

Modélisation du comportement mécanique local du bois de charme

SOH MBOU Delin, POT Guillaume, VIGUIER Joffrey, MARCON Bertrand,
MILHE Louis

Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Rue porte de Paris, 71250 Cluny,
France.

Delin.SOH_MBOU@ensam.eu

Mots clefs : charme ; scanner RX ; orientation locale des fibres ; densité locale, sciage.

Contexte et objectif

Contexte

Le bois s'affirme aujourd'hui comme un élément clé de l'innovation, l'aménagement et le développement structurel durable. Parmi les essences présentes en Europe, et plus particulièrement en France, les feuillus ont longtemps été considérés comme essences secondaires mais suscitent dernièrement un intérêt croissant du fait de sa grande disponibilité comparément aux essences de résineux et ses propriétés mécaniques intéressantes. Le charme (*Carpinus betulus*) fait partie de ces essences de feuillus oubliées du secteur structurel et reste peu documenté dans la littérature comparément aux résineux et même aux autres feuillus tels que le chêne ou le hêtre. Une meilleure connaissance de ses propriétés mécaniques permettrait non seulement de le rendre compétitif sur le marché de la construction mais aussi de favoriser la diversification des essences utilisées et donc l'optimisation de l'utilisation de nos forêts.

Objectif

Ce travail a pour objectif la contribution à l'amélioration de la connaissance des propriétés mécaniques du bois de charme et sa capacité à être utilisé structurellement. Spécifiquement, cette approche vise à comprendre le comportement mécanique du bois de charme à l'échelle structurelle (pour la construction) et comment les propriétés locales (orientation des fibres, densité) influent sur ce comportement, afin de déterminer quels seraient les moyens de contrôle non-destructifs les plus adéquats pour classer cette essence.

Matériel et Méthode

Échantillonnage

L'échantillonnage sur lequel s'est basé cette étude a été constitué au départ d'un lot de 167 planches de charme de 2 mètres de long en moyenne et de section $21 \times 70 \text{ mm}^2$. Le LaBoMaP est équipé d'un scanner industriel qui a été utilisé pour obtenir diverses données sur chaque planche. En déplaçant les planches dans le scanner dans le sens de la longueur, le scanner capture des données locales telles que l'orientation locale des fibres (ODF) et la densité locale tout en fournissant des images des quatre faces dans la longueur de la planche (Fig. 2).

Calcul de l'orientation locale des fibres dans un sciage

Comme proposé par Besseau (2021) l'ODF 3D est obtenu par interpolation des angles planaires mesurés sur les quatre faces d'une planche grâce à l'effet trachéide. Les faces dans la largeur fournissent les angles α et les faces dans l'épaisseur les angles β , mais ces seules données de surface ne suffisent pas à déterminer les angles γ internes. Une interpolation linéaire dans

l'épaisseur et la largeur permet de compléter les valeurs manquantes des angles α et β , ce qui permet d'obtenir les angles d'orientations locales des fibres (Éq. 1).

$$\gamma = \arccos(1/\sqrt{1 + \tan^2(\alpha) + \tan^2(\beta)}) \quad (1)$$

Calcul de la densité locale d'un sciage

Après le passage d'une planche de bois d'épaisseur e aux rayons X , les intensités d'énergie incidente (I_0), émergente (I) sont relevés, et le coefficient d'absorption linéaire μ est identifié via la loi de Beer-Lambert donnée en Éq. 2 ; μ étant dépendant de la capacité d'absorbance du matériau pour la longueur d'onde du rayonnement X utilisé et est considéré constant pour un lot donné de sciages. Grâce à des mesures manuelles de masse et de dimensions des planches, la régression de la moyenne des logarithmes des niveaux de gris permet de déterminer les coefficients a et b (respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine) de la relation Éq. 3. Ceux-ci appliqués à l'Éq. 3, donnent ensuite la densité locale moyenne par section transversale le long de la planche. Cette information n'est utilisée ici qu'à titre d'illustration méthodologique.

$$\rho = \frac{1}{\mu_m e} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

$$pe = a \ln(\text{niveau de gris}) + b \quad (3)$$

Avec $\mu_m = \mu/\rho$, le coefficient d'atténuation massique tenant compte de la densité locale.

Module élastique local analytique basé sur l'orientation des fibres

En l'absence d'une méthode automatique et précise de différenciation entre les directions radiale et tangentielle, un modèle isotrope transverse a été préféré. La valeur de E_0 (module d'élasticité longitudinal, dans la direction des fibres) fixée à 95 % du percentile des résultats expérimentaux d'essais de traction sur le lot de planches a néanmoins influencé les autres propriétés matériau telles que le module d'élasticité transversal E_{90} et le module de cisaillement G_{LTrans} . En effet, E_{90} a été calculé comme la moyenne des rapports orthotropes donnés par Guitard pour les feuillus standards (Tab. 1) : E_R/E_L et E_T/E_L étant multipliée par E_0 . G_{LTrans} , le module de cisaillement dans le plan isotrope transverse, a été calculé de manière similaire comme étant la moyenne des rapports orthotropes de Guitard G_{LT}/E_L et G_{LR}/E_L multipliée comme précédemment par E_0 . Le coefficient de Poisson transverse ν_{Trans} , lui a été calculé comme la moyenne des coefficients de Poisson orthotropes de Guitard : ν_{LT} et ν_{LR} . Le Tab. 1 résume les propriétés mécaniques utilisées permettant d'exprimer la matrice des complaisances $[S]$ dans le repère local du matériau $(\vec{L}, \vec{Trans})$.

Pour chaque élément de la grille d'angles interpolés γ_{xyz} , la matrice des complaisances $[S]$ a été obtenue par rotation en fonction de γ_{xyz} , afin d'obtenir la matrice des complaisances locales $[S']$ pour chaque position dans le système d'axes de l'échantillon $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Le module élastique local longitudinal (selon $\vec{x}$) est obtenu par inversion du premier coefficient de la matrice des complaisances $[S']$. La rigidité locale longitudinale moyenne a été calculée pour chaque section transversale, tous les millimètres dans la longueur. Le profil de module élastique (MoE) axial apparent, $E_{a,BT}(x)$, est défini comme la moyenne glissante harmonique de la rigidité locale, c'est à dire la raideur équivalente des ressorts en série de raideurs individuelles (Pot et al 2024) sur une longueur choisie de 90 mm. Le minimum du $E_{a,BT}(x)$ sur chaque planche est utilisé comme indicateur de la résistance à la traction. Ce modèle mécanique a permis à Pot et al (2024) de prédire la résistance avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,49$ pour le chêne.

Tab. 1: Propriétés mécaniques des feuillus standards selon Guitard (1987) et propriétés mécaniques isotropes transveres simplifiées utilisées dans ce présent travail.

E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	ν_{LR}	ν_{LT}
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		
14400	1810	1030	1260	971	0.38	0.46
E_0	E_{90}		G_{LTrans}		ν_{LTrans}	
MPa	MPa		MPa			
15452	1420		1115		0.42	

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\nu_{TransL}}{E_{90}} & 0 \\ -\frac{\nu_{LTrans}}{E_0} & \frac{1}{E_{90}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LTrans}} \end{bmatrix}$$

Module élastique local expérimental avec un système de stéréo-corrélation d'images

Des essais de traction pilotés en déplacement (3 mm/min) jusqu'à rupture sur 330 éprouvettes conformément à la norme EN 408+A1 (2012) ont été effectués à l'aide d'une machine Zwick Z250 (de capacité 250 kN) équipée de mâchoires auto-serrantes de $60 \times 80 \text{ mm}^2$. Les champs de déplacement ($u(x)$, $u(y)$, $u(z)$) ont été mesurés par stéréo-corrélation d'images (DIC-2D), avec un motif aléatoire gravé au laser (points de diamètre 1 mm espacés de 1 mm), une acquisition toutes les 2 secondes, une grille d'analyse (ZOI) de $35 \times 35 \text{ px}^2$ (soit $4 \times 4 \text{ mm}^2$) pour une erreur de corrélation de 0.0314 px et calculés en référence à la moyenne de 10 images prises en absence de chargement mécanique. Deux points virtuels distants de δ ont été définis pour simuler un extensomètre virtuel: l'un en $x + \delta/2$ et l'autre en $x - \delta/2$. Le MoE a été calculé dans la partie linéaire de la courbe force-déplacement entre 10% et 40% de la charge maximale ($F_{\max}$). Une fenêtre de $68 \times 90 \text{ mm}^2$ (soit 2 mm en moins dans la largeur h pour limiter les effets de bord) a ensuite été déplacée le long des éprouvettes permettant d'extraire les déplacements moyens, les déformations correspondantes et les MoE locaux (Fig. 1).

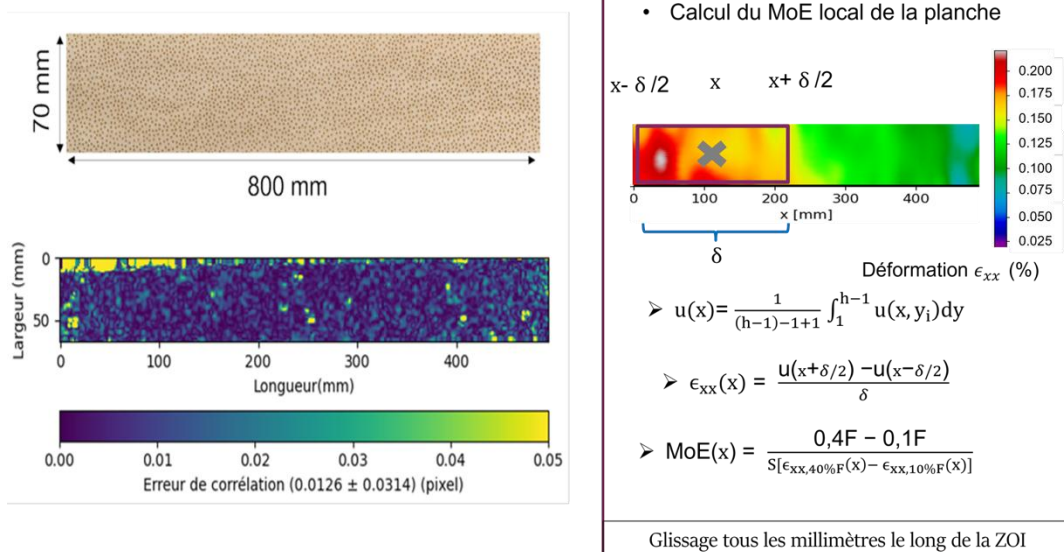


Fig. 1 : Calculs DIC-2D : à gauche, mouchetis des éprouvettes et erreur de corrélation ; à droite, champ de déformation longitudinale issu de la stéréo-corrélation et calcul du MoE local

Résultats et discussions

La Fig. 2 montre un exemple de comparaison entre le profil de rigidité axiale obtenu expérimentalement et celui obtenu analytiquement. On observe qu'ils se superposent qualitativement ce qui traduit que le modèle analytique décrit bien le comportement réel de l'éprouvette. L'écart quantitatif peut être dû au fait que le modèle analytique fait un certain nombre d'hypothèses parmi lesquelles un comportement en 2D, l'hypothèse d'une poutre de type Bernoulli (non prise en compte des contraintes transverses et de cisaillement), ce qui

simplifie et décomplexifie le comportement réel. On peut également remarquer une corrélation entre variation locale d'angle de fil et de la densité locale suggérant que l'intégration de la densité locale en complément de l'ODF permettrait d'améliorer les performances du modèle.

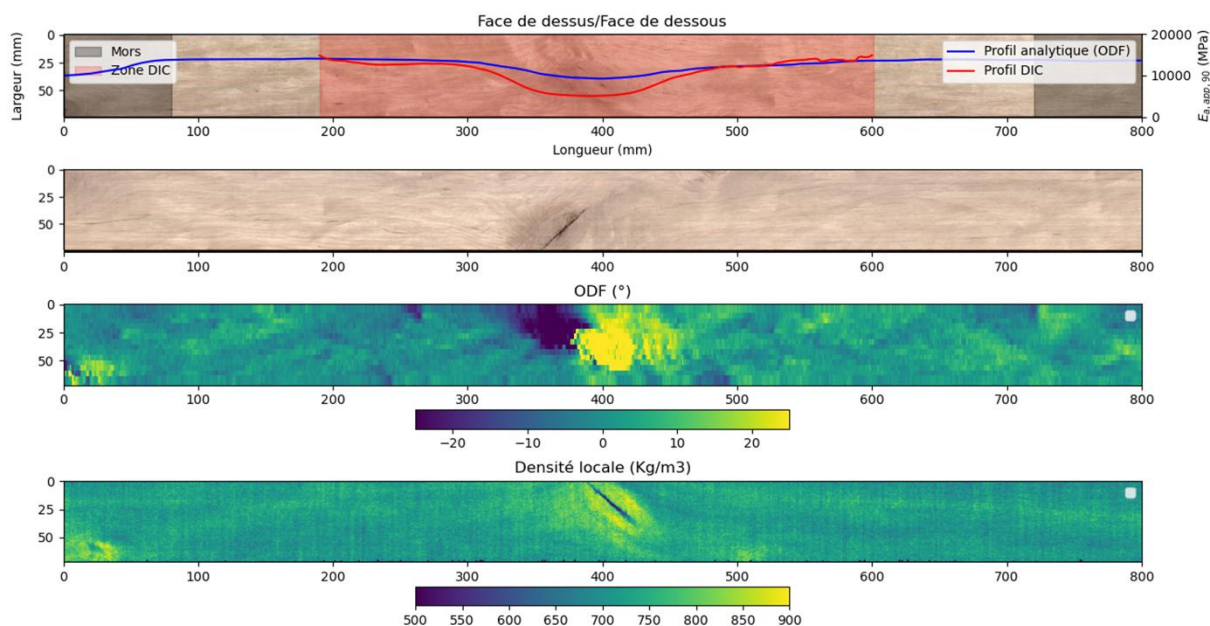


Fig. 2 : Exemple d'images (vue de dessus/vue de dessous) d'une planche, son ODF, sa densité locale et comparaison entre son profil analytique et son profil DIC du MoE

Conclusions et perspectives

Basée uniquement sur la mesure de l'orientation des fibres, cette méthode constitue une approche innovante susceptible de transformer les pratiques industrielles actuelles, mais elle pourrait être améliorée en intégrant la densité locale des sciages comme paramètre du modèle. Des recherches supplémentaires pourraient viser à quantifier l'impact de chaque propriété mécanique sur la prédiction de la rupture, afin d'affiner et d'améliorer la précision du modèle.

Remerciements

Ce projet est en collaboration avec FCBA et est soutenu financièrement par l'ADEME au travers du projet de recherche Feuillus CHOC 2282D0474-A, dont le but est de valoriser les essences feuillues secondaires dans la construction.

Références

- Besseau B (2021) Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne, These de doctorat, HESAM.
- EN 408+A1 (2012) Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, Cépaduès.
- Pot G, Viguier J, Besseau B, Lanvin J-D, Reuling D (2024) Modelling tensile mechanical properties of oak timber from fibre orientation scanning for strength grading purpose, 11th Hardwood Conference, Sopron, Hungary.