

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Mise au point d'une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques : Contribution à la détermination des symétries matérielles d'un matériau

Mohammed EL MOURIDI¹, Thierry LAURENT¹, Loïc BRANCHERIAU²,
Olivier ARNOULD¹, Joseph GRIL¹

¹ Équipe MAB, LMGC, Université Montpellier 2, CNRS UMR5508 {elmouridi,laurent,arnould,jgril}@lmgc.univ-montp2.fr

² Département PERSYST CIRAD, loic.brancheriau@cirad.fr

Ce travail consiste à développer un outil expérimental permettant de déterminer les symétries matérielles d'un matériau au comportement mécanique mal connu (loupe de thuya). La voie d'investigation choisie pour atteindre cet objectif repose sur le développement d'un outil expérimental basé sur la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques. Classiquement, cette méthode porte sur la mesure de la vitesse de propagation dans plusieurs échantillons de géométrie cubique (ou polyédrique à 14 faces) permettant 3 (ou 7) mesures par échantillons. En utilisant ce principe expérimental sur un seul échantillon de forme sphérique, nous augmentons considérablement le nombre de points de mesures (jusqu'à 133) tout en nous affranchissant des problèmes de variabilité entre échantillons. Il s'agit ici de présenter l'adaptation, la mise au point et la validation du banc expérimental de mesure par contact direct appliqué à des échantillons de forme sphérique. Pour qualifier la méthode et éprouver sa robustesse, une campagne d'essais sur un matériau de référence (l'aluminium) et sur un bois très homogène (le hêtre) a été menée. La détermination de la matrice de rigidité a été réalisée en traitant le problème direct (détermination de la rigidité apparente dans une direction donnée) puis le problème inverse à partir d'une série d'essais ultrasonores.

1 Introduction : contexte de l'étude

Le thuya (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.) a la faculté de développer de la loupe, excroissance se trouvant au niveau du collet de l'arbre. La loupe joue un rôle économique et social important pour le secteur artisanal marocain. Les forêts de thuya subissent une importante « dégradation » due à une forte demande conduisant à une sur-exploitation de ce matériau. Deux projets franco-marocains ont été mis en place dans le but de contribuer à la préservation de cette espèce végétale en choisissant d'améliorer les conditions de coupe du bois de la loupe dans le but de minimiser les déchets lors du tranchage et du sciage. Le premier projet est un P.R.A.D* (ÉGIDE), intitulé : « caractérisation technologique et valorisation du bois de la loupe de thuya », le deuxième est un projet de coopération entre le CNRS[†] (France) et le CNRST[‡] (Maroc) intitulé « contrôle des paramètres de découpe de la loupe de thuya en vue d'une utilisation rationnelle en marqueterie et en ébénisterie ».

L'usinage du bois en général, tient compte des symétries naturelles dépendantes de son mode de croissance. La loupe de thuya ne présente pas les mêmes symétries naturelles que le bois présent dans le tronc par exemple. En suivant la même logique, l'amélioration de

la coupe de la loupe de thuya passe alors par l'identification de ces symétries matérielles. Nous nous sommes alors orientés vers les méthodes ultrasonores qui présentent de nombreux avantages comme notamment la fiabilité, la simplicité et la rapidité de mise en œuvre. De plus ces méthodes sont bien indiquées pour caractériser les symétries matérielles [2] (et le comportement mécanique) et apporter des réponses sur les propriétés structurales d'un matériau. La technique ultrasonore retenue pour cette application est une mesure par contact direct [4]. Pour réduire les problèmes liés à la variabilité entre échantillons (problème récurrent pour toutes mesures sur des échantillons de bois), il a été décidé d'effectuer ces mesures sur le même échantillon, ce qui impose de recourir à un échantillon de forme spécifique. Afin de mesurer toutes les composantes du tenseur d'élasticité pour un matériau orthotrope comme le bois, il est nécessaire d'avoir au moins 6 directions de mesure différentes et 2 modes de sollicitations (ondes de compression et de cisaillement). Dans le cas de la loupe, le groupe de symétrie du matériau n'étant pas connue, nous nous sommes orientés vers un échantillon de forme sphérique qui permet de multiplier le nombre de directions de mesure.

Dans cet article, nous allons présenter l'adaptation et la mise au point d'un banc expérimental de mesure ultrasonore par contact direct conduit sur des échantillons sphériques ainsi que la validation de ce banc. Cette validation passe par la détermination de la rigidité d'un matériau isotrope de référence (alliage d'alumi-

*. Projet de Recherche Agronomique pour le Développement

†. Centre National de la Recherche Scientifique

‡. Centre National de Recherche Scientifique et Technique

nium, 2017A) par deux méthodes expérimentales, d'une part à partir d'un essai classique de traction et d'autre part à partir de la méthode ultrasonore conduite sur une sphère d'aluminium prise au voisinage de l'éprouvette de traction.

La recherche des symétries d'un matériau s'est faite à partir de la méthode d'analyse des composantes principales (ACP) et la validation expérimentale, conduite sur du bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L.), matériau orthotrope homogène à l'échelle de la mesure, permet de retrouver à partir des 133 mesures les axes d'orthotropie.

Le problème est résolu par une approche directe puis inverse. Tout d'abord, connaissant la matrice de rigidité dans les axes principaux du matériau, on détermine la rigidité apparente dans une direction quelconque, obtenue lors d'une expérience. Inversement, à partir des résultats d'une série d'essais ultrasonores sur une sphère dans 133 directions différentes, il s'agit de déterminer la matrice de rigidité du matériau dans les axes d'orthotropie. Dans la suite de l'article, une modélisation théorique du problème direct est présentée. Sa résolution numérique permet de calculer le coefficient de rigidité dans n'importe quelle direction de propagation des ondes. A partir de la solution du problème direct, la résolution d'une équation matricielle permet de déterminer 3 coefficients de la matrice de rigidité et 3 combinaisons linéaires des 6 autres coefficients manquants (i.e., les mesures ne sont faites qu'avec des ondes de compression) à partir des mesures sur la sphère.

2 Matériel et méthode

Pour les besoins de notre application, le moyen le plus rapide pour obtenir la matrice de rigidité est la méthode ultrasonore par contact direct [1]. Cette méthode consiste à mettre en contact les surfaces planes de deux transducteurs avec celles d'un échantillon et de mesurer la vitesse de propagation de l'onde le traversant.

Généralement, les échantillons utilisés ont une forme géométrique cubique [1] (ou polyédrique à 14 faces [2]), l'utilisation de ce type de géométrie permet d'avoir 3 (ou 7) directions de mesure par échantillon. La détermination des symétries matérielles d'un matériau par la méthode ultrasonore nécessite un nombre élevé de mesure, ce qui se traduit par un nombre élevé d'échantillons découpés dans différentes directions. L'utilisation d'un seul échantillon de géométrie sphérique [3] permet d'une part d'augmenter considérablement le nombre de points de mesures, jusqu'à 133 dans notre cas (d'autant plus grand que le rapport rayon de la sphère/diamètre des transducteurs est grand), sur un même échantillon et ainsi de s'affranchir des problèmes de variabilité entre échantillons. A l'origine, la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques est conçue spécifiquement pour la détermination des symétries matérielles. Son principe consiste à exciter un échantillon au moyen d'une onde ultrasonore et de relever sur l'oscilloscope son temps de propagation dans l'échantillon (temps de vol). Le dispositif expérimental (figure 1) est constitué d'un générateur d'impulsion 5800 PR large bande (35MHz, Panametrics, Sofranel), d'un oscilloscope 54621 A (60 MHz, marque Agilent) et d'un « banc

ultrasonore », constitué d'un bâti, d'un outil de repérage angulaire réglable [3] et de deux transducteurs ultrasonores longitudinaux PANAMETRICS V303 SU (1 MHz, ϕ 13 mm).

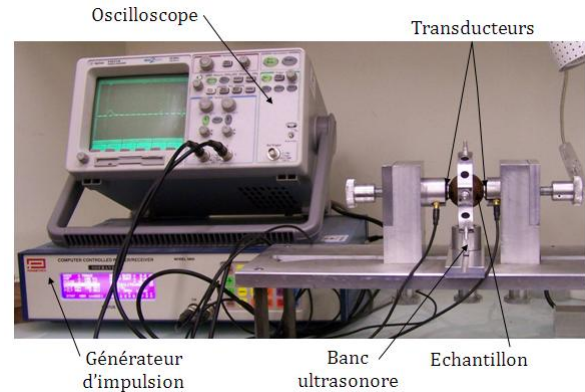


FIGURE 1 – Dispositif expérimental

Les éprouvettes utilisées ont une géométrie sphérique de 36 mm de diamètre, usinées à l'aide d'un tour à commande numérique. Des essais préalables, conduits sur des échantillons sphériques de hêtre, directement en contact entre les 2 transducteurs de surface terminale plane ont montré que la zone de contact, quasi-ponctuel dans ce cas, ne suffit pas à une bonne transmission des ondes. Une interface de liaison entre la surface plane du transducteur et l'échantillon sphérique a été réalisée en alliage d'aluminium (2017A). Cette interface est centrée sur l'extrémité du transducteur (figure 2) et présente une zone de contact hémisphérique avec la sphère du matériau à tester. Le diamètre maximal de cette calotte sphérique est de 5,11mm.

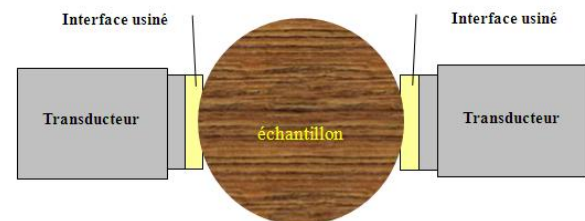


FIGURE 2 – Adjonction des interfaces sur le banc ultrasonore

La présence de ces 2 interfaces de liaison, engendre une modification du temps de vol qu'il est nécessaire de corriger. La correction se fait en mesurant la différence des temps de vol avec et sans embout sur un matériau acceptant une bonne transmission sur un contact ponctuel entre la sphère et le transducteur. L'alliage d'aluminium 2017A répond à cette contrainte. La figure 3 montre la disposition de la sphère pour effectuer cette correction (à droite la sphère est en contact direct sur le plan terminal du transducteur ; à gauche la sphère d'aluminium est en contact avec la calotte sphérique des embouts eux-mêmes en contact avec les plans terminaux des transducteurs).

L'identification de la direction du tir impose de repérer précisément la position de la sphère. La solution retenue est de placer la sphère dans un repère orthogonal dont les directions des axes sont repérées par des pointes sèches (figure 4). L'outil de repérage est monté sur une glissière perpendiculaire à la direction des transducteurs. Cet outil présente sur sa partie inférieure une touche

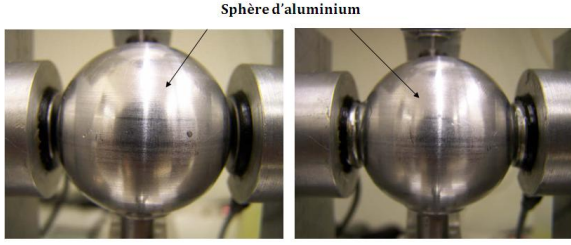


FIGURE 3 – Situation expérimentale pour la mesure de correction due aux interfaces

présentant une calotte sphérique sur laquelle vient se centrer la sphère. Cette touche est réglable en hauteur pour permettre d'ajuster la coïncidence entre l'axe des transducteurs et un diamètre de la sphère.

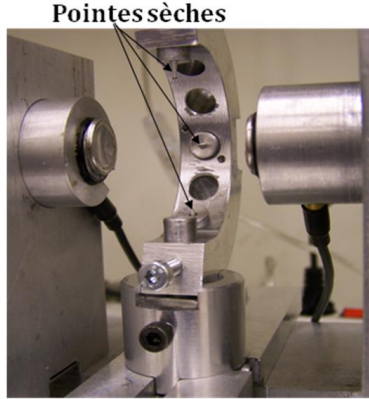


FIGURE 4 – Outil de repérage de la direction équipé de 2 pointes sèches à 90°

L'outil de repérage impose un traçage précis de la sphère sous forme de méridiens et latitudes (figure 5). Un tracé présentant un écart angulaire égal à 15° permet d'avoir 133 directions de mesure. Un outil de repérage est utilisé pour que la sphère prenne un positionnement exact lors des essais.



FIGURE 5 – Mode de traçage

Les essais ultrasonores se font suivant une direction notée OY^* sur la figure 6. La propagation de l'onde est supposée rectiligne et correspondre à un trajet diamétral. (O, X, Y, Z) ou $(O, 1, 2, 3)$ représente le repère choisi pour le traçage de la sphère. Les pôles se trouvent dans la direction Z . (O, X^*, Y^*, Z^*) représente le repère caractérisant le positionnement de la sphère suivant la direction de propagation de l'onde ultrasonore. Pour repérer toutes les directions de mesure au cours des essais, 2 paramètres angulaires sont nécessaires, α et φ , qui caractérisent les rotations entre les repères (O, X, Y, Z) et (O, X^*, Y^*, Z^*) .

La rigidité apparente C_{22}^* suivant l'axe (O, Y^*) est calculée à partir de la relation :

$$C_{22}^* = \rho V^2 = \frac{m}{4/3\pi r^3} \left(\frac{2r}{\tau} \right)^2 = \frac{3m}{\pi r \tau^2} \quad (1)$$

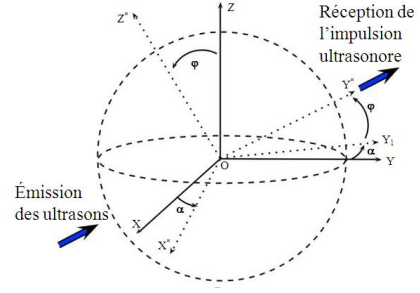


FIGURE 6 – Définition géométrique d'un essai ultrasonore

avec ρ la masse volumique de l'échantillon, V la vitesse de propagation de l'onde suivant (O, Y^*) , m la masse de l'échantillon sphérique, r le rayon de la sphère et τ le temps de vol suivant (O, Y^*) . Une borne supérieure de l'incertitude expérimentale sur la mesure de la rigidité est alors de :

$$\frac{|\Delta C_{22}^*|}{C_{22}^*} = \frac{|\Delta m|}{m} + \frac{|\Delta r|}{r} + 2 \cdot \frac{|\Delta \tau|}{\tau} \quad (2)$$

Cette incertitude vaut 0,8% pour l'alliage d'aluminium et 0,7% pour le bois de hêtre.

3 Modélisation théorique du problème direct

Connaissant la matrice de rigidité du matériau testé, il s'agit de déterminer l'expression de la rigidité en C_{22}^* obtenue lors d'une expérience (figure 6). Les résultats de la totalité des essais ultrasonores autour de la sphère peuvent ainsi être simulés par le calcul. Le tenseur de rigidité d'un matériau anisotrope dans ses axes principaux $(O, 1, 2, 3)$ s'écrit en notation matricielle :

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix} \quad (3)$$

L'équation du problème direct s'obtient par rotation de la matrice de rigidité d'un angle α autour de l'axe (O, Z) puis d'un φ autour de l'axe (O, X^*) :

$$C^* = P_{X \rightarrow X^*}(\varphi) \cdot P_{Z \rightarrow Z^*}(\alpha) \cdot C \cdot P_{Z^* \rightarrow Z}(\alpha) \cdot P_{X^* \rightarrow X}(\varphi) \quad (4)$$

Avec, par exemple, $P_{Z \rightarrow Z^*}(\alpha)$ la matrice de rotation autour de (O, X^*) . La première rotation donne la formule de $C_{Y^*Y^*}$ ou C_{22}^* suivante :

$$C_{22}^*(\alpha) = \sin^4(\alpha) \cdot C_{11} + \cos^4(\alpha) \cdot C_{22} + 2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \sin^2(\alpha) \cdot (C_{12} + 2 \cdot G_{12}). \quad (5)$$

La deuxième rotation donne la formule finale :

$$C_{22}^* = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos^4(\varphi) \cdot \sin^4(\alpha) \\ \cos^4(\varphi) \cdot \cos^4(\alpha) \\ \sin^4(\varphi) \\ 2\cos^4(\varphi) \cdot \cos^2(\alpha) \sin^2(\alpha) \\ 2\cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(\varphi) \sin^2(\alpha) \\ 2\cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(\varphi) \cos^2(\alpha) \end{pmatrix}^T}_{A} \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{22} \\ C_{33} \\ (C_{12} + 2G_{12}) \\ (C_{13} + 2G_{13}) \\ (C_{23} + 2G_{23}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Dans le cas où la sphère est orientée selon des axes quelconques, C_{22}^* est calculé numériquement suivant l'équation 6. Une première série de rotation autour de l'axe (O, Z) puis autour (O, X^*) est effectuée afin d'obtenir une orientation « quelconque » des axes. Une deuxième série de rotation permet ensuite d'obtenir l'ensemble des résultats de l'expérience.

4 Résolution du problème inverse

La solution de l'équation matricielle est unique pour un ensemble suffisant d'essais ultrasonores autour de la sphère (supérieur à 6 essais). Elle s'écrit de manière classique par analogie avec la régression multilinéaire :

$$\vec{C}^\Sigma = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot C_{22}^*(\alpha, \varphi) \quad (7)$$

avec $\vec{C}^\Sigma = [C_{11}, C_{22}, C_{33}, (C_{12} + 2G_{12}), (C_{13} + 2G_{13}), (C_{23} + 2G_{23})]^T$ l'expression matricielle du tenseur d'élasticité recherché dans les axes principaux. La solution existe si la matrice $A^T \cdot A$ est inversible. Cependant, cette solution ne donne accès qu'à 6 données issues de la matrice de rigidité, ce qui ne permet pas de calculer les 9 composantes. Une solution consisterait à utiliser des ondes de cisaillement sur le même échantillon pour compléter ces mesures mais cette solution n'a pas encore été développée actuellement.

5 Résultats numériques du problème direct

Il s'agit ici de simuler un test ultrasonore sur un échantillon sphérique en choisissant un pas angulaire de α et φ égal à 10° .

5.1 Modèle aluminium

Les paramètres d'entrée pour l'aluminium sont les suivants : $E_1 = E_2 = E_3 = 69$ GPa, $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0,33$, $G_{23} = G_{13} = G_{12} = 26$ GPa, $\rho = 2700$ kg/m³.

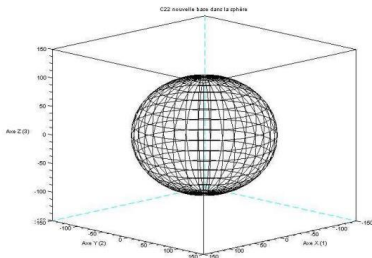


FIGURE 7 – Valeur de C_{22}^* selon l'orientation émission - réception pour le modèle Aluminium

Le matériau étant isotrope, la caractéristique C_{22}^* est identique quelque soit la direction d'émission-réception considérée et vaut 102,4 GPa.

5.2 Modèle bois dans les axes d'orthotropie

Les axes $\{1, 2, 3\}$ correspondent aux axes $\{R, T, L\}$ du matériau. Les paramètres d'entrée pour le bois dit «

standard » sont obtenus à partir du modèle prévisionnel de Guitard [5] : $E_1=2$ GPa, $E_2=1$ GPa, $E_3=15$ GPa ; $\nu_{12}=0,67$, $\nu_{13}=0,057$, $\nu_{23}=0,033$; $G_{23}=1$ GPa, $G_{13}=1,3$ GPa, $G_{12}=0,4$ GPa ; $\rho=500$ kg/m³.

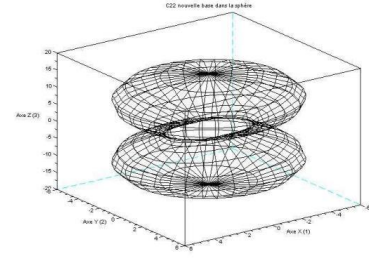


FIGURE 8 – Valeur de C_{22}^* selon la direction de mesure pour le modèle Bois

Le vecteur solution de rigidité est alors le suivant : $[C_{11}, C_{22}, C_{33}, (C_{12} + 2G_{12}), (C_{13} + 2G_{13}), (C_{23} + 2G_{23})]$: [2.7; 1.4; 16.2; 1.8; 4.3; 3.1] GPa. Le vecteur de rigidité associé $[C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{23}, C_{13}, C_{12}, G_{23}, G_{13}, G_{12}]$ est : [2, 7; 1, 4; 16, 5; 1, 1; 1, 7; 0, 98; 1; 1, 3; 0, 4] GPa. La valeur de C_{22} varie en fonction de la direction de propagation considérée (figure 8). Lorsque la direction est celle de l'axe (O, Z) (axe longitudinal), la valeur est égale à C_{33} ; la valeur est celle de C_{22} en OY (axe tangentiel) ; la valeur est celle de C_{11} en OX (axe radial).

5.3 Modèle bois avec une orientation quelconque de la sphère

La sphère est supposée être désorientée de 30° en α et de 50° en φ avant la réalisation de l'ensemble des essais ultrasonores.

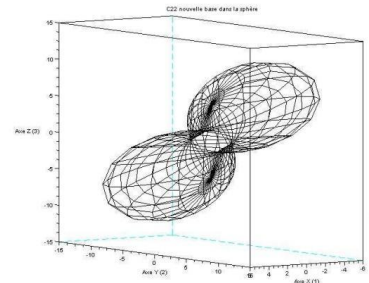


FIGURE 9 – Valeur de C_{22}^* selon l'orientation émission - réception pour le modèle Bois

Le résultat des calculs est montré sur la figure 9. Sur cette figure, la forme caractéristique de la figure 8 est tournée de 30° en α et de 50° en φ . L'identification des axes d'orthotropie d'un matériau peut se faire en utilisant la méthode ACP et permet de retrouver en premier l'orientation du grand axe (angle φ) et, après une réorientation de la forme caractéristique par une rotation de $-\varphi$. On procède à une deuxième recherche par la méthode ACP des 2 autres axes (angle α) dans le plan $(z = 0)$ perpendiculaire au grand axe. Les trois directions d'orthotropie sont ainsi déterminées.

6 Validation expérimentale du banc de mesure

Pour valider notre méthode et éprouver sa robustesse, une campagne d'essais a été menée sur deux ma-

tériaux au comportement connu, l'alliage d'aluminium 2017A, un matériau isotrope homogène, et le bois du hêtre (*Fagus sylvatica* L.), un matériau orthotrope et homogène comparé à la longueur d'onde de l'onde ultrasonore.

6.1 Essais sur un matériau isotrope de référence (aluminium 2017A)

Deux types d'essais ont été menés sur ce matériau. Le premier consiste à appliquer la méthode ultrasonore par contact direct sur l'échantillon sphérique. Il permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore et, en mesurant la masse volumique du matériau, de déterminer le module de rigidité (complaisance) du matériau en traction/compression. Le deuxième est un essai de traction réalisé dans la même direction que la mesure ultrasonore sur une éprouvette prélevée dans la prolongation de la sphère et usinée suivant la direction de mesure ultrasonore. Il permet de déterminer le module d'élasticité et le coefficient de Poisson et par la suite le coefficient de rigidité en traction/compression. Pour chaque essai, les résultats sont obtenus sur un même échantillon en répétant 30 fois la mesure. La masse de l'échantillon est mesuré à l'aide d'une balance de type Mettler PM100. L'erreur de mesure de la balance est $\Delta m = \pm 0,01$ g, le diamètre de l'échantillon est mesuré par un pied à coulisse de type Mitutoyo d'incertitude est $\Delta r = \pm 0,01$ mm. La masse volumique calculée pour cet alliage d'aluminium est alors de $\rho = 2806 \pm 2,8$ kg/m³.

vitesse(m/s)	sans interface	avec interface
min	6138	6126
max	6182	6190
moy	6154	6163
Ecart-type	10,6	12,2
Erreur(%)	0,34	0,39

TABLE 1 – Valeurs expérimentales minimale, maximale, moyenne, écart-type et l'erreur relative de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore

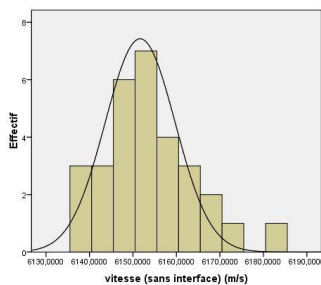


FIGURE 10 – Histogramme et courbe gaussienne des valeurs de vitesse ultrasonore

Les valeurs expérimentales et l'histogramme des vitesses de propagation de l'onde ultrasonore (1^{er} essai) sont présentées dans le tableau 1 et la figure 10. Nous avons réalisé un test de comparaison des moyennes sur des échantillons appariés qui s'est révélé significativement différent au seuil de 5%. Cependant le biais induit par les interfaces est de l'ordre de 8 m/s (erreur de 0,1%).

Les valeurs expérimentales et l'histogramme du module d'élasticité (2^{ème} essai) sont présentées dans le ta-

bleau 2 et la figure 11. L'essai de traction nous a permis de déterminer le coefficient de Poisson de l'aluminium égale à $0,32 \pm 0,8\%$.

Module d'élasticité (MPa)				
min	max	moy	écart-type	erreur(%)
70606	70945	70820	96	0,27

TABLE 2 – Valeurs expérimentales minimale, maximale, moyenne, écart-type et l'erreur relative du module d'élasticité

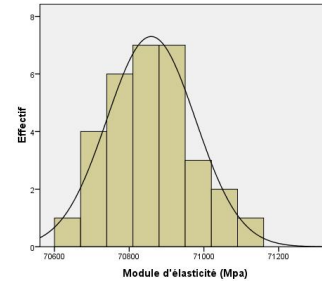


FIGURE 11 – Histogramme et courbe gaussienne des valeurs de module d'élasticité

	Relation	C (MPa)
Essai de traction	$C = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	101300
Essai ultrasonore	$C = \rho \cdot V^2$	106300

TABLE 3 – Valeurs du coefficient de rigidité de l'aluminium déterminée par 2 méthodes

Le tableau 3 présente la comparaison du coefficient de rigidité de l'aluminium déterminée à partir des essais de traction et des essais ultrasonores. Nous avons réalisé un test de comparaison des moyennes sur des échantillons appariés qui s'est révélé significativement différent au seuil de 5%. Cependant le biais induit par le choix de la méthode est de l'ordre de 5000 MPa (erreur de 5%).

6.2 Cas d'un essai réel sur une sphère du hêtre

Nous choisissons expérimentalement de placer les pôles en opérant 2 rotations successives contrôlées, une rotation autour de l'axe des Z d'un angle β (figure 13) d'une valeur de 40° et une deuxième rotation autour de l'axe des Y d'un angle θ d'une valeur de 45° . Le nouveau repère (O, X, Y, Z) n'est donc plus confondu avec le repère d'orthotropie (O, R, T, L). Nous procédons ensuite aux mesures ultrasonores (figure 12), cette figure montre l'équivalent de la figure 9 pour une expérience réalisée sur une sphère du hêtre dont on connaît les axes d'orthotropie. Nous appliquons à ces mesures la méthode ACP afin de retrouver les axes d'orthotropie autrement dit de retrouver les valeurs des angles β et θ (figures 14 et 15).

La méthode ACP permet de retrouver l'angle de la première composante principale avec l'axe des Z : $46,5^\circ$ trouvée pour un angle expérimentalement imposé de 45° . Pour trouver le deuxième angle de rotation du repère d'orthotropie, cette méthode donne $33,4^\circ$ pour une valeur de β imposée de 40° .

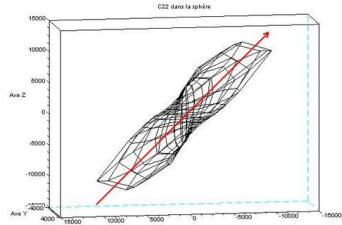


FIGURE 12 – Valeurs expérimentales de C_{22}^* selon la direction de propagation pour une sphère de hêtre

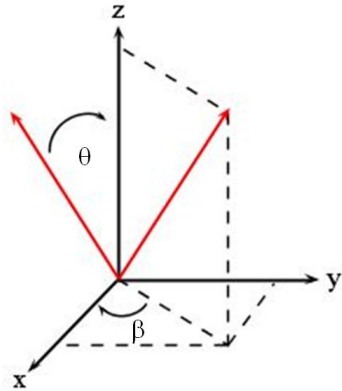


FIGURE 13 – représentation des angles de rotation θ et β

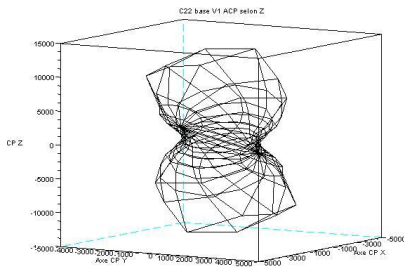


FIGURE 14 – valeurs expérimentales de C_{22}^* du bois du hêtre après rotations d'un angle de $\theta=46,5^\circ$ trouvée par ACP

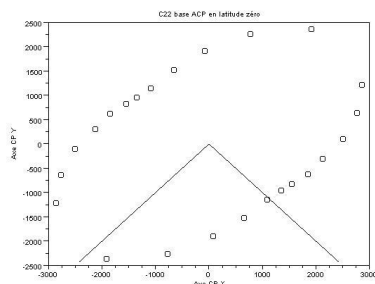


FIGURE 15 – valeurs expérimentales du bois du hêtre après rotations d'un angle de $\beta=33,2^\circ$ trouvée par ACP

7 Conclusion

- Dans cet article, nous avons présenté l'adaptation et la mise au point d'un banc expérimental de mesure ultrasonore par contact direct conduit sur des échantillons sphériques ainsi que la validation de ce banc. Cette méthode sera utilisée dans la recherche des symétries matérielles du bois de la loupe de thuya.
- Le modèle théorique du problème direct donne des résultats en accord avec l'expérience. Cette modélisation théorique (résultats d'une série d'essais ultrasonores en transmission sur une sphère

orientée) a permis de proposer une méthode de détermination des axes d'orthotropie du matériau.

- Les résultats expérimentaux des essais ultrasonores conduits sur un échantillon de bois de hêtre (non orienté selon le repère (O, R T, L)) associés à la méthode ACP, nous a permis de retrouver ces axes d'orthotropie. Les valeurs trouvées sont de $46,5^\circ$ pour un angle expérimentalement imposé θ de 45° et de $33,4^\circ$ pour une valeur β imposée de 40° . θ et β sont les deux angles qui paramètrent le changement de repère.
- La solution proposée du problème inverse (détermination des constantes de rigidité du matériau) ne permet pas actuellement de déterminer les 9 coefficients de la matrice de rigidité mais seulement 3 coefficients et 3 combinaisons linéaires des 6 autres coefficients.
- La poursuite de ce travail consistera à utiliser, toujours sur le même échantillon, des transducteurs d'ondes de cisaillement pour compléter ces mesures et permettre ainsi de bénéficier d'un outil expérimental de caractérisation de la matrice de rigidité rapide et fiable.

Références

- [1] Bucur V. "Ultrasonic velocity, stiffness matrix and elastic constants of wood", *Journal of the Acoustical Society*, n° 44, 23-28 (1985)
- [2] M. François, G. Geymonat and Y. Berthaud, "Determination of the symmetries of an experimentally determined stiffness tensor : Application to acoustic measurements", *International Journal of Solids and Structures*, Volume 35, Issues 31-32, November 1998, Pages 4091-4106
- [3] Rajaofetra N. "Conception d'un prototype d'identification de la direction testée d'une sphère de loupe de thuya lors d'essais mécaniques", *Rapport de stage Laboratoire de Mécanique et Génie Civil Equipe de Mécanique de l'Arbre et du Bois* (2008)
- [4] Bucur V. "Acoustic of Wood", *Springer series in wood sciences*, Editors : T.E. Timell, R. Wimm (2006)
- [5] Guitar D. "Mécanique du matériau bois et composites", *collection Nabla, Cepadues-Editions* (1987)