

Analyse de la propagation ultrasonore**dans un composite stratifié****Dispersion de vitesse****Wave dispersion: Analysis of ultrasonic wave propagation in laminated composites****Amar BENCHAALA**

Institut de Physique, Laboratoire d'Acoustique, Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediene (USTHB), BP n° 9, DAR EL BEIDA, ALGER, ALGÉRIE

Contribution à la visualisation des ondes ultrasonores (ultrasonic waves visualisation) par une méthode acousto-optique. Obtention du doctorat 3^e cycle à l'Université d'Alger en 1978. Maître assistant chargé de cours à l'USTHB d'Alger. Étude, dans le cadre d'une thèse d'État, de la propagation des ondes ultrasonores dans les composites (propagation of ultrasonic waves in composite materials). Cette étude se poursuit actuellement au laboratoire de Mécanique et d'Acoustique au CNRS-Marseille.

**Claude GAZANHES**

CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31, chemin Joseph-Aigier, BP n° 71, 13277 MARSEILLE CEDEX 9

Maître de Recherche responsable de l'Équipe de Recherche « Ultrasons ». Principaux thèmes de Recherches, Imagerie et Tomographie Acoustique, Propagation en milieux dispersifs : milieux diphasiques et matériaux composites, Simulation de problèmes d'acoustique sous-marine : Propagation modale par petits fonds marins.

**Jean-Pierre HÉRAULT**

CNRS LA US, 31, chemin Joseph-Aiguier, BP n° 71, 13277 MARSEILLE CEDEX 9

Ingénieur chargé des calculs numériques au Service Ultrasons (Département d'Acoustique du LMA). Études de simulation numérique dans le cadre des recherches sur les milieux de propagation à paramètres variables. Applications à la propagation dans des milieux diphasiques (liquide-bulles d'air); des matériaux composites stratifiés (aluminium-résine), des couches sismiques ainsi qu'au contrôle non destructif des matériaux.

**Marcel MIANE**

CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Équipe d'Ultrasons, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13009 MARSEILLE

Chargé de l'étude expérimentale des phénomènes de dispersion et d'amortissement dans des structures modélisant des matériaux composites, a conçu une nouvelle méthode de mesure qui reste utilisable lorsqu'il y a déformation du signal ultrasonore ayant traversé le composite.

**Henri SAUL**

Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13009 MARSEILLE

Mise au point et réalisation des bancs de mesures destinés à l'étude des phénomènes de dispersion de vitesse dans les matériaux composites, et des structures modélisant des matériaux composites. Mises au point de techniques de fabrication adaptées à la réalisation de milieux hétérogènes périodiques.

RÉSUMÉ

On étudie la dispersion de vitesse d'ondes ultrasonores se propageant parallèlement aux couches d'un milieu stratifié à deux composants (aluminium-résine epoxy), dans la gamme de fréquences 0,2-2,5 MHz. Nous obtenons une courbe de vitesse de phase, en fonction de la fréquence, qui comprend deux branches correspondant à deux modes de propagation : un mode lent et un mode rapide. La comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle théorique d'Hegemier *et al.* est présentée.

Enfin on synthétise le signal dispersé au moyen de la méthode de la phase stationnaire toujours à partir du modèle théorique et on le compare au signal expérimental reçu.

MOTS CLÉS

Composite stratifié, ondes ultrasonores, dispersion, vitesse de phase, vitesse de groupe, méthode de la phase stationnaire, modes de propagation.

SUMMARY

The dispersion of ultrasonic waves by laminated composites is studied by investigating the propagation parallel to the layers of a two constituents aluminium-epoxy composite material within the frequency range 0.2-2.5 MHz. Two modes of propagation are observed; the slow velocity and the high velocity propagation modes. Comparison and discussion between experimental data and prediction from a theoretical model : the mixture theory of Hegemier and al. is used.

Finally, the transmitted pulse is synthesized on the basis of the stationary phase method from the model of Hegemier. The comparison with the experimental pulse is presented.

KEY WORDS

Laminated composite, ultrasonics waves, dispersion, phase velocity, group velocity, stationary phase method, propagation modes.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
 2. Mesures de vitesse de phase
 3. Courbes de dispersion
 4. Dispersion de trains d'ondes ultrasonores
 5. Conclusion
- Bibliographie

1. Introduction

Les possibilités que présente le contrôle des composites par les techniques ultrasonores non destructives et les problèmes posés par ce type de contrôle ont relancé l'intérêt des études de propagation dans de tels milieux.

En effet, à l'intérieur du composite, les réflexions multiples aux frontières des composants sont à l'origine d'une dispersion géométrique qui se traduit par une variation de la vitesse de phase des ondes ultrasonores en fonction de la fréquence. La forme d'un

train d'ondes ultrasonores qui a traversé un composite est fortement altérée : sa durée augmente et la fréquence initiale est parfois modifiée.

Dans de telles conditions, il devient difficile, voire impossible, de mesurer avec précision la vitesse de phase des ondes ultrasonores.

C'est pourquoi l'étude de la dispersion de vitesse d'ondes ultrasonores dans un composite nous a paru intéressante.

Afin de mieux maîtriser les phénomènes et pour des raisons technologiques, nous avons réalisé des composites à deux phases résine-aluminium avec des épaisseurs de l'ordre du millimètre et travaillé dans la gamme de fréquences 0,2-2,5 MHz.

2. Mesure de vitesse de phase

Nous avons réalisé des échantillons de composites stratifiés que nous avons étudiés sur le banc de mesure de vitesse de phase représenté sur la figure 1. Ces composites sont constitués de plaques d'aluminium d'égale épaisseur réunies entre elles par des couches de résine epoxy de même épaisseur.

La technique de mesure est une technique par transmission [3]. Nous avons calculé la vitesse de propagation des ultrasons à partir d'une mesure de temps de propagation. La gamme de fréquences explorée s'étend de 0,2 à 2,5 MHz. Le signal émis toutes

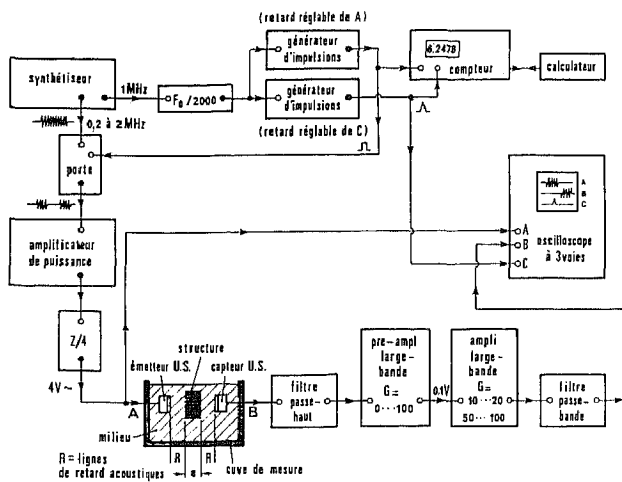


Fig. 1. — Bloc diagramme de l'installation de mesures de vitesse de phase.

les 2 ms est un train d'ondes d'une durée de 20 μ s. Nous avons utilisé des transducteurs émetteur et récepteur à large bande placés face à face dans une cuve de mesure remplie d'eau. Le composite est placé entre les transducteurs dont il est séparé par deux lignes à retard en eau de 1 cm d'épaisseur. La propagation s'effectue parallèlement aux couches.

3. Courbes de dispersion

Pour trois structures de 2-1-0,5 mm d'épaisseur, nous avons reporté sur la figure 2 les courbes de dispersion

expérimentales (en trait plein) et théoriques [2]. Ces courbes montrent deux branches de dispersion de la vitesse de phase en fonction de la fréquence : le mode primaire et le mode secondaire. Le mode secondaire présente une fréquence de coupure qui n'est pas mesurée avec précision à cause de la dispersion du signal.

Dans le cas de la structure 2 mm (fig. 2a) pour les fréquences au-dessous de la fréquence de coupure le mode primaire est excité et sa vitesse de phase décroît de 4864 ms^{-1} pour 200 kHz à 4440 ms^{-1} pour 305 kHz. Au voisinage de la fréquence de coupure, le mode secondaire est excité et sa vitesse de phase vaut 5970 ms^{-1} pour 400 kHz puis décroît à 4907 ms^{-1} pour 800 kHz. Pour les fréquences entre 305 et 450 kHz le signal reçu est fortement altéré. La fréquence de coupure dépend de l'épaisseur des couches — elle croît quand l'épaisseur diminue (fig. 2) — et dépend aussi de la nature des composants.

On constate sur la figure 2 que, pour le mode primaire, les résultats expérimentaux concordent assez bien avec le modèle théorique alors qu'ils s'en écartent pour le mode secondaire. Ceci vient du fait que dans le mode théorique le rapport (épaisseur couche/longueur d'onde nominale du signal) reste petit : ce qui explique que vers les basses fréquences les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les résultats théoriques. Nos résultats expérimentaux approchent les résultats théoriques de Brekhovskikh [3]. Cependant pour la reconstitution de signaux dispersés dans les milieux stratifiés le modèle de Brekhovskikh présente une lourdeur certaine dans son traitement informatique ce qui nous a amenés au choix du modèle d'Hegemier *et al.* d'une mise en œuvre plus simple.

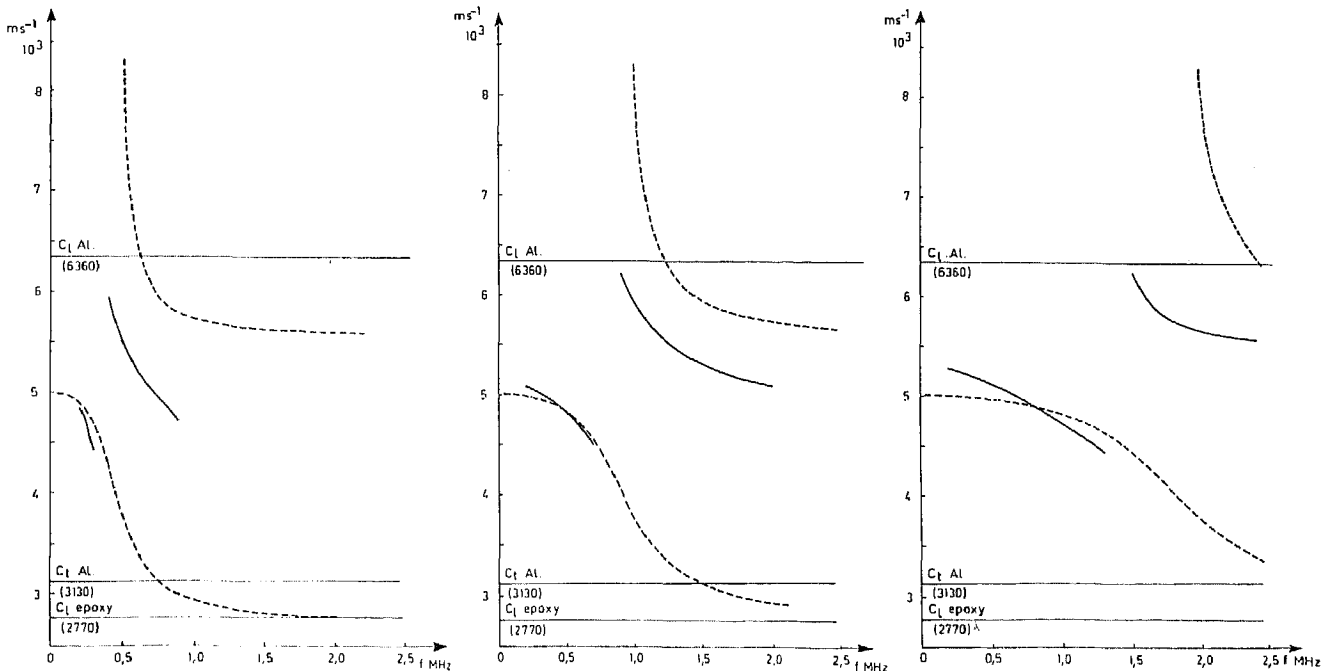


Fig. 2. — Vitesse de phase en fonction de la fréquence : (a) structure 2 mm; (b) structure 1 mm; (c) structure 0,5 mm. — courbe expérimentale; courbe théorique.

4. Dispersion de trains d'ondes ultrasonores

La figure 4 montre clairement qu'un train d'ondes ultrasonores est déformé en traversant le composite, et que sa vitesse de phase devient difficile à mesurer. Nous verrons qu'une analyse de ce signal dispersé est possible au moyen de la méthode de la phase stationnaire à partir du modèle théorique.

4. 1. ANALYSE PAR LA MÉTHODE DE LA PHASE STATIONNAIRE

Un train d'onde traversant le matériau peut être représenté par une intégrale de la forme :

$$(1) \quad s(r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) \exp [i(kr - \omega t)] dk,$$

k , nombre d'onde; ω , pulsation.

Si la propagation est dispersive k est fonction de ω , le train d'onde se déforme avec la distance r parcourue dans le composite et avec le temps t . L'intégrale (1) peut être évaluée par la méthode de la phase stationnaire [5], [6]; si $A(k)$ le spectre d'amplitude du signal incident varie lentement, seules les valeurs stationnaires de $(kr - \omega t)$ contribuent à la valeur de (1) i.e. :

$$(2) \quad d/dk (kr - \omega t) = 0,$$

$$(3) \quad \text{ou } r - tU = 0,$$

$$(4) \quad U = d\omega/dk \quad (\text{vit. de groupe}).$$

Dans ces conditions la valeur de (1) est donnée par :

$$(5) \quad s(r, t) = A(k_0) \left[2\pi/t \left| \frac{dU_0}{dk_0} \right| \right]^{1/2} \times \exp i(k_0 r - \omega_0 t \pm \pi/4).$$

Le signe \pm correspond à $dU/dk > 0$ ou < 0 respectivement. La relation (5) donne l'amplitude du signal dispersé au temps t_0 . Pour t_0 la relation (3) donne U_0 et les valeurs correspondantes ω_0 , k_0 , etc. sont calculées à partir du modèle théorique de dispersion. Le mode primaire présente un minimum $dU/dk \rightarrow 0$ dans ce cas l'intégrale (1) donne la séquence d'Airy [5].

4. 2. CONTRIBUTION DES MODES

Le signal dispersé est la somme de deux signaux correspondant aux modes primaire et secondaire. La contribution du mode primaire ou secondaire est donnée par la relation (5) qui définit un signal modulé en fréquences. Pour le mode secondaire un paquet d'ondes hautes fréquences constitue le début du signal (car les vitesses de groupe pour ces fréquences sont plus importantes) suivi ensuite par les basses fréquences (fig. 3).

Le mode primaire comprend trois parties (fig. 3) :

(i) un paquet d'ondes dispersif commençant aux basses fréquences avec la vitesse de groupe U_1 et continue

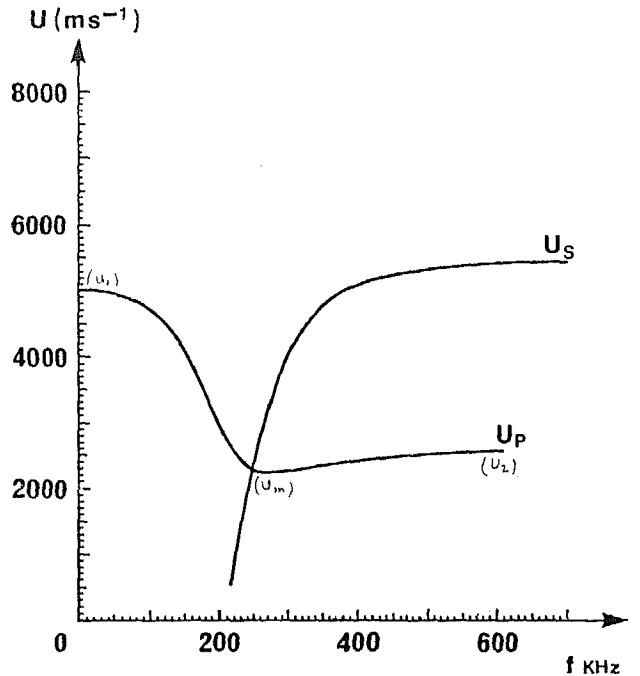


Fig. 3. — Vitesse de groupe théorique des deux modes en fonction de la fréquence. Structure 2 mm.

avec les fréquences croissantes jusqu'au minimum de vitesse de groupe U_m ;

(ii) un paquet d'ondes qui commence aux hautes fréquences avec la vitesse de groupe $U_2 < U_1$ et continue avec des fréquences décroissantes jusqu'au minimum de vitesse de groupe U_m ;

(iii) un paquet d'ondes correspondant à la séquence d'Airy avec la vitesse de groupe minimale U_m .

Enfin le signal théorique dispersé résulte de l'interférence entre les modes primaire et secondaire.

En travaillant avec un signal émis de trois périodes sur la structure 2 mm, l'analyse nous permet d'observer ce qui suit :

L'oscillogramme de la figure 4 a montre que le signal reçu est constitué d'un paquet à 275 kHz correspondant au mode primaire : le signal correspondant (fig. 4 c) synthétisé montre également le mode primaire essentiellement.

L'oscillogramme de la figure 4 b comparé au signal synthétisé correspondant (fig. 4 d) montre que le signal à 500 kHz dispersé est composé d'un paquet

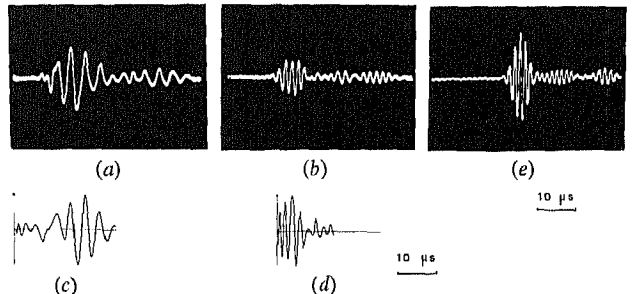


Fig. 4. — Signaux dispersés expérimentaux et synthétisés correspondant (a-c) à 275 kHz, (b-d) à 500 kHz, (e) à 700 kHz.

hautes fréquences (mode secondaire), un paquet (mode primaire) et une zone commune d'interférence des deux modes.

Nous pouvons voir sur la ligne 4e qu'à 700 kHz le signal dispersé est encore composé des deux modes mais nettement séparés.

Nous observons sur les oscillogrammes que les modes interfèrent et sont moins distincts que dans le cas des signaux synthétisés. Ceci est dû au fait que le modèle théorique de dispersion prévoit deux modes plus séparés que les résultats expérimentaux (fig. 4).

5. Conclusion

Des mesures répétitives et précises de vitesses dans les composites sont difficiles à cause de la dispersion dans ces matériaux. Les difficultés deviennent plus importantes dans le cas des matériaux industriels. Cependant en 1969, J. S. Whittier et J. C. Peck [7] ont mesuré la vitesse du mode lent dans les basses fréquences. Plus tard H. J. Sutherland et R. Lingle [8] ont mis en évidence les deux modes de propagation dans la zone intermédiaire de fréquences. Enfin dans les hautes fréquences C. H. Yew et P. N. Jogi [4] ont remarqué les deux signaux correspondant au mode lent et au mode rapide.

La technique par transmission utilisée a permis d'étudier la dispersion de vitesse d'ondes se propageant parallèlement aux couches. Les résultats expérimentaux confirment l'existence de deux modes de propaga-

tion dans les matériaux stratifiés et sont en bon accord avec les résultats prévus par le modèle d'Hegemier, essentiellement pour le mode primaire et s'en écartent quantitativement pour le mode secondaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. M. BREKOVSKIKH, *Waves in layered media*, Academic Press, New York, 1960.
- [2] G. A. HEGEMIER, G. A. GURTMAN et A. H. NAYFEH, A continuum mixture theory of waves propagation in laminated and fiber reinforced composites, *Int. J. Solids Structures*, 9, 1973, p. 395-414.
- [3] C. GAZANHES, J.-P. HERAULT, M. MIANE, H. SAUL et A. BENCHALA, Étude de la dispersion de vitesse d'une onde ultrasonore dans un composite stratifié, *Rev. Phys. Appl.* 18, 1983, p. 9-18.
- [4] C. H. YEW et P. N. JOGI, A study of wave motion in fiber reinforced medium, *Int. J. Solids Structures*, 12, 1976, p. 613-703.
- [5] A. PAPOULIS, *The Fourier integral and its applications*, McGraw Hill, New York, 1962.
- [6] TOLSTOY et CLAY, *Ocean acoustics: theory and experiment in under-water sound*, Mc Graw Hill, 1979.
- [7] J. S. WHITTIER et J. C. PECK, Experiments on dispersive pulse propagation in laminated composites and comparison with theory, *J. Appl. Mech.*, 36, 1969, p. 485-490.
- [8] H. J. SUTHERLAND et R. LINGLE, Geometric dispersion of acoustic waves by a fibrous composite *J. Comp. Mat.*, 6, 1972, p. 490-502.