

Caractérisation expérimentale et modélisation de lamelles aboutées-panneautées de chêne homogénéisées

CORDEIRO Silva^{1,2}, SOH MBOU Delin¹, POT Guillaume¹, MARCON Bertrand¹,
VIGUIER Joffrey¹, MILHE Louis¹, CHASTAGNIER Thibault³, LOUVET Thibaut³,
LANVIN Jean-Denis⁴, REULING Didier⁴

¹Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, F-71250 Cluny, France

²Master Génie mécanique et matériaux, Université Bretagne Sud, Lorient, France

³Ducerf Groupe, Le Bourg, 71120 Vendennes-lès-Charolles, France

⁴FCBA, Allée de Boutaut BP227, 33028 Bordeaux, France.

silvcordeiro2019@gmail.com

Mots clés : Feuillus, Bois de Qualité Secondaire, Propriétés mécaniques, Lamellé-collé, Traction, Modélisation numérique

Contexte et Objectifs

Le bois, en tant que matériau naturel et renouvelable, joue un rôle important dans les secteurs de la construction et du mobilier. Parmi les différentes essences de bois, le chêne se distingue historiquement pour sa robustesse et sa longévité, faisant de lui un choix privilégié dans ces industries. Cependant, son utilisation dans la construction a diminué au fil des ans, bien que les chênes sessile et pédonculé demeurent la première ressource de bois en France métropolitaine (23 % du volume de bois sur pied à l'horizon 2035, Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques, FCBA 2019).

Les bois feuillus, tels que le chêne, posent des défis particuliers lors de leur utilisation dans des applications structurales, notamment en raison de leur hétérogénéité marquée. Contrairement aux bois résineux, qui sont plus homogènes et plus faciles à travailler, les lamelles de feuillus utilisées dans les lamellé-collés présentent un plus grand nombre d'aboutages par entures (comme illustré dans la Fig. 1b). De plus, les contraintes de coût matière limitent aussi la largeur des courçons les constituant. Afin de produire des poutres de lamellé-collé suffisamment larges, une solution est de panneauter dans la largeur pour obtenir des lamelles aboutées-panneautées (LAP).

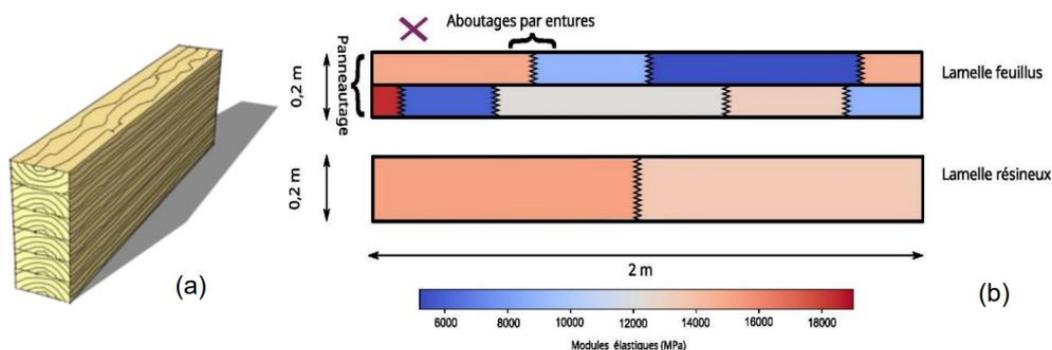


Fig. 1 : (a) Schéma d'une poutre lamellé-collé. (b) Comparaison schématique entre une lamelle aboutée-panneautée de bois feuillus (en haut) et une lamelle de résineux (en bas), la couleur représentant le module élastique (Soh Mbou et al. 2023).

Une étude antérieure menée par Soh Mbou et al. (2023), purement numérique, a mis en lumière un problème possible des lamelles aboutées-panneautées en chêne en raison d'une hétérogénéité des contraintes significative sous sollicitation de traction (la sollicitation limitante pour le lamellé-collé – cf. EN 14080 2013). Cette hétérogénéité entraînerait des concentrations de contraintes locales (ou, « surcontraintes ») pouvant dépasser de 40 % la contrainte moyenne, compromettant la performance structurelle globale. Selon Soh Mbou et al. (2023), un tri préalable des courçons, basé sur leurs modules d'élasticité longitudinal (MOE), permettrait de réduire ces concentrations de contrainte de moitié.

Ce travail vise à approfondir ces précédents résultats à travers des essais expérimentaux comparés à une modélisation numérique, en se focalisant sur l'impact de l'hétérogénéité des lamelles sur la performance mécanique des LAP de bois feuillus. L'objectif principal est d'explorer comment ces variations internes de MOE influencent la résistance mécanique des LAP et d'identifier des moyens non-destructifs pour améliorer leurs caractéristiques dans un contexte de production à partir de bois de qualité secondaire.

Matériels et Méthodes

Tri et fabrication des LAP

À partir d'un ensemble de 365 courçons de chêne sessile ou pédonculé de section $21 \times 105 \text{ mm}^2$, 29 LAP de dimensions $19,5 \times 200 \times 3000 \text{ mm}^3$ ont été fabriquées en vue d'être testées. La sélection des courçons a été réalisée en fonction de leur MOE mesuré de façon non destructive par méthode vibratoire (BING®, CIRAD, Paradis et al. 2017). Ainsi, comme le montre la Fig. 2a, la valeur de référence médiane du groupe d'éprouvettes testé est de 12,8 GPa. Les courçons présentant un MOE inférieur à cette valeur, 96 courçons ont été classés comme "faibles", tandis que ceux ayant un MOE supérieur à cette valeur, 109 courçons ont été considérés comme "forts". Les 160 courçons restants forment un troisième groupe composé de courçons sans sélection particulière, dénommé « aléatoire ».

Les courçons ont ensuite été assemblés pour former trois types de LAP : 8 LAP "faibles" (composés de courçons avec un MOE faible), 9 LAP "fortes" (composés de courçons avec un MOE élevé) et enfin 12 LAP "aléatoires".

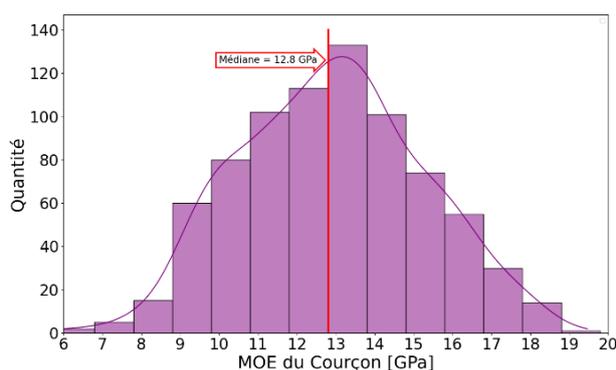


Fig. 2a - Distribution de MOE longitudinal des courçons

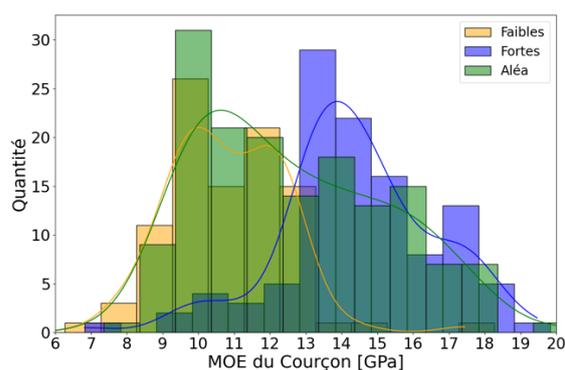


Fig. 2b - Distribution des MOE Longitudinal des courçons utilisés pour la fabrication des LAP

La Fig. 2b montre la distribution du MOE des courçons selon les LAP fabriquées. La superposition des courbes de distribution révèle que les LAP "faibles" et "fortes" sont plus homogènes, comme le montre la faible dispersion des MOE autour de leurs médianes respectives. En revanche, les LAP "aléatoires" affichent une distribution plus étendue, indiquant une plus grande variabilité dans la composition des courçons.

Essais de Traction

Les essais de traction ont été effectués afin d'évaluer la résistance mécanique des 29 LAP et d'analyser l'impact du tri effectué sur les courçons. La Fig. 3 illustre le dispositif d'essai, dans lequel chaque panneau, d'une longueur totale de 3000 mm, est soumis à une force de traction F . L'objectif est de faire en sorte que le maximum d'aboutages présents dans les LAP soit testés. Les extrémités des LAP sont maintenues dans des mors longs de 300 mm, ce qui assure une zone de test utile de 2400 mm au centre du panneau.

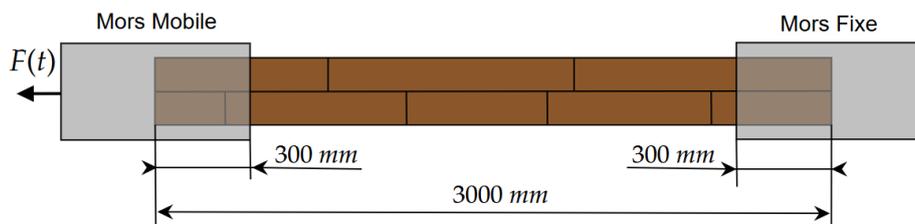


Fig. 3 : Configuration d'essai - Le panneau de 3 m mais le longueur testée hors mors est de 2,4 m

En parallèle, un système de stéréo-corrélation d'images (StrainMaster, LaVision©) a été installé pour observer l'évolution des déformations tout au long du panneau pendant les essais. Ce système permet une analyse précise de l'hétérogénéité des LAP, notamment en identifiant les zones les plus déformées en raison des variations de MOE. Des extensomètres virtuels intégrés dans le logiciel DaVis (LaVision©) ont été utilisés pour des mesures précises des déformations des LAP, permettant de remonter aux MOE « statiques » locaux, garantissant une analyse complète des propriétés mécaniques des LAP.

Modélisation Numérique

Une modélisation par éléments finis a été réalisée pour simuler les essais de traction et analyser la répartition des déformations et contraintes dans les LAP. Le modèle, de type orthotrope, prend en compte les propriétés mécaniques différenciées du matériau dans les trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle), reflétant ainsi la nature anisotrope du bois. Cependant, chaque courçon est considéré comme étant homogène. Les singularités telles que les nœuds ou autres défauts locaux n'ont pas été incluses, et les liaisons entre les courçons (aboutage comme panneautage) ont été modélisés comme des liaisons parfaites (voir Fig. 4).

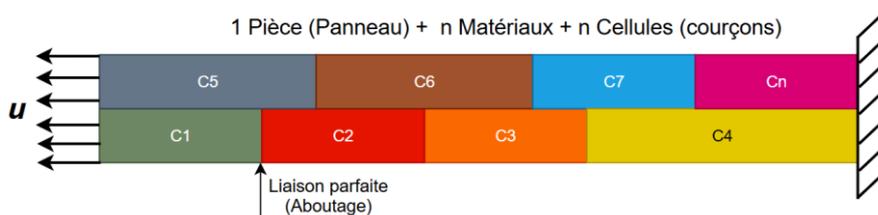


Fig. 4 : Modélisation éléments finis sur Abaqus™, avec n courçons homogènes pour n propriétés matériau associées

Les propriétés mécaniques utilisées dans le modèle ont été déterminées à partir des valeurs de MOE issues de l'analyse vibratoire non destructive pour chaque courçon. Le module longitudinal a été pris égal au MOE vibratoire, tandis que les modules d'élasticité dans les directions radiale et tangentielle, ainsi que les modules de cisaillement, ont été calculées à l'aide des rapports indiqués par Kretschmann (2010) pour le chêne blanc. A partir des résultats du calcul du modèle éléments finis, un indicateur de l'hétérogénéité des contraintes a été calculé, le Rapport de Sur-Contraintes (RSC), analogue à un coefficient de concentration de contrainte. Il est calculé par le rapport entre la contrainte de traction moyenne ($\sigma_{moyenne}$) appliquée sur tout le panneau et la contrainte longitudinale maximale (σ_{Max}) comme indiqué par l'Equation

1. Une étude de convergence a été menée vis-à-vis du nombre d'éléments afin d'avoir un maximum de contrainte déterminé correctement et non dépendant du maillage (éléments hexaédriques de côté 6 mm à interpolation quadratique). La Fig. 5 montre la répartition des contraintes sur un panneau mettant bien en évidence l'hétérogénéité et la concentration de contrainte pouvant exister entre courçons contigus.

$$RSC = \frac{\sigma_{Max}}{\sigma_{moyenne}} \quad \text{Equation 1}$$

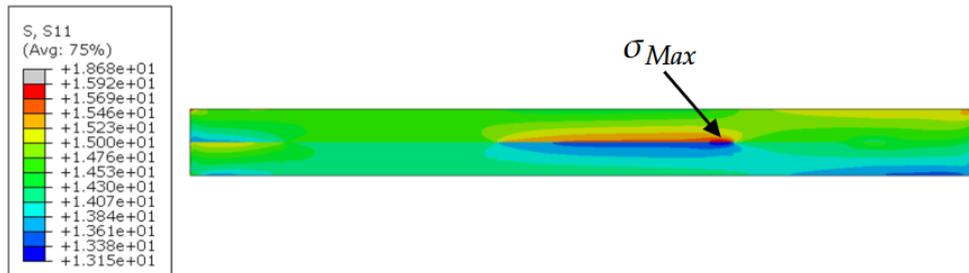


Fig. 5 : Exemple de répartition des contraintes longitudinales sur un panneau et zone de contrainte maximale où le RSC sera également maximal

Résultats et discussions

Les résultats pour l'ensemble des LAP en termes de MOE et de résistance sont présentés Fig. 6a et 6b. En comparant en détails les trois lots de LAP (faible, fort, aléatoire), plusieurs observations importantes peuvent être faites :

- Lot Fort : Les LAP composées de courçons avec un MOE élevé présentent une distribution de résistance relativement resserrée, avec des valeurs globalement plus élevées, ce qui indique une meilleure résistance mécanique et une plus grande homogénéité.
- Lot Aléatoire : Ce lot présente la plus grande dispersion des valeurs de résistance ainsi que les valeurs les plus faibles. L'absence de tri rigoureux selon le MOE se traduit par une variabilité accrue des propriétés mécaniques, rendant les LAP plus imprévisibles en termes de résistance.
- Lot Faible : Bien qu'ayant des valeurs de MOE de courçons plus faibles que pour les LAP aléatoires, les valeurs de résistance sont plus grandes. Elles restent cependant inférieures au lot fort.

L'homogénéité des LAP apparaît donc comme un facteur primordial dans l'explication de leur résistance en traction. Par conséquent, la corrélation entre le MOE des LAP et leur résistance (Fig. 6b) se révèle très faible ($R^2 = 0.1$), contrairement au comportement habituel du matériau bois. Cette relation n'est donc pas assez précise pour prédire la résistance des LAP de manière fiable.

L'indicateur RSC apparaît plus pertinent pour évaluer la résistance des LAP (Fig. 7). En effet, les LAP présentant un RSC plus faible tendent à être plus homogènes, et donc à avoir une résistance plus élevée. En revanche, la zone rouge dans la Fig. 7 représente une région où les LAP auraient résisté moins que prévu par rapport à leur RSC. Aucun panneau n'est effectivement situé dans la zone rouge, cela confirme que l'utilisation du RSC comme indicateur est un outil efficace pour mieux anticiper les performances mécaniques, surtout dans des contextes où le MOE seul ne donne pas une image complète de la résistance du matériau.

D'un point de vue technologique, il est essentiel de noter que les LAP du lot aléatoire présentaient une résistance caractéristique de 11,3 MPa, contre 17,7 MPa pour les LAP du lot

faible et 20,2 MPa pour celles du lot fort. Or, la valeur cible était de 14 MPa (équivalent de résistance en traction de la classe D24), ce qui illustre bien l'importance capitale de l'homogénéité de ces LAP pour bien valoriser la ressource utilisée.

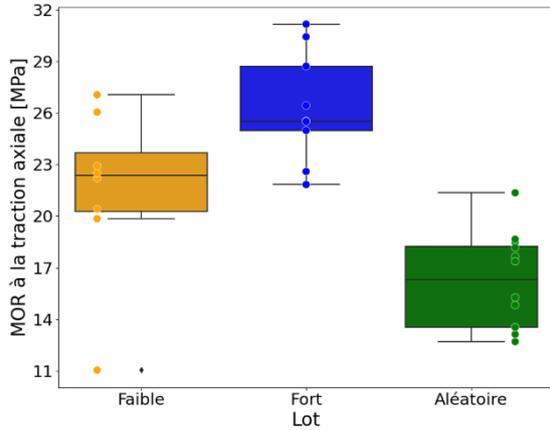


Fig. 6a : Distribution de MOR de chaque lot

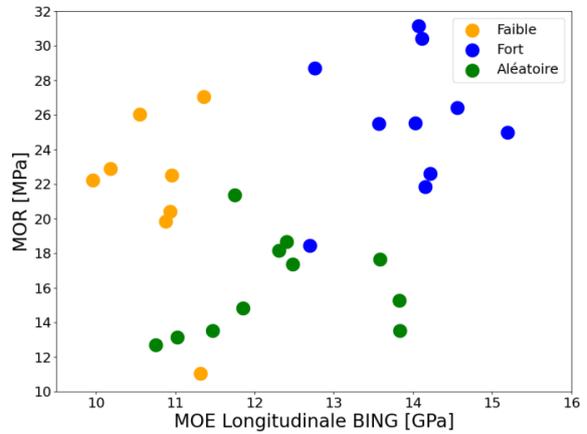


Fig. 6b : Relation entre MOR et MOE longitudinale des LAP

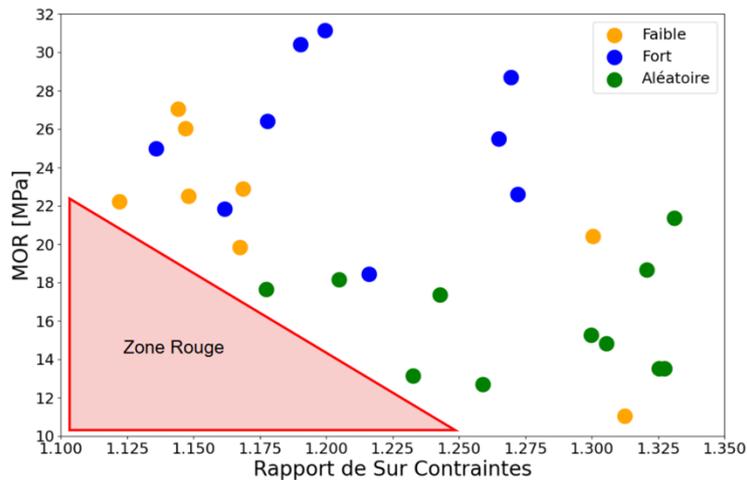


Fig. 7 : Relation entre le MOR et le Rapport de Sur-Contrainte (RSC) des LAP

Conclusion

Cette étude montre l'impact crucial de l'hétérogénéité des MOE des courçons de bois feuillus utilisés pour la fabrication de LAP sur leurs performances mécaniques. Les résultats soulignent l'importance de la sélection des courçons constituant les lamelles en fonction de leurs propriétés mécaniques. L'hétérogénéité interne, représentée ici par les variations de MOE, influence directement la fiabilité et la performance des LAP. Un indicateur, le Rapport de Sur-Contraintes (RSC) a été proposé pour estimer la résistance des LAP, surpassant le MOE global vibratoire traditionnellement utilisé.

D'un point de vue technologique, il apparaît qu'une homogénéisation des courçons selon leur MOE grâce à un tri réalisé par machine vibratoire longitudinale permettrait d'atteindre des résistances bien supérieures pour une même ressource. Le tri proposé ici permet d'atteindre une classe T18 pour les LAP constituées de courçons de MOE fort. Pour les LAP constituées de courçons de modules faibles, le MoE moyen deviendrait le facteur limitant malgré une bonne résistance et ne permettrait d'obtenir qu'une classe T11 malgré une résistance caractéristique très importante.

Etant donné le faible nombre de lamelles testées, ces chiffres demandent validation, mais la tendance est très claire : la maîtrise de l'hétérogénéité de MoE des LAP est primordiale pour optimiser leur résistance, et donc très certainement également celle des produits en lamellé-collé les utilisant.

Remerciements

Ce projet est soutenu financièrement par l'ADEME au travers des projet de recherche TreCEffiQuaS, et CHOC.

Références

Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques, FCBA (2019) Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. ADEME, France Bois Forêt, CODIFAB.

EN 14080 (2013). Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements.

Kretschmann D. (2010) Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA.

Paradis S, Brancheriau L, Bailleres H (2017) Bing: Beam Identification by Non destructive Grading.

Soh Mbou D, Pot G, Viguiet J, Besseau B, Milhe L, Rolle J (2023) Modélisation de l'hétérogénéité des contraintes dans les lamelles aboutées panneautées de chêne. In: Actes des 12e journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois. HAL, Limoges, France.

Soh Mbou D, Besseau B, Pot G, Viguiet J, Marcon B, Milhe L, Lanvin J-D, Reuling D (2024) Oak timber cross-cutting based on fiber orientation scanning and mechanical modelling to ensure finger-joints strength. In: 11th Hardwood Conference. Sopron, Hungary.