

Effet du vieillissement naturel sur les propriétés physicomécaniques du bois de chêne de la cathédrale Notre Dame de Paris

BOURCHANIN Matteo^{1,2}, NOUEMSI SOUBGUI Epiphane^{3,4}, MATSUO-UEDA Miyuki^{2,5},
SAUVAT Nicolas¹, GUIBAL Daniel⁶, MOUTOU PITTI Rostand^{1,7}, GRIL Joseph^{1,8}

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal,
Clermont-Ferrand

²RISH, Kyoto University, Japan

³Local Mat. Promotion Authority/MIPROMALO/MINRESI, Nkolbikok, Yaoundé, Cameroun

⁴Laboratory Engineering Civil and Mechanics, National Advanced School of Engineering,
Université de Yaoundé, Cameroun

⁵Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan

⁶UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier

⁷CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon

⁸Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand

nouemsisepiphane@gmail.com

Mots clés : Chêne ; Vieillissement ; Appariement ; Comportement mécanique ;
Hygroscopicité ; Réutilisation.

Contexte et objectifs

La connaissance des propriétés du vieux bois est nécessaire à la prise de décision des ingénieurs confrontés au remplacement d'éléments de structure issus de la déconstruction de bâtiments anciens ou à l'entretien d'un monument historique. Des recherches menées au Japon à partir de bois récupérés de bâtiments traditionnels (Kohara 1958) ont mis en évidence un certain nombre de tendances dans l'effet du vieillissement naturel : dégradation des polysaccharides, noircissement (Matsuo et al 2011), peu d'effet sur la rigidité voire la résistance, diminution de l'énergie de rupture, notamment dans le sens transversal au fil (Yokoyama et al 2009). De telles recherches se heurtent à deux difficultés majeures : l'obtention d'échantillons bien identifiés de vieux bois et la variabilité intrinsèque du matériau. Le vieillissement dont il est ici question est l'oxydation lente en volume, indépendamment de l'effet supplémentaire de la dégradation de surface (altération) ou des dommages induits par des actions mécaniques ou hygromécaniques.

L'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris (NDP) fut une catastrophe qui a néanmoins permis de nombreuses avancées scientifiques. Notamment, les vestiges de la charpente, étudiés et datés avec l'ANR Casimodo, constituent un stock important de bois de chêne datant du XIIe au XIXe siècle et offrant une opportunité rare d'étudier les propriétés de vieillissement du bois. Dans le cas du bois de NDP, il faut également considérer l'effet du feu, qui se traduit par la présence d'une enveloppe de bois carbonisé autour des restes de poutres, et, sous cette enveloppe, de bois « torréfié » modifié par la chaleur en plus de l'âge.

Le projet en cours, financé par le CNRS, vise à caractériser l'évolution des propriétés physicomécaniques du bois de chêne. Piloté par l'Institut Pascal (France), il implique également des partenaires en France, au Japon et en Italie. Des échantillons de poutres référencées NDP ont été découpés et répartis entre les différentes équipes. Les résultats présentés ici ont été obtenus préalablement lors du stage de master de Bourchanin (2023), dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Pascal et l'Université de Kyoto.

Matériel et méthodes

Deux lots, a et b, des échantillons de bois du XXI^e siècle ainsi que des échantillons des XII^e, XIII^e, XIX^e, XXI^e siècles ont été utilisés, obtenus à partir de restes de poutres préalablement datées (Fig. 1) par dendrochronologie dans le cadre de l'ANR Casimodo (Penagos et al 2024). Les poutres partiellement carbonisées présentent une géométrie très variable (Fig. 2). Après découpe de rondelles tirées des extrémités de chaque tronçon de poutre, des blocs ont été usinés dans le sens R, avec une épaisseur T de 35 mm et des longueurs L et R variables. Les échantillons nécessaires aux différentes campagnes expérimentales seront prélevés par les divers partenaires dans ces géométries, permettant le positionnement par rapport à la moelle à chaque fois que cela est possible. Dans le cas des résultats préliminaires présentés ici, des échantillons L de dimensions 120 (L) x 20 (R) x 5 (T) mm et des échantillons R de dimensions 70 (R) x 10 (T) x 4 (L) mm ont été produits à partir de tels blocs.

Après stabilisation à 65% RH, 20°C, la densité (d) et la largeur des cernes (RW) des échantillons L et R ont été mesurées, ainsi que les paramètres de couleur (CIELab) au moyen d'un spectrocolorimètre. Puis des essais de flexion 3 points ont été effectués jusqu'à rupture : à partir de la courbe reliant la contrainte et la déformation maximales, le module d'Young (MOE) et la contrainte de rupture (MOR) ont été obtenus, ainsi qu'une estimation de l'énergie surfacique de rupture (G) en divisant l'aire sous la courbe par la section de l'échantillon.

La couleur a également été mesurée au moyen d'un spectrocolorimètre sur la face transverse des rondelles, ainsi que sur quelques carottes de sondage prélevées dans la charpente de NDP avant l'incendie en vue d'études dendrochronologiques.



Fig.1 : Exemple de section disponible



Fig. 2 : Illustration du plan de coupe des pièces à géométrie variable

Premiers résultats

Pour les données de couleur telles que celles présentées dans la Fig. 3, la position est sans unité et correspond à l'ordre des mesures, espacées d'environ 5 mm ; cependant, la géométrie de l'échantillon rend parfois difficile la précision. Les profils de luminance (L^*) montrent que l'effet du feu est limité à la surface : s'il avait atteint par diffusion l'ensemble du volume, un profil parabolique aurait été observé. Les emplacements internes peuvent donc être qualifiés de bois « intacts ». Les difficultés de mise en correspondance sont illustrées dans la Fig. 4, qui

montre que, si les 2 lots de bois du XXI^e siècle choisis pour la comparaison sont proches des bois des XII^e et XIII^e siècles, les pièces du XIX^e siècle sont assez différentes. Les différences de valeurs de MOE, Fig. 5, semblent donc davantage influencées par l'anatomie que par le vieillissement.

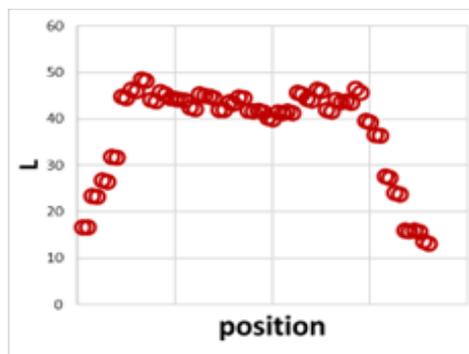


Fig. 3 : Luminance L* en fonction de la position

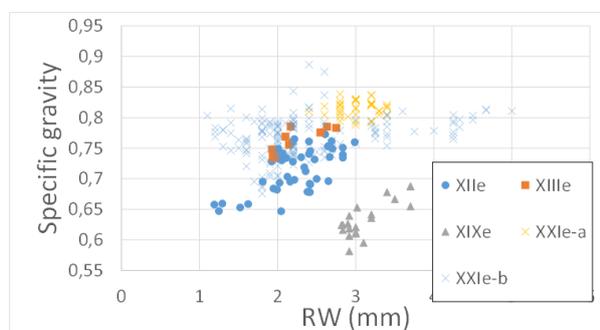


Fig. 4 : Relation entre la densité et la largeur des cernes en fonction de l'origine du bois

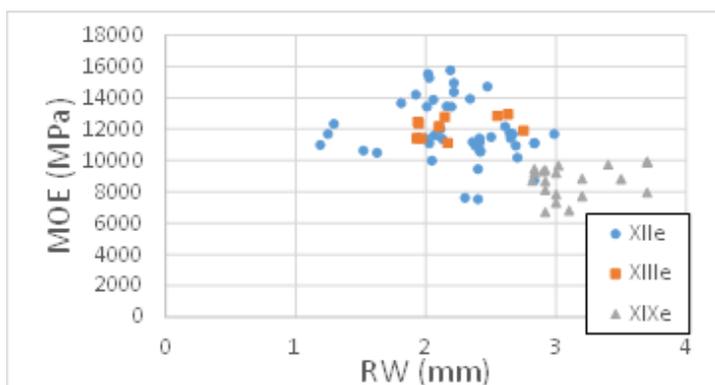


Fig. 5 : Relation entre le module d'élasticité et la largeur des cernes pour le bois ancien

Conclusion et perspectives.

Les résultats présentés ici visaient notamment à 1- consolider les techniques de rapprochement pour comparer les bois anciens et récents, 2- évaluer les propriétés élastiques instantanées, 3- déterminer le comportement hygroscopique, 4- estimer les effets du vieillissement sur la rupture et le comportement dépendant du temps. La profondeur de perturbation de l'incendie a été évaluée à l'aide d'une analyse de couleur. Des essais préliminaires de flexion 3 points réalisés sur un petit nombre d'échantillons du XII^e au XIX^e siècle ont mis en évidence la variabilité considérable de ce matériau et la nécessité de gérer un échantillon diversifié pour parvenir à des conclusions fiables. Les premiers essais permettent d'isoler les parties endommagées par le feu, afin de se concentrer sur le vieillissement naturel. Comparer les propriétés sur des échelles de temps aussi larges revient à faire correspondre l'anatomie d'échantillons de différentes époques. Les résultats futurs fourniront des informations sur le comportement hygroscopique et mécanique de ces bois. La diminution éventuelle de la teneur en eau d'équilibre résultant de la perte attendue d'hémicelluloses devrait également être étudiée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNRS via le projet PEPS FuturVieuxBois, la Région AuRA et le Massif Central (fonds FNADT et FEDER) via le projet SAPIMAC pour leur soutien, le Summer Program de la JSPS pour la recherche menée au Japon, et les participants à l'ANR Casimodo (Olivier Girardclos, Benoit Brossier...) pour la datation et l'obtention du bois.

Références

Bourchanin M (2023) Effect of time, heat and fire on the properties of oak, rapport de stage, Master Sciences du Bois, Univ. Montpellier.

Kohara J (1958) Study on the old timber, Research Report of Faculty of Technology, Chiba University, 9(15):1-55.

Matsuo M, Yokoyama M, Umemura K, Sugiyama J, Kawai S, Gril J, Kubodera S, Mitsutani T, Ozaki H, Sakamoto M, Imamura M (2011) Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment, *Holzforschung* 65(3):361-8.

Penagos C, Girardclos O, Hunot J-Y, Martin C, Jacquot K, Cao I, Lemoine M, Brossier B, Lavier C, Coubray S, Dufraisse A (2024) Naming, relocating and dating the woods of Notre-Dame “forest”, first results based on collated data and archaeological surveys of the remains, *Journal of Cultural Heritage*, 65:21–31.

Yokoyama M, Gril J, Matsuo M, Yano H, Sugiyama J, Clair B, Kubodera S, Mitsutani T, Sakamoto M, Ozaki H, Imamura M, Kawai S (2009) Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *Comptes Rendus Physique*, 10(7):601-611.