



Analyse temps-fréquence de la propagation des ondes de Lamb dans des plaques viscoélastiques

M. Seddiki et H. Djelouah

USTHB, USTHB, BP 32 El Alia, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie, 16000 Alger, Algérie
seddiki-m@live.com

Dans le présent travail, nous étudions la propagation des ondes de Lamb dans un guide d'onde viscoélastique en PMMA d'épaisseur $e = 2.03$ mm. La génération des ondes de Lamb est assurée par un transducteur piézoélectrique à ondes longitudinales monté sur un sabot en plexiglas à angle variable. Deux protocoles expérimentaux ont été utilisés pour détecter les ondes de Lamb. Le premier protocole consiste à détecter les ondes de Lamb générées à l'aide de transducteurs piézoélectriques placés dans différentes configurations. Le second protocole consiste à détecter l'onde de Lamb à l'aide d'un interféromètre laser. Pour l'identification des modes propagatifs, nous avons utilisé la Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée. Les résultats montrent que cette méthode est très efficace pour l'identification des modes de Lamb multiples.

1 Introduction

L'emploi des matériaux composites, le plus souvent viscoélastiques, est de plus en plus répandu dans les industries de pointe comme l'aéronautique, l'aérospatiale, l'industrie automobile ou encore l'industrie nucléaire. En effet, ces secteurs industriels remplacent de plus en plus souvent les structures métalliques et les montages rivetés par des matériaux composites et des assemblages collés dont le principal intérêt est une diminution de poids pour des performances mécaniques plus élevées. De plus, la nature non métallique de ces milieux et l'absence de rivets éliminent le risque de corrosion des structures ce qui est un enjeu économique très considérable. Cependant, ces matériaux subissent, au cours de leur durée de vie, des contraintes mécaniques ou thermiques qui les fragilisent et peuvent provoquer l'apparition de défauts. Des techniques fiables de CND doivent alors être mises en œuvre pour établir le diagnostic de ces composites et surveiller leur état à divers stades de leur utilisation. Parmi toutes les méthodes de CND par ultrasons, les ondes de Lamb [1-2] sont les plus couramment utilisées pour détecter les défauts dans les plaques constituées de ce type de matériaux. De par leurs propriétés, ces ondes permettent d'ausculter une structure sur de longues distances (quelques centimètres à quelques dizaines de mètres selon la nature du milieu) [3-10]. L'interprétation des résultats obtenus avec les ondes de Lamb nécessitent d'une part une compréhension du phénomène de dispersion résultant du mode de propagation guidée et le développement de méthodes de traitement de signal particulières.

Le principal objectif de ce travail est l'analyse de la propagation des ondes de Lamb dans des plaques viscoélastiques saines en utilisant une méthode de traitement de signal temps-fréquence (Pseudo-Distribution de Wigner Ville Lissée 'PDWVL').

2 Théorie des ondes de Lamb

Les ondes de Lamb sont des perturbations élastiques se propageant dans des plaques dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Ces ondes de plaque sont dispersives [1-2]. L'équation caractéristique de dispersion permettant de calculer le vecteur d'onde des modes propagatifs dans un milieu viscoélastique s'écrit [11] :

$$(\Gamma^{*2} - S^{*2}) \tan Q^* + 4 \Gamma^{*2} S^* Q^* \tan S^* = 0 \quad (1)$$

Dans cette expression, Γ et S et Q sont données par :

$$\Gamma^* = \gamma^* h, S^* = s^* h, Q^* = q^* h$$

où h est la demi épaisseur et γ, s, q sont des vecteurs d'onde complexes qui s'expriment sous la forme :

$$\gamma = k_1(\omega) e^1 - i \alpha_1(\omega) e^1, s = k_2(\omega) e^2 - i \alpha_2(\omega) e^2, \\ q = k_3(\omega) e^3 - i \alpha_3(\omega) e^3$$

où ω est la pulsation, e^m (avec $m = 1, 2, 3$) est un vecteur unité définissant la direction de propagation, $k_m(\omega)$ et $\alpha_m(\omega)$ sont respectivement le nombre d'onde réel et le facteur d'atténuation dans la direction de propagation considérée.

Dans notre cas, le guide d'ondes est une plaque en plexiglas (PMMA) d'épaisseur fixe $e = 2.03$ mm). Ce matériau est isotrope et faiblement viscoélastique. Sa faible viscoélasticité, nous autorise à minimiser, sans la négliger pour autant, l'atténuation des ondes de Lamb lors de leur propagation. Dans ces conditions, la matrice de rigidité se réduit à deux modules indépendants C_{11} et C_{12} . Ces modules sont complexes et ils sont résumés dans le tableau ci-dessous [12]:

Tableau 1: Propriétés de la plaque en Plexiglas.

Épaisseur e (10^{-3} m)	2.03±0.01
Densité ρ (kg/m^3)	1190±10
$C_{11} = C_{22} = C_{11}' + i C_{11}''$ (10^9 Pa)	8.5 + i 0.2
$C_{12} = C_{12}' + i C_{12}''$ (10^9 Pa)	4.3 + i 0.1
$C_{66} = (C_{11} - C_{12}) / 2 = C_{66}' + i C_{66}''$ (10^9 Pa)	2.1 + i 0.05

La résolution numérique de l'équation caractéristique Eq. (1) par la méthode de Newton-Raphson permet de déterminer les nombres d'ondes des modes symétriques et antisymétriques des ondes de Lamb. La Figure 1 illustre les différentes formes des courbes de dispersion obtenues pour une plaque en Plexiglas.

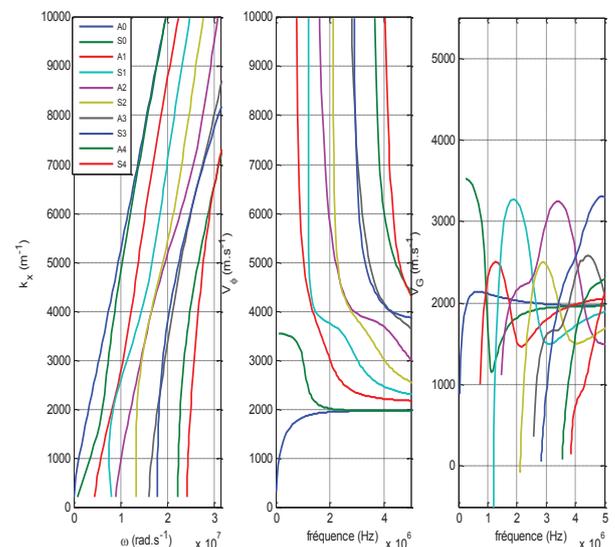


Figure 1: Différentes formes des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la plaque en PMMA.

3 Technique de traitement du signal (PDWVL)

La distribution de Wigner-Ville (DWV) est une technique d'analyse temps-fréquence qui interprète un signal donné dans le plan temps-fréquence de manière synchrone. Cette technique permet d'examiner la variation du contenu fréquentiel en fonction du temps. Le résultat de cette distribution fournit la densité d'énergie des différentes composantes fréquentielles du signal à des instants donnés. En raison de l'existence des termes d'interférence non nuls dans la DWV, nuisibles à l'interprétation des résultats, elle peut être remplacée par la Pseudo distribution de Wigner-Ville Lissée (PDWVL), dans laquelle des fonctions de pondération sont convoluées avec la DWV pour restreindre et diminuer l'effet des termes d'interférence [13]. La PDWVL d'un signal temporel $x(t)$ est donnée par [14]:

$$I(t, f) = \iint h(\tau) g(\zeta - t) x(\zeta + \tau/2) x^*(\zeta - \tau/2) e^{-i2\pi f\tau} d\zeta d\tau \quad (2)$$

où x^* est le complexe conjugué de x , h et g sont respectivement les fenêtres de lissage temporelle et fréquentielle.

Le résultat de la PDWVL peut être représenté dans le plan temps-fréquence en utilisant un code de couleurs en fonction de l'intensité $I(t, f)$. Les différents modes de Lamb possédant différentes distributions d'énergie peuvent être identifiés en comparant les résultats expérimentaux avec les solutions analytiques déjà établies sous forme de courbes de lenteurs.

Ces courbes de lenteurs sont obtenues en translatant la coordonnée transversale des courbes de dispersion des vitesses de groupe $V_G(f)$ (Figure 1) en utilisant la formule suivante :

$$t_g = \Delta t + L/V_G \quad (3)$$

où V_G et t_g représentent la vitesse et le temps de groupe des ondes de Lamb respectivement, L est la longueur du parcours de l'onde dans la plaque tandis que Δt représente le retard temporel du système incluant le retard dans les sabots en plexiglas.

4 Dispositifs expérimentaux

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour générer et recevoir les ondes de Lamb est composé de trois modules : un module d'émission constitué d'un générateur d'impulsion (SOFRANEL Pulser/Receiver Model 5072PR délivrant une impulsion de durée de l'ordre de dix nanosecondes et d'amplitude maximale de -360V) et un transducteur piézoélectrique à ondes longitudinales de marque PANAMETRICS monté sur un sabot en plexiglas à angle variable θ . La fréquence centrale du transducteur utilisé est de 1 MHz et sa bande passante est comprise entre 0.5 MHz et 1.5 MHz. Le second module est le guide d'onde qui est une plaque en PMMA d'épaisseur $e=2.03\text{mm}$. Le troisième module est le module de réception constitué du couple transducteur de contact-sabot en plexiglas à angle variable, identique à celui que nous avons utilisé en émission. Un gel couplant (Aquasonic) est appliqué sur les surfaces de contact pour la bonne transmission de l'énergie acoustique.

L'utilisation des sabots à angle variable permet une génération sélective ou préférentielle d'un seul mode de Lamb sous incidence oblique. L'angle d'incidence θ requis pour l'excitation du mode désiré est calculé à partir de :

$$\theta(\text{Mode}) = \text{Arcsin}(V_p(\text{plexiglas})/V_p(\text{mode})) \quad (4)$$

où V_p (plexiglas) est la vitesse longitudinale dans le sabot en plexiglas et V_p (mode) est la vitesse de phase de l'onde de Lamb que l'on souhaite exciter. La valeur de la vitesse des modes est identifiée à partir des courbes de dispersion à la fréquence de travail de 1 MHz.

Le second dispositif employé pour la détection des ondes de Lamb générées utilise une sonde laser Polytec OFV 505 pour mesurer le déplacement normal des ondes de Lamb générées sur la surface de la plaque testée.

Le signal mesuré par le couple transducteur-sabot ou par le vibromètre laser est échantillonné par un oscilloscope numérique puis transféré vers un microordinateur via un bus IEEE. Les données ainsi stockées sont traitées par la technique de traitement de signal temps-fréquence adoptée (PDWVL).

5 Résultats et discussions

Pour identifier les modes propagatifs, nous avons appliqué la Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée sur les données expérimentales obtenues pour le guide d'onde étudié (plaque en Plexiglas). Différentes configurations ont été utilisées pour générer et recevoir les ondes de Lamb. Nous présentons d'abord les résultats correspondant à la génération-réception par contact au moyen d'un couple transducteur-sabot puis ceux correspondant à la détection sans contact par le biais d'un vibromètre laser.

5.1 Mesures par contact

Les mesures par contact ont été menées sous incidence oblique en utilisant deux transducteurs de contact montés sur des sabots en plexiglas à angle variable (fréquence centrale $f = 1\text{MHz}$, l'angle de réception $\theta_{\text{réception}} = \text{l'angle d'émission}$ $\theta_{\text{émission}} = 45^\circ$). Des signaux ont été enregistrés pour différentes distances entre le transducteur émetteur et le transducteur récepteur (une dizaine de mesures ont été effectuées avec un pas $\Delta x = 1 \pm 0.1\text{cm}$). Les signaux ainsi stockés ont été traités par la Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée. Le résultat de l'application de cette technique d'analyse sur les données expérimentales est représenté sous forme d'images temps-fréquence utilisant un code de couleurs en fonction de l'intensité $I(t, f)$ de la PDWVL. La couleur rouge correspond à l'intensité maximale et la couleur bleue correspond à une intensité nulle. Les différents modes de Lamb possèdent différentes distributions d'énergie, donc ils peuvent être distingués sur le plan temps-fréquence. La PDWVL du signal acquis à une distance entre le transducteur émetteur et le transducteur récepteur de $x = 3 \pm 0.1\text{cm}$ est illustrée sur la Figure 2. Dans ce cas, on note l'apparition d'une seule tache sur le plan temps-fréquence, ce qui s'interprète par l'existence d'un seul mode de Lamb se propageant dans le guide d'onde étudié. Pour l'identification de ce mode, nous avons utilisé deux méthodes d'interprétation des images temps-fréquence. La première méthode consiste à rechercher les temps correspondant aux maxima d'intensité pour différentes distances et ceux à une fréquence donnée. À partir de ces temps et distances de

propagation, nous avons calculé la vitesse de groupe du mode généré et ensuite nous l'avons comparée aux courbes de dispersion des vitesses de groupe précédemment obtenues (Figure 1); le mode de Lamb se propageant dans la plaque en plexiglas est ainsi identifié. Pour la deuxième méthode d'interprétation, les courbes de lenteurs donnant l'évolution du temps de groupe t_g en fonction de la fréquence, obtenues en utilisant l'Eq. (3), sont superposées aux images temps-fréquence. Si une tache temps-fréquence coïncide avec une courbe de lenteur donnée, le mode de Lamb existant est donc reconnu.

Sur la Figure 3-(a) est représenté le résultat de la première méthode d'interprétation. Les vitesses de groupe calculées expérimentalement sont représentées par le symbole "+" de couleur rouge. Ces derniers coïncident avec une très bonne précision avec la courbe de dispersion de la vitesse de groupe du mode S2 ; ce qui signifie que c'est ce mode qui a été généré préférentiellement sous incidence oblique dans la plaque en PMMA étudiée.

Le résultat de la deuxième méthode d'interprétation est illustré sur la Figure 3-(b) ; celui-ci montre l'existence d'une seule tache sur le plan temps-fréquence et celle-ci coïncide avec la courbe de lenteur du mode S2 ; c'est donc ce dernier qui a été généré. Pour cette figure, l'onde ultrasonore a parcouru une distance de 8.7cm incluant le retard dans les sabots en plexiglas utilisés pour la génération et la réception des ondes ainsi que le retard lié au système d'acquisition.

Une bonne concordance entre les résultats des deux méthodes d'interprétation est constatée.

5.2 Mesures sans contact

Sur les Figures 4-(a) et (b) sont représentés les résultats de la PDWVL obtenus pour les données expérimentales correspondant à une génération par contact sous incidence normale et oblique respectivement et une détection sans contact par un vibromètre laser.

Dans le cas où le transducteur est posé directement sur la plaque testée (incidence normale (Figure 4-(a))), on note l'existence de plusieurs taches sur le plan temps-fréquence, ce qui correspond à une génération multiple de modes qui sont indiscernables dans le domaine temporel mais ils sont observables avec une bonne résolution sur le plan temps-fréquence. L'interprétation de la série de mesures sans contact, effectuée en traduisant la sonde laser sur l'axe de propagation avec un pas $\Delta x = 1 \pm 0.1$ cm, par la méthode de

recherche de maxima (Figure 5-(a)) et celle des courbes de lenteurs (Figure 5-(b)) nous a permis d'identifier les modes générés sous incidence normale dans la plaque en PMMA. Sur la Figure 4-(a) le mode prépondérant d'énergie la plus élevée (couleur rouge foncé) correspond au mode S2. D'autres taches plus claires (jaunes et vertes) correspondent aux modes S0 et A0. Les vitesses de groupe expérimentales du mode S2 sont représentées sur la Figure 5-(a) par le symbole "+" de couleur rouge, celles correspondant au mode S0 sont montrées par le symbole "+" de couleur bleue, tandis que celles qui correspondent au mode A0 sont illustrées par le même symbole de couleur noire. Les fréquences auxquelles ces modes apparaissent sur le plan temps-fréquence sont comprises dans la bande passante du transducteur utilisé.

Dans le cas où les ondes de Lamb sont générées sous incidence oblique ($f=1$ MHz, $\theta=45^\circ$) (Figure 5-(b)), le mode généré est le mode S2 (Figures 6-(a) et (b)). Ce résultat est compatible avec les mesures faites avec contact sous incidence oblique (Figure 2).

5 Conclusion

La propagation des ondes de Lamb dans un guide d'ondes viscoélastique en PMMA et l'identification des modes de Lamb ont été étudiées à l'aide d'une méthode de traitement du signal temps-fréquence. Deux procédés distincts ont été proposés pour l'interprétation des images temps fréquence obtenues par la PDWVL. Le premier revient à identifier les modes propagatifs en calculant leur vitesse de groupe expérimentalement tandis que le second consiste à superposer les courbes de lenteurs sur les taches qui apparaissent dans le plan temps-fréquence. Les résultats montrent que la PDWVL permet d'identifier les différents modes en les séparant dans le plan temps-fréquence à partir de très peu de mesures contrairement aux autres techniques de traitement du signal qui nécessitent un échantillonnage spatial pour réaliser une représentation dans le plan vecteurs d'ondes-pulsations. Ces qualités donnent à cette méthode d'analyse un potentiel certain pour l'identification des différents modes coexistants dans une plaque et résultant d'une éventuelle conversion de mode en présence d'un défaut dans le milieu de propagation.

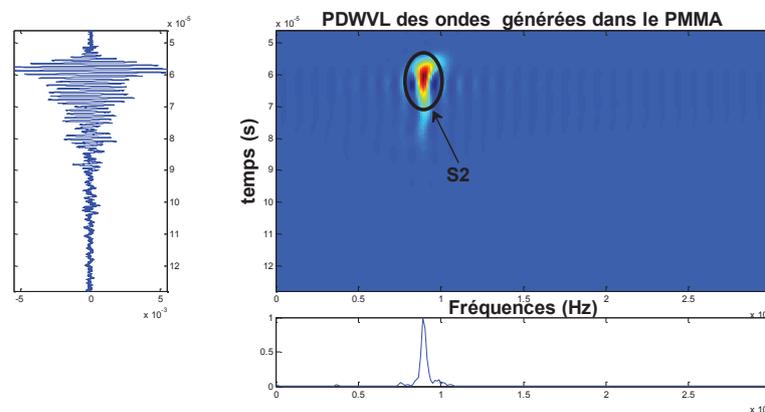


Figure 2 : Représentation temps fréquence PDWVL des données expérimentales correspondant à deux transducteurs par contact montés sur des sabots à angle variable ($f = 1$ MHz, angle de réception $\theta_{\text{réception}} = \text{angle d'émission } \theta_{\text{émission}} = 45^\circ$).

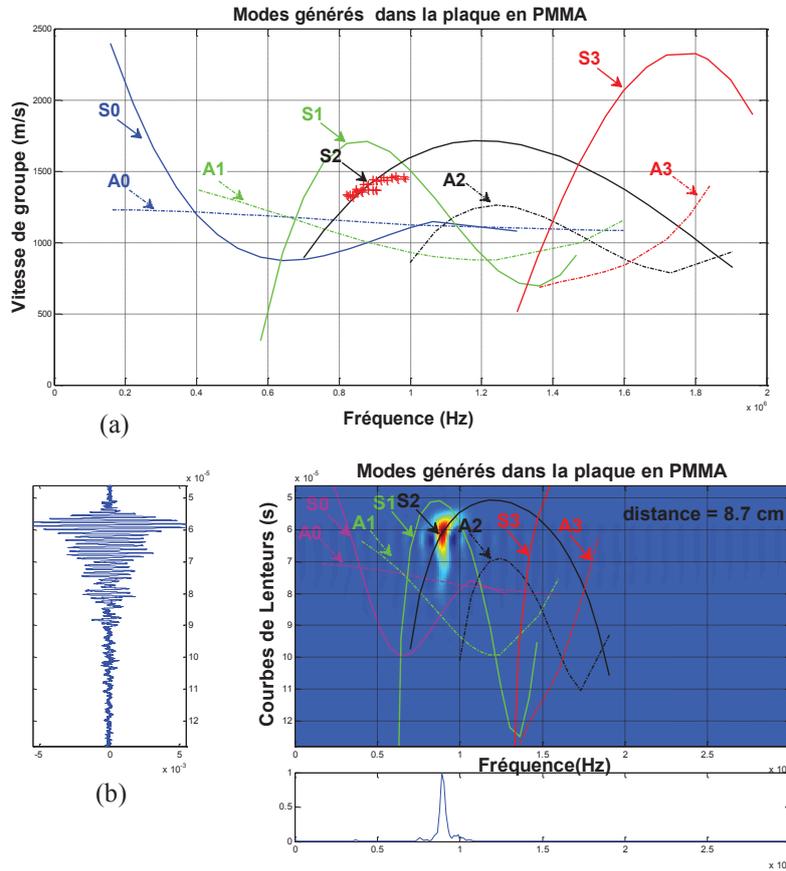


Figure 3 : Identification des modes de Lamb obtenus pour deux transducteurs émetteur-récepteur de contact ($f=1\text{MHz}$, $\theta=45^\circ$) : (a) par la méthode de recherche de maxima, (b) par la méthode des courbes de lenteurs.

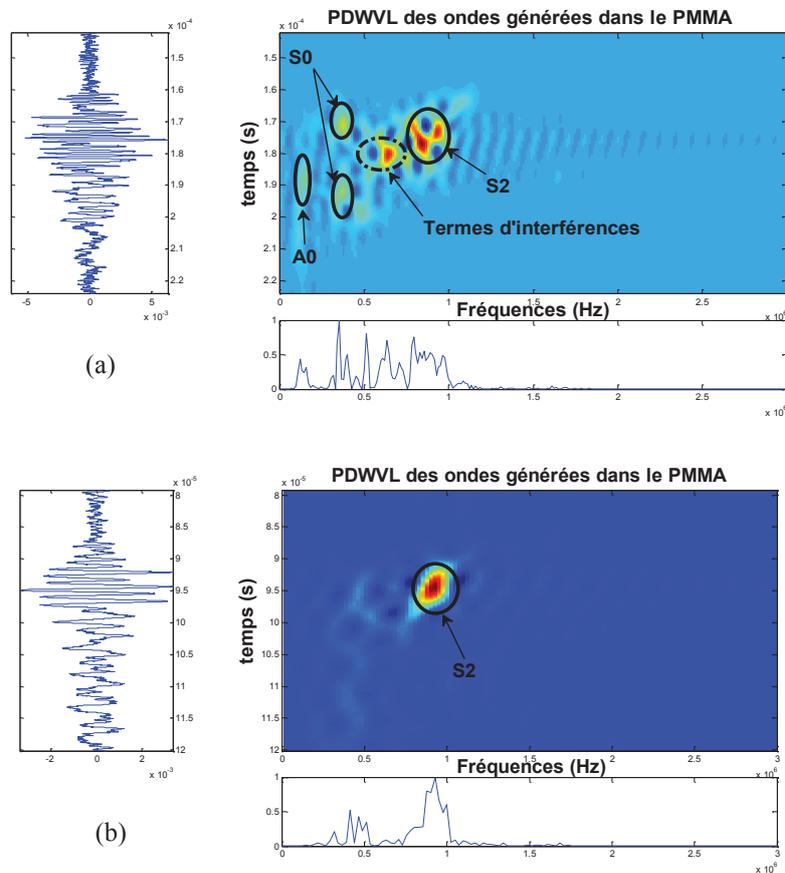


Figure 4 : Représentation temps-fréquence des ondes de Lamb générées dans la plaque en PMMA : (a) sous incidence normale ($f=1\text{MHz}$, réception laser), (b) sous incidence oblique ($f=1\text{MHz}$, réception laser).

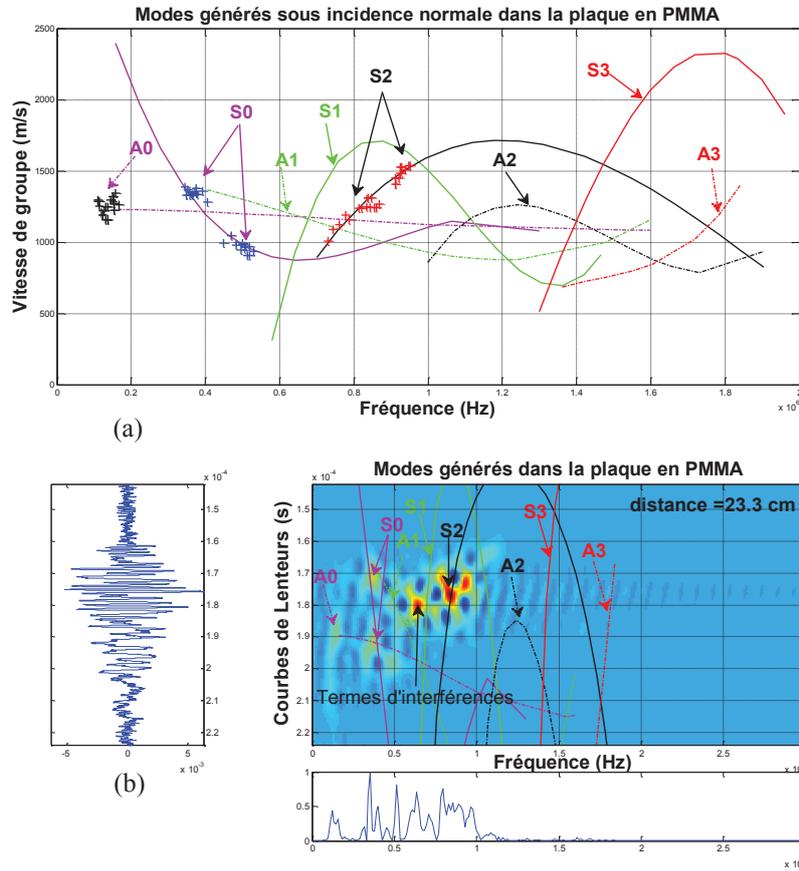


Figure 5 : Identification des modes de Lamb générés par un transducteur par contact ($f=1\text{MHz}$, $\theta=0^\circ$) et détectés sans contact par le vibromètre laser : (a) par la méthode de recherche de maxima, (b) par la méthode des courbes de lenteurs.

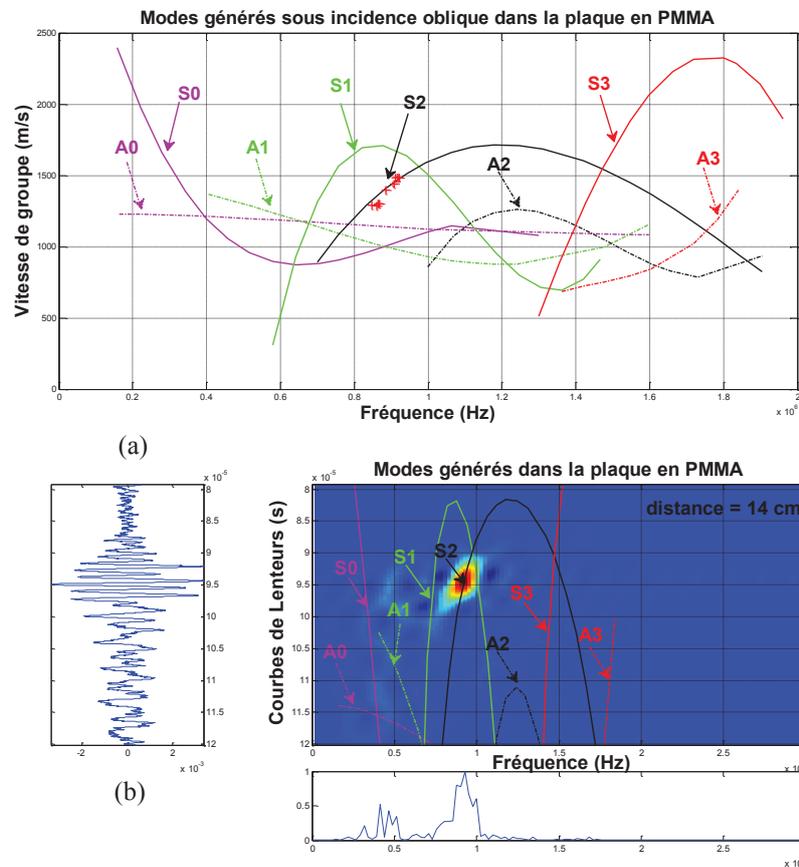


Figure 6 : Identification des modes de Lamb générés par un transducteur de contact ($f=1\text{MHz}$, $\theta=45^\circ$) et détectés sans contact par le vibromètre laser : (a) par la méthode de recherche de maxima, (b) par la méthode des courbes de lenteurs.

Références

- characterising anisotropic, viscoelastic materials, *Ultrasonics* 38, 781-786 (2000).
- [1] H. Lamb, On waves in an elastic plate, *Proc. Roy. Soc. of London A* 93, 114-128 (1917).
- [2] I.A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb waves*, Plenum Press, New York (1967).
- [3] D.E. Chimenti, Guided waves in plates and their use in materials characterization, *J. Am. Soc. Mech. Eng.* 50 (5), 247-284 (1997).
- [4] D. Alleyne, P. Cawley, The interaction of Lamb waves with defects, *IEEE Trans. Ultras. Ferro. & Freq. Contr.*, 39 (3), 381-397 (1992).
- [5] J.L. Rose, *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press (1999).
- [6] D. Alleyne et P. Cawley, Optimization of Lamb wave inspection techniques, *NDT&E International* 25 (1) (1992).
- [7] K. Maslov et T. Kundu, Selection of Lamb modes for detecting internal defects in composite laminates, *Ultrasonics* 35 (1997).
- [8] T. Ghosh, T. Kundu, et P. Karpur, Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates, *Ultrasonics* 36 (1998).
- [9] W. Yang et T. Kundu, Guided waves in multilayered anisotropic plates and their use in internal defect detection, *ASCE J. of Eng. Mechanics* 124 (1998).
- [10] M. Castaings et B. Hosten, Air-coupled measurement of plane wave : ultrasonic plate transmission for
- [11] K. Tanaka et A. Kon-no, Harmonic Waves in a Linear Viscoelastic Plate, *Bulletin of the JSME* 23(176) (1980).
- [12] M. Castaings, *Contrôle et évaluation non destructifs de matériaux par ondes ultrasonores guidées*, Habilitation à diriger des recherches, Université Bordeaux, France (2002).
- [13] P. Flandrin et B. Escudé, Principe et mise en œuvre de l'analyse temps-fréquence par transformation de Wigner-Ville Traitement du signal, *Traitement du Signal* 2(2) (1985).
- [14] F. Auger, P. Flandrin, O. Lemoine, P. Gonçalvès, *Time-Frequency Toolbox for MATLAB*, CNRS (France) and Rice University, USA (1998).