

Vers une prise en compte de l'orthotropie du bois dans l'auscultation et la surveillance des ouvrages par ultrason et émission acoustique

X. ZHANG ^a, M. TAKARLI ^a, N. SAUVAT ^a, F. DUBOIS ^a,
M.Z. SBARTAÏ ^b, F. COURREGES ^c

a. GC2D, Univ. Limoges, EA 3178, 19300 Egletons, France
xi.zhang@unilim.fr; mokhfi.takarli@unilim.fr; nicolas.sauvat@unilim.fr;
frederic.dubois@unilim.fr;

b. I2M-GCE, UMR-CNRS 5295, Univ. Bordeaux, 33405 Talence, France
zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr;

c. XLIM-RESYST, UMR-CNRS 7252, Univ. Limoges, 87068 Limoges, France
fabien.courreges@unilim.fr;

Résumé :

La méthode ultrasonore est une méthode non destructive avec un fort potentiel dans le classement des bois, l'auscultation et la surveillance des structures en bois. L'intérêt de cette méthode est d'améliorer l'évaluation des caractéristiques mécaniques du bois en production et en service, ainsi que la fiabilisation de son usage dans le temps. La propagation des ondes élastiques dans le bois est un phénomène complexe qui est affectée par divers paramètres tels que l'orthotropie, l'angle du fil, l'hétérogénéité naturelle, la distribution des cernes annuels, la présence de défauts, l'humidité, et la nature de l'excitation et les types d'ondes (compression, cisaillement et surface).

Ce travail préliminaire traite de la sensibilité de la propagation de la polarisation des ondes ultrasonores en fonction de l'angle du fil dans le bois. Pour atteindre cet objectif, nous avons mené plusieurs approches : des mesures expérimentales en laboratoire sur des poutres massives et lamellées collées, une modélisation analytique par résolution de l'équation fondamentale de la dynamique et une simulation numérique par la méthode des éléments finis (MEF). L'effet du rapport signal sur bruit (SNR) a été étudié en variant la tension d'impulsion (de 100 à 400V) et le facteur de gain du récepteur (de 1 à 10000). Plusieurs méthodes de détermination du temps de vol (TOF) ont également été étudiées.

Abstract:

Ultrasonic method is a type of non-destructive testing (NDT) commonly used to realize auscultation and monitoring of timber structural elements. The idea is to improve the evaluation of mechanical characteristics of timber and to assess its reliability in time. The propagation of elastic waves in wood material is a complex phenomenon that depends on several factors such as orthotropy, fibers angle, annual rings distribution, presence of defects, moisture content and the nature of the excitation and types of waves (compression, shear and surface) propagating in the medium.

This preliminary work deals with the sensitivity of the propagation and the polarization of ultrasonic waves to fibers angle in the wood. To achieve this objective, several approaches have been conducted: experimental laboratory measurements on massive wood and glulam, an analytical modeling by solving the fundamental equation of the dynamics and a numerical simulation by finite element method (FEM). The effect of the signal-to-noise ratio (SNR) has been studied by varying the pulse voltage (from 100 to 400V) and the gain factor of the receptor (from 1 to 10000). Several methods of determining time of flight (TOF) have also been studied.

Mots clefs : Bois, Orthotropie, Contrôle Non destructif (CND), Ultrasons, Traitement du signal ultrasonore, Rapport signal sur bruit (SNR), Temps de vol (TOF)

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans la cadre d'un projet, financé par la région Nouvelle Aquitaine, dont l'objectif est de proposer une méthodologie de couplage de techniques de contrôle non destructif (CND) afin de fiabiliser l'auscultation et la surveillance des éléments structuraux en bois. L'idée étant d'approcher au mieux les caractéristiques mécaniques du bois en service et de contrôler sa qualité pour prolonger la durée de vie de ce type de constructions à l'aide d'une maintenance préventive beaucoup plus économique que la maintenance curative. Le travail repose d'une part sur une identification en continu des champs hydriques par des méthodes électriques, électromagnétiques et ultrasonore ; et d'autre part sur une qualification de l'état de fissuration et de son évolution dans le temps à l'aide de mesures acoustique.

Parmi les méthodes non destructives proposées, nous avons celles basées sur la propagation des ondes élastiques comme les méthodes passives (émission acoustique) et méthodes actives (impulsions ultrasonores) dans l'auscultation et la surveillance des éléments de structures. Concernant l'auscultation, le but est d'obtenir une cartographie spéciale des propriétés mécaniques (E, G, ν) en intégrant les effets de l'orthotropie et de la présence éventuelle des défauts. Nous présenterons des résultats obtenus par mesures de vitesses de propagation d'ondes élastiques (compression et cisaillement) réalisées sur des poutres en massif (Douglas) et en lamellé-collé (Douglas et Epicéa). Deux méthodes sont utilisées, en fonction du rapport signal sur bruit (SNR), pour la détermination du temps de vol : le critère d'Akaike et le critère de Hinkley. Nous souhaitons toutefois étayer ces travaux par une approche théorique permettant par la suite de développer des modèles mécaniques par éléments finis prédictifs. Ce travail préliminaire vise donc à confronter ces deux approches (théorique et expérimental) traitant de l'effet de l'angle des fibres et l'effet des essences et des échelles sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le douglas et l'épicéa.

2 Propagation et polarisation des ondes mécaniques dans un corps élastique orthotrope

2.1 Approche analytique

L'étude de la vitesse de propagation des ondes élastiques (compression « P » et cisaillement « S ») permet la détermination des modules élastiques d'un matériau [7] [8]. 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 $\theta=90^\circ$) 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 orthotrope [repère (O, L, R, T)], le tenseur de Christoffel et les composantes de la matrice de raideur s'écrivent comme suit, avec φ est l'angle de rotation du repère autour de T :

$$\Gamma_{11} = \frac{1}{\frac{\cos^4\varphi}{E_L} + \frac{\sin^4\varphi}{E_R} + \frac{\sin^2\varphi\cos^2\varphi}{G_{LR}} - \frac{2\sin^2\varphi\cos^2\varphi\nu_{RL}}{E_R}} \quad (4)$$

$$\Gamma_{22} = \frac{1}{4\sin^2\varphi\cos^2\varphi * \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{2\nu_{RL}}{E_R} - \frac{1}{G_{LR}}\right) + \frac{1}{G_{LR}}} \quad (5)$$

$$\Gamma_{33} = \frac{1}{\frac{\cos^2\varphi}{G_{LT}} + \frac{\sin^2\varphi}{G_{RT}}} \quad (6)$$

$$\Gamma_{12} = 0 \quad (7)$$

Les données mécaniques utilisées pour le calcul des vitesses sont celles du Douglas (Tab.1) [7] [2]. La masse volumique apparente (ρ), à 12% d'humidité interne, est égale à 500 kg/m³. Les résultats obtenus sont présentés en Fig. 2.

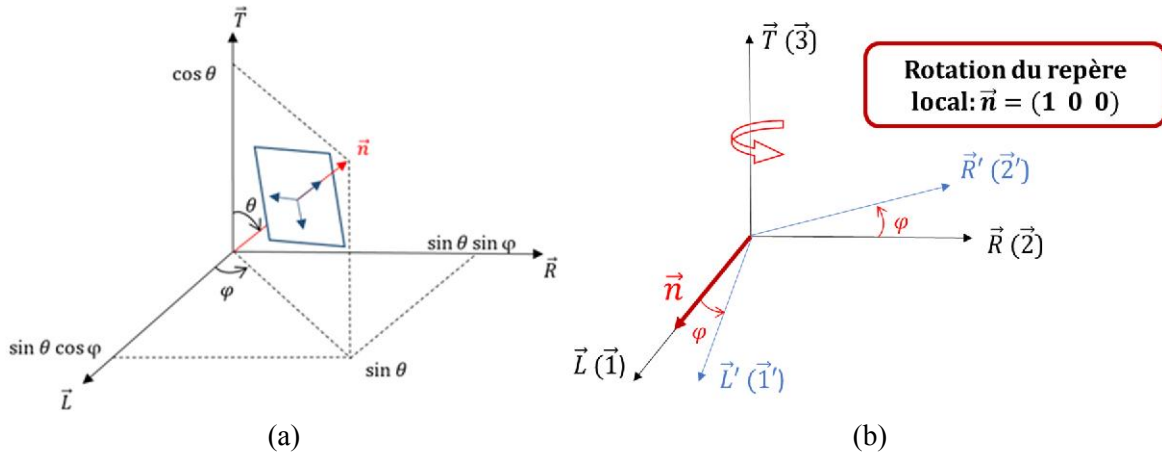


Fig. 1 : Définition des axes structuraux, des angles utilisés, de la direction de propagation et des directions de polarisation (a) et une hypothèse de la propagation d'onde dans le plan LR (b).

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

Tab. 1 : Propriétés élastiques du Douglas [7], [2]

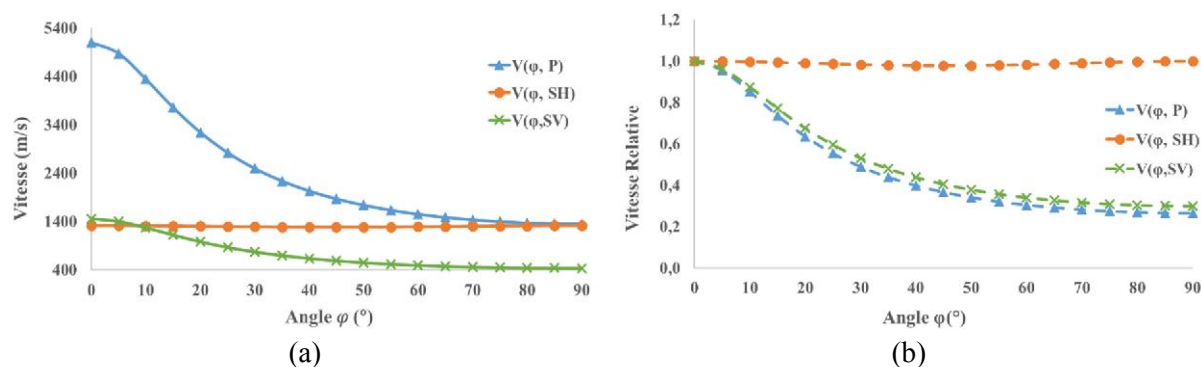


Fig. 2 : Variation des vitesses théoriques (a) et des vitesses relatives (b) selon l'angle entre la direction de propagation et le sens des fibres sur le plan (LR)

2.2 Approche numérique




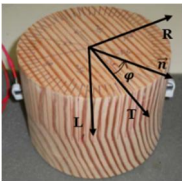
Nous avons réalisé un modèle 2D par éléments finis avec le logiciel Castem pour étudier la propagation de l'onde dans un plan LR d'une poutre de Douglas, avec les paramètres qui ont été utilisés pour la partie analytique (Tab.1). Ensuite, une onde a été appliquée sous forme de pression positive constante (Impact) avec une évolution en demi-sinus. La résolution s'appuie sur la procédure PASAPAS. Finalement, grâce au temps (t) de propagation et la distance (d) entre deux points choisis, la vitesse de propagation $v = d/t$ est calculée. Les discrétisations spatiales et temporelles sont définies en fonction des critères suivants :

- Discrétisation spatiale : $\Delta x \leq \frac{\lambda_{min}}{N}$, $\lambda_{min} = \frac{v_{min}}{f}$;
- Discrétisation temporelle : $\Delta t \leq \Delta t_{critique} \approx \frac{\Delta x}{v_p}$, $N \geq 10$, $\Delta t_{critique}$ est le temps critique d'un incrément.

2.3 Approche expérimentale

L'intérêt principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'angle des fibres et de l'échelle de mesure sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le bois massif et lamellé collé. Les mesures ultrasonores sont réalisées sur deux essences (Douglas et Epicéa) à échelle d'une poutre lamellée collée et sur du Douglas massif aux échelles métrique et centimétrique (Tab.2). Deux appareils de mesure sont utilisés pour déterminer le TOF de l'onde de compression :

- Un appareil ultrasonore (Pundit PL-200) composé d'un générateur d'impulsion allant de 100 à 400V et un facteur de gain à la réception de 1 à 10000 (de 0 à 80dB). La résolution temporelle est de $0,1\mu s$ et la tension est mesurée à $\pm 30,52\mu V$ sur une échelle de 16 bits. Un couple de transducteurs piézoélectriques de type résonant (émetteur et récepteur) est utilisé pour réaliser les mesures ; avec une fréquence de résonance de $54\text{ kHz} \pm 5\text{ kHz}$. Un couplant acoustique est utilisé pour assurer un bon contact entre les transducteurs et le matériau ;
- Un appareil acousto-ultrasonore avec une carte d'acquisition PCI-2 (18bits, 2 voies, fréquence d'échantillonnage 40MS/sec), de deux capteurs de type NANO30, dont la bande passante est comprise entre 125 et 750 KHz, caractérisée par un pic de résonance à 300 KHz et deux préamplificateurs avec un gain de 40 dB. La génération de l'impulsion ultrasonore est réalisée à l'aide de la fonction AST (Auto Sensor Test).

Essences	Type	Géométrie et Masse volumique	Dispositifs
Epicéa	Lamellé collé	L. 230cm x b. 8cm x h. 40cm, $\rho = 419\text{kg/m}^3$ 	(i)
Douglas	Massif	L. 300cm x b. 15cm x h. 15cm, $\rho = 519\text{kg/m}^3$ 	(i)
	Lamellé collé	L. 234cm x b. 8cm x h. 40cm, $\rho = 483\text{kg/m}^3$ 	
	Massif	D. 20cm x h. 20cm, $\rho = 500\text{kg/m}^3$ [4] 	(ii)

Tab 2. Caractéristiques des échantillons étudiés

2.4 Traitement et analyse du signal pour la détection des temps-de-vol (TOF, Time of flight)

2.4.1 Le rapport signal sur bruit (SNR)

Le rapport signal permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. Il est défini par le rapport de la puissance moyenne du signal P_s et la puissance moyenne du bruit P_B . Il s'exprime généralement en décibels (dB) selon :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{dB} = 10 * \log\left(\frac{P_s}{P_B}\right) = 20 * \log\left(\frac{U_s}{U_B}\right) \quad (8)$$

Avec S et B le signal et le bruit respectivement, et U la tension.

Afin d'étudier l'effet du SNR, sur la détermination du TOF, nous avons enregistré des signaux en faisant varier à la fois la tension d'impulsion et le facteur de gain du récepteur. L'amplitude U_s correspond à la tension maximale du signal, mais l'amplitude U_B qui correspond à la tension maximale du bruit dépend de la méthode de la détermination du TOF qui représente le point de transition entre le bruit et le signal. Dans le paragraphe ci-dessous, nous présenterons deux méthodes de détermination du TOF issues de la littérature (critères de Hinkley et Akaike). En plus de ces deux critères nous proposons une nouvelle méthode (MG : Maximum Glissant) qui consiste à tracer, pour une forme d'onde donnée, l'évolution de l'amplitude maximale (valeur absolue) en fonction du temps d'enregistrement (Fig. 5 (a)). Cela fait apparaître un premier plateau qui correspond au niveau du bruit (B) et un plateau maximal qui correspond à l'amplitude maximal du signal (S). Les Figs.5 (b) et (c) montrent une augmentation

logarithmique du SNR en fonction de la tension d'impulsion et du facteur de gain. Cette augmentation est plus importante en fonction du gain.

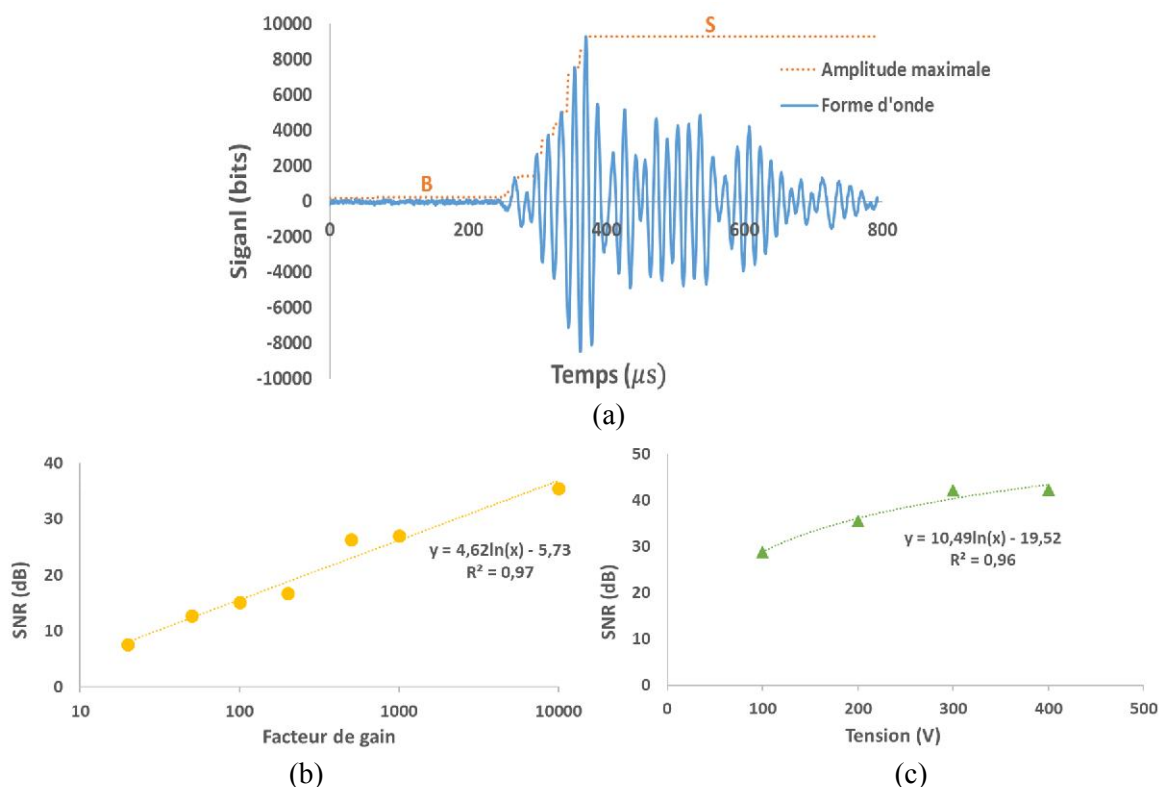


Fig. 5 : (a) Forme d'onde du signal ultrasonore et détermination du SNR ; (b) Evolution du SNR en fonction de la tension d'impulsion avec un facteur de gain 1000 ; (c) Evolution du SNR en fonction du facteur de gain avec une tension d'impulsion 200V.

2.4.2 La détection des temps-de-vol (TOF, Time of flight)

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour la détermination du temps de vol de l'onde telles que : le critère d'information d'Akaike [5], [1], le critère de Hinkley [6] et le critère de Fisher [9]. Dans le cas de notre étude, les critères de Hinkley et d'Akaike sont utilisés pour évaluer le TOF. Ces critères produisent des résultats suffisamment fiables pour des signaux ultrasons ayant un rapport Signal/Bruit supérieur à 10 dB [9].

- a. Le « *critère de Hinkley* » (*Hinkley*) est une méthode utilisée pour le CND du béton [6] qui est basée sur la comparaison de l'énergie partielle et l'énergie totale du signal :

$$S[k] = \sum_{p=1}^k (x_p^2) - \frac{k}{\alpha \cdot N} \sum_{p=1}^N (x_p^2)$$

Le facteur α est un paramètre d'ajustement qui doit minimiser la dispersion (erreur de détermination) des mesures de TOF. Pour $\alpha = 1$, le critère repose sur l'analyse de la puissance instantanée du signal et le TOF est donné par le minimum de la fonction Hinkley.

- b. Le « *critère de Akaike* » (AIC) est une approche utilisée pour estimer l'ordre des modèles autorégressif (AR) afin de déterminer le temps de déclenchement. Dans ce cas ; les intervalles du signal sont supposés être deux séries temporelles (i.e. le bruit et le signal), différentes avant

et après le point du temps de déclenchement. Le TOF est donné par le minimum de la fonction AIC [1] [5].

$$AIC = k \cdot \log(\text{var}(x[1, \dots, k])) + (N - k) \cdot \log(\text{var}(x[k + 1, \dots, N]))$$

Avec $x[k]$ le signal à l'indice k , n la variable, N la longueur du signal et var la variance.

La Fig. 6 (a) donne l'évolution du TOF en fonction du SNR. Le TOF est déterminé par les trois méthodes : Hinkley, Akaike et MG. Le SNR est déterminé par l'équation (8) pour laquelle l'amplitude U_B dépend de la méthode de détermination du TOF. Cette représentation montre:

- D'une part, que la méthode Hinkley se distingue par le TOF le plus élevé et le SNR le plus faible ; cela découle d'une sur-estimation du niveau de bruit. De plus, les valeurs de TOF sont très dispersées pour une très faible bande de SNR ;
- Et d'autre part, les résultats sont très similaires entre les méthodes AIC et MG qui montrent une diminution du TOF en fonction du SNR pour se stabiliser à partir d'un SNR d'environ 20 dB. Néanmoins, nous notons une certaine dispersion dans les valeurs de TOF qui s'estompent à partir de 27 dB.

La Fig. 6 (b) donne cette fois-ci l'évolution de la vitesse V_p en fonction du SNR, ou nous notons une augmentation de la vitesse pour atteindre un seuil de stabilisation à partir de 27dB. Entre la valeur plus basse du SNR (9,4dB) et la plus grande (42,1dB), nous notons une erreur de l'ordre de 420 m/s dans l'estimation de la vitesse V_p . Cette erreur est considérable, notamment dans le cas de la détermination des propriétés élastiques où la vitesse intervient à la puissance 2.

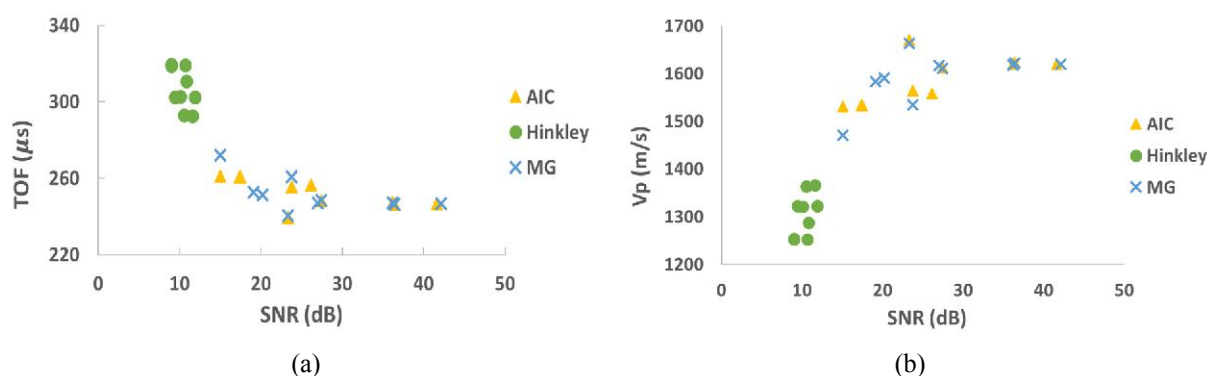


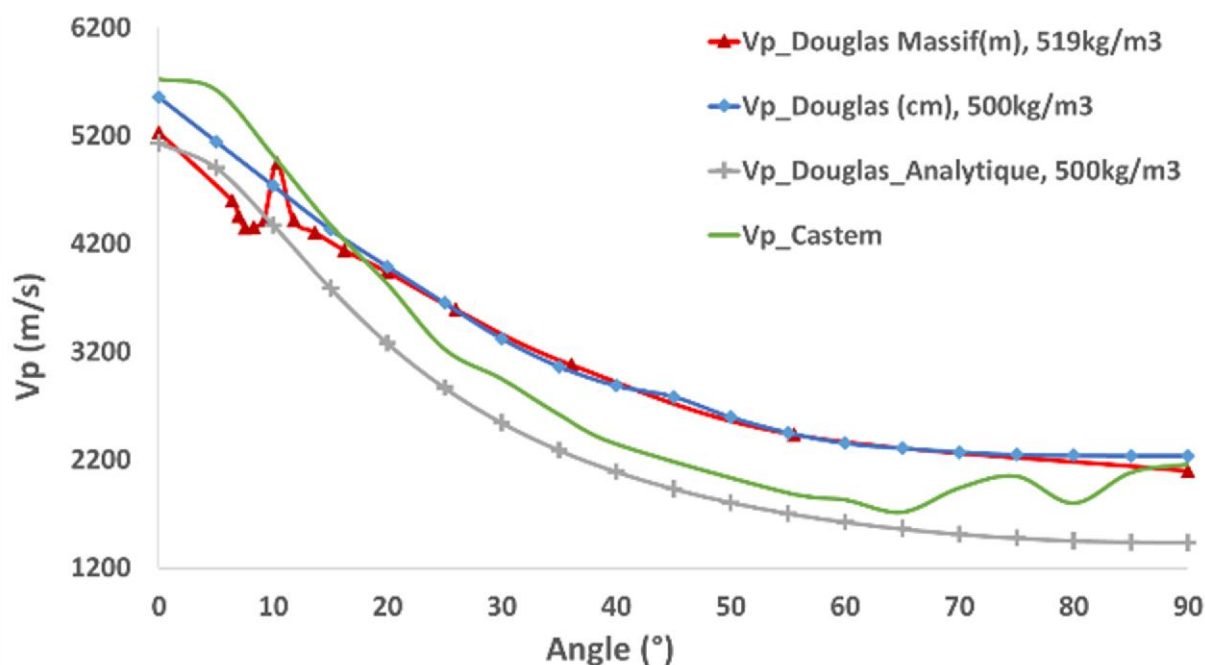
Fig. 6 : (a) Evolution du TOF en fonction du SNR ; (b) Evolution de la vitesse de propagation d'onde de compression en fonction de SNR.

2.5 Comparaison des vitesses de propagations d'onde

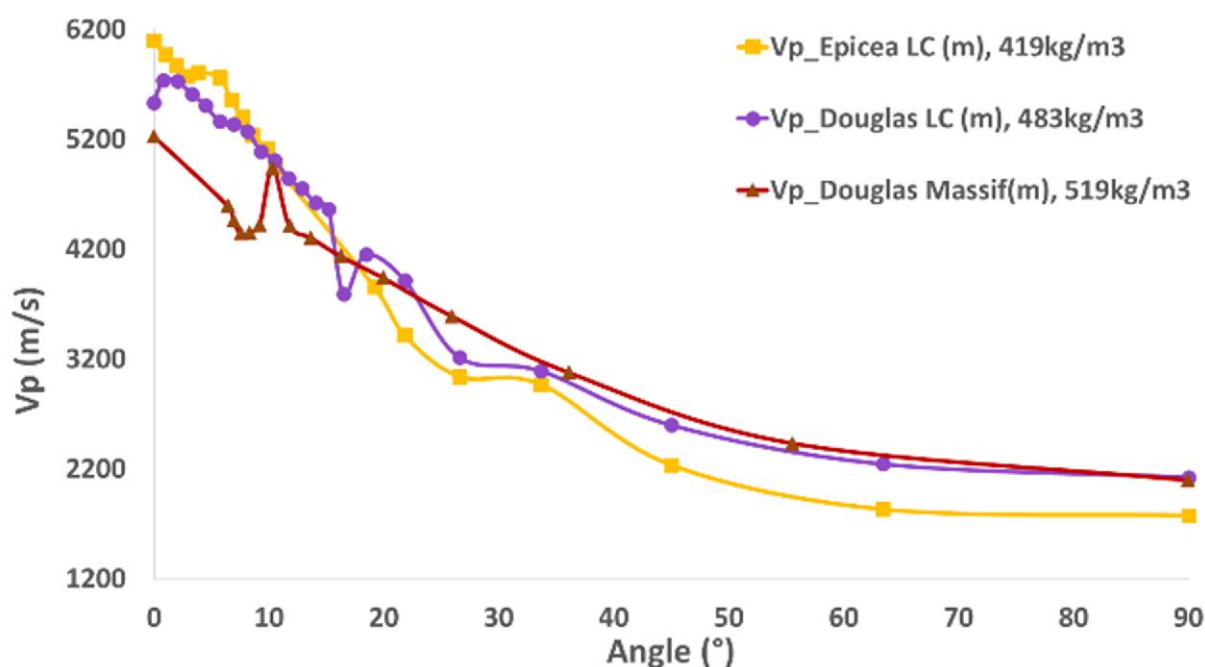
La Fig. 6 (a) montre l'évolution de vitesse V_p en fonction de l'angle de fibre sur le plan LR. Les mesures sont réalisées sur du Douglas Massif à deux échelles différentes : d'une part sur une poutre de 3m de long, et d'autre part sur un échantillon cylindrique de 20cm de diamètre. Ces deux mesures expérimentales sont confrontées aux deux approches théoriques présentées précédemment. De manière générale, les quatre courbes présentent une évolution similaire correspondant à la loi empirique d'Hankinson [4]. Par ailleurs, cette évolution ne semble pas dépendre des deux échelles de mesure (centimétrique et métrique).

La Fig. 6 (b) présente les résultats obtenus sur des poutres en lamellé collé (Douglas et Epicéa). Nous retrouvons la même tendance observée pour du bois massif avec de faibles écarts justifiés probablement

par les différences de masse volumique. Cette similitude des résultats entre le bois massif et le lamellé collé montre que l'effet de l'orthotropie sur les vitesses est principalement gouverné par l'orientation naturelle des fibres, et la présence des lamelles parallèlement à ces fibres ne semble pas ajouter un effet considérable sur les vitesses. L'effet des lamelles pourra se voir éventuellement en introduisant le paramètre d'atténuation des ondes, notamment par les effets de diffraction et de réflexion au niveau des interfaces collées.



(a)



(b)

Fig. 7 : Evolution de V_p en fonction de l'orientation des fibres sur le plan LR : (a) Douglas massif à deux échelles différentes ; (b) poutres en lamellé collé

3 Conclusions

A l'échelle des éléments structuraux, et compte tenu de la forme relativement cylindrique des cernes de croissance, le bois est représenté comme un matériau orthotrope. Cependant pour l'étude d'éprouvettes d'échelle différente, positionnée loin du 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.

Pour la partie expérimentale, nous avons mis en évidence plusieurs points :

1. La détermination du TOF dépend principalement du rapport signal sur bruit (SNR), et les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre la méthode d'Akaike et celle développée dans cette étude, pour lesquelles le TOF est indépendant du SNR à partir de 27dB ;
2. L'étude de l'effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de compression V_P montre une concordance entre les approches expérimentales (Echelle métrique et Echelle centimétrique, Bois massif et lamellé collé) et théoriques (Analytique et Numérique). L'évolution de V_P en fonction de l'angle de fibre dans le plan LR correspond à la loi empirique Hankinson, et ne dépend pas de l'effet d'échelle et la présence des lamelles.

Références (16 gras)

- [1] A. Carpinteri, J.Xu*, G. Lacidogna, A. Manuello, Reliable onset time determination and source location of acoustic emission in concrete structures, Politecnico di Torino, Department of Structural Engineering and Geotechnics, Corso Duca degli Abruzzi 2, 10129 Toino, Italy, 2012.
- [2] D.E. Kretschmann, Mechanical Properties of Wood. Research General Engineer (1999).
- [3] F.C. Beall, Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. Wood Science and Technology 36, 3, 197–212, 2012.
- [4] F. Lamy, Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois sous Sollicitations Mécanique et Climatique : Apports de l'Emission Acoustique. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2016.
- [5] H. Zhang, Clifford Thurber, Charlotte Rowe, Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings, Bulletin of the seismological Society of America, Vol. 93, No. 5, pp. 1904-1912, 2003.
- [6] J. H. Kurz*, Christian U. Grosse, Hans-Wolf Reinhardt, Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete, Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 4, 70550 Stuttgart, Germany, 2004.
- [7] L. Espinosa, L. Brancheriau, F. Prieto, and P. Lasaygues. Sensitivity of Ultrasonic Wave Velocity Estimation Using the Christoffel Equation for Wood Non-Destructive Characterization. BioResources 13(1), 918-928, 2018.
- [8] P. Cuxac, Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Vandœuvre-lès-Nancy, INPL, 1991.
- [9] P. Lasaygues, A. Arciniegas, L. Brancheriau, Comparaison de méthodes de détection de temps de vol adaptées à la tomographie ultrasonore des arbres sur pied, LMA-CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France, 2014.