

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

TOULGOAT Killian<sup>1</sup>, SAPEY Grégoire<sup>1</sup>, LAUX Didier<sup>1</sup>, AUGEREAU Franck<sup>1</sup>, ARNOULD Olivier<sup>2</sup>, ROSENKRANTZ Eric<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IES, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

<sup>2</sup>LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

[killian.toulgoat@umontpellier.fr](mailto:killian.toulgoat@umontpellier.fr)

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

### Introduction

Le génie mécanique, en particulier le domaine du transport, a besoin de matériaux très techniques qui ont souvent un impact environnemental élevé causé par leur composition (propriétés effectives moyennes), 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 le domaine de l'éco-construction mais aussi pour le 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 est un obstacle à l'utilisation plus systématique du bois dans la construction et le 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 et qu'une grande hétérogénéité, telle que des nœuds, des gradients hydriques ou un mauvais alignement des fibres (angle de fil) peuvent se produire. Chaque pièce en bois nécessite une caractérisation approfondie avec 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 petit échantillon de bois en mesurant les champs de vitesses acoustiques à sa surface.

### Contexte et objectifs

La méthode ultrasonore usuelle consiste à mesurer la vitesse dans les directions principales des échantillons. Cette méthode est souvent appliquée en utilisant plusieurs échantillons usinés suivant différentes orientations afin d'avoir les faces nécessaires sur lesquelles placer l'émetteur et le récepteur pour effectuer une mesure en transmission. Malheureusement, ces mesures ne permettent généralement de déterminer avec précisions que les coefficients diagonaux de la matrice de rigidité et, lorsque les coefficients sont mesurés sur différents échantillons, ils sont impactés par la variabilité du bois. Des méthodes d'analyse modale, telles que la RUS (Resonant Ultrasound Spectroscopy), sont également utilisées car elles permettent en général d'identifier plus de coefficients élastiques sur un même échantillon. Toutefois suivant la géométrie de l'échantillon, en raison du manque de sensibilité de la mesure à certains coefficients, seuls certains termes diagonaux de la matrice de rigidité (en particulier les modules de cisaillement) peuvent être estimés avec précision (Longo et al 2018).

## Matériel et méthode expérimentale

Les mesures ont tout d'abord été effectuées pour déterminer la matrice de rigidité d'un échantillon isotrope transverse et d'un échantillon orthotrope. L'échantillon isotrope transverse est un composite à matrice époxy contenant des fibres de verre. Ce composite est utilisé pour valider la méthode expérimentale. L'échantillon orthotrope est un cube de hêtre de 20 mm de côté et de densité  $668 \text{ kg/m}^3$  à l'ambiante. S'agissant de premières mesures équivalent à des tests, aucune mesure d'hygrométrie n'a été effectuée sur l'échantillon de bois. L'excitation acoustique est induite par un transducteur piézoélectrique (Sonaxis CMP83) avec une fréquence centrale de 2 MHz et une taille d'élément nominale de 6 mm de diamètre. Le transducteur est excité par un générateur d'impulsion (JSR modèle DPR300). Le transducteur est placé sur un sommet de l'échantillon. Les ondes acoustiques sont transmises à l'échantillon par une goutte de miel (utilisé comme agent de couplage) et leur déplacement est mesuré sur toute une face de l'échantillon à l'aide d'un interféromètre laser (Polytec OFV-5000). En effet, grâce à l'effet Poisson, toutes les ondes acoustiques ont une composante normale à la face, même les ondes de compression, ce qui permet de les mesurer avec l'interféromètre laser. En balayant la surface avec ce laser, on capture ainsi la propagation des fronts d'onde, ce qui permet d'estimer leurs vitesses. La position des points de mesure laser, correspondant aux récepteurs, est contrôlée par une plateforme motorisée avec une précision en déplacement de  $1 \mu\text{m}$ . Enfin, la vitesse de l'onde de compression est déterminée pour chaque angle en calculant le temps de vol relatif entre la source ponctuelle et chaque récepteur pour une direction de propagation donnée. La source et les récepteurs étant placés avec précision, l'incertitude sur la mesure de la vitesse est faible (de l'ordre de  $\pm 100 \text{ m/s}$ ).

## Résultats

Lors des mesures expérimentales ultrasonores, il peut y avoir une ambiguïté concernant la vitesse mesurée. En effet, il existe la vitesse de groupe, qui est la vitesse du trajet direct entre la source et le récepteur, et la vitesse de phase qui correspond à la vitesse du front d'onde. Ces deux vitesses ont été tracées sur la Fig. 1.

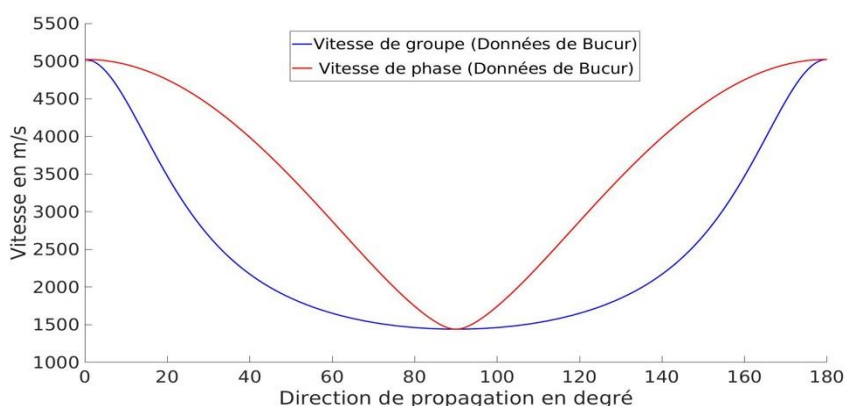


Fig. 1 : Comparaison des vitesses ultrasonores dans un échantillon de hêtre dans le plan LT obtenues à partir des modèles analytiques des vitesses de phase et de groupe en utilisant les équations de Christoffel (Mavko et al 2009) et les coefficients mesurés par Bucur et Archer (1984)

On observe un écart important entre la vitesse de groupe et la vitesse de phase. Cet écart est d'autant plus important que la direction de propagation ne correspond pas à une direction principale. En effet, dans le sens du fil ( $0^\circ$  ou  $180^\circ$ ) ou perpendiculairement au fil ( $90^\circ$ ), la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe. Dans notre cas, une vitesse de groupe est mesurée expérimentalement sans ambiguïté, car la source et les récepteurs sont ponctuels. En effet, le contact entre la source et l'échantillon se fait en un point (un des sommets) et la

dimension des récepteurs est celle de la tâche focale du laser mesurant plusieurs centaines de micromètres de diamètre. Cette ambiguïté entre les deux vitesses pose souvent des problèmes d'interprétation des mesures dans les milieux anisotropes (Dellinger et Vernik 1994).

La première série de mesures a été effectuée dans le plan longitudinal tangentiel (LT) du cube de hêtre. La vitesse des ultrasons en fonction de la direction de propagation est donnée sur la Fig. 2. Les données expérimentales sont comparées aux vitesses de groupe calculées analytiquement à partir des équations de Christoffel (Mavko et al 2009) en utilisant la review des coefficients de rigidité du hêtre donnée dans Longo et al (2018). A partir des coefficients extrema, l'intervalle de confiance des vitesses a été tracé sur la Fig. 2.

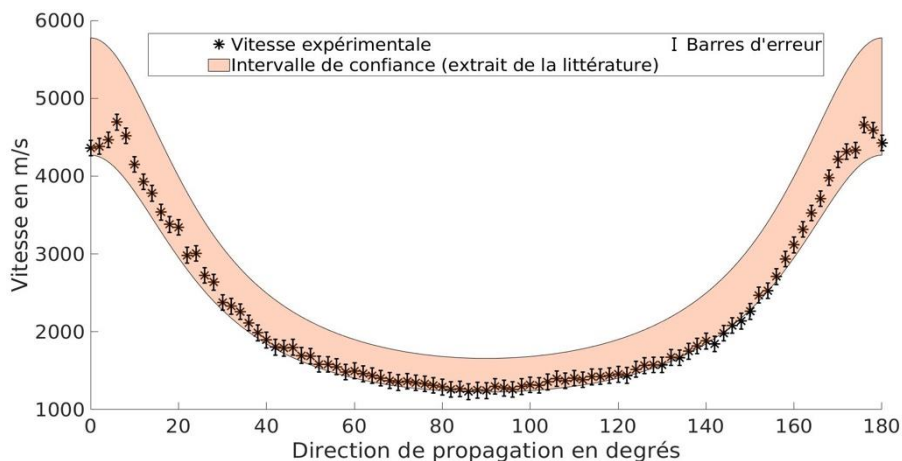


Fig. 2 : Comparaison des vitesses ultrasonores expérimentales d'un échantillon de hêtre dans le plan LT avec les données recensées dans la littérature (Longo et al 2018) ; les barres d'erreur sont représentées à une fois les écarts-types

Les vitesses expérimentales ont été ajustées par méthode inverse, la courbe ajustée est tracée sur la Fig. 3. L'initialisation est donnée par le modèle de Guitard et El Amri (1987) qui permet d'estimer les coefficients de la matrice de rigidité (Tab. 1) pour un échantillon de feuillus à partir de sa masse volumique. Les coefficients de la matrice de rigidité qui permettent d'ajuster les données expérimentales via l'identification inverse sont donnés dans le Tab. 1 également.

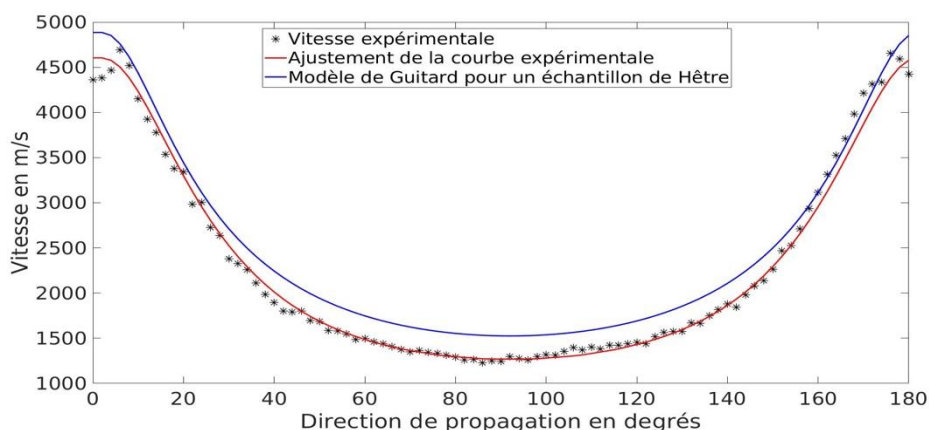


Fig. 3 : Ajustement de la courbe expérimentale par méthode inverse à partir des coefficients élastiques donnés par le modèle de Guitard et El Amri (1987)

Tab. 1 : Coefficients de la matrice de rigidité (en GPa) donnés par le modèle de Guitard (1987) et obtenus par ajustement des données expérimentales d'un échantillon de hêtre dans le plan LT (Fig. 3)

Coefficients de la matrice de rigidité (GPa)	Modèle de Guitard – initialisation (GPa)	Identification par méthode inverse (GPa)
$C_{TT}$	1,57	1,08
$C_{LL}$	16,09	14,29
$C_{LT}$	1,15	1,28
$G_{LT}$	1,02	0,99

## Conclusion et perspectives

Ce résumé présente une nouvelle méthode de caractérisation des propriétés mécaniques des échantillons bois. La méthode s'appuie sur la mesure de la propagation du front d'onde ultrasonore en différents points de l'une des surfaces de l'échantillon. La vitesse des ondes de compression est mesurée dans l'un des plans d'anisotropie. On peut noter que, en fonction des conditions expérimentales, il est très important d'adapter le modèle analytique. Dans le cas de la méthode présentée dans ce résumé, la vitesse mesurée est celle de groupe. Une limitation est que cette méthode expérimentale est actuellement appliquée à de petits échantillons de bois coupés loin de la moelle et bien orientés. Cela nous permet de supposer une symétrie orthotrope cartésienne plutôt qu'un comportement orthotrope en repère cylindrique. Une comparaison entre les données expérimentales et la vitesse analytique dans le plan LT d'un échantillon cubique de hêtre montre le potentiel de cette méthode pour déterminer l'ensemble de la matrice de rigidité par méthode inverse.

## Remerciements

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

## Références

- Bucur V, Archer RR (1984) Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, 18(4), p. 255-265.
- 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.
- Dellinger J, Vernik L (1994) Do traveltimes in pulse-transmission experiments yield anisotropic group or phase velocities? *Geophysics*, 59(11), p. 1774-1779.
- 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), p. 335–358.
- Longo R, Laux D, Pagano S, Delaunay T, Le Clézio E, Arnould O (2018) Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): A comprehensive study, *Wood Science and Technology*, 52, p. 383-402.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin, J (2009) Elasticity and Hooke's law. In: *The rock physics handbook*, second edition. Cambridge University press, p. 21-80.