

**L'APPLICATION DES ONDES ULTRASONORES DANS L'ETUDE
DES PROPRIETES DE RIGIDITE ET D'AMORTISSEMENT DES
MATERIAUX VISCOELASTIQUES**
*THE STUDY OF THE RIGIDITY AND AMORTISSMENT PROPRIETES
OF VISCOELASTIC MATERIALS BY USING THE ULTRASONIC
WAVES*

M.Y.FACI, M.M.BACCOUCHE, MM. A.Satur, M. A.BADDIDI Bouda, M.A.MEBTOUCHE,
D. BERENDJENE

Laboratoire de caractérisation et d'instrumentation,
Centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle
BP 64, Route dely Brahim, cheraga Alger, Algérie

Email : elfaci@yahoo.fr

Tel : 00 213 21 36 18 50

Fax: 00 213 21 36 18 50

Résumé

L'application des ondes ultrasonores dans l'étude des propriétés de rigidité et d'amortissement dans les matériaux viscoélastiques permet la détermination du module d'élasticité et du coefficient d'amortissement sur un seul échantillon.

A cet effet nous avons remarqué que lors des examens ultrasonores en mode écho ou en mode de transmission des échantillons en matériaux composites et en polymères, il se produit une certaine modification des paramètres acoustiques et de transmission inhérents à la vitesse de propagation et à l'atténuation de l'onde émise due à l'acuité des résonances du comportement vibro-acoustiques des structures. Notre étude réside dans l'exploitation de ces paramètres acoustiques en utilisant un modèle rhéologiques qui répond au comportement viscoélastiques du milieu de propagation. Une récente méthode de traitement de signal basé sur l'analyse particulière dans le domaine temporelle des signaux, permet une meilleure résolution et une bonne précision du temps de vol des ondes émises. Les résultats obtenus sont jugés encourageants et incitent sa généralisation pour la caractérisation réelle de nouveaux matériaux.

Mots clés: Ultrasons, composite stratifié, polymère, amortissement, rigidité

Abstract

The ultrasonic wave application in viscoelastic material to study the rigidity and amortisement proprieties allows the elasticity module and amortisement coefficient determination. As a matter of fact, we have noticed during the ultrasonic examination in echo or transmission mode of the parallelepiped samples in composite and polymer material, an occurrence of modification of the acoustic and transmission inherent with the propagation velocity and the attenuation of the transmitted wave. Our study consists in exploiting these acoustic parameters while using rheological model that comes up with viscoelastic behaviour of the propagation medium. A recent method of signal process based on the particular on signal temporal field allows a better resolution and the good precision of the time of flight emitted.

The results obtained are in agreement with the literature and incite to apply for other new composite material.

Keys: *Acoustic, laminated composite, polymer, amortissement, rigidity.*

INTRODUCTION

Parmi les essais non destructifs les plus avantageux pour la détermination des propriétés de rigidité et de d'amortissements des matériaux viscoélastiques on compte la technique des ondes ultrasonores basées sur la détermination de la vitesse de phase d'une onde de volume se propageant à travers le milieu et par conséquent la détermination des modules d'élasticité et des coefficients d'amortissement.

Notre objectif est l'application de la transformée d'Hilbert sur un milieu anisotrope, a cet effet on présente trois types échantillons:

- Un composite stratifié unidirectionnel.
- Un polyéthylène.
- Un Polyuréthane.

TECHNIQUES UTILISEES

La Méthode classique C-SCAN est utilisée pour visualiser les zones endommagées de la structure, les paramètres sensibles à ses zones se résument dans la vitesse et l'atténuation ultrasonore dont l'épaisseur et la densité doivent être connue pour le calcul des propriétés élastiques du milieu. La plaque est considérée épaisse si et seulement si deux échos internes et successifs sont séparés dans le domaine temporel [Gra94], il est à noter qu'il est plus simple de mesurer la vitesse et l'atténuation sur des plaques épaisses [Hsu92]

Tableau N° 01 : Valeurs réelles des trois références.

Type de composite	épaisseur	Densité
Carbone époxy	5.40	1.18
Polyéthylène	2.50	0.90
Polyuréthane	1.80	1.30

et [Day92]. Cependant sur les plaques minces quand les échos se chevauchent seulement un ou deux des quatre paramètres sont mesurables simultanément [Kind88] et [Pia89]. Quant aux matériaux absorbants, le cas des composites, la mesure des atténuations impose le choix des intervalles de fréquence appropriés, à cet effet si la fréquence est si importante le signal est d'autant plus atténué et si la fréquence est si basse la sensibilité est quasiment nulle et par conséquent toute mesure est pratiquement impossible [Gra 94].

ETUDE EXPERIMENTALE

Le signal ultrasonore est produit par un générateur d'impulsion / récepteur électronique qui excite un capteur piézo-électrique, l'onde plane transmise à travers la plaque avec une conversion de mode selon les angles de rotation de la plaque, le capteur piézo-électrique reçoit le signal puis il l'amplifie, il est digitalisé par un oscilloscope numérique (TEKTRONIX TDS, modèle 3054), les signaux reçus seront transférés à l'ordinateur. Toutes les mesures ont été réalisées dans une cuve d'eau où la température est de 21°, on note que la vitesse ultrasonore dans l'eau est de 1485 m/s. Nous avons testé différents matériaux (tableau N°01), le premier est un composite stratifié de 10 plis de tissu carbone/époxy (quasi isotrope) transverse dans le plan de la plaque [Che01]. Afin d'éviter des erreurs de calcul les spécimens doivent être plane et parallèle au moins de 1% de la face latérale [Sel85] la fréquence utilisée est de 2.25MHZ. Le deuxième et le troisième échantillon sont respectivement un polyéthylène et un polyuréthane, la fréquence utilisée est de 5 KHz, la

mesure des densités est réalisée par le principe d'Archimède avec une erreur de $\pm 0.01\text{gr/cm}^3$.

La transformé d'Hilbert des signaux de référence et à travers le milieu est utilisé pour la détermination de la vitesse de phase, cette méthode de traitement de signal de grande résolution est intéressante pour l'interprétation temporelle pour tout signal acoustique permettant une bonne estimation et une précision de temps de vol.

Le signal de référence est obtenu lorsque l'échantillon est placé entre les deux transducteurs, en alignant et ajustant parallèlement les deux transducteurs à une certaine distance permettant à l'échantillon d'être placé entre eux de sorte que le temps de propagation entre transducteur et le spécimen soit de quatre fois supérieure au temps à travers le spécimen (Sel 85), le signal de référence est obtenu en mesurant le pas dans l'eau sans l'interposition de l'échantillon entre eux, la vitesse peut être calculée comme suit:

$$V_i(x_i, \varphi) = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{V_0 \tau_i}{d} \left[\frac{V_0 \tau_i}{d} - 2 \cos \theta \right]}} \quad (1)$$

V_0 est la vitesse de référence de l'eau à la température mesurée.

τ_i l'écart du temps de propagation entre les deux parcours.

θ_i l'angle d'incidence selon la direction i.

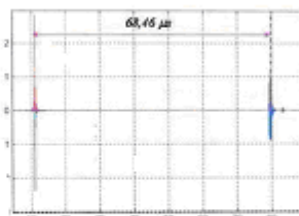
RESULTATS ET DISCUSSION

Les vitesses minimales de propagation sont calculées par la mesure de temps de vol en utilisant la relation (1) pour les dix signaux, le coefficient d'atténuation de l'onde transversale et longitudinale s'exprime simplement en fonction du rapport des faisceaux acoustiques reçus en présence et en absence de l'échantillon (respectivement A_i , A_t et A_0).

Les mesures seront prises entre 0° et 30° pour le composites et entre 51° jusqu'à 59° pour les polymères respectivement les polyéthylènes et les polyuréthanes.

On peut estimer le temps de vol pour les deux cas d'incidence longitudinale et transversale prise séparément et contenant au moins l'écho d'interface eau / spécimen sont individuellement comparables avec le signal de référence également traitée (fig 01, fig 02, fig 03).

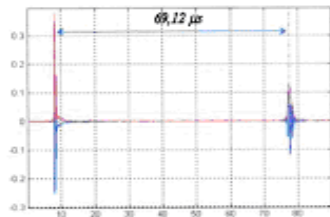
Amplitude(V)



Temps(s)

Signal01:Signal temporel des échos
enveoppés de l'onde longitudinale en
immersion du composite carbone époxy

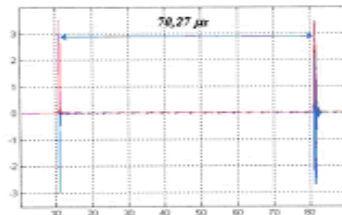
Amplitude(V)



Temps(μs)

Fig02:Signal temporel des échos enveloppés de l'onde transversale en immersion du carbone époxy

Amplitude(v)



Temps(μs)

Fig03:Signal temporel de l'écho de référence enveloppé en immersion

Néanmoins l'estimation du temps de vol entre les pics des transformées d'Hilbert des échos d'émission et de l'interface eau/spécimen de chacune de ces différentes ondes incidentes longitudinales et transversales permet le recouvrement des vitesses de propagation des ondes ultrasonores à travers l'axe de symétrie du matériau, par conséquent le module de Young E_1 et de cisaillement approprié G_{12} sont données par les relations suivantes:

$$\rho V_T = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \quad (2)$$

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2G = K + \frac{4}{3}G = \frac{G(4G - E)}{3G - E} \quad (3)$$

Bien que le rapport des amplitudes de la transformation de Fourier soit fortement atténué on fait recours à la théorie en utilisant la relation suivante:

$$(V_L/V_T)^3 = 2 (\alpha_T / \alpha_L) \quad (4)$$

Les mêmes procédures sont respectées pour les deux autres matériaux, le tableau ci dessous recueille tous les paramètres à savoir la vitesse ultrasonore, l'atténuation et le module de Young

	V_L (m/s)	V_T (m/s)	Rupture q d'impédance	α_L (dB/mm)	α_T (dB/mm)	E_1 (Gpa)	G_{12} (Gpa)
Carbone époxyde	2757034	1522.69	0.85	0.43	0.93	6.99	2.73
Polyéthylène	2102.27	643.24	0.98	0.36	0.65	1.08	2.48
Polyuréthane	2010.86	577.55	0.91	0.41	0.99	1.26	3.52

Tableau02: Résultat en banc d'essai par immersion.

On s'aperçoit que Les valeurs des vitesses de propagation et d'atténuation sont plus proches de la littérature, l'absorption est nettement élevée dans l'axe transversal relativement à la normale des différents matériaux traités, ce qu'il leur confère un degré d'hétérogénéité important suite à l'empilement des fibres pour le cas des composites et de cristallinité pour le cas des polymères. Les constants élastiques réels sont aussi déterminés en utilisant les équations suivantes:

$$C_{ij}(f) = \beta \cdot V_{ij}^2 \quad (5)$$

$$N_{ij}(f) = \alpha_{ij} \cdot V_{ij} / \pi \cdot f \quad (6)$$

Rokhlin et all [Rok 92] utilisent la solution directe de l'équation de Christoffel (07) pour la détermination des constantes élastiques en injectant l'ensemble des données des vitesses pour les différents modes de propagations:

$$(C_{ijkl} n_j n_l - \delta_{ik} \cdot \beta \cdot V_j^2) \cdot P_k = 0 \quad (7)$$

Les constantes réelles de l'ensemble des cinq mesures sont déduites de l'équation (7), et seront affichés dans le tableau suivant:

Matériaux	Rigidité	Type d'onde	Vitesse (m/s)		Atténuation		Partie réelle de la rigidité (GPa)	Amortissement $n \times 10^{ex-2}$
			Minimale	Ecart type	Minimale	Ecart type		
Carbone epoxy	C11	Longitudinal O_L	2757	80	0.43	0.028	89.71	16.78
	C66	Transversale OT Plan (1.2) Angle critique $i_c = 30^\circ$	1522	24	0.093	0.08	27.36	20.04
polyéthylène.	C11	Longitudinale (OL)	2102	72	0.36	0.023	39.77	0.48
	C66	Transversale OT Plan 1.2 Angle critique $i_c = 59^\circ$	643	16	0.65	0.05	3.72	0.66
Polyuréthane	C11	Longitudinale (OL)	2010	86	0.410	0.018	52.56	5.25
	C66	Transversale OT Plan 1.2 Angle critique $i_c = 51^\circ$	577	12	0.99	0.06	4.33	3.31

Tableau N°03 : Obtention des rigidités complexes des matériaux viscoélastiques par la technique ultrasonore en immersion

a-Détermination simultanée des paramètres acoustiques :

En mode de réflexion une telle référence d'épaisseur d est de densité ρ est immergée dans une cuve d'eau ($t_{\text{eau}} = 20^\circ\text{C}$), l'impulsion ultrasonore se propage dans le fluide couplant eau est réfléchi à l'interface eau spécimen pour produire l'écho S_2 , une partie de l'impulsion l'écho S_3 traverse le spécimen qui sera réfléchi dans la seconde interface, alors que S_1 réfléchit à l'interface entre l'eau et le matériau de référence :

Le champ de déplacement est

$$S_0(t) = f(\omega t - k_0 \cdot x) \quad (06)$$

$$S_1(t) = R_{03} f(\omega t - k_0(L - d)) \quad (07)$$

$$S_2(t) = R_{01} f(\omega t - 2k_0(L - d)) \quad (08)$$

$$S_3(t) = (T_{01})^2 f(\omega t - 2k_0(L - d) - 2k_1 d) \quad (09)$$

Soit R_{ij} et T_{ij} sont respectivement les coefficients de réflexion et de transmission des interfaces entre i et j en incidence normale

Avec

$$Z_j = \rho_j c_j \quad (10)$$

k_0 et k_1 sont les nombres d'ondes respectivement dans l'eau et le spécimen avec

$$k_0 = \omega / c_1 - l \alpha(v) \quad (11)$$

Avec v la fréquence

Propriétés mécaniques recherchées:

On utilise la méthode mixte pour la détermination de l'épaisseur et le temps de vol, par contre la densité et l'atténuation seront déterminé par l'analyse fréquentielle.

Nous procéderons par l'enregistrement du signal de référence et celui à travers le spécimen qui contient au moins deux échos séparés S_2 et S_3 enveloppée par la transformée d'Hilbert (Courbe en rouge), le temps de vol est estimé simplement pour chaque écho enveloppé t_2 et t_3 en utilisant les pics de la transformée d'Hilbert correspondante aux échos du signal original, d'où $T_1 = 4.18 \mu\text{s}$ et $T_2 = 0.57 \mu\text{s}$.

On enregistre les différents échos en utilisant la relation:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad \rho = \pi \quad (12)$$

On obtient la transformée de Fourier respectif de chaque écho, $S^*_1(v_0)$, $S^*_{2^*}(v_0)$ et, $S^*_{3^*}(v_0)$ qui sont comparable à v_0 . L'ensemble des résultats est recueilli dans le tableau suivant:

	d (mm)		C _L (m/s)		ρ (g/cm ³)		α (db/mm)	
	A ₁	A ₂	A ₁	B	C	B	C	B
Carbone époxy	5.31	5.46	2943.60	2750	1.07	1.18	0.430 02.5mhz	-
Polyéthylène	2.50	2.54	1924	1950	0.89	0.90	0.24à5mhz	0.249 à 5 mhz
Polyuréthane	1.79	1.85	2131.90	2090	1.30	1.30	0.43 à 5 mhz	0.461 à 4 mhz

Tableau 04: Synthèse des résultats obtenus par échos.

A₁ : temps de vols

A₂ : valeur obtenus en utilisant le pied à coulisse

B : valeur de référence.

C : Estimation du rapport spectral.

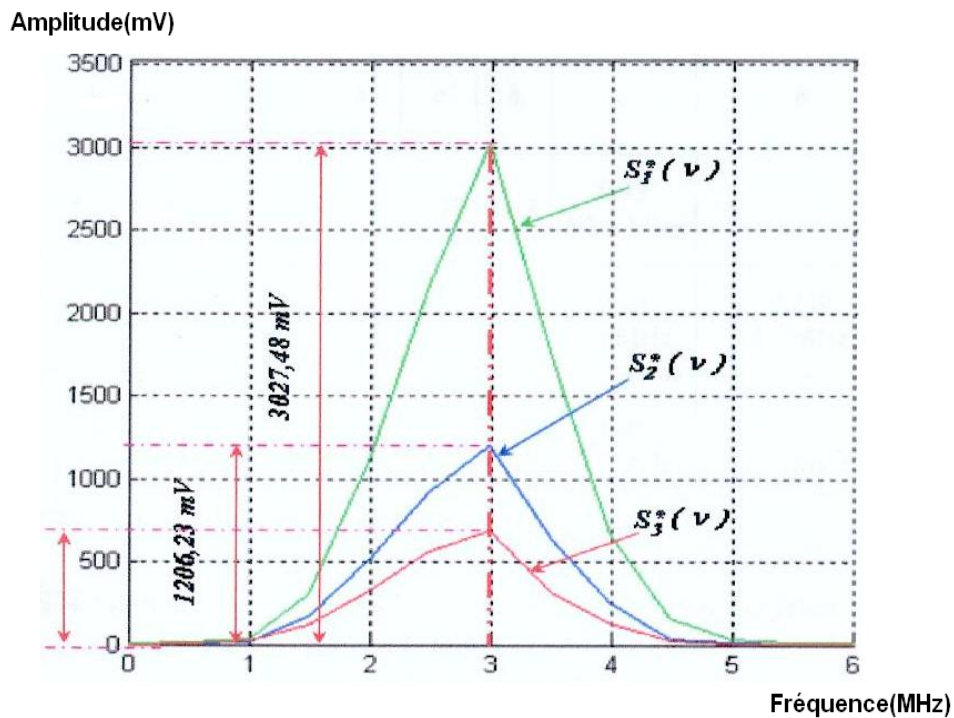


Fig04 : Représentation complexes de Fourier des échos S1, S2 et S3 du composite carbone époxy

CONCLUSION

D'après notre recherche il s'est avéré que l'obtention des paramètres acoustiques dans le cas des matériaux viscoélastiques par la technique de transmission reste un domaine très délicat. La caractérisation est basée sur une bonne estimation des mesures ultrasonores qui

sont réduites au domaine temporel et fréquentiel des ondes de propagation à travers le matériau.

D'après les résultats expérimentaux, la propagation et l'atténuation des ondes acoustiques apparaissent comme deux phénomènes dépendant l'un de l'autre, elles permettent l'identification de leurs propriétés viscoélastiques, l'anisotropie ne présente pas une difficulté notoire puisque les mesures à haute fréquence sont réalisables puisque les mesures faites sur les différents échantillons sont appréciables. Pour le cas du polymère, milieu considéré comme absorbant, on distingue un petit écart entre les deux méthodes du fait de la dépendance de la rigidité et l'amortissement par rapport à la fréquence. Nous déduisons que la connaissance des caractéristiques a permis l'identification des propriétés d'élasticité et de viscoélasticité des matériaux étudiés en composite stratifiés unidirectionnel de fibre de carbone/époxy, en polyéthylène et polyuréthane.

Les résultats obtenus lors de l'application de la transformée de Fourier pour l'estimation du temps de vol de l'onde émise présente des résultats jugés très satisfaisants par rapport à la littérature tout en encourageant sa généralisation pour une caractérisation réelle de nouveaux matériaux.

BIBLIOGRAPHIES

[1] - Ilić O., Dragon A., Hild F. « In Continuum damage mechanics of materials structures and structures », 2002, (O. Allix, F. Hild Ed.), Elsevier Science Ltd.

[2]-Hahn H T, Tsai S W. « Nonlinear behavior of unidirectional composite materials » -. Journal of Composite Materials, 1973, V7, pp 102-118.

[3]- Ladevèze P., Pelle JP. « La maîtrise du calcul en mécanique linéaire et non linéaire », 2001, Edition Hermès, Paris.

[4]- Toubal, L., Lorrain, B., Karama, M. « Evaluation des déplacements et des déformations par Photogrammétrie », 2003, 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice 1-5 septembre 2003.

[5]- Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B. élastique d'un composite mince par interférométrie speckle » - 2004. Journée scientifique, Fournie, D., Ratel, M.P. « Détermination du tenseur AFM - Tarbes, France 12 janvier 2004.

[6]- Toubal, L. « Approches analytique et expérimentale de l'endommagement par fatigue d'un Composite Carbone/Epoxy », 2004, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III.

[7]-[AM5122], Nemoz.G «Texture textile tridimensionnelle» doc. AM 5122 [collection technique 2006]

[8]- [CARR00] Carrega et coll., « matériaux polymères » Edition Dundee 2000.

[9]- [GAY05] Gay.D " Matériaux composites" Edition Hermes 2005.

[100]-[REYP95] Reyue M «Les matériaux composites », Edition: Presses universitaires de France, 1995.