

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

Hussein Daher^{1,2}, Sabine Caré¹, Gilles Forêt¹, Loïc Payet²

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

² CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne, France

RESUME : Le changement climatique a de nombreuses conséquences dont la hausse des températures maximales qui est l'un des effets le plus important. Pour lutter contre le changement climatique, il est nécessaire de diminuer l'empreinte carbone. Dans le domaine de la construction, l'utilisation des matériaux à base de bois permet de répondre à cette nécessité car, le bois stocke le carbone pendant toute leur durée de vie. Cependant, il est nécessaire de préciser les règles de dimensionnement, notamment en cas d'incendie dans les ouvrages. L'enjeu actuel est de mieux comprendre quelles sont les propriétés résiduelles dans les sections des éléments de structure en bois non carbonisés qui peuvent être soumise à des températures jusqu'à 100°C. Cette étude présente l'évolution des propriétés mécaniques du bois en fonction de la température (20-150°C) et de la teneur en eau dans le bois afin de bien comprendre le comportement du bois dans différentes conditions pour une bonne utilisation de ce matériau. De manière connexe, cette étude permet aussi de préciser comment les hausses de températures avec le changement climatique peuvent avoir un effet sur la tenue d'une structure.

Mots-clefs : Bois, Température, Humidité, Compression axiale, Eurocode 5

I. INTRODUCTION

Le comportement thermo-hygro-mécanique (THM) du bois désigne l'influence conjointe de la température, de l'humidité et des contraintes mécaniques sur les propriétés du bois. Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il peut absorber ou désorber de l'eau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Cela peut modifier sa masse volumique, ses dimensions mais également ses propriétés mécaniques (résistances et modules).

Lors d'un incendie, les éléments structuraux en bois perdent leur section résistante en raison de la carbonisation des couches superficielles et également leur résistance mécanique car les couches non carbonisées peuvent se dégrader sous l'effet des températures plus ou moins élevées. Dans le bois, la présence d'un gradient de température entraîne une migration de l'humidité vers les zones les moins chaudes et une évaporation en surface (White 1987). L'association du gradient de température avec l'augmentation du taux d'humidité, affectera donc les propriétés mécaniques du bois (Gerhards 1982 ; Schaffer 1973 et 1977).

Selon l'approche proposée dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-2 :2005), la résistance en compression à 100°C est inférieure de 25% de celle à 20°C, mais l'effet de la teneur en eau dans le bois n'est pas

précisé. Des essais préliminaires menés en 2020 au CSTB (Rapport d'essais n° EEM/EA2R 20 26087828) 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 humidité, la température et les contraintes mécaniques auxquelles il est soumis. Le présent travail étudie l'influence de la température et de l'humidité sur la résistance en compression du bois afin de mieux comprendre le comportement du bois dans différentes conditions d'humidité et de température, pour une bonne utilisation du bois dans les ouvrages.

II. MATERIAUX ET METHODES

Dans cette partie, on présente les matériaux et les méthodes utilisés pour évaluer les effets de la température (°C) et de la teneur en humidité (MC%) sur la résistance en compression (R) du bois selon la direction axiale (sens des fibres) ainsi que sur le module d'Young (E).

Les essais sont réalisés (Tableau 1) d'une part avec du bois massif (bois de sapin) de différentes provenances pour étudier l'effet de la variabilité du bois (section S0, protocole P1) et d'autre part avec du lamellé-collé (classe GL24H conformément à la norme NF EN 1480 avec du bois d'épicéa, noté BLC) pour différentes conditions hydriques et thermiques (sections S1 et S2, protocoles P1, P1bis et P2).

TABLEAU 1. Dimensions et nombre d'essais à différentes températures selon les protocoles. Pour P1 103°C, pour la section S0, l'essai a été réalisé à température ambiante après étuvage à 103°C.

SECTION	DIMENSIONS	BOIS	P1		P1BIS ET P2		
			20°C	103°C	60°C	100°C	150°C
	[MM ³]						
Section S0	35x35x80	bois massif	5 X 5	1	-	-	-
Section S1	50x50x100	Lamellé-collé	5	2	5 X 2	5 X 2	5 X 2
Section S2	97x92x200	Lamellé-collé	5	4	5 X 2	5 X 2	5 X 2

Pour tenir compte de la variabilité des échantillons (notamment densité), les résistances R et les modules d'Young E seront normalisés par rapport à la densité et sont notés respectivement R* et E*. A noter que les modules d'Young E sont déterminés à partir du déplacement de la traverse de la machine d'essais auquel on applique un coefficient de correction qui prend en compte la rigidité de la machine d'essais : il est supposé que ce coefficient de correction est indépendant de la température et de la teneur en eau des échantillons. Les résistances et les modules sont déterminés avec des sections actuelles qui sont calculées à partir des coefficients de retrait des bois (Tropix) pour tenir compte des variations dimensionnelles. De la même manière, les densités sont corrigées pour tenir compte des modifications en teneurs en eau suite au conditionnements

des échantillons (masse d'eau et dimensions des échantillons). Il est supposé que la température n'a pas d'effet sur les variations dimensionnelles.

A. Essais sur le bois massif à différentes teneurs en eau et à 20°C

Le protocole mise en place (P1, Tableau1) consiste à contrôler l'humidité et la température des échantillons de bois de sapin en même temps. Des échantillons de dimensions 35x35x80 mm³ sont mis dans des dessiccateurs contenant une solution saline saturée pour contrôler l'humidité relative (Figure 1). Les essais sont réalisés à 20°C pour 5 teneurs en eau. Les essais dans les conditions ambiantes (MC≈11%) sont utilisés comme référence pour les autres teneurs en eau. Les données sont normalisées par rapport à cette référence.

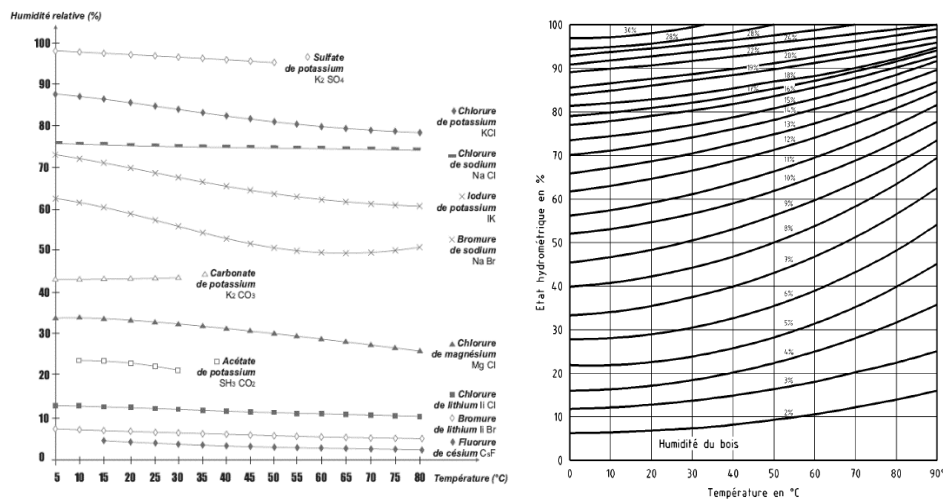


FIGURE 1. A gauche : Courbe des valeurs de l'humidité relative au-dessus des solutions salines saturées en fonction de la température (NF X15-119). A droite : Equilibre hygroscopique du bois en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant (Eurocode 5-EN 1995-1-1)

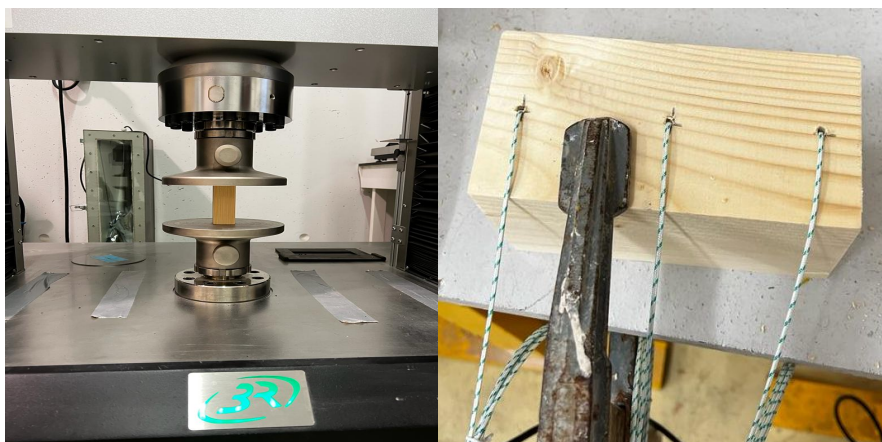


FIGURE 2. A gauche : Essais de compression pour les essais sur le bois de Sapin (section S0) réalisé sur une presse électromécanique 3R de capacité 300KN.

A droite : Positionnement des thermocouples pour les protocoles P1, P1bis et P2, à différentes hauteurs dans les échantillons (sections S1 et S2) avec une mesure de la température au cœur

B. Essais sur le lamellé-collé, à différentes températures (20°C, 60°C, 100°C et 150°C)

- Protocole 1 : Essais initiaux à la température ambiante et à 103°C

Le 1^{er} protocole P1 consiste à réaliser des essais de compression à température ambiante (20°C) et à 103°C (bois anhydre après stabilisation de la masse). Ces essais sont utilisés pour interpréter les résultats pour les autres essais avec le bois lamellé-collé BLC (GL24H). Les données seront normalisées par rapport aux résultats obtenus à 20°C.

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

Le protocole P1bis consiste à réaliser des essais de compression à différentes températures (60°C, 100°C et 150°C), avec la même perte de masse que pour les essais à 103°C et les mêmes sections que pour le protocole P1. Pour ce faire, on a introduit 3 thermocouples dans chaque échantillon afin d'évaluer le gradient thermique, ensuite on procède à l'étuvage des échantillons et finalement on réalise les essais de compression.

- Protocole 2 : Essais à température homogène et différentes pertes de masse

Le protocole P2 consiste à réaliser des essais de compression, à différentes températures (60°C, 100°C et 150°C), avec une température homogène dans toute la section. De même, on introduit 3 thermocouples dans chaque échantillon (en considérant les mêmes sections que pour les protocoles P1 et P1bis), afin de vérifier le gradient thermique. Ensuite, on procède à l'étuvage des échantillons jusqu'à atteindre une température homogène dans les échantillons et finalement on réalise les essais de compressions.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Essais sur le bois massif, Effet de la teneur en humidité à Température ambiante 20°C (Bois de Sapin)

- Remarque préliminaires

Les essais ont été réalisés avec 3 tasseaux de bois de Sapin, notés Tass1, Tass2 et Tass3 (Tableau 2) qui diffèrent par leur densité (en lien avec la largeur de cerne). Les échantillons sont prélevés dans les tasseaux en évitant les défauts au maximum (bois clair). En accord avec la bibliographie (Wood Handbook 1987, Guitard 1987a et Guitard 1987b), pour une même teneur en eau (ici MC≈11%), la résistance en compression augmente avec la densité, ainsi que le module d'Young. Pour tenir compte de cet effet, les propriétés mécaniques sont normalisées par rapport à la densité. Pour l'ensemble des essais à différentes teneurs en eau, les écart-types sont compris entre 0.6 et 3.4 MPa pour les résistances en compression et 0.05 e 0.4 GPa pour les modules d'Young.

TABLEAU 2. Caractéristiques des 3 tasseaux de bois de Sapin pour les essais de référence

	TASS 1	TASS 2	TASS 3
Densité (g/cm ³)	0,49 +/- 0,01	0,41 +/- 0,01	0,39 +/- 0,01
Teneur en eau MC (%)	10,8 +/- 0,1	10,9 +/- 0,4	11,5 +/- 0,0
Résistance (MPa)	51 +/- 1	42 +/- 2	36 +/- 1

- Résistances en compression

Selon la Figure 3, la résistance en compression du bois diminue avec l'augmentation de la teneur en eau (MC %) en lien avec la matrice solide (parois cellulaires) qui est moins résistante. L'humidité a un impact important sur la résistance en compression du bois et une dépendance linéaire est observée entre les contraintes et la teneur en eau MC%.

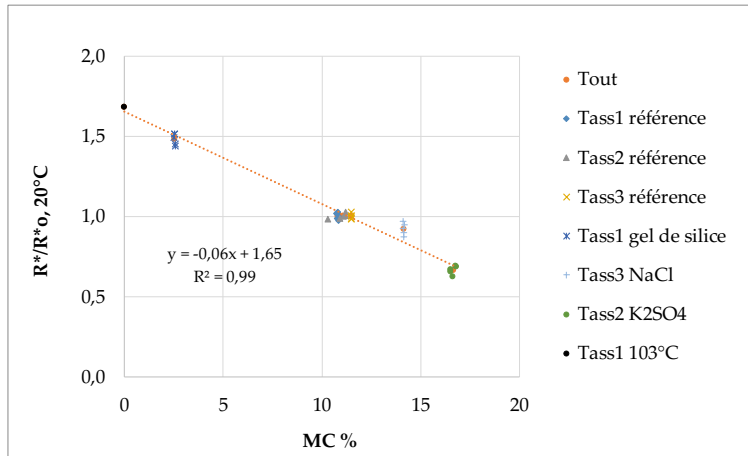


FIGURE 3. Résistance en compression du Sapin à différentes teneurs d'humidité (MC %) et à température ambiante (20°C). Résistance R* normalisée par rapport à la résistance R*o de référence.

- Modules d'Young

La Figure 4 présente les valeurs du module de Young (E^*/E^*_o) en fonction de la teneur en humidité et à température ambiante du bois de Sapin. Les modules d'Young diminuent avec la teneur en eau en lien avec la matrice solide (parois cellulaires) qui est moins rigide.

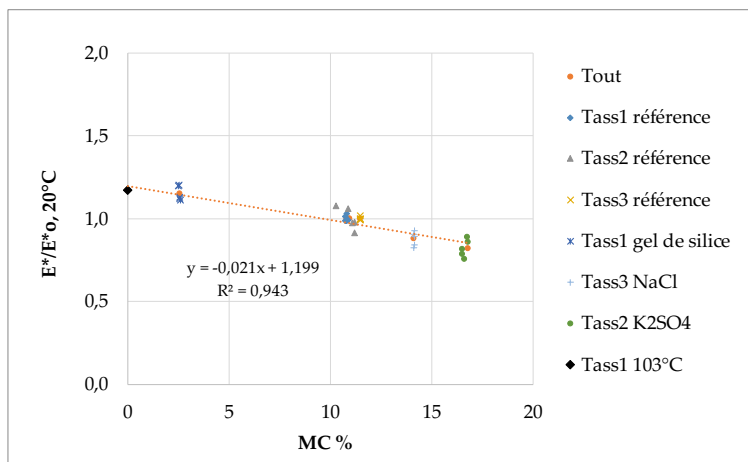


FIGURE 4. Module de Young à différentes teneurs d'humidité (MC %) et à température ambiante (Bois Sapin). Module d'Young normalisé par rapport au module d'Young à MC 10%.

Comme pour les résistances, une dépendance linéaire est observée entre les modules d'Young et la teneur en eau. Si le rapport R/Ro (donc sans normaliser par rapport à la densité) est exprimé en fonction de MC, une régression linéaire donne pour la pente un facteur de 0.014. Ce résultat est

cohérent avec la correction proposée par (Guitard 1987b) pour prendre en compte la dépendance du module d'Young avec l'humidité du bois (0.015 en compression longitudinale, pour un bois clair et une humidité homogène dans les échantillons entre 6% et 20% de MC).

B. Essais sur le bois lamellé-collé, Effet de la température (20 à 150°C) pour les sections S1 et S2 du bois lamellé-collé

- Remarques préliminaires

Les échantillons ont été prélevés dans des poutres de lamellé-collé (classe GL24H) ; ils sont constitués de plusieurs lamelles d'épicéa collées entre elles (2 pour les sections S1 et S2) avec des orientations de cernes qui peuvent être différentes. Le Tableau 3 donne les résistance, densité et humidité des échantillons de référence (20°C) pour les 2 sections étudiées (S1 et S2). Les éprouvettes ont des résistances équivalentes à la température ambiante (effet de la densité et de l'humidité qui se compensent). A noter que, comme pour les essais sur les sections S0, les propriétés mécaniques (résistances et module d'Young) seront normalisées avec la densité (R^* et E^*).

TABLEAU 3. Données pour les essais de référence à la température ambiante et pour les 2 sections

SECTION	MC%	DENSITE (g/cm ³)	RESISTANCE (MPa)
S1	12	0,41 +/- 0,1	35 +/- 2
S2	10,7 +/- 0,7	0,43 +/- 0,2	35 +/- 2

Les protocoles expérimentaux (P1bis et P2) consistent à étuver les échantillons avec différentes pertes de masse (Tableau 4). La perte de masse relative mesurée est de 10.9% après étuvage à 103°C pendant 24h00 pour les 2 sections S1 et S2. Pour le protocole P1bis, les pertes de masse pour les 2 sections et les 3 températures sont du même ordre de grandeur que celle à 103°C. Pour le protocole P2, elles augmentent avec la température avec des différences plus marquées pour la section S2. Ces données sont cohérentes avec les teneurs en eau finales estimées qui sont très faibles et même nulles pour la section S1.

TABLEAU 4. Données pour les essais des protocoles P1bis et P2, à différentes températures et pour les 2 sections. Pour les teneurs en eau notées 0*, la perte de masse est supérieure à la masse d'eau initiale

		P1bis			P2		
		60°C	100°C	150°C	60°C	100°C	150°C
Perte de masse relative (%)	S1	10,5 +/- 0,2	10,5 +/- 0,5	10,4 +/- 0,1	9,3 +/- 0,1	11,3 +/- 0,4	11,0 +/- 0,3
	S2	9,3 +/- 0,3	10,3 +/- 0,3	10,5 +/- 0,1	5,3 +/- 0,6	10,2 +/- 0,2	13,8 +/- 0,2
Durée étuvage (h)	S1	27	15	2	24	18	2
	S2	144	48	23	28	24	20
MC final (%)	S1	0*	0*	0*	0*	0*	0*
	S2	1,6	0,5	0,3	6,1	0,53	0*

- Résistances en compression

Les Figure 5 et 6 présentent respectivement les valeurs de la résistance en compression du bois lamellé-collé (GL24H) en fonction de la température (20-150°C) pour les sections S1 et S2.

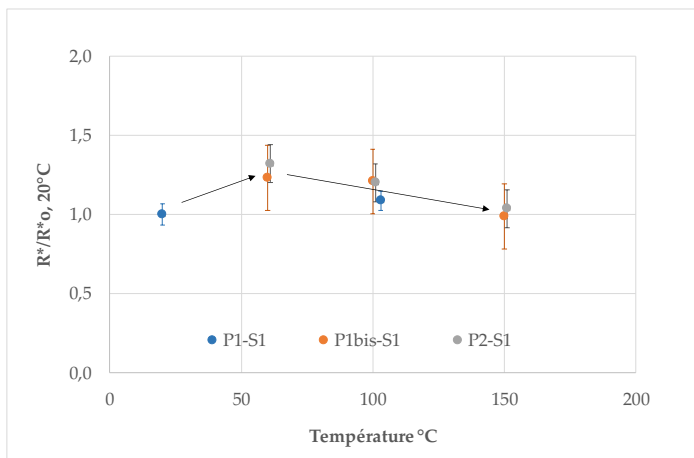


FIGURE 5. Résistance à différentes températures (20-150°C) et pour la section S1 et les protocoles P1, P1bis et P2, pour le bois BLC. Résistance R* normalisée par rapport à la résistance R*o à 20°C.

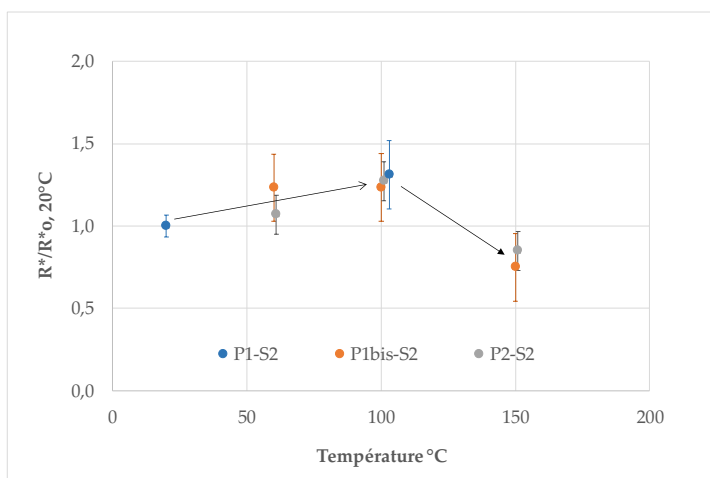


FIGURE 6. Résistance en compression à différentes températures (20-150°C) et différentes pertes de masse pour S2, pour le bois BLC. Résistance R* normalisée par rapport à la résistance R*o à 20°C.

De manière générale, les tendances sont similaires pour les 2 sections S1 et S2 avec une augmentation des contraintes avec la température par rapport aux essais de référence (20°C) puis une diminution (aux incertitudes de mesures près). Pour S1, la diminution des contraintes est observée à 60°C et pour S2 à 100°C. Les résultats obtenus peuvent être expliqués par plusieurs facteurs.

Tout d’abord, l’augmentation des contraintes observée pour les échantillons S1 et S2 par rapport aux échantillons de références peut être liée à une diminution de la teneur en eau du bois (Tableau 4). Cela est cohérent avec les données sur S0. Cependant, le rapport $R^*/R^*o < 1,5$, est inférieur à celui observé pour S0 ; ce qui peut suggérer également un effet de la température.

Par ailleurs, la diminution des contraintes observées lorsque la teneur en eau est proche de zéro peut être due à des dégradations des éprouvettes. En effet, des fissures au niveau des éprouvettes ont été observées après étuvage, ainsi qu'une dégradation de la colle. De plus, au-delà de 100°C, des dégradations chimiques peuvent également 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)), ce qui peut affecter sa résistance en compression. L'humidité du bois peut également se vaporiser à cette température, créant ainsi des fissures qui peuvent avoir un impact sur les résistances.

Enfin, l'amplitude des variations des contraintes en fonction de la température est plus marquée pour la section S2 que pour la section S1. A 100°C, l'augmentation des résistances est moins marquée pour la section S1, où les résistances sont du même ordre de grandeur que les essais de référence. Ce résultat est cohérent avec les essais préliminaires réalisés au CSTB (Rapport d'essais n° EEM/EA2R 20 26087828) qui avaient montré des résistances à 100°C proches de celles mesurées à 20°C pour des échantillons de dimension équivalente (40x40x80 mm³). Les différences entre les échantillons S1 et S2 peuvent donc s'expliquer par des effets d'échelle.

Par ailleurs, pour les différentes températures et pour une même section (S1 et S2), les résultats sont relativement proches entre les différents protocoles. Pour S1, ce résultat peut être expliqué par des pertes de masse relativement équivalentes avec une teneur en eau estimée à 0%, ce qui indique qu'il n'y a probablement pas d'effet des gradients thermiques sur les résultats. Pour la section S2, les résultats diffèrent davantage entre les protocoles P1bis et P2, en particulier à la température de 60°C. Cela peut être lié à des pertes de masse différentes entre les protocoles.

- Modules d'Young

Les Figures 7 et 8 présentent respectivement les valeurs du module de Young du bois lamellé-collé (GL24H) en fonction de la température (20-150°C) pour les sections S1 et S2. Les résultats pour les modules d'Young sont similaires à ceux obtenus pour les résistances en compression (effet de la température, de la teneur en eau et différence entre les sections S1 et S2).

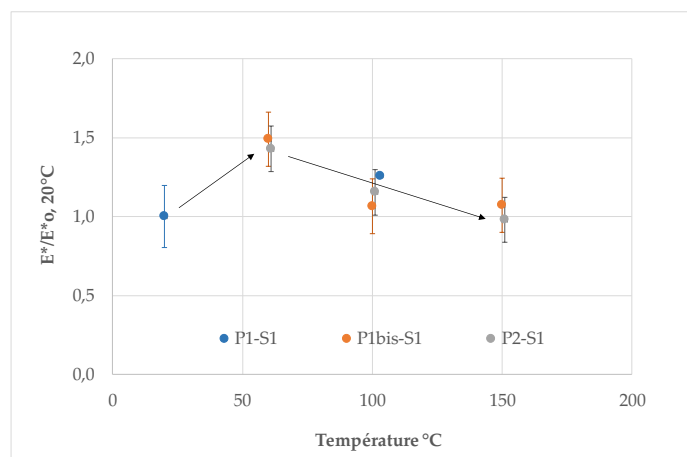


FIGURE 7. Module d'Young à différentes températures (20-150°C) et différentes pertes de masse pour S1, pour le bois BLC. Module d'Young E^* normalisé par rapport au module d'Young E^*_{o} à 20°C.

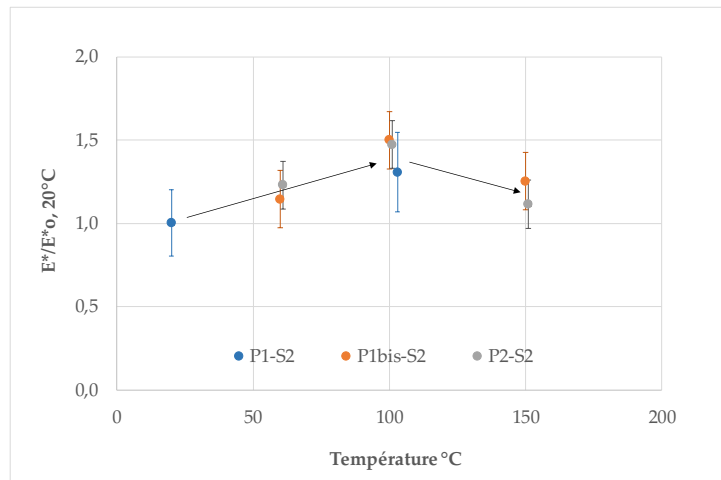


FIGURE 8. Module d'Young à différentes températures (20-150°C) et différentes pertes de masse pour S2, pour le bois BLC. Module d'Young E^* normalisé par rapport au module d'Young E^*_o à 20°C.

- Conclusions

D'après les résultats obtenus avec les différents protocoles, la température et la teneur en eau ont un effet opposé sur les propriétés mécaniques. La diminution de la teneur en eau entraîne une augmentation des propriétés mécaniques, alors que l'augmentation de la température induit une baisse de ces propriétés. Cela est due à des dégradations des éprouvettes à des températures élevées (fissures, dégradation de la colle), dégradations thermiques (dégradation de la lignine) à 150°C et finalement la taille des échantillons (effet d'échelle).

IV. CONCLUSTIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis d'évaluer les propriétés mécaniques (résistances et modules d'Young) d'une part en fonction de l'humidité du bois sur du bois clair (i.e. sans défauts) à température ambiante et d'autre part en fonction de la température avec du bois lamellé-collé pour différentes teneurs en eau. Les résultats de cette étude ont montré que l'augmentation de la température et la diminution de la teneur en eau ont un effet opposé sur la résistance et la rigidité du bois (module d'Young).

Par rapport à la problématique du comportement mécanique d'éléments en bois soumis à des incendies et pour les sections non carbonisées, il est nécessaire de préciser les propriétés avec des teneurs en eau plus élevées. Pour ce faire, des essais à différentes teneurs en eau et jusqu'à des températures proches de 100°C seront réalisés sur des échantillons de section S1 (sur lamellé-collé Epicéa, essais similaires réalisés sur les section S0 avec du bois de Sapin). Par ailleurs, des essais sur les sections S1 et S2 et S3 (200x200x400 mm³) seront effectués avec des durées croissantes d'étuvage (de 15 min jusqu'à 60min). L'objectif de ces essais est de pouvoir proposer une loi de dépendance des propriétés mécaniques (résistance et module d'Young) en fonction de la température et de la teneur en eau du bois.

Enfin, des essais au feu seront réalisés sur des poutres dans différentes conditions. Ce travail permettra de proposer des pistes sur l'implémentation des propriétés thermo-hygro-mécaniques dans des modèles de calcul couplés thermo-hygro-mécanique qui pourront être validés avec les essais au feu sur les poutres.

REFERENCES

Ehrhart, T., Steiger, R., & Frangi, A. (2021). Influence of the moisture content on the compressive strength and modulus of elasticity parallel to the grain of engineered hardwood products (EHP). In R. Görlacher (Ed.), *54th meeting of the International Network on Timber Engineering Research (INTER 2021)* (pp. 299-314). Timber Scientific Publishing. <https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa:27618>

Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois. *NF EN 1995-1-1,2*. (2005)

Figueroa, M., Moraes, P., Maestri, F., (2014). Temperature and moisture content effects on compressive strength parallel to the grain of paricá. *Ambiente Construido, Porto Alegre, Brazil*

Gerhards, C. C., (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : Analysis of immediate effects. *Wood Fiber 14 (1) : 4-36*

Guitard, D., El Amri, F., (1987a) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 44 (3), pp.335-358. hal-00882421*

Guitard, D., (1987b). Mécanique du matériau bois et composites. Cépaduès.

Heger, F., Navi, P., (2005). Comportement thermo-hydrromécanique du bois "Applications technologiques et dans les structures". *EPFL Press*

Norme Française, NF X 15-119, Juillet (1999). Mesure de l'humidité de l'air, Générateurs d'air humide à solutions salines pour étalonnage des hygromètres

Rapport d'essais n° EEM/EA2R 20 26087828. *CSTB, Etude de la résistance en compression en fonction de la température du matériau bois – épiceá, (2020), France*

Rousset, P., Turner, I., 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. *INRA, EDP Sciences, 2006*.

Schaffer, E. L., (1973) : Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. *J. Test. Eval. 1(4) : 319-329*

Schaffer, E. L., (1977) : State of structural timber fire endurance. *Wood Fiber 9 :145-170*

Tropix, Fiches d'essence Sapin et Epicéa – Tropix 7 - Cirad

White R. H., (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science. 19(4) : 446-452*

Wood Handbook, wood as an engineering material, *The Laboratory N°72, Department of*