

CFA/VISHNO 2016

Interaction entre un faisceau ultrasonore et une structure sandwichP. Gatignol^a, N. Bedrici-Frai^b et B. Vacossin^c^aUniversité de Technologie de Compiègne -Laboratoire Roberval-UMR, Centre de Recherches de Royallieu CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France^bESTACA, Parc Universitaire Laval Changé, BP76121, 53061 Laval Cedex 9, France^cUPJV- LTI -EESA- QLIO, 15, avenue François Mitterrand, 02880 Cuffies, France
philippe.gatignol@utc.fr

LE MANS

Dans la perspective du contrôle par ultrasons des structures multicouches, nous présentons quelques résultats concernant la simulation de l'interaction d'un faisceau ultrasonore avec une structure sandwich. La structure est composée de deux couches élastiques, de matériaux différents a priori, couplées par une couche intermédiaire dont le comportement est supposé de nature fluide. La structure est immergée dans un fluide au sein duquel un transducteur émet un faisceau borné monochromatique impactant la structure sous une incidence quelconque. Les courbes de dispersion de la structure dans le vide sont d'abord tracées, mettant en évidence les ondes modales et leurs relations avec les modes de Lamb de chacune des couches élastiques. Déduts de l'examen de ces courbes, des choix appropriés de la fréquence du faisceau et de son angle d'incidence, permettent d'engendrer des ondes modales privilégiant les modes de Lamb de la couche impactées mais également de la couche opposée. Les ondes de Lamb à vitesse de groupe négative peuvent être engendrés dans l'une ou l'autre de ces couches. La déformation des courbes de dispersion en fonction des caractéristiques de la couche de couplage montre comment apparaît dans la structure sandwich un mode particulier désigné comme "mode vertical" par certains auteurs.

1 Introduction

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un ensemble de travaux de simulation relatifs au contrôle non destructif par ultrasons de structures multicouches planes. Les structures sont formées d'une alternance de couches élastiques [1] pouvant être liées entre elles par des collages interfaciaux [2] ou séparées par des couches de comportement fluide (la présente étude). Ces structures peuvent en particulier modéliser certains matériaux composites comportant par exemple des défauts de délaminage de grande étendue. L'anisotropie des matériaux élastiques peut être prise en compte [3] et le cas de défauts d'extension finie a été traité sous l'approximation de Kirchoff [4] ou par méthode hybride d'éléments finis de frontières [5].

La structure est immergée dans un milieu fluide dans lequel est disposé un transducteur ultrasonore. La fréquence et l'incidence du faisceau émis par ce transducteur sont choisies de telle sorte que l'impact du faisceau sur la structure engendre une onde guidée ou plus généralement une onde modale [6], combinaison d'ondes guidées (Lamb) et d'ondes de surface (Rayleigh) ou d'interface (Stoneley, [7]).

La méthode de simulation est de type semi-analytique, faisant appel à des représentations intégrales de Fourier par superposition d'ondes planes. Elle a été largement décrite dans les références [3] et [4].

2 La structure étudiée

La structure multicouche qui fait l'objet du présent travail est constituée de deux couches élastiques (1) et (3), d'épaisseurs h_1 et h_3 , séparées par une couche fluide (2) d'épaisseur h_2 . L'ensemble peut être immergé dans un fluide (0) d'extension infinie (figure 1). Les masses volumiques sont désignées par ρ_i ($i = 0,1,2,3$) et les célérités des ondes par c_{iL}, c_{iT} ($i = 1,3$) pour les solides et par c_i ($i = 0,2$) pour les fluides.

L'émetteur ultrasonore, situé dans le fluide (0), engendre un faisceau monochromatique de pulsation ω , de profil gaussien de demi-largeur a , sous l'angle d'incidence q .

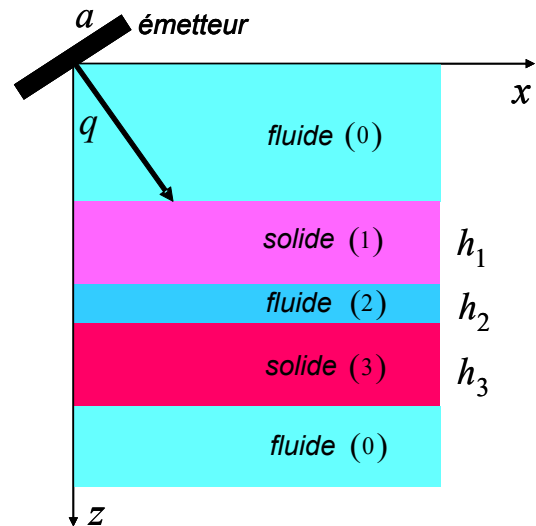


Figure 1: Géométrie de la structure.

Dans un premier temps, la structure est considérée comme étant située dans le vide et les ondes modales pouvant s'y propager sont analysées. Les courbes de dispersion de ces ondes modales sont tracées dans le plan de la fréquence et du nombre d'onde axial adimensionnels définis respectivement par

$$K_{iT} = \omega h_1 / c_{iT} \quad , \quad \bar{k}_x = k_x h_1 \quad .$$

Lorsque la structure est immergée dans le fluide (0), l'analyse de ces courbes de dispersion permet de définir une fréquence et un angle d'incidence bien adaptés à la génération d'une onde modale donnée. En particulier, la génération de "modes paradoxaux", pour lesquels les vitesses de phase et d'énergie (vitesse de groupe) sont de signes opposés, est possible, mettant en évidence la rétropropagation énergétique de l'onde.

3 Analyse des ondes modales

Les courbes de dispersion sont tracées pour deux structures particulières : une structure symétrique constituée de deux plaques d'aluminium identiques séparées par une lame d'eau d'épaisseur variable, et une structure asymétrique acier/eau/aluminium. Dans les deux cas, le couplage des ondes de Lamb dans chacune des couches solides est apprécié selon la variation d'épaisseur de la lame d'eau.

3.1 Structure symétrique Al/Eau/Al

Cette structure a fait l'objet d'études asymptotiques et expérimentales par Coulouvrat et al [8] en vue d'identifier un mode particulier appelé "mode vertical" suivant la terminologie introduite par Y. Benel Mostafa [9]. Il s'agit d'un mode basse fréquence pour lequel, pour une plage de valeurs du rapport h_2 / h_1 , la fréquence ne varie pratiquement pas tandis que le nombre d'onde axial peut prendre un ensemble de valeurs positives significatif.

Dans le présent travail, l'étude systématique du couplage entre les deux plaques solides, au fur et à mesure que l'épaisseur de la lame d'eau diminue, a permis de mettre en évidence l'apparition d'un tel mode comme le montrent les Figures 2 (a), (b), (c), (d). Les courbes modales (en noir pointillé) sont comparées aux courbes des modes de Lamb symétriques (en rouge) et antisymétriques (en bleu), et aux courbes modales de la couche d'eau (en vert).

Les valeurs des paramètres physiques sont les suivantes :

$$r_1 = 2800 \text{ kg}\times\text{m}^{-3}, c_{1L} = 2c_{1T} = 6000 \text{ m}\times\text{s}^{-1},$$

$$r_2 = 1000 \text{ kg}\times\text{m}^{-3}, c_2 = 1500 \text{ m}\times\text{s}^{-1}.$$

Pour un rapport d'épaisseur égal à 1, Figure 2(a), le couplage est faible sauf à très basse fréquence où le mode plan de la lame d'eau se scinde en deux pour se coupler avec le mode de Lamb antisymétrique A_0 . Lorsque le rapport h_2 / h_1 diminue, Figure 2(b), la branche inférieure de ce mode plan évolue pour faire apparaître le mode vertical.

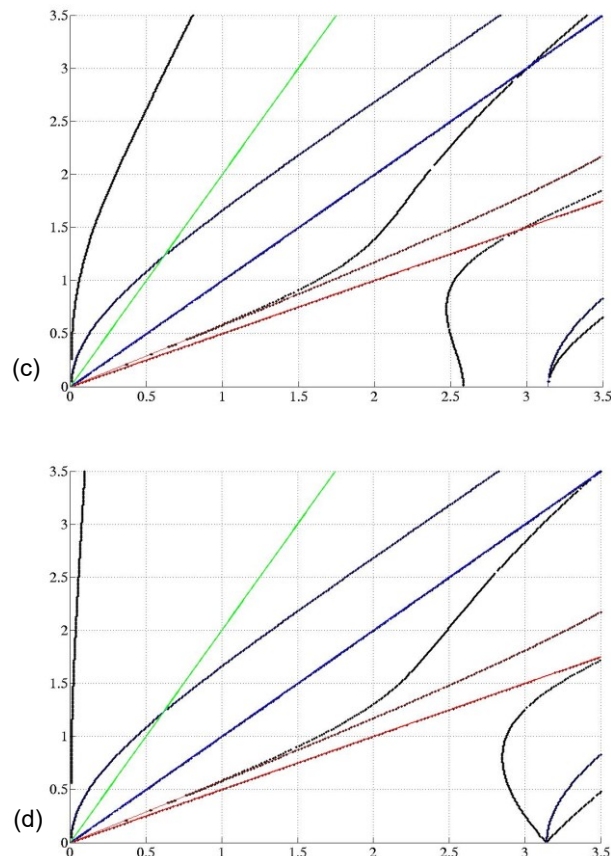


Figure 2: Courbes de dispersion de la structure Al/eau/Al pour différentes épaisseurs de la lame d'eau : $h_2 / h_1 = 1$ (a), 0.01 (b), 0.001(c), 0.00001 (d).

Pour des valeurs encore plus faibles de ce rapport, le mode vertical s'infléchit pour prendre une allure paradoxale, Figure 2(c), puis pour se confondre avec le mode de Lamb symétrique S_1 de la couche élastique d'épaisseur $2h_1$, Figure 2(d).

On remarque par ailleurs sur ces courbes que la branche supérieure du mode plan s'éloigne de plus en plus du mode A_0 pour donner lieu à un mode d'interface dont la vitesse de propagation diminue avec l'épaisseur de la lame d'eau.

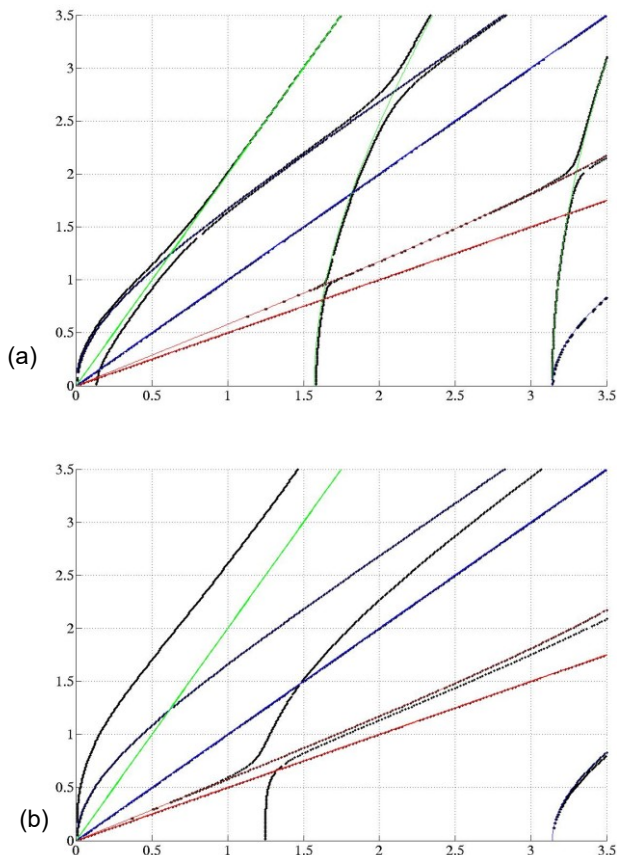
Dans le cas du couplage fort, pour une lame d'eau très fine, les ondes modales observées sont en rapport avec les ondes de Lamb de la couche d'épaisseur $2h_1$. Toutefois, la présence de la lame d'eau supprime un sur deux des modes antisymétriques et provoque l'apparition de nouveaux modes antisymétriques par juxtaposition de modes symétriques de chaque couche, en opposition de phase (voir § 4.1).

3.2 Structure asymétrique Acier/Eau/Al

Des observations similaires peuvent être faites sur des structures plus générales que la précédente. Nous présentons ci-dessous le cas d'une structure acier/eau/aluminium pour un rapport des épaisseurs des plaques solides

$$h_3 / h_1 = 0.55,$$

avec les valeurs suivantes pour les paramètres physiques :



$$r_1 = 8000 \text{ kg}\times\text{m}^{-3}, c_{1L} = 2c_{1T} = 4000 \text{ m}\times\text{s}^{-1},$$

$$r_2 = 1000 \text{ kg}\times\text{m}^{-3}, c_2 = 1500 \text{ m}\times\text{s}^{-1}.$$

$$r_3 = 2800 \text{ kg}\times\text{m}^{-3}, c_{3L} = 2c_{3T} = 6000 \text{ m}\times\text{s}^{-1},$$

Les Figures 3 (a), (b), (c), (d) montrent l'évolution des courbes modales, à basse fréquence, lorsque l'épaisseur de la couche fluide diminue. L'interprétation en est plus complexe que dans la situation précédente en raison de la séparation des modes de Lamb de chaque plaque élastique. Les modes seront désignés ici par les symboles usuels, suivis de la mention du numéro de la couche, les modes de la couche fluide étant désignés par la lettre M. Ainsi, $M_0(2)$ désignera le mode plan de cette couche.

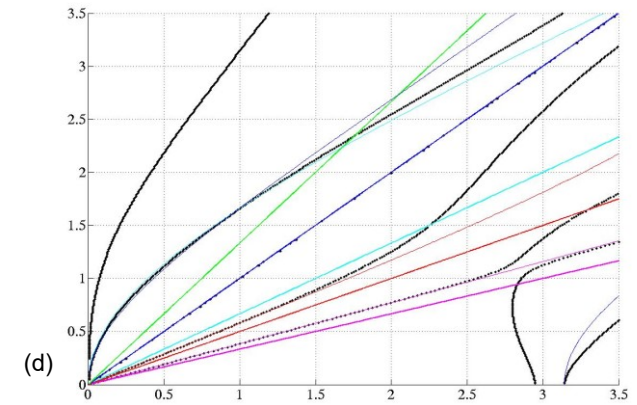
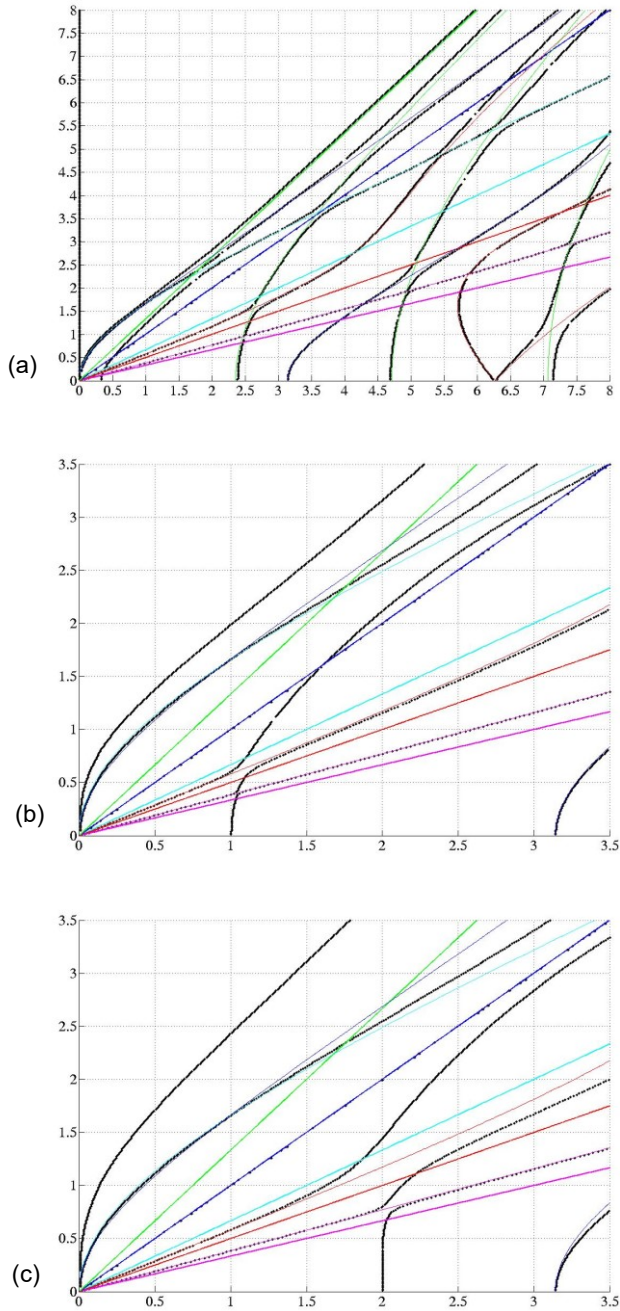


Figure 3: Courbes de dispersion de la structure Acier/eau/Al pour différentes épaisseurs de la lame d'eau : $h_2 / h_1 = 1$ (a), 0.1 (b), 0.02 (c), 0.005 (d).

Pour un rapport $h_2 / h_1 = 1$, Figure 3 (a), le couplage est faible sauf à basse fréquence où le mode plan $M_0(2)$ se scinde en deux branches : la branche supérieure évolue du mode $A_0(1)$ vers $M_0(2)$; la branche inférieure évolue de $M_0(2)$ à $A_0(3)$, $M_1(2)$ et $A_0(1)$.

Pour $h_2 / h_1 = 0.1$, Figure 3 (b), cette branche inférieure, après avoir interagi avec $S_0(1)$, se couple avec $S_0(3)$ en donnant d'abord naissance à un mode vertical. Ce dernier est parfaitement formé sur la Figure 3 (c) avant de rejoindre $S_0(3)$. Pour des épaisseurs encore plus faibles de la lame d'eau, Figure 3 (d), le mode vertical s'incurve pour donner un mode paradoxal semblable à celui observé dans la situation précédente.

Les Figures 3 montrent également, comme pour la structure précédente, la formation d'un mode d'interface à basse fréquence dont la vitesse de propagation est très dépendante de l'épaisseur de la lame d'eau. L'évolution de ce mode en fonction de cette épaisseur est d'ailleurs assez similaire d'un cas à l'autre, ce qui montre que le mode est très lié à la propagation dans la lame d'eau où il est formé de deux ondes évanescentes radialement.

4 Génération des modes paradoxaux

Les structures sont à présent immergées dans un fluide extérieur (0), supposé ici identique au fluide interstitiel (2). Pour des fréquences K_{1T} et des nombres d'ondes axiaux \bar{k}_x , donc des incidences, bien choisis, le faisceau ultrasonore émis dans ce fluide externe va engendrer une onde modale dans la structure.

4.1 Structure symétrique Al/Eau/Al

Nous reprenons d'abord le cas de la structure symétrique Al/eau/Al dans le cas d'une lame d'eau très fine:

$$h_2 / h_1 = 0.00001 .$$

La Figure 4, qui est une extension de la Figure 2(d), montre l'existence de deux modes paradoxaux sur lesquels deux choix de valeurs sont indiqués.

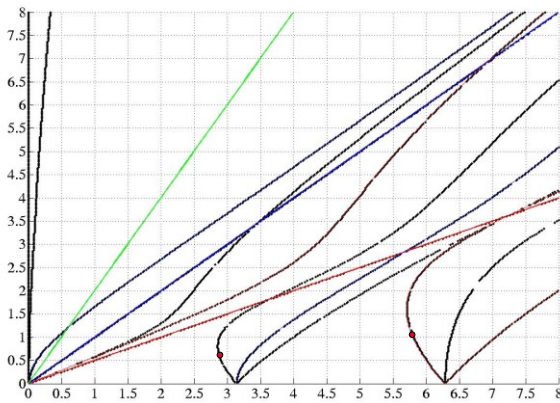


Figure 4 : Courbes modales de la structure Al/eau/Al pour $h_2 / h_1 = 0.00001$.

Le premier choix correspond aux valeurs

$$K_{1T} = 2.9 \quad , \quad q = 5^\circ \quad .$$

La cartographie de la Figure 5 représente les champs de pression dans les fluides et de contrainte normale dans les solides, en modules. Cette cartographie confirme bien que le mode engendré correspond au mode $S_1(1 + 3)$. Bien que le point de calcul soit choisi sur la branche paradoxale de ce mode, le décalage énergétique vers "l'amont" n'est pas nettement visible en raison des faibles valeurs de l'incidence et de la fréquence.

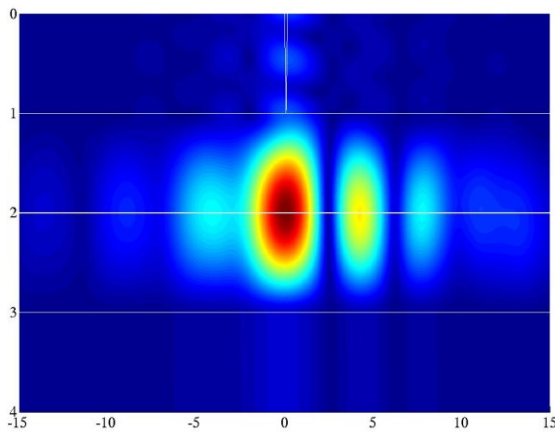


Figure 5 : Structure Alu/Eau/Alu. Cartographie de pression et de contrainte normale en modules pour le mode $S_1(1 + 3)$.

Le second choix correspond aux valeurs

$$K_{1T} = 6 \quad , \quad q = 2.4^\circ \quad .$$

La cartographie de la Figure 6 concerne les parties réelles de pression et de contrainte normale (changée de signe) de telle sorte qu'il apparaît clairement que le mode engendré se compose des deux modes $S_1(1)$ et $S_1(3)$ en opposition de phases. Il s'agit donc d'un mode antisymétrique pour la structure globale.

Là encore, les faibles valeurs de la fréquence et de l'incidence ne permettent pas de mettre en évidence le décalage énergétique vers l'amont.

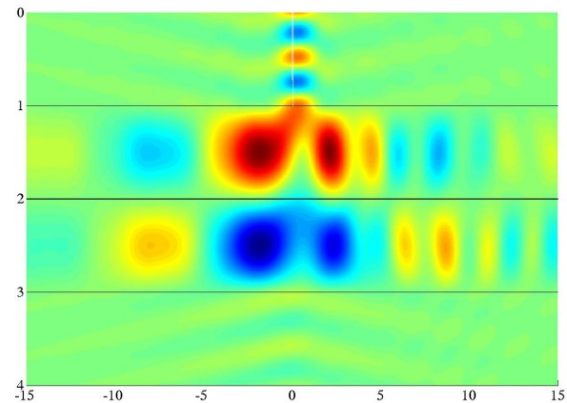


Figure 6 : Structure Alu/Eau/Alu. Cartographie de pression et de contrainte normale ($-T_{zz}$) pour le mode $S_1(1) + S_1(3)$.

4.2 Structure asymétrique Acier/Eau/Al

La structure introduite au § 3.2 est à présent considérée pour une épaisseur de lame d'eau $h_2 = 0.01 h_1$. Elle est immergée et soumise à l'impact du faisceau ultrasonore.

La Figure 7 montre les courbes de dispersion de cette structure pour une plage importante de fréquences. Plusieurs modes paradoxaux apparaissent. En particulier, pour des valeurs de la fréquence adimensionnelle K_{1T} voisines de 16, la courbe $S_1(3)$, dans sa partie paradoxale, coupe la courbe $A_4(1)$. Cette circonstance particulière a présidé au choix du rapport 0.55 pour les épaisseurs des deux plaques.

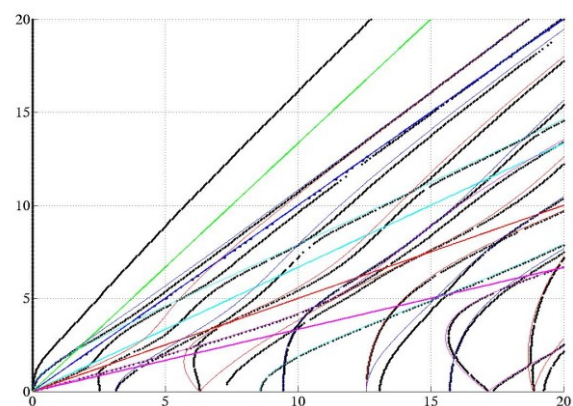


Figure 7: Courbes de dispersion de la structure Acier/eau/Al pour une épaisseur de la lame d'eau : $h_2 / h_1 = 0.01$.

Pour le choix de fréquence adimensionnelle et d'incidence suivant

$$K_{1T} = 16.4 \quad , \quad q = 2.7^\circ \quad ,$$

la cartographie des pressions et des contraintes normales, en modules, est présentée sur la Figure 8.

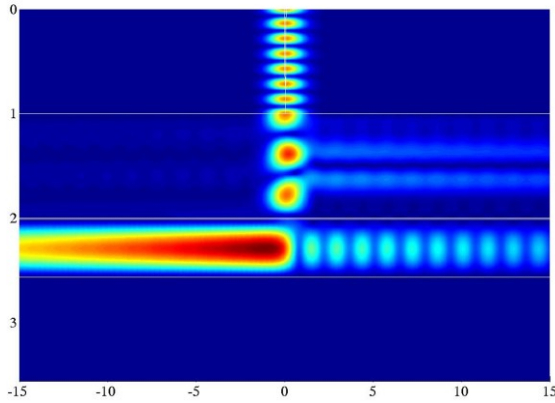


Figure 8 : Structure Acier/Eau/Alu. Cartographie de pression et de contrainte normale en modules pour le mode $A_4(1) + S_1(3)$.

Le décalage amont de l'énergie dans la couche (3) est nettement visible, alors que l'onde, dans la couche (1), se propage dans le sens de l'impact du faisceau.

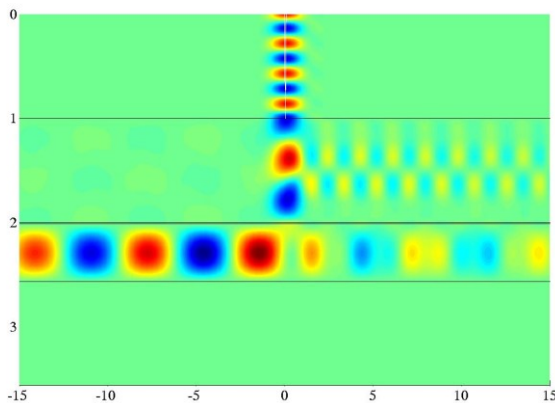


Figure 9 : Structure Acier/Eau/Alu. Cartographie de pression et de contrainte normale ($-T_{zz}$) pour le mode $A_4(1) + S_1(3)$.

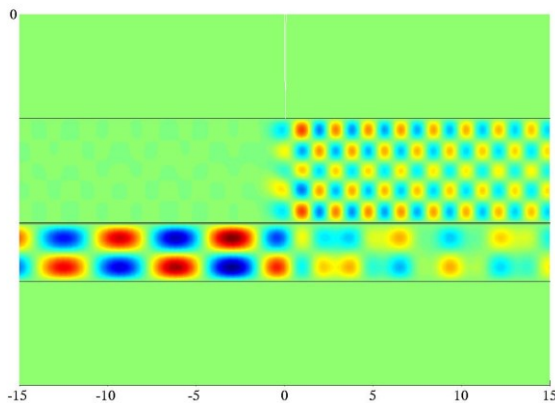


Figure 10 : Structure Acier/Eau/Alu. Cartographie de contrainte de cisaillement (T_{zx}) pour le mode $A_4(1) + S_1(3)$.

L'identification de l'onde modale engendrée est facilitée par l'examen des cartographies des contraintes normales et de cisaillement en parties réelles, présentées sur les Figures 9 et 10.

Il apparaît clairement sur ces cartographies que l'onde modale est constituée d'un mode symétrique (paradoxal) dans la couche d'aluminium (3), correspondant au mode $S_1(3)$ de cette couche, et d'un mode antisymétrique dans la couche d'acier (1), correspondant au mode $A_4(1)$.

5 Conclusion

L'étude des ondes modales pouvant se propager dans des structures planes solide/fluide/solide a été menée par un tracé systématique des courbes de dispersion. L'analyse de ces courbes a montré comment certains modes, désignés comme modes verticaux, peuvent apparaître dans les basses fréquences lorsque l'épaisseur de la couche fluide varie, d'abord pour une structure symétrique, corroborant ainsi des résultats de la littérature obtenus par voies asymptotique et expérimentale. Le phénomène a ensuite été observé sur des structures plus générales. L'analyse des courbes de dispersion montre par ailleurs l'existence de mode paradoxaux pour la structure globale.

Sous l'impact d'un faisceau ultrasonore, ces structures, immergées, peuvent être le siège de telles ondes modales, pouvant présenter certaines propriétés remarquables. En particulier, de telles ondes modales peuvent être constituées d'un mode dont l'énergie se propage dans le sens de l'impact dans la couche supérieure, tandis que dans la couche inférieure la composante modale présente un décalage énergétique dans le sens opposé.

Références

- [1] N. Bedrici-Frai, B. Vacossin, Ph. Gagnol, Génération d'ondes modales dans une structure multicouche plane par l'impact d'un faisceau ultrasonore, *CFM*, (2013).
- [2] B. Vacossin, N. Bedrici-Frai, Ph. Gagnol, Interaction entre un faisceau ultrasonore et une structure élastique à deux couches, *CFA, Poitiers 2014*.
- [3] B. Vacossin, C. Potel, Ph. Gagnol, J-F de Belleval, Interaction of a monochromatic ultrasonic beam with a finite length defect at the interface between two anisotropic layers – Kirchhoff approximation and Fourier representation, *IEEE, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **56/10**, 2251-2267, (2009).
- [4] N. Bedrici, Ph. Gagnol, C. Potel, An iterative method for the interaction between a bounded beam and an interface defect in solids, under Kirchhoff approximation, *Acustica-Acta Acustica*, **95**, 189-202, (2009).

- [5] N. Bedrici-Frai, Méthode hybride "intégrales de Fourier / éléments finis de frontière" pour l'étude de l'interaction d'un faisceau ultrasonore avec un défaut situé dans un multicouche, *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne*, 2008.
- [6] M. Bruneau, C. Potel, Matériaux et Acoustique, *Hermès*, (2006).
- [7] H. Franklin, M. Rousseau, Ph. Gatignol, Influence des conditions de collage sur l'existence de l'onde d'interface entre deux solides élastiques, *Acustica*, **80/2**, 147-155, (1994).
- [8] F. Coulouvrat, M. Rousseau, O. Lenoir, J-L. Izbicki, Lamb-Type Waves in symmetric Solid-Fluid-Solid Trilayer, *Acustica-Acta Acustica*, **84**, 12-20, (1998).
- [9] Y. Benel Mostafa, Etude de la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu multicouche. Application à l'évaluation non-destructive de collages, *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne*, 1990.