

Physique / Solides, fluides : structure

# Étude par microscopie acoustique de l'effet d'atténuation transversale et longitudinale sur les modes de propagation dans les structures monocouches et multicouches

Tarek Tahraoui \*, A. Boudour, Y. Boumaïza

Faculté des sciences, Département de physique, Laboratoire LEAM, Université Badji Mokhtar-ANNABA, B.P. 12, 23000 Annaba, Algérie

Reçu le 31 août 2008 ; accepté après révision le 18 février 2009

Disponible sur Internet le 1<sup>er</sup> avril 2009

Présenté par Jacques Villain

## Résumé

Le présent travail traite de l'étude par simulation de l'effet d'atténuation transversale et longitudinale sur les modes de propagation dans certains matériaux monocouches (couche/substrat) : Cr/Fe, Al/Si et dans les structures multicouches : Al/époxy/Al. L'étude se base sur la simulation du signal acoustique reçu par le microscope acoustique à réflexion lors de l'exploration d'un matériau revêtu. L'exploitation du signal simulé nous a permis de connaître la variation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence de l'onde acoustique excitatrice. De plus, et pour les matériaux monocouches, nous avons déterminé aussi les variations de ce coefficient en fonction du coefficient d'atténuation.

Pour ces matériaux, les calculs ont été faits dans une large gamme de fréquences (50 MHz à 3,5 GHz) et pour des épaisseurs de revêtement allant de 0,5  $\mu\text{m}$  à 150  $\mu\text{m}$ . Pour les structures multicouches, nous avons déterminé les variations des vitesses des différents modes de propagation en fonction de la fréquence et le coefficient d'atténuation. *Pour citer cet article : T. Tahraoui et al., C. R. Physique 10 (2009).*

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Acoustic microscopy study of the effect of transversal and longitudinal attenuation on the propagation modes in monolayer and multilayer structures.** This Note considers the study by modelling of the effect of transversal and longitudinal attenuation on the propagation modes in certain monolayers (layer/substrate): Cr/Fe, Al/Si and in multilayer structures: Al/epoxy/Al. The study is based on modelling the acoustic signal detected by the reflection acoustic microscope during the investigation of a coated material. The use of the simulated signal allows us to know the variation of the reflection coefficient as a function of the excitation acoustic wave incidence angle. Moreover, and for monolayer materials, we have also determined the variations of the coefficient as a function of the coefficient of attenuation.

For these materials the calculations have been made over a large frequency range (50 MHz to 3.5 GHz) and for coating thicknesses from 0.5  $\mu\text{m}$  to 150  $\mu\text{m}$ . In the case of multilayer structures, we have determined the variations in speed of the different propagation modes as functions of frequency and the attenuation coefficient. *To cite this article: T. Tahraoui et al., C. R. Physique 10 (2009).*

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [tahraouitarek@yahoo.fr](mailto:tahraouitarek@yahoo.fr) (T. Tahraoui).

**Mots-clés :** Microscopie acoustique ; Signature acoustique ; Coefficient de réflexion ; Atténuation ; Structures monocouches ; Structures multicouches ; Contrôle Non Destructif (CND)

**Keywords:** Acoustic microscopy; Acoustic signal; Reflection coefficient; Attenuation; Monolayer structures; Multilayer structures; Non-Destructive Control

## 1. Introduction

L'étude par microscopie acoustique des propriétés des matériaux nécessite la compréhension du phénomène de propagation des ondes dans les solides et dans les liquides ainsi que la connaissance des lois qui régissent les transferts d'onde aux interfaces. L'information est récupérée par un dioptre sphérique d'ouverture  $\theta_{\max}$ , qui intègre l'énergie (Fig. 1). La connaissance du coefficient de réflexion  $R(\theta)$ , en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ , s'avère donc nécessaire pour déterminer et analyser les différents modes de propagation. Il faut connaître, pour cela, l'amplitude, la direction de propagation et la polarisation de l'onde incidente, ainsi que les propriétés élastiques des matériaux. Une méthode de calcul de l'expression de  $R(\theta)$ , utilisant le bilan mécanique, continuité des contraintes et des déplacements à l'interface, a été développée par Brekhovskikh [1–4] la micro caractérisation d'un matériau passe par la détermination de sa signature acoustique  $V(z)$ . l'expression de  $R(\theta)$  est donnée par [1,3,6,7] :

$$V(z) = \int_0^{\theta_{\max}} P^2(\theta) R(\theta) \exp(2jk_0z \cos \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta$$

où :  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\theta_{\max}$  est l'ouverture maximale de la lentille,  $P^2(\theta)$  est la fonction pupille ;  $R(\theta)$  est la fonction de réflexion du spécimen et  $k_0$  est le vecteur d'onde dans le liquide de couplage.

Le coefficient de réflexion pour les matériaux monocouches est donné par l'expression [1,4,5] :

$$R(\theta) = \frac{\eta_0(M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}) + j\rho_0\omega^2(M_{11}M_{23} - M_{21}M_{13})}{\eta_0(M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}) - j\rho_0\omega^2(M_{11}M_{23} - M_{21}M_{13})}$$

L'atténuation nous permet d'avoir des informations importantes sur les propriétés acoustiques de l'échantillon. La prise en compte de ce paramètre présente un grand intérêt pour la compréhension des phénomènes physiques et permet également une micro caractérisation plus précise des matériaux. L'atténuation intervient dans le coefficient de réflexion en considérant des vitesses complexes des ondes de volume [1–3] :

$$V_l^* = \frac{V_l}{1 + j\alpha_l V_l / 2\pi f} \quad \text{et} \quad V_s^* = \frac{V_s}{1 + j\alpha_s V_s / 2\pi f}$$

Ces fonctions montrent qu'en présence des coefficients d'atténuation, le coefficient de réflexion  $R(\theta)$  est fonction de la fréquence de travail du microscope acoustique

## 2. Résultats et discussions

### 2.1. Étude des structures monocouches

Dans les matériaux monocouches plusieurs modes de surfaces sont générés à la surface du système monocouche, le nombre et la nature de ces modes dépend essentiellement du rapport des vitesses transversales de l'onde acoustique dans la couche et dans le substrat. En effet, si la propagation du mode transversal est plus rapide dans la couche ( $V_{s1} > V_s$ ) (exemple : le système Acier/Cr), alors seul le mode de Rayleigh apparaît. Dans ce cas, la vitesse de l'onde de surface (Rayleigh) est facilement déterminée à partir de la phase du coefficient de réflexion, dans le cas où l'onde est moins rapide dans la couche que dans le substrat ( $V_{s1} < V_s$ ) (cas du système Al/Si), plusieurs modes apparaissent.

#### 2.1.1. Étude du cas « couche plus rapide que le substrat »

La fonction de réflexion  $R(\theta)$  dépend non seulement de la fréquence  $f$  de travail mais aussi de l'épaisseur ( $d$ ) de la couche. A cet effet, et pour chaque épaisseur ( $d$ ) les tracés du module et de la phase de  $R(\theta)$  pour des fréquences variables nous montrent s'il y a un effet de dispersion ou non.

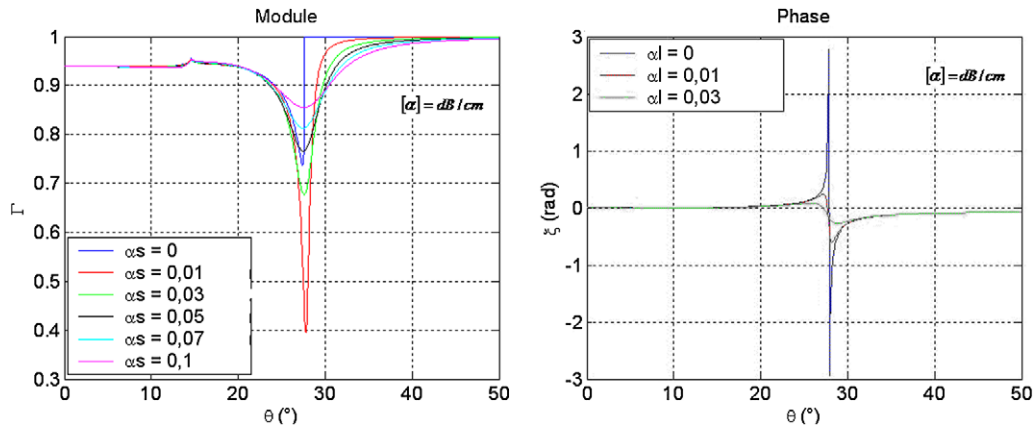


Fig. 1.  $R(\theta)$  du système Cr/Fe pour  $\alpha_s \neq 0$  ( $d = 4 \mu\text{m}$  ;  $f = 225 \text{ MHz}$ ).

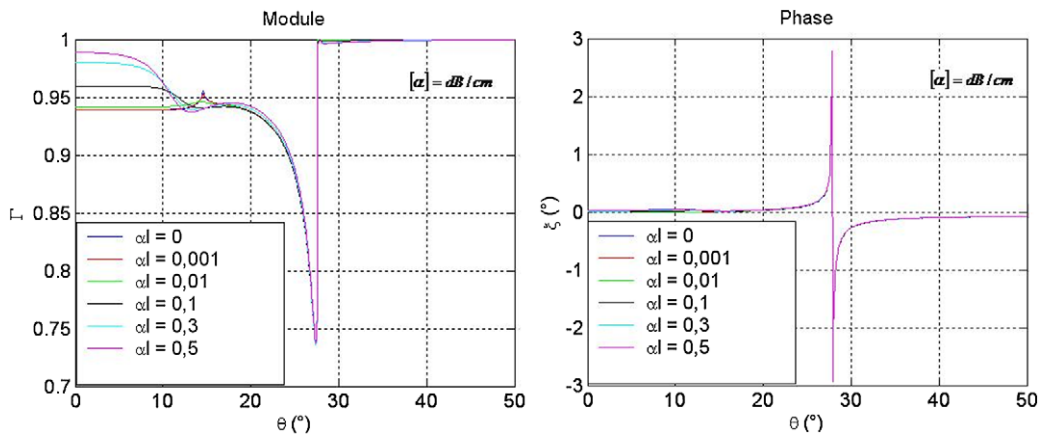


Fig. 2.  $R(\theta)$  du système Cr/Fe pour  $\alpha_l \neq 0$  ( $d = 4 \mu\text{m}$  ;  $f = 225 \text{ MHz}$ ).

Pour bien montrer les effets de l’atténuation transversale et longitudinale sur l’amplitude et la phase de  $R(\theta)$  du système Cr/Fe nous allons étudier les cas suivants :

- 1) On utilise l’atténuation uniquement du substrat (Figs. 1 et 2) ;
- 2) On utilise l’atténuation uniquement de la couche mince (Figs. 3 et 4).

Dans le premier cas, si on utilise uniquement l’atténuation transversale du substrat  $\alpha_s \neq 0$ , on constate que l’amplitude de  $R(\theta)$  au voisinage de l’angle de Rayleigh diminue jusqu’à une valeur critique de l’atténuation transversale du substrat (notée  $\alpha_{cs}$ ), puis elle augmente en fonction de  $\alpha_s$ , ce que l’on montre sur la Fig. 1.

Dans le cas où on considère l’atténuation longitudinale du substrat ( $\alpha_l \neq 0$ ) tous les modes sont stables sauf le mode longitudinal qui est perturbé et difficilement détectable  $\alpha_l$  (Fig. 2).

Dans ces deux cas ( $\alpha_s \neq 0$ ) et ( $\alpha_l \neq 0$ ) on note que les angles correspondants aux différents modes sont stables (les vitesses de tous les modes sont constantes). Donc l’atténuation du substrat dans le cas où la couche est plus rapide n’influe pas sur les vitesses des modes de propagation.

Dans le deuxième cas, si on utilise uniquement l’atténuation transversale de la couche mince ( $\alpha_{sl} \neq 0$ ), on note pour quelques valeurs critiques de l’atténuation transversale de la couche ( $\alpha_{sl}$ ) que l’amplitude du coefficient de réflexion au voisinage de l’angle de Rayleigh a un pic dont l’amplitude diminue en fonction de  $\alpha_{sl}$  jusqu’à une valeur critique (notée :  $\alpha_{csl}$ ), puis elle augmente et on note aussi que la phase du coefficient de réflexion diminue au fur et à mesure que  $\alpha_{sl}$  augmente, d’autre part on note qu’il n’y a pas de déplacement des modes de propagation c’est-à-dire que les vitesses de tous les modes ne varient pas quand  $\alpha_{sl}$  augmente.

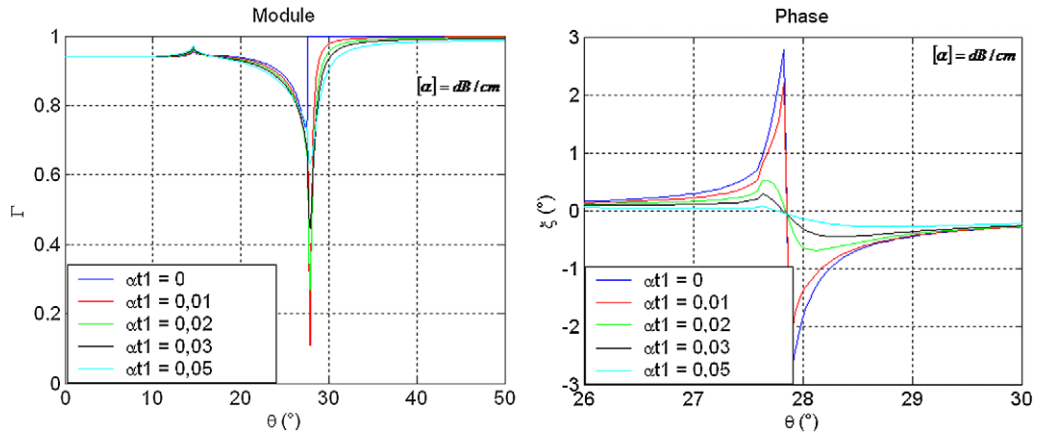


Fig. 3.  $R(\theta)$  du système Cr/Fe pour  $\alpha_{s1} \neq 0$  ( $d = 4 \mu\text{m}$  ;  $f = 225 \text{ MHz}$ ).

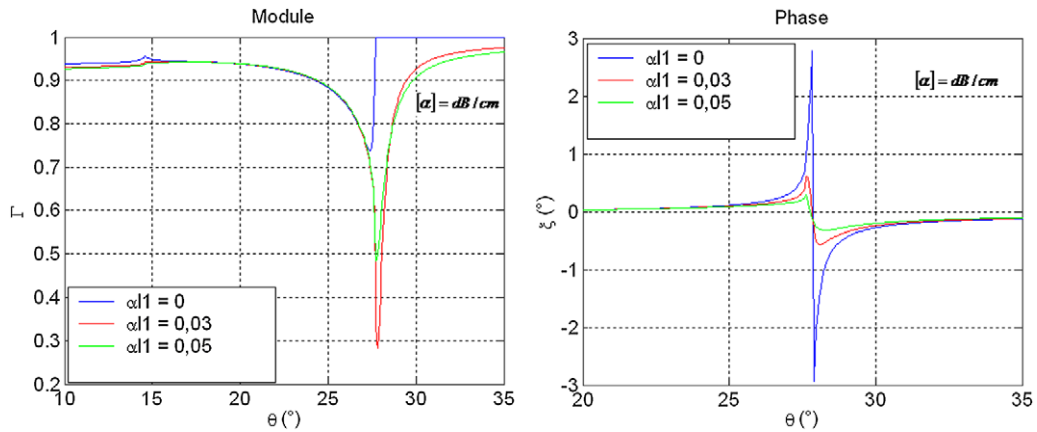


Fig. 4.  $R(\theta)$  du système Cr/Fe pour  $\alpha_{l1} \neq 0$  ( $d = 4 \mu\text{m}$  ;  $f = 225 \text{ MHz}$ ).

Dans le cas où on prend en considération uniquement l’atténuation longitudinale dans la couche mince ( $\alpha_{ll} \neq 0$ ), on constate, d’une part, que les vitesses varient peu en fonction de  $\alpha_{l1}$ , d’autre part l’amplitude du coefficient de réflexion au niveau de l’angle de Rayleigh diminue jusqu’à une valeur critique de l’atténuation longitudinale (notée  $\alpha_{cl1}$ ), puis elle augmente tandis que les vitesses de tous les modes restent constantes.

2.1.2. Étude du cas ‘couche moins rapide que le substrat’

Dans ce cas, la fonction de réflexion  $R(\theta)$  possède plusieurs pics et plusieurs modes de surfaces apparaissent. Ces modes sont appelés ‘mode de Lamb’. Le nombre de ces modes est fixé par la fréquence et par l’épaisseur de la couche. Ce sont des modes dispersifs. Nous avons pris comme exemple le système Al/Si.

2.1.2.1. Étude des modes de surface du système Al/Si Nous avons tracé les variations du module et de la phase de  $R(\theta)$  pour plusieurs épaisseurs (Fig. 5). Les courbes ainsi tracées montrent que les positions des pics et le nombre des modes de Lamb varie en fonction de la fréquence ou de l’épaisseur de la couche. Ce qui montre que ces modes sont bien dispersifs. A partir des angles critiques des modes de Lamb, nous déduisons leurs vitesses. La Fig. 6 montre les variations des vitesses en fonction de l’épaisseur à une fréquence de 550 MHz.

2.1.2.2. Étude de l’effet de l’atténuation sur les modes du système Al/Si Nous pouvons remarquer à travers les courbes du module et de la phase du coefficient de réflexion pour différentes valeurs de l’atténuation longitudinale du substrat (Fig. 7) et transversale (Fig. 8), que les modes de propagations sont stables, il en est de même pour l’atténuation transversale de la couche mince ( $\alpha_{st}$ ) (Fig. 10).

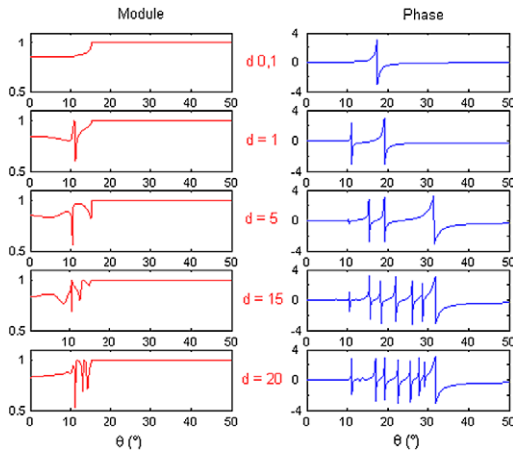


Fig. 5.  $R(\theta)$  du système Al/Si pour plusieurs épaisseurs de la couche ( $f = 550$  MHz).

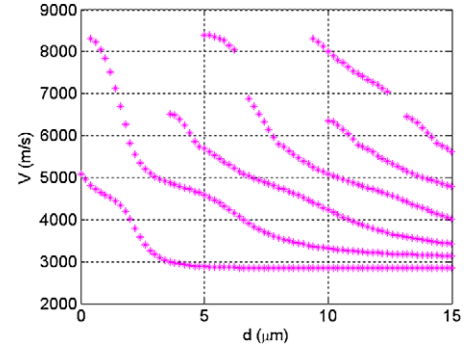


Fig. 6. Courbes de dispersion du système Al/Si.

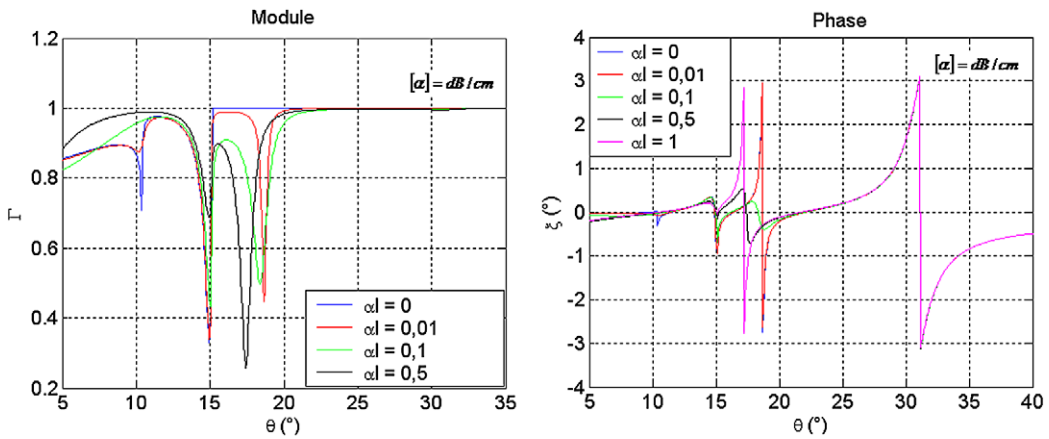


Fig. 7.  $R(\theta)$  du système Al/Si pour  $\alpha_l \neq 0$  ( $f = 550$  MHz ;  $d = 4,5$   $\mu\text{m}$ ).

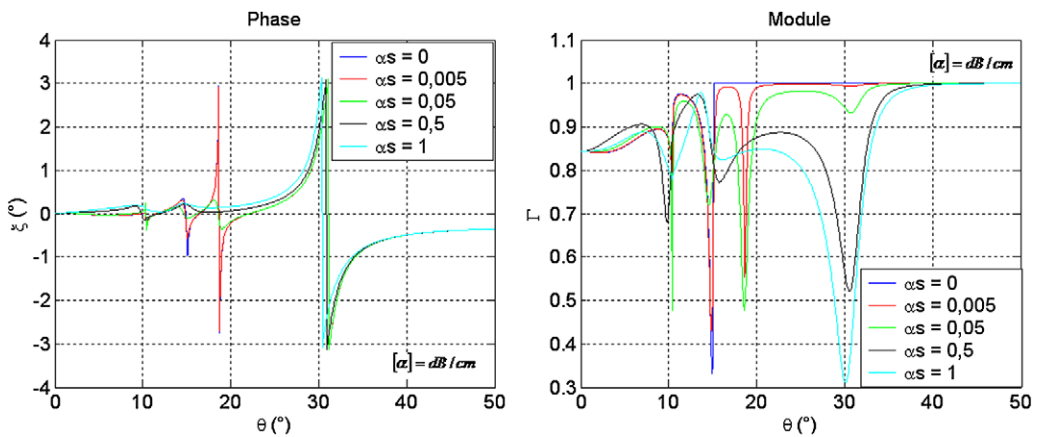


Fig. 8.  $R(\theta)$  du système Al/Si pour  $\alpha_s \neq 0$  ( $f = 550$  MHz ;  $d = 4,5$   $\mu\text{m}$ ).

Cependant, le deuxième mode est très influencé par l'atténuation longitudinale du substrat ( $\alpha_l$ ) (Fig. 7) où l'angle critique correspondant à ce mode glisse vers les angles supérieures, c'est-à-dire que la vitesse diminue en fonction

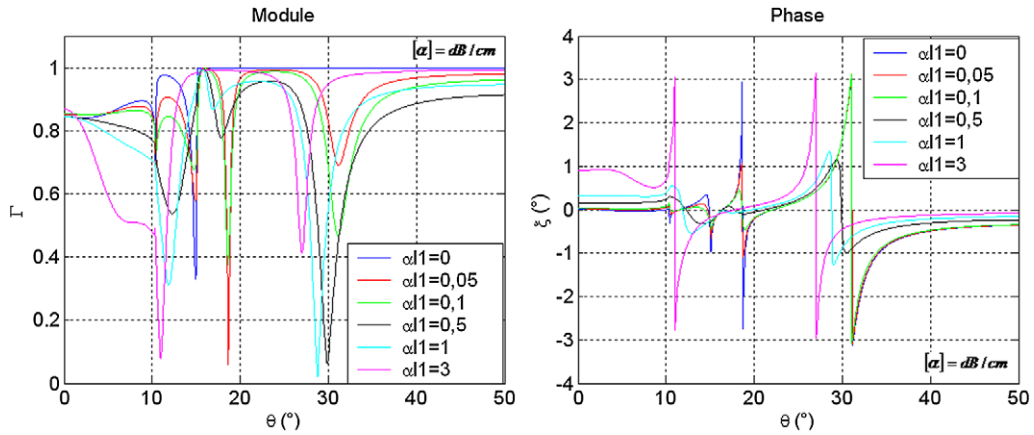


Fig. 9.  $R(\theta)$  du système Al/Si pour  $\alpha_{l1} \neq 0$  ( $f = 550$  MHz ;  $d = 4,5 \mu\text{m}$ ).

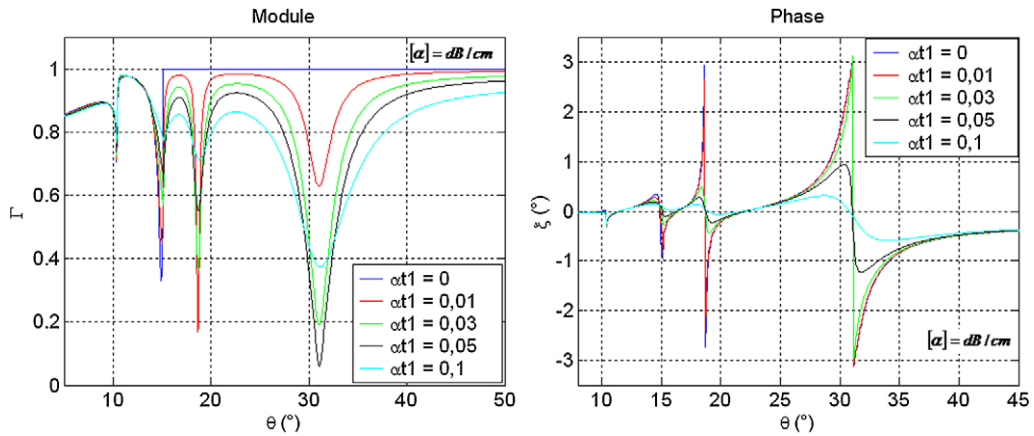


Fig. 10.  $R(\theta)$  du système Al/Si pour  $\alpha_{s1} \neq 0$  ( $f = 550$  MHz ;  $d = 4,5 \mu\text{m}$ ).

de  $\alpha_l$  et les vitesses obtenus sont celles de la couche mince qui à cette fréquence se comporte comme un matériaux massif d'où l'on obtient l'influence de la couche par rapport au substrat.

On remarque dans le cas de la Fig. 9 qu'il y a perturbation de l'amplitude du mode principale ainsi que des autres modes, ceci est dû à l'influence du substrat par rapport à la couche.

### 3. Étude des structures multicouches

La microscopie acoustique peut être utilisée pour la caractérisation des propriétés élastiques d'une structure multicouches, le problème revient à déterminer les angles critiques des modes de Lamb ou bien les vitesses des ondes de Lamb. Un système multicouche est une superposition de plusieurs milieux de nature différente (solide, fluide ou poreux), modélisés par des matrices de transfert. Nous avons étudié un milieu multicouche immergé dans un fluide, dont les caractéristiques, ont été définies à partir d'un problème industriel de l'aérospatiale. Il est composé de deux couches d'aluminium séparées par une couche de colle (époxy) [8–10]. La Fig. 11 présente, le coefficient de réflexion  $R(\theta)$  (module et phase), pour une fréquence de 5 MHz, d'une onde plane sur le milieu multicouche (Al 1,6 mm/époxy 0,2 mm/Al 0,6 mm). Pour les structures multicouche, les ondes de Lamb sont dispersives, et le coefficient de réflexion  $R(\theta)$  dépend de la fréquence, les minima de  $R(\theta)$  correspondent aux ondes de Lamb se propageant dans le système multicouche. Nous observons sur la Fig. 11 sept minima de  $R(\theta)$  mettant en évidence sept modes de Lamb. Sur la Fig. 12, sont reportés les points correspondant à ces minima pour différentes fréquences, ils permettent la visualisation des courbes de dispersion des ondes de Lamb.

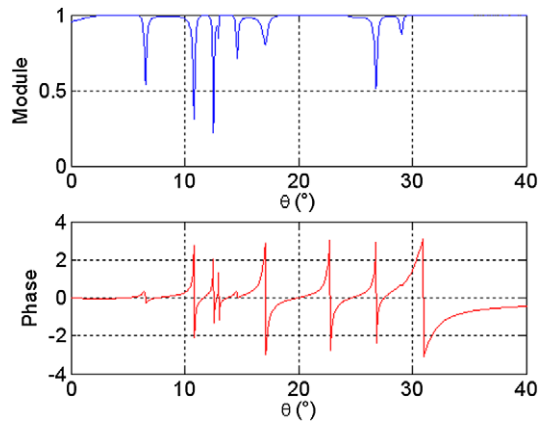


Fig. 11.  $R(\theta)$  du système multicouche,  $f = 5$  MHz (Al 1,6 mm/époxy 0,2 mm/Al 0,6 mm).

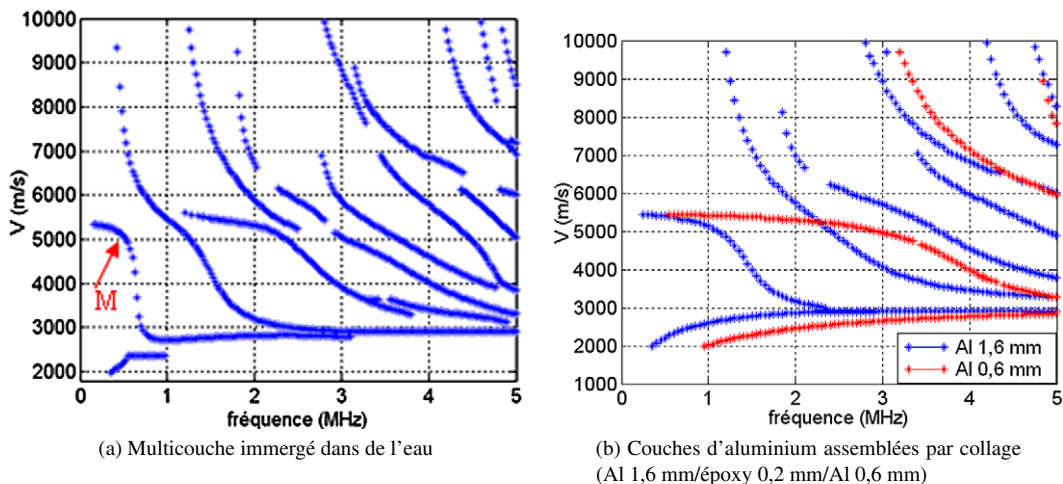


Fig. 12. Courbes de dispersion des modes de Lamb.

De manière générale les courbes de dispersion du milieu multicouche (Fig. 12a), ressemblent fortement aux courbes de dispersion de chacune des deux plaques d'aluminium assemblées par collage (Fig. 12b) ; c'est-à-dire par superposition des deux courbes de dispersion de chacune des couches d'aluminium (Fig. 13). Nous observons ce pendant un mode supplémentaire (M), qui semble caractéristique de l'assemblage multicouche. Ce mode dépend des paramètres caractérisant les différentes couches (vitesses, épaisseurs, densités, atténuations, ...) [8].

Pour bien comprendre le phénomène et pour voir l'effet de la densité du fluide on a tracé les courbes de dispersion des modes de Lamb du multicouche (Al 1,6 mm/époxy 0,15 mm/Al 0,6 mm) immergé dans de l'eau (Figs. 14 et 15) et dans un fluide de densité  $0,5 \text{ kg/m}^3$  (Figs. 16 et 17). En comparant les courbes de dispersion du multicouche (Fig. 14) et des plaques d'aluminium assemblées par superposition des deux courbes de dispersion de chaque plaque isolée (Fig. 15), on distingue le mode supplémentaire (M2) caractéristique de la structure multicouche. Ce mode rejoint vers l'angle de  $32^\circ$ , le mode  $M_1$  pour tendre vers l'asymptote correspondant aux ondes de Rayleigh. Notons de plus que le mode  $M_1$ , au voisinage de cet angle, n'est visible qu'en analyse spectrale [8]. La comparaison des modes du système multicouche et des modes des plaques isolées (Fig. 17) présentée par superposition sur la Fig. 16 pour une densité du fluide plus faible, fait apparaître une différence sur le mode  $M_1$  qui est voisin de  $A_0$  (plaque épaisse) en basse fréquence alors qu'il rejoint  $A'_0$  (plaque mince) en haute fréquence. Notons que ce mode n'était pas détecté au dessus de 1 MHz quand le multicouche était immergé dans de l'eau.

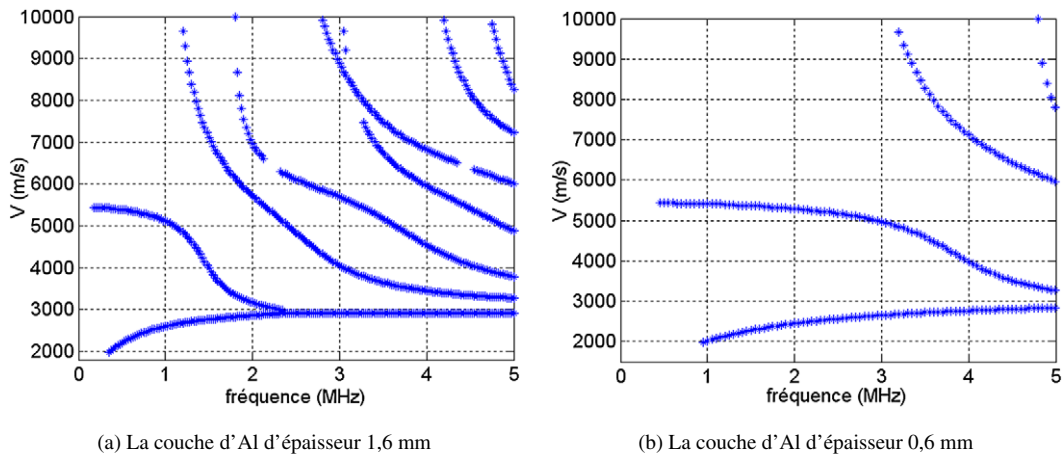


Fig. 13. Courbes de dispersion des couches d'aluminium isolées.

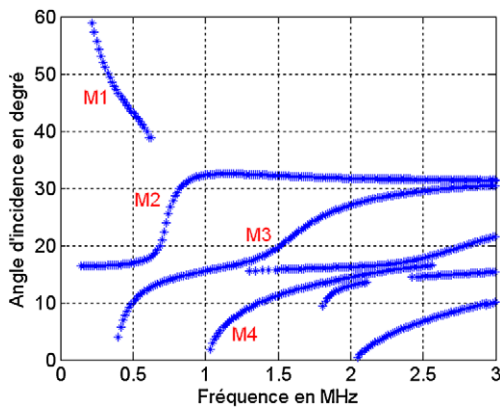


Fig. 14. Courbes de dispersion angulaire du multicouche immergé dans de l'eau Al 1,6 mm/époxy 0,15 mm/Al 0,6 mm.

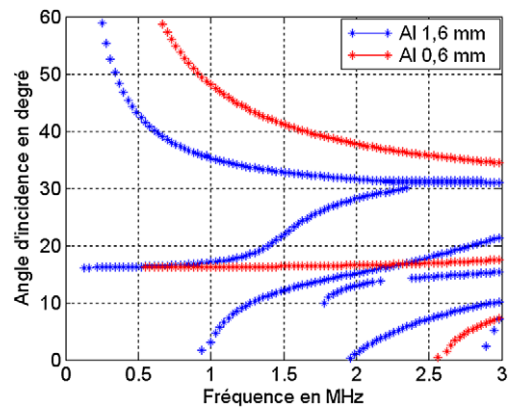


Fig. 15. Courbes de dispersion des couches d'aluminium assemblées par collage.

#### 4. Effet de l'atténuation dans les structures multicouches

Les courbes de dispersion montrent des changements considérables sur les vitesses des modes de Lamb lorsque l'on introduit le coefficient d'atténuation longitudinal  $\alpha_l$  des couches d'aluminium dans le programme utilisé pour le calcul (Fig. 18a). Tandis que lors de l'utilisation de l'atténuation transversale  $\alpha_s$ , les courbes de dispersion ne montrent aucun changement (Fig. 18b).

#### 5. Conclusion

L'existence des modes de surface est donnée par l'apparition de pics dans le tracé de la phase du coefficient de réflexion. Le nombre des modes de surface correspond au nombre de ces pics. Pour les matériaux monocouches, où la couche est moins rapide que le substrat, le nombre de mode de surface est fonction de la fréquence et de l'épaisseur de la couche. Le coefficient de réflexion  $R(\theta)$  est beaucoup plus sensible à l'effet de l'atténuation transversale que l'atténuation longitudinale, l'amplitude et la phase de  $R(\theta)$  diminue en fonction de l'atténuation transversale et longitudinale, on remarque l'apparition d'autres modes du substrat sur la couche et inversement quand l'épaisseur atteint la valeur de  $\lambda$  (longueur d'onde). Ce qui explique le phénomène de la décroissance des vitesses de ces modes sous l'influence de l'atténuation.



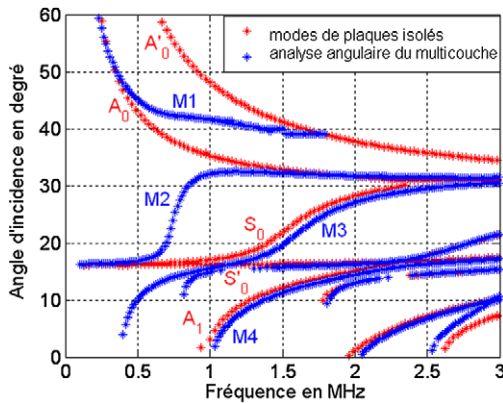


Fig. 16. Courbes de dispersion angulaire des modes de Lamb du multicouche immergé dans un fluide de densité 0,5 (Al 1,6 mm/époxy 0,15 mm/Al 0,6 mm).

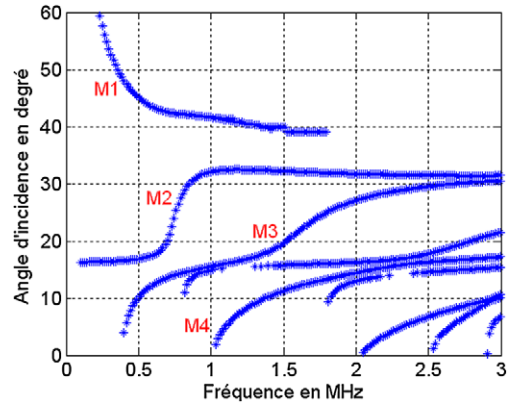
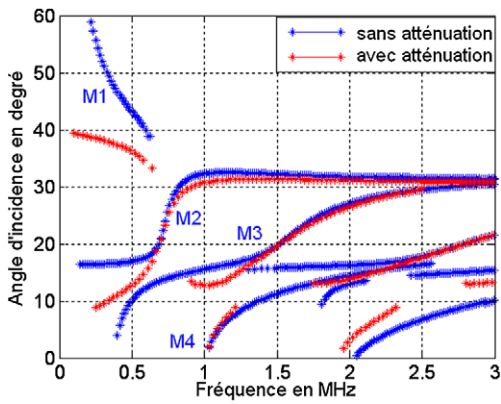
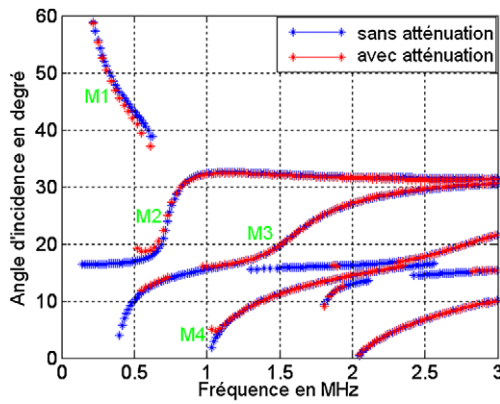


Fig. 17. Courbes de dispersion angulaire des modes de Lamb du multicouche immergé dans un fluide de densité 0,5 (Al 1,6 mm/époxy 0,15 mm/Al 0,6 mm).



(a) Atténuation longitudinale :  $\alpha_l = 1$  db/ $\mu$ m



(b) Atténuation transversale :  $\alpha_s = 0,1$  db/ $\mu$ m

Fig. 18. Courbes de dispersion du multicouche immergé dans de l'eau avec et sans atténuation (Al 1,6 mm/époxy 0,2 mm/Al 0,6 mm).

## Références

- [1] L.M. Brekhovskikh, O.A. Godin, *Acoustic of Layered Media I: Plane and Quasi-Plane Waves*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [2] G. Mott, Reflection and refraction coefficients at a fluid–solid-interface, *The Journal of the Acoustical Society of America* 50 (3) (1970) 819–829.
- [3] A. Briggs, *Acoustic Microscopy*, Clarendon Press, Oxford, 1992.
- [4] Z. Yu, Scanning acoustic microscopy and its applications to material characterization, *Reviews of Modern Physics* 67 (4) (1995) 863–891.
- [5] R.J.M. da Fonseca, L. Ferdj-Allah, G. Despaux, A. Boudour, L. Robert, J. Attal, *Advanced Materials* 5 (7/8) (1993) 508–519.
- [6] A. Benbelghit, D. Boutassouna, B. Helifa, I.K. Lefkaier, Determination of the elastic properties of some coated materials by simulation of the analogue signal of the reflection acoustic microscope, *NDT&E International* 39 (2006) 76–81.
- [7] J.D.N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Series in Pure and Applied Physics, 2002.
- [8] Y. Benelmostafa, J.F. De Belleval, N. Mercier, I. Molinero, Modélisation numérique de la propagation des ultrasons dans un milieu multicouche. Application aux collages.
- [9] W.J. Xu, M. Ourak, M. Ouaftouh, B. Nongaillard, Study of acoustic signatures for nonspherical curved acoustic lens, *Proc. IEEE Ultrasonic Symposium* (1994) 1413–1416.
- [10] W.J. Xu, M. Ourak, Angular measurement of acoustic reflection coefficient for substrate materials and layered structures by V(z) technique, *NDT&E International* 30 (2) (1997) 75–83.