des échantillons vers la surface, induit par l'évaporation de l'humidité (Kosiková et al., 1999 ; Zhang et al., 2013). Ce phénomène résulte de la décomposition thermique des composés organiques du bois, qui libère des composés volatiles se condensant ensuite en surface, provoquant une coloration caractéristique.

À des températures plus basses, les variations de couleur sont moins prononcées, car l'ampleur des modifications chimiques est directement corrélée à la température appliquée (LeVan, 1989). Entre 40°C et 90°C, les modifications physiques observées concernent principalement l'élimination de l'eau et l'émission de composés extractibles volatils (Manninen et al., 2002).

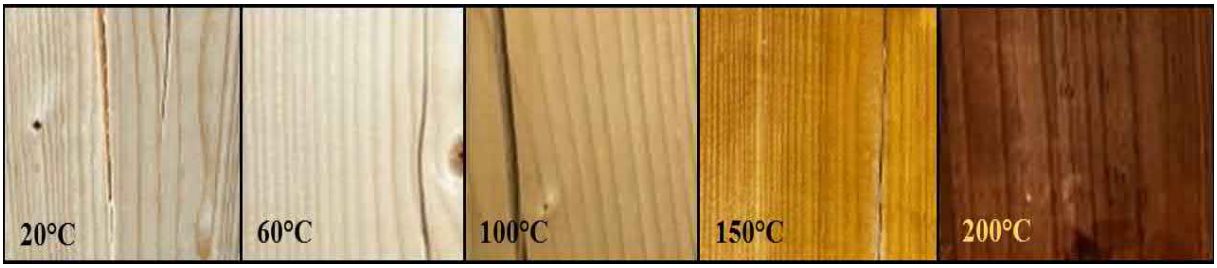


Figure 87 : Changement de couleur des échantillons en fonction de la température de séchage.

9.6. Modes de Ruptures

Divers modes de rupture ont été observés sur les échantillons soumis à une compression parallèle aux fibres dans les protocoles P_{1bis} et P_2. La nature des ruptures est principalement influencée par la température de séchage. Les courbes force-déplacement de la traverse (Annexe A. 3) illustrent ces phénomènes en montrant comment les différents types de rupture

évoluent en fonction du déplacement de la traverse lors de l'application de la charge compressive.

A des températures inférieures à 150°C, les modes de ruptures observés sont classiques, incluant des mécanismes d'endommagement par flambement et de rupture par traction et cisaillement des fibres, comme illustré dans la Figure 88. Pour ces trois exemples, les courbes force-déplacement (Annexe A. 3) indiquent un comportement ductile.

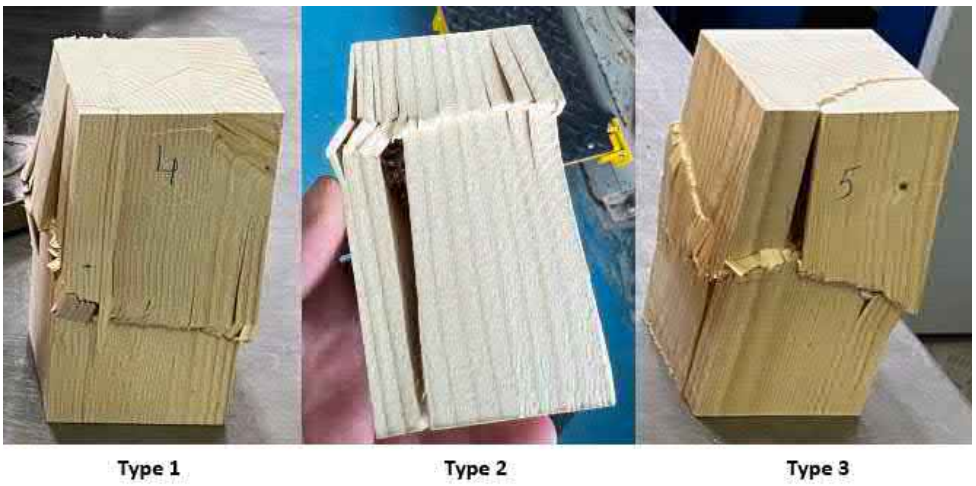


Figure 88 : Modes de ruptures des échantillons en compression pour des températures inférieures à 150°C

Pour des températures supérieures à 150°C, une transition progressive vers les modes de ruptures représentés à la Figure 89 est observée avec l'augmentation de la température. Ce changement est principalement attribué à la dégradation thermique des polymères de bois et de la résine phénol-formaldéhyde (colle) à haute température (Xu et al., 2017). Cette dégradation se traduit par un comportement plus fragile, illustré par la courbe force-déplacement (Annexe A. 3, Fig. A3.4).

Figure 89 : Modes de ruptures des échantillons en compression pour des températures supérieures à 150°C

Les modes de ruptures sont fortement influencés par la température de séchage. A des températures inférieures à 150°C, les ruptures sont principalement dues à la traction et au cisaillement des fibres. Au-delà de 150°C, la dégradation des polymères du bois et de la résine phénol-formaldéhyde devient le facteur dominant, conduisant à des ruptures fragiles par fissuration et délaminage.

Chapitre 10

Résultats des essais des protocoles P_3 et P_4

Le chapitre précédent a analysé l'influence de la température d'étuvage sur le comportement mécanique en compression du bois lamellé-collé de différentes sections. Il a été établi qu'à des températures élevées, les propriétés physiques et mécaniques du bois sont intimement liées à la dégradation thermique des polymères au sein du matériau ainsi qu'à la variation de la teneur en eau des échantillons durant l'étuvage. Ce chapitre poursuit l'exploration en s'appuyant sur deux protocoles expérimentaux distincts afin d'évaluer les propriétés thermomécaniques du bois.

- Protocole P_3 : Effet immédiat de la température à différentes durées d'étuvage

Le protocole P_3 s'intéresse à l'effet immédiat de la température sur le bois lamellé-collé. Des échantillons de différentes sections (S_1, S_2 et S_3) sont chauffés à une température prédéterminée pendant des durées variables (15, 25, 40, 50 et 60 minutes) avant de subir des essais de compression. Gerhards (1982) a fourni un résumé des études pertinentes concernant l'effet immédiat de la teneur en humidité et de la température sur les propriétés mécaniques du bois massif. A titre d'illustration, le bois de paricá exposé à une température de 230°C pendant 3 heures perd approximativement 65% de sa résistance en compression parallèle au fil du bois (Marinquez et Moraes 2010). De même, la résistance du pin sylvestre soumise à 220°C pendant 2 heures diminue de près de moitié par rapport à sa résistance initiale à température ambiante (Moraes et al. 2005).

- Protocole P_4 : Effet permanent de la température

Le protocole P_4 vise à déterminer l'effet permanent de la température sur le bois. Les échantillons (section S_1 uniquement) sont chauffés à la température définie puis refroidis à température ambiante avant d'être testés. Cette méthode a été employée dans de nombreuses études pour évaluer la résistance résiduelle après incendie des éléments structuraux en bois (Bekhta et Niemz 2003, Kocaefe et al. 2008, Green et al. 2008 et Zhong et al. 2016).

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la résistance en compression du lamellé-collé pendant et après exposition à différentes températures. Les résultats obtenus contribueront à établir une base pour l'évaluation du comportement des structures en bois lors d'un incendie.

10.1. Données des Thermocouples

Les Figures 90, 91 et 92 illustrent respectivement les profils thermiques des section S_1, S_2 et S_3 pour le protocole P_3 à une température de 250°C et une durée d'étuvage de 60 min. On observe une nette présence de gradients thermiques pour les trois sections, avec des températures plus élevées aux extrémités qu'au cœur.

Pour la section S_1, avec une température homogène de 250°C dans l'étuve, les extrémités présentent des valeurs d'environ 180°C, tandis que le cœur atteint approximativement 150°C après 60 min d'étuvage (Fig. 90). La présence d'eau ralentit le réchauffement du cœur, comme en témoigne le palier observé autour de 100°C pendant 15 min.

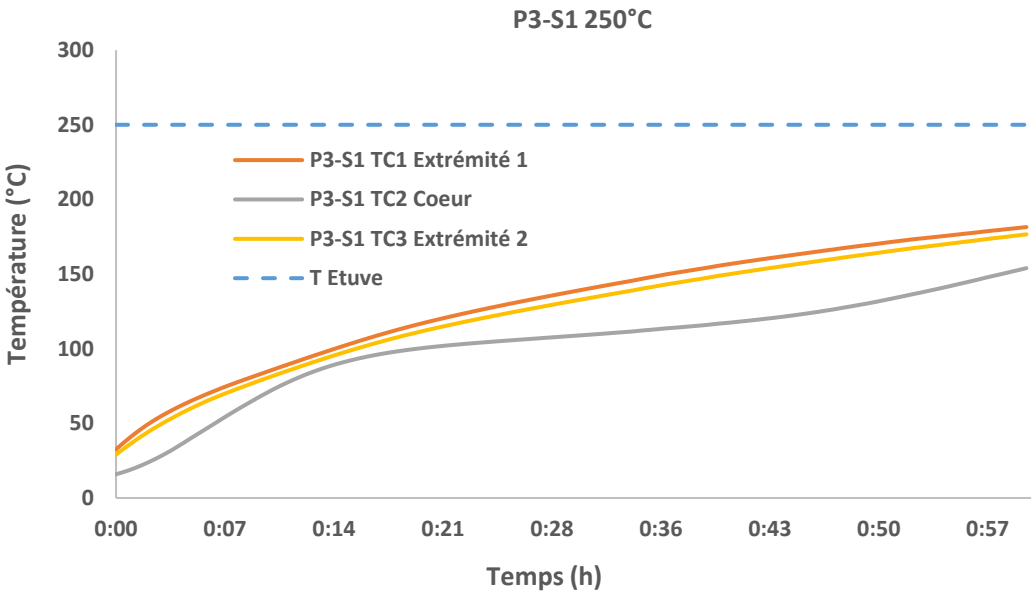


Figure 90 : Profil thermique de la section S_1 pour le protocole P_3 à 250°C

Le profil thermique de la section S_2 à 250°C suit une tendance similaire à celle de la section S_1 (Fig. 91). Les extrémités présentent des valeurs d'environ 180°C, tandis que le cœur atteint approximativement 130°C après 60 min d'étuvage. Le palier de température observé autour de 100°C est plus prononcé dans la section S_2, avec une durée de 30 minutes contre 15 minutes pour la section S_1. Cette observation met en évidence l'influence de l'épaisseur de la section sur le comportement thermique : plus la section est grande, plus le palier est long et plus la différence de température entre le cœur et les extrémités est importante.

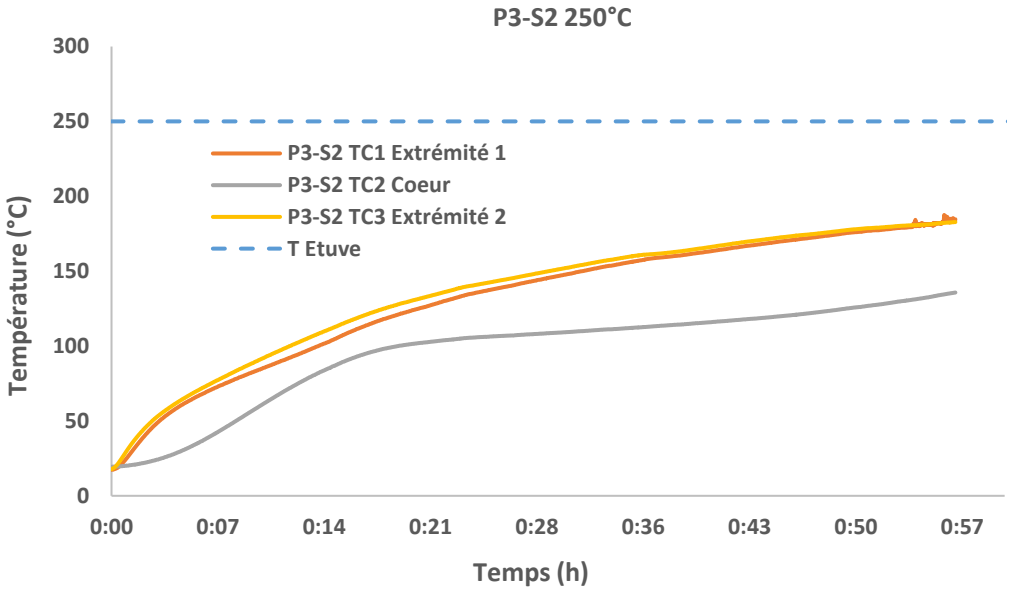


Figure 91 : Profil thermique de la section S_2 pour le protocole P_3 à 250°C

L'analyse des profils thermiques des sections S_1 et S_2 révèle donc l'impact des dimensions des sections sur la répartition de la chaleur à l'intérieur du matériau. Plus la section est importante, plus l'écart de température entre le cœur et les extrémités devient important. Ce comportement

peut être attribué à deux facteurs : la conductivité thermique du matériau (voir section 4.2.3) et la gestion de l'humidité.

En effet, pour les sections S_1 et S_2, d'une taille respectivement plus petite, les courbes montrent que la chaleur se propage plus rapidement vers le cœur. Après 60 minutes de traitement à 250°C, l'écart entre les extrémités et le cœur est relativement modéré : environ 16% pour S_1 et 28% pour S_2. Ce phénomène peut être expliqué par une combinaison entre la résistance thermique modérée du matériau et la vaporisation de l'humidité autour de 100°C, qui ralentit temporairement la montée en température.

Cependant, la section S_3 présente un comportement thermique singulier. Avec une dimension plus importante, la propagation de la chaleur est nettement plus lente, en particulier vers le cœur. Après 60 minutes, la température des extrémités atteint seulement 70°C, alors que le cœur reste à environ 35°C, soit un écart de plus de 50% (Fig. 92). Ce phénomène ne peut pas être expliqué uniquement par la présence d'humidité ou la résistance thermique classique. Pour S_3, les données enregistrées par les thermocouples placés aux extrémités semblent présenter des anomalies, car des écarts similaires ne sont pas observés aux autres températures testées. Ces irrégularités pourraient être attribuées à des problèmes spécifiques aux thermocouples, tels qu'une calibration inadéquate, un dysfonctionnement, ou à des erreurs survenues lors de la mise en place des capteurs.

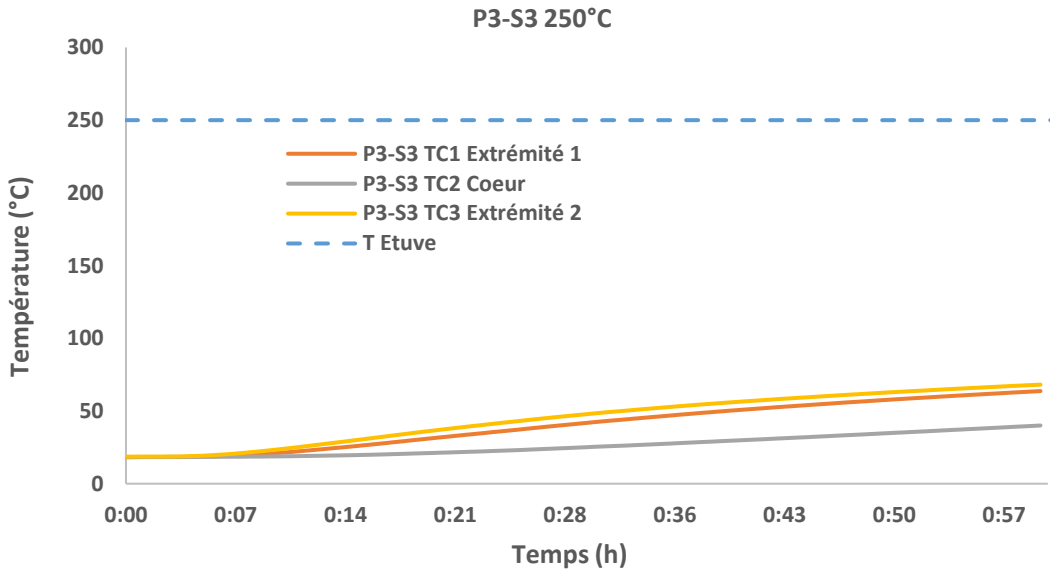


Figure 92 : Profil thermique de la section S_3 pour le protocole P_3 à 250°C

10.2. Perte de masse et teneur en eau

- **Section S_1**

Les pertes de masse des échantillons de lamellé-collé de section S_1 ont été évaluées à partir des masses mesurées avant et après les essais à différentes températures pendant une durée de 60 minutes (Tableau 14). Les teneurs en eau comme pour les protocoles P_{1bis} et P_2 ont été calculées à partir des pertes de masse et du MC initial. Les MC finaux calculés laissent penser, contrairement aux protocoles P_{1bis} et P_2, la présence d'un gradient hydrique d'autant plus prononcé que la température est basse (ce qui sera discuté dans la section 10.5). Les MC finaux représentent donc une valeur moyenne de l'humidité au sein des échantillons.

Bien que les protocoles P_3 et P_4 aient été réalisés dans des conditions expérimentales différentes (P_3 réalisé au CSTB et P_4 à l'ENPC), la différence de perte de masse et de teneur en eau entre ces deux protocoles peut être considérée comme négligeable (durée d'étuvage de 60 min).

	P3				P4			
	60°C	100°C	150°C	250°C	60°C	100°C	150°C	250°C
Perte de masse relative (%)	2,5	5,5	8,9	13,0	2,25	5,1	8,3	11,9
MC final (%)	8,1	4,1	0,5	0	9,1	4,8	0,6	0
MC final / MC initial (%)	74,4	40,1	5,3	0	80,3	50,2	9,8	0

Tableau 14 : Données des essais des protocoles P_3 et P_4 à différentes températures pendant une durée de 60 minutes pour la section S_1

La perte de masse des échantillons suit une relation linéaire avec la température jusqu'à 150°C, où les teneurs en eau des échantillons des protocoles P_3 et P_4 deviennent quasiment nulles (Fig. 93). Cette perte de masse est principalement attribuée à l'évaporation de l'eau contenue dans le bois. Cependant, la perte de masse continue d'augmenter lorsque la température dépasse 150°C. A 250°C, la perte de masse atteint 13% pour le protocole P_3 et 12% pour le protocole P_4. Cette perte de masse additionnelle est attribuée à la dégradation des constituants chimiques du bois, comme en témoigne le changement de couleur significatif observé à la surface des échantillons.

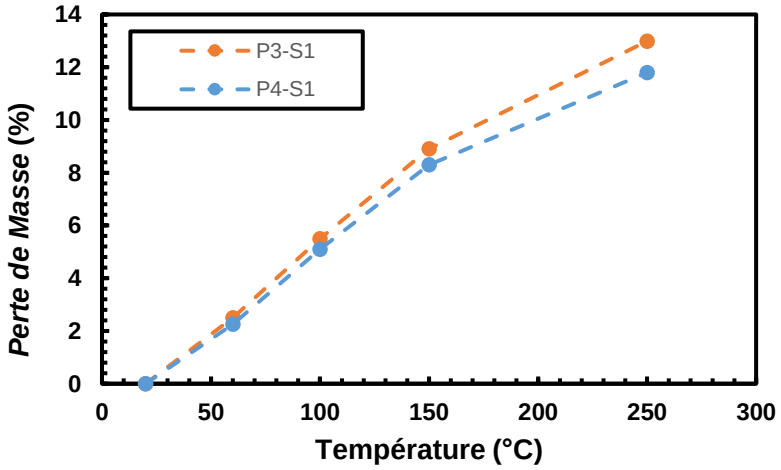


Figure 93 : Perte de masse en fonction de la température pour la section S_1 selon les protocoles P_3 et P_4

- **Section S_2 et S_3**

L'impact immédiat de la température sur les sections S_2 et S_3 a été évalué à l'aide du protocole P_3, en étudiant l'effet de différentes durées d'étuvage. Les échantillons ont été chauffés à des températures spécifique (60°C, 100°C, 150°C et 250°C) pendant des durées variables (15, 25, 40, 50 et 60 minutes) avant de subir des essais de compression. Les profils thermiques ont montré des gradients thermiques importants pour les sections à différentes températures. Les pertes de masses et les rapports entre la teneur en eau finale et la teneur en eau initiale des échantillons pour chaque combinaison température-durée d'étuvage sont présentés dans le Tableau 15. Comme précédemment, ces données laissent penser qu'il existe un gradient hydrique au sein des échantillons.

		P3							
		60°C		100°C		150°C		250°C	
		S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3
Perte de masse relative (%)	15 min	0,37	0,14	0,75	0,29	1,28	0,47	2,45	0,73
	25 min	0,56	0,24	1,19	0,55	2,0	0,87	3,25	1,01
	40 min	0,79	0,36	1,67	0,75	3,0	1,26	4,63	1,45
	50min	0,9	0,39	2,0	0,78	3,76	1,39	5,70	1,85
	60min	1,1	0,43	2,2	0.97	4,18	1,67	7,22	2,07
MC final / MC initial (%)	15 min	96,2	98,5	92,6	97,0	86,7	95,4	74,4	92,6
	25 min	94,5	97,4	88,0	94,7	79,4	90,7	66,7	89,6
	40 min	92,1	96,1	82,9	92,4	68,8	86,7	51,7	85,4
	50min	90,6	95,7	79,0	92,1	62,1	85,4	41,5	81,0
	60min	89,5	95,6	76,8	90,4	58,5	82,9	36,3	78,4

Tableau 15 : Données pour les essais du protocoles P_3 à différentes températures et à différentes durées d'étuvage (15, 25, 40, 50 et 60 minutes) pour les sections S_2 et S_3

Les Figures 94 et 95 illustrent l'évolution de la perte de masse relative des sections S_2 et S_3 en fonction de la température et de la durée d'étuvage. On observe une augmentation graduelle de la perte de masse relative avec l'élévation de la température et de la durée d'étuvage pour les deux sections. Cette tendance est similaire pour les deux sections, avec une perte de masse plus faible à 60°C pour toutes les durées d'étuvage et plus élevée à 250°C. Il est à noter que la perte de masse relative est globalement plus élevée pour la section S_2 que pour la section S_3, ce qui peut être attribué à un effet d'échelle.

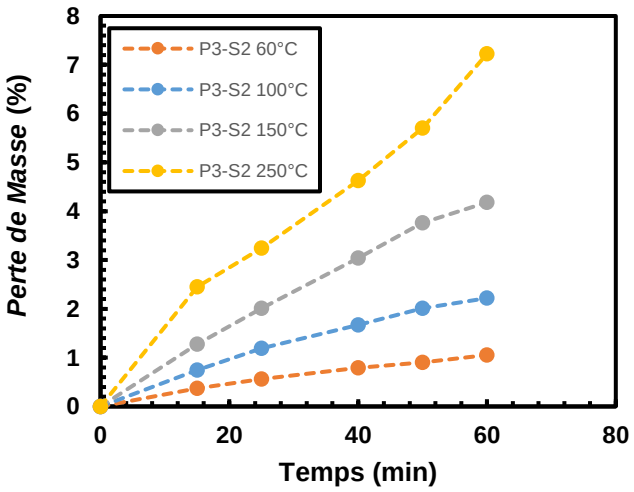


Figure 94 : Perte de masse en fonction du temps d'étuvage à différentes températures pour la section S_2 selon le protocole P_3

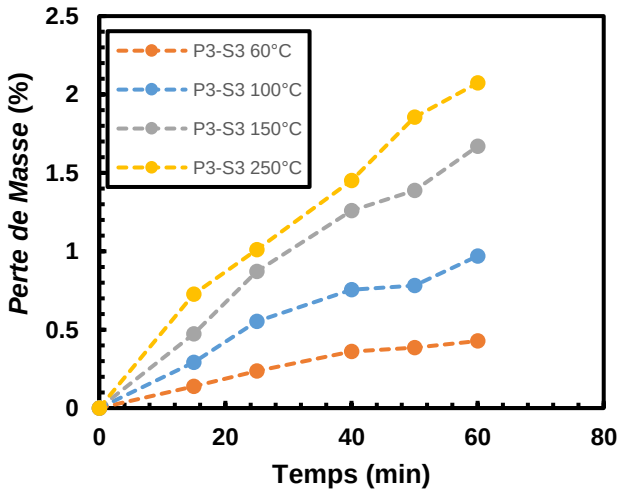


Figure 95 : Perte de masse en fonction du temps d'étuvage à différentes températures pour la section S_3 selon le protocole P_3

10.3. Propriétés mécaniques

En raison de contraintes techniques liées au gradient thermique, l'analyse se limite aux résistances en compressions dans cette partie. Les modules d'élasticité axiaux ne sont pas présentés.

- **Section S_1**

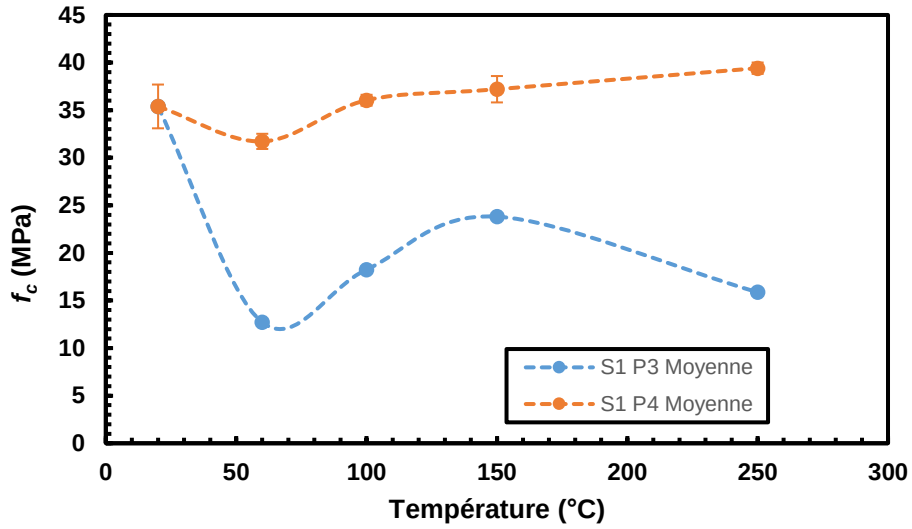


Figure 96 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_1 selon P_3 et P_4 (pour une durée de 60 minutes)

Pour la section S_1, la résistance en compression f_c du bois est sensible à l'augmentation de la température, comme le montre la Figure 96. Cette relation complexe dépend de la plusieurs facteurs, dont la teneur en eau, la température et la durée d'exposition à la chaleur.

Dans le cas du protocole P_3, une diminution initiale de la résistance en compression suivie d'une augmentation est observée entre 20°C et 150°C. Ce comportement peut s'expliquer par deux phénomènes distincts :

- **Ramollissement des hémicelluloses et de la lignine :** Les travaux de Schaffer (1973) ont montré que les hémicelluloses ramollissent à partir de 55°C, tandis que la lignine commence à se décomposer vers 100°C. Ce ramollissement induit une diminution de la résistance en compression.
- **Déshydratation du bois :** L'évaporation d'une partie de l'humidité contenue dans le bois peut entraîner une augmentation de la résistance en compression. Ce phénomène est lié à la réduction de la teneur en eau, qui améliore les propriétés mécaniques du bois en diminuant son hygroscopicité.

Au-delà de 150°C, la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la température. Cette chute est principalement attribuée à la dégradation des polymères constitutifs du bois et aux changements de leur température de transition vitreuse (T_g).

- **Dégradation des polymères :** Selon Fengel et Wegener (1989) et Beall et Eickner (1970), les hémicelluloses se dégradent entre 150°C et 200°C, tandis que la lignine se décompose entre 220°C et 250°C.
- **Changements de T_g :** Les hémicelluloses ont une T_g comprise entre 150°C et 220°C et la lignine entre 140°C et 190°C (voir section 4.4).
- **Dégradation de la résine phénol-formaldéhyde :** Au-dessus de 175°C, la résine phénol-formaldéhyde utilisée dans le lamellé-collé se dégrade également.

L'analyse de la variance révèle des différences significatives de résistance en compression entre 20°C et les autres températures étudiées. La diminution maximale de f_c observée après 60

minutes à 250°C est de 56%, ce qui concorde avec les résultats rapportés dans la littérature (Zhong et al. 2016, Marinquez et Moraes 2010).

Dans le cadre du protocole P_4, l'évolution de la résistance en compression présente un comportement singulier. Une diminution initiale est observée à 60°C, suivie d'une augmentation progressive pour atteindre des valeurs proches, voire supérieures, à celles enregistrées à 20°C. Cette baisse initiale peut être attribuée aux gradients hydriques présents au sein des échantillons (voir section 10.5). À cette température, l'humidité pourrait ne pas être uniformément répartie, affectant ainsi la résistance du bois.

L'augmentation postérieure de la résistance, surpassant parfois les valeurs initiales, s'explique par l'évaporation totale de l'humidité au sein des échantillons. Une fois l'humidité éliminée, les effets du ramollissement à haute température et des gradients thermiques disparaissent lors du refroidissement des échantillons à température ambiante avant le test de compression. Cette homogénéisation de la structure du bois favorise sa stabilité et augmente sa résistance en compression. Toutefois, le refroidissement sur 24 heures n'a pas permis au matériau de retrouver son état hydrique initial, ce qui pourrait partiellement expliquer l'augmentation de la résistance observée.

En moyenne, les valeurs de f_c pour le protocole P_4 sont respectivement 39%, 51%, 64% et 65% plus élevées que celles du protocoles P_3 à 60°C, 100°C, 150°C et 250°C. Après 60 minutes à 250°C, le lamellé-collé d'épicéa du protocole P_4 affiche même une augmentation de 11% de sa résistance en compression par rapport à sa valeur initiale à 20°C.

Ces résultats démontrent l'influence significative des gradients thermiques et hydriques sur la résistance en compression du bois. Ils confirment également la réversibilité du comportement mécanique du bois vis-à-vis de la température en tenant compte la distribution de la teneur en eau. En effet, après exposition à des températures élevées suivie d'un refroidissement, le bois retrouve des résistances en compression proches, voire supérieures à celle observées à 20°C. Ce phénomène s'explique par l'évaporation de l'humidité contenue dans le bois, qui entraine une densification de sa structure cellulaire.

- **Section S_2**

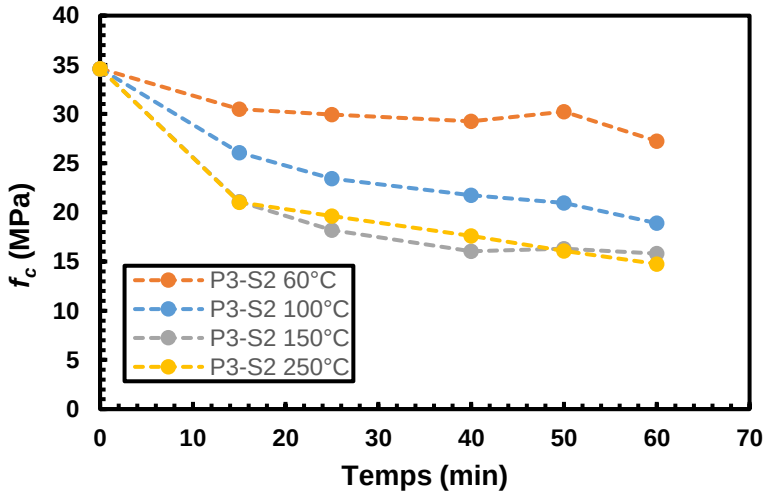


Figure 97 : Evolution de f_c en fonction de la durée d'exposition à différentes températures pour la section S_2 selon le protocole P_3

De manière générale, la Figure 97 met en évidence une influence significative de la température sur la résistance en compression du lamellé-collé d'épicéa pour la section S_2. Une diminution de f_c est observée avec l'augmentation de la température, particulièrement marquée pour les expositions prolongées. Cette baisse s'explique vraisemblablement par les effets conjugués du ramollissement des hémicelluloses et de la lignine, ainsi que par les dégradations thermiques des polymères constitutifs du bois.

À température ambiante (20°C), la résistance en compression initiale est d'environ 35 MPa. Après 60 minutes d'exposition à 60°C, la résistance en compression diminue d'environ 21% par rapport à la valeur initiale. Cette réduction s'accentue à 100°C, avec une baisse d'environ 45% après 60 minutes d'exposition. La tendance se poursuit à 150°C, avec une perte d'environ 55% après 60 minutes d'exposition. À 250°C, la diminution est similaire à celle observée à 150°C, avec une chute de résistance d'environ 58% après 60 minutes.

L'effet de la température sur la résistance en compression est d'autant plus marqué que la durée d'exposition est longue. Une diminution progressive de f_c est observée pour chaque température en fonction du temps d'exposition.

En comparaison avec les résultats obtenus pour la section S_1, une tendance similaire s'observe concernant l'influence de la température et de la durée d'exposition sur la résistance en compression (protocole P_3). Cependant, la diminution de f_c est légèrement moins importante pour la section S_2, ce qui peut s'expliquer par un effet d'échelle. Dans une section plus épaisse, la répartition des contraintes thermiques est moins homogène, ce qui peut accentuer les dégradations locales du bois. De plus, la teneur en eau joue un rôle significatif dans la résistance du bois sous l'effet de la chaleur. Une teneur en eau plus élevée dans les sections épaisses peut contribuer à une évaporation plus lente (prolongation du palier à 100°C, comme mentionné dans la section 9.2), retardant ainsi la dégradation thermique et limitant la perte de résistance en compression.

- **Section S_3**

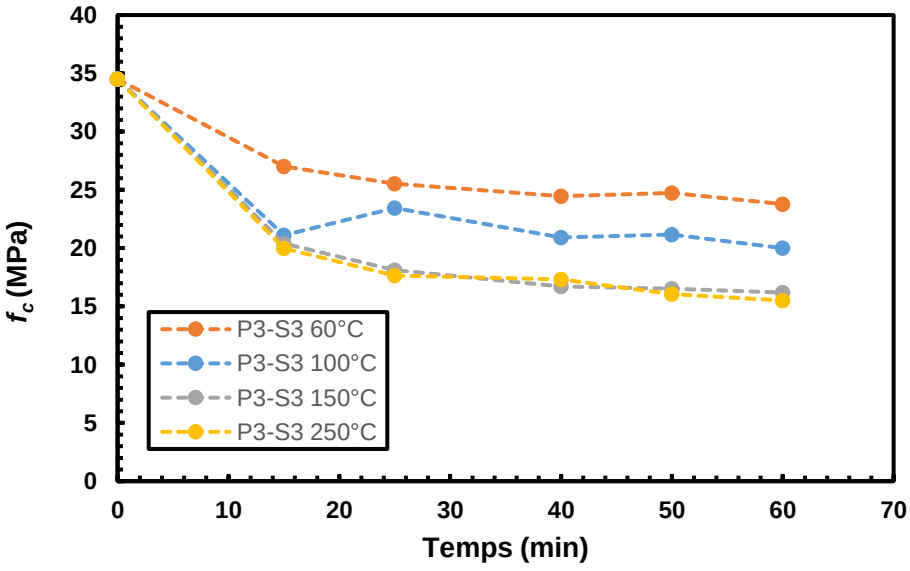


Figure 98 : Evolution de f_c en fonction de la durée d'exposition à différentes températures pour la section S_3 selon le protocole P_3

Pour la section S_3, à température ambiante (20°C), la résistance en compression initiale est d'environ 35 MPa. Après 60 minutes d'exposition à 60°C, la résistance en compression diminue d'environ 31% par rapport à la valeur initiale. Cette réduction s'accentue à 100°C, avec une baisse d'environ 42% après 60 minutes d'exposition. La tendance continue à 150°C, avec une perte d'environ 53% après 60 minutes d'exposition. À 250°C, la diminution de f_c est similaire à celle observée à 150°C, avec une chute d'environ 55% après 60 minutes d'exposition.

En comparant avec les résultats obtenus pour les sections S_1 et S_2, on observe une tendance similaire en ce qui concerne l'influence de la température et de la durée d'exposition sur la résistance en compression. Cependant, la diminution de f_c est légèrement moins importante pour la section S_3, ce qui peut s'expliquer par un effet d'échelle.

10.4. Modes de Ruptures

Le protocole P_3 présente des modes de rupture singuliers, fortement influencés par la dimension de la section et de la température, particulièrement sous l'effet de gradients thermiques. Cette partie vise à analyser en détail ces modes de ruptures et à explorer l'impact des gradients thermiques et hydriques sur le comportement du bois.

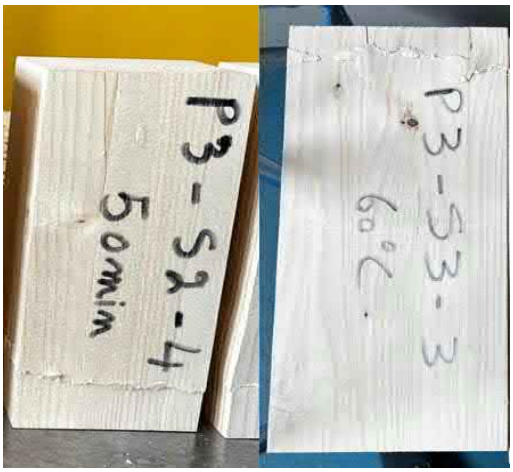


Figure 99 : Modes de rupture à 60°C pour les sections S_2 et S_3

Figure 100 : Modes de rupture à 250°C pour la section S_1

À 60°C, toutes les sections testées (S_1, S_2 et S_3) ont présenté un mode de rupture par écrasement localisé aux extrémités (Fig. 99). Cette observation met en évidence une susceptibilité commune des différentes sections aux contraintes mécaniques à basse température. Le mode de rupture par écrasement des extrémités se caractérise par un écrasement progressif des fibres du bois dans les zones de contact avec les plaques de compression. Ce phénomène se produit lorsque les contraintes sont concentrées aux extrémités, dépassant la capacité de résistance locale du matériau. Il en résulte une déformation continue sans rupture soudaine, avec une capacité portante résiduelle maintenue au-delà du pic de contrainte. La courbe contrainte-déplacement associée montre une montée initiale suivie d'un plateau, indiquant une stabilité relative de la résistance avant une diminution progressive de la contrainte, correspondant à l'écrasement des fibres (Fig. A3.5, Annexe A. 3).

Avec l'augmentation de la température, la section S_1 se distingue des sections S_2 et S_3. En effet, la section S_1 présente des modes de rupture similaires à ceux observés pour les protocoles P_{1bis} et P_2, impliquant des ruptures par traction et cisaillement des fibres (Fig. 100). En revanche, les sections S_2 et S_3 conservent le mode de rupture par écrasement aux extrémités jusqu'à 250°C (Fig. 104). Ce comportement divergeant s'explique par l'influence des dimensions de la section.

Figure 101 : Modes de rupture à 250°C pour la section S_3

La répartition non uniforme de la température dans l'échantillon induit des contraintes thermiques qui influencent considérablement la résistance mécanique et la propagation des fissures. Ces contraintes thermiques sont plus prononcées dans les zones où le gradient thermique est le plus important, ce qui explique la concentration des ruptures dans ces zones.

Les différences de comportement observées entre les sections S_1, S_2 et S_3 suggèrent un rôle potentiel des gradients hydriques dans ce phénomène. Des analyses préliminaires, menées sur la section S_1 et présentées dans la partie suivante, ont porté sur l'exposition à différentes températures (60°C, 100°C, 150°C) pendant 60 minutes. L'objectif était d'évaluer l'existence de gradients hydriques et leur contribution potentielle à la divergence de comportement observée.

10.5. Evaluation de l'influence du gradient hydrique

10.5.1. Méthodologie expérimentale

Afin d'appréhender l'impact du gradient hydrique sur le comportement des échantillons, une série d'expériences rigoureusement contrôlées a été menée. Des échantillons de section S_1, ont été soumis à des températures prédéfinies de 60°C, 100°C et 150°C pendant une durée précisément fixée de 60 minutes.

En préambule à l'étuvage, une mesure initiale de la teneur en eau à la surface des échantillons a été effectuée à l'aide d'un humidimètre à pointe (Fig. 102). Cette étape préliminaire était essentielle pour établir un état de référence de la distribution de l'humidité au sein des échantillons avant leur exposition aux températures élevées. Les échantillons ont ensuite été placés dans une étuve préchauffée à la température cible respective (60°C, 100°C et 150°C) et maintenue à cette température constante pendant une durée de 60 minutes.

Une fois l'étuvage terminé, les échantillons ont été découpés en plusieurs faces selon le schéma prédéfini illustré à la Figure 103. Cette découpe minutieuse a permis de prélever des tranches à différentes profondeurs du matériau, offrant ainsi une résolution spatiale adéquate pour l'analyse de la distribution de l'humidité. La teneur en eau de chaque tranche a ensuite été déterminée, permettant d'établir un profil de distribution de l'humidité à l'intérieur des échantillons après exposition aux températures élevées.

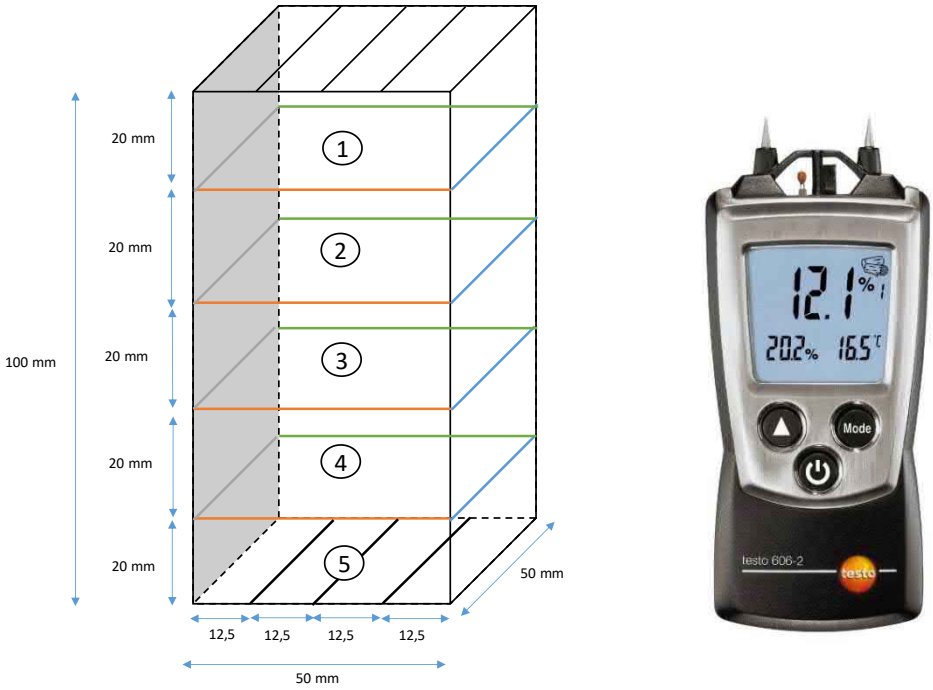


Figure 102 : Mesure de la teneur en eau à la surface de l'échantillon de section S_1 à l'aide d'un humidimètre à pointe

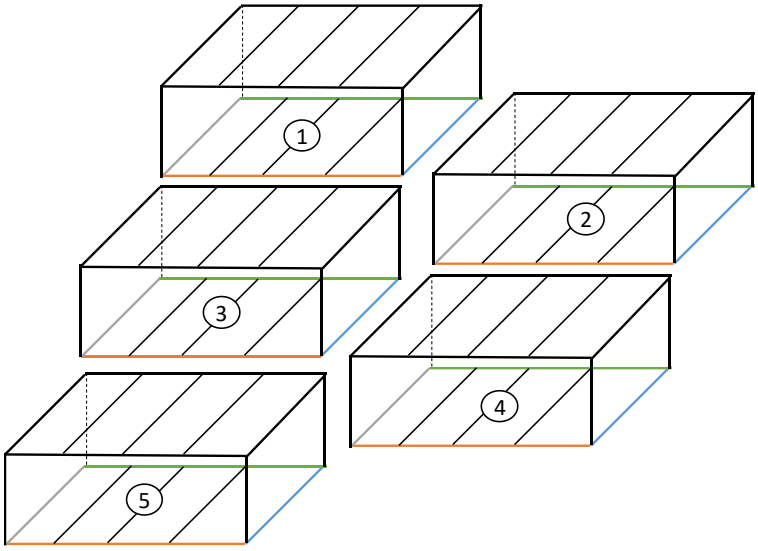


Figure 103 : Découpe des échantillons en 5 tranches après étuvage à différentes températures

10.5.2. Interprétation des résultats

- Echantillon à 60°C

La Figure 104 présente la distribution de la teneur en eau à la surface et au cœur de l'échantillon, avant et après un étuvage à 60°C pendant 60 minutes. Cette Figure illustre deux des quatre faces latérales de l'échantillon, les deux autres étant symétriques par rapport à celles représentées. Les valeurs de teneur en eau (MC) dans le plan largeur x longueur sont moyennées, bien qu'un gradient de teneur en eau ait été observé entre les surfaces extérieures et l'intérieur de l'échantillon (voir annexe A. 4).

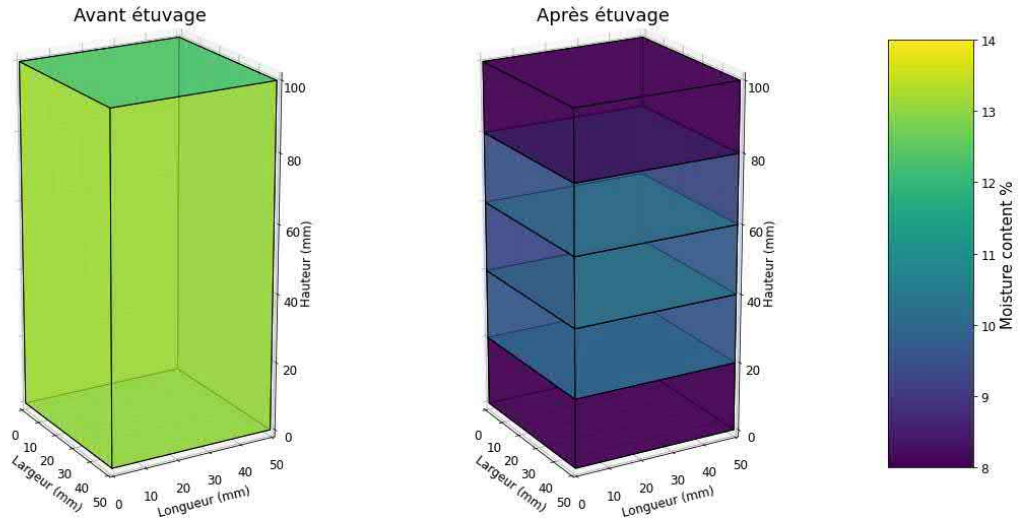


Figure 104 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 60°C pour 60 min

L'analyse de la Figure 104 montre une distribution relativement homogène de la teneur en eau à la surface de l'échantillon avant étuvage, avec des valeurs comprises entre 12,1% et 13,3%, et une prédominance autour de 12,5%. Cette uniformité initiale de la teneur en eau constitue une condition idéale pour l'étude de l'effet de l'étuvage sur la redistribution de l'humidité dans le matériau.

Après étuvage, la répartition de la teneur en eau devient hétérogène, avec une tendance générale à la diminution de l'humidité de la surface vers le cœur de l'échantillon. Ce phénomène est cohérent avec les principes de diffusion de l'humidité, qui favorisent le déplacement de l'eau liée des zones de forte concentration (cœur) vers les zones de plus faible concentration (surface). En parallèle, un phénomène de thermomigration (voir section 4.3) se produit, correspondant à un transfert d'humidité induit par les gradients de température, déplaçant l'eau des zones plus chaudes (surface) vers les zones plus froides (cœur). Ce processus combine ainsi à la fois la diffusion de l'humidité et la thermomigration, créant une répartition complexe de la teneur en eau à travers l'échantillon. Il est important de souligner que l'humidimètre utilisé ne permet pas de mesurer des valeurs inférieures à 8%.

- Echantillon à 100°C

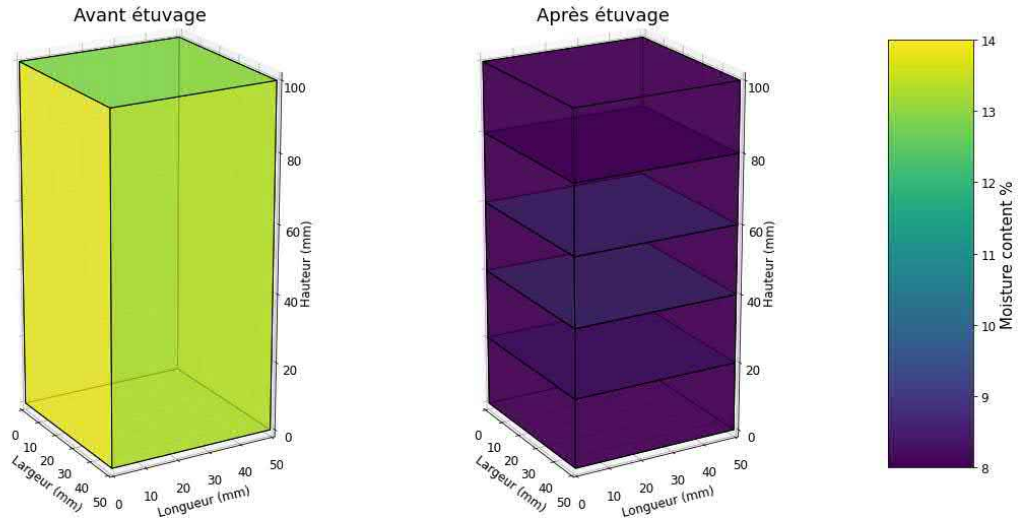


Figure 105 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 100°C pour 60 min

L'analyse de la Figure 105 révèle, de manière similaire à l'échantillon chauffé à 60°C (Fig. 104), une distribution hétérogène de la teneur en eau au sein de l'échantillon chauffé à 100°C. On observe une tendance générale à la diminution de la teneur en eau de la surface vers le cœur, en lien avec les mécanismes combinés de diffusion de l'humidité et de thermomigration. À cette température élevée, l'effet de thermomigration est plus prononcé, en raison des gradients de température plus importants, ce qui accentue le transfert d'humidité des zones plus chaudes (surface) vers les zones plus froides (cœur).

Cependant, la perte d'humidité est nettement plus prononcée à 100°C qu'à 60°C. En effet, la diminution moyenne de la teneur en eau atteint environ 25% à 100°C, contre 10% à 60°C. De plus, la distribution de l'humidité devient plus hétérogène à 100°C, avec des zones de forte évaporation concentrées en surface, tandis que le cœur de l'échantillon subit une perte d'humidité plus modérée. Cette différence de teneur en eau entre la surface et le cœur est plus accentuée à 100°C, mettant en évidence l'influence accrue de la température sur les mécanismes de transfert et de redistribution de l'humidité à travers le matériau.

- Echantillon à 150°C

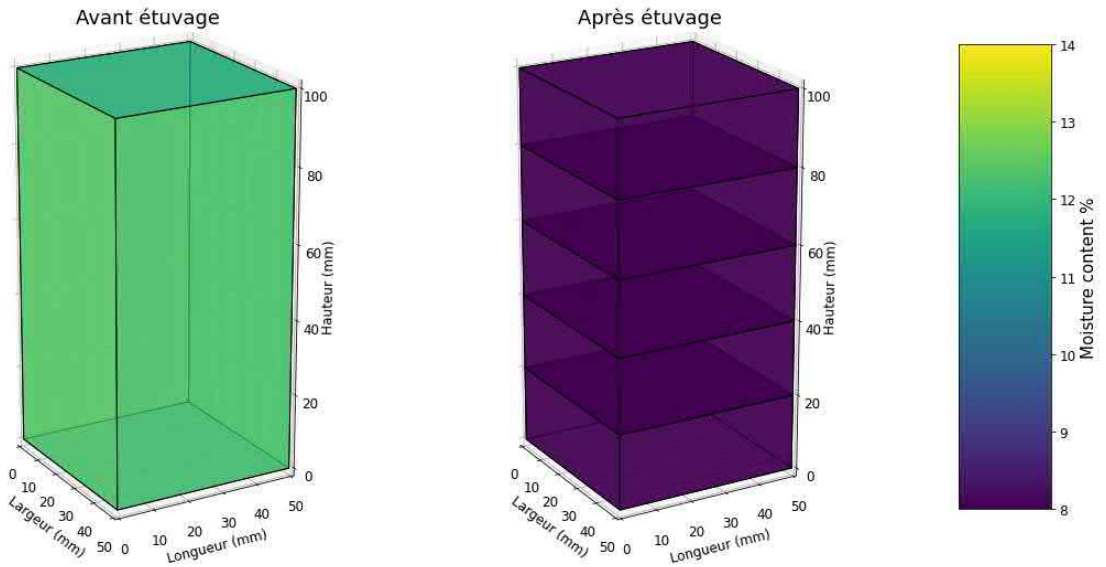


Figure 106 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 150°C pour 60 min

L'étuvage à 150°C pendant 60 minutes a permis d'atteindre un état sec pour l'échantillon, avec une perte de masse relative de 16%. Cette observation contraste avec les résultats obtenus pour les échantillons étuvés à 60°C et 100°C, où seule la surface de l'échantillon semblait sèche tandis que le cœur restait humide.

Il est important de souligner que la détermination précise d'un éventuel gradient d'humidité entre la surface et le cœur de l'échantillon reste complexe. En effet, l'humidimètre utilisé ne fournit pas de mesure précises en dessous d'une teneur en eau de 8%. Or, comme le montre la Figure 109, toutes les faces de l'échantillon étuvé à 150°C présentaient des teneurs en eau inférieures à ce seuil, rendant impossible leur mesure directe par l'humidimètre. Néanmoins, la perte de masse relative de 16% confirme que l'échantillon a subi un séchage complet à 150°C.

Conclusion Partie 2 – Section B

Cette partie s'est focalisée sur l'analyse de l'impact des gradients thermiques et hydriques sur le comportement mécanique du bois lamellé-collé d'épicéa. Divers protocoles d'essais ont été mis en œuvre afin d'évaluer les profils thermiques et hydriques dans différentes conditions.

Les résultats obtenus démontrent que la présence d'eau retarde le réchauffement du matériau autour de 100°C, comme en témoigne l'observation d'un palier de température à cette valeur, comme déjà évoqué dans la partie 4.3. Ce palier varie en fonction de la position des thermocouples et de l'épaisseur des échantillons.

Par ailleurs, les propriétés mécaniques, telles que la résistance en compression parallèle au fil du bois et le module d'élasticité axial, sont sensibles aux températures de séchage, à la durée d'étuvage et aux teneurs en eau. Une relation opposée entre la température et la teneur en eau sur les propriétés mécaniques du bois a été mise en évidence. La diminution de la teneur en eau conduit à une augmentation de ces propriétés, tandis que l'élévation de la température entraîne leur diminution. Ceci s'explique par les dégradations subies par les éprouvettes à haute température (fissures, dégradation de la colle), les dégradations thermiques de la lignine à partir de 150°C et l'effet d'échelle lié à la taille des échantillons. Une relation exponentielle reliant les propriétés mécaniques à la température et à la teneur en eau a permis de valider les résultats expérimentaux pour les protocoles P_{1bis} et P_2, où les gradients hydriques et thermiques étaient finalement très faibles voire absent. Ainsi, l'application des formules (29) et (30) a été possible dans ces cas. En revanche, pour le protocole P_3, cette relation ne s'applique pas en raison de la présence de gradients thermiques et hydriques significatifs.

L'effet immédiat et permanent de la température à différentes durées d'étuvage a également été examiné. Les résultats confirment l'influence significative des gradients thermiques et hydriques sur la résistance en compression du bois, tout en soulignant la réversibilité du comportement mécanique vis-à-vis de la température en tenant en compte de la distribution de la teneur en eau. En effet, après exposition à des températures élevées suivie d'un refroidissement, le bois retrouve des résistances en compression proches, voire supérieures à celles observées à 20°C, au moins pour S_1, ce qui reste à confirmer pour S_2 et S_3.

L'étude a également mis en lumière une relation étroite entre l'évolution de la couleur du bois et son exposition à la chaleur. Les modifications chromatiques s'intensifient avec l'augmentation de la température, devenant particulièrement prononcées au-delà de 150°C. Ces changements de couleur résultent de la combinaison de plusieurs facteurs, tels que l'oxydation thermique, la décomposition des composés organiques et la migration des extraits internes vers la surface du bois.

Enfin, l'analyse des modes de rupture des échantillons testés en compression parallèle au fil a révélé une forte dépendance vis-à-vis de la température de séchage et des gradients thermiques et hydriques.

Partie 3

Etudes Expérimentales à l'échelle structurale

Cette partie présente une analyse expérimentale approfondie du comportement thermo-hygro-mécanique des éléments structuraux en bois, avec un intérêt particulier porté sur des poteaux soumis à des efforts de compression, représentatifs des conditions d'utilisation en contexte réel. L'objectif principal de cette étude est de quantifier l'influence des gradients thermiques et hydriques sur les propriétés mécaniques du bois à l'échelle structurale.

Dans un premier temps, nous détaillons la méthodologie expérimentale employée pour réaliser les essais de compression sur des poteaux en bois lamellé-collé, exposés à diverses sollicitations thermiques. Ensuite, les résultats des essais mécaniques menés dans des conditions variées sont présentés et discutés. Enfin, une comparaison entre ces résultats et ceux obtenus à l'échelle du matériau est effectuée.

Chapitre 11

Matériaux et Méthodes

Dans ce chapitre, nous présentons l'essence de bois utilisée pour les poutres testées, les sections étudiées, une description du dispositifs expérimentaux mise en œuvre, ainsi que les protocoles expérimentaux adoptés.

11.1. Matériaux : le bois lamellé-collé

Cette étude porte sur des poutres en bois lamellé-collé d'épicéa identiques à celles utilisées pour le prélèvement des sections S_1, S_2 et S_3 dans les essais à l'échelle du matériau (Partie 2). Le choix de l'épicéa s'explique par son utilisation répandue dans la construction en France. De plus, le lamellé-collé présente des avantages par rapport au bois massif, tels que la possibilité d'atteindre des sections et des portées plus importantes, tout en offrant des propriétés mécaniques et physiques relativement plus homogènes (Falk et Colling 1995, Dietsch et Tannert 2015). Cette homogénéité est notamment due au processus de fabrication, qui permet d'éliminer les défauts du bois avant l'encollage des lamelles, assurant ainsi une meilleure régularité des performances. Par ailleurs, il est pertinent de comparer les résultats obtenus à l'échelle structurale à ceux obtenus à l'échelle du matériau, d'autant plus que les sections ont été prélevées sur les mêmes poutres testées.

Au total, 6 poutres de deux sections différentes font l'objet de cette étude. Les poutres étudiées sont conformes à la norme NF EN 14080 et appartiennent à la classe GL24h. Le tableau 16 présente les propriétés mécaniques des poutres GL24h selon cette norme.

Propriété	Valeur	Unité
Résistances		
Flexion	24	MPa
Traction axiale	16.5	MPa
Traction transversale	0.40	MPa
Compression axiale	24	MPa
Compression perpendiculaire	2.3	MPa
Cisaillement	2.7	MPa
Modules		
Module d'élasticité moyen axial	11.6	GPa
Module d'élasticité transversal	8.5	GPa
Module de cisaillement moyen	0.75	GPa

Tableau 16 : Caractéristiques mécaniques des poutres GL24h selon la norme NF EN 14080

Les poteaux étudiés présentent deux sections distinctes :

- **Section S_4 :** 10,5 cm x 11,3 cm
- **Section S_5 :** 13,5 cm x 13,7 cm

Ces dimensions correspondent à des sections proches de celles couramment utilisées dans les applications réelles. La hauteur de 150 cm a été spécifiquement choisie en fonction des dimensions du four utilisé pour les essais thermiques.

Chaque poteau est constitué de lames de bois assemblées par collage, conformément à la technique du bois lamellé-collé. Ce procédé assure une meilleure uniformité des propriétés mécaniques, tout en minimisant les variations naturelles du matériau. L'épaisseur des lames varient selon la section :

- **Section S_4 :** 3 lames de 3,5 cm d'épaisseur chacune
- **Section S_5 :** 3 lames de 4,5 cm d'épaisseur chacune

Par conséquent, une analyse de compression axiale et une vérification des charges critiques de flambement ont été réalisées sur les deux sections de poteaux afin de garantir leur stabilité structurelle sous les charges appliquées. La charge critique de flambement, déterminée selon la méthode d'Euler, représente la limite au-delà de laquelle un poteau peut perdre sa stabilité latérale. Pour la section S_4 (10,5 cm x 11,3 cm), la charge critique de flambement est d'environ 62 tonnes, tandis que pour la section S_5 (13,5 cm x 13,7 cm), elle est estimée à environ 140 tonnes.

Les charges appliquées sur les poteaux ont été calculées en prenant en compte une contrainte admissible de 30 MPa, bien que la résistance caractéristique soit de 24 MPa selon la Tableau 16 conformément à la norme NF EN 14080. Cette valeur de 30 MPa a été retenue sur la base des résultats obtenus après essais de compression à température ambiante. Pour la section S_4, la charge appliquée est de 36 tonnes, tandis que pour la section S_5, elle est de 57 tonnes, obtenues en multipliant la contrainte admissible par la section transversale de chaque poteau. Ces charges appliquées sont inférieures aux charges critiques calculées, garantissant ainsi la stabilité des poteaux sous les conditions de charge testées.

11.2. Protocoles et dispositifs expérimentaux

11.2.1. Cellule d'essais

L'expérimentation se déroule dans un four équipé d'un ensemble complet de dispositifs de mesure et de contrôle, garantissant une précision et une fiabilité optimales des données recueillies (Fig. 107). Quatre brûleurs, répartis uniformément de chaque côté du four, assurent une distribution homogène de la température, minimisant ainsi les gradients thermiques dans le four. Des thermocouples (TC), positionnés stratégiquement avec deux en haut et deux en bas sur chaque face du four, permettent une mesure et une régulation précises de la température en temps réel, assurant un contrôle rigoureux des conditions d'essai. Le dispositif comprend également un capteur de déplacement et un capteur de force de haute précision, destinés à enregistrer avec exactitude les forces et les déplacements appliqués aux poutres durant les essais de compression. Une fois l'essai démarré, le four est hermétiquement fermé afin de confiner la chaleur et d'assurer une répartition homogène de la température à l'intérieur, minimisant ainsi l'influence de facteurs externes sur les résultats.

Grâce à cet appareillage complet, le four offre la possibilité d'évaluer avec une grande précision les performances thermiques et mécaniques des poutres testées dans différentes conditions, garantissant ainsi une analyse rigoureuse et détaillée.

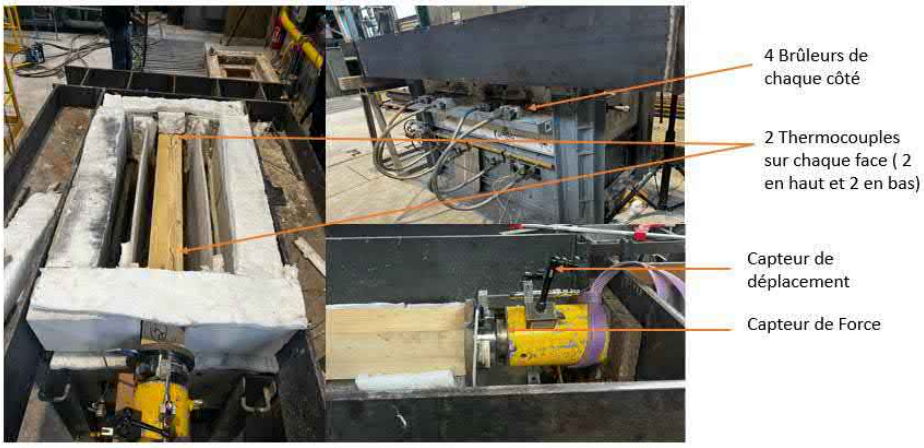


Figure 107 : Cellule d'essais

11.2.2. Processus de chargement des poutres

Le capteur de force est couplé à une pompe hydraulique manuelle pour le chargement des poutres, comme illustré sur la Figure 108. Ce système permet d'appliquer une charge croissante de manière contrôlée sur les poutres. La charge est appliquée progressivement jusqu'à atteindre la résistance maximale à la rupture de la poutre. Le test se termine lorsque la charge atteint 50% de la résistance maximale enregistrée (Fig. 109).

Figure 108 : Pompe hydraulique manuelle utilisée pour le chargement des poutres

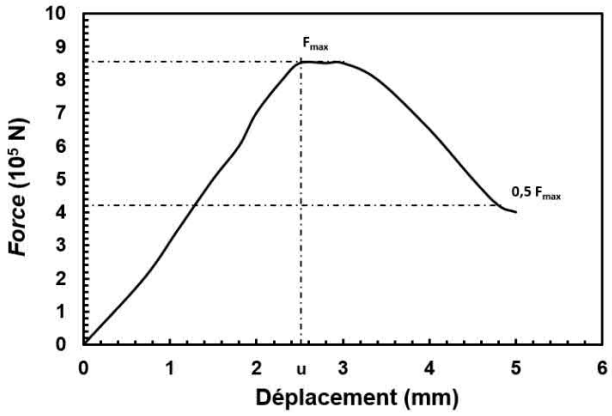


Figure 109 : Exemple de force appliquée en fonction du déplacement pour les essais de compression, u représente le déplacement correspondant à force maximale F_{max}

11.2.3. Instrumentation des poutres

La température au sein des poutres a été mesurée à l'aide de huit thermocouples de type K d'un diamètre de 1,5 mm. Il est important de préciser que, en raison des dimensions du four utilisé, seule une section d'un mètre, sur une longueur totale de 1,5 mètre, a été exposée au feu, ce qui justifie la concentration des thermocouples dans cette zone spécifique.

La distribution des thermocouples a été soigneusement réalisée afin d'évaluer les gradients thermiques à la fois longitudinaux et transversaux au sein des poutres. Cette disposition permet d'obtenir une analyse détaillée de la répartition de la température dans les éléments. Les Figures 110 et 111 illustrent respectivement la distribution des thermocouples dans les poutres S_4 et S_5.

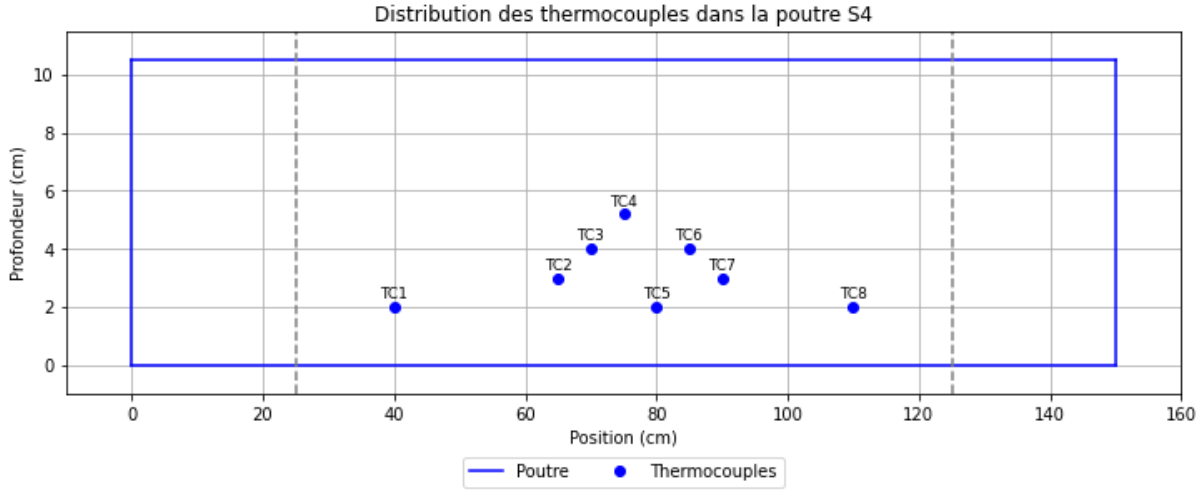


Figure 110 : Distribution des thermocouples TC dans la poutre S_4

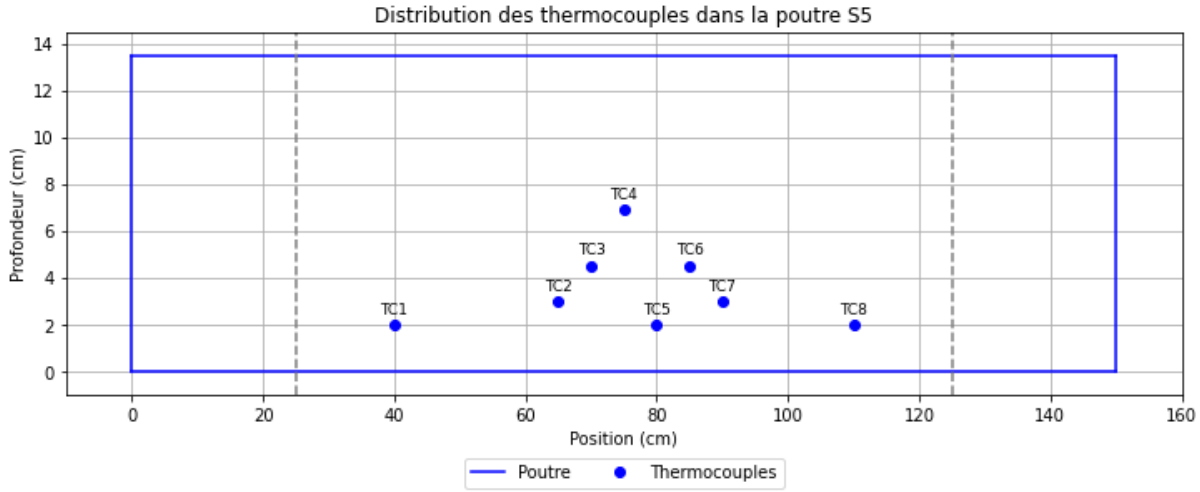


Figure 111 : Distribution des thermocouples TC dans la poutre S_5

Les poutres S_4 et S_5, représentées par des rectangles bleus dans les Figures 110 et 111, ont des dimensions différentes. La poutre S_4 présente une profondeur de 10,5 cm et une longueur de 150 cm, tandis que la poutre S_5 possède une profondeur de 13,5 cm pour la même longueur. La partie des poutres exposées au feu est indiquée par les lignes discontinues.

La répartition des thermocouples, représentés par des points bleus, diffère entre les deux poutres :

- Positions Longitudinales : Les thermocouples sont situés entre 40 cm et 110 cm le long des poutres S_4 et S_5.
- Profondeurs : Les thermocouples sont principalement situés entre 2 cm et la mi-profondeur (5,2 cm pour S_4 et 6,9 cm pour S_5).

Les thermocouples sont principalement disposés vers le centre de la poutre, en particulier entre 60 cm et 90 cm de longueur, avec 2 thermocouples aux extrémités.

Figure 112 : Implémentation des thermocouples dans les poutres

Figure 113 : Thermocouple de type « K » utilisé

Afin de mesurer les températures avec précision aux profondeurs souhaitées dans les poutres, des thermocouples ont été installés conformément aux schémas présentés dans les Figures 110 et 111. Pour garantir un positionnement adéquat et une mesure fiable, les thermocouples ont été fixés à l'aide d'agrafes, comme illustré dans la Figure 112. Une fois les thermocouples solidement fixés, les trous percés pour leur insertion ont été soigneusement rebouchés avec de l'isolant ISOFRAX afin d'éliminer tout effet parasite potentiel lié à leur présence et garantir un bon transfert de chaleur entre le bois et les thermocouples.

11.2.4. Protocoles expérimentaux

Les protocoles expérimentaux pour les essais à l'échelle structurale sont élaborés à partir des protocoles P_3 et P_4 établis à l'échelle du matériau. Cette démarche vise à valider l'applicabilité de ces protocoles à des éléments structuraux plus complexes.

En premier lieu, des essais de compression à température ambiante sont réalisés sur les deux sections S_4 et S_5. Ces essais servent de référence pour les essais ultérieurs menés dans des conditions thermiques variées.

Conformément au protocole P_3, des essais sont menés en chauffant les poutres à 250°C pendant 60 minutes dans un four. Ensuite, les essais de compression sont effectués à chaud. Une poutre de chaque section est testée selon cette procédure.

Suivant le protocole P_4, une poutre de chaque section est chauffée à 250°C pendant 60 minutes, puis refroidie pendant 24 heures avant d'être soumise à un essai de compression à froid.

Pour les deux protocoles, il est à noter qu'initialement, il était convenu que l'échauffement à 250°C dure 60 minutes à partir du moment où le four atteignait une température homogène de 250°C. Cependant, une inflammation observée sur une poutre (voir section 12.1.2.1) a nécessité une modification du protocole.

Les essais du protocole P_3 visent à évaluer l'effet immédiat de l'élévation de la température sur le comportement des poutres en cas d'incendie, en tenant compte des gradients thermiques et hydriques potentiels. En revanche, les essais du protocole P_4 visent à analyser l'effet permanent de la température sur les poutres après refroidissement et à vérifier la réversibilité des propriétés mécaniques du bois vis-à-vis de la température à l'échelle structurale.

Chapitre 12

Résultats des essais de compression à l'échelle structurale

Dans ce chapitre, nous présentons les profils thermiques des poutres durant les phases de chauffe et de refroidissement, l'influence immédiate et permanente de la température sur la résistance en compression, les modes de rupture observés des poutres, ainsi qu'une comparaison avec les essais réalisés à l'échelle du matériau.

12.1. Données des Thermocouples

12.1.1. Données des thermocouples du four

La disposition des thermocouples (TC) à l'intérieur du four est illustrée par la Figure 114. Les TC1 et TC2 sont placés dans la partie inférieure du four, tandis que les TC3 et TC4 se situent dans la partie supérieure. Il est important de souligner que le système de ventilation du four est localisé en dessous du TC2.

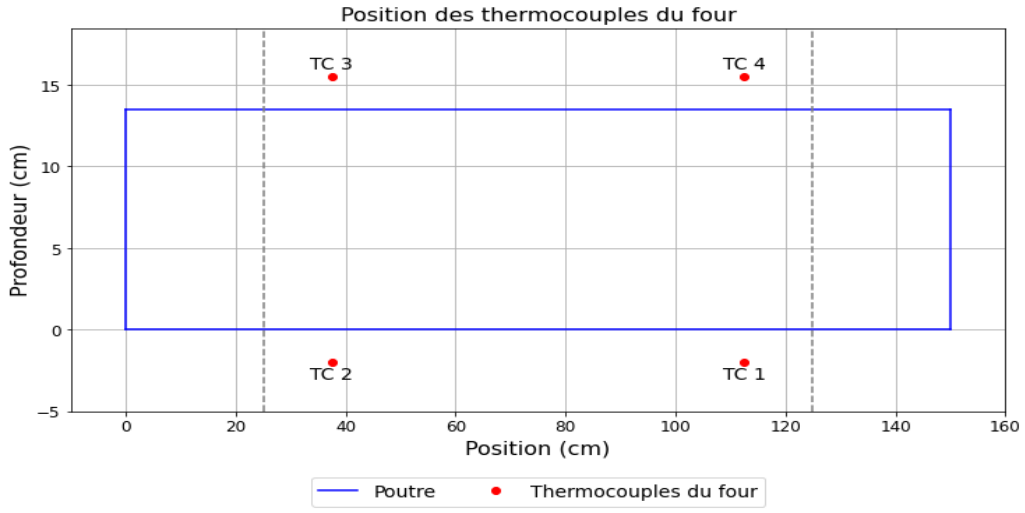


Figure 114 : Position des Thermocouples dans le four

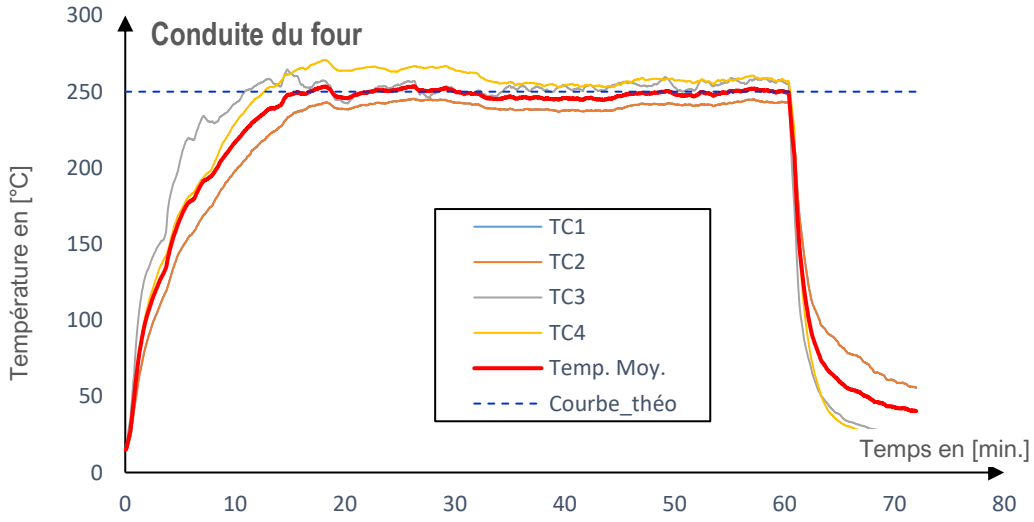


Figure 115 : Données des Thermocouples dans le four

La Figure 115 montre que les températures enregistrées par les thermocouples TC1 et TC2, placés dans la partie inférieure du four, sont constamment inférieures à celles enregistrées par les TC3 et TC4, situés dans la partie supérieure. Cette différence de température est attribuable à la présence du système de ventilation dans la partie inférieure du four, qui génère un flux d'air chaud vers le haut du four. La température moyenne du four atteint 250°C après 15 min, et demeure toujours entre les températures enregistrées par les TC1 et TC4, indiquant ainsi que la répartition de la chaleur dans le four est relativement homogène.

12.1.2. Données des Thermocouples de la poutre

12.1.2.1. Phase de chauffe

- **Poutre S_4**

La Figure 116 illustre la distribution des thermocouples et des températures dans la poutre S_4 après avoir être chauffée à 250°C pendant 60 minutes. La poutre est représentée par un rectangle horizontal, avec la position des thermocouples indiquée par des points. Les températures mesurées par les thermocouples sont représentées par des valeurs numériques en degrés Celsius et par une échelle de couleurs.

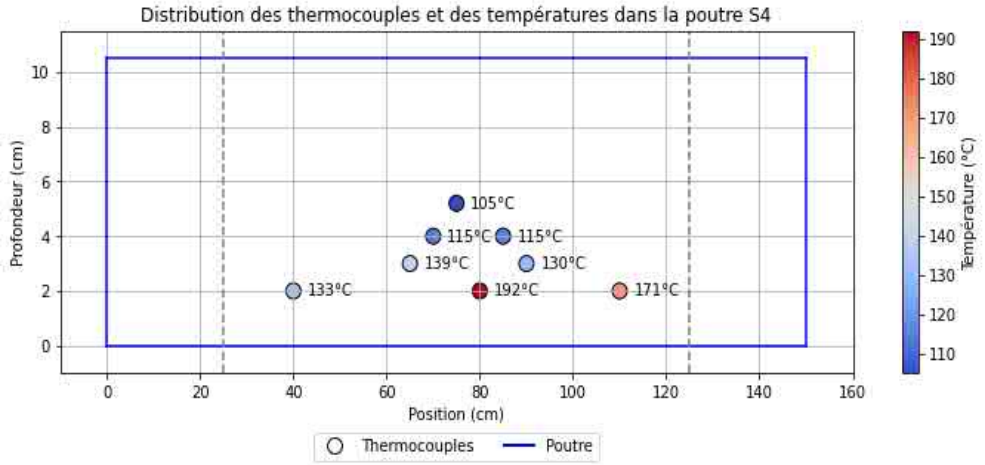


Figure 116 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_4

L'analyse de la Figure permet de dégager plusieurs observations importantes :

1. **Distribution hétérogène de la température à profondeur constante :**

On observe une hétérogénéité marquée de la température, avec une valeur maximale de 192°C mesurée à la surface, près du centre longitudinal de la poutre. En comparaison, des températures plus basses ont été enregistrées aux extrémités, avec des valeurs de 133°C et 171°C à une même profondeur de 2 cm. Cette disparité met en évidence l'existence de gradients thermiques significatifs, tant sur la longueur de la poutre qu'en profondeur.

2. **Impact de la ventilation :**

L'influence notable de la ventilation est illustrée par la valeur de température significativement plus basse enregistrée par le TC1 (133°C) par rapport aux TC5 et TC8 (192°C et 171°C) à profondeur égale. Cette observation souligne l'importance de prendre en compte les conditions d'exposition lors de l'analyse du comportement thermique des structures, en particulier dans le contexte d'une ventilation potentiellement hétérogène.

3. **Homogénéité relative des températures à l'intérieur de la poutre :**

Des valeurs de températures relativement uniformes sont observées à des profondeurs de 3 cm (139°C et 130°C) et 4 cm (115°C), suggérant une diffusion efficace de la chaleur à l'intérieur de la poutre.

4. **Gradient thermique important :**

La température minimale de 110°C enregistrée au cœur de la poutre confirme la présence d'un gradient thermique important entre la surface et le cœur.

- **Poutre S_5**

Lors de l'échauffement de la poutre S_5, un incident s'est produit, provoquant l'inflammation de la poutre (Fig. 117). Initialement, il était prévu de commencer l'échauffement à 250°C une fois que le four aurait atteint une température homogène de 250°C, ce qui prend environ 10 minutes. Ainsi, la poutre aurait été exposée à une température élevée pendant une durée totale d'environ 70 minutes, incluant le temps de stabilisation thermique avant l'essai prévu de 60 minutes.

Figure 117 : Poutre S_5 enflammée durant l'essai

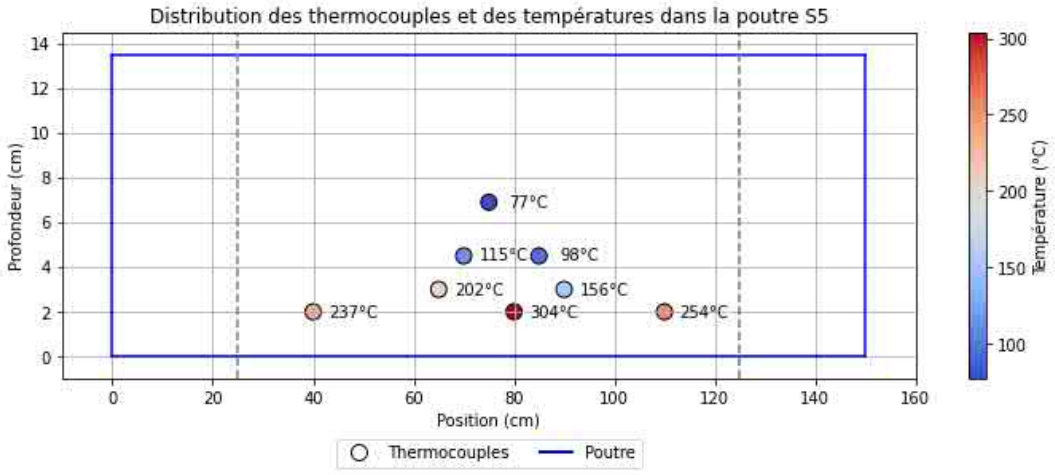


Figure 118 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_5 enflammée

L'analyse des données des thermocouples (Fig. 118) confirme que l'incident s'est produit approximativement à 80 cm de la position 0. En effet, le thermocouple situé à cet endroit a enregistré une température de 304°C, dépassant largement la température maximale admissible pour la poutre. La Figure 118 illustre également une hétérogénéité de la température à toutes les profondeurs analysées (2 cm, 3 cm et 4,5 cm), ainsi qu'un gradient thermique important entre le cœur et la surface de la poutre. Il est important de noter que cet essai a été répété une seconde fois après modification du protocole, en chauffant la poutre pendant 60 minutes, incluant les 10 minutes nécessaires pour atteindre la température homogène de 250°C. Cette adaptation a permis de mener l'essai sans que l'inflammation de la poutre ne se reproduise (Fig. 119).

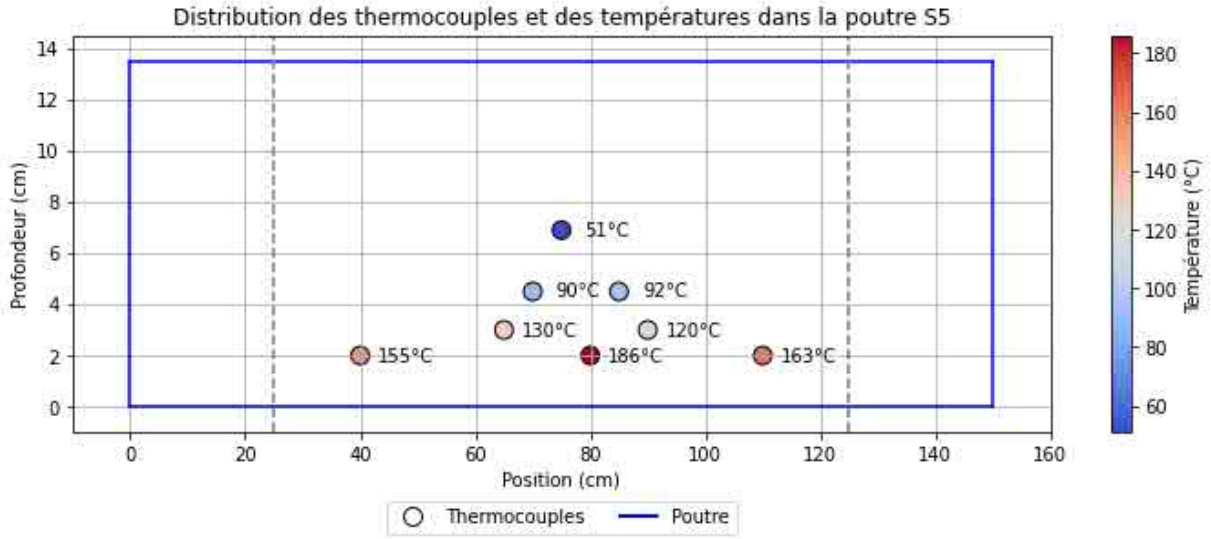


Figure 119 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_5 (essai répété)

L'analyse des données de température obtenues pour la poutre S_5 (Fig. 119) révèle un profil de distribution similaire à celui observé pour la poutre S_4. Une hétérogénéité notable de la température est présente à une profondeur de 2 cm. En revanche, des valeurs relativement uniformes sont atteintes aux profondeurs de 3 cm (130°C et 120°C) et 4,5 cm (90°C et 92°C), suggérant une diffusion efficace de la chaleur à l'intérieur de la poutre. La température minimale de 51°C enregistrée au cœur de la poutre met en évidence la présence d'un gradient thermique important entre la surface et le cœur de l'élément.

12.1.2.2. Phase de refroidissement

La Figure 120 illustre l'évolution des températures au sein de la poutre S_5 pendant le cycle de refroidissement précédant l'essai de compression, réalisé pour évaluer la réversibilité du comportement mécanique de la poutre vis-à-vis de la température.

On observe une légère augmentation de température pour les thermocouples TC3, TC4 et TC6 durant la phase de refroidissement, tandis que les températures des autres thermocouples diminuent. Cette hausse est particulièrement notable dès le début du refroidissement et se maintient tout au long de la phase, avant que les températures ne se rejoignent autour de 20°C après environ 19 heures. Un comportement similaire a été observé pour la poutre S_4.

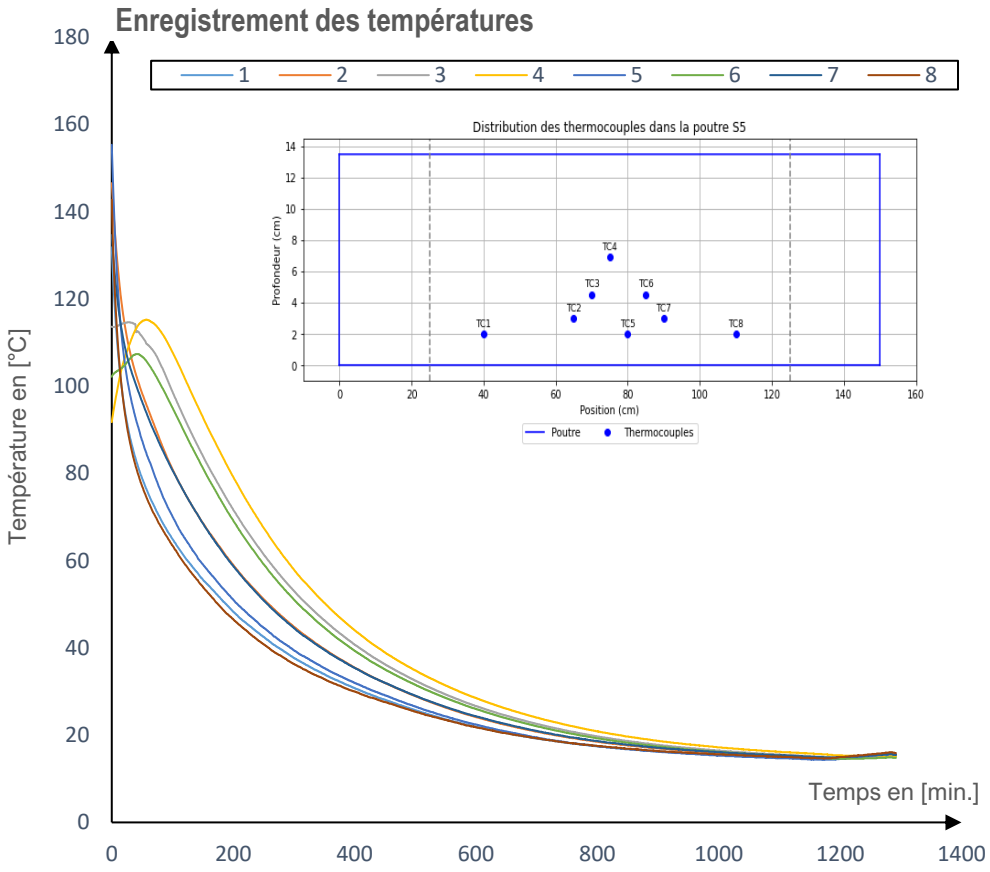


Figure 120 : Evolution des températures au sein de la poutre S_5 lors du cycle de refroidissement (24 heures avant l'essai de compression)

A noter que les thermocouples TC3, TC4 et TC6 correspondent à ceux qui sont placés le plus en profondeur. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer l'augmentation de température des thermocouples TC3, TC4 et TC6 pendant le refroidissement :

- **Thermophorèse :** Comme mentionné dans la partie 4.3, la thermophorèse est un phénomène de transfert de masse provoqué par un gradient de température. Dans ce cas, l'évaporation de l'eau contenue dans le bois lors de la phase de chauffage crée un gradient de concentration de vapeur d'eau. Ce gradient provoque la diffusion de la vapeur d'eau du cœur de la poutre vers sa surface, entraînant un transfert de chaleur qui peut être observé par les thermocouples TC3, TC4 et TC6.

- **Convection :** La convection, également décrite en partie 4.3, correspond au mouvement d'un fluide sous l'effet d'un gradient de température ou de pression. La Figure 119 met clairement en évidence un gradient de température important dans la poutre. Ce gradient induit une convection de l'air chaud du cœur vers la surface, contribuant ainsi à l'augmentation de température des thermocouples TC3, TC4 et TC6.

- **Porosité du bois :** La porosité du bois joue un rôle clé dans les processus de transfert thermique tels que la thermophorèse et la convection. Dans le cas des bois résineux, la porosité est principalement due à la structure des trachéides, qui facilitent la diffusion des molécules d'eau et des gaz ainsi que la circulation de l'air. Cette porosité influence directement les variations de température observées aux niveaux des thermocouples TC3, TC4 et TC6 pendant la phase de refroidissement.

12.2. Détermination de la section non carbonisée de la poutre S_5

La phase d'échauffement de la poutre S_5 a été compromise par un incident conduisant à son inflammation (Fig. 117), en raison d'un protocole inadapté aux conditions expérimentales, comme cela a été précédemment expliqué. Cet événement a nécessité une réévaluation précise de la section non carbonisée de la poutre afin de déterminer sa capacité résiduelle à supporter des charges. Deux méthodes distinctes ont été employées à cette fin.

12.2.1. Détermination expérimentale par grattage

Cette méthode consiste à examiner attentivement la poutre pour identifier la limite exacte entre la zone carbonisée et la zone saine (voir Fig. 20). Le processus implique le grattage progressif de la surface de la poutre jusqu'à ce que la zone saine, non altérée, soit visible. Cette approche permet une mesure directe de la section non carbonisée restante.

Figure 121 : Poutre S_5 après essai au feu et avant grattage

Figure 122 : Poutre S_5 après grattage et détermination de la section non carbonisée

La section carbonisée a ensuite été retirée par grattage (Fig. 122) afin de déterminer la nouvelle section non carbonisée. Ainsi, la section S_5 est passée de 135 mm x137 mm à 110 mm x 118 mm. La poutre a été pesée avant (M=10,82 Kg) et après grattage (M=10,29 Kg).

12.2.2. Détermination selon l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2)

Cette méthode normative propose une approche calculatoire pour estimer la section non carbonisée en se basant sur les propriétés géométriques de la poutre, les conditions d'incendie et les propriétés thermiques du matériau. L'Eurocode 5 partie 2 (NF EN 1995-1-2) fournit des équations et des diagrammes permettant de déterminer la profondeur de carbonisation en fonction de la durée d'exposition au feu et des caractéristiques de la poutre (voir section 4.5).

Selon les données des thermocouples de la poutre (Fig. 123), la durée d'exposition de l'incendie est de 19,3 minutes. Selon l'équation 18 (voir section 4.5), la profondeur de carbonisation d pour une durée d'incendie $t = 19{,}3\ min$, avec une vitesse de carbonisation $\beta_0 = 0{,}65$ (Tableau 7) est estimée à :

$$d = 0{,}65\ x\ 19{,}30 = 12{,}5\ mm$$

- Calcul de la section non carbonisée

- Dimensions initiales : 135 mm (largeur) x 137 mm (hauteur)

- En soustrayant deux fois la profondeur de carbonisation aux dimensions initiales de la poutre :

$$b_{non\ carbonisé} = 135\ mm - 2\ x\ 12{,}545\ mm = 109{,}9\ mm$$

$$h_{non\ carbonisé} = 137\ mm - 2\ x\ 12{,}545\ mm = 111{,}9\ mm$$

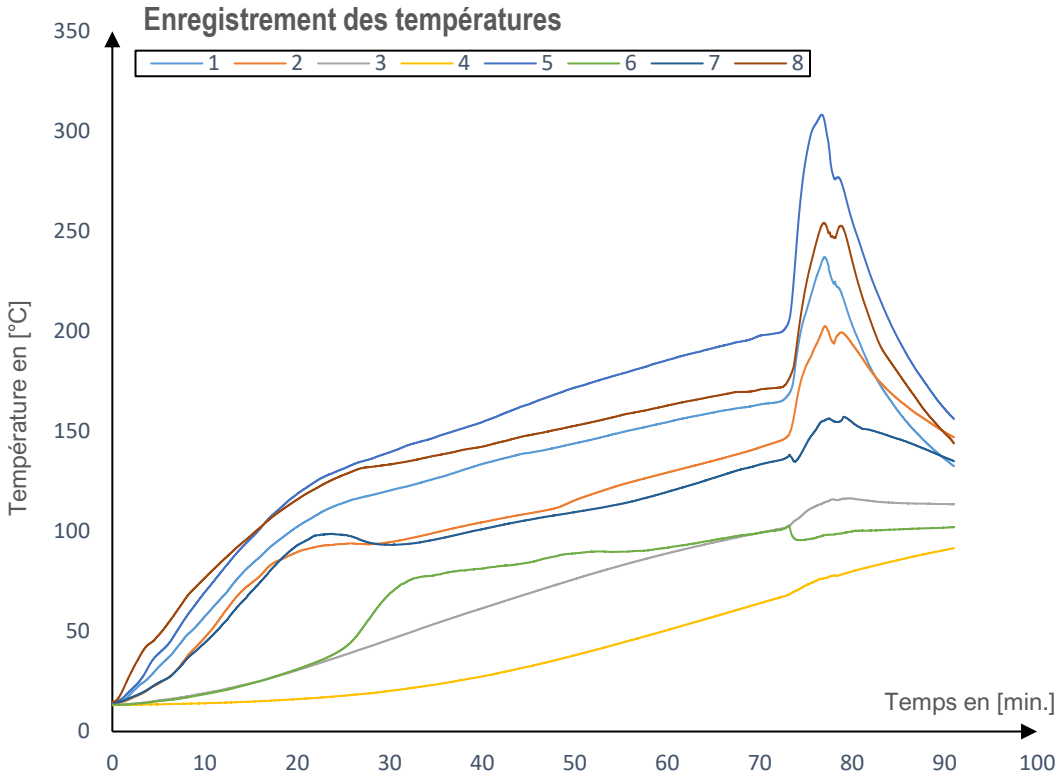


Figure 123 : Données des Thermocouples de la poutre S_5 enflammée

Afin de valider la section résiduelle de la poutre après l'incendie, deux méthodes distinctes ont été utilisées : la détermination expérimentale par grattage et le calcul selon l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2). Les résultats des deux approches présentent une concordance notable, avec une absence d'écart pour la largeur et un écart limité à 6 mm pour la hauteur. Cette faible différence confirme la robustesse et la fiabilité des deux méthodes. Ainsi, la section non carbonisée restante de la poutre, retenue pour la suite de l'analyse, est estimée à 110 mm x 118 mm.

12.3. Propriétés mécaniques

Nous présentons les résultats des essais mécaniques en compression pour l'ensemble des poutres testées, de section S_4 et S_5, et ceci pour les différents états (état initial, état après échauffement et après échauffement et refroidissement) ainsi que pour la poutre enflammée. A noter qu'ici seuls les efforts sont reportés car nous n'avons pas accès aux variations dimensionnelles de la section après échauffement. Par ailleurs, les teneurs en eau sont évaluées à partir des pertes de masse avant et après essais et constituent des valeurs moyennes dans les poutres.

12.3.1. Poutre S_4

La Figure 124 présente l'évolution de l'effort appliqué en fonction du déplacement pour la section S_4 dans trois conditions distinctes : température ambiante, après exposition au feu et réversibilité post-chauffage.

On observe une diminution de l'effort maximal des poutres avec l'augmentation de la température. Cette diminution est d'autant plus importante pour la poutre chauffée pendant 60 minutes et testée immédiatement (35% de l'effort maximal initial) que pour la poutre chauffée pendant 60 minutes et refroidie pendant 24 heures avant d'être testée (17% de l'effort maximal initial). L'exposition immédiate à une température de 250°C réduit drastiquement la capacité portante de la poutre, indiquant une dégradation thermique significative. Les propriétés mécaniques, telles que la rigidité et la résistance, sont notablement affectées, probablement en raison des gradients thermiques et hydriques, et de la dégradation des composants cellulaires du bois.

En revanche, après un cycle de chauffage et de refroidissement de 24 heures, le bois montre une certaine récupération de ses propriétés mécaniques. Cependant, cette récupération reste partielle et les propriétés initiales ne sont pas complètement restaurées. De plus, le taux de teneur en humidité (MC) joue un rôle important dans le comportement mécanique du bois après chauffage. Le MC a été estimé à partir des masses initiales avant les essais et des masses mesurées après chauffage. La section testée après réversibilité, malgré un MC moyen inférieur (6,6%) à celui de la condition de référence (12%), présente une capacité portante réduite. Étant donné que ces observations reposent sur un seul essai, il est difficile de tirer des conclusions définitives.

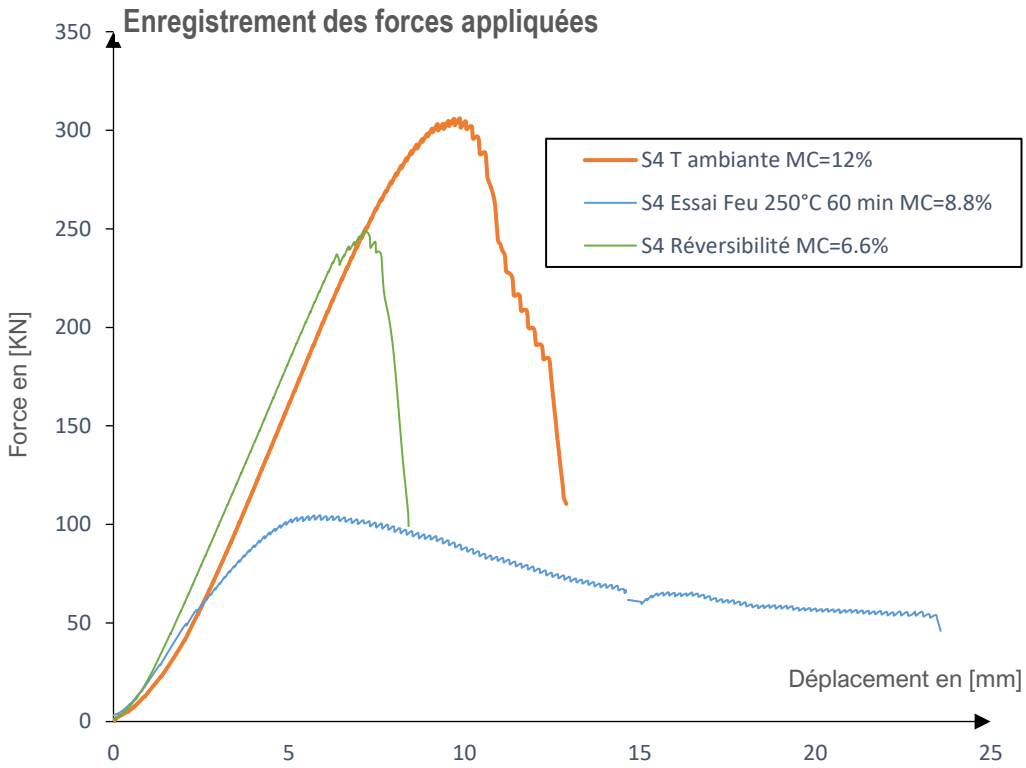


Figure 124 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la section S_4 dans trois conditions distinctes : température ambiante, exposition au feu et réversibilité post-chauffage.

12.3.2. Poutre S_5

La Figure 125 présente les résultats des essais de compression effectués sur les échantillons de la section S_5 après exposition à une température de 250°C pendant 60 minutes. Les effets d'un refroidissement de 24 heures sur la réversibilité des propriétés mécaniques sont également illustrés.

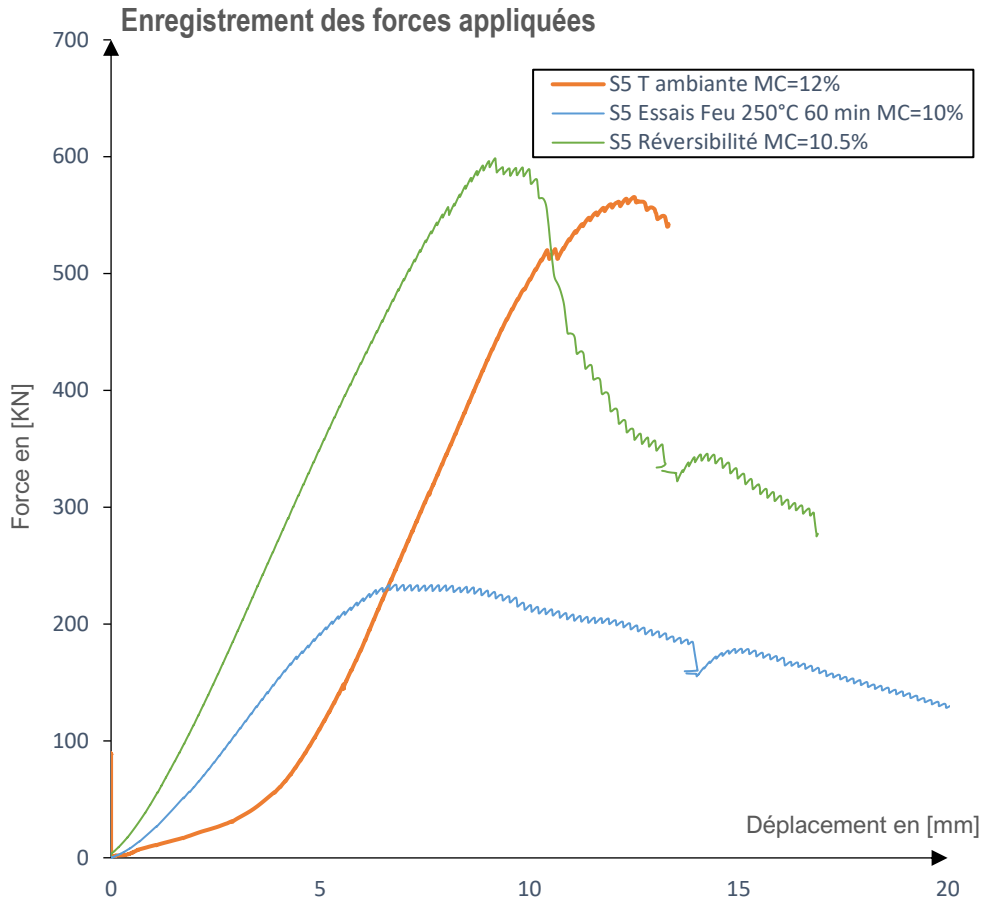


Figure 125 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la section S_5 dans trois conditions distinctes : température ambiante, exposition au feu et réversibilité post-chauffage.

Les résultats obtenus pour la section S_5 concordent avec ceux de la section S_4 pour les échantillons chauffés pendant 60 minutes et testés immédiatement. Une diminution significative de l'effort maximal est observée, atteignant 42 % de la valeur initiale. Cette dégradation met en lumière l'impact sévère des gradients thermiques, ainsi que de la dégradation des composants cellulaires du bois, sur ses propriétés mécaniques, notamment la rigidité et la résistance. Bien que les gradients hydriques n'aient pas été directement évalués dans cette étude, leur influence potentielle, combinée aux effets thermiques, ne peut être exclue. Le taux de teneur en humidité moyen (MC) a été estimé à partir des masses initiales avant les essais et des masses mesurées après chauffage.

En revanche, un comportement particulier est observé après un cycle complet de chauffage et de refroidissement de 24 heures. Le bois dépasse l'effort maximal intial, affichant une augmentation de 6% par rapport à la valeur mesurée à température ambiante pour une teneur en eau moyenne de 10,5%. Étant donné que ces observations reposent sur un seul essai, il est difficile de tirer des conclusions définitives.

- **Poutre enflammée**

La poutre S_5, après avoir été exposée au feu, a subi un test de compression 24 heures après son refroidissement. Afin de comparer les résultats obtenus avec la résistance en compression parallèle au fil du bois à température ambiante, la résistance à température ambiante de la section non carbonisée a été calculée à partir de la résistance caractéristique de la poutre.

$$F = \sigma \times A = 30 \times 110 \times 118 = 389400\ N = 389.4\ KN$$

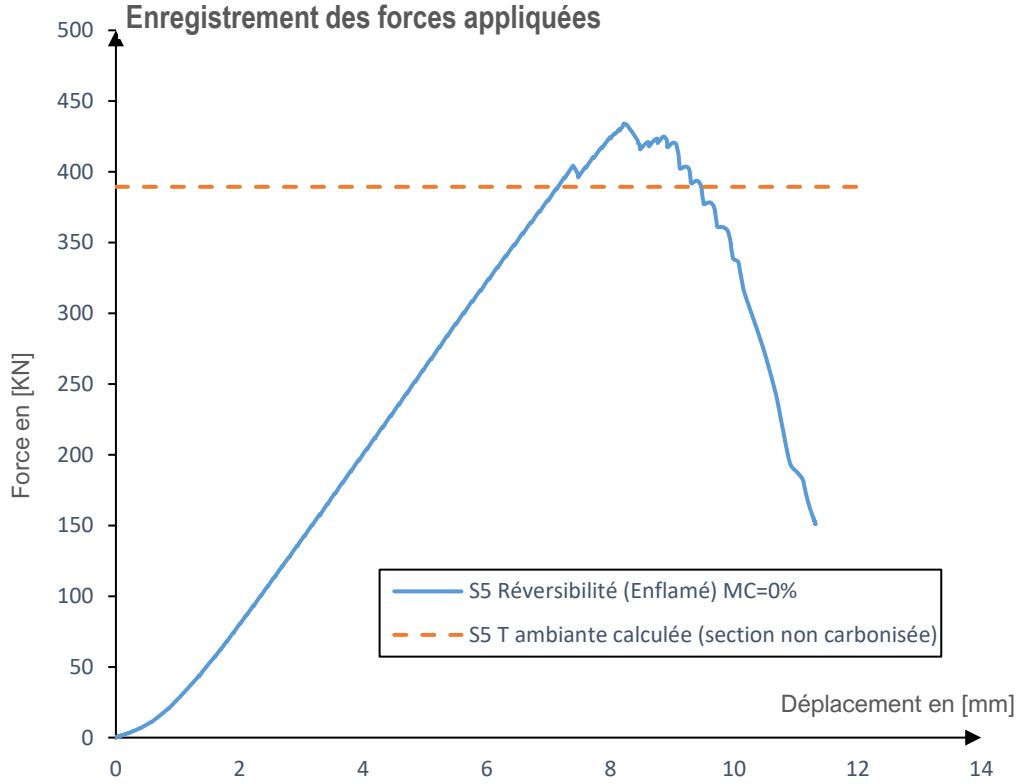


Figure 126 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la poutre S_5 enflammée après refroidissement de 24 heures

Comme le montre la Figure 126, les résultats obtenus pour la poutre S_5 enflammée concordent avec ceux de la poutre non enflammée après un cycle complet de chauffage et de refroidissement de 24 heures. Concernant la teneur en eau, le MC a été estimé à 0 % en moyenne à l'aide de la méthode des pesées, basée sur les masses initiales et finales. Il est également important de noter que le bois ne montre pas seulement une récupération de sa résistance initiale, mais présente une augmentation de 11,5 % par rapport à la valeur mesurée à température ambiante. Cependant, étant donné que cette observation repose sur un seul essai pour chaque cas d'études, il est difficile de tirer des conclusions définitives, et des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

12.3.3. Discussions

Les résultats des essais de compression pour les poutres S_4 et S_5 mettent en lumière des tendances importantes concernant la réponse mécanique du bois soumis à des températures élevées et des cycles de réversibilité thermique. Toutefois, il est essentiel de noter que ces résultats reposent sur un seul essai, ce qui limite la généralisation des conclusions. Des études supplémentaires à l'échelle structurale sont nécessaires pour valider ces observations.

- **Effets des Températures Élevées sur la Résistance en Compression**

La diminution notable de l'effort maximal des poutres S_4 et S_5 immédiatement après exposition à des températures élevées (250°C) démontre la sensibilité du bois à la température, ainsi qu'à l'apparition de gradients thermiques et hydriques. Pour la poutre S_4, l'effort maximal a diminué

à 35% de la valeur initiale après 60 minutes de chauffage, tandis que pour la poutre S_5, cette diminution a atteint 42%. Ces réductions significatives révèlent non seulement une dégradation des composants cellulaires du bois, mais aussi l'effet combiné des gradients thermiques et hydriques, altérant la résistance globale de la structure.

- **Récupération des propriétés mécaniques après refroidissement**

La récupération des propriétés mécaniques après refroidissement varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la durée et l'intensité de l'exposition à la chaleur, la teneur en eau, et les défauts internes du bois. La poutre S_4 a montré une récupération partielle, sans retrouver entièrement ses propriétés mécaniques initiales, probablement en raison de ces facteurs. En revanche, la poutre S_5 a non seulement retrouvé sa résistance initiale, mais a également affiché une augmentation de 6 % par rapport à la valeur mesurée à température ambiante. Cette augmentation pourrait être liée à une réduction de la teneur en eau, mais il est important de noter que ces résultats sont issus d'un seul essai, rendant nécessaire des études supplémentaires pour confirmer cette hypothèse.

- **Impact de la Teneur en Eau**

La teneur en eau joue un rôle important dans le comportement mécanique du bois après exposition à des températures élevées. Des recherches ont montré qu'un bois à faible teneur en eau tend à mieux récupérer après un cycle thermique, mais cette récupération dépend de la manière dont l'humidité est redistribuée dans la structure du matériau (Glass et Zelinka, 2010). Pour S_4, bien que la teneur en eau ait diminué à 6,6 %, la résistance n'a été que partiellement restaurée, confirmant les résultats antérieurs selon lesquels une humidité non uniforme peut générer des contraintes internes réduisant la récupération. À l'inverse, la poutre S_5, avec une teneur en eau de 10,5 %, a montré une meilleure récupération, mettant en évidence l'importance d'une gestion adéquate de l'humidité pour améliorer les performances post-exposition.

- **Comportement de la Poutre Enflammée**

La performance de la poutre S_5 enflammée a révélé des résultats intéressants. Après un cycle complet de chauffage et de refroidissement de 24 heures, cette poutre a montré une augmentation de 11,5 % de la résistance par rapport à la valeur calculée à température ambiante. La teneur en eau, estimée à 0 % par la méthode des pesées après l'inflammation de la poutre et la détermination de la section non carbonisée par grattage, pourrait expliquer cette augmentation. Il est possible que la carbonisation superficielle ait agi comme une barrière thermique, protégeant ainsi le noyau interne de la poutre et permettant une meilleure préservation des propriétés mécaniques. Cependant, cette hypothèse nécessite des recherches supplémentaires pour être confirmée.

12.3.4. Conclusions

Les essais réalisés mettent en évidence la complexité des interactions thermiques et hydriques sur les propriétés mécaniques du bois. Les résultats suggèrent que, bien que le bois puisse récupérer partiellement ses propriétés après un cycle de refroidissement, des dommages irréversibles peuvent persister, surtout en présence de gradients thermiques et hydriques importants ainsi que de défauts. De plus, la gestion précise de la teneur en eau joue un rôle important dans la récupération des propriétés mécaniques après exposition à des températures

élevées. Cependant, étant donné que ces observations reposent sur un seul essai, il est difficile de tirer des conclusions définitives.

12.3.5. Comparaison avec les résultats à l'échelle du matériau

Pour mieux comprendre la pertinence de nos résultats expérimentaux et leur applicabilité, une comparaison avec les données disponibles à l'échelle du matériau et de la structure a été effectuée. Cette comparaison permet de replacer nos observations dans un contexte plus étendue et d'évaluer la cohérence ainsi que la portée des résultats obtenus.

Effet immédiat de la température :

L'analyse à l'échelle du matériau révèle une diminution significative de la résistance en compression avec l'augmentation de la température. Dans la section S_1, la résistance en compression enregistrée à température ambiante (20°C) s'élève à 35,5 MPa, tandis qu'elle chute à 15 MPa après un échauffement de 60 minutes à 250°C. Cela représente une perte de résistance de 42,3%.

L'examen des résultats à l'échelle structurale confirme la tendance observée au niveau du matériau. Pour la section S_5, la résistance en compression enregistrée à température ambiante atteint 30,5 MPa, contre 12,6 MPa (calculée à partir de la section initiale) après un échauffement de 60 minutes à 250°C, soit une perte de résistance de 41,3%. Des pertes de résistance comparables ont été observées dans la section S_4, avec une diminution de 35,8%.

Effet permanent de la température :

A l'échelle du matériau, après un cycle de chauffage et de refroidissement de 24 heures, le bois présente une récupération partielle de ses propriétés mécaniques à 60°C avec une teneur en eau d'environ 10,5%. En revanche, une récupération totale est observée à 250°C, dépassant même les valeurs enregistrées à température ambiante pour une teneur en eau de 0% (Fig. 96). La récupération partielle à 60°C peut s'expliquer par des gradients d'humidité au sein des échantillons. En effet, à 60 minutes, l'humidité pourrait ne pas être uniformément répartie, affectant ainsi la résistance du bois (comme cela a été par ailleurs montré pour la section S_1, voir section 10.5).

À l'échelle structurale, bien que certaines tendances de récupération mécanique aient été observées après un cycle de chauffage et de refroidissement de 24 heures, il est important de nuancer les résultats en raison des différences possibles dans les propriétés mécaniqyes initiales des poutres avant chauffage. Pour la poutre S_5, une récupération apparente est observée, surpassant même les valeurs à température ambiante, tant pour la poutre enflammée avec une teneur en eau de 0% (Fig. 126) que pour le test répété sans inflammation avec une teneur en eau de 10,5% (Fig. 125). Cependant, il est difficile d'être aussi affirmatif sur ces résultats en raison des variations potentielles des propriétés mécaniques des poutres avant échauffement. En revanche, pour la poutre S_4, le bois présente une récupération partielle de ses propriétés mécaniques (récupération de 83%) avec une teneur en eau de 6,6%.

Pour mieux comprendre ces observations, il est recommandé de réaliser des essais supplémentaires à l'échelle structurale avec et sans gradients d'humidité afin de valider les résultats obtenus.

12.4. Modes de Ruptures

Le chauffage des poutres à 250°C pendant 60 minutes a nettement dégradé leurs propriétés mécaniques, augmentant la sensibilité du bois à différents types de ruptures lors des essais de compression. Les principaux modes de rupture observés sont des ruptures classiques incluent la rupture par traction et compression, et par cisaillement.

Les zones écrasées et déformées des poutres, visible sur la Figure 127, présentent des signes de rupture par traction et compression. La perte de rigidité due au le traitement thermique accentue cette défaillance sous l'effet des charges appliquées lors des essais de compression. La poutre de section S_5 a été chauffée à une température de 250°C pendant 60 minutes, et l'essai de compression a été réalisé immédiatement après ce chauffage. La courbe force-déplacement, représentée par la courbe bleue dans la Figure 125, montre une diminution de la capacité portante avec un plateau plus étendu par rapport aux poutres testées a température ambiante et refroidies pendant 24 heures. Cette différence s'explique par la présence de gradients thermiques dans le matériau, qui influencent la répartition des contraintes et modifient les propriétés mécaniques du bois sous compression.

Figure 127 : Mode de rupture de la poutre S_5 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et testée à chaud

Par ailleurs, les éclats de bois irréguliers et les ruptures angulaires visibles à la jonction entre les zones chauffées et non chauffées, comme illustré dans les Figures 128 et 129, indiquent des ruptures par cisaillement. Ce mode de rupture se produit lorsque les forces appliquées provoquent un glissement entre les couches de fibres de bois, particulièrement fragilisées par la dégradation thermique.

Figure 128 : Mode de rupture de la poutre S_5 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et refroidie pendant 24 heures

Figure 129 : Mode de rupture de la poutre S_4 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et refroidie pendant 24 heures

Conclusion Partie 3

L'étude expérimentale réalisée à l'échelle structurale a permis de mieux comprendre le comportement thermo-hygro-mécanique des éléments en bois, en se focalisant sur les poteaux en compression. Les résultats obtenus mettent en évidence des phénomènes complexes influençant les propriétés mécaniques du bois lorsqu'il est soumis à des gradients thermiques et hydriques.

Principales Observations sur les poteaux testés

1. **Effet des températures élevées**
    - L'exposition à une température de 250°C pendant 60 minutes entraîne une diminution significative de la résistance en compression des poutres. Cette réduction est attribuée à la dégradation des composants cellulaires du bois et à l'existence des gradients thermiques et hydriques importants au sein des poutres.
    - Immédiatement après l'exposition, la capacité portante des poutres est considérablement réduite, atteignant 35% et 42% de la valeur initiale pour les sections S_4 et S_5 respectivement.
2. **Impact de la teneur en eau**
    - La teneur en eau joue un rôle important dans le comportement mécanique post-chauffage. Une faible teneur en eau semble favoriser une meilleure récupération des propriétés mécaniques après le cycle de chauffage et de refroidissement.
    - La redistribution de l'humidité au sein de la structure du matériau joue un rôle essentiel dans ce processus. Toutefois, une répartition inégale de l'humidité, souvent causée par des gradients hydriques, peut compromettre la restauration complète des propriétés mécaniques du matériau.
3. **Modes de ruptures**
    - Des modes de ruptures classiques ont été observés, y compris la rupture par traction et compression, et par cisaillement. Ces ruptures sont exacerbées par les températures élevées et les défauts présents dans les poutres.

Comparaison avec les résultats à l'échelle du matériau

Les comparaisons avec les données à l'échelle du matériau révèlent une cohérence générale dans les tendances observées. Toutefois, certaines variations peuvent être liées à la présence de défauts structuraux et aux conditions spécifiques des échantillons, bien que les gradients d'humidité n'aient pas été explicitement mesurés. Les essais à l'échelle structurale confirment les tendances de diminution de la résistance à haute température et la récupération partielle des propriétés mécaniques après refroidissement, avec des différences attribuées aux particularités de chaque échantillon.

Conclusions

Les résultats de cette étude soulignent l'importance de comprendre les interactions complexes entre les effets thermiques et hydriques sur les propriétés mécaniques du bois. Bien que le bois puisse récupérer ses propriétés après un cycle de refroidissement, des dommages irréversibles peuvent persister en raison de gradients hydriques ou de défauts internes. Une faible teneur en

eau, ainsi qu'une bonne répartition de l'humidité dans la structure, sont des facteurs clés pour optimiser la récupération des propriétés mécaniques. De plus, les gradients thermiques et hydriques doivent être soigneusement gérés pour garantir la stabilité et la performance des structures en bois exposées à des conditions extrêmes.

Des essais supplémentaires sont recommandés pour approfondir la compréhension de ces phénomènes et développer des stratégies de protection et de récupération adaptées.

Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif principal de cette thèse était de fournir une compréhension approfondie du comportement thermo-hygro-mécanique du bois lorsqu'il est exposé à des conditions d'incendie, avec des implications directes pour l'amélioration de la sécurité et de la performance des structures en bois. Les travaux menés ont permis de répondre à cet objectif en investiguant les propriétés mécaniques du bois à la fois à l'échelle du matériau et à l'échelle structurale, tout en développant des modèles prédictifs et en évaluant la réversibilité des performances mécaniques après exposition à des températures élevées.

- Analyse des propriétés thermohydriques à l'échelle du matériau

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont révélé l'influence déterminante de la teneur en eau et de la température sur les propriétés mécaniques du bois massif et lamellé-collé. A température ambiante, une corrélation linéaire entre la densité du bois et la teneur en eau a été établie, confirmant que l'humidité est un paramètre clé pour la performance mécanique. L'augmentation de la température et de l'humidité entraîne une diminution significative de la résistance en compression et du module d'élasticité axial, avec une dégradation marquée observée à des températures supérieures à 150°C, principalement due à la dégradation de la lignine et aux transformations thermiques des autres composants du bois.

- Réversibilité des propriétés mécaniques

Une contribution majeure de cette thèse réside dans l'évaluation de la réversibilité des propriétés mécaniques du bois après exposition à des conditions thermiques sévères. Les résultats montrent qu'après un cycle de refroidissement, une récupération partielle, voire complète, des propriétés mécaniques est possible sous certaines conditions, notamment lorsque la teneur en eau se situe près du point de dessiccation (MC=0%). Toutefois, la présence de gradients hydriques complexes et les défauts internes peuvent limiter cette réversibilité, soulignant l'importance de la maîtrise des conditions thermiques et hydriques pour optimiser la récupération des propriétés mécaniques du bois après un incendie.

- Développement et validation des modèles prédictifs

Cette thèse a également permis de développer des modèles empiriques robustes reliant les propriétés mécaniques du bois à la température et à l'humidité sous conditions homogènes. Ces modèles, validés par des résultats expérimentaux, permettent de prédire avec précision l'évolution des résistances mécaniques en fonction de la température et de la teneur en eau, bien que certaines divergences subsistent dans les conditions extrêmes d'humidité. Par ailleurs, la comparaison avec les facteurs de réduction proposés par l'Eurocode 5 a mis en évidence la nécessité de réviser ces derniers pour mieux intégrer l'effet de l'humidité sur les performances mécaniques du bois, en particulier dans les scénarios d'incendie.

- Modes de rupture

Les différents modes de rupture observés au cours des essais, tant à l'échelle du matériau qu'à l'échelle structurale, sont des modes de ruptures classiques. Les principales modes de ruptures observés été des ruptures par traction, compression, et par cisaillement. Cependant, le protocole P_3 a présenté un mode de rupture particulier, caractérisé par un écrasement localisé aux

extrémités, attribuable à des gradients hydriques importants s'ajoutant aux gradients thermiques.

- Comportement à l'échelle structurale

Les essais réalisés à l'échelle structurale sur des poteaux en bois soumis à des gradients thermiques et hydriques ont confirmé la complexité du comportement mécanique du bois en conditions d'incendie. Une réduction significative de la résistance en compression a été observée après exposition à des températures élevées, suivie d'une récupération partielle après refroidissement. Cette récupération dépend toutefois de la répartition de l'humidité et des défauts structurels des éléments testés. L'alignement global entre les résultats obtenus à l'échelle du matériau et ceux observés à l'échelle structurale a permis de valider les conclusions de cette thèse, tout en mettant en évidence certaines spécificités propres aux grandes structures en bois.

Perspectives

Basées sur les résultats de l'étude, plusieurs pistes de recherche prometteuses se dégagent pour approfondir notre compréhension du comportement du bois sous l'influence de la température et de l'humidité, et pour améliorer son utilisation dans diverses applications structurales. Ces perspectives incluent une étude approfondie de l'influence de la teneur en eau et de la température sur une gamme plus large d'essences de bois**,** l'investigation détaillée du paramètre « n » dans les relations exponentielles**,** l'exploration de la réversibilité des propriétés du bois vis-à-vis de la teneur en eau et de la température**,** la réalisation d'essais supplémentaires à l'échelle structurale**,** le développement de modèles de comportement multidimensionnels**, l'**étude de la stabilité des poteaux pendant la phase de refroidissement d'un incendie**,** et enfin, l'amélioration des facteurs de réduction dans les normes et codes de construction**.**

- Etudie approfondie de l'influence de la teneur en eau et de la température sur une gamme plus large d'essences de bois

L'analyse menée dans cette thèse pourrait être étendue à d'autres essences de bois résineux et feuillus, couramment utilisées dans la construction. Cette démarche permettrait de mieux comprendre les variations de comportement entre différentes espèces et d'établir des modèles plus généralisés des propriétés mécaniques du bois en fonction de la teneur en eau et de la température. En outre, il serait pertinent d'explorer l'influence de ces paramètres sur des propriétés mécaniques additionnelles, telles que la résistance en traction, en flexion et en cisaillement, afin de couvrir l'ensemble des sollicitations auxquelles le bois peut être soumis en contexte de construction.

- Investigation détaillée du paramètre « n » dans les relations exponentielles

Le paramètre « n », clé dans les relations exponentielles entre les propriétés mécaniques du bois, la teneur en eau et la température, mérite une attention particulière. Une étude approfondie pourrait permettre de mieux comprendre les facteurs qui influencent sa valeur et son évolution sur une gamme de températures plus large, y compris des températures extrêmes. Cela pourrait conduire au développement de modèles prédictifs permettant d'estimer le paramètre « n » pour différentes essences de bois et conditions environnementales, et ainsi d'améliorer les modèles existants pour une prévision plus précise du comportement du bois en conditions d'incendie.

- Réversibilité du bois vis-à-vis de la teneur en eau et de la température

L'étude de la réversibilité des propriétés du bois à des températures plus élevées que celles étudiées (au-delà de 300°C) constitue une piste de recherche intéressante. Il serait essentiel de comprendre les mécanismes physiques et chimiques au niveau cellulaire qui influencent cette réversibilité, en particulier lors des processus de séchage et de reconditionnement. Le développement de modèles prédictifs permettrait de mieux estimer le degré de réversibilité en fonction de différents paramètres, tels que l'essence du bois, les conditions de séchage, et l'historique hygrométrique. Il serait également pertinent d'analyser l'impact de la réversibilité sur les propriétés mécaniques et physiques du bois (résistance, module d'élasticité, densité), notamment en conditions fluctuantes d'humidité.

- Réalisation d'essais supplémentaire à l'échelle structurale

Les résultats obtenus dans cette thèse reposent sur un nombre limité d'essais à l'échelle structurale. Bien que ces résultats soient significatifs, il est difficile de tirer des conclusions définitives à partir d'un seul ensemble d'essais. Il est donc recommandé de réaliser davantage d'essais expérimentaux à l'échelle structurale pour confirmer les tendances observées et pour approfondir la compréhension du comportement du bois en conditions d'incendie. Une plus grande quantité de données expérimentales permettrait de renforcer la fiabilité des résultats et d'améliorer les recommandations pratiques pour les applications industrielles.

- Développement de modèles de comportement multidimensionnels

En parallèle, il est nécessaire de développer des modèles de comportement mécaniques plus complets qui intègrent l'influence combinée de la teneur en eau, de la température, de la vitesse de chargement et d'autres facteurs pertinents. L'utilisation de techniques de modélisation avancées, telles que les éléments finis ou l'intelligence artificielle, permettrait de simuler le comportement du bois dans des conditions environnementales et mécaniques complexes. Ces modèles doivent être validés par des comparaisons avec des résultats expérimentaux pour assurer leur robustesse.

- Stabilité des poteaux pendant la phase de refroidissement d'un incendie

Une étude approfondie du comportement des poteaux en bois lamellé-collé sous charge de compression pendant les phases de chauffage et de refroidissement lors d'un incendie est essentielle pour mieux comprendre leur résistance au feu. Cela contribuerait à la prévention des ruptures structurales pendant cette phase critique, améliorant ainsi la sécurité incendie des structures en bois et la protection des pompiers durant cette période.

- Amélioration des facteurs de réduction dans les normes et codes de construction

Enfin, cette thèse a montré qu'il est nécessaire de réviser certains facteurs de réduction des propriétés mécaniques actuellement proposés par l'Eurocode 5, notamment pour mieux intégrer l'influence de la teneur en eau et de la température. Il est recommandé de proposer des ajustements aux coefficients de réduction, et de collaborer avec les organismes de normalisation pour intégrer ces nouvelles connaissances dans les futures révisions des codes de construction. En parallèle, le développement de guides pratiques pour les ingénieurs permettrait une application plus précise de ces ajustements dans la conception des structures en bois.

Références

Al-musawi, H., Huber, C., Grabner, M., Ungerer, B., Krenke, T., Matz, P., Teischinger, A., Müller, U. (2023). Compressive strength of beech and birch at different moisture contents and temperatures. *Journal of Materials Science*, 58, 13994-14008.

Alves, S. S., Figueiredo, J. L. (1989). A model for pyrolysis of wet wood. *Chemical Engineering Science*, 44(12), 2861-2869.

Arends, T., Barakat, A. J., Pel, L. (2018). Moisture transport in pine wood during one-sided heating studied by NMR. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 259-271.

Audebert, M. (2010). Approche expérimentale et modélisation du comportement au feu d'assemblages bois sous différents types de sollicitations. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

Back, E. L., Salmen, N. L. (1982). Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi*, 65(7).

Badel, E. (1999). Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation. Thèse de doctorat, ENGREF (AgroParisTech), France.

Beall, F.C., Eickner, H.W. (1970). Thermal degradation of wood components. *Forest Products Research Paper*, FPL 130. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Bekhta, P., Niemz, P. (2003). Effect of high-temperature drying on wood properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 61(1-2), 3-10.

Bekhta, P., Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57, 539-546.

Benoit, Y., Legrand, B., Tastet, V. (2008). *Calcul des structures en bois : Guide d'application*. Edition AFNOR Eyrolles.

Bodig, J., Jayne, B. H. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA, 133–135.

Bonnet, M. (2017). Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.

Bonoma, B., Simo, T. M., & Monkam, L. (2010). Influence of the temperature and water content on the density and porosity of tropical woods: Ayous, Baobab, Sapelli, Lotofa, and Padouk. *Phys Chem News*, 51, 79–83.

Bossu, J., Beauchêne, J., Estevez, Y., Duplais, C., Clair, B. (2016). New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: the case of a fast-growing tropical species Bagassa guianensis. *PloS ONE*, 11(13).

Boussougou, M. Nicaise. (2012). Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.

Buchanan, A. (2000). Fire performance of timber construction. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2, 100-109.

Defo, M. (1999). Modélisation du séchage du bois sous vide par contact : l'approche du potentiel hydrique. Thèse de doctorat, Université Laval, Canada.

Deglise, X., Richard, C., Rolin, A., Francois, H. (1981). Fast pyrolysis / Gasification of lignocellulosic materials at short residence time. *1st E.C. Conference, Applied Science Publishers Ltd*, London, 548-553..

Dietsch, P., & Tannert, T. (2015). Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Construction and Building Materials*, 101, 1259–1270.

Drysdale, D. (1998). *Introduction to Fire Dynamics* (2nd ed.). John Wiley and Sons. England, 451p.

Dunlap, F. (1912). The specific heat of wood. *U.S.Dep.Agr.Bull.*, n°110 (cited in Kollmann).

Engelund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., Hill, C. A. S. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47, 141-161.

Fahrni, R., Schmid, J., Klippel, M., Frangl, A. (2018). Correct temperature measurements in fire-exposed wood. *World Conference on Timber Engineering*, Seoul.

Falk, R. H., Colling, F. (1995). Laminating effects in glued laminated timber beams. *Journal of Structural Engineering*, 121(12), 1857–1863.

Fengel, D., Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, Germany : Walter de Gruyter.

Fredlund, B. (1993). Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. *Fire Safety Journal*, 20, 39-69.

Fu, W. L., Guan, H. Y., Keis, S. (2021). Effects of moisture content and grain direction on the elastic properties of beech wood based on experiment and finite element method. *Forest*, 12(5), 17.

Gagliardini, O. (2021). *Construction Bois selon l'Eurocode 5*. L3 Génie Civil, Université Grenoble Alpes, 2020/2021.

Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M., Winter, S. (2014). Building Climate – Long-term measurements to determine the effect on the moisture gradient in timber structures. *Final report*, TU München, Germany.

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

Glass, S. V., Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. In *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 4-1–4-19). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Glos, P., Henrici, D. (1991). Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. *Institut für Holzforschung der Universität München*, Munich.

Green, D.W., Evans, J.W. (2008). Effect of cyclic long-term temperature exposure on the bending strength of lumber. *Wood Fiber Sci.*, 40, 288-300.

Green, D. W., Kretschmann, D. E. (1994). Moisture content and the properties of clear Southern Pine. *Research Paper FPL-RP-531*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Greenspan, L. (1977). Points fixes d'humidité des solutions aqueuses binaires saturées. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, 81A(1), 89-96. https://doi.org/10.6028/jres.081A.011.

Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépaduès.

Gupta, M., Yang, J., Roy, C. (2003). Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles. *Fuel*, 82, 919-927.

Harmathy, T. Z. (1995). Properties of building materials. In : The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2nd ed.). Boston, MA : Society of Fire Protection Engineers, 142-155.

Hering, S., Keunecke, D., Niemz, P. (2012). Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Science and Technology*, 45, 927-938.

Hering, S., Ozyhar, T., Sanabria, S. J., Niemz, P. (2012). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th ed.). John Wiley and Sons, Inc., USA, 986p.

Jamaaoui, A. (2017). Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.

Janssens, M. (1994). Thermo-physical properties for wood pyrolysis models. *Pacific Timber Engineering Conference*, PTEC94, Goald Coast, Australia, 607-618.

Keylwerth, R. (1964). Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft, Reinbek Institut für Holzphysik und mechanische Holztechologie.

Knudson, R. M., Schniewind, A. P. (1975). Performance of structural wood members exposed to fire. *Forest Products Journal*, 25(2), 23-32.

Kocaefe, D., Poncsak, S., Boluk, Y. (2008). Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*, 3(2), 517-537.

Kollmann, F. (1951a). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Zweite Auflage, erster Band, pp. 737, 742.

Kollmann, F. (1951b). Über das mechanische Verhalten von Kiefernholz bei Biegung und Temperaturen zwischen 20° und 100°. *Svenska Träforskningsintitutet, Trätekniska Avdelningen, Meddelande 22*, Stockholm.

Kollmann, F. F.P., Côté, W. A. Jr. (1968). *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Springer, Berlin.

Kollmann, F. F.P., Côté, W. A. Jr. (1984). *Principles of Wood Science and Technology: Volume 1, Solid Wood*. Berlin : Springer-Verlag.

König, J. (1995). Fire resistance of timber joists and load bearing wall frames. *Swedish Institute for Wood Technology Research*, Report No. 19412071.

König, J., Walleij, L. (1999). One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and post-protection situations. *Rapport*, Stockholm.

König, J. (2004). Effective values of thermal properties of timber and thermal actions during the decay phase of natural fires. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures*, 13p.

Kosiková, B., Hricovini, M., & Cosetino, C. (1999). Interaction of lignin and polysaccharides in beech wood (*Fagus sylvatica*) during drying processes. *Wood Science and Technology*, 33, 373-380.

Lahouar, M., et al. (2015). Réponse thermique de quatre essences de bois de construction soumises à un feu normalisé. *Orgagec Rénovation de la ville, les matériaux organiques dans l'enveloppe du bâtiment*, Novembre.

Landolt-Börnstein. (1961). *Tables of Properties of Matter, Vol. 2, Part 4, Thermal properties*. Springer, Berlin.

Laplanche, K. (2006). Etude du comportement au feu des assemblages de structure bois : approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont 2, France.

Lathuillière, D. (2015). Etude du comportement et du renforcement d'appuis sollicités en compression selon un angle donné du bois lamellé-collé. Université de Lorraine, France.

Leicher, D., Laz, T. (2014). Usages durables du bois en milieu urbain. Guide du *ALEC Plaine Commune (Agence Locale de l'Énergie et du Climat de Plaine Commune)*, Saint-Denis, France.

Lesage Constructions Bois. Photo d'une maison à ossature bois. *Lesage Constructions Bois*. Consulté à l'adresse : https ://www.lesageconstructionsbois.fr/construction-en-ossature-bois-ou-panneaux-bois-massif/

LeVan, S. L. (1989). Color changes in aspen veneer during drying. *Forest Products Journal*, 39(6), 48-52.

Li, W., Liu, C., Wang, X., Shi, J., Mei, C., Van den Bulcke, J., Van Acker, J. (2023). Understanding the impact of wood type and moisture content on the bonding strength of glued wood. *Wood Material Science & Engineering*, 18(1), 303-313.

Manninen, A.M., Pasanen, P., Holopainen, J. (2002). Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated scots pine wood. *Atmospheric Environment*, 36, 1763-1768.

Manthey, M. (2020). Rapport d'essais n° EEM/EA2R 2026087828, Etude de la résistance en compression en fonction de la température du matériau bois – épicéa. CSTB, France.

Marinquez, M.J., Moraes, P.D. (2010). Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of parica. *Construction and Building Materials*, 24(1), 99-104.

Monties, B. (1980). *Les polymères végétaux*. Ed. Bordas, Paris.

Moraes, P.D. (2003). Influence de la température sur les assemblages bois. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, France.

Moraes, P. D., Rogaume, Y., Bocquet, J. F., Triboulot, P. (2005). Influence of temperature on the embedding strength. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63(4), 297-302.

Möttönem, H. (2006). *Wood Drying Technology*. Springer Science & Business Media.

Mouras, S., Beauchêne, J., Pinta, F. (2007). Le matériau bois et ses dérivés : définition et propriétés, dégradation et protection. Montpellier : CIRAD, 68p.

Navi, P., Heger, F. (2005). *Comportement thermo-hydromécanique du bois*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

Navi, P., Sandberg, D. (2011). *The thermo-hydro-mechanical processing of wood*, Chapter 5: Influence of the THM processing parameters on the mechanical and chemical degradation of wood. Taylor & Francis Group.

NF EN 13183-1. (2002). Teneur en humidité d'une pièce de bois scié – Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation [Normes]. *Saga Web*.

NF EN 14080. (2013). Structures en bois – Bois lamellé-collé et bois massif reconstitué – Exigences, P 21-501.

NF EN 14081-1. (2019). *Structures en bois – Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance – Partie 1 : Exigences générales, P 21-500-1*.

NF EN 16351. (2021). Structures en bois – Bois lamellé-croisé – Exigences, P 21-362.

NF EN 16682. (2017). Conservation du patrimoine culturel – Méthodes de mesurage de la teneur en humidité, ou teneur en eau, de matériaux constituant un patrimoine culturel immatériel [Normes]. *Saga Web*.

NF EN 1990. (2003). Eurocodes structuraux : Bases de calcul des structures.

NF EN 1995-1-1/NA. (2010). Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments – Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1 :2008.

NF EN 1995-1-2/NA. (2020). Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu – Annexe Nationale à la NF EN 1995-1-2 :2004.

NF EN 384. (2022). Bois de structure – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique.

NF EN X15-119. (1999). Mesure de l'humidité de l'air. Générateurs d'air humide à solution salines pour l'étalonnage des hygromètres.

Natterer, J., Kessel, M., Sandoz, J.L. (1987). Etude par essais à l'EPFL de l'épicéa suisse. *Journal de construction suisse romande*, 61(21), 25-32.

Natterer, J., Sandoz, J.L., Rey, M. (2004). *Construction en bois* (2nd éd.), *Traités de Génie Civil*, Volume 13. Edition : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Ozyhar, T., Hering, S., Niemz, P. (2013). Moisture-dependent orthotropic tension-compression asymmetry of wood. *Holzforschung*, 67, 395-404.

Paradis, S., Guibal, D., Gérard, J., Beauchêne, J., Brancheriau, L., Cabantous, B., Châlon, I., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., Langbour, P., Lotte, S., Méjean, C., Parant, B., Thévenon, M.-F., Thibaut, A., Vernay, M. (2015). *TROPIX 7.5.1 : caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées*. Montpellier : CIRAD-PERSYST, 1 p. N° de certification : IDDN.FR.001.070032.002.S.P.2002.000.30615. ISBN 978-2-87614-680-8.

Penvern, H., Zhou, M., Maillet, B., Courtier-Murias, D., Scheel, M., et al. (2020). How bound water regulates wood drying. *Physical Review Applied*, 14(5), 054051. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.054051. ⟨hal-03085702⟩

Pettersen, R.C. (1984). The chemical composition of wood. *Advances in Chemistry Series*, 57-126.

Plassat, F. (2009). Travail mécanique du bois – Mise en œuvre du bois. *Techniques de l'ingénieur*, BM 7 404v2.

Promobois, A. (2012). *Guide pour construire avec le bois*. Guide de l'Auvergne Promobois.

Rajohnson, J. R. (1996). Etude expérimentale et modélisation du traitement thermique de rétification du bois massif sous gaz convectif en vue d'améliorer ses propriétés physico-chimiques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne, France.

Rémond, R. (2004). Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. Thèse de doctorat, ENGREF (AgroParisTech), France.

Rousset, P., Turner, L., Donnot, A., Perré, P. (2006). Choix d'un modèle de pyrolyse ménagée du bois à l'échelle de la microparticule en vue de la modélisation macroscopique. *Annals of Forest Science,* 63(2), 213-229.

Samaké, A. (2016). Etude de l'influence des transferts thermos-hydriques sur les composants d'assemblages bois sous incendie. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont 2, France.

Samaké, A., Taazount, M., Audebert, P., Palmili, P. (2014). Thermo-hydric transfer within timber connections under fire exposure: Experimental and numerical investigations. *Applied Thermal Engineering,* 63(1), 254-265.

Sarkanen, K.V., Ludwig, C.H. (1971). Definition and nomenclature in lignins, occurrence, formation, structure, and reactions. In : Sarkanen, K.V., Ludwig, C.H. (Eds.), *Lignins*, Wisley-Interscience, 11-18.

Schaffer, E. L. (1967). Charring rate of selected woods – transverse to grain. *FPL Research Paper 69*.

Schaffer, E.L. (1973). Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. *Journal of Testing and Evaluation,* 1(4), 319-329.

Schaffer, E. L. (1984). Structural fire design: Wood. *Forest Products Laboratory, Research Paper FPL 450*, Madison.

Sedighi Gilani, M., Vontobel, P., Lehmann, E., Carmeliet, J., & Derome, D. (2014). Moisture migration in wood under heating measured by thermal neutron radiography. *Experimental Heat Transfer,* 27(2), 160–179.

Simpson, W., TenWolde, A. (1999). Physical properties and moisture content relations of wood. In : *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1-24.

Siau, J. F. (1995). *Wood : Influence of moisture content on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Wood Science and Forest Products, Blacksburg, VA, USA.

Sjostrom, E. (1981). *Wood Chemistry : Fundamentals and Applications*. Academic Press, New York, 169-189.

Skaar, C. (1976). Effect of high temperatures on the rate of degradation and reduction in hygroscopicity of wood. In *Research Conference on High-Temperature Drying Effects on Mechanical Properties of Softwood Lumber*, 25-26 Feb, Madison, Wis. (USA), USDA, Forest Products Laboratory.

Skaar, C. (1988). *Wood-water relations*. Springer Science & Business Media.

Steinhagen, H. P. (1977). Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40°C to +100°C : A literature review. *General Technical Report FPL-9*. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 13p.

Stamm, A. J. (1956). Thermal degradation of wood and cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry*, 3, 414-417.

Sulzberger, P. H. (1953). The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints. *Department of Supply, Aeronautical Research Consultative Committee*, Report ACA-46.

Terrei, L., Acem, Z., Marchetti, V., Lardet, P., Boulet, P., & Parent, G. (2021). In-depth wood temperature measurement using embedded thin wire thermocouples in cone calorimeter tests. *International Journal of Thermal Sciences*, 162, 11.

Thi, V. D. (2017). Modélisation du comportement au feu des structures en bois. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

Thomas, G. C. (1997). Fire resistance of light timber framed walls and floors. *University of Canterbury*, Canterbury, New Zealand.

Tran, H. C., White, R. H. (1992). Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and Materials*, 16(4), 197–206.

Trouy, M-C., Triboulot, P. (2019). Matériau bois – Structure et caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur*, C 925v4.

Varnier, M. (2019). Comportement thermos-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.

White, R. H., Schaffer, E. L. (1981). Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. *Wood and Fiber*, 13(1), 17-38.

Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. (1987). United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Laboratory Report No. 72.

Wommelsdorf, O. (1966). Dehnungs- und Querdehnungszahlen von Hölzern. Dissertation, Technische Hochschule Hannover.

Xu, M., Cui, Z., Chen, Z., Xiang, J. (2017). Experimental study on compressive and tensile properties of a bamboo scrimber at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 151, 732-741.

Zhang, Y. M., Yu, W. J., Zhang, Y. H. (2013). Effect of steam heating on the color and chemical properties of Neosinocalamus Affinis bamboo. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 33, 235–246.

Zhong, Y., Ren, H. Q., Jiang, Z. H. (2016). Effects of temperature on the compressive strength parallel to the grain of bamboo scrimbe. *Materials* (Basel, Switzerland), 9(6), 436.

Annexes

A.1 Bibliographie

Effets de l'humidité et de la température sur la résistance en compression parallèle au fil du bois (Gerhards 1982)

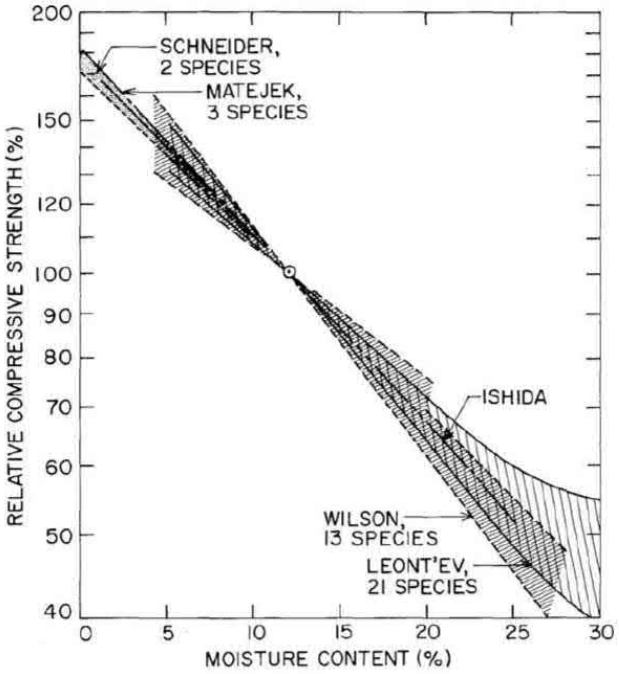


Figure A1. 1 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois à température ambiante, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). La résistance est normalisée à 100% pour une teneur en humidité de 12%

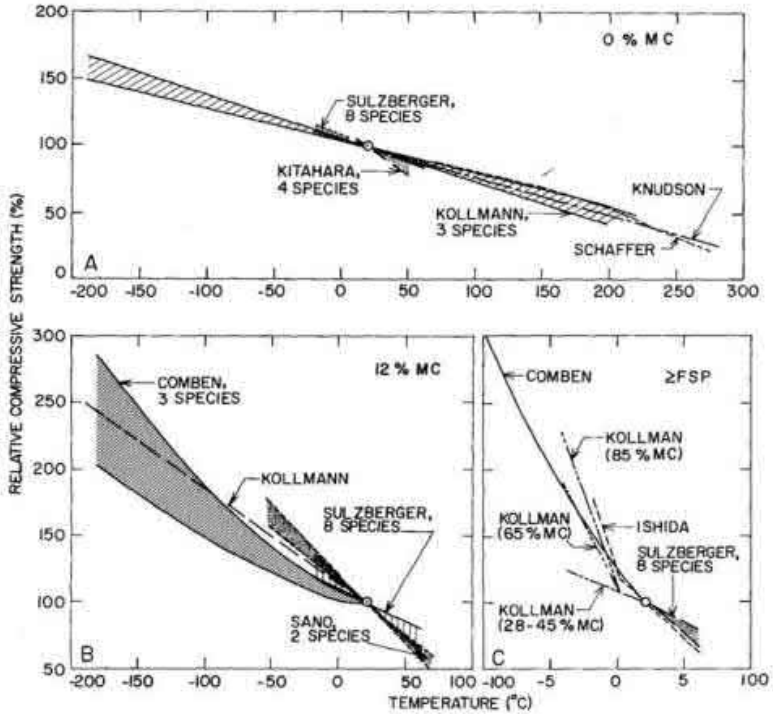


Figure A1. 2 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois et de la température, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). La résistance est normalisée à 100% pour une température de 20°C

Effets de l'humidité et de la température sur le module d'élasticité axial parallèle au fil du bois (Gerhards 1982)

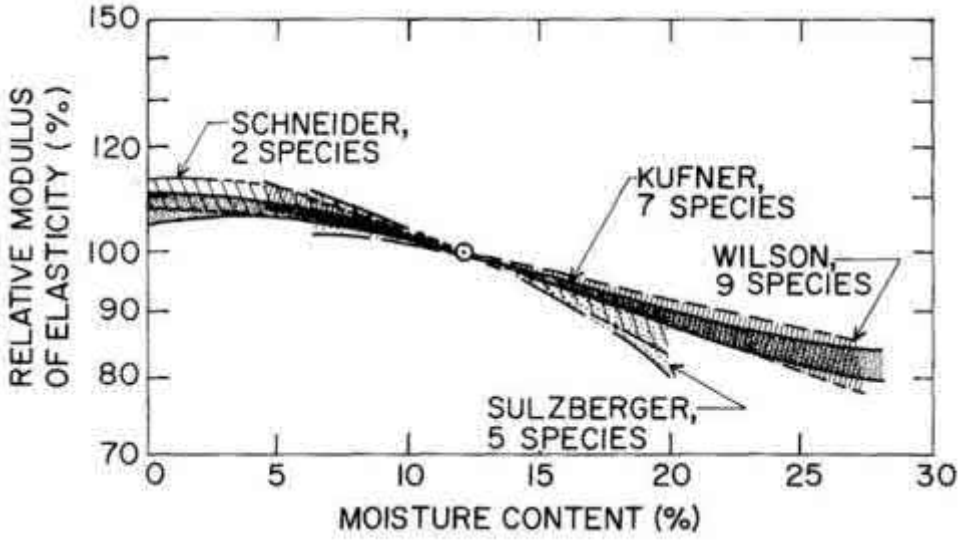


Figure A1. 3 : Evolution du module d'élasticité axial parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois à température ambiante, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). Le module est normalisé à 100% pour une teneur en humidité de 12%

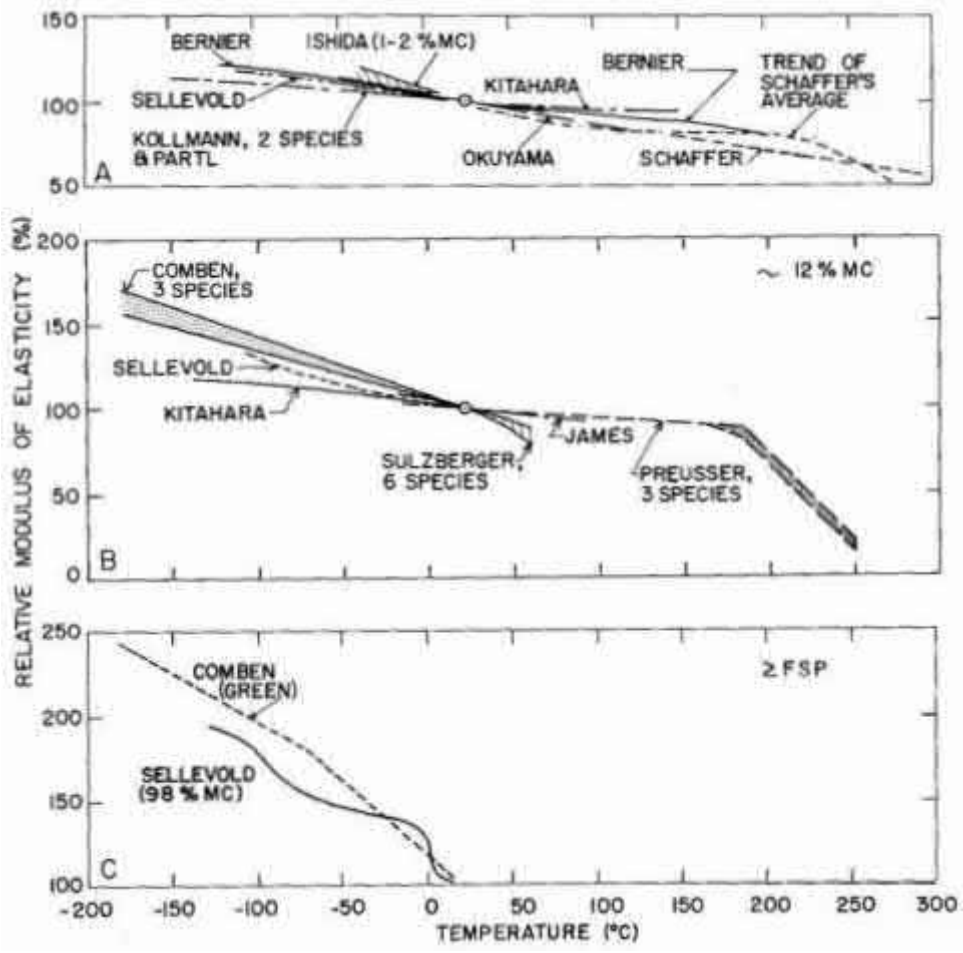


Figure A1. 4 : Evolution du module d'élasticité axial parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois et de la température, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). Le module est normalisé à 100% pour une température de 20°C

A.2 Données des Thermocouples

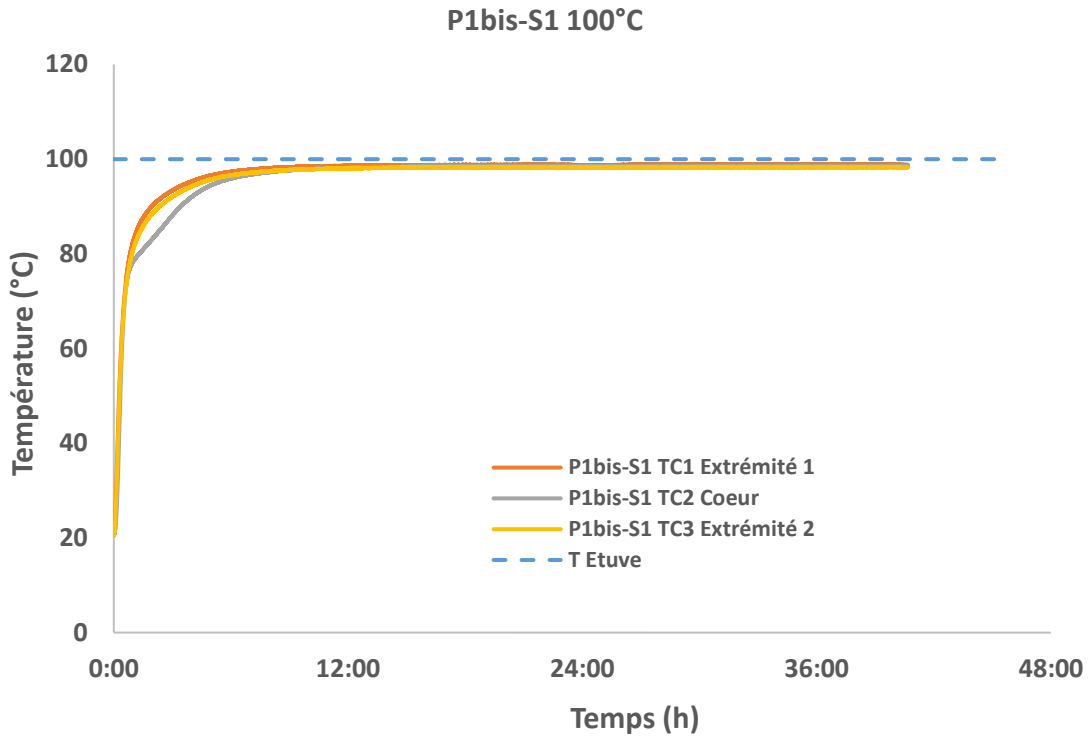


Figure A2. 1 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_1 à 100°C

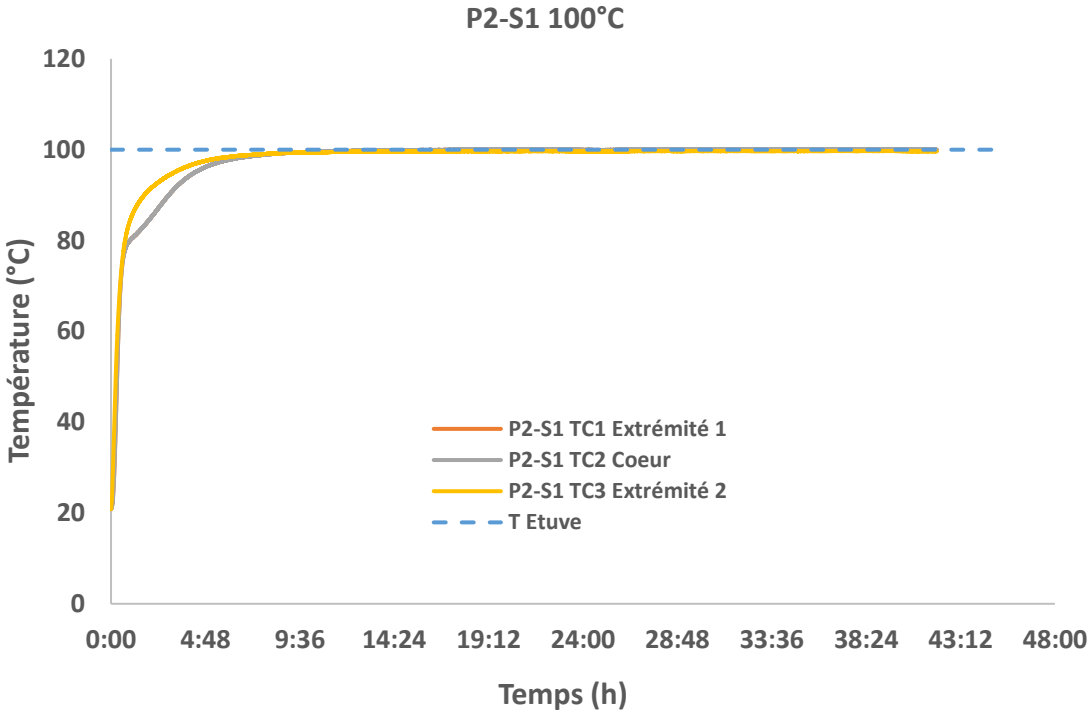


Figure A2. 2 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_1 à 100°C

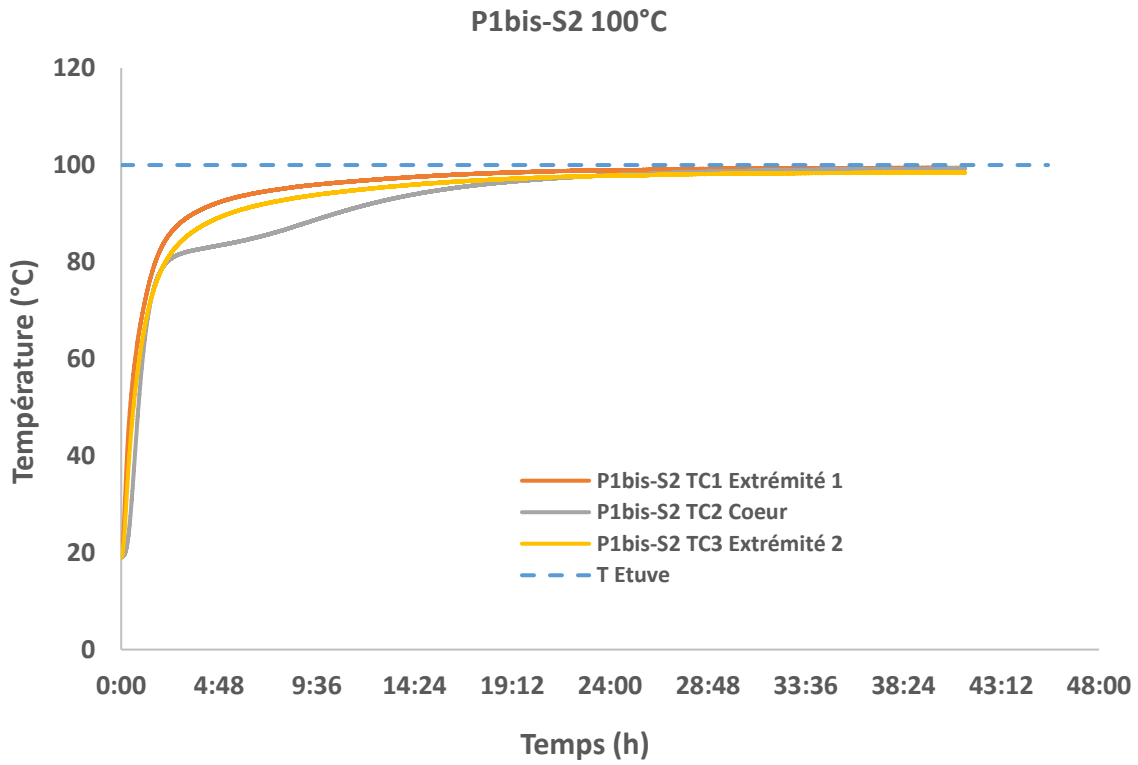


Figure A2. 3 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_2 à 100°C

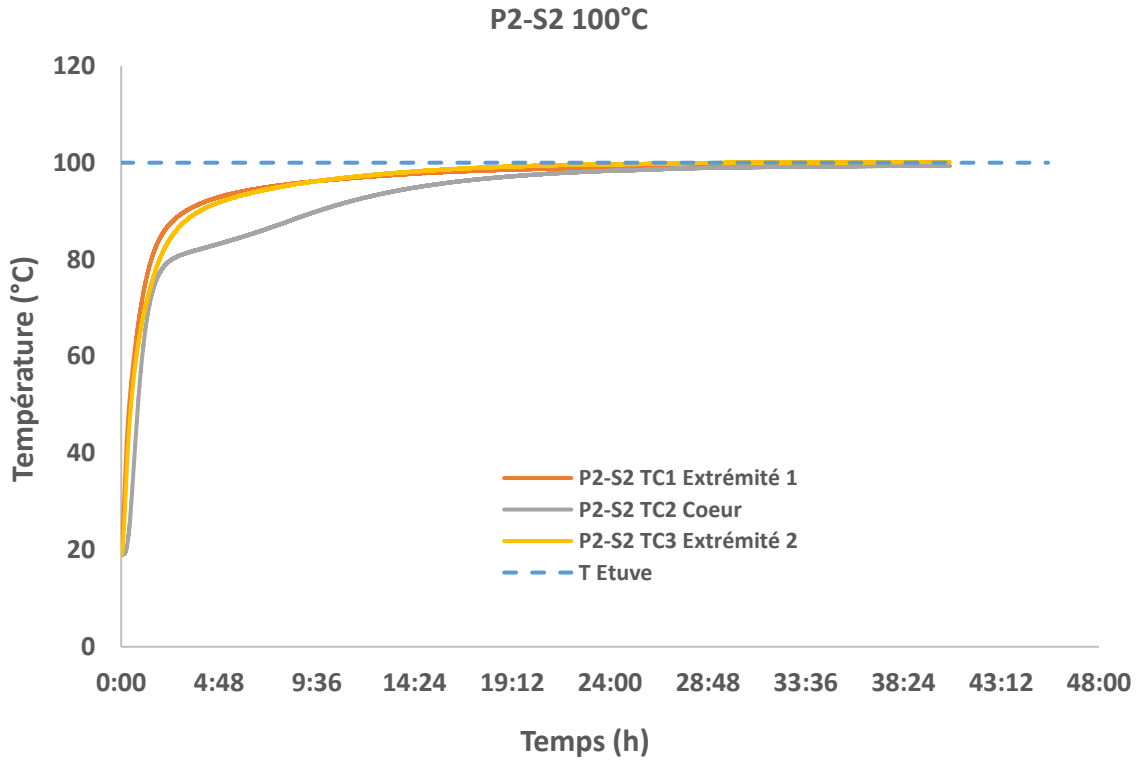


Figure A2. 4 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_2 à 100°C

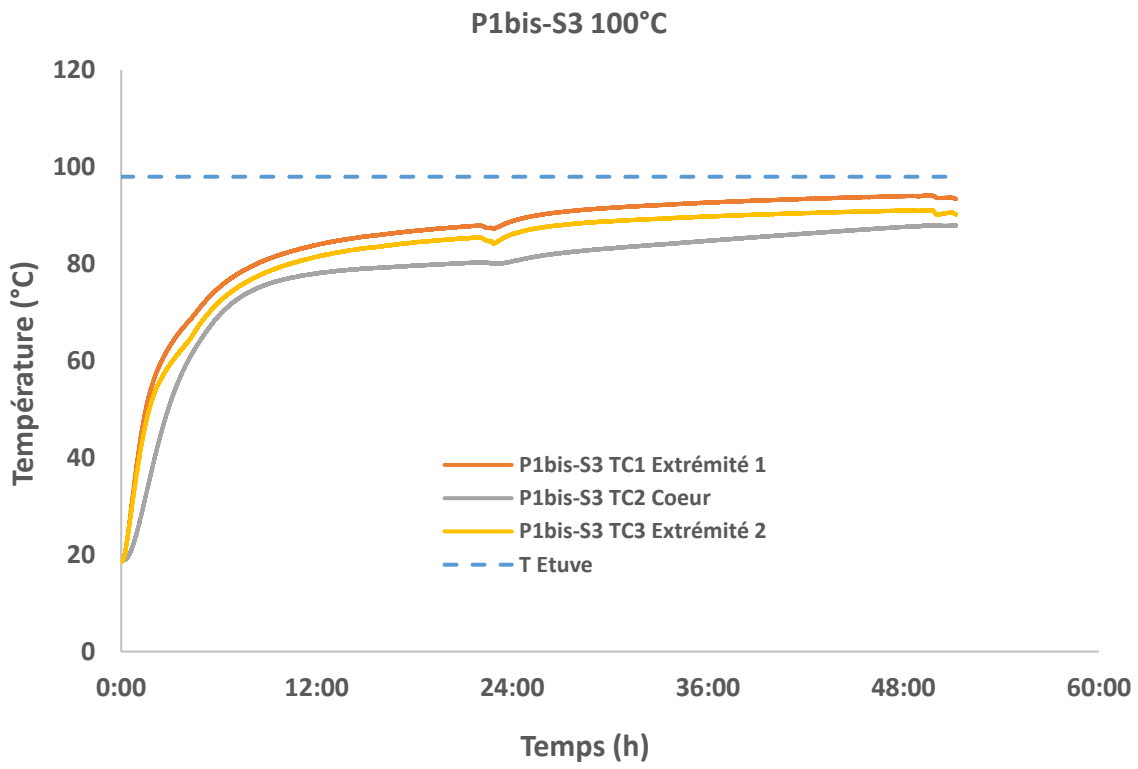


Figure A2. 5 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_3 à 100°C

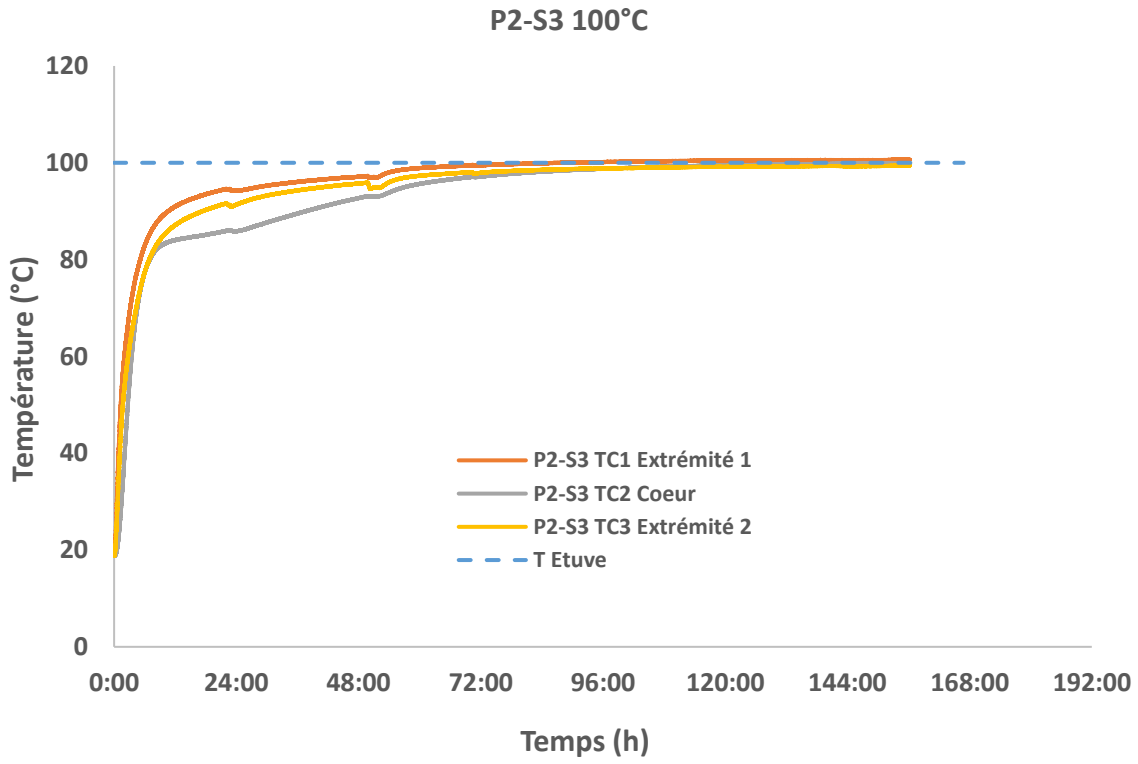


Figure A2. 6 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_3 à 100°C

A.3 Modes de rupture - Courbes force-déplacement

- **Mode de rupture Type 1**

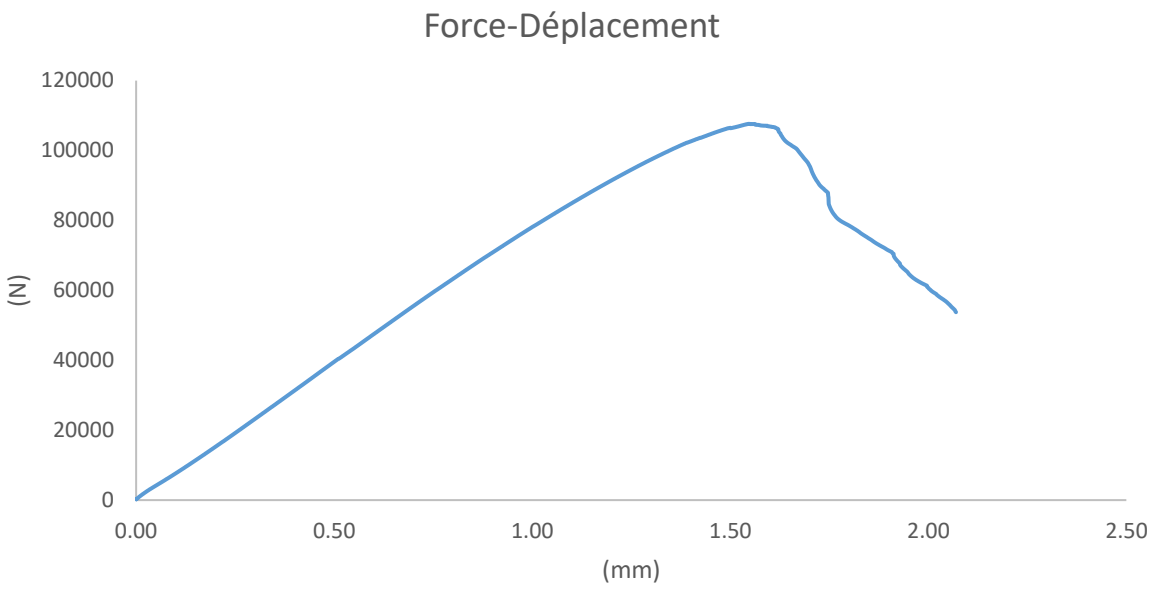


Figure A3. 1 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 1

- **Mode de rupture Type 2**

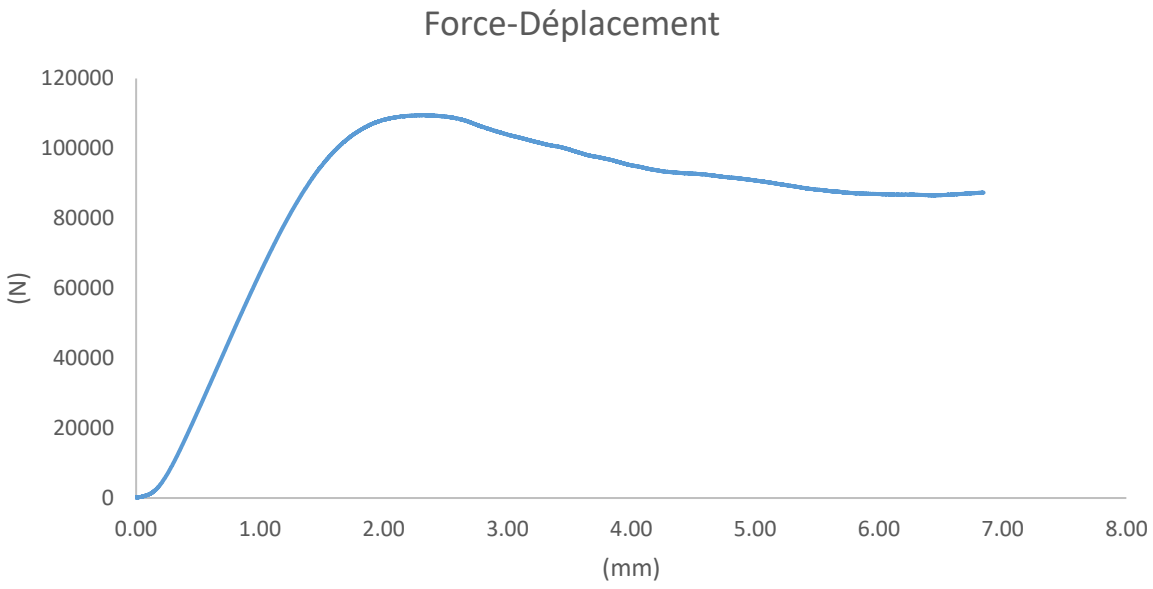


Figure A3. 2 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 2

- **Mode de rupture Type 3**

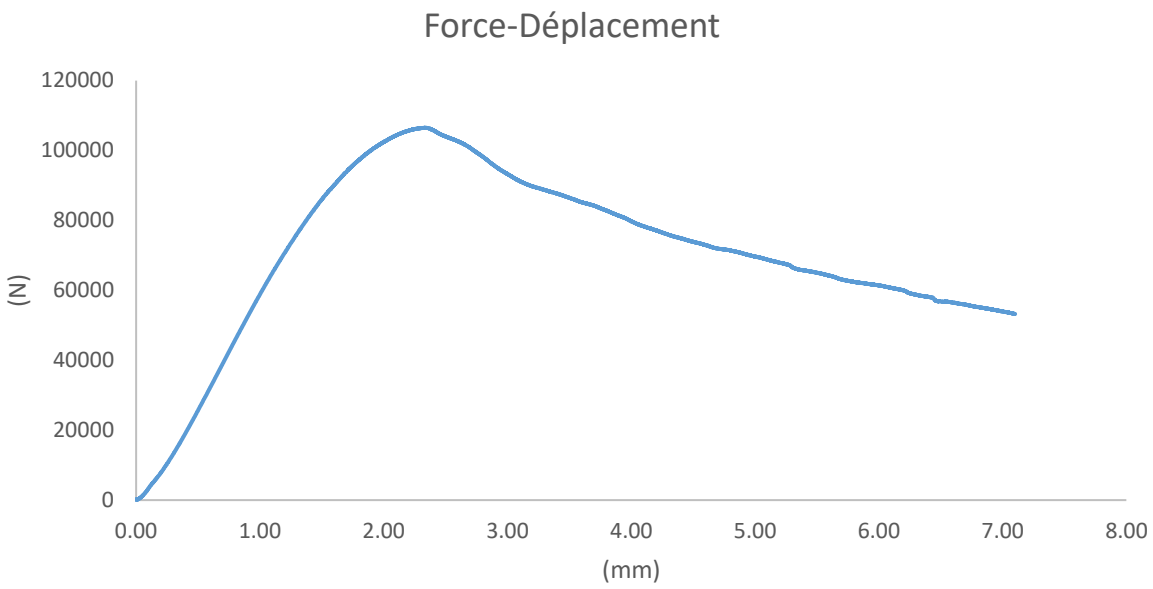


Figure A3. 3 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 3

- **Mode de rupture Type 4 et 5**

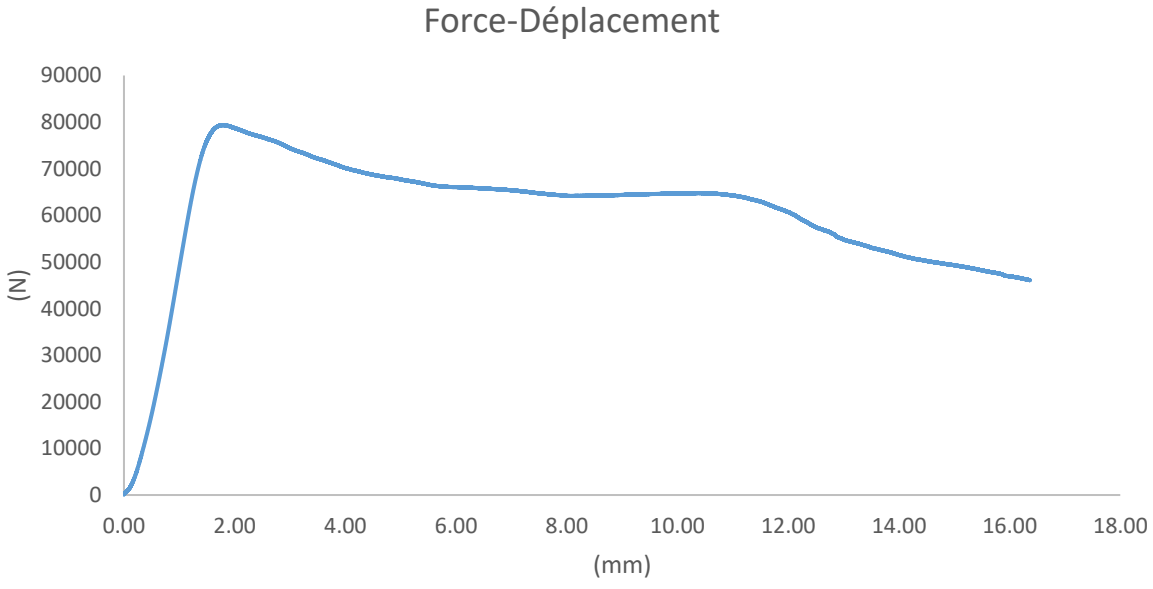


Figure A3. 4 : Courbe force-déplacement associé aux modes de rupture du type 4 et 5

- **Mode de rupture écrasement des extrémités**

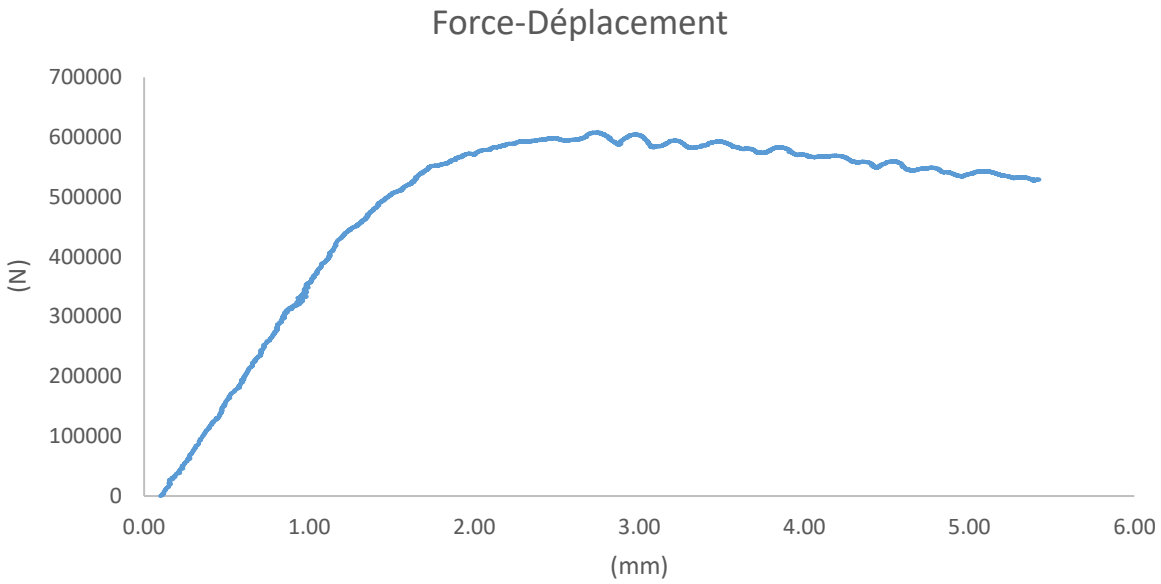


Figure A3. 5 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture écrasement des extrémités

A.4 Evaluation du gradient hydrique

- Evaluation du gradient hydrique d'un échantillon de section S_1 chauffée à 60°C pour une durée de 60 minutes

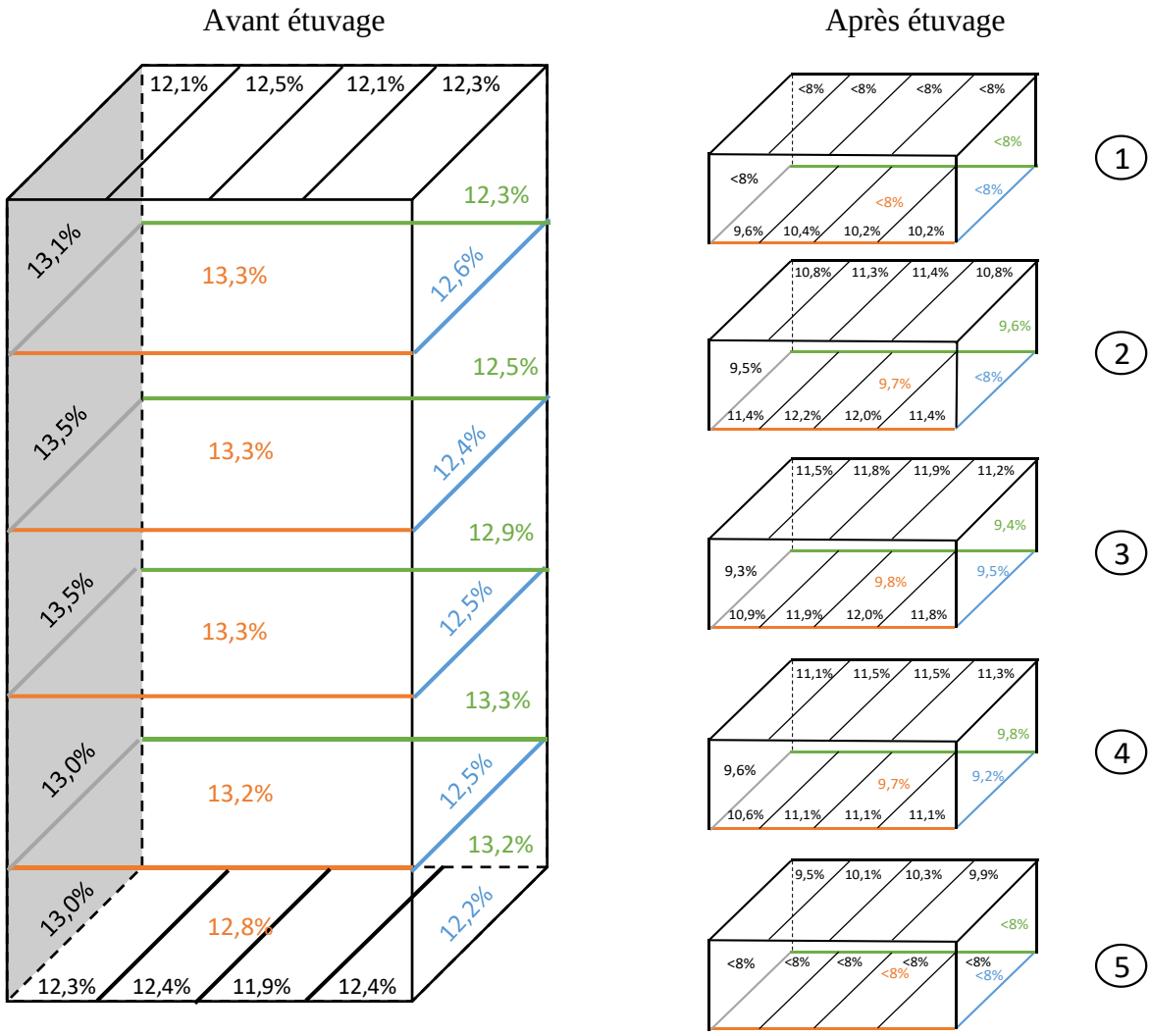


Figure A4. 1 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 60°C pour 60 minutes

- Evaluation du gradient hydrique d'un échantillon de section S_1 chauffée à 100°C pour une durée de 60 minutes

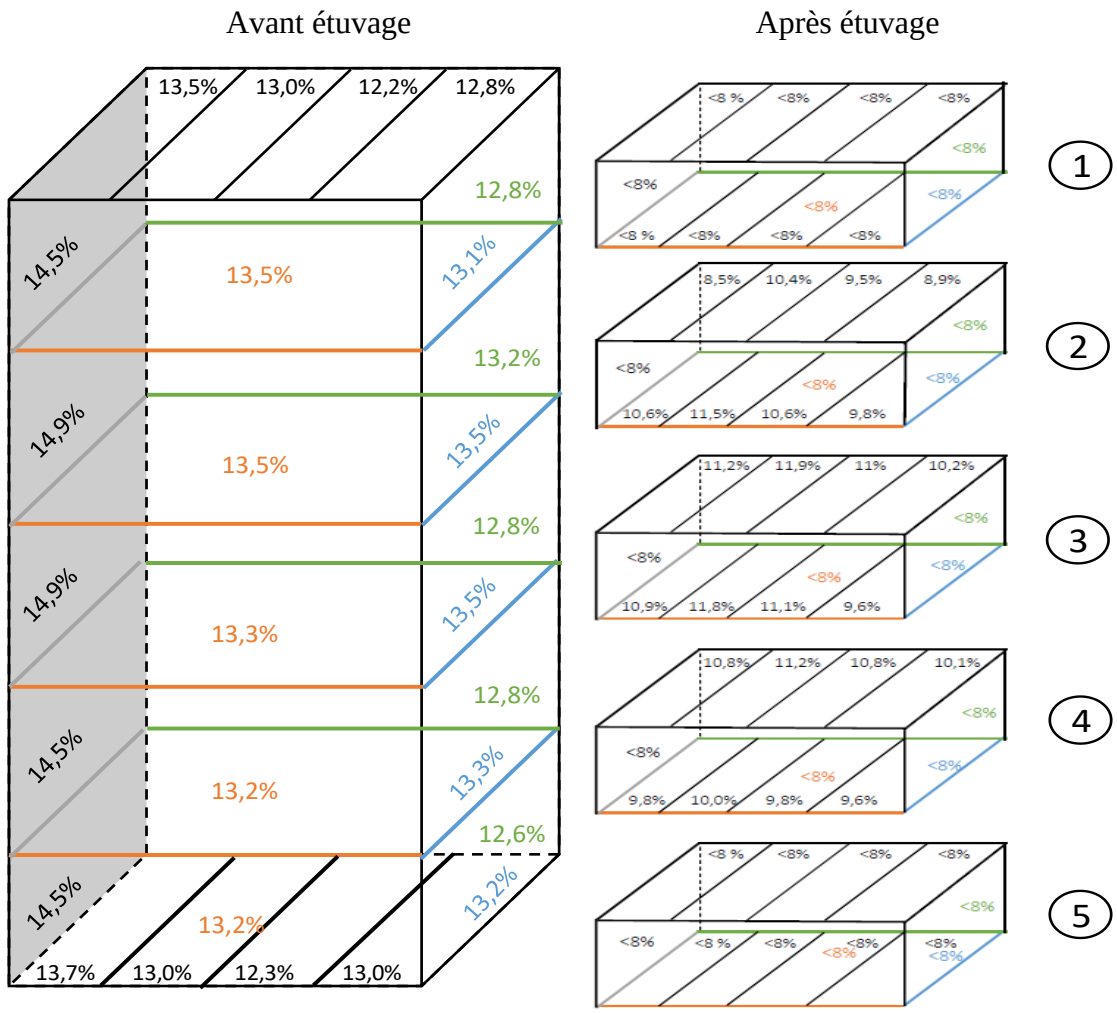


Figure A4. 2 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 100°C pour 60 minutes

- Evaluation du gradient hydrique d'un échantillon de section S_1 chauffée à 150°C pour une durée de 60 minutes

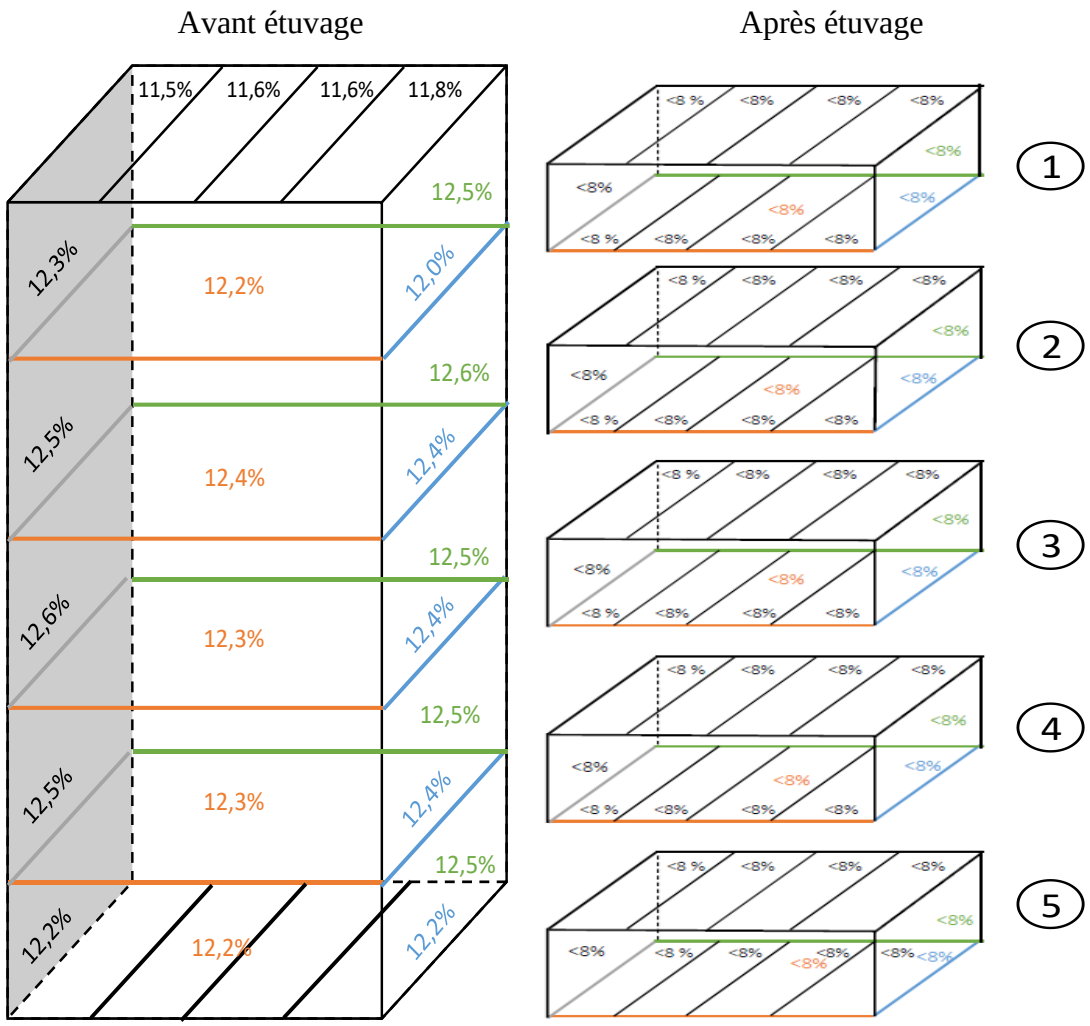


Figure A4. 3 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 150°C pour 60 minutes

Tables des Figures

Figure 1: (a) Equivalence des énergies-procédés de trois poutres (bois lamellé-collé, béton et acier) en durée de consommation théorique d'un bâtiment de 50m2 (Leicher et al. 2014). (b) Energie grise de la structure de deux variantes d'une crèche, en bois et en béton..... 15
Figure 2: Coupe transversale d'un tronc d'arbre (THI, 2017) 16
Figure 3 : Microstructure du bois résineux d'après (Lathuillière, 2015) 17
Figure 4 : Directions et plans principaux du bois (Mouras et al. 2007)..... 17
Figure 5 : Structure de la paroi d'une cellule de bois et mesure de l'AMF (Trouy, Triboulot 2019)..... 19
Figure 6: Proportions approximatives de la composition de la paroi cellulaire pour le bois de résineux et de feuillus (©Forêt.Nature, paru dans la revue trimestrielle d'avril-juin 2018).... 19
Figure 7: Motifs de la chaîne cellulosique d'après (Sjostrom, 1981) 20
Figure 8: Motifs élémentaires de la lignine d'après (Sarkanen & Ludwig 1987)..... 20
Figure 9: Du bois massif aux BLC et CLT (d'après la Fig.1 de l'EN 16351) 22
Figure 10: Schéma représentatif d'une poutre en bois lamellé-collé avec focus sur la jonction à enture de deux lamelles (Gagliardini 2021) 23
Figure 11: Illustration des différents états de l'eau dans le bois (Bonnet 2017)..... 25
Figure 12: Évolution de la teneur en eau du bois lors des différentes étapes de transformation (Gamper et al 2014)..... 27
Figure 13: a) a) Comparaison des Isothermes de Sorption selon les essences (Manfoumbi Boussougou 2012) b) Isothermes de Sorption de quatre génotypes de Douglas-fir (Jamaaoui 2017)..... 28
Figure 14: a) Abaque d'équilibre hygroscopique des bois en fonction de la température et de l'humidité relative (NF EN 1995-1-1/NA 2010) b) Caractérisation des isothermes de sorption pour les feuillus et les résineux (Varnier 2019) 28
Figure 15: Corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa (Natterer et al., 1987) 32
Figure 16: a) Résistance en compression en fonction de la teneur en eau du bois ; b) Résistance en traction en fonction de la teneur en du bois (Green et kretschmann, 1994)..... 33
Figure 17: Variation du module d'élasticité axial en fonction du taux d'humidité pour des bois de différentes densités ($\rho 0$) (Kollmann et Côté, 1984)..... 33
Figure 18: Courbes de contrainte-déformation pour le bois sans défauts sollicité uniaxialement le long des fibres (Natterer et al., 2004)..... 37
Figure 19: Variation de la résistance en traction (Ct, α) et en compression (Cc, α) en fonction de l'angle entre les fibres (α) et la sollicitation (F) (Natterer et al., 2004)..... 38
Figure 20: Front de pyrolyse dans le bois (THI, 2017)..... 40
Figure 21: Schéma récapitulatif de combustion du bois massif (Lahouar et al., 2015)..... 41
Figure 22: Variation des propriétés mécaniques du bois dans le sens des fibres en fonction de la température (Laplanche, 2006)..... 42
Figure 23: Evolution de la masse volumique du bois en fonction de la température (Audebert 2010)..... 43
Figure 24: Evolution de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température (König 2004)..... 44
Figure 25: Evolution de la conductivité thermique du bois en relation avec la température (Moraes 2003) 45

Figure 26: Processus de transfert de masse dans échantillon de bois exposé au feu, avec RH représentant l'humidité relative (Arends et al., 2018) 46
Figure 27: Illustration des plateaux observés à 100°C dans le bois soumis à l'incendie (Schaffer 1967) 46
Figure 28: Exemple de résultat obtenu par White et Schaffer (1981) 47
Figure 29: Variation du module d'élasticité en fonction de la température pour un polymère amorphe (Navi et Heger 2005) 48
Figure 30: Température de transition vitreuse ($Tg°C$) : a) Corrélation entre l'humidité interne (emc%, teneur en eau à l'équilibre) et les composants polymériques du bois, ainsi que b) l'humidité relative (HR%) et la matrice hémicellulose-lignine (d'après les travaux de Salmén (1982, 1986) cités dans l'étude de Navi (2011)) 49
Figure 31: Température de transition vitreuse ($Tg°C$) des composants du bois dans des conditions complètement sèches (Back E.L., 1982) 49
Figure 32: Variation du module d'élasticité longitudinal du bois en fonction de la température (NF EN 1995-1-2) 51
Figure 33: Variation des résistances du bois en fonction de la température (NF EN 1995-1-2) 51
Figure 34 : Evolution de la résistance en compression en fonction de la température et de la teneur en eau (Manthey 2020) 52
Figure 35: Définition de la section résiduelle (2) et efficace (3) à partir de la section initiale (1) de l'élément (NF EN 1995-1-2) 54
Figure 36 : Dimensions des éprouvettes S_0 de bois de Sapin 61
Figure 37 : Scie à onglet utilisée pour la découpe des éprouvettes S_0 de bois de sapin 61
Figure 38 : Dimensions des éprouvettes S_1 du lamellé-collé 62
Figure 39 : Découpe des poutres lamellé-collé à l'aide d'une scie électrique 62
Figure 40 : Mesure de la teneur en eau des éprouvettes à l'aide d'un hygromètre à pointe (Testo 606-2) 63
Figure 41 : Echantillons de bois de sapin de section S_0 dans les dessiccateurs contenant différentes solutions à température ambiante 65
Figure 42 : Courbe des valeurs de l'humidité relative au-dessus des solutions salines saturées en fonction de la température (NF X15-119 65
Figure 43 : Conditionnement des échantillons du bois lamellé-collé à 60°C dans un étuve à température contrôlée 65
Figure 44 : Essais de compression sur le bois de sapin (section S_0) réalisé à l'aide d'une presse électromécanique de marque 3R, d'une capacité de 300KN 66
Figure 45 : Evolution de la densité du bois massif en fonction de la teneur en eau à température ambiante 69
Figure 46 : Evolution de la densité du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau à température ambiante 70
Figure 47 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois massif en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante 71
Figure 48 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante 72
Figure 49 : Comparaison de la résistance relative à la compression à température ambiante, normalisée selon la densité et la teneur en eau initiale de 12%, en fonction de MC 73
Figure 50 : Evolution du module d'élasticité axial du bois massif (sapin) en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante 74

Figure 51 : Evolution du module d'élasticité axial du lamellé-collé en fonction de la teneur en eau (MC) à température ambiante 74
Figure 52 : Module d'élasticité axial relative à la compression à température ambiante, non normalisée par rapport à la densité, en fonction de MC 76
Figure 53 : Variation de la densité normalisée en fonction de MC à trois températures (20°C, 60°C et 90°C), sans prise en compte des dilatations thermiques 77
Figure 54 : Variation de la densité normalisée en fonction de MC à trois températures (20°C, 60°C et 90°C), en prenant en compte les dilatations thermiques et les déformations hydriques 78
Figure 55 : Evolution de la résistance en compression du bois lamellé-collé de section S_1 en fonction de la température et de la teneur en eau 79
Figure 56 : Evolution du facteur n en fonction de la température 80
Figure 57 : Valeurs du paramètre P pour la résistance en compression des essences de bois moyennes signalées par Sulzberger (1953) 81
Figure 58 : Comparaison entre f_c mesurée par Kollmann (1968) et f_c estimée par l'équation 30 81
Figure 59 : Comparaison entre f_c mesurée pour le BLC et fc estimée par l'équation 29. 82
Figure 60 : Comparaison entre f_c mesurée pour le BLC et f_c estimée par la norme NF EN 384 83
Figure 61 : Facteur de réduction pour la résistance en compression parallèle au fil des bois résineux à différentes MC 84
Figure 62 : Evolution du module d'élasticité axial du bois lamellé-collé de section S_1 en fonction de la température et de la teneur en eau 85
Figure 63 : Valeurs du paramètre P pour le module d'élasticité axial des essences de bois moyennes signalées par Sulzberger (1953) 86
Figure 64 : Comparaison entre E_L mesurée pour le BLC et E_L estimée par l'équation 32 86
Figure 65 : Facteur de réduction pour le module d'élasticité axial parallèle au fil des bois résineux à différentes MC 87
Figure 66 : Photos des différentes sections (S_1, S_2 et S_3) du lamellé-collé découpé 92
Figure 67 : Acquisition des données des Thermocouples 93
Figure 68 : Positionnement des thermocouples à mi-épaisseur 93
Figure 69 : Essais de compression réalisés sur une presse électromécanique de capacité 5000 KN 94
Figure 70 : Etuve à température contrôlée XUE686 utilisée pour l'échauffement des échantillons 94
Figure 71 : Données TC pour les protocoles P_2 et P_{1bis} pour la section S_3 à 150°C 96
Figure 72 : Données des thermocouples lors de l'essais de compression pour le protocole P_{1bis} et P_2 pour la section S_1 à 100°C 97
Figure 73 : Palier de température 100°C au cœur durant l'échauffement à 200°C des échantillons S_2 pour le protocole P_2 98
Figure 74 : Palier de température 100°C au cœur durant l'échauffement à 200°C des échantillons S_3 pour le protocole P_2 98
Figure 75 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_1 selon les protocoles P_{1bis} et P_2 99
Figure 76 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_2 selon les protocoles P_{1bis} et P_2 100

Figure 77 : Perte de masse relative en fonction de la température pour la section S_3 selon les protocoles P_{1bis} et P_2 100
Figure 78 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_1 selon P_{1bis} et P_2 100
Figure 79 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_2 selon P_{1bis} et P_2 101
Figure 80 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_3 selon P_{1bis} et P_2 102
Figure 81 : Comparaison entre fc mesurée et fc estimée par les équations (29) et (30) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C 103
Figure 82 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé (section S_1) en fonction de la température, déterminé par la traverse de la machine, pour les protocoles P_{1bis} et P_2 103
Figure 83 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé section S_2 en fonction de la température selon les protocoles P_{1bis} et P_2 104
Figure 84 : Evolution du module d'élasticité axial moyen du lamellé-collé section S_3 en fonction de la température selon les protocoles P_{1bis} et P_2 104
Figure 85 : Comparaison entre E_L mesuré et E_L estimé par les équations (32) et (33) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C pour la section S_2 105
Figure 86 : Comparaison entre E_L mesuré et E_L estimé par les équations (32) et (33) pour différentes teneurs en eau et jusqu'à 200°C pour la section S_3 105
Figure 87 : Changement de couleur des échantillons en fonction de la température de séchage. 106
Figure 88 : Modes de ruptures des échantillons en compression pour des températures inférieures à 150°C 107
Figure 89 : Modes de ruptures des échantillons en compression pour des températures supérieures à 150°C 107
Figure 90 : Profil thermique de la section S_1 pour le protocole P_3 à 250°C 109
Figure 91 : Profil thermique de la section S_2 pour le protocole P_3 à 250°C 109
Figure 92 : Profil thermique de la section S_3 pour le protocole P_3 à 250°C 110
Figure 93 : Perte de masse en fonction de la température pour la section S_1 selon les protocoles P_3 et P_4 111
Figure 94 : Perte de masse en fonction du temps d'étuvage à différentes températures pour la section S_2 selon le protocole P_3 112
Figure 95 : Perte de masse en fonction du temps d'étuvage à différentes températures pour la section S_3 selon le protocole P_3 112
Figure 96 : Evolution de fc en fonction de la température pour S_1 selon P_3 et P_4 (pour une durée de 60 minutes) 113
Figure 97 : Evolution de f_c en fonction de la durée d'exposition à différentes températures pour la section S_2 selon le protocole P_3 114
Figure 98 : Evolution de f_c en fonction de la durée d'exposition à différentes températures pour la section S_3 selon le protocole P_3 115
Figure 99 : Modes de rupture à 60°C pour les sections S_2 et S_3 116
Figure 100 : Modes de rupture à 250°C pour la section S_1 116
Figure 101 : Modes de rupture à 250°C pour la section S_3 117
Figure 102 : Mesure de la teneur en eau à la surface de l'échantillon de section S_1 à l'aide d'un humidimètre à pointe 118
Figure 103 : Découpe des échantillons en 5 tranches après étuvage à différentes températures 118

Figure 104 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 60°C pour 60 min 119
Figure 105 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 100°C pour 60 min 119
Figure 106 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 150°C pour 60 min 120
Figure 107 : Cellule d'essais 127
Figure 108 : Pompe hydraulique manuelle utilisée pour le chargement des poutres 127
Figure 109 : Exemple de force appliquée en fonction du déplacement pour les essais de compression, u représente le déplacement correspondant à force maximale F_{max} 127
Figure 110 : Distribution des thermocouples TC dans la poutre S_4 128
Figure 111 : Distribution des thermocouples TC dans la poutre S_5 128
Figure 112 : Implémentation des thermocouples dans les poutres Figure 113 : Thermocouple de type « K » utilisé 129
Figure 114 : Position des Thermocouples dans le four 131
Figure 115 : Données des Thermocouples dans le four 131
Figure 116 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_4 132
Figure 117 : Poutre S_5 enflammée durant l'essai 133
Figure 118 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_5 enflammée 133
Figure 119 : Distribution des thermocouples et valeurs des températures à la fin de la période de chauffe dans la poutre S_5 (essai répété) 134
Figure 120 : Evolution des températures au sein de la poutre S_5 lors du cycle de refroidissement (24 heures avant l'essai de compression) 135
Figure 121 : Poutre S_5 après essai au feu et avant grattage 136
Figure 122 : Poutre S_5 après grattage et détermination de la section non carbonisée 136
Figure 123 : Données des Thermocouples de la poutre S_5 enflammée 137
Figure 124 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la section S_4 dans trois conditions distinctes : température ambiante, exposition au feu et réversibilité post-chauffage. 138
Figure 125 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la section S_5 dans trois conditions distinctes : température ambiante, exposition au feu et réversibilité post-chauffage. 139
Figure 126 : Evolution de la résistance en compression en fonction du déplacement pour la poutre S_5 enflammée après refroidissement de 24 heures 140
Figure 127 : Mode de rupture de la poutre S_5 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et testée à chaud 143
Figure 128 : Mode de rupture de la poutre S_5 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et refroidie pendant 24 heures 143
Figure 129 : Mode de rupture de la poutre S_4 chauffée à 250°C pour une durée de 60 minutes et refroidie pendant 24 heures 143

Figure A1. 1 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois à température ambiante, d'après les données de plusieurs études

présentées par Gerhards (1982). La résistance est normalisée à 100% pour une teneur en humidité de 12%..... 163
Figure A1. 2 : Evolution de la résistance en compression parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois et de la température, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). La résistance est normalisée à 100% pour une température de 20°C..... 163
Figure A1. 3 : Evolution du module d'élasticité axial parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois à température ambiante, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). Le module est normalisé à 100% pour une teneur en humidité de 12%..... 164
Figure A1. 4 : Evolution du module d'élasticité axial parallèle au fil du bois en fonction de la teneur en humidité du bois et de la température, d'après les données de plusieurs études présentées par Gerhards (1982). Le module est normalisé à 100% pour une température de 20°C 164

Figure A2. 1 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_1 à 100°C 165
Figure A2. 2 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_1 à 100°C 165
Figure A2. 3 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_2 à 100°C 166
Figure A2. 4 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_2 à 100°C 166
Figure A2. 5 : Données TC pour le protocole P_{1bis} pour la section S_3 à 100°C 167
Figure A2. 6 : Données TC pour le protocole P_2 pour la section S_3 à 100°C 167

Figure A3. 1 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 1..... 168
Figure A3. 2 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 2..... 168
Figure A3. 3 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture du type 3..... 169
Figure A3. 4 : Courbe force-déplacement associé aux modes de rupture du type 4 et 5 169
Figure A3. 5 : Courbe force-déplacement associé au mode de rupture écrasement des extrémités 170

Figure A4. 1 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 60°C pour 60 minutes 171
Figure A4. 2 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 100°C pour 60 minutes 172
Figure A4. 3 : Teneur en eau de l'échantillon mesurée avant et après étuvage à 150°C pour 60 minutes 173

Liste des Tableaux

Tableau 1: Coefficient de rétractibilité et nervosités correspondantes pour différentes essences de bois (Gagliardini 2021)..... 31
Tableau 2 : Valeurs du facteur $kmod$ en fonction de la classe de service et de la classe de durée du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué (Yves Benoit et al., 2008)..... 35
Tableau 3: Valeurs du facteur $kdef$ en fonction de la classe de service (Yves Benoit et al., 2008)..... 36
Tableau 4: Valeurs des coefficients ψ pour les bâtiments (Tableau A1.1 de la norme NF EN 1990)..... 36
Tableau 5: Propriétés caractéristiques du bois massif selon la norme NF EN 338 en termes de résistance (MPa), de rigidité (GPa) et de masse volumique (kg/m^3) 39
Tableau 6: Les différentes étapes de transformation des propriétés physico-chimique du Peuplier en fonction de la température (Schaffer, 1973)..... 50
Tableau 7: Valeurs de calcul des vitesses de combustion $\beta 0$ et βn pour différentes essences de bois (NF EN 1995-1-2) 53
Tableau 8 : Densités et teneurs en eau (MC) déterminées pour les éprouvettes S_0 et S_1 à 20°C 62
Tableau 9 : Tableau comparatif des teneurs en eau initiales des éprouvettes S_0 et S_1, obtenues par mesure directe à l'aide de l'hygromètre à pointe et par calcul à partir des masses sèches déterminées après séchage à 103,5°C 63
Tableau 10 : Humidité Relative théorique en fonction de la température pour chaque solution saline utilisée (Greenspan 1977) 64
Tableau 11 : Evolution des propriétés mécaniques du bois de Sapin section S_0 en fonction de la densité (MC ≈ 11%) 70
Tableau 12 : Données pour les essais de référence à température ambiante et pour les 3 sections étudiées dans les conditions initiales (65% HR) 93
Tableau 13 : Données des essais des protocole P_{1bis} et P_2 à différentes températures pour les trois sections..... 99
Tableau 14 : Données des essais des protocoles P_3 et P_4 à différentes températures pendant une durée de 60 minutes pour la section S_1..... 111
Tableau 15 : Données pour les essais du protocoles P_3 à différentes températures et à différentes durées d'étuvage (15, 25, 40, 50 et 60 minutes) pour les sections S_2 et S_3..... 112
Tableau 16 : Caractéristiques mécaniques des poutres GL24h selon la norme NF EN 14080 125