



HAL
open science

Caractérisation ultrasonore du bois

Emmanuel Le Clezio, Jérôme Fortineau, Guy Feuillard, Loïc Brancheriau,
Philippe Lasaygues

► **To cite this version:**

Emmanuel Le Clezio, Jérôme Fortineau, Guy Feuillard, Loïc Brancheriau, Philippe Lasaygues. Caractérisation ultrasonore du bois. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00554455

HAL Id: hal-00554455

<https://hal.science/hal-00554455>

Submitted on 10 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation ultrasonore du bois

Emmanuel Le Clézio¹, Jérôme Fortineau¹, Guy Feuillard¹, Loïc Brancheriau², Philippe Lasaygues³

¹ Université François Rabelais de Tours, CNRS FR 3110, INSERM U 930, École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire,

Rue de la Chocolaterie BP 3410, F-41034 BLOIS CEDEX, emmanuel.leclezio@univ-tours.fr

² CIRAD - Département PERSYST, Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux

UPR 40, Production et valorisation des bois tropicaux, TA B-40/16, 73 Rue Jean François Breton, 34398 Montpellier Cedex 5

³ Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Équipe "Propagation & Imagerie"

UPR CNRS 7051, 31, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, France

Ce travail, principalement expérimental, s'insère dans un projet dont le but est de développer une technique de contrôle non destructif d'arbres sur pied. Dans une première approche, des mesures de coefficients de transmission d'ondes ultrasonores sont réalisées sur des échantillons plans de chêne. Des cartographies du bois sont ainsi effectuées dans les trois plans de symétrie principaux du matériau. Elles permettent, dans un premier temps, de révéler la microstructure du matériau. La comparaison de ces résultats avec des mesures en réflexion permet, de plus, d'identifier l'impédance acoustique du matériau et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en son sein. Il est ainsi possible de remonter aux propriétés visco-élastiques du bois. L'analyse de ces résultats permet alors de quantifier la dispersion présente sur ces caractéristiques et de les confronter aux données présentes dans la littérature. En particulier, le degré d'anisotropie du matériau sera discuté. Cette première étude permet donc d'appréhender le phénomène de propagation des ondes ultrasonores au sein d'un matériau inhomogène visco-élastique réel tel que le bois et constitue une étape préliminaire nécessaire au contrôle non destructif de la structure sur pied.

1 Introduction

Le bois est un milieu naturel et vivant dont la préservation et le contrôle sont actuellement reconnus comme priorités internationales. D'un point de vue écologique tout d'abord, il est fondamental de pouvoir recenser les différentes essences, et d'en connaître les caractéristiques. Du point de vue du développement économique ensuite, les arbres constituent une source de revenu agricole non négligeable, et le bois un matériau de construction en redécouverte (écologie, économie d'énergie, maisons vertes ...). Les producteurs ont alors besoin de méthodes de caractérisation et de contrôle efficaces permettant de déterminer les propriétés mécaniques de l'arbre et de s'assurer de sa qualité.

Le bois est un matériau biologique aux caractéristiques structurales complexes. Il est anisotrope, multicouche, à symétrie radiale, et ses caractéristiques se modifient en fonction des contraintes environnementales ou de son âge [1, 2]. La littérature fait état de nombreux travaux de tomographie ultrasonore, visant à caractériser et à contrôler l'intégrité du bois [3, 4, 5, 6, 7]. L'étude présentée ici s'insère dans le projet ANR BioGMid (Biological growth medium integrity diagnoses using bi-modality tomographies) dont le but est de développer une technique de contrôle non destructif d'arbres sur pied. Principalement expérimentale, elle constitue une étape préliminaire à la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores au sein d'un matériau inhomogène visco-élastique réel tel que le bois, en vue de son contrôle.

La première section présente les échantillons plans de chêne qui sont étudiés par la suite, et le dispositif expérimental permettant de réaliser des mesures de coefficients de transmission et de réflexion d'ondes ultrasonores dans les trois plans de symétrie principaux du matériau. Elles conduisent à la réalisation de cartographies du bois présentées dans la section suivante. Celles-ci permettent, dans un premier temps, de révéler la microstructure du matériau. Dans un second temps, il est possible d'en extraire des caractéristiques du matériau telles que la vitesse de propagation des ondes longitudinales s'y propageant, l'impédance acoustique, la masse volumique et le module de rigidité longitudinal du matériau [8, 9]. La présence de défauts structuraux du bois est aussi mise en évidence. Ces différents résultats sont discutés et confrontés à des données issues de la littérature. Leur analyse permet de quantifier la dispersion présente sur ces caractéristiques, et le degré d'anisotropie du matériau est discuté.

2 Dispositif expérimental

2.1 Échantillons

Le bois peut être modélisé, en première approche, comme un matériau cylindrique multicouche. Un tronc idéal est alors considéré comme possédant une symétrie orthotrope cylindrique. Trois plans principaux sont classiquement définis à partir des directions longitudinale (\vec{L}), radiale (\vec{R}) et tangentielle (\vec{T}) [2]. Présentés sur la figure 1, ils sont respectivement notés TR pour la sec-

tion transversale, LR pour un quartier et LT pour une dosse.

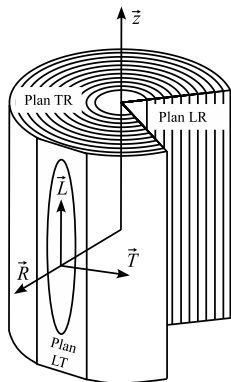


FIGURE 1 – Plans de symétrie du bois.

Dans l’objectif de développer des méthodes de contrôle d’arbres sur pied, il a été choisi d’étudier du bois de chêne fraîchement coupé. Trois échantillons, d’épaisseur 0,5 mm, ont donc été taillés dans un tronc de chêne (figure 2), et conservés dans de l’eau. De plus, pour éviter de chauffer le matériau, il a été choisi de ne pas poncer les échantillons étudiés. Leur état de surface correspond donc à celui obtenu après découpe, et sera pris en compte dans les analyses réalisées dans les sections suivantes.



FIGURE 2 – Échantillons de bois découpés dans les trois plans caractéristiques du bois.

2.2 Banc de mesures ultrasonores et traitements associés

Le dispositif expérimental utilisé pour cartographier les échantillons de bois est présenté sur la figure 3. L’échantillon plan est immergé dans une cuve à eau et placé entre deux transducteurs réglés orthogonalement au plan de l’échantillon. Les transducteurs (ref. Technisonic ILD-0106-GP) possèdent une fréquence centrale de 0,8 MHz et un diamètre de 0,75 pouces.

Pour chaque point d’une cartographie, les coefficients de transmission et de réflexion sont calculés comme le rapport des spectres des signaux transmis et réfléchis à ceux de référence. Ces valeurs sont prises à la fréquence centrale des transducteurs. Pour la transmission, la mesure de référence correspond à la propagation des ultrasons entre les deux transducteurs, en absence d’échantillon, c’est-à-dire dans l’eau. Pour la réflexion, elle correspond à un écho sur un matériau à très forte rupture d’impédance acoustique avec l’eau, ici, l’acier. La réflexion, alors considérée comme totale, permet d’effectuer une mesure en insertion substitution. La charge

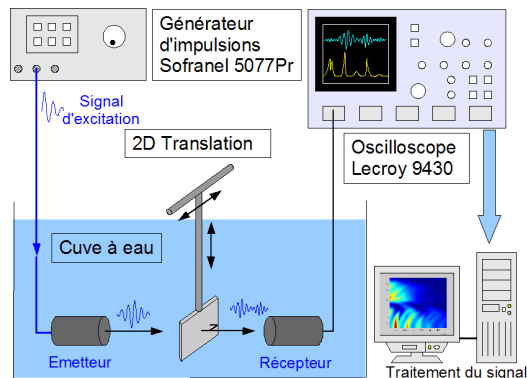


FIGURE 3 – Dispositif expérimental.

acoustique en face avant du transducteur étant la même pour les deux mesures (référence et avec échantillon), l’énergie de l’onde délivrée par le transducteur est la même dans les deux cas. De plus, les effets de diffraction sont corrigés. La célérité v_l est ensuite identifiée à partir du décalage temporel entre le signal de transmission et celui de référence. Le signal acquis en réflexion permet de déterminer l’impédance acoustique $Z = \rho v_l$ en chaque point. À partir de ces deux données, la masse volumique locale ρ moyennée sur la surface du faisceau acoustique est déduite. Il est enfin possible de déterminer le module de rigidité longitudinal $C_{ll} = \rho v_l^2$. L’échantillon est ensuite déplacé le long des deux axes perpendiculaires au faisceau acoustique, par pas de 0,5 mm, permettant ainsi de réaliser une cartographie de toute une zone de l’échantillon.

3 Résultats expérimentaux

Dans cette section sont successivement présentés les résultats expérimentaux et les caractéristiques identifiées pour les trois plans de symétrie TR, LR et LT.

3.1 Plan TR

La figure 4(a) présente les mesures en transmission réalisées sur l’échantillon TR. Elles correspondent à une propagation le long des fibres du matériau, et les propriétés déduites de ces mesures seront donc caractéristiques de la direction longitudinale \vec{L} du bois. De manière similaire, la figure 4(b) présente les mesures en réflexion. Ces deux cartographies révèlent la microstructure du bois. En particulier, la symétrie cylindrique y est clairement visible. Trois zones peuvent clairement être distinguées : le cœur de l’arbre (A), une partie l’entourant (B) et la périphérie (C). Notons que celle-ci ne correspond cependant pas au bois jeune, les échantillons ayant dû être taillés de façon parallélépipédique pour les adapter au dispositif expérimental. La vitesse v_l des ondes longitudinales se propageant au sein de l’échantillon, déduite des mesures de transmission, est présentée sur la figure 4(c). Les trois zones y sont clairement visibles. Les ondes longitudinales se propageant dans le cœur possèdent une faible célérité, de l’ordre de 3200 m.s^{-1} . La seconde zone est marquée par une augmentation de la vitesse jusqu’à 3600 m.s^{-1} , la périphérie ayant des valeurs nettement plus élevées,

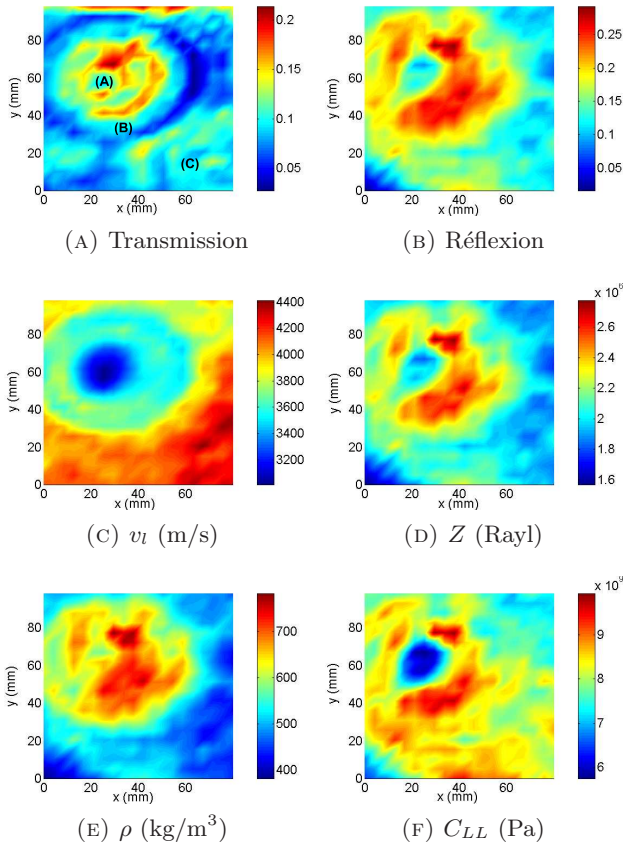


FIGURE 4 – Échantillon de bois dans le plan TR.

de 4000 à 4400 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'impédance acoustique Z (figure 4(d)), déduite des mesures de réflexion seules, varie de 1,6 à 2,7 MRayl, la partie entourant directement le centre du tronc possédant une impédance plus importante que le cœur et l'extérieur. Cependant, comme noté précédemment, les mesures en réflexion (figure 4(b)) sont plus sensibles à l'état de surface de l'échantillon que celles en transmission. Ce phénomène est en particulier visible sur la zone située en bas à gauche de la cartographie 4(b). Elle correspond à un bord de coupe dont l'état de surface est dégradé, conduisant à une mauvaise réflexion dont les effets se répercuteront dans les cartographies suivantes. Par conséquent, les résultats issus de cette partie du graphe seront considérés comme erronés et ne seront plus discutés par la suite. La masse volumique du matériau ρ (figure 4(e)) est ensuite déduite des caractéristiques de vitesse et d'impédance acoustique. Il ne s'agit donc plus d'une détermination directe. Plus faible au centre de l'échantillon et à l'extérieur, entre de 400 et 600 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, elle peut atteindre 800 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en périphérie, pour une masse volumique moyenne de 543,9 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ légèrement inférieure aux données de la littérature avoisinant les 750 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [1, 2]. Finalement, la constante de rigidité (figure 4(f)), notée ici C_{LL} , est déduite des mesures de vitesses et de masse volumique. Elle varie entre 6 et 10 GPa, pour un module moyen de 8,33 GPa, le cœur du bois étant plus souple que les parties externes. Rappelons que les caractéristiques identifiées ici correspondent à la seule direction \vec{L} identifiée sur la figure 1. Les variations notées révèlent donc d'une dispersion des caractéristiques longitudinales du bois, du cœur vers la circonférence.

3.2 Plan LR

Les résultats présentés sur la figure 5 correspondent à une propagation des ondes longitudinales tangentiellement aux cernes du matériau, le rayon de courbure du matériau étant beaucoup plus grand que l'épaisseur de l'échantillon. Par conséquent, les propriétés déduites de ces mesures seront caractéristiques de la direction \vec{T} . La figure 5(a) présente les mesures en transmission réalisées sur l'échantillon noté LR. La direction \vec{L} étant verticale, la structure lignée du bois y est clairement visible, les différences notables de transmission n'apparaissant que sur l'axe horizontal. En particulier, une zone de relativement forte transmission est remarquable entre $x = 50$ mm et $x = 80$ mm. Cette bande présente une certaine inhomogénéité autour de $y = 60$ mm, conduisant à une faible transmission. Cette zone, fortement échogène, apparaît de même sur la figure 5(b). Il s'agit donc d'un défaut du matériau perturbant à la fois la transmission et la réflexion des ultrasons. Ce défaut, présent sur la

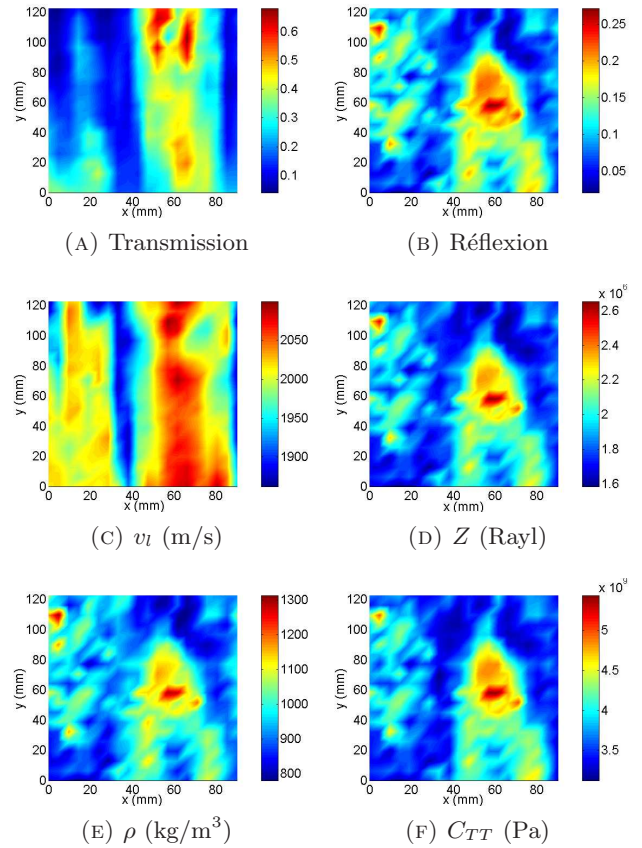


FIGURE 5 – Échantillon de bois dans le plan LR.

cartographie de vitesse 5(c) est une zone de relativement forte célérité des ondes ultrasonores, autour de 2100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. La vitesse de l'onde longitudinale s'étend globalement de 1850 à 2100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, les ondes étant plus rapides dans la partie située entre $x = 50$ mm et $x = 80$ mm. Ces célérités sont logiquement inférieures à celles mesurées dans la direction \vec{L} , l'onde de compression se propageant ici dans des directions perpendiculaires aux fibres. L'impédance acoustique présentée sur la figure 5(d) varie entre 1,6 à 2,6 MRayl, de manière similaire au plan TR. La figure 5(e) présente des valeurs de masse volumique variant entre 800 et 1300 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

pour une masse volumique moyenne de $953,2 \text{ kg.m}^{-3}$. En effet, la grande majorité de la cartographie correspond à une masse volumique oscillant entre 800 et 900 kg.m^{-3} , les fortes valeurs pouvant être associées à des inhomogénéités du matériau. Notons que la masse volumique moyenne est du même ordre de grandeur que celle identifiée dans le plan TR, dans la zone (B) de la figure 4(a). Ceci indique que, bien que réalisées dans le plan LR, les mesures ont été effectuées sur un échantillon issu d'une zone du bois relativement éloignée du cœur de l'arbre. La figure 5(f) présente la cartographie du module de rigidité longitudinale, noté ici C_{TT} car correspondant à une propagation des ultrasons dans la direction tangentielle. C_{TT} varie de 3 à 5,5 GPa, pour une valeur moyenne de 3,79 GPa. Notons que seul le défaut précédemment cité possède un module C_{TT} pouvant atteindre des valeurs supérieures à 5,5 GPa, proches de celles identifiées dans le plan TR. Ceci semble indiquer que le défaut correspond à un début de branche, les fibres ayant localement subi une rotation. Ceci est confirmé par les fortes célérités mesurées dans la zone du défaut. Pour un défaut de type fissure ou pourrissement du matériau, le module de rigidité aurait été nettement plus faible que le module moyen.

3.3 Plan LT

La figure 6 présente les mesures en transmission (6(a)) et en réflexion (6(b)) réalisées sur l'échantillon LT. Les figures 6(c), 6(d), 6(e) et 6(f) présentent res-

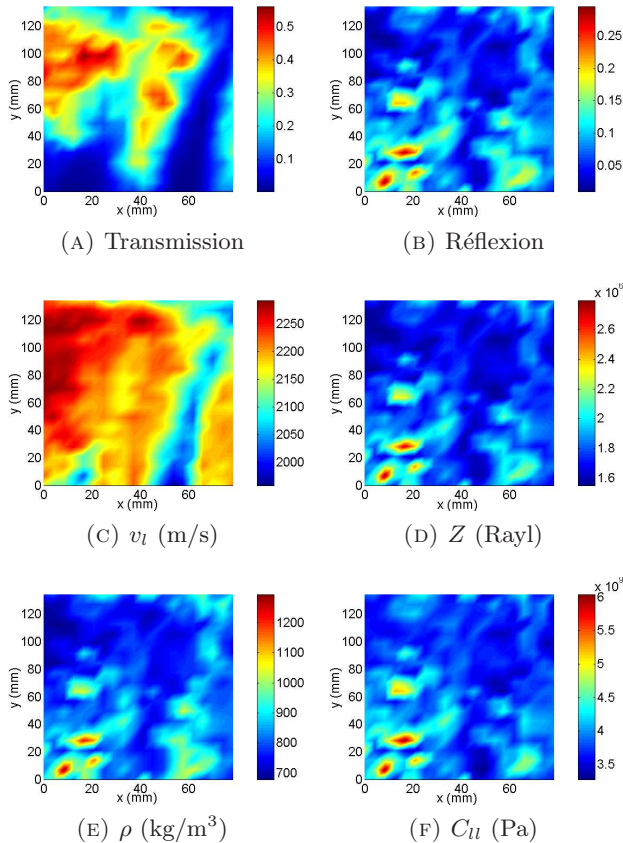


FIGURE 6 – Échantillon de bois dans le plan LT.

pectivement les caractéristiques de vitesse longitudinale, d'impédance acoustique, de masse volumique et de ri-

gidité longitudinale déduites des mesures de transmission et de réflexion par une procédure similaire à celle présentée dans la section 3.1. La vitesse de l'onde longitudinale varie de 1950 à 2300 m.s^{-1} . Ces valeurs sont similaires à celles identifiées dans le plan LR, l'onde ultrasonore se propageant perpendiculairement aux fibres du bois. Il est cependant important de noter qu'ici les ultrasons se propagent dans des directions associant les propriétés \vec{R} et \vec{T} du matériau. Comme pour le plan LR, l'impédance acoustique varie entre 1,6 et 2,6 MRayl. Notons, là encore, la présence d'une zone échogène et à forte impédance acoustique dans le bas gauche de la cartographie. La masse volumique varie globalement entre 700 et 900 kg.m^{-3} , pour une masse volumique moyenne de 822,6 kg.m^{-3} . Le défaut est toujours visible, sa masse volumique pouvant être supérieure à 1200 kg.m^{-3} . Ces valeurs sont similaires à celles identifiées dans le plan LR. Finalement, la constante de rigidité longitudinale, notée C_u , varie de 3 à 6 GPa, pour une valeur moyenne de 3,89 GPa. L'inhomogénéité possède un module de rigidité beaucoup plus élevé, autour de 6 GPa. Comme pour le plan LR, il s'agit ici vraisemblablement d'une zone correspondant à un début de branche. Rappelons que le module de rigidité longitudinale C_u correspond à un mélange des caractéristiques \vec{R} et \vec{T} , l'onde se propageant longitudinalement dans une direction perpendiculaire au plan LT (figure 1). La loi de mélange dépendant évidemment de la profondeur à laquelle l'échantillon a été découpé, il est ici relativement difficile d'extraire les données R et T de ces mesures. Néanmoins, les résultats présentés ici et ceux de la section suivante permettront de quantifier le degré d'inhomogénéité de ces caractéristiques.

4 Analyse des résultats

Les caractéristiques moyennes des bois feuillus sont fournies par [1] sous forme de modules d'Young et de coefficients de Poisson. Elles conduisent à la matrice de rigidité suivante :

$$C = \begin{bmatrix} 2.57 & 1.02 & 1.47 & 0 & 0 & 0 \\ 1.02 & 1.45 & 1.07 & 0 & 0 & 0 \\ 1.47 & 1.07 & 15.46 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.37 \end{bmatrix} \quad (\text{GPa}). \quad (1)$$

Les propriétés longitudinales sont regroupées dans la table 1 et comparées à celles identifiées pour le chêne dans les sections précédentes. De même, le tableau 2

| Direction | Lit. [1] | TR→L | LT→R, T | LR→T |
|---------------|----------|-------|---------|-------|
| Longitudinale | 15, 46 | 8, 33 | | |
| Transversale | 1, 45 | | | 3, 79 |
| Radiale | 2, 56 | | 3, 89 | |

TABLE 1 – Rigidités dans les directions caractéristiques du chêne.

présente les facteurs d'anisotropie f_a du matériau. Ceux-ci correspondent au rapport des caractéristiques du bois

dans une de ses directions principales avec celles issues d'une autre direction.

| f_a | Lit. [1] | Mesures US |
|-------|----------|------------|
| L/T | 10,6 | 2,20 |
| L/R | 6,0 | 2,14 |
| R/T | 1,86 | 1,03 |

TABLE 2 – Facteurs d'anisotropie f_a du chêne.

Bien que les propriétés mesurées et celles issues de la littérature soient du même ordre de grandeur, certaines différences apparaissent. En particulier, la constante de rigidité C_{LL} mesurée est presque deux fois inférieure à celle proposée par Jodin. De même, C_{TT} est plus de deux fois supérieure. Ceci conduit à des différences notables sur les facteurs d'anisotropie. Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer ces disparités. Tout d'abord, le bois étudié dans le présent article est un bois fraîchement coupé et saturé d'eau, du fait du mode de conservation. Il serait alors intéressant de prendre en compte, dans une étude ultérieure, le taux de reprise hydrique de l'échantillon de manière à déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau [1, 10]. Ensuite, le bois est connu pour être un matériau complexe dont les caractéristiques varient entre différentes espèces, ainsi qu'au sein d'un même arbre [1, 11]. Ces variations, mises en évidence dans les sections précédentes, feront l'objet de travaux futurs visant à l'étude de la propagation d'ondes ultrasonores au sein de matériau inhomogènes.

5 Conclusion

Des cartographies en transmission et en réflexion ont été réalisées sur des plaques de chêne représentative des trois plans caractéristiques du matériau. De manière à ne pas dégrader les propriétés du bois, celui-ci a été immergé dans de l'eau immédiatement après découpe. Ces mesures ont permis d'identifier la célérité de l'onde longitudinale ultrasonore s'étant propagée à travers l'échantillon, ainsi que l'impédance acoustique et la masse volumique locale. Il a ainsi été possible d'identifier les constantes de rigidité longitudinales dans les trois directions du matériau : \bar{L} , \bar{T} et \bar{R} , bien que cette dernière soit difficilement dissociable de la composante en \bar{T} . Ces résultats, du même ordre de grandeur que ceux cités dans la littérature, montrent que les caractéristiques du bois peuvent varier fortement au sein d'un même arbre, et sur des zones de quelques centaines de cm^2 . La présence de défauts structuraux du matériau a néanmoins pu être mise en évidence. Les perspectives de ces travaux concerneront la prise en compte des variations de ces propriétés dans de modèles permettant d'appréhender la propagation d'ondes ultrasonores dans des milieux inhomogènes à symétrie cylindrique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Maxime Liège pour son aide précieuse dans la réalisation des mesures.

Références

- [1] Jodin F., "Le bois, matériau d'ingénierie", *Ed. Arbor*, ISBN 2-907086-07-3 (1994)
- [2] Trouy-Triboulot M.-C., Triboulot P., "Matériau bois - Structure et caractéristiques", *Techniques de l'Ingénieur C 925* (2008)
- [3] Nicolotti G., et al., "Application and comparison of the three tomographic techniques for detection of decay in trees", *Journal of Arboriculture* 29 (2), 66-78 (2003)
- [4] Divos F., Szalai L., "Tree evaluation by acoustic tomography", *13th International Symposium on NDT of Wood* (2002)
- [5] Maurer H., et al., "A simple anisotropy correction procedure for acoustic wood tomography", *Holzfor-schung* 60, 567-573, (2006)
- [6] Cheng-Jung Lin, et al., "Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees", *International Biodeterioration & Biodegradation* xxx, 1-8 (2008)
- [7] Schubert S., et al., "Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity", *Holzfor-schung* 63, 107-112, (2009)
- [8] He Ping, "Measurement of acoustic dispersion using both transmitted and reflected pulses", *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2), 801-807 (2000)
- [9] Fortineau J., et al., "Evaluation of the moisture content in phenolic resin via acoustic measurements", *Journal of Applied Physics* 100, 074911 (2006)
- [10] Fortineau J., et al., "Moisture content characterization in composite materials based on ultrasonic transmission measurements", *Journal of Applied Physics* 101, 114911-1 114911-8 (2007)
- [11] Guitard D., Gachet C., "Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois", *Ann. For. Sci.* 61, 129-139 (2004)