

Comportement mécanique des éléments structuraux en bois des bâtiments patrimoniaux

Anselme Baudouin Hade^{1,2}, Pierre Teissier², Joseph Gril^{1,3}, Nicolas Sauvat¹,
Alaa Chateaufneuf⁴, Rostand Moutou Pitti^{1,5}

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-6300 Clermont-Ferrand, France

² DMI-PROVENCE, [13120](#) Gardanne, France

³ Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF Pascal, F-6300 Clermont-Ferrand, France

⁴ CIDECO, 63001 Clermont-Ferrand, France

⁵ CENAREST, IRT, Libreville, Gabon

anselme_baudouin.hade@etu.uca.fr

rostand.moutou_pitti@uca.fr

Mots clefs : réutilisation, économie circulaire, structures en bois patrimoniaux, puits de carbone

Contexte et objectifs

Les structures anciennes en bois représentent une part du patrimoine culturel de l'humanité et leur protection est un enjeu prioritaire pour de nombreux pays (Tévi 2024). Dans le sud de l'Europe, notamment en France où le nombre de monuments historiques est particulièrement élevé, la conservation du patrimoine architectural et historique constitue un enjeu de taille (André 2003). Conscients de cet enjeu, les pouvoirs publics renforcent leur engagement : dans le budget 2024 du ministère français de la culture, les crédits alloués à la préservation des monuments historiques progressent de 40 millions d'euros pour atteindre 507 millions (Budget 2024 du ministère de la culture, 2023). Cependant, la préservation de ces structures, et notamment des éléments en bois, soulève de nombreux défis qui dépassent largement les seules questions budgétaires. Par exemple, le remplacement des éléments détériorés peut s'avérer inacceptable dans le cas des structures présentant une valeur historique importante (Ericsson *et al* 2017). De surcroît, il est très difficile de mener des recherches expérimentales sur le comportement mécanique des structures historiques traditionnelles en raison de la rareté et de la valeur historique des anciennes structures en bois (Huo *et al* 2010).

La variabilité des propriétés mécaniques du bois ancien s'explique principalement par les effets du temps et par l'historique des conditions environnementales et des charges (avant abattage comme après mise en œuvre), auxquels s'ajoutent la variabilité de matière du bois (hétérogénéité intrinsèque) et la présence de singularités ou défauts localisés. Bien que de nombreuses méthodes non destructives permettent d'évaluer certaines caractéristiques physiques des structures en bois, il reste difficile d'établir un lien fiable entre ces mesures et les propriétés mécaniques, en particulier la rigidité. C'est pourquoi les données issues de ces évaluations non destructives doivent être intégrées à des modèles probabilistes, afin de réaliser des analyses de propagation d'incertitudes (E55 2006).

Dans le cadre du projet de rénovation de la charpente en bois du presbytère de Saint-Véran, situé dans le département des Hautes-Alpes (05) et inscrit au titre des monuments historiques, une étude combinant méthodes expérimentales et méthode numérique a été menée afin de caractériser le comportement mécanique des éléments en bois de la structure. Les méthodes expérimentales comprennent un examen visuel ainsi que des essais non destructifs (END) *in situ* visant à estimer des paramètres clés tels que la masse volumique et le module d'élasticité longitudinale. La méthode numérique repose sur l'utilisation d'un algorithme de type Monte

Carlo pour analyser la propagation des incertitudes dans l'évaluation du module d'élasticité avec les essais non destructifs.

Matériel et méthode

La méthode de résistance au forage : Le Résistographe

Le Résistographe utilise une mèche de petit diamètre pour percer le bois avec une vitesse d'avancement et une vitesse de rotation données et mesure l'énergie nécessaire pour maintenir ces vitesses. Cette énergie est mesurée sous forme de pourcentage de celle déployée par le moteur de l'appareil et est désignée par résistance relative RA (Tévi 2024). L'intégration de la résistance relative sur la profondeur de pénétration h de la mèche permet d'obtenir une mesure de résistance moyenne à la pénétration (RM) du bois suivant la relation :

$$RM = \frac{1}{H} \int_0^H RA \cdot dh \quad (1)$$

Le Résistographe est calibré en déterminant une équation de corrélation entre RM et la masse volumique ρ_m (Fig. 1). Pour ce faire, cinq pièces de bois en mélèze, issues d'une scierie de Saint-Véran (Hautes-Alpes), ont été sélectionnées. Ce choix repose sur le fait que le mélèze est l'unique essence exploitée localement, garantissant ainsi l'homogénéité du matériau étudié. Le bois utilisé est neuf et a été conditionné à un taux d'humidité de 12 %. Afin de disposer d'un étalonnage couvrant différentes densités, plusieurs pièces de mélèze ont été pesées à l'aide d'une balance de précision. Cinq d'entre elles, présentant des masses volumiques distinctes comprises entre 390 et 710 kg/m³, ont été retenues. Chaque pièce (120 × 200 mm, L = 500 mm) a été quadrillée sur la face 200 × 500 mm avec un pas de 90 mm (selon la longueur de 500 mm) × 37 mm (selon la hauteur de 200 mm), soit un total de 30 points de mesure plus un point central, pour permettre la réalisation des essais au Résistographe. Pour chaque pièce, la moyenne des résistances RM a été calculée (Eq. 1) puis utilisée pour établir la corrélation avec la ρ_m . Ce choix méthodologique vise à représenter au mieux la tendance centrale des mesures et à limiter les biais d'estimation, qu'ils soient par excès ou par défaut.

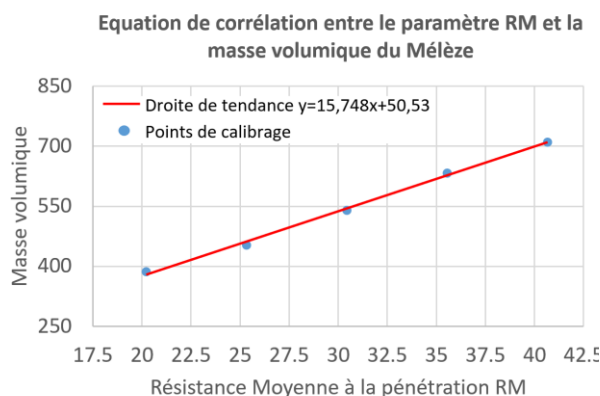


Fig. 1 : Corrélation empirique entre le paramètre RM et la masse volumique du mélèze

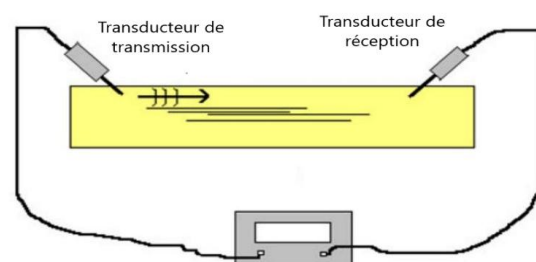


Fig. 2 : Principe de la méthode de propagation des ondes élastiques (Bohumil Kasal, 2010)

La méthode des ondes élastiques : Le Pundit

La méthode de propagation des ondes élastiques, utilisée dans les contrôles non destructifs, repose sur la mesure de la vitesse de propagation de ces ondes à travers le matériau. Le Pundit est un appareil équipé de deux transducteurs (l'un pour l'émission et l'autre pour la réception) permettant de mesurer cette vitesse dans le bois. Le transducteur émetteur génère une onde élastique, qui traverse le matériau et est captée par le transducteur récepteur placé à une distance

connue. Le Pundit enregistre le signal reçu et mesure le temps de propagation de l'onde entre les deux transducteurs pour estimer la vitesse (Fig. 2).

Propagation des incertitudes dans l'évaluation du module d'élasticité : Simulation de Monte Carlo

Le module dynamique E_d est évalué à partir de la vitesse de propagation des ondes V et de la masse volumique ρ :

$$E_d = V^2 \rho \quad (2)$$

tandis que le module statique E_s est déterminé selon Tévi (2024) :

$$E_s = E_d / 1,36 \quad (3)$$

En remplaçant dans (2) ρ par l'expression de corrélation avec RM, et en injectant le résultat dans (3), on obtient :

$$E_s = (11,579RM + 37,15)V^2 \quad (4)$$

Cinq mesures de V et de RM ont été effectuées par élément de structure. Afin de déterminer la propagation des incertitudes dans le calcul du module d'élasticité statique, ces variables sont supposées suivre une loi normale, dont les paramètres (moyenne et écart type) ont été estimés à partir des cinq mesures initiales. Sur cette base, une simulation de Monte Carlo est réalisée générant 1001 paires aléatoires de valeurs V et RM, conformes aux distributions définies. Ces échantillons simulés ont ensuite été utilisés pour calculer une distribution du module d'élasticité statique.

Résultats et discussion

La méthodologie employée pour la détermination de E_s , fondée sur des essais non destructifs réalisés *in situ*, s'est révélée globalement fiable pour les éléments de structure constituant la charpente en bois du presbytère de Saint-Véran. Les mesures effectuées indiquent que les éléments de cette charpente présentent un module moyen de 8,90 GPa, avec un intervalle de confiance compris entre 6,95 et 10,92 GPa, soit une dispersion de 1,99 GPa (Fig. 3).

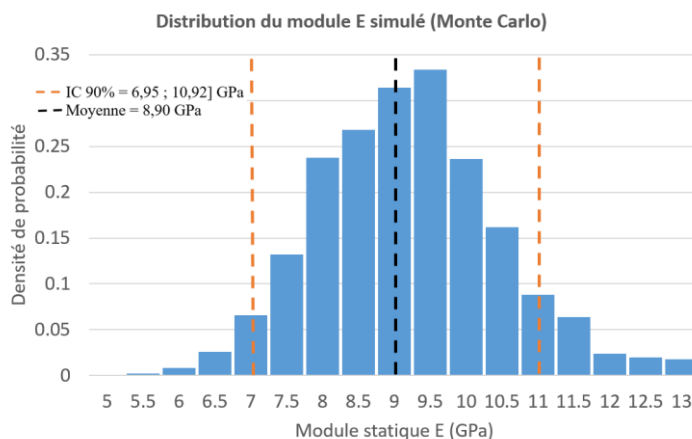


Fig. 3 : Distribution du module d'élasticité statique longitudinale des éléments de structure bois appartenant à la charpente du presbytère de Saint-Véran

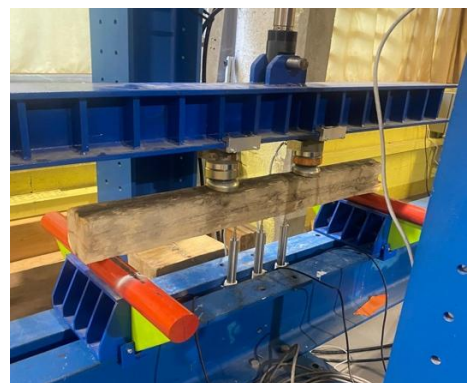


Fig. 4 : Dispositif expérimental pour mesurer le module d'élasticité en flexion statique

Afin de valider la fiabilité des résultats obtenus, un élément de structure en bois provenant de la charpente (retrouvé parmi les gravats) a été soumis à un essai de flexion en quatre points

(Fig. 4). L'objectif était de déterminer son module d'élasticité statique en flexion et de le comparer aux valeurs estimées par les méthodes non destructives. Le module d'élasticité longitudinal mesuré lors de cet essai s'élève à 8,52 GPa, une valeur très proche de la médiane de la distribution obtenue par simulation. Cette bonne concordance entre les résultats des approches destructives et non destructives confirme la fiabilité des méthodes non destructives, qui s'imposent ainsi comme une alternative, notamment lorsque le prélèvement d'échantillons est techniquement complexe ou incompatible avec la conservation du patrimoine.

Conclusion

Les résultats mettent en évidence le potentiel des méthodes non destructives comme outil complémentaire pour évaluer le module d'élasticité des structures en bois patrimoniales ; la fiabilité des résultats sera éprouvée au moyen d'une campagne étendue, comparant la variabilité observée du bois ancien à celle simulée par Monte Carlo. Grâce à l'association du Résistographe et de la mesure de la vitesse de propagation des ondes élastiques, il a été possible d'estimer le module d'élasticité longitudinal statique en intégrant les incertitudes expérimentales via une approche de type Monte Carlo. La confrontation avec les résultats d'essais destructifs en flexion quatre points a permis de valider la méthode, notamment pour l'échantillon 2, dont le module d'élasticité statique se situe dans l'intervalle de confiance issu des simulations. Cette convergence confirme la pertinence des approches non destructives pour le diagnostic mécanique des éléments anciens, tout en préservant leur intégrité.

Références

- AFNOR (1995) EN 408 : Bois de structure – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, Association Française de Normalisation, Paris, 146 p.
- André N (2003) Méthodologie d'analyse mécanique des structures bois du patrimoine : application à la réhabilitation d'un beffroi, 111 p.
- Ericsson K, et al (2017) Non-destructive testing of the historic timber roof structures of the National Museum in Stockholm, Sweden, *Int J Herit Archit Stud Repairs Maint*, 2(2) :218–229.
- Huo J, Liu HQ, Wang LW, Xiao B (2010) FE-based strength analysis of Penglai Pavilion, 11th World Conf Timber Eng (WCTE), 3:2151–2154.
- E55 C (2006) Assessment of timber structures, 9th World Conf Timber Eng (WCTE), 2:1462–1469.
- Kasal B, Tannert T (2010) In situ assessment of structural timber: State of the art report of the RILEM Technical Committee 215-AST, RILEM of the Art Reports, Springer, Dordrecht, 215 p.
- Presse DDE (2023) Budget 2024 du ministère de la Culture, 77 p.
- Tevi KR (2024) Méthodologie d'évaluation de la santé structurale d'une structure bois du patrimoine : étude de la halle de Villeréal, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 333 p.