

ETUDE DE LA PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES EN MILIEU HETEROGENE :  
APPLICATION AU CALCUL DE LA DISPERSION DE VITESSE PAR  
UNE TECHNIQUE LARGE BANDE.

A. BENCHAALA, J.P. HERAULT, C. GAZANHES

LABORATOIRE DE MECANIQUE ET D'ACOUSTIQUE- CNRS- 31, chemin Joseph-Aiguier - 13402 MARSEILLE CEDEX 09

**RESUME** L'étude de la propagation d'ondes acoustiques en milieu hétérogène met en évidence une dispersion de type géométrique dans la vitesse des ondes ultrasonores. Pour déterminer l'effet de dispersion caractérisant le matériau composite stratifié choisi ici on met en oeuvre une technique faisant appel à des signaux ultrasonores à large bande. On détermine par analyse de Fourier les spectres de phase des signaux émis et transmis et on en déduit la loi de dispersion de la vitesse de phase.

**SUMMARY** The ultrasonic waves propagation in the dispersive media is studied and the materials chosen for this study are layered composite materials. The dispersive effect of the acoustical waves characterizing these materials are studied by a large band technics. In this technics, the phase velocity of the dispersive medium is computed from the phase spectrum of the emitted and received impulses got by a Fourier transform.

**INTRODUCTION.** - Une onde ultrasonore se propageant en milieu hétérogène fait apparaître un phénomène de dispersion dans la vitesse de phase de cette onde ; en effet la forme de l'onde est fortement altérée et présente une augmentation de durée et une modification de la fréquence initiale. Les variations de la vitesse de phase en fonction de la fréquence engendrées par cette dispersion de type géométrique entraîne, lors de contrôles non destructifs, des imprécisions voire des impossibilités de mesure dans la localisation de défauts. C'est pourquoi nous avons réalisé des modèles standards de milieux hétérogènes sous forme de composites stratifiés (notamment en couches alternées d'aluminium et de résine époxyde) constituant des échantillons de référence de caractéristiques connues.

L'étude de la vitesse de phase dans ces matériaux composites révèle deux modes de propagation : un mode lent (ou mode primaire) et un mode rapide (ou mode secondaire) qui ont été mis en évidence par SUTHERLAND H.J. et LINGLE R. /1/ et observés par YEW C.H. et JOGI P.N. /2/ et par nous-mêmes /3/ et /7/.

Afin de déterminer l'effet de dispersion qui caractérise le matériau considéré, on a mis en oeuvre une technique faisant appel à des signaux ultrasonores à large bande. On détermine par analyse de Fourier les spectres de phase du signal émis et du signal transmis et on en déduit la loi de dispersion de la vitesse de phase. Cette technique de mesure de

vitesse par signaux à large bande est une adaptation de celle utilisée par SACHSE W. et PAO Y.H. /4/.

Pour vérifier la validité de la technique à large bande, les résultats obtenus dans ces conditions sont comparés à ceux donnés par la technique de l'épaisseur variable exploitée par LYNNWORTH L.C. et al. /5/ et par PAPADAKIS E.P. /6/.

Principe de la technique à large bande

Considérons un signal d'entrée appliqué sur le milieu dispersif de longueur  $x = L$  ; après traversée du milieu, on recueille en sortie un signal dispersé dont la forme varie en fonction de  $L$  et du temps  $t$ .

Au point  $x = 0$  et pour  $t \geq 0$  le signal incident, de pulsation  $\omega$ , peut se mettre sous la forme :

$$(1) \quad E(0,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

où  $g(\omega) = |g(\omega)| e^{i\phi_0}$  qui est la transformée de Fourier de  $E(0,t)$

$|g(\omega)|$  est l'amplitude spectrale

$\phi_0$  est la phase initiale du signal.

Après avoir traversé l'épaisseur  $L$  du milieu dispersif le signal de sortie est de la forme :

$$(2) \quad E(L,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) e^{i(\omega t - kL)} d\omega$$

avec  $k = \frac{\omega}{c(\omega)} + i\alpha(\omega)$ ,  $c(\omega)$  étant la vitesse de phase et  $\alpha$  l'atténuation.



ETUDE DE LA PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES EN MILIEU HETEROGENE : APPLICATION AU CALCUL DE LA DISPERSION DE VITESSE PAR UNE TECHNIQUE LARGE BANDE

En portant la valeur de  $k$  dans (2) et en posant

$$F(L, \omega) = g(\omega) e^{-\alpha L} e^{-i\omega L/c}$$

$F(L, \omega)$  devient en tenant compte de l'amplitude spectrale et de la phase

$$(3) \quad F(L, \omega) = |g(\omega) e^{-\alpha L}| e^{-i(\frac{\omega L}{c} - \phi_0)}$$

que l'on peut encore écrire selon :

$$(4) \quad F(L, \omega) = |F(L, \omega)| e^{i\phi(\omega)}$$

En revenant à (2) on a donc :

$$(5) \quad E(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(L, \omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$F(L, \omega)$  est la transformée de Fourier du signal  $E(L, t)$  dont le spectre de phase est donné selon (3) et (4) par la relation :

$$(6) \quad \phi(\omega) = -\frac{\omega L}{c} + \phi_0$$

d'où l'on tire la valeur de la vitesse de phase

$$c = \frac{\omega L}{\phi_0 - \phi}$$

En résumé, une transformée de Fourier sur le signal temporel d'entrée  $E(0, t)$  donne les parties réelle  $R(\omega)$  et imaginaire  $I(\omega)$  de  $g(\omega)$  permettant de calculer la phase  $\phi_0(\omega)$  selon :

$$\phi_0(\omega) = \arctg [ I(\omega)/R(\omega) ]$$

En procédant de la même façon pour le signal dispersé on obtient le spectre de phase donnant accès à la phase  $\phi(\omega)$ .

Par conséquent, la connaissance de  $\phi_0$  et  $\phi$  permet de remonter à la vitesse de phase  $c$  dans le matériau dispersif considéré.

#### Mesures expérimentales en technique large bande

Les mesures acoustiques sont effectuées en transmission à l'aide d'impulsions brèves (quelques  $\mu s$ ) excitant l'échantillon placé en immersion dans une cuve d'eau. On ne considère que la propagation des ondes parallèlement aux strates. Pour couvrir la gamme de fréquences allant de 0,1 MHz à 2,5 MHz quatre paires de transducteurs ont été utilisés successivement.

Le montage expérimental comprend une chaîne d'émission et de réception acoustique et une chaîne d'acquisition et de traitement.

Les signaux analogiques provenant de la mesure sont échantillonnés sur 2000 points par un enregistreur rapide Biomation 4500. Les données ainsi mémorisées

sont ensuite transférées sur un ordinateur MINC PDP 11-03 qui assure la sauvegarde de ces données sur disquettes en vue de traitements ultérieurs.

Le traitement numérique est réalisé par un programme FORTRAN utilisant un algorithme de FFT (Transformée de Fourier rapide) appliqué aux signaux émis et transmis. Afin d'obtenir des spectres de phase continue on a opéré un "déroulement" de phase par algorithme.

Dans le but de tester la technique à large bande, des milieux non dispersifs ont été mis à l'épreuve : on sait en effet que dans de tels cas la vitesse de phase à travers ces milieux doit rester constante attestant par là-même que le milieu n'est pas dispersif. Par exemple pour un échantillon de laiton testé selon cette technique dans la gamme de fréquences 0,15 MHz - 2 MHz le résultat de calcul indique une vitesse de phase constante sur toute la gamme de fréquences et égale à  $4450 \pm 63$  m/s soit une incertitude de  $\pm 1,4\%$ .

En ce qui concerne les mesures faites sur les échantillons stratifiés, les résultats de calcul traduits sous forme de courbes de dispersion de vitesse montrent bien l'existence simultanée des deux modes signalés dans les références /1/, /2/, /3/ et /7/.

Précisons en outre qu'une autre méthode de mesures, basée sur la variation artificielle de l'épaisseur d'un échantillon, a été mise en oeuvre pour comparer les résultats obtenus à ceux de la technique large bande. Cette méthode - dite de l'épaisseur variable - permet, dans certaines limites de faire varier continûment l'épaisseur d'un échantillon stratifié, constitué de deux coins glissant l'un sur l'autre, sans provoquer de saut de phase.

En appliquant cette méthode de l'épaisseur variable on obtient des résultats confirmant ceux donnés par la technique à large bande.

#### CONCLUSION

Dans la précédente étude on a mis en évidence l'intérêt de la technique de mesure par signaux à large bande, qui permet, grâce à l'analyse spectrale, d'effectuer assez rapidement des mesures de dispersion de vitesse et même d'atténuation. Toutefois la procédure expérimentale devient un peu plus délicate à mettre en oeuvre lorsque plusieurs modes de propagation coexistent.

ETUDE DE LA PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES EN MILIEU HETEROGENE : APPLICATION AU CALCUL DE LA DISPERSION DE VITESSE PAR UNE TECHNIQUE LARGE BANDE

D'une manière générale, cette technique est avantageuse car elle réduit considérablement la charge expérimentale en fournissant des résultats satisfaisants.

REFERENCES

/1/ SUTHERLAND H.J. et LINGLE R., Geometric dispersion of acoustic waves by a fibrous composite. J.Compos.Mat.6 (1972) 490-502  
 /2/ YEW C.H. et JOGI P.N., A study of wave motion in fiber-reinforced medium. Int.J.Solids Struct. 12 (1976) 693-703.  
 /3/GAZANHES C., HERAULT J.P., MIANE M., SAUL H. et BENCHAALA A., Etude de la dispersion de vitesse d'une onde ultrasonore dans un composite stratifié. Revue Phys. Appl. 18 (1983) 9-18.  
 /4/ SACHSE W. et PAO Y.H., On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids. J.Appl. Phys. 49 (1978) 4320-4327.  
 /5/ LYNNWORTH L.C., PAPADAKIS E.P. et RHEA W., Ultrasonic measurement of phase and group velocity using continuous wave transmission technique. A M M R C Report C T R 73-2 (1973).  
 /6/ PAPADAKIS E.P., Ultrasonic velocity and attenuation: measurement methods with scientific and industrial applications. Physical Acoustics, Masson W.P. and R.N.Thurston. Eds XII, Academic Press, New York (1976) 277-374.  
 /7/ BENCHAALA A., Contribution à l'étude de matériaux composites de type stratifié par voie ultrasonore : essais de caractérisation par la dispersion de vitesse. Thèse de Doctorat d'Etat à soutenir à l'Université de Provence Aix-Marseille I (mars 1987).

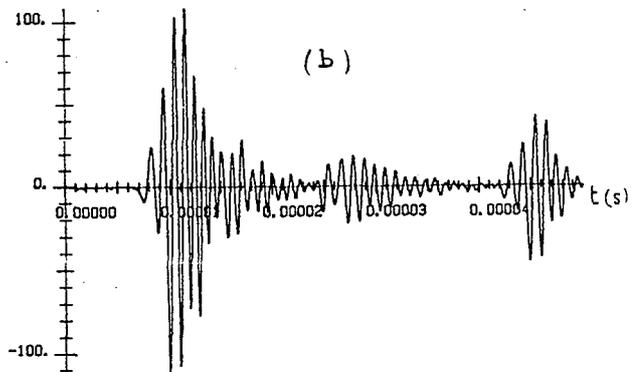
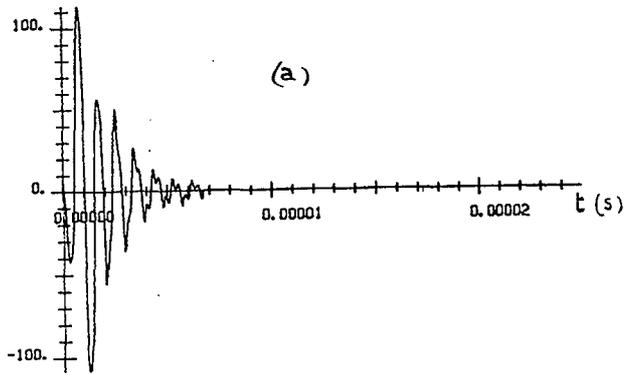


FIGURE 1' - Signal émis (a) et signal reçu à travers un stratifié aluminium-résine (b).

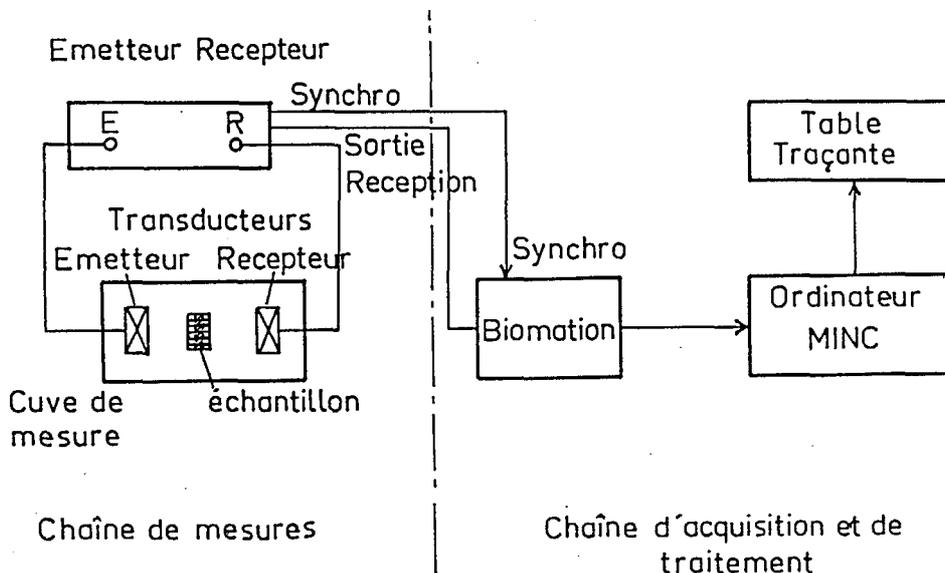


FIGURE 1 - Schéma synoptique de la chaîne d'émission-réception des signaux et chaîne d'acquisition et de traitement des données.



ETUDE DE LA PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES EN MILIEU HETEROGENE : APPLICATION AU CALCUL DE LA DISPERSION DE VITESSE PAR UNE TECHNIQUE LARGE BANDE

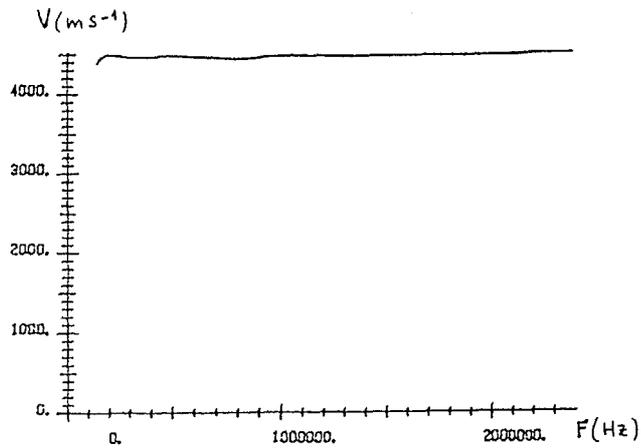


FIGURE 2 - Courbe de vitesse de phase dans un milieu non dispersif (laiton) de 0,15 MHz à 2 MHz obtenue par la technique à large bande.

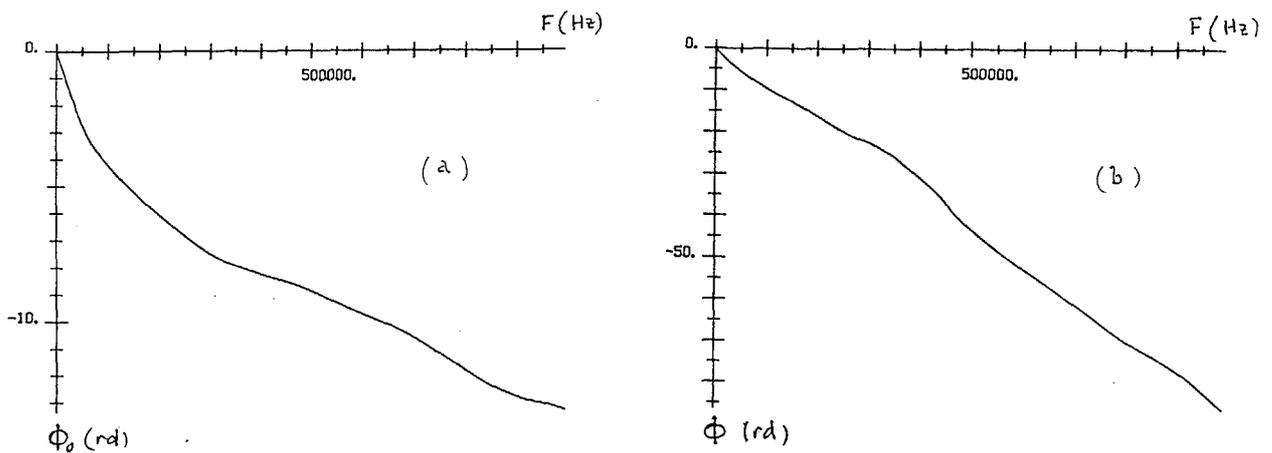


FIGURE 3 - Spectres de phase  $\Phi_0$  fig.3(a) et  $\Phi$  fig.3(b) correspondant au mode lent dans le stratifié aluminium-résine (épaisseur des couches : 1,5 mm).

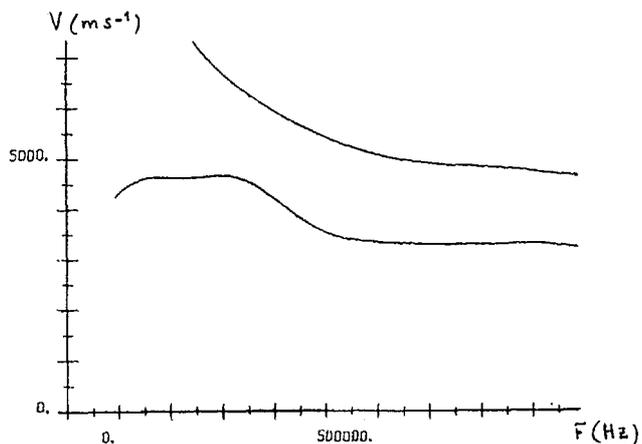


FIGURE 4 - Courbes de vitesse de phase (mode lent et mode rapide) relatives au stratifié aluminium-résine (épaisseur des couches : 1,5 mm).