

Participation du LMGC au projet PEPS « FuturVieuxBois » du CNRS : Analyse comparative du comportement hygromécanique du bois de Chêne issu de la charpente médiévale et contemporaine de Notre-Dame de Paris.

MARTINET Camille¹, BARDET Sandrine², MONTERO Cédric²

¹Master Sciences du Bois, Faculté des Sciences, Université de Montpellier

²LMGC, Université de Montpellier, CNRS

camille.martinet01@etu.umontpellier.fr

Mots clés : Chêne ; Notre-Dame de Paris ; vieillissement naturel ; propriétés viscoélastiques ; fluage ; hygroscopie ; réutilisation

Contexte et objectif

Le projet CNRS PEPS « FuturVieuxBois » porte sur la caractérisation de la longévité du vieux bois. Il s'intéresse aux effets du vieillissement naturel ou artificiel dans les usages structurels du matériau. Il rassemble sept partenaires académiques en France, en Italie et au Japon. Le LMGC à Montpellier a pour objectif de comparer les propriétés hygroscopiques et mécanique de l'ancien Chêne carbonisé de la charpente de Notre-Dame de Paris à celles du Chêne récent, utilisé lors de sa reconstruction. Le vieillissement des bois peut notamment altérer leur stabilité dimensionnelle (Kránitz et al 2016), leur résistance et comportement différé (Noguchi et al 2012). Trois hypothèses sont émises dans cette étude : (a) le bois ancien est plus stable hygroscopiquement que le bois récent ; (b) le bois ancien présente des propriétés élastiques (MOE longitudinal notamment) plus élevées que le bois récent ; (c) le bois ancien a un comportement différé différent de celui du bois récent.

Matériel et méthode

Matériel d'étude

Du Chêne carbonisé de l'ancienne charpente de la cathédrale a été collecté par l'Institut Pascal et la charpente a été reconstruite à l'identique à partir de Chêne récent français (Epaud, 2019). Huit morceaux de Chêne ancien carbonisés ont été confiés au LMGC. La majorité ont pour siècle d'abattage le XII^{ème} siècle. Quatre morceaux de Chêne récent ont également été récupérés dans les chutes du chantier.

Usinage

L'usinage des échantillons est réfléchi en fonction des différents essais prévus. L'objectif est de réaliser, dans chaque morceau de Chêne ancien, trois types d'échantillons correspondant aux essais principaux de l'étude : mesure de l'impact du feu (tranche de la section haute ; $e = 30$ mm), mesure des propriétés hygroscopiques (pavés ; $R=20 \times T=20 \times L=10$ mm³), mesure des propriétés vibratoires et mesure du comportement de fluage (barrettes ; $T=2,5 \times R=12 \times L=150$ mm³). Chaque échantillon est numéroté avec précision de manière à retrouver sa position initiale exacte dans le morceau fourni. Deux morceaux de Chêne récent sont utilisés pour l'usinage de barrettes. Les deux autres servent à l'usinage des pavés. L'usinage permet de réaliser 161 barrettes (115 d'ancien et 46 de récent), ainsi que 132 pavés (97 d'ancien et 35 de récent). Dans un 1^{er} temps, seuls les échantillons présentant un angle de fil inférieur à 1° sont sélectionnés.

Expérimentation

a. Mesure des propriétés hygroscopiques – Retrait-gonflement

Le principe de l'essai de retrait-gonflement est de mesurer les variations dimensionnelles d'un échantillon à différentes humidités relatives afin de déterminer les coefficients de retrait (radial R_R , tangentiel R_T , longitudinal R_L et surfacique RS) et le point de saturation des fibres (PSF). Les dimensions sont mesurées avec un comparateur digital Miyutoyo à $\pm 1 \mu\text{m}$ dans une pièce dont la température variait entre 22 et 24°C. Les états étudiés sont : intermédiaire (HR 55 %), humide (stockage à $T=5^\circ\text{C}$, HR = 99 %), saturé (stockage à $T=5^\circ\text{C}$ en immersion dans de l'eau déminéralisée) et anhydre (103°C pendant 24h).

b. Mesure des propriétés vibratoires – Vybris

La mesure des propriétés vibratoires consiste à imposer des vibrations forcées à l'échantillon par l'interaction d'un électroaimant et d'une pastille métallique, ici en ambiance contrôlée ($T^\circ = 20^\circ\text{C}$ et HR = 85%) (Brémaud et al 2012, Hsieh 2022). Ce montage permet de déterminer le module spécifique longitudinal E/d et le coefficient d'amortissement $\tan \delta$.

c. Appariement des échantillons

Des paires constituées d'un échantillon de Chêne ancien et d'un récent sont formées à partir des propriétés mesurées. Les éprouvettes sont appariées en fonction de leur proximité de module spécifique longitudinal E/d et de densité. Cette étape permet d'isoler l'effet du vieillissement sur les propriétés viscoélastiques tout en supprimant les effets de premier ordre (densité, E/d , angle de fil). La première série comprend cinq paires de barrettes éloignées des zones carbonisées et présentant moins de 10 % de variation en densité, moins de 1 % en E/d .

Mesure du comportement de fluage – Fluage 4 points

Un essai de fluage a été réalisé en flexion 4 points pour mesurer la déformation au cours du temps d'un échantillon sous l'effet d'une charge constante ($m = 650 \text{ g} \leftrightarrow \sigma = 15,3 \text{ MPa}$) afin de déterminer sa complaisance J ($J = \varepsilon(t)/\sigma$) en ambiance contrôlée ($T^\circ = 20^\circ\text{C}$ et HR = 85 %). Les mesures sont réalisées toutes les 15 secondes pendant 10 jours (Hsieh, 2022).

Résultats

Propriétés hygroscopiques

Pour les deux Chênes, les retraits surfaciques RS sont calculés et les niveaux de saturation (PSF) sont estimés (Fig. 1).

Le bois récent présente globalement des valeurs de RS plus élevées (15 à 20 %) avec des largeurs de cernes étroites (1,4 à 2,4 mm). Le bois ancien présente des valeurs de RS plus faibles (autour de 10 %) avec une grande disparité de largeur de cernes (1,2 à 4,3 mm). Quelques échantillons anciens possèdent des valeurs de retrait élevées (20 %).

Le PSF est calculé à partir d'une régression linéaire entre les 3 valeurs de RS et la teneur en eau, la dispersion des PSF est donc similaire à celle du retrait. Les échantillons de Chêne récent présentent en moyenne des PSF plus élevés (34 %) que le Chêne ancien (24 %). Certains échantillons anciens ont des PSF importants (40-45 %), correspondant aux échantillons qui présentent des retraits surfaciques élevées.

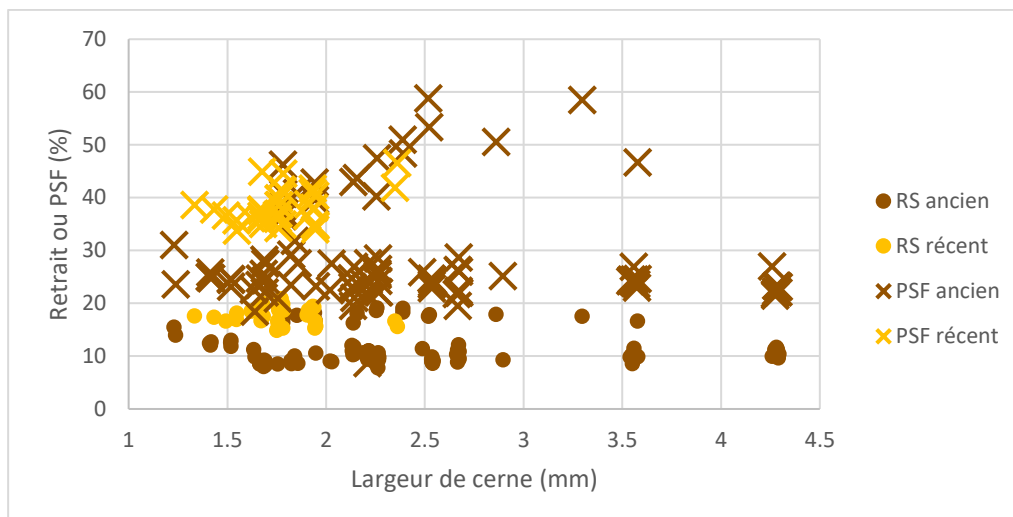


Fig. 1 : Évolution du RS et du PSF en fonction de la largeur de cernes des deux Chênes

Propriétés vibratoires

Le E/d de chaque échantillon est déterminé à partir des mesures vibratoires (Fig. 2). Son évolution est observée en fonction de la densité (Fig. 3).

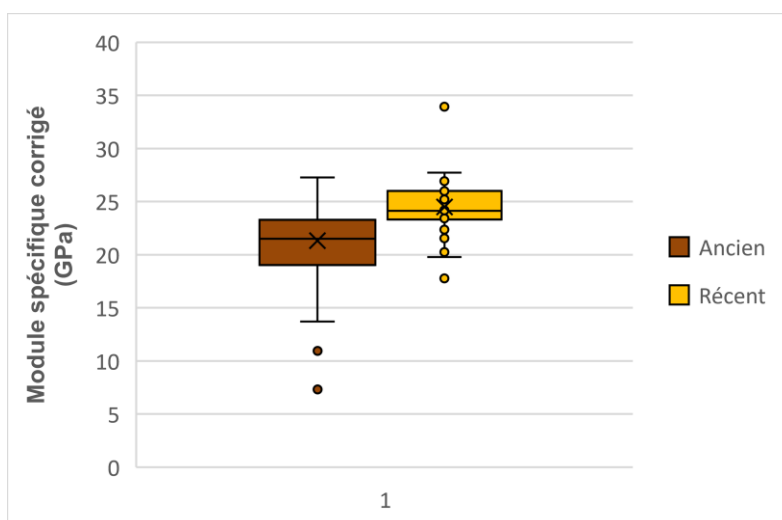


Fig. 2 : Distribution du E/d des deux lots de Chênes

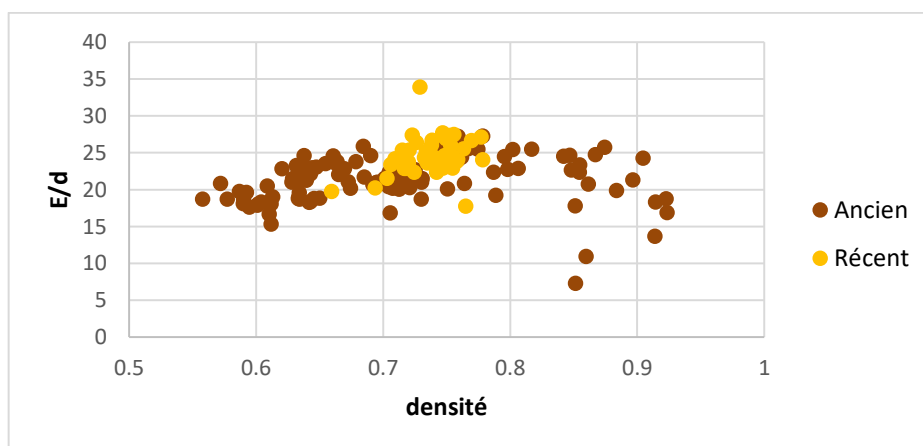


Fig. 3 : Évolution du E/d en fonction de la densité des deux lots de Chênes

Le Chêne ancien présente un E/d plus faible et plus dispersé avec une moyenne à 22 GPa. Le Chêne récent montre des valeurs plus élevées et plus homogènes avec une moyenne de 24 GPa. Les éprouvettes de Chêne récent présentent une répartition de la densité concentrée, de 0,70 à 0,78. La plage recouverte par celles de l'ancien Chêne est plus étendue, de 0,60 à 0,87.

Comportement différé

L'essai de fluage permet d'obtenir l'évolution du différentiel de complaisance ΔJ ($\Delta J = J_t - J_{1\text{min}}$) au cours du temps de la première série d'échantillon (Fig. 4).

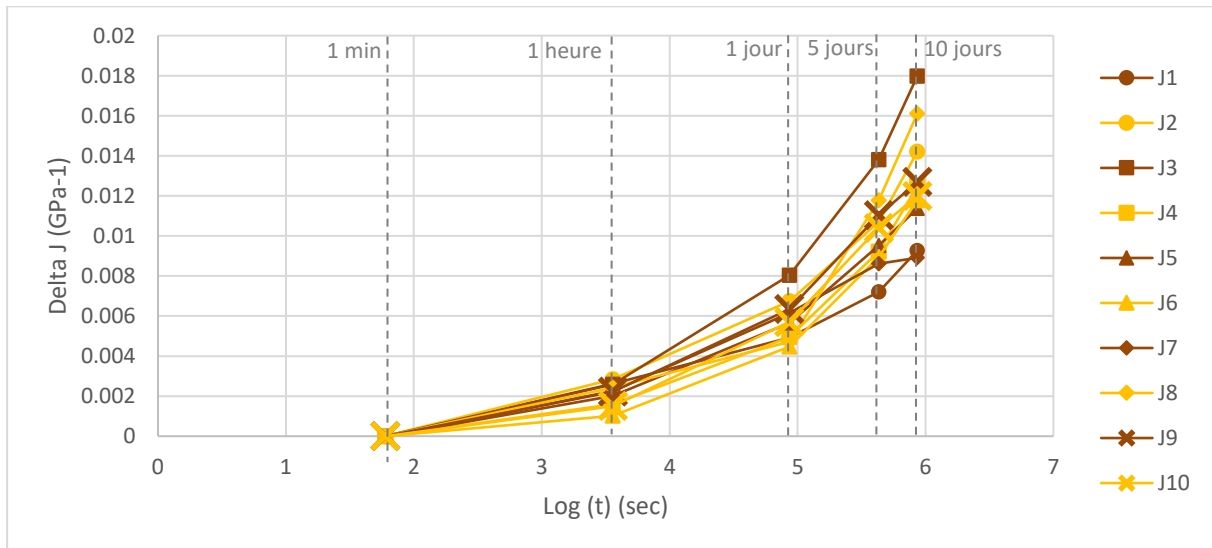


Fig. 4 : Évolution du ΔJ en fonction du temps des 5 paires

La complaisance augmente au cours du temps après chargement. Les échantillons anciens et récents présentent une similitude de comportement. La comparaison par paire ne permet pas d'identifier une tendance nette pour les deux lots de Chênes.

Discussion

Propriétés hygroscopiques

Les valeurs de RS et de PSF plus élevées du bois récent traduisent une plus forte sensibilité à l'humidité. Les fortes valeurs de certains échantillons anciens est expliquée par la variabilité de leur largeur de cernes, liant fortement la largeur de cerne aux propriétés hygroscopiques. Les valeurs de RS du bois ancien montrent la présence de 2 lots ($RS > 15\%$ et $RS < 13\%$), suggérant la présence de 2 essences : Chêne sessile et Chêne pédonculé, une analyse anatomique est en cours. Le Chêne ancien est plus stable hygroscopiquement que le récent, confirmant l'hypothèse (a).

Propriétés vibratoires

Le E/d des échantillons anciens est plus faible (22 GPa) que celui des échantillons récents (24 GPa). L'ancien Chêne semble moins rigide que le Chêne récent. Les mesures des propriétés vibratoires tendent donc à contredire l'hypothèse (b) supposant que l'ancien Chêne présente des propriétés mécaniques longitudinales (E) plus élevées que le Chêne récent. Les éprouvettes de Chêne récent présentent des valeurs de densité homogènes. Celles de l'ancien Chêne montrent une hétérogénéité, pouvant être expliquée par la variabilité structurelle des échantillons, ou bien un endommagement mécanique ? Cette variabilité affecte également le E/d, jeu de données plus dispersé pour le vieux bois.

Comportement de fluage

Les résultats obtenus lors de la première série de fluage montrent une augmentation globale de J au cours du temps. Le comportement élastique du Chêne ancien ne semble pas différent de celui du Chêne récent. Il n'y a pas de tendance identifiée dans le comportement de l'ancien Chêne par rapport à celui du Chêne récent. Les résultats d'une série ne permettent pas d'affirmer un effet du vieillissement sur la viscoélasticité du bois. Ce résultat ne confirme pas l'hypothèse (c) et suggère que le bois ancien a un comportement viscoélastique identique à celui du bois récent.

Conclusion et perspectives

L'étude met en évidence la meilleure stabilité hygroscopique du Chêne ancien tout en soulignant le fort effet des largeurs de cernes sur le RS et PSF. Le module spécifique du bois ancien est inférieur à celui du bois récent, suggérant un comportement moins élastique. Enfin, les essais de fluage ne révèlent pas de différence significative entre bois ancien et récent, ne permettant pas de conclure à un effet du vieillissement sur la viscoélasticité. Il est donc nécessaire d'augmenter l'échantillonnage, notamment en Chêne récent ainsi que de poursuivre les séries de fluage et les essais mécaniques complémentaires.

Remerciements

Ce projet est financé par CNRS Ingénierie dans le cadre d'un programme PEPS – Projet Exploratoire et Premier Soutien.

Nous remercions les partenaires de BIOWOOEB (CIRAD) et du L2C (Université de Montpellier) qui ont contribué aux analyses.

Références

Brémaud I, El Kaïm Y, Guibal D, Minato K, Thibaut B, Gril J (2012) Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science*, 69(3), 373–386. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0166-z>

Hsieh T (2022) Structure/properties relationships of time - dependent behavior of wood - from understanding mechanisms to determining predictive indicators (Thèse de doctorat, Université de Montpellier).

Kránitz K, Sonderegger W, Bues C-T, Niemz P (2016) Effects of aging on wood : A literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), 7-22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>

Noguchi T, Obataya E, Ando K (2012) Effects of aging on the vibrational properties of wood. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3), S21-S25. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.008>