

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

CHARPENTE STRUCTURE



Crédits photos : CSTB

Réalisé par :

CSTB
le futur en construction

Financé par :

CODIFAB
Développement des Industries Françaises
de l'Ameublement et du Bois

REALISATION



Le futur en construction

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, exerce quatre activités clés : la recherche et expertise, l'évaluation, la certification et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de la transition énergétique dans le monde de la construction. Son champ de compétence couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le groupe CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

Pour en savoir plus : www.cstb.fr/fr/

FINANCEMENT



Le CODIFAB, Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois, a pour mission de conduire et financer, par le produit de la Taxe Affectée, des actions d'intérêt général en faveur des fabricants français de l'ameublement (meubles et aménagements) et du bois (menuiseries, charpentes, panneaux, bois lamellé, CLT, ossature bois, ...). Le CODIFAB fédère et rassemble 4200 PME/ETI et plus de 10000 artisans, représentés par leurs organisations professionnelles:



Les actions collectives ont pour objectif d'accompagner les entreprises de création, de production et de commercialisation par : une meilleure diffusion de l'innovation et des nouvelles technologies, l'adaptation aux besoins du marché et aux normes environnementales, la promotion, le développement international, la formation, et par toute étude ou initiative présentant un intérêt pour l'ensemble de la profession.

Pour en savoir plus : www.codifab.fr

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, Fig. 1) 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.

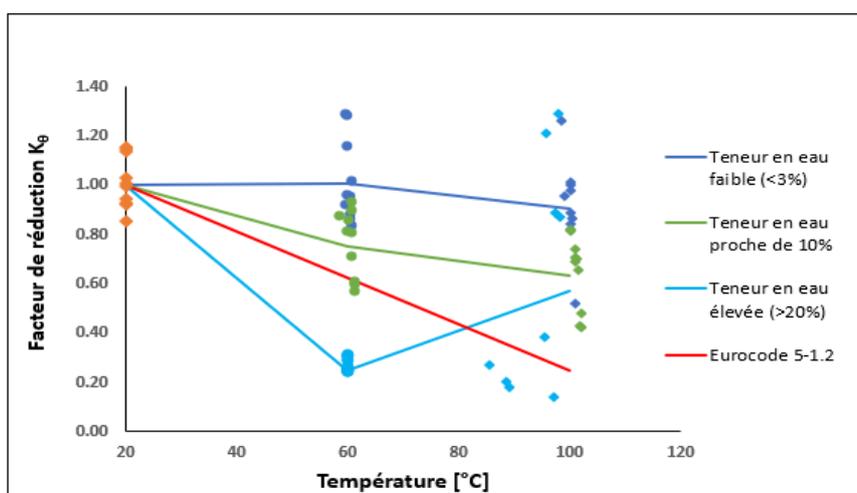


Figure 1 : Evolution de la résistance en compression en fonction de la température et de la teneur en eau (Manthey 2020)

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 différents 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.

- 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 (Fig. 2) 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.

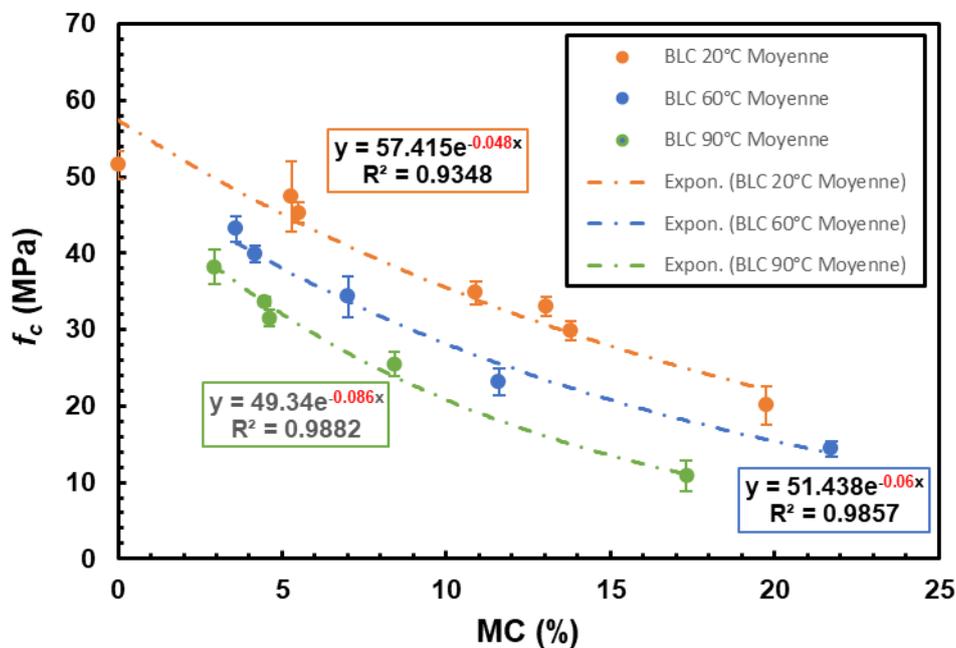


Figure 2 : Evolution de la résistance en compression du bois lamellé-collé en fonction de la température et de la teneur en eau

- 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 (Fig. 3), 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.

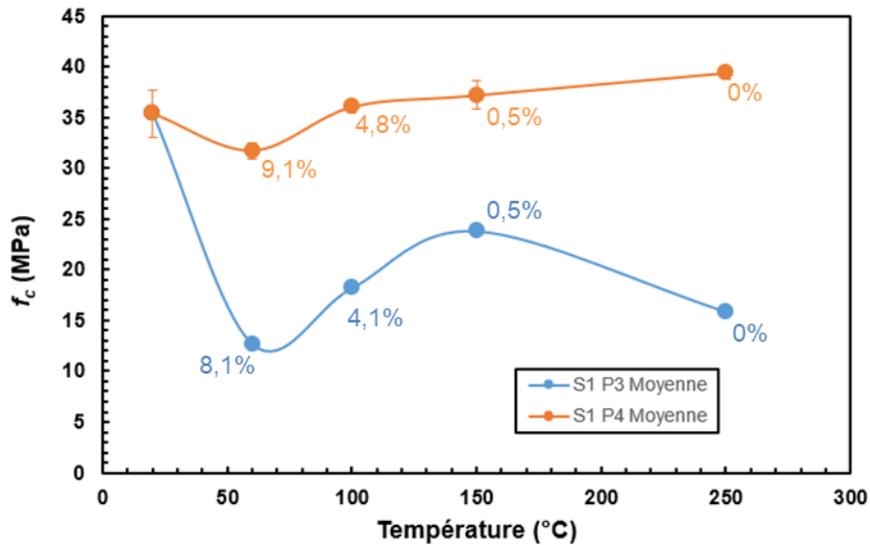


Figure 3 : Evolution de f_c en fonction de la température selon P₃ (effet immédiat de la température) et P₄ (effet permanent après de refroidissement)

- 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 (Fig. 4).

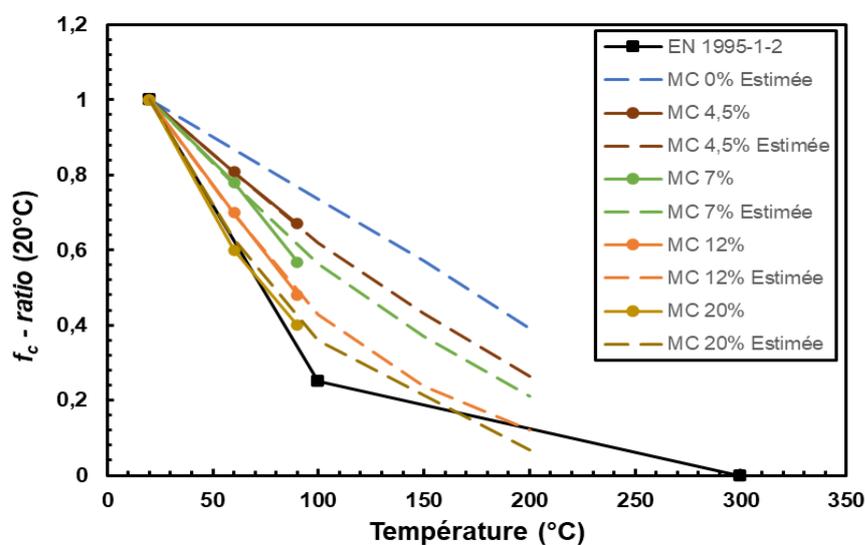


Figure 4 : Facteur de réduction pour la résistance en compression parallèle au fil des bois résineux à différents MC

■ Accès aux résultats complets de cette étude :

www.codifab.fr