

Etude du comportement mécanique du bois en compression en fonction de la température et l'humidité : application aux sections résiduelles d'éléments en bois soumis à des incendies

DAHER Hussein^{1,2}, CARE Sabine¹, FORET Gilles¹, PAYET Loïc²

¹Laboratoire Navier, Université Gustave Eiffel, ENPC, CNRS (UMR 8205),
F-77455 Marne-la-Vallée, France

²CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne, France
hussein.daher@enpc.fr , loic.payet@cstb.fr

Mots clefs : Bois ; Température ; Humidité ; Eurocode 5 ; Compression axiale ; Module d'Young

Contexte et objectifs

Ces dernières années, des bâtiments en bois, allant du simple rez-de-chaussée aux Immeubles de Grandes Hauteurs (IGH), ont été construits dans le monde entier afin de favoriser des constructions à faible empreinte carbone et l'utilisation des ressources forestières. La prévision de la résistance au feu des éléments en bois soumis à des incendies a gagné en importance pour améliorer la crédibilité des bâtiments en bois en cas de feu et afin de concevoir des structures appropriées.

L'enjeu actuel est de mieux comprendre quelles sont les propriétés résiduelles dans les sections des éléments de structure en bois non carbonisées qui peuvent être soumises à des températures jusqu'à 100°C-150°C. En ce qui concerne les paramètres qui affectent les propriétés mécaniques des éléments en bois exposés à la chaleur du feu, la température n'est pas la seule variable importante, la teneur en eau l'est également. En effet, selon la littérature, la teneur en eau dans la section résiduelle (section non carbonisée) peut être variable car il existe des processus complexes comme la vaporisation, le transfert et la condensation de l'eau (Gerhards 1982, White 1981, Woodhandbook 1987).

Selon l'approche proposée dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-2:2005), la résistance en compression à 100°C est inférieure de 25% à celle à 20°C, mais la teneur en eau dans le bois n'est pas précisée. Des essais préliminaires menés en 2020 au CSTB (Manthey 2020) ont montré pour la plage de température 20-100°C qu'au-delà de la température, la résistance en compression était surtout affectée par la teneur en eau du bois. A 100°C, la résistance en compression, après stabilisation de la masse, est presque identique à la résistance initiale à 20°C. Elle est d'environ 60% de la résistance initiale pour une éprouvette avec une teneur en eau d'environ 10%.

Le comportement thermo-hygro-mécanique du bois est donc complexe et dépend de nombreux facteurs tels que l'essence de bois, le type de bois (bois massif ou reconstitué), la teneur en eau, la température et les contraintes mécaniques auxquelles il est soumis. Le présent travail étudie l'évolution des propriétés mécaniques du bois (résistance en compression et module d'Young longitudinal) en fonction de la température et de l'humidité afin de mieux comprendre le comportement du bois, pour une bonne utilisation du bois dans les ouvrages qui peuvent être soumis à des incendies.

Matériels et méthodes

Dans cette section, nous présentons les matériaux et les approches employés pour évaluer l'influence de la température entre 20°C et 150°C et de la teneur en eau sur la résistance à la compression axiale (sens des fibres) ainsi que sur le module d'Young.

Les expérimentations ont été menées de deux manières distinctes. Tout d'abord, nous avons utilisé du bois massif (bois de Sapin) provenant de diverses sources, dans le but d'étudier les effets de la variabilité du bois. Ensuite, nous avons utilisé du lamellé-collé de classe GL24H conforme à la norme NF EN 14080, fabriqué à partir de bois d'épicéa (noté BLC), en faisant varier les conditions thermiques et hydriques.

Bois massif (Sapin)

Le protocole mis en place (P_0) considère un contrôle simultané de l'humidité et de la température des échantillons de Sapin. Pour ce faire, des échantillons (section S_0 , dimensions 35x35x80 mm³) sont placés dans des dessiccateurs contenant une solution saline saturée afin de contrôler l'humidité relative. Les essais présentés dans ce travail sont réalisés à température ambiante (20°C) pour 5 niveaux de teneur en eau différents. Les essais réalisés avec une teneur en eau d'environ 11%, servent de référence pour les autres niveaux de teneur en eau. Toutes les données sont ensuite normalisées par rapport à cette référence (et aussi par rapport à la densité pour tenir compte de la variabilité du matériau bois d'un échantillon à l'autre).

Bois lamellé-collé (BLC)

Les essais sur le lamellé-collé (GL24H) ont été réalisés selon plusieurs protocoles pour étudier son comportement à différentes températures (20°C, 60°C, 100°C et 150°C), teneurs en eau, et pour différentes dimensions (sections : S_1 , S_2 et S_3 , respectivement avec les dimensions suivantes : 50x50x100mm³, 97x92x200mm³, 187x198x400mm³). Le premier protocole P_1 , consiste en des essais de compression à la température ambiante 20°C, dans 2 états hydriques (état initial avec une teneur en eau d'environ 11% et état sec après étuvage à 103°C). Ces essais ont été effectués pour servir de référence lors de l'interprétation des résultats obtenus lors des autres protocoles. Pour les autres températures (60°C, 100°C ou 150°C), les échantillons sont placés dans une étuve pendant des durées différentes en fonction des conditions d'humidité ou de température requises, puis les essais mécaniques ont été réalisés (à l'aide de thermocouples, nous avons vérifié que, pendant la durée de l'essai mécanique, la température dans les échantillons restait identique à celle à la sortie de l'étuve). Dans le cadre du protocole P_{1bis} , des essais de compression sont réalisés en considérant une même perte de masse de 10%, après étuvage pour chaque section et température. Le protocole P_2 visait à maintenir une température homogène tout au long de la hauteur de la section. Finalement, le protocole P_3 consistait en des essais de compression à différentes températures (60°C, 100°C et 150°C), après des durées variables d'échauffement dans l'étuve (15min, 25min, 40min, 50min et 60min). Les résultats obtenus pour tous les protocoles ont été normalisés par rapport aux résultats à 20°C, ainsi que par la densité des échantillons (densité estimée en tenant compte de la teneur en eau moyenne après étuvage).

Résultats et discussion

Essais sur le bois massif, effet de la teneur en humidité à température ambiante

La Fig. 1 donne les résultats des résistances et modules longitudinaux pour le bois de sapin. De manière attendue, les propriétés mécaniques baissent avec la teneur en eau et pour le module longitudinal, la correction de Guitard (Guitard 1987) est en effet vérifiée. Ces résultats sont discutés en fonction de l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques des parois cellulaires.

Des essais seront réalisés sur le lamellé-collé (GL24H) à 20°C et jusqu'à 100°C dans la suite du travail avec la section S₁ afin de discuter de la variabilité de la loi de Guitard pour du bois reconstitué (BLC).

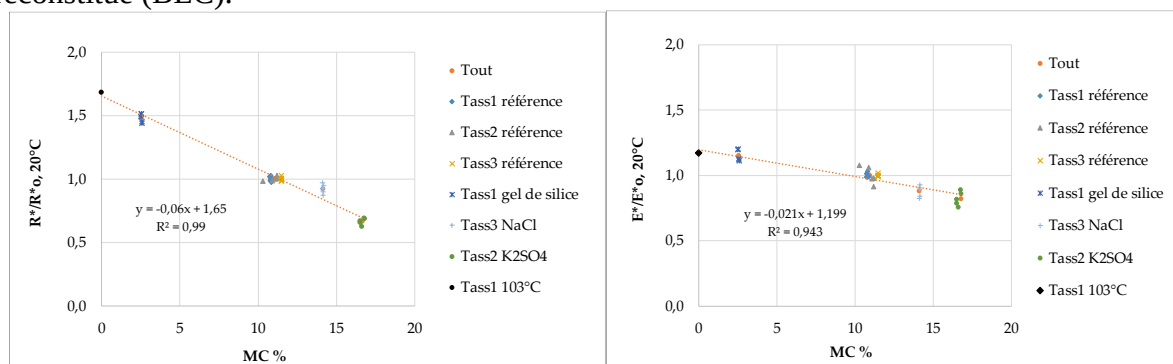


Fig. 1 : Résistances en compression et Modules d'Young du Sapin (de 3 provenances différentes notées Tass1, Tass2 et Tass3) à différentes teneurs en eau (MC%) et à température ambiante (20°C) et normalisés par rapport à la référence (notée avec l'indice 0) et la densité (désignée par *). 5 échantillons sont testés par conditions hydriques.

Essais sur le lamellé-collé (P₁, P_{1bis} et P₂), effet de la température (20°C à 150°C) pour les sections S₁, S₂ et S₃

La Fig. 2 montre les résultats obtenus pour la section S₁ à différentes températures et pour les protocoles P₁, P_{1bis} et P₂. Les propriétés mécaniques augmentent avec la température par rapport aux essais de référence à 20°C, puis diminuent par la suite. La diminution des propriétés mécaniques observée est plus marquée à 60°C pour la section S₁, tandis que pour les sections S₂ et S₃, cela se produit autour de 100°C (résultats non présentés ici). Ces variations peuvent être expliquées par différents facteurs tels que la diminution de la teneur en eau du bois, des dégradations des éprouvettes (eg. fissuration du bois ou délaminage entre lamelles du BLC) et des dégradations chimiques. Les différences entre les sections S₁, S₂ et S₃ peuvent être dues à des effets d'échelle.

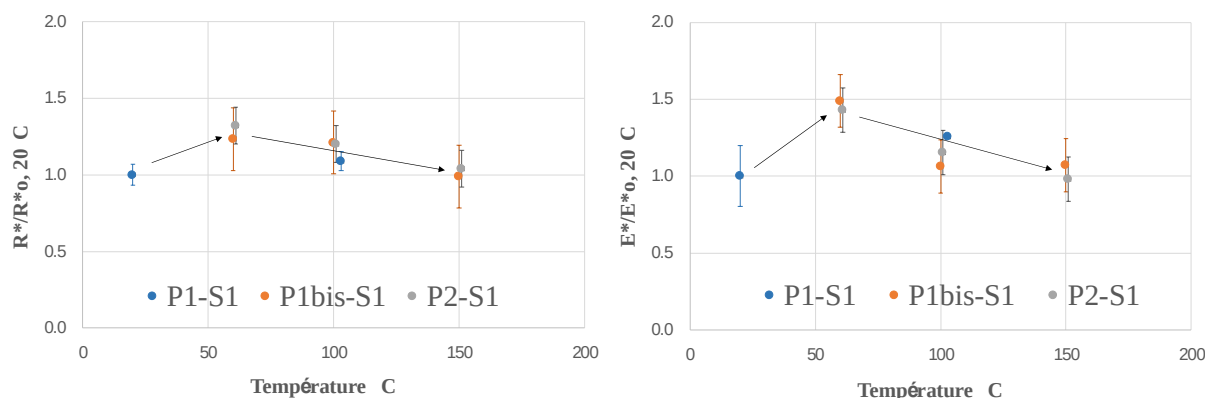


Fig. 2 : Résistances en compression et Modules d'Young à différentes températures (20-150°C) pour les trois protocoles P₁, P_{1bis} et P₂ et pour la section S₁, pour le bois BLC. Les résultats sont normalisés par rapport à l'état de référence (notée avec l'indice 0) et la densité (désignée par *). 5 échantillons sont testés par température.

Essais sur le lamellé-collé (P₃), effet de la température (20°C à 150°C) avec différentes durées d'échauffement (15min à 60min) pour les sections S₁, S₂ et S₃

Le protocole P₃ consistait à étuver les échantillons pendant des durées variables, comme indiqué précédemment. Les essais réalisés montrent que les résistances en compression ont tendance à diminuer pour les trois sections étudiées et les trois températures d'étuvage en fonction de la

durée d'étuvage (résultats non montrés ici). L'ensemble des résultats est discuté en fonction des pertes de masse après étuvage, des gradients thermiques, ainsi que des gradients hydriques induits lors de l'étuvage. En particulier, il est proposé une discussion sur les modes de rupture des échantillons qui diffèrent pour ce protocole par rapport aux autres protocoles (écrasement aux extrémités au lieu de fissures de cisaillement). Ces différences sont expliquées par rapport aux gradients hydriques observés dans les échantillons.

Conclusions et perspectives

Ce travail a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques, à savoir les résistances et les modules d'Young, de deux types de bois en fonction de la teneur en eau et de la température. D'une part, nous avons étudié le bois parfait (i.e. sans défauts), à température ambiante, en faisant varier la teneur en eau. D'autre part, nous avons analysé le bois lamellé-collé à différentes teneurs en eau en fonction de la température. Les résultats de notre étude ont révélé un effet opposé de la température et de la teneur en eau sur la résistance et la rigidité du bois.

Pour aborder la problématique liée au comportement mécanique des éléments en bois exposés à des incendies, en particulier pour les sections non carbonisées, il s'avère nécessaire de caractériser ses propriétés à des niveaux d'humidité plus élevés. Pour ce faire, nous prévoyons de mener des essais sur des échantillons de section S_1 (BLC), avec des essais similaires effectués sur les sections S_0 en bois de Sapin, en faisant varier les niveaux d'humidité et en exposant les échantillons à des températures approchant les 100°C. L'objectif de ces essais est de développer une relation qui permettra de décrire comment les propriétés mécaniques, telles que la résistance et le module d'Young, dépendent de la température et de la teneur en eau du bois. Enfin, des essais au feu seront réalisés sur des poutres dans différentes conditions et seront discutés à partir des résultats présentés ici. Ces travaux serviront de base pour intégrer les propriétés thermo-hygro-mécaniques dans des modèles de calcul couplés, lesquels pourront être validés grâce aux essais au feu réalisés sur les poutres.

Références

- Eurocode 5 (2005) Conception et calcul des structures en bois, NF EN 1995-1-1,2.
- Gerhards C.C (1982) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood, Wood Fiber (1):4-36.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, Cépaduès.
- Manthey M (2020) Rapport d'essais n° EEM/EA2R 2026087828, Etude de la résistance en compression en fonction de la température du matériau bois – épicea, CSTB, France.
- White R.H, Shaffer (1981). Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. Wood and Fiber Science. 13(1): 17-38.
- Wood Handbook (1987) Wood as an engineering material, The Laboratory N°72, Department of Agriculture, United states.