VALIDATION DES MESURES DES PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DE MATÉRIAUX COMPOSITES À L'AIDE DE LA PROPAGATION ACOUSTIQUE EN MILIEUX STRATIFIÉS PLANS

M. Castaings, B. Hosten

► To cite this version:

M. Castaings, B. Hosten. VALIDATION DES MESURES DES PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DE MATÉRIAUX COMPOSITES À L'AIDE DE LA PROPAGATION ACOUSTIQUE EN MILIEUX STRATIFIÉS PLANS. Journal de Physique IV Proceedings, 1992, 02 (C1), pp.C1-857-C1-860. 10.1051/jp4:19921187 . jpa-00251149

HAL Id: jpa-00251149

<https://hal.science/jpa-00251149>

Submitted on 1 Jan 1992

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.

VALIDATION DES MESURES DES PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DE MATÉRIAUX COMPOSITES À L'AIDE DE LA PROPAGATION ACOUSTIQUE EN MILIEUX STRATIFIÉS PLANS**M. CASTAINGS et B. HOSTEN***Laboratoire de Mécanique Physique, Université de Bordeaux I, URA C.N.R.S. N° 867, 351 Cours de la Libération, F-33405 Talence cedex, France*

Résumé - Nous présentons une méthode permettant de valider les mesures des constantes d'élasticité de milieux stratifiés plans viscoélastiques. Pour de tels milieux, la méthode de mesure impose généralement une fréquence élevée. Il est donc essentiel de vérifier si les résultats obtenus sont représentatifs du matériau en régime statique.

Abstract - This paper presents a method to validate measurements of elastic constants for n-layered anisotropic and viscoelastic plates. For such a medium, the measurement method uses ultrasonic waves with high frequencies. Consequently it's important to verify if the results are representative of the material in the static regime.

Introduction:

La méthode d'identification des constantes de viscoélasticité des matériaux ^{1,2} présente des restrictions concernant le domaine fréquentiel. En effet, le milieu étudié doit être considéré comme homogène et infini ce qui, pour des échantillons stratifiés plans de faible épaisseur, impose à la fréquence de caractérisation une valeur souvent élevée pour laquelle l'atténuation du matériau joue un rôle important. Il est donc essentiel de savoir si les résultats obtenus sont représentatifs du milieu en régime statique ou du moins s'ils restent valables pour des domaines fréquentiels pour lesquels l'atténuation devient négligeable.

Après avoir exposé les conditions restrictives sur la fréquence de mesure des constantes, nous présenterons un moyen de valider ces constantes aussi bien à la fréquence de caractérisation qu'à des fréquences bien plus basses.

I) IDENTIFICATION DES CONSTANTES D'ELASTICITE :

La méthode d'identification ^{1,2} utilise l'acquisition d'échos isolés transmis par l'échantillon. Pour considérer le milieu étudié comme homogène et infini, les multi-réflexions entre les interfaces solide/solide doivent être inexistantes ($\lambda \gg$ épaisseur des couches) et celles entre interfaces liquide/solide et solide/liquide dans la plaque immergée doivent être séparables ($\lambda \ll$ épaisseur de l'échantillon). Ces considérations conduisent alors à une modélisation du milieu similaire à celle des structures cristallines.

L'échantillon étudié ici est une plaque en matériau composite, stratifiée plane constituée de 32 couches de fibres de carbone unidirectionnelles à matrice Peek. Son épaisseur est de 4,24 mm et sa densité vaut 1,58. Il présente une symétrie orthotrope. Deux plans principaux sont étudiés : le plan P12 perpendiculaire aux fibres (plan quasi-isotrope) et le plan P13 contenant les fibres (plan fortement anisotrope). Pour chacun d'eux, deux modes sont générés : un mode quasi-longitudinal Q1 et un mode quasi-transverse Qt. Les mesures sont effectuées à la fréquence de 2,27 MHz et sont répertoriées dans le tableau 1.

Tableau 1 - Constantes d'élasticité Cij (en GPa).

C11	C22	C12	C66	C33	C13	C55
13,4	12,9	6,7	3,2	119,4	6	5,4

Pour un tel milieu, l'atténuation anisotrope influence fortement la propagation d'ondes ultrasonores. Il est donc intéressant de quantifier les constantes de viscoélasticité qui sont représentatives de ce phénomène. Les résultats présentés dans les tableaux 1 et 2 sont obtenus dans deux plans principaux suivant la procédure définie dans la référence 1.

Tableau 2 - Constantes de viscoélasticité Nij (en Pa.s) à la fréquence de 2,27 MHz.

N11	N22	N12	N66	N33	N13	N55
9,4	11	3	2	44	9	13

L'ensemble des constantes obtenues (Cij et Nij) sont représentatives du milieu global constitué des trente deux couches, mais aussi de chacune d'elles puisqu'elles sont identiques et orientées dans la même direction.

II _ VALIDATION DES CONSTANTES D'ELASTICITE:

Le principe de validation des constantes d'élasticité repose sur la confrontation des coefficients de transmission de la plaque, calculés et mesurés. Contrairement à la méthode précédente, le milieu est maintenant considéré comme fini et hétérogène.

a) Méthode de calcul:

Elle est basée sur la méthode de Thompson / Haskell ^{3,4,5} adaptée à la propagation de modes hétérogènes ⁶. La prise en compte de l'anisotropie sera décrite dans une publication ultérieure.

A chaque couche i , correspond une matrice de transfert A_i reliant les vecteurs de déplacement et de contrainte d'une interface à ceux de l'autre interface. Ainsi, de proche en proche, on construit la matrice de transfert globale A permettant d'obtenir les vecteurs des déplacements et des contraintes de la dernière interface à partir de ceux de la première interface. Les ondes se propageant dans le milieu incident (eau) sont des ondes planes homogènes non-amorties et sont converties à l'interface fluide/solide anisotrope absorbant en ondes hétérogènes de volume ^{1,2,6}. La matrice de transfert A et les conditions aux limites de la plaque permettent le calcul du coefficient de transmission de la plaque. Celui-ci évolue avec deux variables : l'angle d'incidence et la fréquence, dont une, au choix, sera fixée. Les paramètres de calculs sont l'épaisseur, la densité et les constantes préalablement mesurées (Cij et Nij) des couches constituant le milieu mais aussi la célérité de l'onde incidente.

b) Méthode de mesure:

Elle consiste à mesurer la fonction de transfert de l'échantillon. Les réflexions multiples dans l'échantillon augmente considérablement l'étendue du faisceau ultrasonore à la sortie de l'échantillon [Fig. 2]. Pour recevoir la totalité des ondes transmises et se placer dans les conditions d'ondes planes, le transducteur récepteur est déplacé perpendiculairement au faisceau transmis [Fig.2].

A chaque position du récepteur, les signaux $S_j(t)$ sont mémorisés dans un microcalculateur. Leur somme $s(t) = \sum_j s_j(t)$ est représentative d'un signal acquis par un transducteur infini, à condition de choisir judicieusement le pas du déplacement. La sommation s'arrête lorsque le niveau du signal descend en dessous d'un seuil donné.

Le coefficient de transmission de la plaque en fonction de la fréquence est sa fonction de transfert calculée à l'aide du module du rapport des spectres des signaux transmis et incident :

$$T(f) = \frac{|S(f)|}{|E(f)|}$$

avec $E(f) = \text{TF} [e(t)]$: spectre du signal incident
 $S(f) = \text{TF} [s(t)]$: spectre du signal total transmis par la plaque
 TF : Transformée de Fourier.

La bande de fréquence de 0,2 à 3 MHz est couverte à l'aide de trois transducteurs (large bande, à immersion) de fréquences centrales respectives 0,5 MHz, 1 MHz et 2,25 MHz.

- Figure 2 - Chaînes de mesure et de calcul du coefficient de transmission.

La figure 2 illustre ce procédé de validation dans le cas d'un stratifié à deux couches.

III _ RESULTATS:

Les figures 3(a) et 3(b) présentent les résultats relatifs à l'échantillon de Peek-carbone. Les calculs et mesures sont effectués pour les deux plans P12 et P13 à des incidences différentes.

La confrontation des coefficients de transmission calculés et mesurés montre que la théorie coïncide bien avec l'expérimentation dans toute la gamme de fréquence étudiée et pour les deux plans.

On observe qu'en dessous de 1 MHz pour le plan P12 et en dessous de 0,5 MHz pour le plan P13, l'atténuation joue un rôle négligeable puisque le coefficient de transmission a des maximums très voisins de 1. Par conséquent, la bonne confrontation des mesures et du calcul de transmission, pour les deux plans et en dessous de ces fréquences, permet de dire que les constantes C_{ij} mesurées à 2,25 Mhz sont représentatives des C_{ij} correspondant à un régime proche du régime statique.

Au delà de 1 MHz, la viscoélasticité du matériau devient de plus en plus prépondérante et la comparaison entre calcul et mesures met en cause les valeurs des paramètres C_{ij} mais aussi des N_{ij} . On peut donc, une fois les C_{ij} validés en basse fréquence, vérifier si les mesures préalables des N_{ij} permettent un calcul du coefficient de transmission en accord avec les mesures. Il suffit de travailler à une fréquence mettant bien en jeu les phénomènes de viscoélasticité du milieu sans toutefois empêcher toute transmission de signal. Ainsi, on peut dire dans le cas présent, que les valeurs des N_{ij} obtenues pour les deux plans sont satisfaisantes jusqu'à environ 2,5 MHz.

Au delà, les écarts observés peuvent être provoqués par des phénomènes non pris en compte dans le modèle de calcul, comme par exemple, la diffraction liée à la structure fibreuse du composite.

(a) Plan P12 sous incidence de 10° (b) Plan P13 sous incidence de 5°

- Figures 3 - Coefficient de transmission théorique (—) et expérimental (ooo)

-Conclusion:

Le choix d'une fréquence de caractérisation élevée ne présente pas d'inconvénient pour la connaissance des constantes d'élasticité du milieu composite à fibres, étudié dans cette étude. Il reste à vérifier si ce résultat est toujours valable pour des composites à plus forte proportion de matrice et/ou à matrice plus absorbante. La confrontation des coefficients de transmission calculé et mesuré à la fréquence de caractérisation permet de valider les résultats de mesures des constantes d'élasticité et de viscoélasticité.

Si on abaisse la fréquence, on s'approche du régime statique. L'atténuation du milieu devient négligeable et la confrontation précédente revient alors à vérifier si les constantes d'élasticité mesurées sont représentatives du milieu proche du régime statique.

L'exploitation du coefficient de transmission présente un autre intérêt : celui d'optimiser les valeurs des constantes d'élasticité et de viscoélasticité en ajustant le coefficient de transmission théorique sur celui expérimental. Ce dernier point fera l'objet de développements futurs.

Références:

- 1- B. Hosten M. Deschamp B.R.Tittmann "Inhomogeneous wave generation and propagation in lossy anisotropic solids. Application to the characterization of viscoelastic composite material" JASA Vol. 82, No. 5, 1763-1770 (1987).
- 2- B. Hosten "Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer" JASA Vol. 89, No. 6, 2745-2752 (1991)
- 3- W.T. Thomson "Transmission of elastic waves through a stratified medium" J.Appl.Phys. Vol 21, 89-93 (1950).
- 4- N.A. Haskell "The dispersion of surface waves on multilayered media", Bull. Seismol. Soc. Am. Vol 43, 17-34 (1953).
- 5- L.M. Brekhovskikh "Waves in layered media" Academic press, New York (1980), 53...
- 6- B.Hosten "Bulk heterogeneous plane wave propagation through viscoelastic plates and stratified media with large values of frequency domain" Ultrasonics Vol 29, 445-449 (1991).