



**HAL**  
open science

# ONDES DE LAMB DANS LES MILIEUX MULTICOUCHES

Philippe Guy, A. Jungman, G. Quentin, J. Le Flour

► **To cite this version:**

Philippe Guy, A. Jungman, G. Quentin, J. Le Flour. ONDES DE LAMB DANS LES MILIEUX MULTICOUCHES. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C2), pp.C2-1249-C2-1252. 10.1051/jphyscol:19902293 . jpa-00230627

**HAL Id: jpa-00230627**

**<https://hal.science/jpa-00230627>**

Submitted on 4 Feb 2008

**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.

1er Congrès Français d'Acoustique 1990

ONDES DE LAMB DANS LES MILIEUX MULTICOUCHES<sup>(1)</sup>

Ph. GUY, A. JUNGMAN, G. QUENTIN et J.C. LE FLOUR\*

Groupe de Physique des Solides, Université Paris 7, 2 Place Jussieu,  
F-75251 Paris Cedex 05, France

\* Régie Nationale des Usines Renault, 8-10 Avenue Emile Zola, F-92109  
Boulogne Billancourt Cedex, France

**Résumé** - L'interaction d'une onde ultrasonore avec un système bi-couche constitué d'une plaque d'acier doux anisotrope et d'une couche de colle est étudié expérimentalement et théoriquement. Les propriétés d'anisotropie de la plaque métallique sont démontrées à partir des courbes de dispersion des vitesses des modes de Lamb d'ordre zéro. L'amplitude des modes  $A_0$  et  $S_0$  est mesurée par analyse spectrale des signaux réfléchis. Les variations d'amplitude de ces signaux en fonction du produit  $Fd$  (où  $F$  est la fréquence ultrasonore et  $d$  l'épaisseur de la plaque) sont analysées théoriquement et interprétés physiquement. Les résultats sont ensuite étendus au cas d'un système bi-couche constitué par une couche de colle déposée sur la plaque. L'influence de la couche de colle, non visible sur les courbes de dispersion, est mise en évidence sur l'amplitude des coefficients de réflexion.

**Abstract** - The interaction of an ultrasonic wave with a double-layer system made of an anisotropic steel plate and an adhesive medium is experimentally and theoretically studied. The anisotropic properties of the rolled plate are demonstrated by using velocity dispersion curves. The amplitude of the modes  $A_0$  and  $S_0$  are measured by spectrum analysis of the reflected signals. Their variation with respect to the product  $Fd$  (where  $F$  is the ultrasonic frequency and  $d$  the plate thickness) are analyzed theoretically and physically interpreted. These results are then extended to the case of the double layer system. For a plate with adhesive layer it is shown that significant changes of the amplitude of the reflection coefficient occur, although no modification can be observed on the dispersion curves.

## 1 - INTRODUCTION.

Les méthodes ultrasonores d'évaluation des systèmes multicouches collés ont été abondamment étudiées [1-7]. Parmi les différentes approches existant pour caractériser les propriétés mécaniques d'un système plaque métallique-colle, les ondes guidées semblent particulièrement bien adaptées puisqu'elles accumulent, lors de leur propagation, les effets des interactions à l'interface des différentes couches [8-12]. Cependant, la plupart de ces études considèrent la propagation des ondes élastiques dans des plaques isotropes. Par contre il n'existe que peu de résultats sur les ondes guidées dans des plaques anisotropes. Récemment, les relations de dispersion ont été étendues à des systèmes orthorhombiques par Nayfeh et Chimenti [13] pour expliquer les courbes de dispersion expérimentales obtenues par réflexion sur une plaque de composite uniaxial graphite-epoxy et par Hirao et Fukuoaka [14], dans le cas d'une feuille d'aluminium laminée.

Dans cette étude nous présentons les résultats expérimentaux concernant la propagation d'ondes guidées dans des systèmes bi-couches constitués d'une plaque d'acier anisotrope et d'une couche de colle. Dans la première partie nous mettons en évidence les propriétés d'anisotropie de la plaque, à partir de l'analyse des courbes de dispersion expérimentales. Dans la seconde partie, nous analysons les variations d'amplitude des coefficients de réflexion en fonction de la dispersion des modes  $A_0$  et  $S_0$  pour des systèmes bi-couches. Et nous montrons que cette approche peut permettre de distinguer entre une plaque seule et un système plaque-colle.

## 2- ONDES GUIDEES DANS UNE PLAQUE ANISOTROPE.

### 2-1 - Position théorique du problème.

Pour un solide isotrope, la variation de la vitesse de phase d'un mode de plaque avec la fréquence se représente généralement sous forme de courbes de dispersion. Ces courbes sont calculées à partir des vitesses des ondes de volume longitudinale  $C_l$  et transversale  $C_t$ . Cependant pour les aciers qui n'ont pas subi de traitement thermique ou de surface après laminage, le milieu est anisotrope. Le calcul des vitesses de phase  $C_p$  des modes de plaque impose alors d'introduire, dans les équations caractéristiques, des valeurs de vitesses  $C_l$  et  $C_t$  différentes pour chaque angle d'incidence et données par les courbes de lenteurs caractéristiques de la symétrie du matériau. Dans le cas de plaques d'aluminium laminées une formulation théorique générale assez complexe a été obtenue par Hirao et Fukuoaka [17], basée sur une symétrie orthorhombique. Cependant ces auteurs ont montré que l'anisotropie des vitesses dans un tel matériau ne modifiait que faiblement le comportement des modes. Notre objectif étant la caractérisation d'un système plaque-colle, nous n'avons donc pas estimé utile dans cette étude de transposer ces calculs. Nous nous contentons donc de mettre en évidence expérimentalement l'anisotropie de nos échantillons, et nous interprétons les écarts observés entre les mesures ultrasonores et les courbes de dispersion calculées à partir d'un modèle isotrope.

(1) Cette étude est soutenue par la Régie Nationale des Usines Renault  
Direction des Laboratoires - Boulogne-Billancourt, contrat n° V1 - 6905.

### 2-2 - Expériences.

Les modes de plaque ont été générés sur des plaques d'acier doux et sur des systèmes bi-couches constitués d'une plaque d'acier sur laquelle sont déposées différentes épaisseurs de colle (Table I). L'anisotropie de la plaque d'acier a été vérifiée par une mesure des vitesses suivant les trois directions orthogonales  $Ox, Oy, Oz$  comme indiqué sur la Fig. 1. Le plan  $xOy$  s'est révélé isotrope pour la vitesse longitudinale ( $C_{lx} = C_{ly}$ ). Il existe au contraire une forte anisotropie entre le plan  $xOy$  et la direction  $Oz$  (Table II). Compte tenu de la faible épaisseur de la plaque, il n'a pas été possible de mesurer la vitesse transversale dans le plan  $xOy$ . Une mesure indirecte des vitesses  $C_{tx}$  et  $C_{ty}$ , obtenue à partir de la vitesse de Rayleigh, elle même connue en mesurant avec une précision de 3% l'angle critique de rétrodiffusion maximale [15], a confirmé l'isotropie dans ce plan.

Echantillon	P	A	B	C	D	E	F
Épaisseur d'acier (mm.)	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Épaisseur de colle (mm.)	-	0.20	0.46	0.7	0.96	1.15	1.82

Table I - Caractéristiques des échantillons.

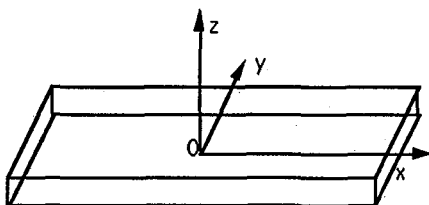


Fig. 1 - Système de coordonnées.

$C_{lx}$ (m/s)	$C_{ly}$ (m/s)	$C_{lz}$ (m/s)	$C_{tz}$ (m/s)	$C_{tx}$ (m/s)
5210	5210	6130	3110	3350

Table II - Vitesses des ondes de volume dans la plaque d'acier ( $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ).

### 2-3 - Résultats.

Afin d'évaluer l'influence de l'anisotropie sur la vitesse de phase des modes de plaque, nous avons reporté les données expérimentales sur les courbes de dispersion théoriques tracées dans les deux hypothèses simplificatrices suivantes : i) échantillon isotrope dont les vitesses sont mesurées dans le plan  $xOy$  (Fig. 2); ii) échantillon isotrope dont les vitesses sont mesurées suivant  $Oz$  (Fig. 3).

Dans la première hypothèse on observe (Fig. 2) un bon accord entre les courbes théoriques et les valeurs expérimentales sauf pour les vitesses élevées ( $C_p \approx 7000 \text{ ms}^{-1}$ ) des modes  $A_1$  et  $S_2$ . En effet, d'après la loi de Snell-Descartes, ces points correspondent à des angles d'incidence dans l'eau proches de la direction  $Oz$  ( $\theta_e \approx 12^\circ$ ), soit par rapport à la normale dans le solide  $\theta_l \approx 59^\circ$  pour l'onde longitudinale et  $\theta_t \approx 27^\circ$  pour l'onde transversale. Dans ce cas, il est naturel que l'hypothèse simplificatrice d'un milieu isotrope ayant des vitesses mesurées dans le plan  $xOy$  ne puisse correctement rendre compte des vitesses de phase des modes. Par contre, l'accord est excellent pour les modes  $S_0$  et  $A_1$ , particulièrement au voisinage de  $C_p = 5000 \text{ ms}^{-1}$  correspondant à une onde longitudinale réfractée dans la direction rasante, donc avec une vitesse égale à celle choisie dans le plan  $xOy$  conformément à notre hypothèse.

Au contraire, dans la seconde hypothèse (Fig. 3) les deux points précédents, correspondant à  $C_p \approx 7000 \text{ ms}^{-1}$ , sont en bon accord avec les courbes calculées, tandis que les autres points, associés à des directions proches de celles du plan de la plaque, s'éloignent des prédictions théoriques. Dans les deux cas, le mode  $A_0$  est bien décrit, puisque sa vitesse de phase correspond à un angle d'incidence dans l'eau supérieur aux angles critiques transversal et longitudinal. Entre  $3000 \text{ ms}^{-1}$  et  $5200 \text{ ms}^{-1}$ , il existe également un léger écart entre les valeurs théoriques et expérimentales. Afin de minimiser cet écart, nous avons utilisé, pour le calcul des constantes élastiques, un modèle hexagonal, qui rend compte en première approximation, de la symétrie des plaques utilisées. La méthode consiste à considérer les points expérimentaux de coordonnées  $F_d$  et  $C_p$  connues, et de les introduire dans les équations de Lamb afin de déterminer les couples  $(C_l, C_t)$  vérifiant ces équations. Pour chaque angle un seul de ces couples réintroduit dans les équations de Christoffel doit permettre de trouver une constante élastique  $c_{13}$  unique. Aucune des solutions examinées ne vérifiant ce critère, on en déduit que le système hexagonal n'est pas une représentation correcte de la symétrie de l'échantillon. Comme nous le laissons prévoir plus haut (cf § 2-1), compte tenu de la métallurgie des plaques, le système orthorhombique serait probablement mieux adapté à nos éprouvettes.

Pour les systèmes acier-colle, les points expérimentaux obtenus en réflexion du côté de la plaque d'acier (Fig. 2) montrent que les modes sont très proches de ceux d'une plaque. L'influence négligeable de la colle sur la position des modes a déjà été observé par Léomy et al [16]. La plupart des modes des différents échantillons étant confondus ou très proches, nous ne présentons sur la Fig. 2 que les résultats concernant les plaques avec colle C et D. De plus, pour la clarté de la figure, un seul symbole est utilisé quand les points se superposent.

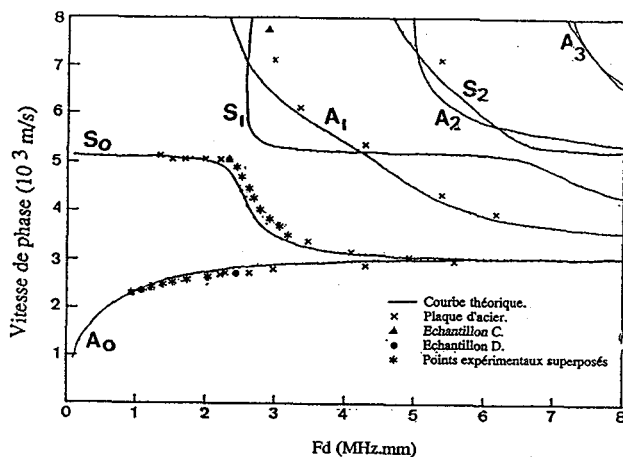


Fig. 2 - Courbes de dispersion d'une plaque d'acier, calculées à l'aide de  $C_{lx}$ ,  $C_{tx}$ .

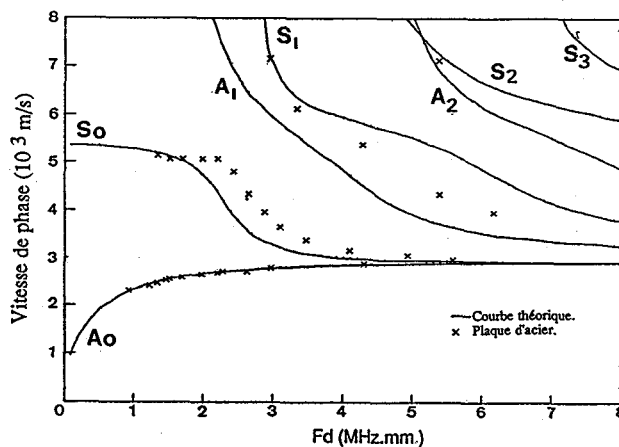


Fig. 3 - Courbes de dispersion d'une plaque d'acier, calculées à l'aide de  $C_{lz}$ ,  $C_{tz}$ .

### 3 - AMPLITUDE REFLECHIE DES MODES $A_0$ ET $S_0$ .

L'impossibilité de caractériser la présence de colle derrière la plaque nous a amenés à mesurer, pour les divers échantillons, l'amplitude réfléchie dans l'eau à l'incidence critique des différents modes en fonction du produit  $Fd$ . Les résultats présentés sur les Fig. 4 et 5. montrent que l'amplitude réémise dans le fluide augmente avec la dispersion du mode, quelque soit l'échantillon étudié.

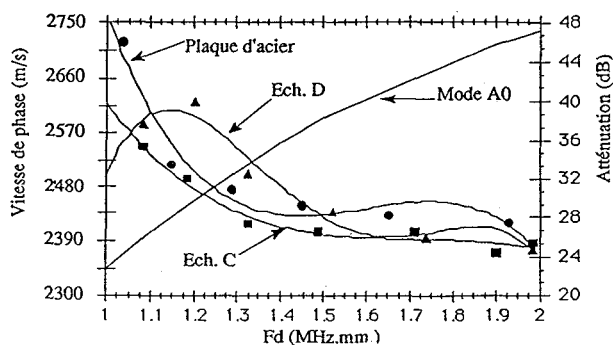


Fig. 4 - Amplitude du mode  $A_0$  en fonction du produit  $Fd$ .

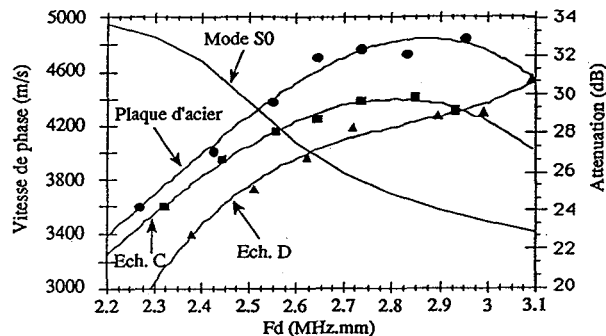


Fig. 5 - Amplitude du mode S0 en fonction du produit Fd.

Ce résultat est conforme à l'analyse théorique de Osborne et Hart [17] qui ont montré que l'atténuation des modes d'une plaque immergée augmente avec le gradient de la vitesse de phase  $dC_p/d\omega$ , c'est à dire avec la pente des courbes de dispersion. Inversement, un mode présentant une faible dispersion (courbe de dispersion proche de l'horizontale), est peu atténué dans le solide et réémet donc moins d'énergie dans le fluide, ce qui conduit à des extrema peu prononcés et assez larges dans les spectres réfléchis ou transmis. Une interprétation physique de la variation de l'amplitude réémise en fonction de la pente des courbes de dispersion peut être donnée en considérant d'une part l'ouverture du faisceau ultrasonore, d'autre part l'étendue spectrale du signal.

Du fait de l'ouverture du faisceau, l'échantillon est irradié dans un secteur angulaire  $\theta \pm \Delta\theta$ , où  $\theta$  désigne l'incidence sur la plaque de l'axe du faisceau. Dans une région faiblement dispersive, l'énergie du mode se répartit sur une plage étendue de fréquence, provoquant une perte de sensibilité dans la détection des extrema des spectre réfléchis ou transmis, tandis que dans une zone très dispersive, le mode n'est excité que sur une bande spectrale très étroite qui accumule toute son énergie, donnant des extrema très marqués et bien localisés. Ces considérations doivent permettre de choisir le domaine ( $\theta$ , Fd) à explorer de manière à obtenir la meilleure sensibilité pour l'identification des modes. En outre, on observe pour le mode  $S_0$  (Fig. 5) que l'amplitude réfléchi par un système bi-couche est inférieure à celle d'une plaque seule, ce qui correspond à un affaiblissement du mode de plaque en présence de la couche de colle.

#### 4 - CONCLUSION.

Nous avons essayé d'identifier et de caractériser les effets d'une couche de colle sur une plaque d'acier doux à partir des ondes de plaque générées sous incidences critiques. L'anisotropie de la plaque a été mise en évidence sur les courbes de dispersion en comparant les données spectrales aux courbes calculées à l'aide d'un modèle isotrope. Nous avons montré que la position des modes des systèmes bi-couches métal-colle obtenue en réflexion sur l'acier n'étaient pas modifiées par rapport à celle d'une plaque. Nous avons également étudié les variations de l'amplitude réémise par un mode en fonction du produit Fd. Les résultats expérimentaux, en bon accord avec les prédictions théoriques existantes, indiquent qu'il est possible dans certains cas de distinguer en réflexion une plaque d'un système bi-couche.

#### REFERENCES

- /1/ Rose, J.L. and Meyer, P.A., Materials Evaluation, June 1973.
- /2/ Schoenberg, M., J. Acoust. Soc. Am., 68 (5), (1980).
- /3/ Alers, G.A., Flynn, P.L. and Buckley, M.J., Materials Evaluation, 35 (4), (1977) 77.
- /4/ Rose, J.L., Avioli Jr., M.J. and Bilgram, R., British Journal of NDT, 3 (1983) 67.
- /5/ Pilarsky, A. and Rose, J.L., J. Acoust. Soc. Am., 63 (2) (1988) 300.
- /6/ Chang, F.H. et al., I.E.E.E. Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-23 (5) (1976) 334.
- /7/ Guyott, C.C.H., Cawley, P. and Adams, R.D., J. Acoust. Soc. Am., 20 (1986) 129.
- /8/ Mal, A.K., Yin, C.C. and Bar-Cohen, Y., Review of Progress in Quantitative N.D.E., 7, D.O. Thompson and D.E. Chimenti edit., Plenum Press New-York (1987).
- /9/ Pilarsky, A., Materials Evaluation, 43 (1985) 765.
- /10/ Rocklin, S.I. and Redwood, M., Acustica, 16, (1965) 224.
- /11/ Rocklin, S.I. and Bendec, F., J. Acoust. Soc. Am., 73 (1983) 55.
- /12/ Rocklin, S.I. and Marom, D., J. Acoust. Soc. Am., 80 (1986) 585.
- /13/ Nayfeh, A.H. and Chimenti, D.E., Journal of Applied Mechanics, 55 (1988).
- /14/ Hirao, M. and Fukuoka, H., J. Acoust. Soc. Am., 85 (1989) 2311.
- /15/ De Billy, M. and Adler, L., J. Acoust. Soc. Am., 83 (1988) 1736.
- /16/ Leomy, F., de Billy, M. and Quentin, G., Revue Physique Appl. 23 (1988) 1547.
- /17/ Osborne, M.F.M. and Hart, S.D., J. Acoust. Soc. Am., 17 (1945) 1.