

Vérification et validation d'un modèle éléments finis pour l'étude vibratoire des structures bois multicouches assemblées par des tourillons

T.A. Bui^{1,2}, P. Lardeur³, M. Oudjene^{1,4}

¹ INRA LERMAB, Université de Lorraine, France, {tuan-anh.bui,marc.oudjene}@univ-lorraine.fr

² Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Hanoi, Vietnam

³ Roberval, Université de Technologie de Compiègne, Sorbonne Universités, France, pascal.lardeur@utc.fr

⁴ Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec

Résumé — Cet article présente une étude expérimentale et numérique concernant le comportement vibratoire des poutres bois multicouches assemblées par des tourillons en bois également. Des résultats expérimentaux, concernant des poutres constituées d'une seule couche ainsi que des poutres multicouches, sont présentés. Un modèle éléments finis, constitué d'éléments volumiques pour les couches de bois ainsi que pour les tourillons, est proposé. La méthodologie de Vérification et Validation est ensuite appliquée pour évaluer la performance de ce modèle éléments finis.

Mots clefs — éléments finis, vibration, structures bois, structure multicouche, matériau composite.

1. Introduction

De nos jours, les options respectueuses de l'environnement sont pleinement intégrées dans le processus de conception des produits et des structures et suscitent de plus en plus d'intérêt dans le contexte actuel du réchauffement de la planète. Même si le bois en tant que matériau naturel est plus compétitif d'un point de vue écologique et esthétique, la construction en bois présente certains inconvénients liés à l'utilisation de produits pétrochimiques, en particulier les colles, dans les structures bois multicouches. Dans ce contexte, un consortium regroupant des partenaires de six pays européens a été formé dans le cadre d'un projet de recherche commun financé par le programme Interreg Europe du Nord-Ouest, appelé "Adhesive Free Timber Building" (AFTB), visant à mettre au point une méthode d'assemblage plus respectueuse de l'environnement. Dans le cadre du projet AFTB, il a été proposé d'utiliser des tourillons en bois densifié comme élément d'assemblage afin de produire des structures bois multicouches sans colle.

La présente étude concerne le développement et l'évaluation d'un modèle éléments finis permettant de simuler le comportement vibratoire des poutres bois multicouches sans colle, assemblées à l'aide de tourillons en bois densifié.

2. État de l'art

L'utilisation de tourillons en bois densifié comme organe d'assemblage n'est pas nouvelle. Les tourillons en bois dur ont été utilisés avec succès pour l'assemblage de structures bois depuis des milliers d'années. Malheureusement, les tourillons en bois dur (non densifié) souffrent du fluage et d'une perte de rigidité au fil du temps. L'utilisation des tourillons en bois compressé pourrait résoudre ces problèmes puisque le bois compressé possède des propriétés mécaniques nettement supérieures en contrôlant sa densité et son taux d'humidité au cours du processus de fabrication [1].

Même si la compression (ou la densification) du bois n'a pas fait l'objet de recherches approfondies ces dernières années, elle a attiré de nombreux chercheurs dans le passé. Cette technologie a été initiée en Allemagne en 1930 sous le nom commercial de Lignostone et en Angleterre, elle est connue sous le

nom de Jicwood et Jablo [2, 3]. Au cours des dix dernières années, de nombreuses tentatives ont été entreprises pour démontrer les avantages des tourillons en bois compressé en tant qu'élément d'assemblage [2, 4-7].

Dans la construction en bois, le comportement vibratoire des planchers bois est un problème essentiel car ils sont légers et plus sujets aux vibrations gênantes causées par les activités humaines que les planchers en béton [8]. Dans l'Union Européenne, les critères de conception concernant le comportement vibratoire des planchers bois exploitent généralement les règles de l'Eurocode 5 [9]. Plusieurs études traitant des performances vibratoires en service des planchers bois multicouches sont disponibles dans la littérature [10-13]. Les auteurs ont récemment étudié expérimentalement les performances vibratoires des poutres bois multicouches assemblées par tourillons [7]. Les résultats en termes de fréquences et d'amortissement sont jugés satisfaisants comparés à ceux obtenus pour les poutres collées. En revanche, la variabilité du comportement vibratoire des poutres bois multicouches assemblées par tourillons est significative [14].

3. Résultats expérimentaux

3.1. Analyse modale

Les données expérimentales ont été enregistrées et analysées à l'aide du système LMS Test Lab.

Toutes les poutres ont été testées en conditions libre-libre. Les conditions libre-libre ont été obtenues grâce aux coussins de laine minérale placés aux deux extrémités, comme illustré sur la Figure 1. La rigidité de la laine minérale est très faible, ce qui garantit des conditions libre-libre [11]. Les poutres ont été excitées par marteau d'impact en 11 points régulièrement espacés. Un accéléromètre tridimensionnel était fixé à l'extrémité de la poutre. Les réponses aux différents points ont été obtenues en utilisant le théorème de réciprocité.

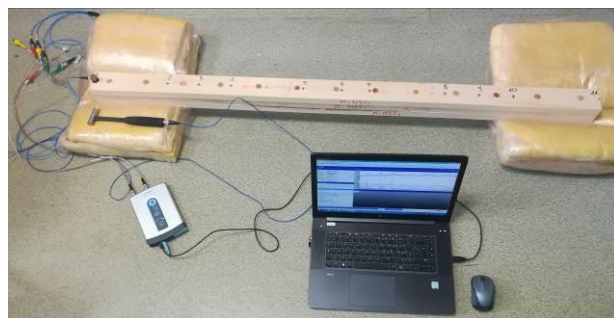


Figure 1 – Dispositif expérimental en conditions libre-libre

3.2. Résultats expérimentaux pour les poutres monocouches

Seize poutres monocouches en chêne de dimensions 70 mm x 22,5 mm x 1450 mm ont tout d'abord été analysées. Les valeurs de fréquences ainsi que la variabilité correspondante pour les seize poutres monocouches sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Variabilité des premières fréquences propres des poutres monocouches en chêne

	Min	Max	Moyenne	CoV
1 ^{ère} fréquence (Hz)	41.6	49.6	46.5	4.8%
2 ^{ème} fréquence (Hz)	111.2	138.3	127.8	5.2%
3 ^{ème} fréquence (Hz)	217.7	270.9	250.4	5.1%

Toutes les poutres monocouches ont également été pesées pour connaître la densité du matériau. Ensuite, pour chaque poutre, le module élastique longitudinal du matériau a été extrait de l'expression analytique des fréquences en utilisant la théorie classique des poutres minces :

$$f_n = \frac{a_n}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} \quad (1)$$

avec :

$$a_1 = \left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 ; a_2 = \left(\frac{5\pi}{2}\right)^2 ; a_3 = \left(\frac{7\pi}{2}\right)^2$$

I est le moment d'inertie, ρ est la masse volumique, A et L sont l'aire de la section et la longueur de l'éprouvette, respectivement. Les valeurs du module d'élasticité longitudinal, calculées à partir des trois premières fréquences, sont présentées sur la Figure 2. Théoriquement, le module peut être identifié en exploitant n'importe quelle fréquence. Les résultats obtenus à partir des trois premières fréquences propres expérimentales sont proches, ce qui constitue un résultat cohérent. Le niveau de variabilité du module d'élasticité longitudinal du matériau est élevé.

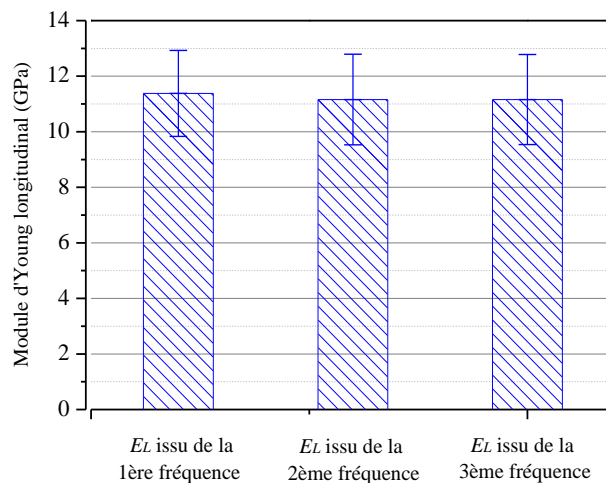


Figure 2 – Valeur moyenne et variabilité du module d'élasticité longitudinal

3.3. Résultats expérimentaux pour les poutres multicouches

Cinq poutres multicouches constituées d'un empilement de trois couches de chêne ont été fabriquées. Les couches ont d'abord été percées pour obtenir une rangée de 27 trous de 16 mm de diamètre. Elles ont ensuite été empilées, maintenues à l'aide de dispositifs de serrage (Figure 3) et assemblées, grâce à un marteau, par 27 tourillons en bois densifié de 16 mm de diamètre.



Figure 3 – Assemblage de poutres bois multicouches par tourillons

Le Tableau 2 donne les fréquences des trois premiers modes des poutres multicouches, ainsi que la variabilité. La variabilité des fréquences est proche de celle observée pour les poutres monocouches.

Tableau 2 – Variabilité des premières fréquences propres des poutres multicouches en chêne

	Min	Max	Moyenne	CoV
Masse (kg)	3.93	4.78	4.50	6.5%
1 ^{ère} fréquence (Hz)	102.0	122.4	115.4	6.3%
2 ^{ème} fréquence (Hz)	246.4	276.5	263.2	3.9%
3 ^{ème} fréquence (Hz)	406.3	461.6	432.8	4.8%

4. Vérification et validation d'un modèle éléments finis pour une poutre multicouche assemblée par tourillons

4.1. Description du modèle éléments finis

Un modèle éléments finis pour simuler le comportement des poutres multicouches a été mis au point en utilisant le logiciel Abaqus / Standard [15]. Des éléments de type hexaèdre à 8 nœuds avec intégration réduite (C3D8R), ont été utilisés pour les couches de bois et les tourillons. Le matériau orthotrope est considéré pour les couches de bois ainsi que pour les tourillons. Pour les couches de bois, le module d'élasticité longitudinal provient des résultats de l'analyse modale expérimentale réalisée sur les poutres monocouches (voir Figure 2). Les autres propriétés élastiques sont extraites de la littérature [17-19]. On suppose que l'adhésion entre les tourillons et les couches de bois est parfait (sans glissement) et que les différentes couches n'interagissent pas entre elles. La méthodologie de Vérification et Validation [16] a été appliquée pour évaluer les performances du modèle éléments finis.

4.2. Vérification du modèle éléments finis

La Figure 4 montre l'influence du maillage sur les trois premières fréquences propres. La convergence est obtenue pour un maillage contenant environ 23000 éléments. La Figure 5 montre un maillage de référence contenant 60000 éléments, ainsi que le maillage retenu, constitué de 23000 éléments.

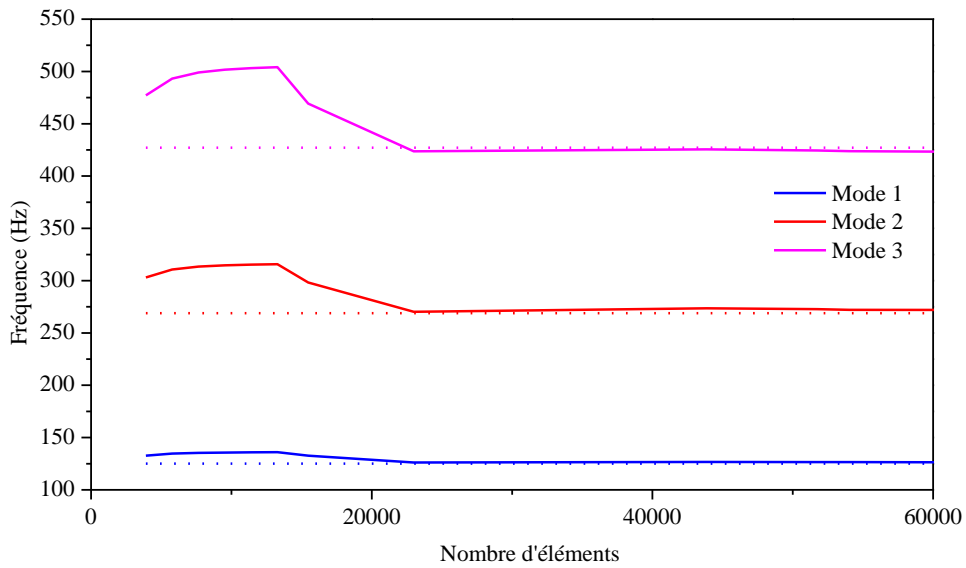


Figure 4 – Étude de convergence des trois premières fréquences propres

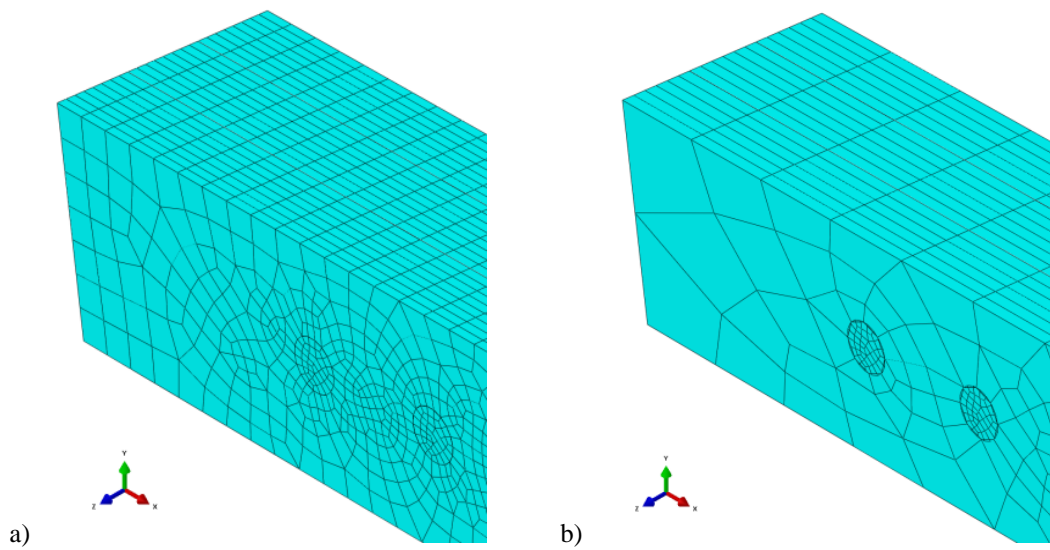


Figure 5 – Modèles éléments finis :

a) modèle de référence (60000 éléments) ; b) modèle retenu (23000 éléments)

4.3. Validation du modèle éléments finis

La comparaison entre les mesures expérimentales et les résultats prédits numériquement est présentée pour une des cinq poutres à trois couches étudiées.

Le Tableau 3 compare les fréquences propres expérimentales et numériques. Les écarts, ne dépassant pas 5%, sont jugés satisfaisants.

Les déformées modales expérimentales et numériques sont montrées sur la Figure 6. La corrélation entre les déformées modales expérimentales et numériques a été évaluée à l'aide du critère MAC. Les valeurs, données dans le Tableau 3, sont proches de 1, ce qui met en évidence un très bon accord entre les déformées modales expérimentales et numériques.

En conclusion, les tests de Vérification et Validation sont satisfaisants, la capacité prédictive du modèle éléments finis proposé est donc tout à fait satisfaisante.

Tableau 3 – Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour une poutre multicouche

	Simulation	Expérience	Différence	MAC
1 ^{ère} fréquence (Hz)	125.5	122.4	2.5%	0.997
2 ^{ème} fréquence (Hz)	268.3	276.5	-3.0%	0.986
3 ^{ème} fréquence (Hz)	427.1	449.3	-4.9%	0.963

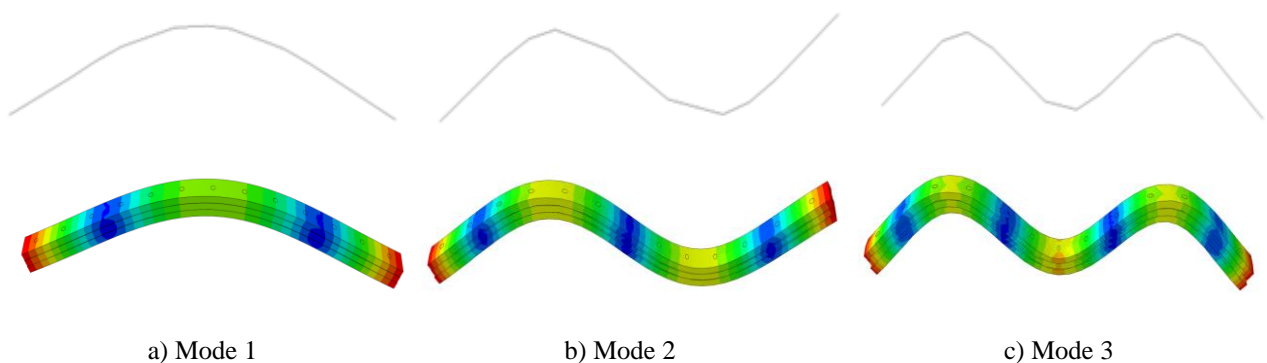


Figure 6 – Déformées modales expérimentales et numériques

5. Conclusion

Cet article a présenté une étude expérimentale et numérique concernant le comportement vibratoire des poutres bois multicouches assemblées par des tourillons en bois également. Des résultats expérimentaux, concernant des poutres constituées d'une seule couche ainsi que des poutres multicouches, ont été présentés. On observe une variabilité significative des fréquences propres. Un modèle éléments finis, constitué d'éléments volumiques pour les couches de bois ainsi que pour les tourillons, a été proposé. La méthodologie de Vérification et Validation a été appliquée pour évaluer la performance de ce modèle éléments finis. Les bons résultats obtenus montrent que la capacité prédictive du modèle éléments finis proposé est tout à fait satisfaisante.

Les perspectives de cette étude sont nombreuses. D'une part, une approche éléments finis stochastique sera développée pour pouvoir prendre en compte numériquement la variabilité expérimentale observée. D'autre part, le modèle éléments finis présenté est performant mais également complexe de mise en œuvre dans un contexte industriel. Une recherche sera menée pour tenter d'identifier des modèles éléments finis plus simples mais néanmoins capables de reproduire le comportement physique complexe des poutres multicouches en bois assemblées par des tourillons.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le Fonds européen de développement régional d'avoir accordé un financement au titre du contrat *Interreg NWE 348 "Towards Adhesive Free Timber Buildings"* (AFTB). Le soutien financier du gouvernement vietnamien est également grandement apprécié.

Références

- [1] Z. Guan, W. Komatsu, K. Kitamori, K. Jung, Structural characteristics of beam-column connections using compressed wood dowels and plates, 11th World Conference on Timber Engineering, 2010.
- [2] M. Madhoushi, M. Gray, T. Tabarsa, Influence of wood densification on withdrawal strength of fasteners in eastern cottonwood (*populus deltoides*), 11th World Conference on Timber Engineering, 2010.
- [3] E-V. Kultikova, Structural and properties relationships of densified wood, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [4] K. Jung, A. Kitamori, K. Komatsu, Evaluation on structural performance of compressed wood as shear dowel, *Holzforschung*, Vol. 62(4), page 461 - page 467, 2008.
- [5] I. Hassel, P. Berard, K. Komatsu, Development of wooden shear Wall-Improvement of stiffness by utilizing elements of densified wood, *Holzforschung*, Vol. 62(5), page 584 - page 590, 2008.
- [6] I. El Houjeyri, M. Oudjene, M. Khelifa, Y. Rogaume, A. Sotayo, Z. Guan, Structural performance of timber connections and multilayered beams assembled through compressed wood dowels, World Conference on Timber Engineering, 2018.
- [7] T-A. Bui, M. Oudjene, P. Lardeur, M. Khelifa, Y. Rogaume, Vibration performance of multilayered timber beams assembled through compressed wood dowels, World Conference on Timber Engineering, 2018.
- [8] B. Anshari, Z. Guan, K. Komatsu, A. Kitamori, K. Jung, Explore novel ways to strengthen glulam beams by using compressed Japanese cedar, 11th World Conference on Timber Engineering, 2010.
- [9] EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: design of timber structures – Part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2004).
- [10] J. Weckendorf, E. Ussher, I. Smith, Dynamic response of CLT plate systems in the context of timber and hybrid construction, *Composite Structures*, Vol. 157, page 412 - page 423, 2016.
- [11] K. Jarnerö, A. Brandt, A. Olsson, Vibration properties of a timber floor assessed in laboratory and during construction, *Engineering Structures*, Vol. 82, page 44 - page 54, 2016.
- [12] E-S. Bernard, Dynamic serviceability in lightweight engineered timber floors, *J. Struct. Eng. ASCE* 134, page 258 - page 268, 2008.
- [13] B. Zhang, A. Kermani, T. Fillingham, Vibrational performance of timber floor constructed with metal web joists, *Eng. Struct.* 56, page 1321 - page 1334, 2013.
- [14] T-A. Bui, P. Lardeur, M. Oudjene, Experimental study of vibration uncertainty of multilayered timber beams assembled through wood dowels, *International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*, page 4867 – page 4880, 2018.
- [15] Abaqus 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., (2014).
- [16] W. L. Oberkampf, G. T. Timothy, C. Hirsch, Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics, *Appl Mech Rev*, Vol. 57(5), page 345 - page 384, 2004.
- [17] E-M. Meghlat, M. Oudjene, H. Ait-Aider, J-L. Batoz, A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method, *Construction and Building Materials*, Vol. 41, page 263 - page 269, 2013.
- [18] V-D. Tran, M. Oudjene, P-J. Méausoone, FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 52, page 40 - page 47, 2014.
- [19] J. Blomberg, Mechanical and Physical Properties of Semi-Isostatically Densified Wood. PhD. Thesis, Luleå University of Technology, LTU Skellefteå, Division of Wood Science and Technology, 2006:28, ISSN-1402-15444, (2006).
- [20] É. Arnoult, P. Lardeur, L. Martini, The modal stability procedure for dynamic and linear finite element analysis with variability, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, page 30 - page 45, 2011.