

Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques de placages d'hêtre

DEMOULIN Leyne¹, POT Guillaume¹, DENAUD Louis¹, GIRARDON Stéphane¹,
MARCON Bertrand¹

¹Arts et metier institute of technology, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté,
HESAM Université, F-71250, Cluny, France
leyne.demoulin@ensam.eu

Mots clefs : Bois sans défaut ; Caractérisation mécanique ; Stéréo-corrélation d'images ; Caractérisation non destructive

Contexte et objectifs

L'industrie du transport souhaite réduire son empreinte carbone vis-à-vis de tous les problèmes engendrés par les gaz à effet de serre. Pour atteindre ce but, des matériaux hautes performances fabriqués en bois pourraient être utilisés pour des applications structurales. C'est dans cette logique que le projet WOOFHI (Wood/natural Fiber High homogeneity / performance composite) a pris naissance pour fabriquer des matériaux composites homogènes et optimisés faits à base de matériaux hétérogènes et variables. Cette application nécessite de savoir trier le matériau bois en fonction de ses propriétés mécaniques en se basant sur des méthodes de mesure non destructives et quantitatives. Le tri visuel est standardisé mais n'est pas très efficace et les propriétés mécaniques après tri ne sont pas optimales (Faydi 2017, Duriot 2021). Plusieurs études essaient de prédire le module élastique et la résistance mécanique de produits bois structuraux avec précision et fiabilité comme le montrent (LVL Handbook Europe 2019) en utilisant l'orientation des fibres et la masse volumique locale mesurée sur le bois (Viguier et al. 2018). Le coefficient de détermination obtenu est inférieur à 0.7 et peu d'études prédictives concernant les placages et les échantillons de petites tailles sans défaut ont été faites (Pramreiter et al. 2021, Cha 2003).

L'objectif de ce travail est de comprendre le comportement mécanique du bois sans défaut et comment des perturbations locales influent sur le comportement du matériau. Un protocole expérimental sur des petites éprouvettes réalisées à base de placages visuellement « sans défaut » a été mis en place. Des mesures non destructives d'orientation des fibres et de masse volumique ont d'abord été réalisées, puis les éprouvettes ont été sollicitées jusqu'à rupture par un essai de traction.

Matériel et méthode

Protocole expérimental

La première étape du protocole concerne la fabrication des placages qui proviennent du procédé de déroulage. L'essence étudiée est le hêtre (*fagus sylvatica*) qui provient de la région Centre Val de Loire. Dans un second temps, des éprouvettes de dimension 350 mm de long, 20 mm de large et 2 mm d'épaisseur ont été fabriquées à partir de ces placages à l'aide d'une machine de découpe laser. Les éprouvettes ont été stockées à une température de 24°C avec une humidité relative de l'air de 50% afin de les stabiliser à une humidité de 10 %. Les échantillons ont été découpés avec des angles relatifs à une direction supposée être à 0° pour créer volontairement une variabilité au sein de l'orientation des fibres (Fig. 1). Cette distribution est présentée dans

le Tab. 1. Près de 40 placages ont été nécessaires afin de produire 450 éprouvettes. Une seule orientation a été utilisée par placage.

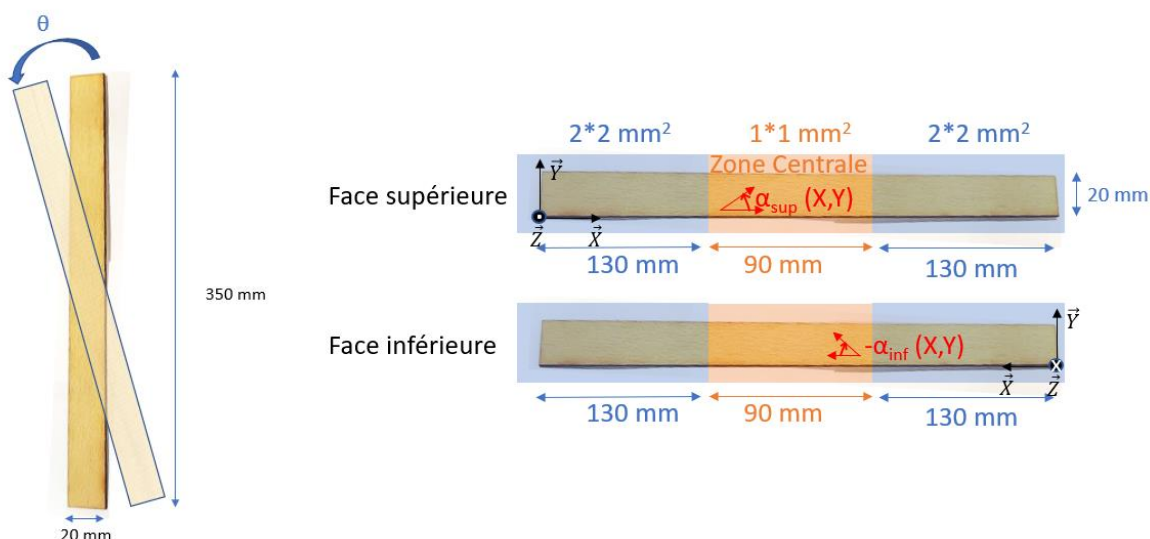


Fig. 1: Angle de découpe

Fig. 2: Résolution des mesures laser pour la face supérieure et inférieure

Tab. 1 : Répartition des éprouvettes en fonction de l'angle de découpe et la vitesse d'essai

Angle de découpe (°)	0	5	10	15	20	30	45
Nombre	110	50	50	50	50	50	30
Échantillons testés	40	16	15	11	24	14	9
Vitesse de déplacement imposé (mm/min)	2	2	1	1	1	0.5	0.5

Ensuite, les échantillons sont scannés avec une machine à commande numérique munie d'une caméra et d'un pointeur laser qui va balayer toute leur surface. Cette technologie utilise l'effet trachéide (Nyström 2003, Simonaho et al. 2002). Cet effet consiste à projeter un laser circulaire sur une surface plane de bois. La diffusion de la lumière étant plus élevée dans le sens de la fibre du bois, une ellipse lumineuse dont le grand axe suit cette orientation se forme alors. Les faces supérieure et inférieure de l'échantillon sont scannées avec différentes résolutions (Fig. 2) afin d'obtenir des cartographies des angles (Fig. 3a,c). La zone centrale est plus résolue que les extrémités car c'est la zone d'intérêt visible entre les mors de traction. L'étape suivante consiste à scanner les éprouvettes à l'aide d'un scanner classique pour obtenir une image d'une résolution de 400 Dpi. La Fig. 3. montre la superposition de la cartographie des angles obtenues avec le scan (Fig. 3b,d).

La largeur est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse et l'épaisseur à l'aide d'un micromètre extérieur. Les échantillons sont ensuite pesés à l'aide d'une balance. Ces mesures permettent de calculer la masse volumique apparente. L'essai de traction a pour but de déterminer les propriétés mécaniques locales grâce à une machine d'essai universelle ZWICK-Roell (250 kN). Les déplacements ont été mesurés par stéréo-corrélation d'images avec la technologie développée par LaVision. Une précharge de 0.1 MPa est appliquée avant essai. Les vitesses de déplacement imposées sur les éprouvettes sont décrites dans le Tab.1. Les vitesses sont réglées afin d'obtenir un temps d'essai compris entre 100 et 180 s jusqu'à la rupture.

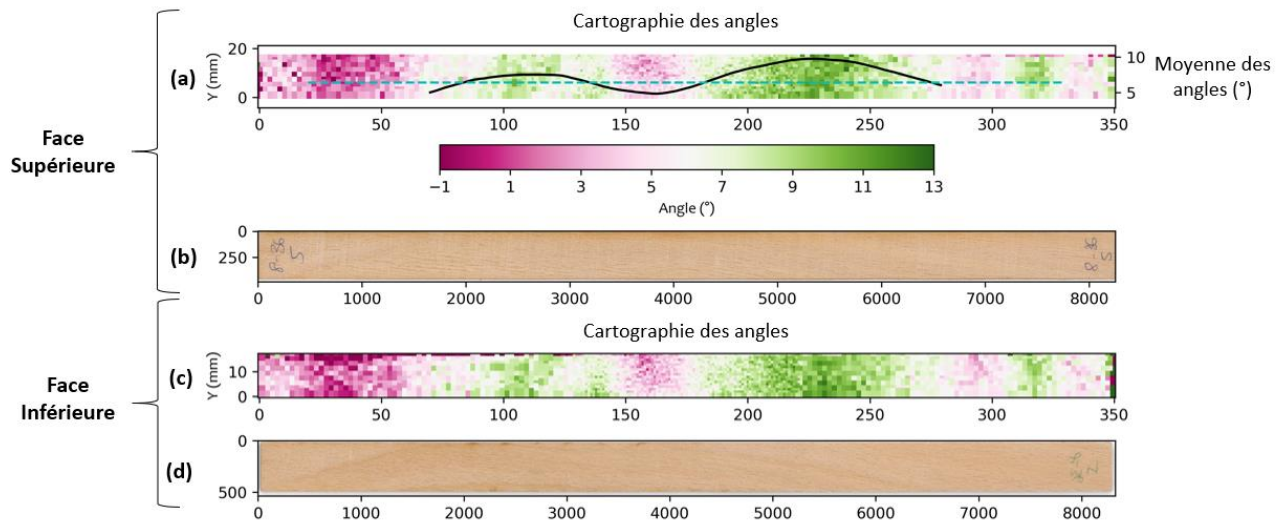


Fig. 1: (a) Cartographie des angles de la face supérieure, (b) Image couleur de la face supérieure, (c) Cartographie des angles de la face inférieure, (d) Image de la face inférieure

Calcul du module longitudinal : extensomètre virtuel et fenêtre glissante

Le module d'élasticité local équivalent le long de l'éprouvette peut être calculé grâce à un extensomètre virtuel de longueur δ (Fig. 4). Ce module est calculé en s'inspirant de la norme (EN 408 2012), c'est-à-dire qu'une régression linéaire est calculée entre 10 et 40% de la force maximale estimée.

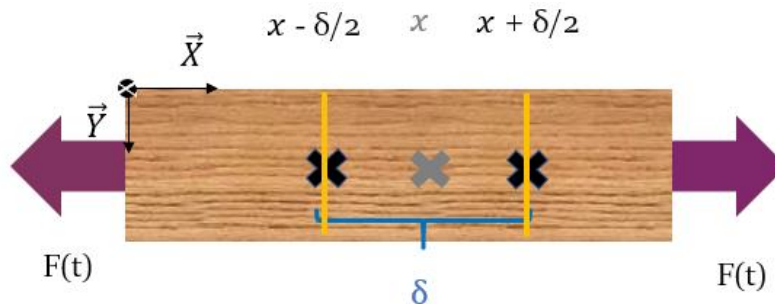


Fig. 4 : Essai de traction avec x la position suivant la longueur de l'éprouvette de centre de l'extensomètre, δ la longueur de l'extensomètre et $F(t)$ la force en fonction du temps

Dans la direction \vec{X} , le module élastique est calculé selon l'équation (1). La déformation est calculée comme un taux d'accroissement du déplacement comme le montre l'équation (2). Le déplacement est calculé comme la moyenne des déplacements sur la largeur de l'éprouvette (bandes jaunes (Fig. 4a)). La contrainte est le rapport de la force divisée par la section de l'éprouvette (équation 3). Avec cette méthode, un module local peut être calculé sur chaque point de la longueur de l'éprouvette. La zone centrale peut être balayée sur les 90 mm de longueur de la zone d'intérêt grâce à l'extensomètre virtuel d'une longueur $\delta = 50$ mm. Le type de résultats obtenu pour une éprouvette est représenté dans la Fig. 5.

$$E_{xx}(x) = \frac{\sigma}{\varepsilon_{xx}(x)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{xx}(x) = \frac{u(x + \delta/2) - u(x - \delta/2)}{\delta} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{Force}{Section} \quad (3)$$

$$u(x) = \frac{1}{19 - 1 + 1} \sum_{i=1}^{19} u(x, y_i) \quad (4)$$

avec $E_{xx}(x)$ le module d'élasticité local en MPa, $\varepsilon_{xx}(x)$ la déformation, σ la contrainte en MPa, $u(x)$ le déplacement en mm et δ la longueur de l'extensomètre en mm.

Résultats et discussion

Pour chaque éprouvette, les résultats obtenus sont présentés Fig. 5. Cette figure permet de montrer qu'il y a une forte corrélation entre le module d'élasticité longitudinal et l'angle en chaque point de la cartographie. En superposant toutes les éprouvettes sur un même graphique, on peut déterminer les propriétés mécaniques en considérant une loi de comportement orthotrope (Fig. 6). Le module longitudinal, de 16.3 GPa, paraît en accord avec la bibliographie malgré un module transversal ainsi qu'un module de cisaillement assez faible qui montre peut-être une forte influence des fissures liées au procédé de fabrication des placages.

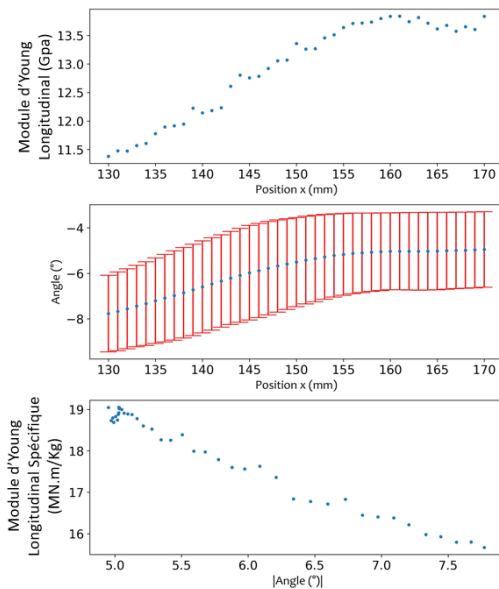


Figure 5 : Exemple de résultat d'une éprouvette : module longitudinal et mesure de l'angle en fonction de la position sur la longueur de l'éprouvette, module spécifique longitudinal en fonction de l'angle

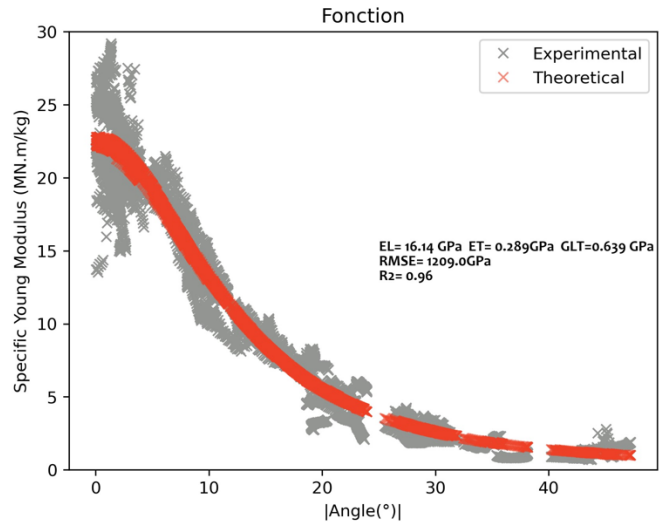


Figure 6 : Optimisation et superposition des propriétés mécaniques en fonction d'une loi de comportement orthotrope (RMSE = Root Mean Square Error, R^2 = coefficient de détermination, EL = module longitudinal et ET = module transversal, GLT = module de cisaillement)

Conclusion et perspectives

Ce protocole expérimental a pour but de caractériser les propriétés mécaniques des placages afin de créer un modèle prédictif se basant sur des mesures physiques non destructives. L'orientation des fibres paraît être un paramètre important dans la variabilité du bois.

L'approche du calcul du module élastique est assez simpliste pour comprendre le comportement local. Une identification inverse des propriétés mécaniques pour chacune des éprouvettes avec un modèle éléments finis intégrant l'orientation des fibres semble incontournable à la compréhension de la déformation et des différences de propriétés locales.

Remerciements

Ce travail est soutenu par le programme « Investissement d'Avenir », projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-003).

Références

Cha J-K (2003) Tensile Strength of Clear Thin Wood Samples in Relation to the Slope of Grain. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2003. Vol. 31, n° 3, pp. 35-41.

Duriot R (2021). Développement de produits LVL de douglas aux propriétés mécaniques optimisées par l'exploitation de la mesure en ligne de l'orientation des fibres lors du déroulage
Thèse de doctorat. HESAM.

EN 408 (2012). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.

Faydi Y (2017) Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. Thèse de doctorat. ENSAM.

LVL Handbook Europe (2019). Federation of the Finnish Woodworking Industries. ISBN 978-952-94-2346-0.

Nyström J (2003) Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 41, n° 1-3, pp. 91-99. DOI 10.1016/S0168-1699(03)00045-0.

Pramreiter M, Stadlmann A, Huber C, Konnerth J, Halbauber P, Baumann G, Mülher U (2021) The Influence of Thickness on the Tensile Strength of Finnish Birch Veneers under Varying Load Angles. *Forests*. Vol. 12, n° 1, pp. 87. DOI 10.3390/f12010087.

Simonaho S-P, Silvennoinen R (2002) Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. *Optics and Lasers in Engineering*. 2002. Vol. 41, n° 1, pp. 95-103. DOI 10.1016/S0143-8166(02)00144-6.

Viguiier J, Bourgeay C, Rohumaa A, Pot G, Denaud L (2018) An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials*. Vol. 181, pp. 146-155. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050.