

Mesure de vitesses ultrasonores sur un échantillon de bois en tenant compte de la rotation du repère d'orthotropie

REMOND Valentine^{1,2}, ROSENKRANTZ Éric², LAMY Frédéric¹, LAUX Didier²,
AUGEREAU Franck², FERRANDIS Jean-Yves², DUBOIS Frédéric¹

¹Laboratoire de Génie civil et Durabilité GC2D, Univ. Limoges, 19300 Egletons, France

²IES, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

valentine.remond@unilim.fr

Mots clefs : structure bois ; orthotrope cylindrique ; méthode ultrasonore ; équation de Christoffel ; interférométrie laser

Contexte et objectifs

Ces dernières années, la construction bois connaît un essor en réponse à des exigences environnementales de plus en plus strictes. Cependant, des difficultés liées à l'anisotropie du bois et à son comportement hygroscopique, compliquent l'utilisation de méthodes de suivi dynamique des propriétés mécaniques, de l'état hydrique et de l'état de fissuration des ouvrages en place. Les méthodes de contrôle non destructif sont largement étudiées pour répondre à ce besoin. Parmi elles, l'émission acoustique permet la détection de fissures et les méthodes ultrasonores ou l'analyse modale sont utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques du bois (Longo et al 2018).

Une mesure des vitesses ultrasonores par interférométrie laser a récemment été développée sur de petits échantillons de bois de 2 cm de côté orientés selon les axes principaux et considérés orthotropes cartésiens (Toulgoat et al 2024). Il est ici question d'utiliser cette même méthode de mesure sur un échantillon de bois de dimensions plus importantes afin de vérifier la fiabilité de la mesure en comparant les vitesses expérimentales et analytiques. Bien que la zone scannée soit limitée par l'amplitude du moteur du laser, donc identique à celle utilisée sur un petit échantillon, le changement d'échelle impose de prendre en compte la courbure des cernes dans le modèle analytique. L'échantillon est donc considéré comme étant orthotrope cylindrique plutôt que cartésien.

Matériels et méthodes

La méthode par interférométrie laser utilisée est détaillée dans Toulgoat et al (2024). Une sonde ultrasonore de 2 MHz est positionnée sur un coin de l'échantillon et est utilisée comme émetteur. Le laser balaye différents points de la surface (récepteurs) et mesure leur déplacement normal. Le suivi de la propagation de l'onde longitudinale de surface (skimming) permet de déduire sa vitesse, qui est équivalente à celle de l'onde longitudinale de volume v_p . Un scan polaire est réalisé avec 15 points de mesure par angle et un pas angulaire $d\theta = 10^\circ$. La vitesse de l'onde longitudinale pour chaque angle θ peut alors être déterminée.

Echantillon

L'étude a été réalisée sur un unique cube de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) de 13 cm de côté (Fig. 1). Le fil du bois est considéré bien aligné avec les arêtes du cube. Les mesures sont réalisées sur deux faces : la face 3 assimilée au plan radial-longitudinal (RL) et la face 1 correspondant au plan RL après rotation du repère d'orthotropie autour de l'axe longitudinal

d'un angle $\alpha = +/ - 30^\circ$ (noté RL_{30}). Les zones scannées de la face 3 et de la face 1 (représentées en rouge sur la Fig. 1) mesurent respectivement 28 mm et 18 mm de côté.

L'angle α varie en fonction du cerne considéré le long de l'arête du cube. Cependant, sur une hauteur de 18 mm, α varie très peu et peut donc être considéré constant dans la zone scannée. Ici, α est calculé comme étant égale à la moyenne des angles mesurés sur les quatre cerne présents dans la zone scannée de la face 1. Les mesures d'angles sont réalisées à l'aide d'AutoCAD, en traçant pour chaque cerne, la tangente au point situé à l'arête entre les faces 1 et 5. In fine, on cherche α tel que la direction tangentielle T' soit localement parallèle aux cerne (Fig. 2).

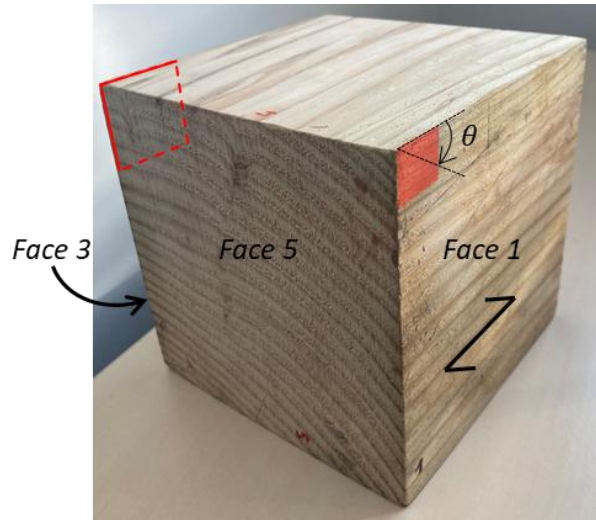


Fig. 1 : Echantillon utilisé : coins scannés et numérotation des faces



Fig. 2 : Angles de rotation du repère d'orthotropie pour les faces 1 et 3

Modèle analytique

Les coefficients élastiques C_{ij} d'un cube issu de la même grume ont été déterminées précédemment par Afoutou et al (2024). Ces valeurs servent de données d'entrée pour alimenter le modèle analytique des vitesses ultrasonores. Le modèle permet d'obtenir la vitesse de groupe, à partir des équations de Christoffel (Mavko et al 2009). En utilisant la matrice de rigidité C exprimée dans le repère initial et la matrice de Bond M , une nouvelle matrice C' est calculée après rotation du repère d'orthotropie autour de l'axe longitudinal (Rokhlin et al 2011). C' correspond donc à la matrice de rigidité exprimée dans le repère (R', T', L) .

$$(C' = MCM^T) \quad (1)$$

Ainsi, ce modèle permet de comparer directement les mesures expérimentales aux vitesses théoriques, en tenant compte de l'angle α du plan étudié.

Résultats et discussion

Une atténuation plus importante a été remarquée pour la mesure dans le plan RL_{30} , par rapport à la mesure dans le plan RL. Cette atténuation a nécessité de réduire la zone scannée à 18 mm plutôt qu'aux 28 mm initialement utilisés afin de pouvoir traiter correctement les signaux.

Les résultats sont présentés en Fig. 3. Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à la méthode de traitement des signaux. Les vitesses expérimentales obtenues dans les deux plans sont globalement cohérentes avec le modèle analytique associé. Comme attendu, les vitesses dans le plan RL_{30} sont inférieures aux vitesses mesurées dans le plan RL. Cela se traduit par le fait que l'échantillon présente un comportement plus anisotrope dans le plan RL_{30} que dans le plan RL. En effet, plus l'angle de rotation du repère est élevé, plus l'orientation du plan étudié tend vers le plan longitudinal-tangentiel (LT), le plus anisotrope.

Toutefois, des différences notables sont observées en ce qui concerne les vitesses analytiques : pour $\theta > 40^\circ$, les vitesses expérimentales dans le plan RL sont supérieures aux vitesses analytiques, tandis que dans le plan RL_{30} elles sont inférieures. L'effet de la rotation du repère semble donc plus marqué expérimentalement que dans le modèle analytique. Le modèle analytique prévoit un écart de vitesse maximum entre les deux plans de 150 m/s à $\theta = 90^\circ$, tandis que l'écart observé expérimentalement à $\theta = 90^\circ$, est d'environ 600 m/s.

Sachant que l'angle de rotation du repère a été estimé par une mesure réalisée sur le logiciel AutoCAD et que les cernes ne sont que partiellement visibles sur l'échantillon, il est probable qu'il y ait une erreur dans l'estimation de α . Par ailleurs, le modèle analytique avec lequel sont comparées les mesures expérimentales est à interpréter avec précaution. En effet, les coefficients de la matrice de rigidité utilisés proviennent d'un échantillon différent et sont issus de mesures réalisées sur tout le volume de l'échantillon. Ici en revanche, les vitesses sont mesurées en surface, sur une zone très localisée de l'échantillon et ne sont peut-être pas représentatives du comportement de l'ensemble du cube.

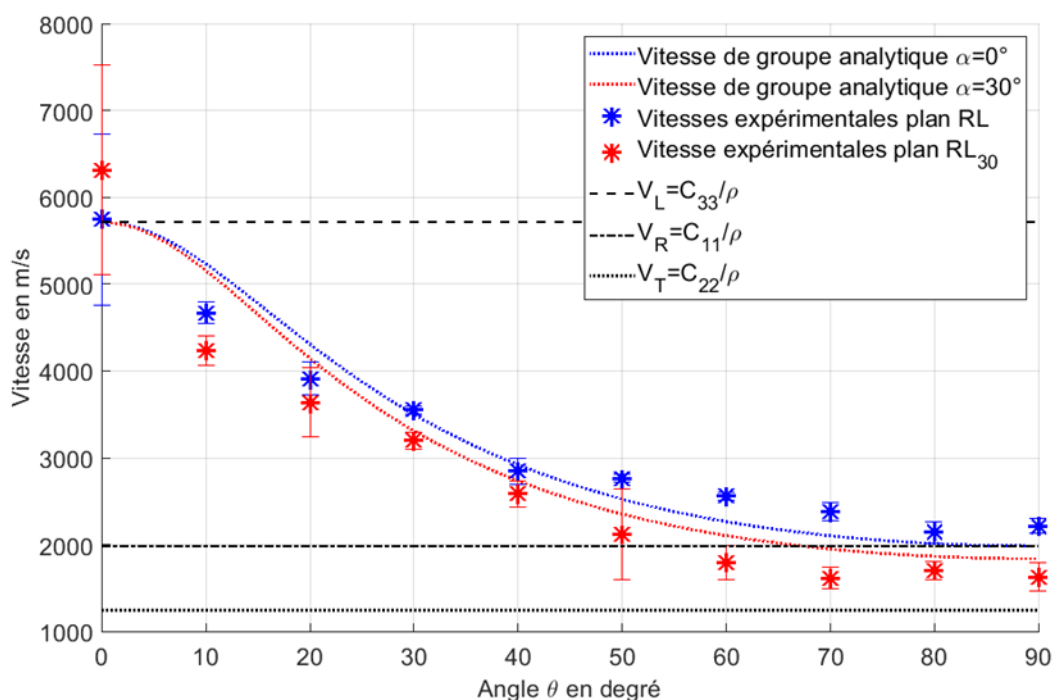


Fig. 3 : Comparaison des vitesses expérimentales et analytiques dans le plan RL et dans le plan RL_{30}

Enfin, dans les deux cas étudiés, la mesure dans le sens des fibres ($\theta=0^\circ$) est peu précise. Certaines mesures dans le plan RL_{30} ont également une variabilité importante, comme le montrent les grandes barres d'erreur.

Conclusion et perspectives

La prise en compte de la rotation du repère d'orthotropie dans le modèle analytique a permis une première comparaison des vitesses de propagation ultrasonores expérimentales et analytiques. L'application de la méthode de mesure par interférométrie laser sur de gros échantillons permet d'obtenir des mesures cohérentes mais, pour l'instant, moins précises que sur des petits échantillons soigneusement usinés. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que : la mesure hors des plans principaux, la variabilité locale de la courbure des cernes, des coins de l'échantillon légèrement abîmés. Ces facteurs, caractéristiques de l'hétérogénéité et de l'anisotropie du bois, pourraient aussi être rencontrés dans des éléments structuraux. De plus, les résultats expérimentaux présentés sont issus d'une seule mesure. Par la suite, il faudrait affiner les résultats en réalisant plusieurs essais afin d'évaluer la reproductibilité.

Finalement, bien que la méthode par interférométrie laser soit adaptée pour des mesures en laboratoire, un dispositif différent devra être utilisé pour des mesures sur des ouvrages in-situ. Nous sommes, entre autres, limités par l'amplitude du moteur du laser qui ne permet pas de mesure sur des longues distances. Pour transposer la méthode aux structures en bois, il est envisageable d'utiliser un système initialement prévu pour de l'émission acoustique, comme système ultrasonore. Les récepteurs utilisés en émission acoustique sont notamment plus sensibles aux signaux faiblement énergétiques. Cette propriété les rend appropriés pour la mesure de signaux acoustiques se propageant sur de grandes distances dans des matériaux atténuants, ce qui est le cas lors de l'étude d'éléments de structure en bois.

Références

- Afoutou J.S, Zhang X, Dubois F (2024) Full elastic properties characterization of wood by ultrasound using a single sample, *Wood Science and Technology*, 58: 403–422.
- Longo R, Laux D, Pagano S, Delaunay T, Le Clézio E, Arnould O (2017) Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): a comprehensive study, *Wood Science and Technology*, 52: 383–402.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J (2009) Elasticity and Hooke's law. In: *The rock physics handbook*, second edition. Cambridge University press, 21-80.
- Rokhlin S, Chimenti D, Nagy P (2011) *Physical Ultrasonics of Composites*, Oxford University Press, 378 p.
- Toulgoat K, Sapey G, Laux D, Augereau F, Arnould O, Rosenkrantz E (2024) Caractérisation élastique complète d'un petit échantillon de bois par interférométrie laser, 13^{èmes} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Nantes, 20-22 novembre 2024.