

Caractérisation mécanique de panneaux CLT par méthode non destructive

BRANCHERIAU Loïc¹, FAIRCLOTH Adam^{2,3}, KARAMPOUR Hassan³,
KUMAR Chandan^{2,4}

¹CIRAD, UPR BioWooEB, Univ. Montpellier, Montpellier, France

²Department of Agriculture and Fisheries, QLD Government, Brisbane, QLD, Australia

³School of Engineering and Built Environment, Griffith University, QLD, Australia

⁴School of Engineering, University of Southern Queensland, Springfield, QLD, Australia

loic.brancheriau@cirad.fr

Mots clefs : panneaux CLT ; évaluation non destructive ; propriétés élastiques ; vibrations acoustiques

Contexte et objectifs

Les produits en bois d'ingénierie sont de plus en plus répandus dans l'industrie de la construction en raison de leurs excellentes performances sismiques, de leurs avantages en matière de préfabrication, de leur installation plus rapide sur site, de leur rôle de puits de carbone naturel, de la réduction des coûts de construction et de l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et de ses performances thermiques (Wang et al. 2018, McGavin et al. 2020). La conception des panneaux CLT nécessite la prise en compte de facteurs spécifiques dus à la nature du matériau bois (Brandner 2013, Kremer et Symmons 2018). Ross (2015) a présenté une revue des techniques d'évaluation non-destructive (END) utilisées dans le monde, dont la majorité concerne l'évaluation des poutres, des grumes et des arbres sur pied. Parmi ces techniques, les systèmes actuels d'END acoustique utilisent l'analyse vibroacoustique des signaux produits par impulsion (Brancheriau et Bailleres 2002). Il a été prouvé que l'END acoustique permettait d'obtenir des caractérisations rapides et précises des propriétés élastiques pour toute une gamme de produits en bois. Plusieurs études (Brancheriau et Bailleres 2002, Bucar et Bucar 2011, Shirmohammadi et al. 2020) ont utilisé cette méthode pour déterminer les propriétés élastiques du matériau testé. Cependant, aucun système de ce type n'a été adopté par l'industrie pour le CLT, probablement en raison de la complexité de la mise en œuvre et de l'inversion de l'équation du mouvement pour des plaques épaisses orthotropes. Faircloth et al (2021) ont étudié quatre conditions aux limites pour un système d'essai non destructif en ligne adapté aux CLT. Parmi les conditions limites évaluées, la condition de libre appui sur tous les côtés était la plus appropriée pour des mesures rapides ; elle a de plus été considérée comme plus facilement transposable dans l'industrie. Une méthode d'END performante pour les fabricants de CLT permettrait de connaître les propriétés de chaque panneau classé individuellement. L'objectif de cette étude était d'étudier la faisabilité du développement d'un système d'END acoustique pour les panneaux CLT minces et épais par le biais d'un essai sur panneaux de taille industrielle, en vue d'une application en ligne d'un outil de caractérisation et de classement.

Matériel et méthode

Un ensemble de 28 panneaux CLT de dimensions latérales ($x = 3.0$ m ; $y = 2.4$ m majoritairement) avec 5 épaisseurs différentes ($z = 7,5$ cm ; $10,5$ cm ; $11,5$ cm ; $12,5$ cm ; $15,0$ cm) a été testé. Toutes les expériences ont été menées sur des panneaux fabriqués en Australie à partir de *Pinus radiata*. Ces panneaux sont considérés comme minces à modérément épais. Les panneaux sont dans un premier temps mis en vibrations libres par un choc à une extrémité. Les vibrations sont captées par un accéléromètre positionné à l'autre coin. La fréquence

d'échantillonnage était de 8 kHz avec une résolution de 0,156 Hz. Des essais statiques ont été réalisés dans un deuxième temps selon les normes EN-16351 et EN-408. Les modules d'élasticité E_x , E_y ont ainsi pu être déterminé, de même que le cisaillement roulant G_{xy} et les deux cisaillements transverses G_{xz} et G_{yz} .

La méthode des éléments finis a été utilisée pour modéliser le comportement dynamique d'une plaque orthotrope épaisse selon la théorie de Hencky-Mindlin. L'équilibre d'un élément de plaque sans forces extérieures peut être écrit comme suit (Brancheriau 2022) :

$$\frac{h^3}{12} \left(C_{11} \frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x^3} + (2G_{12} + C_{12}) \left(\frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial x^2 \partial y} \right) + C_{22} \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial y^3} \right) - \rho \frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x \partial t^2} + \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial y \partial t^2} \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1) \quad (1)$$

Avec x , y , z les coordonnées spatiales (associées aux indices 1, 2, 3 respectivement), t est le temps, h est l'épaisseur du panneau, ρ est la densité du panneau, θ_x et θ_y sont les angles de rotation de la section transversale (associés aux moments de flexion), w est le déplacement, les C_{ij} sont les coefficients de la matrice de rigidité, et les G_{ij} sont les modules de cisaillement (avec $G_{12} = C_{33}$). Le développement théorique complet est en accès libre dans le Dataverse du Cirad (Brancheriau 2022). Un code spécifique a été développé avec GNU Octave (le problème direct est en accès libre). Le type d'élément est rectangulaire (bien adapté à ce cas particulier et orienté le long des axes x et y) avec un polynôme du quatrième ordre pour approximer les déplacements nodaux. Connaissant les valeurs des dimensions, de la densité et des propriétés mécaniques, le modèle numérique permet de déterminer les fréquences de vibration du panneau. Trouver la solution du problème inverse revient à déterminer les 5 propriétés mécaniques à partir des fréquences expérimentales. Le critère suivant a été calculé afin de minimiser la différence entre les fréquences expérimentales et les fréquences calculées :

$$\delta = \sum_{k=1}^{N_f} \frac{|f_{exp k} - f_{comp k}|}{f_{exp k}} \quad (2)$$

Avec δ le critère, $f_{exp k}$ la fréquence expérimentale de rang k , et $f_{comp k}$ la fréquence calculée de rang k . Ce critère permet de prendre en compte les différences d'échelle entre les fréquences. Ce critère a été minimisé par une méthode d'optimisation adaptée de celle proposée par Nelder-Mead.

Résultats et discussion

Les résultats complets de cette étude sont en cours de publication. Le Tab. 1 présente les erreurs de calcul des propriétés mécaniques pour 5, 8 et 12 fréquences de résonance sélectionnées et des résolutions de 0,5 ; 1,0 et 1,5 Hz. Les résultats présentent une erreur modérée (de 7% à 11%) pour 5 fréquences de résonance sélectionnées quel que soit la résolution. Les résultats pour huit fréquences présentent une faible variation (erreur de 1%). L'analyse des erreurs sur l'ensemble des 5 propriétés mécaniques (E_x , E_y , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz}) déterminées par la procédure d'optimisation a montré que les résultats pour 12 fréquences choisies présentent des erreurs les plus faibles lorsque la résolution en fréquence $< 1,0$ Hz. D'une manière générale, lorsque le nombre de fréquences sélectionnées augmente, l'erreur sur les valeurs des propriétés mécaniques diminue. La redondance des informations expérimentales améliore la convergence et la précision de la solution du problème inverse. L'effet de la résolution en fréquence semble être moins important sur la précision que le nombre de fréquences à prendre en compte. Toutefois, on observe que l'erreur sur les propriétés mécaniques augmente à mesure que la résolution de fréquence (erreur en Hz) augmente.

La Fig. 1 présente la relation entre les propriétés mécaniques prédites et mesurées de E_x . La relation linéaire est statistiquement significative avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,77$. Pour toutes les cinq propriétés mécaniques (relations non montrées ici), les constantes des

régressions linéaires ne sont pas significatives à une exception près (figure 1). Un biais notable est observé pour E_x ; dans ce cas, pour des valeurs faibles de E_x , le test acoustique a sous-estimé la valeur de ce paramètre et pour des valeurs élevées, le module E_x a été surestimé. La valeur du module E_x était en moyenne plus élevée que celle de E_y et G_{xy} . Les fréquences associées à E_x sont donc élevées, la fréquence la plus faible étant observée pour G_{xy} puis pour E_y . Une explication possible du biais observé pour E_x serait l'effet du recouvrement des fréquences entre les harmoniques de torsion (G_{xy}) ou de flexion (E_y). La différence moyenne entre l'essai acoustique et statique était de 5 %, 8 % et 19 % pour les propriétés mécaniques E_x , E_y et G_{xy} respectivement.

Tab. 1 : Erreur relative des propriétés mécaniques calculées (ici E_x) induite par la résolution en fréquence et par le nombre de fréquences de résonance utilisées dans la procédure d'optimisation.

Nombre de fréquences	Résolution en fréquence (Hz)	E_x Erreur (%)
5	0,5	11
5	1,0	7
5	1,5	7
8	0,5	1
8	1,0	1
8	1,5	1
12	0,5	1
12	1,0	0
12	1,5	6

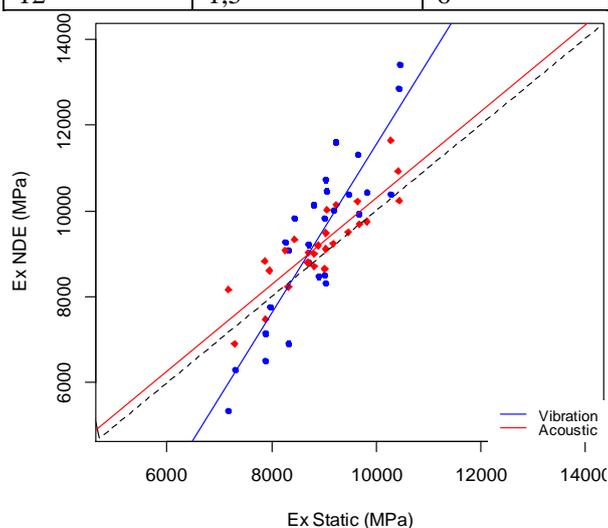


Fig. 1 : Comparaison entre essais acoustiques (en bleu) et statiques pour E_x .

En rouge, la comparaison entre des essais BING et statiques sur des découpes de panneaux (non discutée ici). $E_x \text{ NDE} = 1,97 E_x \text{ Static} - 8108$; $R^2 = 0,77$.

Conclusion

Cet article de synthèse présente le développement et l'évaluation d'un système de contrôle non destructif pour le classement en ligne des panneaux CLT. Dans le cadre de cette étude, plusieurs approches ont été présentées pour valider la méthode expérimentale et l'inversion du modèle numérique. La convergence du modèle dépendait fortement de l'identification correcte des fréquences de résonance pour les propriétés mécaniques recherchées. Le nombre des fréquences sélectionnées a également été étudié pour tester leur influence sur la précision de la convergence. L'analyse de sensibilité a montré que l'erreur de prédiction diminuait avec l'augmentation du nombre de fréquences sélectionnées. L'étape de validation par le biais

d'essais statiques a indiqué de fortes relations entre les valeurs statiques et vibratoires pour E_x , E_y et G_{xy} . La différence moyenne entre ces deux types d'essais était de 5 %, 8 % et 19 % pour les propriétés mécaniques E_x , E_y et G_{xy} respectivement. Les écarts mis en évidence ont montré qu'une identification correcte de la valeur et du rang des fréquences de résonance était nécessaire et que cette identification avait tendance à être moins efficace pour les modes supérieurs en raison de l'effet de recouvrement de ces modes. Pour les basses fréquences, c'est la résolution fréquentielle qui est un paramètre clef dans la convergence du modèle.

Remerciements

Les chercheurs remercient le Centre for Future Timber Structures (CFTS - IH150100030) et l'Australian Research Council (ARC) pour le financement de ce projet. Les auteurs souhaitent remercier la société XLam Australia Pty Ltd. pour son soutien et la fourniture du matériel qui ont permis de maintenir l'orientation et l'applicabilité de l'étude. Nous remercions le Dr. Henri Baillères pour sa contribution à l'étude et sa connaissance approfondie de l'industrie et des méthodes d'END.

Références

Brancheriau L. (2022) Acoustic vibration modelling of wooden thick orthotropic plates. CIRAD Dataverse, doi: <https://doi.org/10.18167/DVN1/2VOFIL>.

Brancheriau L., Baillères H. (2002) Natural Vibration Analysis of Clear Wooden Beams: A theoretical Review. *Wood Science and Technology*, vol. 36, pp. 347-365, doi: 10.1007/s00226-002-0143-7.

Brandner R. (2013) Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*, vol. 1.

Bucar D.G., Bucar B. (2011) Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood Research*, vol. 56, no. 1, pp. 67-76.

Faircloth A., Brancheriau L., Karampour H., So S., Baillères H., Kumar K. (2021) Experimental Modal Analysis of Appropriate Boundary Conditions for the Evaluation of Cross-Laminated Timber Panels for an In-line Approach. *Forest Products Journal*, vol. 71, no. 2, pp. 161-170, doi:10.13073/FPJ-D-20-00062.

Kremer P., Symmons M. (2018) Perceived Barriers to the Widespread Adoption of Mass Timber Construction: An Australian Construction Industry Case Study. *Mass Timber Construction Journal*, vol. 1, pp. 1-8.

McGavin R.L., Dakin T., Shanks J. (2020) Mass-timber Construction in Australia: Is CLT the only answer? *BioResources*, vol. 15(3), pp. 4642-4645.

Ross J.R. (2015) *Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition*. General technical report FPL-GTR-238, vol. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 169p.

Shirmohammadi M., Faircloth A., Redman A. (2020) Determining acoustic and mechanical properties of Australian native hardwood species for guitar fretboard production. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 78, pp. 1161-1171.

Wang J.Y., Stirling R., Paul I. Morris P.I., Taylor A., Lloyd J., Kirker G., Lebow S., Mankowski M., Barnes H.M., Morrell J.J. (2018) Durability of Mass Timber Structures: A review of the biological risks. *Wood and Fiber Science*, 50:110-127.