
Propagation d'Ondes Ultrasonores dans les Matériaux Orthotropes et Hygro-sensibles : vers une fiabilisation du CND-Bois

X. ZHANG¹, F. LAMY¹, M. TAKARLI¹, N. ANGELLIER¹, N. SAUVAT¹, M. Z. SBARTAÏ², F. COURREGES³, F. DUBOIS¹

¹ GC2D Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic - Université de Limoges, 17 Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons - France. xi.zhang@unilim.fr, frederic.lamy@unilim.fr, mokhfi.takarli@unilim.fr, nicolas.angellier@unilim.fr, nicolas.sauvat@unilim.fr, frederic.dubois@unilim.fr,

² I2M Institut de mécanique et d'ingénierie - Université de Bordeaux, 351 cours de la libération, 33405 Talence - France, zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr

³ XLIM-RESYST Réseaux et Systèmes de Télécommunications - Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges - France, fabien.courreges@unilim.fr

RÉSUMÉ.

La méthode ultrasonore est une méthode non destructive couramment utilisée pour le classement des bois, l'auscultation et la surveillance des structures, et qui est affectée par divers paramètres tels que l'humidité, ou l'angle du fil. Ce travail présente quelques analyses dans le but d'étudier la sensibilité de la propagation et de la polarisation des ondes ultrasonores en fonction de l'angle du fil dans le bois. Des résultats expérimentaux de laboratoire sont utilisés pour vérifier les développements analytiques.

Les résultats de cette étude permettent de mettre en exergue l'influence de l'angle des fibres sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. De plus, il a été montré que les ondes de compression sont sensiblement plus affectées par la rotation de la direction de propagation, que les ondes de cisaillement.

ABSTRACT

Ultrasonic method is a type of nondestructive testing commonly used to realize auscultation and the monitoring of timber structural elements, which is affected by various material parameters such as moisture content or grain orientation. This paper deals with some analysis to study the sensitivity of the propagation and the polarization of ultrasonic waves to fibers angle in wood material, and some laboratory measurements are used in order to validate the analytical models.

The results of this study allowed us to highlight the influence of the fiber angle on the propagation velocity of ultrasonic waves. Moreover, it appears that the compression waves are substantially more affected by the rotation of the direction of propagation than the shear waves.

MOTS-CLÉS : Ultrason, bois, orthotropie, CND - Contrôle Non Destructif.

KEY WORDS: Ultrasonic wave, Fibers angle, NDT- Non-Destructive Testing, Velocity.

1. Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre des travaux du projet SOuBois « Surveillance et Auscultation des **Ouvrages en Bois** par Identification des Champs Hydrique et Mécanique », financé par la Région Nouvelle-Aquitain. L'objectif de ce projet collaboratif, réunissant trois laboratoires de recherche de la Nouvelle Aquitaine (GC2D-Egletons, XLIM-Brive et I2M-Bordeaux), est de proposer une méthodologie de couplage de techniques de contrôle non destructif (CND) pour fiabiliser l'*auscultation* et la *surveillance* des *éléments structuraux en bois* comme, par exemple, les ouvrages d'art qui demandent des méthodes d'inspection spécifiques mais également des stratégies de surveillance. Dans le domaine du classement des bois de structure, il est aujourd'hui montré l'importance de développer des méthodologies multiphysiques croisées afin d'approcher au mieux les caractéristiques mécaniques. Dans notre cas, la problématique est du même ordre avec, en plus, l'impact du vieillissement du bois par effet hydrique et/ou mécanique. Deux enjeux importants sont visés dans ce projet.

Le premier concerne la surveillance des éléments structuraux en bois par une identification en continu des champs hydriques (ex. méthodes électriques, électromagnétiques et ultrasonores) et de l'état de fissuration (ex. méthodes acoustiques) afin d'anticiper durant la vie de l'ouvrage une maintenance préventive beaucoup plus économique que la maintenance curative. Le but de cette partie du projet est de mettre en place des outils non destructifs de suivi de l'endommagement et de l'humidité dans un élément de structure en bois. Nous partirons d'un élément de faibles dimensions (échelle matériau) pour développer et mettre au point les techniques puis valider ces dernières sur des éléments de grandes dimensions (échelle d'un élément de structure). Trois objectifs sont visés : (1) optimiser la localisation des fissures et le suivi de leur évolution, (2) développer une approche d'identification permettant de séparer le domaine des fissures sous critiques du domaine des fissures instables pour la mise en place d'alarmes de surveillance des structures en service, (3) développer une méthodologie d'instrumentation et qualifier de nouveaux capteurs « embarqués » pour le suivi en continu des structures en bois.

Le deuxième concerne les inspections détaillées par le développement d'outils d'auscultation (tomographies 2D et 3D, radar, ultrasons et résistivité électrique) permettant une cartographie spatiale des propriétés physiques et mécaniques tout en localisant et en caractérisant les défauts. Cette cartographie permet d'obtenir un diagnostic assez fin de l'état de l'ouvrage et de proposer, si le besoin en est ressenti, des solutions de réparation adaptées au processus de dégradation identifiés.

Parmi les méthodes non destructives proposées, nous citerons celles basées sur la propagation des ondes élastiques comme les méthodes passives (émission acoustique) et méthodes actives (impulsions ultrasonores). La propagation de ces ondes dans le matériau bois est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs comme l'orthotropie, l'hétérogénéité naturelle, la présence de défauts, le champ hydrique et la nature de l'excitation et des ondes (compression, cisaillement et surface) se propageant dans le milieu. Ce travail préliminaire vise donc à confronter deux approches (théorique et expérimentale) traitant de l'effet de l'angle des fibres sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le Douglas, essence très employée dans les ouvrages mais présentant une texture forte.

2. Approches théorique et expérimentale :

2.1. Propagation et polarisation d'ondes ultrasonores dans un corps élastique orthotrope

L'étude de la vitesse de propagation des ondes élastiques (compression « P » et cisaillement « S ») permet la détermination des modules élastiques d'un matériau [CUX 91] [ESP 18]. Après avoir déterminé la structure, c-à-d la classe de symétrie du matériau considéré, le calcul des vitesses de phase pour une onde monochromatique quasi-plane peut se faire en considérant : la loi de Hooke, l'équation de l'équilibre dynamique en l'absence de forces de volume, l'équation de Christoffel et une solution monochromatique. Dans le cas du matériau bois, considéré comme structure orthotrope, les vitesses de propagation dans le plan (LR, avec $\theta = 90^\circ$, Figure.1) sont données par les équations suivantes :

$$V_{\phi,SH}(\varphi) = \sqrt{\frac{\Gamma_{33}}{\rho}}; \text{ onde de cisaillement à polarisation horizontale} \quad [1]$$

$$V_{\phi,P}(\varphi) = \sqrt{\frac{(\Gamma_{11} + \Gamma_{22}) + \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{12}^2}}{2\rho}}; \text{ onde de compression} \quad [2]$$

$$V_{\phi,SV}(\varphi) = \sqrt{\frac{(\Gamma_{11} + \Gamma_{22}) - \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{12}^2}}{2\rho}}; \text{ onde de cisaillement à polarisation verticale} \quad [3]$$

Dans un système orthorhombique [repère (O, L, R, T), Figure.1], le tenseur de Christoffel et les composantes de la matrice de raideur s'écrivent :

$$[\Gamma_{il}] = \begin{bmatrix} C_{11} \cos^2 \varphi + C_{66} \sin^2 \varphi & (C_{12} + C_{66}) \sin \varphi \cos \varphi & 0 \\ (C_{12} + C_{66}) \sin \varphi \cos \varphi & C_{66} \cos^2 \varphi + C_{22} \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & C_{55} \cos^2 \varphi + C_{44} \sin^2 \varphi \end{bmatrix} \quad [4]$$

Les données mécaniques utilisées pour le calcul des vitesses sont celles du Douglas (Tab.1, [KRE 99] [ESP 18]). La masse volumique apparente(ρ), à 12% d'humidité interne, est égale à 448 kg/m³. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 2.

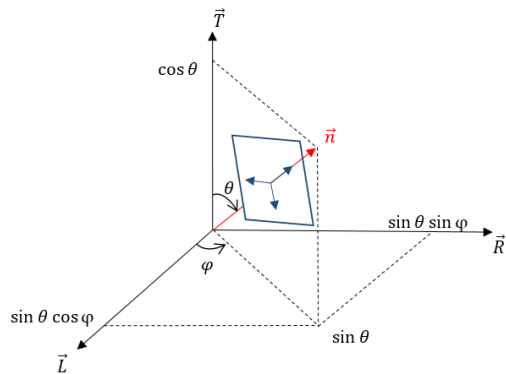


Figure 1. Définition des axes structuraux, des angles utilisés, de la direction de propagation et des directions de polarisation

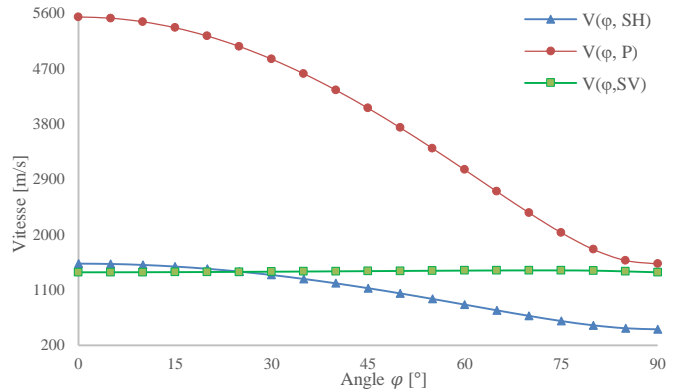


Figure 2. Variation des vitesses théorique selon l'angle entre la direction de propagation et la ligne des fibres sur le plan (LR)

Tableau 1. Propriétés élastiques du Douglas [KRE 99] [ESP 18]

Module statique (GPa)	E(L)	E(R)	E(T)	G(RT)	G(LT)	G(LR)
	13,40	0,91	0,67	0,09	1,05	0,86
Coefficients de poisson	ν (TL)	ν (LT)	ν (RT)	ν (TR)	ν (RL)	ν (LR)
	0,022	0,449	0,390	0,287	0,020	0,292

2.2. Détermination expérimentale de $V_{\phi,P}(\varphi)$ dans le plan (LR)

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure des vitesses est composé : (i) d'une carte d'acquisition d'émission acoustique (PCI-2 : 18bits, 2 voies, fréquence d'échantillonnage 40MS/sec), de deux capteurs de type NANO30 (Figure.3), dont la bande passante est comprise entre 125 et 750 kHz, caractérisée par un pic de résonance à 300 kHz et de deux préamplificateurs avec un gain de 40dB. La génération de l'impulsion ultrasonore est réalisée à l'aide de la fonction AST (Auto Sensor Test). Les résultats obtenus en Figure. 4 montrent des vitesses d'ondes de compression variant de 2200 à 5500 (m/s). Ces valeurs sont en adéquations avec celles que l'on peut retrouver dans la littérature [BEA 02] [BUC 06].

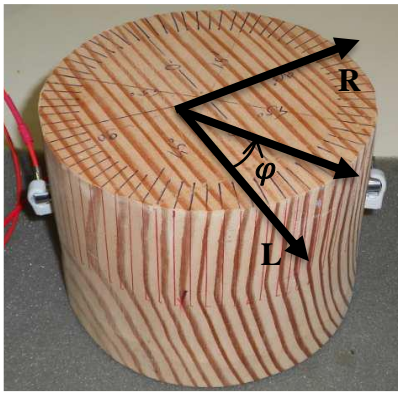


Figure 3. Epreuve de Douglas pour la mesure des vitesses dans le plan (LR)

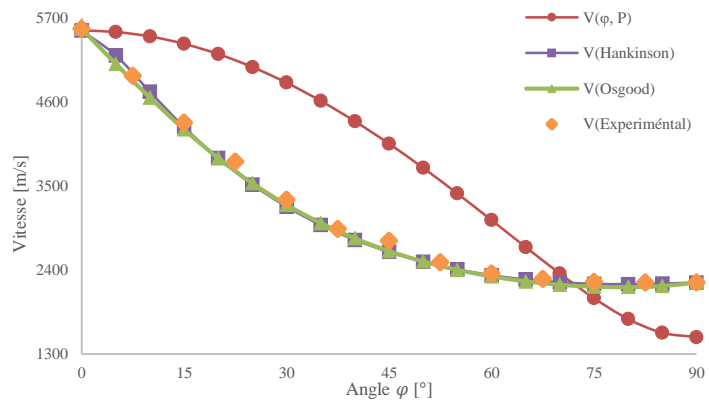


Figure 4. Comparaison des vitesses : mesures expérimentales [LAM 16], modèle orthotrope, Hankinson et Osgood [KAB 01].

3. Conclusions et perspectives :

A l'échelle des éléments structuraux, et compte tenu de la forme relativement cylindrique des cernes de croissance, on représente le bois comme un matériau orthotrope cylindrique. Cependant pour l'étude d'éprouvettes de petites dimensions, et ce, devant la distance au cœur, il est souvent employé une orthotropie accompagnée d'un plan RT isotrope transverse. Cette modélisation, appliquée sur le plan (LR), nous a permis de mettre en exergue l'influence de l'angle des fibres sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ainsi, il en ressort que les ondes de compression sont sensiblement affectées par la rotation de la direction de propagation alors que les ondes de cisaillement le sont moins.

Les mesures expérimentales ont porté uniquement sur les ondes de compression et les résultats obtenus montrent également une grande sensibilité de la vitesse vis-à-vis l'angle des fibres. Cependant, nous constatons que le choix d'une structure orthorhombique pour la modélisation du Douglas ne permet pas de reproduire fidèlement l'allure de la courbe expérimentale. Des formules empiriques très satisfaisantes et très anciennes ont été proposées comme alternative pour traduire cette l'évolution de $V_{\varphi, P}$ fonction de l'angle φ (Hankinson et Osgood [KAB 01]. Des travaux sont en cours pour comprendre la différence observée entre les approches expérimentale et théorique. De plus, une généralisation du développement au cas 3D et aux ondes de cisaillement est en cours de réalisation.

4. Bibliographie

- [BEA 02] BEALL, F.C. 2002. *Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties*. Wood Science and Technology 36, 3, 197–212.
- [BUC 06] Bucur, V. *Acoustics of wood*. Springer edition, 2006.
- [CUX 91] CUXAC, P. 1991. *Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes*. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- [ESP 18] ESPINOSA, L., BRANCHERIAU, L., PRIETO, F., AND LASAYGUES, P. 2018. *Sensitivity of Ultrasonic Wave Velocity Estimation Using the Christoffel Equation for Wood Non-Destructive Characterization*. BioResources 13(1), 918-928.
- [KAB 01] KABIR, M.F. 2001. *Prediction of ultrasonic properties from grain angle*. Journal of institute of wood science, 15(5).
- [KRE 99] KRETSCHMANN, D.E. 1999. *Mechanical Properties of Wood*. Research General Engineer.
- [LAM 16] LAMY, F. 2016. *Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois sous Sollicitations Mécanique et Climatique : Apports de l'Emission Acoustique*. Thèse de doctorat, Université de Limoge.