UTILISATION DES ONDES DE LAMB POUR DETECTER DES DEFAUTS DANS DES MATERIAUX COMPOSITES

C. Potel [1,2], S. Baly [1], J.F. de Belleval [1], O. Pétillon [3], J.L. Arnaud [3]

[1] Univ. Tech. Compiègne, LG2mS, UPRES ass. CNRS, COMPIEGNE, France
[2] Univ. Picardie Jules Verne, IUT d'Amiens, Dépt. OGP SOISSONS, France
[3] Aérospatiale, Centre Commun de Recherches L. Blériot, SURESNES, France

RE PRINT
Congrès COFREND sur les essais non destructifs, 22-26 septembre 1997
tome 1, p. 363-367

UTILISATION DES ONDES DE LAMB POUR DETECTER DES DEFAUTS DANS DES MATERIAUX COMPOSITES

C. Potel [1,2], S. Baly [1], J.F. de Belleval [1], O. Pétillon [3], J.L. Arnaud [3]
[1] Univ. Tech. Compiègne, LG2mS, UPRES ass. CNRS, COMPIEGNE, France
[2] Univ. Picardie Jules Verne, IUT d'Amiens, Dépt. OGP SOISSONS, France
[3] Aérospatiale, Centre Commun de Recherches L. Blériot, SURESNES, France

RESUME

Le but de ce papier est de présenter une méthode expérimentale de détection de défauts dans des plaques composites en utilisant la propagation des ondes de Lamb. Une fois les courbes de dispersion des ondes de Lamb tracées à partir d'un modèle de propagation dans des multicouches anisotropes, les angles d'incidence permettant, à une fréquence donnée de générer une onde de Lamb dans le matériau sont alors déterminés. La configuration de contrôle en échographie peut alors être optimisée. Des résultats expérimentaux sont présentés.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present an experimental method in order to detect defects in composite plates, by using the propagation of Lamb waves. Firstly, the dispersion curves of Lamb waves are drawn from a model of ultrasonic propagation in anisotropic multilayered media. The incident angles corresponding to a given frequency, for which a Lamb wave can propagate in the material are then determined. The echographic experimental evaluation set-up can thus be optimised. Experimental results are presented.

1. INTRODUCTION

Un grand nombre d'éléments utilisés dans l'industrie aéronautique sont des structures minces de grande surface que l'on cherche de plus en plus à contrôler dans leur totalité, les composites étant de plus en plus utilisés dans ce type de structure. Ceci est souvent fait par ultrasons en incidence normale et nécessite un temps trop important. L'utilisation des ondes de Lamb permettrait de contrôler par un balayage dans une seule direction, une bande complète de la structure et donc de diminuer de façon conséquente le temps de contrôle. En effet, les ondes de Lamb présentent certains avantages par rapport aux autres types d'ondes élastiques comme les ondes de volume et les ondes de surface :
- les ondes de Lamb sont naturellement guidées par une plaque et présentent donc une atténuation relativement faible au cours de leur propagation.

- on peut choisir des modes pour lesquels il n'y a pas de zone morte dans l'épaisseur de la tôle.
- la présence d'un défaut modifiant la propagation de ces ondes de plaque, un déplacement sur une ligne permet de contrôler toute une surface.

Une des manières les plus pratiques de générer ces ondes consiste à utiliser un transducteur sous incidence oblique dans un fluide, classiquement de l'eau (immersion totale ou partielle), mais des tentatives sont faites pour s'affranchir de l'eau et travailler directement dans l'air. Ceci présente d'énormes avantages d'utilisation mais deux principaux inconvénients, le premier est un rapport signal/bruit qui chute dramatiquement du fait de l'inadaptation des impédances, et le second la nécessité d'une meilleure précision angulaire à cause de la faible vitesse de propagation de l'onde dans l'air. Dans une première approche, nous avons cherché à déterminer la faisabilité de cette technique de contrôle ainsi que les performances à attendre et la précision nécessaire, en nous intéressant à des matériaux de plus en plus employés dans l'industrie aéronautique tels les composites stratifiés (composites carbone/époxyde ou multicouches métalliques/composites).

2. COURBES DE DISPERSION DES VITESSES DES ONDES DE LAMB

2.1. MODELE DE PROPAGATION DES ULTRASONS DANS DES MULTICOUCHES ANISOTROPES

Soit un multicouche anisotrope constitué de l'assemblage de Q couches anisotropes et d'épaisseur quelconque. La reproduction P fois de cette cellule de base, que l'on peut appeler "supercouche", constitue un multicouche périodique. Un modèle de propagation des ondes ultrasonores dans ce type de matériau, lorsque les caractéristiques de l'onde incidente (angle d'incidence, fréquence) et des milieux constituant le multicouche (constantes élastiques, masse volumique) sont connues, a été développé depuis plusieurs années au Laboratoire. Ce modèle a abouti à un logiciel opérationnel qui permet d'obtenir les coefficients de réflexion et de transmission dans les milieux entourant le multicouche, ainsi que les caractéristiques des ondes se propageant dans chaque couche du multicouche (1,2).

2.2. APPLICATION AUX ONDES DE LAMB

Le tracé des courbes de dispersion des ondes de Lamb permet de déterminer les angles d'incidence pour lesquels une onde de Lamb se propage. Dans le cas d'une plaque entourée de vide (ondes de Lamb pures), l'écriture des conditions aux limites (annulation des contraintes) conduit à l'annulation d'un déterminant (4x4) dans le cas d'une plaque isotrope et (6x6) dans le cas d'une plaque anisotrope. Ce déterminant étant fonction de la projection k_1 du vecteur nombre d'onde sur l'interface, les solutions en k_1 de cette équation correspondent à la propagation d'une onde de Lamb de vitesse :

$$V_L = \frac{\omega}{k_1} \tag{1}$$

où ω est la pulsation de l'onde.

Une autre méthode consiste à chercher les minima du module du coefficient de réflexion pour cette même plaque, mais cette fois plongée dans un fluide. Ces minima correspondent alors aux ondes de Lamb généralisées. Le modèle développé permet donc, par un balayage angulaire et fréquentiel, de déterminer les couples (angle d'incidence, fréquence) pour lesquels une onde de Lamb se propage (3), en respectant toutefois la condition :

$$\frac{\rho_{\text{fluide}}}{\rho_{\text{solide}}} << 1 \qquad (2)$$

La figure 1 donne un exemple de courbes de dispersion des ondes de Lamb généralisées pour une plaque en carbone/époxyle 0°/45°/90°135° comportant huit plis en symétrie miroir. De ces courbes on déduit, en fonction du couplant utilisé, les angles d'incidence permettant, à une fréquence donnée, de générer une onde de Lamb dans le matériau.

3. DETECTION EXPERIMENTALE DE DEFAUTS

3.1. CONFIGURATION EXPERIMENTALE

Des expériences ont été menées sur quatre plaques en carbone/époxyde ayant une symétrie miroir et comportant huit plis :
- deux plaques sans défaut, de séquences 0°/90° et 0°/45°/90°/135°.
- deux plaques comportant un défaut en Téflon de dimensions $8 \times 25\ \text{mm}^2$, situé entre le troisième et le quatrième pli, de séquences 0°/90° et 0°/45°/90°/135°.

Deux montages, correspondant chacun à deux approches différentes ont été utilisés.

3.2. EXPERIENCES EN TRANSMISSION

3.2.1. Dispositif expérimental

Une méthode classique de génération expérimentale des ondes de Lamb généralisées consiste à placer deux transducteurs de même fréquence nominale du même côté de la plaque (4), inclinés de l'angle correspondant à la propagation d'une onde de Lamb pour la fréquence du transducteur. La méthode tout à fait équivalente, choisie ici pour des facilités de montage, est de placer les deux transducteurs de chaque côté de la plaque (5). Cela permet, comme le montre la figure 2, de n'avoir plus que l'inclinaison de la plaque à régler, une fois le réglage des deux transducteurs effectué.

3.2.2. Détection du défaut de Téflon

Le problème est le suivant : sachant que la présence d'un défaut modifie la propagation des ondes de Lamb, quel mode permettra de détecter ce défaut ?

Si un mode de Lamb se propage dans une plaque saine, la présence du défaut va provoquer une première conversion de mode. Une deuxième conversion de mode se produira à la sortie du défaut et une forte atténuation du mode incident sera alors constatée. La démarche employée ici a consisté à analyser les courbes de dispersion de la plaque saine et des plaques au-dessus (trois plis) et en-dessous du défaut (cinq plis), et à choisir le mode de Lamb adéquat.

On observe ainsi sur la figure 3 deux signaux correspondant à une plaque 0°/45°/90°/135° avec et sans défaut. Une diminution d'amplitude du signal correspond à la présence du défaut.

3.3. EXPERIENCES EN ECHOGRAPHIE

Un autre dispositif expérimental consiste à placer le transducteur émetteur et le transducteur récepteur sur un même plan (6), comme le montre la figure 4. Lorsque les deux transducteurs sont inclinés d'un angle correspondant à un mode de Lamb, seul un signal correspondant à un défaut sera reçu par le transducteur récepteur.

La figure 5 présente un signal caractéristique obtenu dans une configuration de ce type pour une plaque 0°/90° comportant un défaut, à une fréquence de 1 MHz et une incidence de 10°.

- L'écho ① correspond à la réflexion spéculaire de l'onde à la surface de la plaque, lié au fait que le transducteur a un faisceau d'une certaine étendue angulaire.
- L'écho ② correspond à un rayonnement de l'onde de Lamb vers la gauche.
- L'écho ③ correspond à l'écho du défaut. L'enveloppe du signal est maximale lorsque les deux transducteurs visent directement le défaut.
- L'extrémité de la plaque pouvant être assimilée à un défaut géométrique, l'écho ④ lui correspond. Suivant le mode utilisé, cet écho n'est pas toujours observé en même temps que l'écho de défaut ③.

De la même manière que pour un contrôle en incidence normale, il est possible, par un balayage dans une seule direction, d'obtenir une cartographie de la plaque en onde de Lamb, comme le montre la figure 6. La première ligne verticale correspond aux échos ① et ②, toujours présents, qu'il y ait ou non un défaut et dont l'amplitude est supérieure à celle de l'écho de défaut. La partie plus claire correspond au défaut.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un modèle de propagation des ondes ultrasonores dans les multicouches anisotropes, développé au Laboratoire, permet de tracer les courbes de dispersion des ondes de Lamb généralisées se propageant dans la structure à contrôler. De ces courbes on déduit, en fonction du milieu de couplage utilisé, les angles d'incidence permettant, à une fréquence donnée, de générer une onde de Lamb dans le matériau. En effet, ces angles ne peuvent pas, pour ce type de matériau, être déterminés simplement comme dans le cas de plaques en matériau isotrope. La configuration de contrôle peut ainsi être optimisée. Des essais ont de plus été réalisés dans l'eau. Ils ont validé notre approche et permis de déterminer un premier ordre de grandeur des performances de la méthode et des précisions nécessaires. L'étape suivante consistera à s'affranchir de l'eau et à travailler directement dans l'air.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Potel C., de Belleval J.F., J. Acoust. Soc. Am., **93**, 5, p 2669-2677, (1993)
(2) Potel C., de Belleval J.F., J. App. Phys., **74**, 4, p 2208-2215, (1993)
(3) Potel C., de Belleval J.F., Acustica - acta acustica, **82**, 5, p 738-748, (1996)
(4) Nayfeh A.H., Chimenti D.E., J. Acoust. Soc. Am., **83**, 5, p 1736-1743, (1988)
(5) Dayal V., Kinra V.K., J. Acoust. Soc. Am., **85**, 6, p 2268-2276, (1989)
(6) Farlow R., Hayward G., Insight, **36**, 12, p 926-935, (1994)

Utilisation des ondes de Lamb pour détecter des défauts dans des matériaux composites

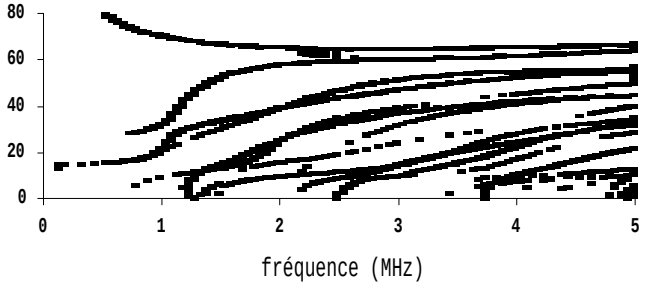

figure 1 : courbes de dispersion des modes de Lamb pour une plaque composite [0°/45°/90°/135°] en carbone/époxyde, comportant 8 plis en symétrie miroir

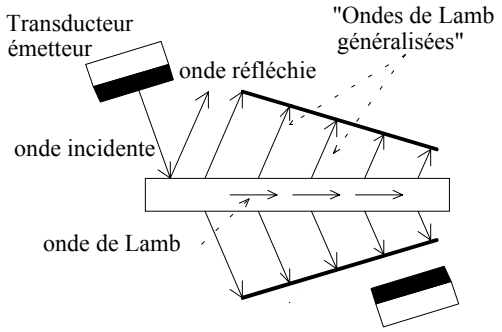

figure 2 : montage en transmission

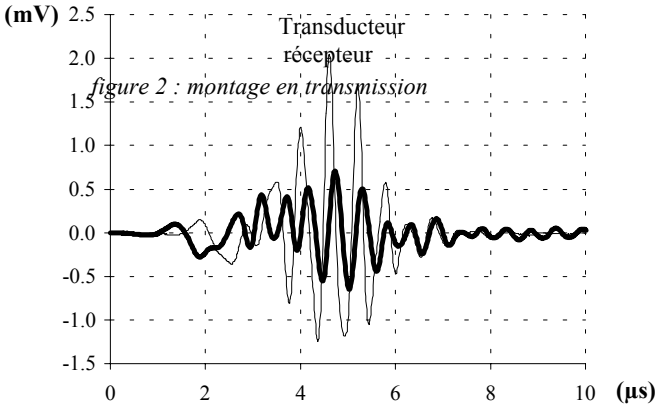

figure 3 : Détection d'un défaut par un montage en transmission pour une plaque [0°/45°/90°/135°] en carbone/époxyde, comportant 8 plis en symétrie miroir.
Incidence de 10,3°, fréquence de 2 MHz.
trait fin : plaque saine ; trait fort : plaque avec défaut

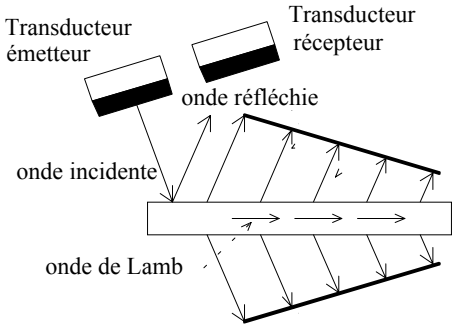

figure 4 : montage en échographie

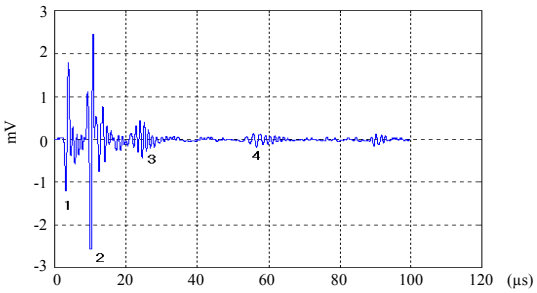

figure 5 : Détection d'un défaut par un montage en échographie pour une plaque [0°/45°/90°/135°] en carbone/époxyde comportant 8 plis en symétrie miroir. Signal caractéristique obtenu à la fréquence de 1 MHz et pour un angle d'incidence égal à 4°.

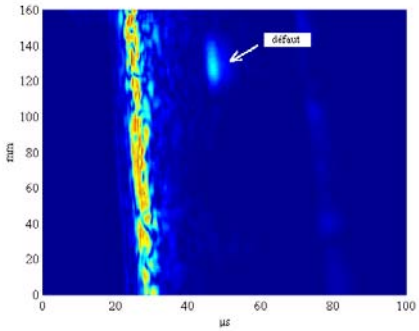

figure 6 : Cartographie en ondes de Lamb pour une plaque [0°/90°] en carbone/époxyde comportant 8 plis en symétrie miroir