

Caractérisation élastique complète d'un petit échantillon de bois par interférométrie laser

TOULGOAT Killian¹, SAPEY Grégoire¹, LAUX Didier¹, AUGEREAU Franck¹, ARNOULD Olivier², ROSENKRANTZ Eric¹

¹IES, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

²LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

killian.toulgoat@umontpellier.fr

Mots clés : bois ; caractérisation ultrasonore ; comportement élastique ; orthotrope ; vitesses de phase et de groupe ; interféromètre laser.

Introduction

Le génie mécanique, a besoin de matériaux très techniques qui ont souvent un impact environnemental élevé causé par leur composition, leur extraction ou leur processus de transformation énergivore. Le bois, ressource naturelle connue pour son excellent rapport propriétés mécaniques/densité, représente une des solutions aux enjeux climatiques actuels, notamment dans les secteurs de l'éco-construction et du génie mécanique (Castanié et al 2024). Actuellement, le manque de connaissance des propriétés mécaniques dans toutes les directions d'orthotropie d'une pièce de bois constitue un frein à son utilisation plus systématique dans le domaine du génie mécanique. Cette méconnaissance est due à la complexité de ce matériau organique, en particulier sa grande variabilité intra et inter-espèces. La nature organique du bois implique que sa composition ne peut pas être finement contrôlée. Chaque pièce en bois nécessite une caractérisation approfondie en utilisant une méthode rapide et robuste pour prédire son comportement viscoélastique tridimensionnel. Pour y parvenir, nous proposons d'optimiser, voire d'adapter, les méthodes ultrasonores déjà existantes à la complexité du bois. Une nouvelle méthode expérimentale est ainsi proposée pour caractériser entièrement un échantillon de bois en mesurant les champs de vitesses ultrasonores à sa surface.

Contexte et objectifs

Les constantes élastiques d'un échantillon de bois peuvent être mesurées à l'aide d'ondes ultrasonores. La méthode la plus simple consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les directions principales par mesure au contact en transmission. Pour ce faire, il est souvent nécessaire d'usiner plusieurs échantillons suivant les directions principales du matériau. La précision des mesures de cette méthode dépend fortement de l'état de surface et du parallélisme des faces ainsi que de la qualité du couplage acoustique entre l'échantillon et les transducteurs ultrasonores. Ces mesures permettent de déterminer uniquement les coefficients diagonaux de la matrice d'élasticité, par la mesure des vitesses ultrasonores de compression et de cisaillement. Toutefois, il est possible de déterminer l'ensemble de la matrice d'élasticité à l'aide de mesures ultrasonores. Ce sont des mesures généralement effectuées en immersion à l'aide d'un goniomètre (Preziosa et al 1981). La mesure des différents coefficients de transmission ou de réflexion en fonction de l'angle d'incidence permet de déterminer les coefficients élastiques selon toutes les directions (Reddy et al 2005). L'application de cette méthode au matériau bois s'avère complexe en raison de l'immersion. En effet, les propriétés du matériau bois varient en fonction de son hygrométrie. Ainsi, l'échantillon doit être imperméabilisé afin de ne pas modifier son comportement viscoélastique. Pour s'affranchir des problèmes liés à l'immersion et pour déterminer un maximum de constantes élastiques en un

minimum de mesures sur un unique échantillon, une méthode d'estimation de la vitesse de propagation des fronts d'ondes ultrasonores par interférométrie laser a été développée. Les constantes élastiques sont estimées par méthode inverse, où la vitesse de groupe analytique est déduite des relations de Christoffel (Mavko *et al* 2009). Ces équations établissent une corrélation entre la vitesse de propagation des fronts d'ondes ultrasonores, en fonction de la direction de propagation, et les coefficients de la matrice de d'élasticité du matériau.

Méthode expérimentale

La méthode expérimentale consiste à mesurer le champ de déplacement normal à la surface de l'échantillon, dû à la propagation d'ondes ultrasonores, par un interféromètre laser à effet Doppler (Polytec OFV-5000). Par effet du coefficient de Poisson, les ondes longitudinales ont une faible composante transverse. Ainsi, la propagation des ondes ultrasonores induit un déplacement normal à la surface de l'échantillon mesuré par l'interféromètre laser. La face mesurée de l'échantillon est recouverte d'adhésif réflecteur et diffuseur, permettant la mesure avec le laser. De plus, l'échantillon est placé et maintenu sur un support goniométrique qui permet de placer la face mesurée à la normale du faisceau laser. L'excitation ultrasonore est assurée par un transducteur piézoélectrique (Sonaxis CMP83) avec une fréquence centrale de 2 MHz. Le transducteur est excité par un générateur d'impulsions (JSR modèle DPR300). La fréquence du transducteur est choisie pour garantir une excitation temporelle courte et donc un régime de propagation des ondes ultrasonores au sein de l'échantillon. À cause de l'atténuation, les mesures sont réalisées à plus basses fréquences ($< 1,5$ MHz). Le transducteur est placé sur un des sommets de l'échantillon. Les ondes ultrasonores sont transmises à l'échantillon par une goutte de miel utilisée comme agent de couplage entre l'échantillon et le transducteur ultrasonore. L'interféromètre laser effectue un balayage de la surface selon un déplacement radial centré sur la source (Fig. 1). Ce balayage permet de mesurer les vitesses de propagation dans des directions spécifiques. La source étant située à un sommet de l'échantillon, une plage angulaire de 0° à 90° est disponible. Pour compléter la mesure, une seconde plage angulaire de 90° à 180° est mesurée en déplaçant le transducteur ultrasonore à un sommet adjacent de l'échantillon. En chaque point du balayage, une mesure sous forme d'A-scan (amplitude du signal en fonction du temps) est enregistrée. La position des points de mesure du laser (aussi appelés récepteurs) est contrôlée par une plate-forme motorisée (Newport Corporation) attachée à la tête laser.

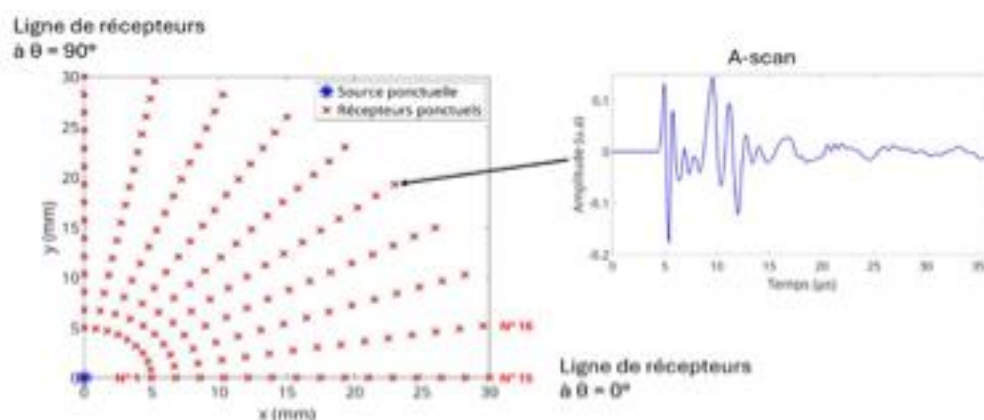


Fig. 1: Points de mesure (récepteurs) lors d'un scan polaire (croix rouges) dans le cas où la sonde ultrasonore est placée sur le sommet inférieur gauche de l'échantillon (étoile bleue) et un exemple d'A-scan associé à l'un des récepteurs.

La plateforme motorisée assure une grande précision sur la distance inter-récepteur ainsi que l'angle de la direction de propagation. L'incertitude sur le temps de vol est égale à la période d'échantillonnage du signal (1/15 MHz). Ainsi, pour chaque direction du plan, la vitesse de la Surface Skimming Compressional Wave (SSCW) est déduite de manière précise en utilisant l'information sur plusieurs récepteurs. Il est important de noter que la source et les récepteurs étant ponctuels, la vitesse mesurée correspond à la vitesse de groupe et non à la vitesse de phase.

Résultats

Une plaque de hêtre débitée en dosse suivant les directions d'anisotropie et loin de la moelle (courbure des cernes négligeables), de dimensions 115,5(L)×45,4(T)×10,3(R) mm et de masse volumique 738 kg/m³, a été caractérisée par interférométrie laser. Afin de montrer au mieux l'anisotropie de cet échantillon, un scan fin a été employé. La région scannée est comprise entre 5 mm et 25 mm de la source ultrasonore, avec un pas angulaire de 2°. Pour chaque direction de propagation, 15 récepteurs espacés uniformément ont été utilisés. Les mesures ont été effectuées avec deux positionnements de sources ultrasonores pour obtenir les vitesses ultrasonores de 0° à 180° (Fig. 2).

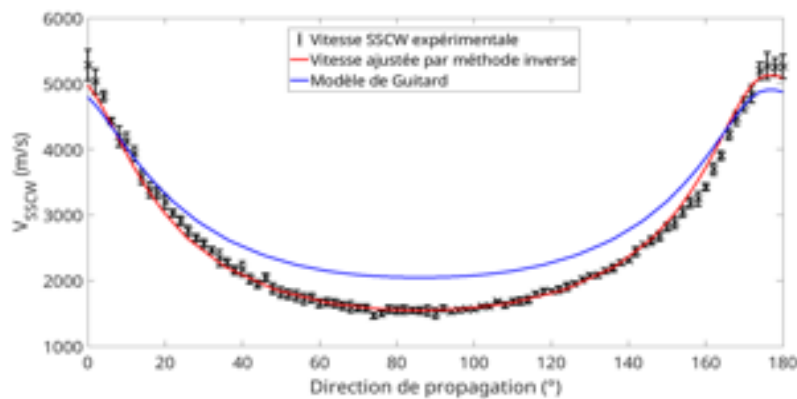


Fig. 2: Vitesse SSCW ajustée par méthode inverse (rouge) à partir des données expérimentales mesurées par interférométrie laser (croix noires)

Dans le modèle analytique de la vitesse de groupe utilisé, quatre coefficients de la matrice d'élasticité interviennent. Dans le plan LT (plan 1,3), il s'agit des deux coefficients longitudinaux C_{TT} et C_{LL} , du coefficient de cisaillement G_{RL} et du coefficient hors diagonale C_{TL} . Ces constantes élastiques ont été déduites à partir de données théoriques obtenues avec le modèle de Guitard et El Amri (1987) à partir de la masse volumique de l'échantillon. Ces données théoriques servent de données d'initialisation du problème inverse.

Tableau 1: Coefficients de la matrice d'élasticité (en GPa) donnés par le modèle de Guitard (1987), obtenus par ajustement des données expérimentales obtenues par interférométrie laser et par analyse modale d'un échantillon de hêtre dans le plan LT (Fig. 2)

Coefficient de la matrice d'élasticité (GPa)	Modèle de Guitard et El Amri (1987)	Interférométrie laser	Analyse modale (Thèse A. Al Fay)
C_{TT}	1,86	1,8 ($\pm 0,3$)	1,87 ($\pm 0,06$)
C_{LL}	17,75	19,4 ($\pm 1,0$)	21,6 ($\pm 0,48$)
C_{TL}	1,36	1,1 ($\pm 0,2$)	-
G_{RL}	1,46	0,9 ($\pm 0,2$)	1,5 ($\pm 0,02$)

Il convient de mentionner que l'incertitude des constantes élastiques trouve son origine dans les barres d'erreur des vitesses, ajustées pour chaque direction. L'incertitude liée à la période d'échantillonnage peut être négligée en comparaison des temps de vol mesurés. La méthode expérimentale utilisant l'interférométrie laser permet la mesure de la vitesse de propagation ultrasonore sur un plan d'anisotropie (ici le plan LT) d'un échantillon de bois, ayant une symétrie orthotrope cartésienne, de 0° à 180°. Cela constitue le principal avantage de cette méthode comparé aux méthodes ultrasonores usuelles ou la goniométrie qui travaille sur des secteurs angulaires limités. À partir de cette mesure de vitesse, quatre coefficients indépendants de la matrice d'élasticité de l'échantillon (C_{TT} , C_{LL} , C_{TL} et G_{RL}) ont été estimés. Le problème inverse utilise un modèle analytique de vitesse de groupe basé sur les équations de Christoffel. Le reste des constantes élastiques peut être estimé par des mesures par interférométrie laser sur les deux autres plans d'anisotropie (plans RL et RT) du même échantillon. Des travaux sont actuellement menés afin de caractériser des échantillons de bois de plus grandes dimensions qui ne peuvent pas être considérés comme orthotrope cartésiens et où la courbure des cernes doit être prise en compte avec un repère d'orthotropie cylindrique (Rémond et al 2025)..

Remerciements

Nous remercions la Région Occitanie et l'Ecole Doctorale I2S (Université de Montpellier) pour leur soutien financier au projet WooFIE.

Références

- Castanié B, Peignon A, Marc C, Eyma F, Cantarel A, Serra J, Curti R, Hadji H, Denaud L, Girardon S, Marcon B (2024) Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review, *Composite Structures*, 329 : 117790.
- Guitard D, El Amri F (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux, *Annales des Sciences Forestières*, 44(3) : 335–358.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin, J (2009) Elasticity and Hooke's law. In: *The rock physics handbook*, second edition, Cambridge University press, 21-80.
- Preziosa C, Mudry M, Launay J, Gilletta F (1981) Détermination des constantes élastiques du bois par une méthode acoustique goniométrique, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série II, 293 : 91-94.
- Reddy SSS, Balasubramaniam K. Krishnamurthy CV, Shankar M (2005) Ultrasonic goniometry immersion techniques for the measurement of elastic moduli, *Composite Structures*, 67(1) : 3-17.
- Rémond V, Rosenkrantz E, Lamy F, Laux D, Augereau F, Ferrandis JY, Dubois F (2025). Mesure de vitesses ultrasonores sur un échantillon de bois en tenant compte de la rotation du repère d'orthotropie. 14^{èmes} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Mont de Marsa