



HAL
open science

Ondes de Lamb dans une plaque comportant une interface striée avec plusieurs périodicités spatiales

Damien Leduc, Anne-Christine Hladky, Bruno Morvan, Jean-Louis Izbicki,
Pascal Pareige

► **To cite this version:**

Damien Leduc, Anne-Christine Hladky, Bruno Morvan, Jean-Louis Izbicki, Pascal Pareige. Ondes de Lamb dans une plaque comportant une interface striée avec plusieurs périodicités spatiales. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-04090910

HAL Id: hal-04090910

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04090910>

Submitted on 6 May 2023

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.

Ondes de Lamb dans une plaque comportant une interface striée avec plusieurs périodicités spatiales

Damien Leduc¹, Anne-Christine Hladky², Bruno Morvan¹, Jean-Louis Izbicki¹, Pascal Pareige¹

¹ Laboratoire d'Acoustique Ultrasonore et d'Electronique (LAUE UMR CNRS 6068)
Université du Havre, Place Robert Schuman, BP 4006
76610 LE HAVRE

² Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN UMR CNRS 8520)
41 boulevard Vauban
59046 LILLE

Résumé :

La propagation d'ondes de Lamb dans une plaque comportant une interface striée est étudiée. Lorsque le profil ne comporte qu'une périodicité spatiale alors un mode réfléchi-converti peut être observé. Le nombre d'onde de ce mode réfléchi-converti est déterminé dans le plan nombre d'onde/fréquence par une relation entre les phonons associés aux ondes incidente et réfléchi-convertie et à celui associé au réseau de stries. Lorsque l'interface striée est composée de plusieurs périodicités spatiales, cette relation est encore vérifiée.

Abstract :

Lamb wave propagation in a plate with a grooved interface is studied. If the surface profile is made up of grooves with one spatial periodicity, a mode conversion is observed. In the wave-number/frequency space, a phonon relation is written between phonons related to the incident and reflected-converted modes and this related to the grating. If the grooved interface is made up of several spatial periodicities, the phonon relation is still verified.

Mots clefs :

Onde de Lamb ; réseau ; phonon.

1 Introduction

Les caractéristiques des ondes de Lamb se propageant dans des plaques, dont les surfaces sont parfaitement planes et parallèles, sont bien connues de nos jours. De plus en plus de travaux concernent donc l'étude de ces mêmes ondes dans des guides légèrement modifiés tels que des plaques d'épaisseurs variables, ou avec des défauts de type fissure ou bien encore des plaques dont les surfaces sont rugueuses [1, 2]. C'est à ce dernier cas que nous nous intéressons ici. Si on effectue le relevé du profil de surface d'une plaque rugueuse, on s'aperçoit, en effectuant une analyse spectrale, qu'il existe des périodicités spatiales Λ dominantes [3]. Ces périodicités spatiales couvrent un large spectre tandis qu'une onde de Lamb, à une fréquence donnée, n'est associée qu'à une seule longueur d'onde λ . La question se pose alors de savoir si l'onde de Lamb est indifféremment sensible à toutes ces « échelles » de rugosité ou si au contraire elle va fortement interagir avec certaines périodicités spatiales. Pour répondre à cette question, nous avons simplifié le problème en considérant des réseaux striés de périodicités spatiales connues. Nous nous intéresserons dans un premier temps à une plaque dont la surface a été striée périodiquement. Nous verrons que des conversions de modes apparaissent à des fréquences particulières. Ensuite, nous traiterons le cas de surfaces dont le profil a été obtenu par addition de deux puis trois périodicités.

2 Réseau composé d'une périodicité spatiale

2.1 Description de l'échantillon étudié

L'échantillon étudié est une plaque d'aluminium dont une des faces est partiellement modifiée. La modification consiste en la présence de 10 rainures triangulaires. Les rainures ont une profondeur de $p=100\ \mu\text{m}$ et une périodicité spatiale de $\Lambda_1=3\ \text{mm}$. La figure 1 donne le profil de la surface. Avant et après les rainures, la surface est parfaitement plane ; c'est dans ces zones que la caractérisation des ondes de Lamb est effectuée. La plaque a une épaisseur de 5 mm. Les caractéristiques acoustiques de l'aluminium sont les vitesses longitudinale $c_L=6320\ \text{m.s}^{-1}$ et transversale $c_T=3115\ \text{m.s}^{-1}$. La masse volumique est de $2700\ \text{kg.m}^{-3}$.

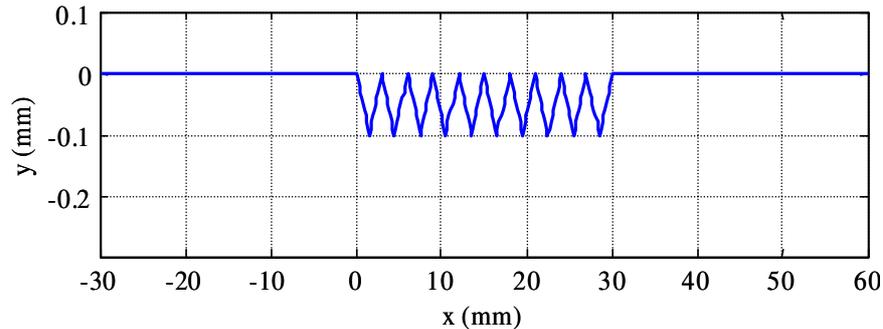


FIG. 1 – Profil de l'interface étudiée : 10 rainures triangulaires de périodicité spatiale $\Lambda_1=3\ \text{mm}$ et de profondeur $p=100\ \mu\text{m}$.

2.2 Etude numérique

L'étude numérique est réalisée avec le code éléments finis ATILA [4]. On suppose la plaque infinie dans une direction donc un maillage bidimensionnel est utilisé. L'étude est réalisée en régime transitoire. L'excitation de l'onde de Lamb est obtenue en envoyant un train de 5 sinusoïdes à 800 kHz dans l'épaisseur de la plaque. Le but est d'exciter le mode S_0 . A cette fréquence, la longueur d'onde du mode S_0 est $\lambda=3.75\ \text{mm}$. La plaque considérée est suffisamment longue avant et après le réseau afin d'éviter les réflexions parasites de bout de plaque. Cette étude transitoire est réalisée sur 60 périodes ($75\ \mu\text{s}$) avec un pas de $0.05\ \mu\text{s}$. Le calcul fournit les déplacements à chaque nœud et pour chaque pas de temps. Le réseau de stries est localisé entre les positions $x=0\ \text{mm}$ et $x=30\ \text{mm}$ (figure 1). On s'intéresse ici aux déplacements normaux des nœuds en surface en fonction du temps entre les positions $x=-30\ \text{mm}$ et $x=0\ \text{mm}$. Les ondes réfléchies peuvent être isolées des ondes incidentes en calculant une FFT temporelle et spatiale à partir de ces relevés temporels. On obtient ainsi une représentation des signaux dans le plan nombre d'onde/fréquence. Les valeurs positives du nombre d'onde correspondent à l'onde incidente (figure 2) alors que les valeurs négatives correspondent aux ondes réfléchies (figure 3). Les niveaux de couleur associés à ces deux images sont différents car l'amplitude de l'onde incidente est très supérieure à celles des ondes réfléchies. On vérifie bien sur la figure 2 que seul le mode S_0 est excité. La courbe de dispersion théorique est superposée au signal expérimental. La méthode d'excitation étant quasi-harmonique, la bande fréquentielle d'excitation est centrée autour de la fréquence 800 kHz. D'après la figure 2, le lobe principal d'excitation s'étend de 660 à 920 kHz. La largeur de la bande fréquentielle d'excitation n'est pas un problème car l'analyse des signaux est faite dans l'espace dual donc chaque composante fréquentielle est traitée indépendamment des autres.

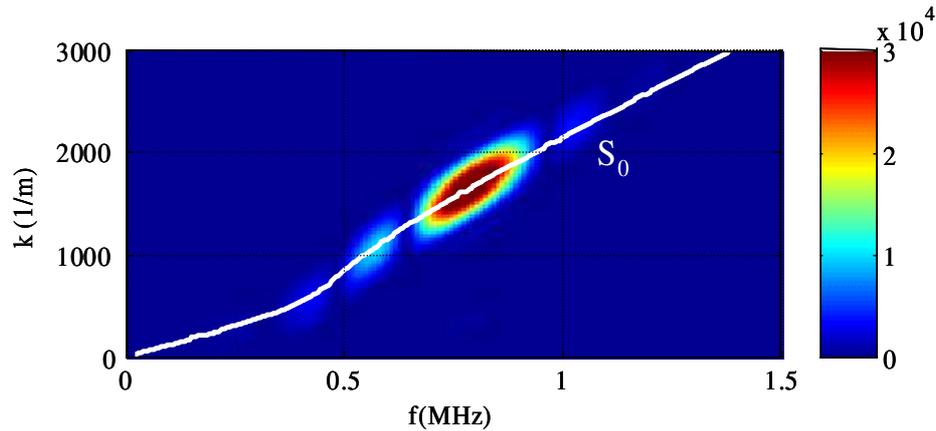


FIG. 2 – Représentation du signal incident dans l'espace dual (k, f) . La courbe de dispersion théorique du mode S_0 a été superposée.

La figure 3 montre qu'il existe un mode S_2 réfléchi à la fréquence 785 kHz. A cette fréquence, le nombre d'onde du mode incident vaut 1670 m^{-1} et le nombre d'onde du mode réfléchi 420 m^{-1} . $2\pi/\Lambda_1$ est une grandeur homogène à un vecteur d'onde et caractéristique du réseau dans l'espace dual. Pour $\Lambda_1=3 \text{ mm}$, $2\pi/\Lambda_1=2094 \text{ m}^{-1}$. On peut remarquer que si l'on additionne les valeurs des nombres d'onde incident et réfléchi ($k_{S_0}+k_{S_2}=2090 \text{ m}^{-1}$), on trouve une valeur proche de $2\pi/\Lambda_1$ (l'erreur relative est de 0.2 %). Nous allons voir dans le prochain paragraphe que cette égalité peut être interprétée comme une relation de phonon.

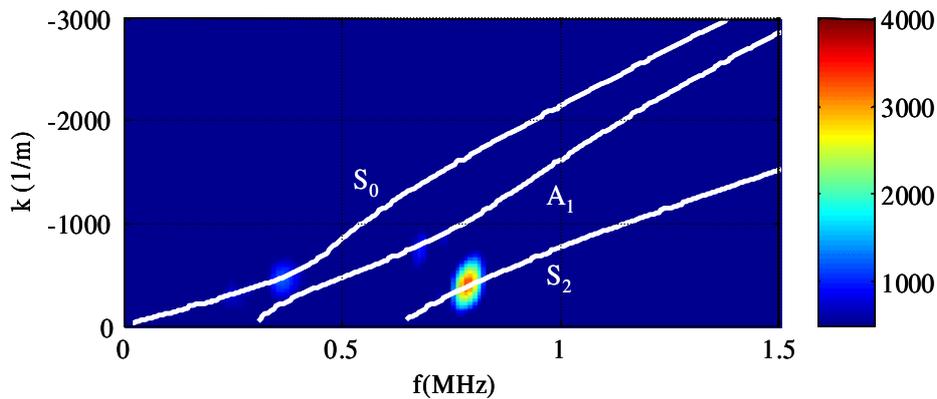


FIG. 3 – Représentation du signal réfléchi par le réseau dans l'espace dual (k, f) . Les courbes de dispersion théoriques des modes S_0 , A_1 et S_2 ont été superposées.

2.3 Interprétation : relation de phonon

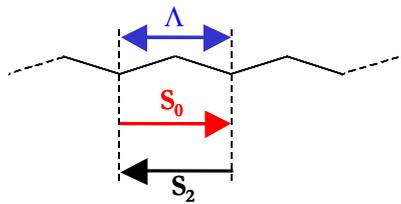
Une relation traduisant une collision entre phonons peut être écrite à l'entrée du réseau. Il y a conservation de la quantité de mouvement lors de la collision : la quantité de mouvement associée au phonon incident est égale à la somme des quantités de mouvement associées au phonon réfléchi et au phonon de réseau :

$$\vec{p}_{S_0} = \vec{p}_{res} + \vec{p}_{S_2} \quad (1)$$

Le phonon de réseau (indice *res*) se propage sous le réseau dans le même sens que l'onde incidente. Par contre, le mode réfléchi se propage en sens opposé. Cela implique une relation entre les nombres d'onde :

$$k_{S_0} = \frac{2\pi}{\Lambda_1} - k_{S_2} \quad (2)$$

Il est possible d'interpréter, dans l'espace réel, la relation (2). Entre deux stries successives, les ondes rétro réfléchies doivent être en phase :



$$k_{S_0} \Lambda + k_{S_2} \Lambda = 2\pi \quad (3)$$

On peut donc interpréter l'interaction entre les ondes de Lamb et le réseau comme une collision de phonons (équation 2) dans l'espace dual et dans l'espace direct, cette interaction est interprétée comme un phénomène d'interférences constructives (équation 3). Une étude similaire a été menée pour des réseaux de périodicité spatiale $\Lambda_2=3.6$ mm et $\Lambda_3=2.4$ mm. Pour ces deux réseaux, la relation (2) est vérifiée (tableau 1). Pour $\Lambda_2=3.6$ mm, on observe à nouveau une conversion en mode S_2 tandis que pour $\Lambda_3=2.4$ mm, le mode converti est le mode A_1 . Une étude expérimentale a été réalisée [5] et montre que les prévisions numériques sont vérifiées avec une erreur relative maximum de 2.5 %.

Λ (mm)	$2\pi/\Lambda$ (m^{-1})	k (S ₀) (m^{-1})	k (S ₂) (m^{-1})	k (A ₁) (m^{-1})	fréquence (kHz)	$k_{S_0}+k_{S_2}$ ou A ₁ (m^{-1})	erreur relative
2.4	2618	1620		1000	765	2620	0.1%
3	2094	1670	420		785	2090	0.2%
3.6	1745	1515	290		720	1805	3.4%

TAB. 1 – Comparaison entre la somme des nombres d'onde des modes incident et réfléchi et le nombre d'onde associé au phonon de réseau.

3 Cas d'un profil composé de deux périodicités spatiales

La plaque étudiée a des dimensions identiques à celle étudiée dans le paragraphe précédent. La surface traitée a un profil obtenu par addition de deux réseaux de stries triangulaires de périodicités $\Lambda_1=3$ mm et $\Lambda_2=3.6$ mm (figure 4). L'onde S_0 est à nouveau excitée à l'extrémité de la plaque et on observe les signaux réfléchis dans l'espace dual (figure 5). Deux conversions sont présentes et correspondent à l'onde S_2 aux fréquences $f_1=785$ kHz et $f_2=720$ kHz. La première conversion est liée au réseau de stries de périodicité 3 mm. La deuxième conversion est attribuée à une réflexion sur un réseau de 3.6 mm comme le montre le tableau 1.

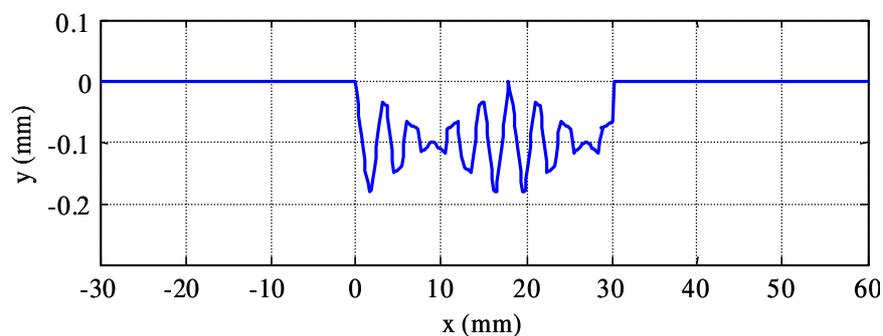


FIG. 4 – Profil obtenu par addition de deux réseaux de stries triangulaires de périodicités $\Lambda_1=3$ mm et $\Lambda_2=3.6$ mm.

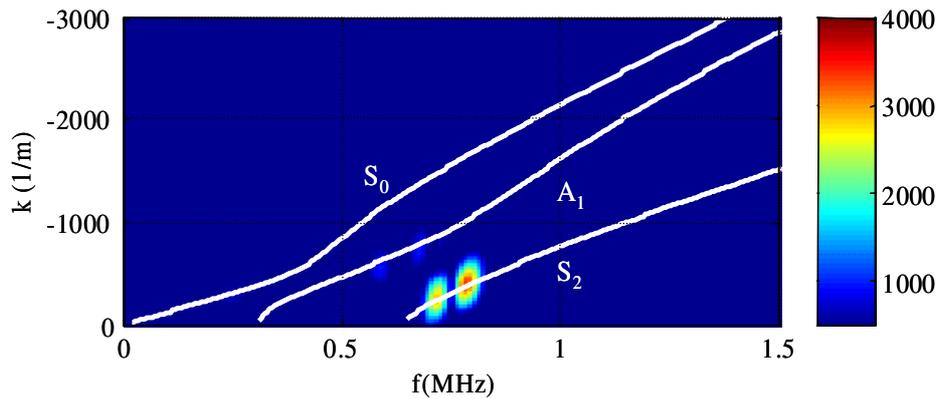


FIG. 5 – Représentation du signal réfléchi dans l'espace dual (k, f) . Les courbes de dispersion théoriques des modes S_0 , A_1 et S_2 ont été superposées.

A la fréquence f_1 , on souhaite comparer les amplitudes des ondes S_2 converties respectivement sur les réseaux à simple et double périodicités. Pour cela, on effectue à cette fréquence une coupe des images obtenues précédemment (figures 3 et 5). Le résultat est donné figure 6.

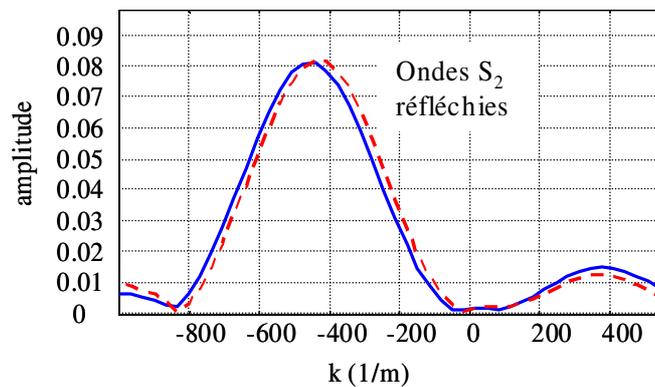


FIG. 6 – Coupe à la fréquence $f_1=785$ kHz des figures 3 et 5.

On constate que les amplitudes de ces conversions sont très proches (erreur relative inférieure à 1%). A une fréquence donnée, et donc à une longueur d'onde λ donnée, l'onde S_0 semble n'être sensible qu'à une seule périodicité spatiale Λ . Les conversions observées pour le profil de surface composé des deux périodicités spatiales Λ_1 et Λ_2 ont la même amplitude et la même fréquence que celles observées pour un réseau de périodicité Λ_1 et un autre de périodicité Λ_2 . On vérifie donc le principe de superposition dans l'espace dual.

4 Cas d'un profil composé de trois périodicités spatiales

Une étude identique à celle du paragraphe 3 est réalisée cette fois-ci sur une plaque dont l'interface traitée est obtenue par addition de trois réseaux de stries triangulaires de périodicités $\Lambda_1=3$ mm, $\Lambda_2=3.6$ mm et $\Lambda_3=2.4$ mm (figure 7). L'observation des signaux réfléchis dans l'espace dual (figure 8) montre trois conversions prépondérantes : deux conversions en mode S_2 aux fréquences $f_1=785$ kHz et $f_2=720$ kHz et une conversion en mode A_1 à la fréquence $f_3=765$ kHz. On retrouve donc bien les conversions associées respectivement au réseau de périodicité 3, 3.6 et 2.4 mm (tableau 1). L'amplitude des modes convertis S_2 est inférieure à celle observée pour le réseau simple. Cette différence s'explique par le fait que la zone striée est plus courte (24 mm) que dans le cas précédent. Une conversion en mode S_0 est aussi observée. Elle vérifie la relation de phonon.

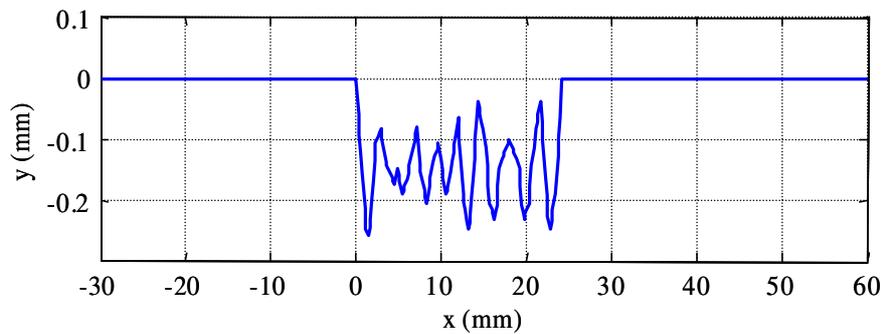


FIG. 7 – Profil obtenu par addition de trois réseaux de stries triangulaires de périodicités $\Lambda_1=3$ mm, $\Lambda_2=3.6$ mm et $\Lambda_3=2.4$ mm.

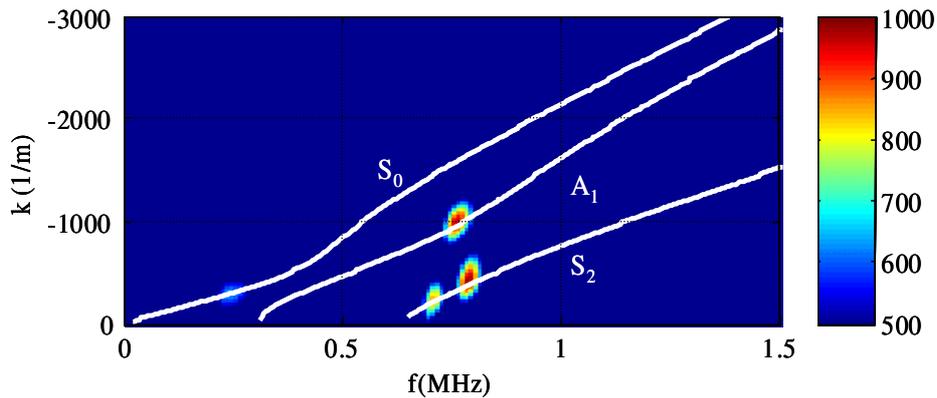


FIG. 8 – Représentation du signal réfléchi dans l'espace dual (k, f) . Les courbes de dispersion théoriques des modes S_0 , A_1 et S_2 ont été superposées.

5 Conclusion

On a montré qu'une onde de Lamb se propageant dans une plaque comportant une interface striée est convertie sous l'interface. Les ondes incidente et réfléchie-convertie vérifient une relation qui fait intervenir une grandeur liée à la géométrie de l'interface : la périodicité spatiale des stries. Une perspective de ce travail est d'étudier des interfaces rugueuses dont le profil est composé d'un grand nombre de périodicités spatiales.

Références

- [1] D.E. Chimenti and O.I. Lobkis, "The effect of rough surfaces on guided waves in plates", *Ultrasonics*, 36, 155-162 (1998).
- [2] W. Lauriks, L. Kelders and J. F. Allard, "surface waves above gratings having a triangular profile", *Ultrasonics*, 36, 865-871 (1998).
- [3] C. Potel, D. Leduc, B. Morvan, P. Pareige, C. Depollier and J-L. Izbicki, "Propagation of Lamb waves in anisotropic rough plates: a perturbation method", *Proceedings of the French Congress on Acoustic (CFA/DAGA '04)*, Strasbourg, France, 1, 147-148 (2004).
- [4] ATILA Finite Element Code for Piezoelectric and Magnetostrictive Transducer Modeling, Version 5.2.1, User's Manual, ISEN, Acoustics Laboratory, Lille, France (2002).
- [5] D. Leduc, A-C. Hladky, B. Morvan, J-L Izbicki and P. Pareige, "Propagation of Lamb waves in a plate with a periodic grating", *Anglo-French Physical Acoustics Conference (AFPAC '05)*, Le Havre, France (2005).