



**HAL**  
open science

**Effet de l'insertion d'un blindage électromagnétique sur la propagation des ondes de Lamb dans un composite à renforts de fibres de verre = Effect on the insertion of an electromagnetic shielding on the propagation of Lamb wave in GFRP**

Matthieu Grésil, Patrick Parneix, Michel Lemistre, Jean-Christophe Walrick,  
Dominique Placko

► **To cite this version:**

Matthieu Grésil, Patrick Parneix, Michel Lemistre, Jean-Christophe Walrick, Dominique Placko. Effet de l'insertion d'un blindage électromagnétique sur la propagation des ondes de Lamb dans un composite à renforts de fibres de verre = Effect on the insertion of an electromagnetic shielding on the propagation of Lamb wave in GFRP. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00384382

**HAL Id: hal-00384382**

**<https://hal.science/hal-00384382>**

Submitted on 11 Jun 2009

**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.

# Effet de l'insertion d'un blindage électromagnétique sur la propagation des ondes de Lamb dans un composite à renforts de fibres de verre

## *Effect on the insertion of an electromagnetic shielding on the propagation of Lamb wave in GFRP*

Matthieu Gresil<sup>1</sup>, Patrick Parneix<sup>2</sup>, Michel Lemistre<sup>3</sup>, Jean Christophe Walrick<sup>4</sup> et Dominique Placko<sup>3</sup>

1 : DCNS  
56311 LORIENT Cedex  
E-mail : [mgresil@estaca.fr](mailto:mgresil@estaca.fr)

2 : DCNS  
44620 NANTES-INDRET

3 : Laboratoire SATIE  
ENS-94235 CACHAN Cedex

4 : ESTACA  
53061 LAVAL Cedex

### Résumé

Dans cette étude, la propagation des ondes de Lamb dans deux matériaux composites, l'un à renforts de fibres de verre et l'autre composé de plis de verre avec une insertion d'un grillage métallique ont été étudiés. Comprendre les caractéristiques des ondes de Lamb est très important pour le développement d'un système de surveillance des structures composites. De minces pastilles piézoélectriques (PZT) ont été insérées lors de la fabrication de ces deux matériaux. L'influence de l'insertion d'un écran électromagnétique, sous la forme d'un grillage métallique, a été étudiée en mesurant les vitesses de groupe à l'aide des signaux reçus. En outre, la détection et la localisation d'endommagements dus à des impacts ont été réalisées pour ces deux matériaux. De plus, une modélisation par éléments finis en 2D nous a permis de valider les différents modes de propagation et la vitesse des modes pour ces composites.

Ce travail met en évidence la faisabilité de l'utilisation des ondes de Lamb pour la détection de différents impacts dans un GFRP avec l'insertion de capteurs piézoélectriques et d'un grillage métallique.

### Abstract

In this study, the propagation of Lamb waves in both composites materials, the first one is a Glass Fibre Reinforced Plastics (GFRP) and the second one is composed of GFRP with an insertion of a wire mesh, have been studied. Understanding the characteristics of Lamb waves is very important for the development of a monitoring system for composite structures. Thin Piezoelectric (PZT) transducers were inserted in these materials during manufacture. The influence of the insertion of an electromagnetic screen was investigated with measurement of group velocities and frequency analyses of received signals. In addition, the detection and location of damage due to impacts have been achieved for these two materials. In addition, finite element modeling in 2D has enabled us to validate the different methods of propagation and speed modes for these composites.

This work highlights the feasibility of using Lamb waves for the detection of different impacts in a GFRP with the insertion of piezoelectric transducers and a wire mesh.

**Mots Clés:** Ondes de Lamb, contrôle de santé intégré, transducteurs piézoélectrique, traitement du signal.

**Keywords:** Lamb waves, structural health monitoring, piezoelectric transducers, signal processing.

## 1. Introduction

Les navires de guerre sont équipés de plus en plus de matériels électroniques générant des champs électromagnétiques (EM) de plus ou moins grande intensité... Les superstructures portent ainsi un certain nombre de contributeurs pouvant perturber le fonctionnement des matériels à l'intérieur du navire, voire de nuire à la santé des personnes qui y sont hébergées. Dans le cas des matériaux composites à renforts de fibres de verre (GFRP), la structure, étant diélectrique, est relativement transparente aux rayonnements

électromagnétiques. Pour assurer un blindage EM, une des voies de recherche est d'insérer un grillage métallique au sein même de la structure lors de la fabrication.

En outre, l'insertion d'un dispositif de contrôle de santé au cœur même de la structure composite permet de renseigner sur l'état de sollicitations (déformations) ainsi que sur la présence d'éventuels endommagements [1]. Ce monitoring interne offre ainsi la possibilité d'optimiser l'emploi de la structure, de prédire d'éventuelles défaillances et ainsi de prévoir les phases d'entretien des navires et structures composites

Néanmoins, on devra prendre en compte certaines caractéristiques spécifiques des composites qui par définition sont des matériaux inhomogènes et anisotropes.

Le choix des ondes de Lamb se justifie par leurs nombreux avantages, en effet elles ont la faculté de mettre en vibration la totalité de l'épaisseur de la plaque et offrent la possibilité de détecter des défauts internes quelle que soit leur profondeur. De plus, les ondes de Lamb ont la particularité de se propager sans trop de déperdition d'énergie dans les matériaux pourtant passablement atténuants que sont les matériaux composites. Un système de contrôle actif peut également réduire le temps d'inspection, car contrairement aux systèmes d'inspection passive, il ne nécessite pas une surveillance continue.

Toutefois, leur utilisation présente quelques difficultés : elles sont dispersives, à une fréquence donnée et donc plusieurs modes peuvent se propager à différentes vitesses. Leur propagation dans des milieux anisotropes et multicouches accroît encore la complexité. Des travaux ont permis d'établir analytiquement les courbes de dispersion [2-6], de les valider expérimentalement [7] et d'étudier l'effet de la dispersion sur de longs trajets [8].

La méthode de propagation des ondes de Lamb a initialement été proposée par Chang et associés [9-10] et d'autres [11-13] en utilisant des disques piézoélectriques comme émetteur et récepteur pour mesurer les changements du signal reçu d'une structure présentant un défaut. Cette méthode a montré son efficacité pour la détection de délaminage et de fissures dans les matériaux composites. Cependant le traitement de signal est complexe en raison de multiples réflexions présentes dans les matériaux composites.

Le travail présenté dans le cadre de la présente communication, traite de l'effet de l'insertion d'un blindage électromagnétique sur la propagation des ondes de Lamb. En particulier, une étude a été menée pour comparer et mesurer la vitesse de groupe dans deux types de matériaux afin de mettre en évidence la faisabilité de l'utilisation des ondes de Lamb pour la détection et la localisation de différents impacts dans un GFRP avec l'insertion de transducteurs piézoélectrique et d'un grillage métallique. L'originalité de cette étude réside donc dans l'ajout de deux fonctionnalités indépendantes dans un GFRP que sont la protection électromagnétique et un contrôle de santé actif.

## 2. Protocole expérimental

### 2.1 Description des matériaux

Pour cette étude deux plaques composites rectangulaires ont été fabriquées ; la première est un composite composé de dix plis de fibres de verre taffetas infusés avec une matrice vinylester (noté M1) (Fig. 1.a) de dimensions 720\*760 mm et de 4 mm d'épaisseur.

La seconde est fabriquée à partir de neuf plis de verre taffetas infusés avec une matrice vinylester comprenant également un blindage électromagnétique, constitué d'un grillage (noté M2) (Fig. 1.b) de même dimensions que la plaque M1. Pour résumer  $M2 = M1 + \text{Blindage électromagnétique}$ .

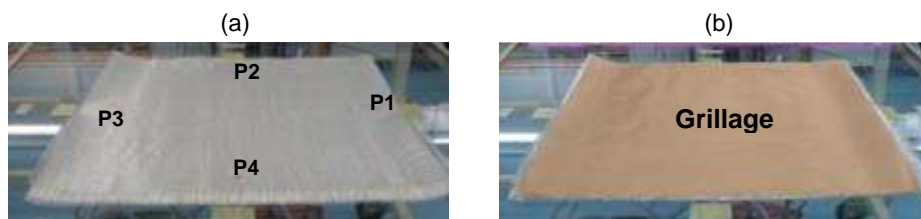


Fig. 1. Matériaux utilisés pour cette étude : (a) GFRP M1 ; (b) GFRP + grillage M2

### 2.2 Méthode expérimentale

Pour l'application du contrôle de santé interne, de minces transducteurs piézoélectriques circulaires (PZT 27, Ferroperm) ont été choisis comme émetteurs et récepteurs. Ces transducteurs ont un diamètre de 20 mm et d'épaisseur 0.5 mm. Un réseau composé de quatre PZT a été intégré au milieu des deux plaques lors de l'infusion sous bâche à vide (notés P1, P2, P3 et P4). Ce réseau de capteurs nous a permis de

mesurer la vitesse de groupe suivant les différentes directions à 0, 90 et 45° afin d'avoir une meilleure connaissance de la propagation des ondes de Lamb dans ces matériaux.

Ces transducteurs sont utilisés pour la génération et la réception des ondes de Lamb pour détecter des endommagements induit par des impacts. Cette détection comporte 3 phases majeures : la génération des signaux, le traitement du signal et l'interprétation de l'endommagement [10]. Les modes fondamentaux symétriques (compression)  $S_0$  et antisymétrique (flexion)  $A_0$  ont été choisis pour prédire la localisation des impacts [14-15].

Le signal d'excitation est généré par une carte ARB-1410 fabriquée par Euro Physical Acoustics SA. La salve de cinq sinus lissée montrée dans la figure 2.a est largement utilisée dans le domaine de l'évaluation non destructive en raison de ses bonnes caractéristiques de dispersion et de sa sensibilité aux défauts structurels [16].

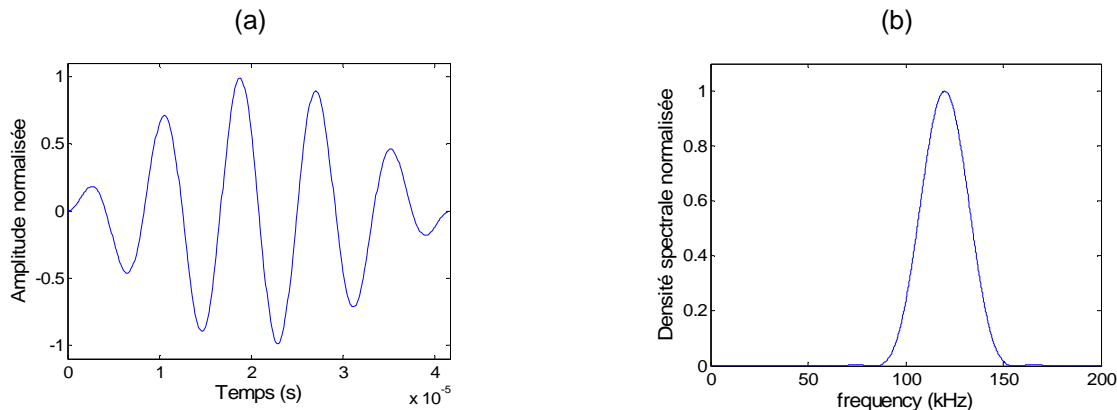


Fig. 2. : (a) salve du signal exciteur à 120 kHz; (b) et sa transformée de Fourier.

La salve excitatrice a donc été choisie afin de créer une excitation cohérente mono-fréquence des ondes. Cet aspect est très important, en particulier lorsqu'il s'agit d'ondes dispersives (Fig. 2.b). Si le nombre de cycles de la fonction d'entrée est augmenté, la largeur de bande se réduit mais l'onde va s'allonger. Lorsque la durée d'une onde est plus longue, le temps de résolution est plus faible. Par conséquent, il y a toujours un compromis entre une bonne caractéristique de dispersion et le temps de résolution.

La réception se fait grâce à un oscilloscope (DPO4034, Tektronix, Inc), puis le signal est transféré vers un PC pour le traitement des données par le biais d'un câble USB. La carte de génération de fonctions a également transféré le signal de déclenchement à l'oscilloscope pour régler le temps initial. L'expérience mise en place est représentée sur la figure 3. Les signaux reçus ont été acquis avec un taux d'échantillonnage de 25MEch/s par l'oscilloscope, et avec une moyenne sur 128 échantillons en vue d'améliorer le ratio signal/bruit.

### 3. Vitesses de propagation des ondes de Lamb dans les deux matériaux

La théorie des courbes de dispersion pour la vitesse de phase et de groupe a été obtenue en utilisant le formalisme de Nayfeh et Chimenti [17]. La vitesse de groupe a été calculée avec la mesure du temps d'arrivée, qui a été déterminée en utilisant le maxima de la transformée de Hilbert du premier paquet d'onde reçu pour une distance donnée entre l'émetteur et le récepteur pour les deux types de matériaux.

Les courbes de dispersions pour les matériaux M1 et M2 montrent qu'il ne peut y avoir que deux modes de propagation à 480 kHz.mm (Fig. 4a et 4b) et (Fig. 5a et 5b) respectivement. Les vitesses de groupes sont de 3,773 km/s pour le mode fondamental symétrique (ou mode de compression  $S_0$ ) ; et de 1,195 km/s pour le mode fondamental antisymétrique (ou mode de flexion  $A_0$ ) pour le matériau M1. Les vitesses de groupes sont de 3,478 km/s pour le mode fondamental  $S_0$  ; et de 1,119 km/s pour le mode fondamental  $A_0$  pour le matériau M2. La vitesse de groupe du mode  $S_0$  est plus grande que celle du mode  $A_0$  pour ces deux matériaux. En conséquence, il est prévu que les premiers paquets de signaux reçus appartiendraient au mode  $S_0$ .

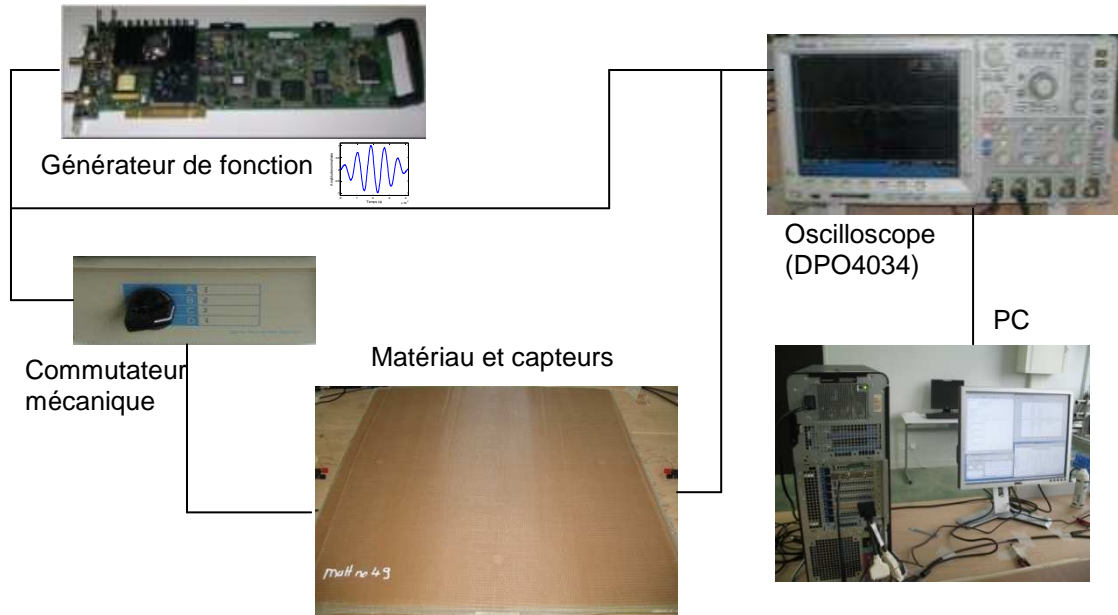


Fig. 3 : Protocole expérimental pour la propagation des ondes de Lamb.

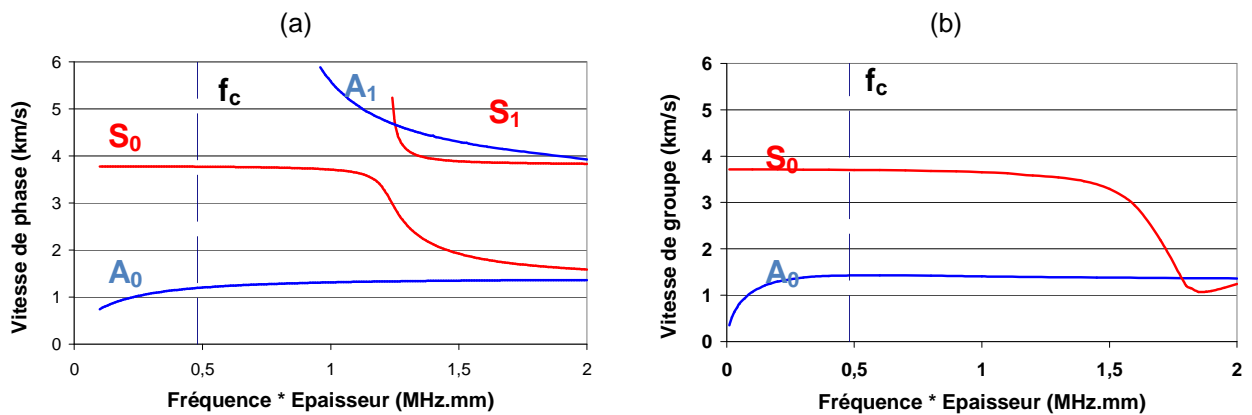


Fig. 4 : Courbes de dispersion théorique du matériau M1 (a) vitesse de phase (b) vitesse de groupe.

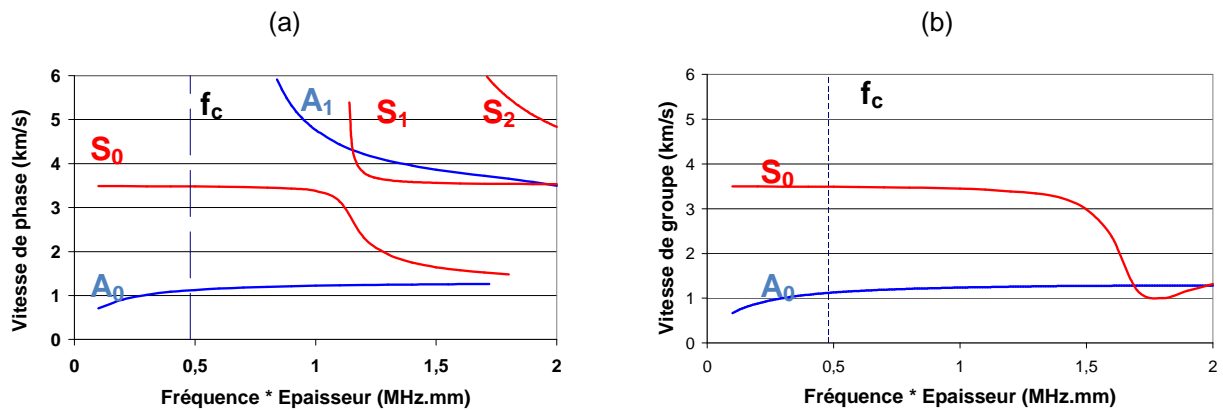


Fig. 5 : Courbes de dispersion théorique du matériau M2 (a) vitesse de phase (b) vitesse de groupe.

Les signaux reçus pour le chemin de propagation P1/P3 dans les matériaux M1 et M2 sont montrés sur les figures 6a et 6b respectivement. La distance entre l'émetteur et le temps de vol du mode  $S_0$  de chaque récepteur sont indiqués dans le tableau 2.

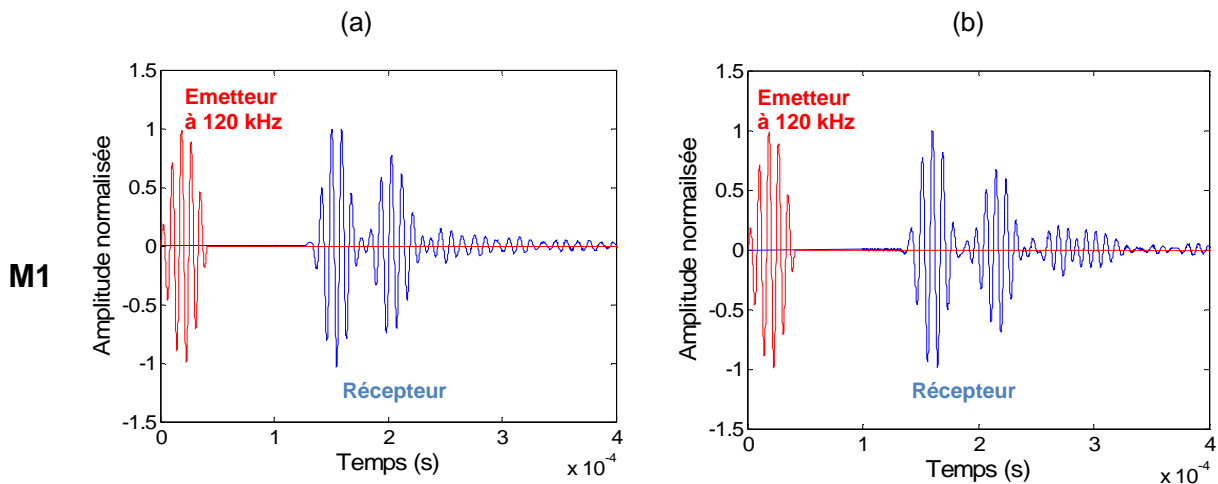


Fig. 6 : Signaux reçus pour le chemin P1/P3 ; (a) matériau M1 (b) matériau M2.

Les vitesses de groupe du mode  $S_0$ , reporté dans le tableau 2, montrent que la vitesse varie en fonction de l'angle de propagation des ondes de Lamb. Pour les chemins faisant un angle de 0 et 90°, c'est-à-dire le long des fibres de verre, la vitesse de groupe moyenne du mode symétrique est de 3,853 km/s. Lorsque le chemin de propagation fait un angle de 45°, c'est-à-dire perpendiculairement aux fibres de verre, la vitesse de groupe moyenne du mode  $S_0$  est de 3,482 km/s. Un écart d'environ 0,37 km/s est donc observable selon l'angle de propagation par rapport à l'alignement des fibres. Donc la vitesse de groupe moyenne entre tous les chemins de propagation, pour le mode  $S_0$ , est de 3,606 km/s soit un écart d'environ 4,6% par rapport à la vitesse théorique calculée précédemment.

Chemin de propagation	Distance (mm) et angle	T.D.V ( $\mu$ s)	Vitesse $S_0$ (km/s)
<b>P1/P2</b>	380 (45°)	108	3,518
<b>P1/P3</b>	555 (0°)	144	3,854
<b>P1/P4</b>	390 (45°)	112	3,482
<b>P2/P3</b>	385 (45°)	110	3,5
<b>P2/P4</b>	520 (90°)	135	3,852
<b>P3/P4</b>	360 (45°)	105	3,429

Tab. 2 : Mesure des vitesses de groupe du mode  $S_0$  pour le matériau M1 (verre).

Les vitesses de groupe du mode  $S_0$ , reportées dans le tableau 3, montrent que la vitesse varie en fonction de l'angle de propagation, comme pour M1. La vitesse de groupe moyenne du mode symétrique est de 3,632 km/s le long des fibres. Et la vitesse de groupe moyenne du mode  $S_0$  est de 3,132 km/s lorsque l'onde se propage à 45°. Un écart d'environ 0,5 km/s est donc observable selon l'angle de propagation par rapport à l'alignement des fibres. Donc la vitesse de groupe moyenne entre tous les chemins de propagation, pour le mode  $S_0$ , est de 3,298 km/s soit un écart d'environ 5,2% par rapport à la vitesse théorique calculée précédemment pour le matériau M2.

Chemin de propagation	Distance (mm) et angle	T.D.V ( $\mu$ s)	Vitesse $S_0$ (km/s)
<b>P1/P2</b>	350 (45°)	110	3,182
<b>P1/P3</b>	510 (0°)	140	3,643
<b>P1/P4</b>	350 (45°)	110	3,182
<b>P2/P3</b>	370 (45°)	120	3,083
<b>P2/P4</b>	525 (90°)	145	3,621
<b>P3/P4</b>	385 (45°)	125	3,080

Tab. 3 : Mesure des vitesses de groupe du mode  $S_0$  pour le matériau M2 (verre+grillage).

Les résultats pour ces deux matériaux sont en bon accord avec les prévisions des vitesses de groupes théoriques. L'écart de vitesse de groupe du mode  $S_0$  entre les matériaux M1 et M2 est de 0,308 km/s.

En outre, les diagrammes temps-fréquence, sur les figures 7a et 7b réalisées par une transformée en ondelette continue montre que la fréquence de la première salve reçue n'évolue quasiment pas lorsque l'écran métallique est inséré dans la structure. Néanmoins, la transformée de Fourier représentée sur la

figure 7c nous montre une légère variation de la fréquence centrale pour le matériau intégrant l'écran électromagnétique. Pour le matériau M2, la fréquence centrale est légèrement plus faible. Par contre, nous observons une nette différence de la transformée de Fourier pour les fréquences aux alentours de 100 et 130 kHz. Ces différences peuvent être expliquées par le fait que la plaque n'est pas exactement de la même dimension (à quelques mm près), et que le bord des plaques est en biseau et qu'il y ait conversions des modes de Lamb.

Toutefois, nous pouvons conclure que cette insertion n'a que peu d'influence sur la propagation des ondes de Lamb sur une plaque saine.

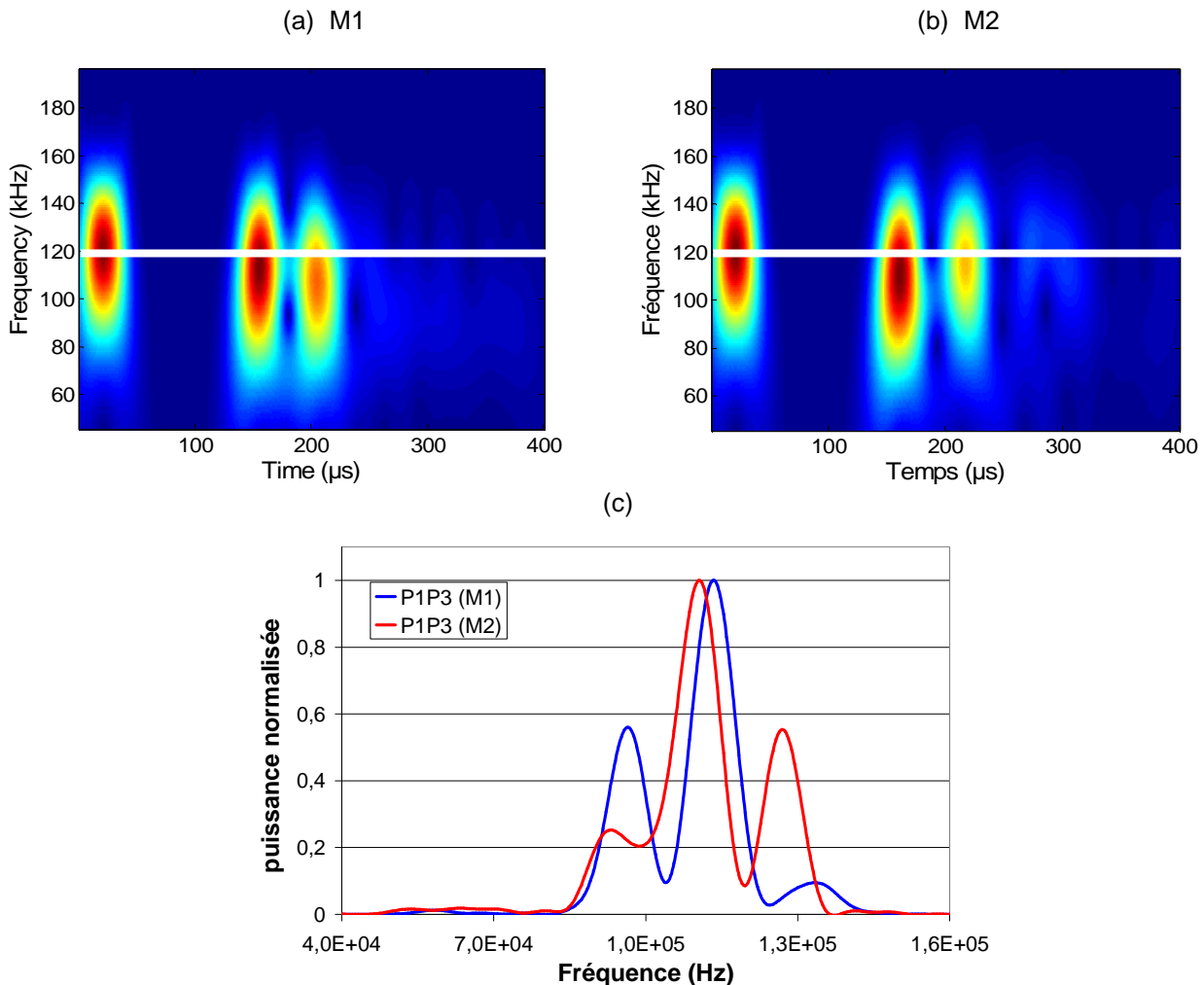


Fig. 7 : (a) Transformée en ondelette continue de l'excitation de P1 et de la réception de P3 pour M1 (b) Transformée en ondelette continue de l'excitation de P1 et de la réception de P3 pour M2; (c) Transformée de Fourier des signaux reçus par P3 pour M1 et M2.

## 4. Détection d'endommagement

### 4.1 Endommagements réalisés par impacts

Pour réaliser des endommagements réalistes d'une structure au cours de sa vie, des essais d'impacts ont été effectués selon la norme ISO6601-1, sur une tour de chute IMATEK Type IM10HV.

La tête d'impacteur est directement fixée à la cellule de charge permettant une mesure optimale de la variation de charge au cours de l'impact. Le poids de la tête d'impacteur et de la traverse est de 8,9 kg. La force produite pendant l'impact est enregistrée en fonction du temps en utilisant un système d'acquisition de données. Avant l'essai, les éprouvettes sont centrées et maintenues aux deux extrémités sur l'embase présentant un trou circulaire de 120 mm de diamètre et centré directement sous la tête d'impacteur hémisphérique de diamètre de 20 mm. Ces essais ont été réalisés par une masse tombante dans une gamme d'énergie allant de 10 à 70 Joules par pas de 20 J à des endroits différents de chacune des deux plaques.

## 4.2 Index d'endommagement

Dans la perspective d'avoir un système capable d'évaluer en temps réel et in situ l'état de santé des structures composites de manière automatique, il est souhaitable de définir un paramètre d'endommagement. Nous avons choisi celui que T. Monnier [18] a défini et qui donne des résultats très reproductibles et très simples à mettre en œuvre (Eq. 1) :

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - FD_i|}{\sum_{i=1}^n |F_i|} \quad (\text{eq. 1})$$

où  $F_i$  et  $FD_i$  sont respectivement les  $i$ -èmes valeurs numériques dans la bande de fréquence utile du module de la Transformée de Fourier (FFT) dans l'état initial et dans un état ultérieur. Le paramètre DI (Damage Index) représente donc la différence normalisée entre la valeur absolue du module des spectres transmis, dans une bande de fréquence donnée. A l'instant initial le paramètre DI est nul, puis toute différence des spectres est mise en évidence par l'augmentation de DI. A la rupture totale de la structure pour laquelle il n'y aurait aucun signal transmis entre l'émetteur et le récepteur, DI atteindrait la valeur 1.

A titre d'exemple, les figures 8a et 8b représentent la FFT dans la configuration (P2/P4) avant et après un impact de 50J pour les deux matériaux M1 et M2 respectivement.

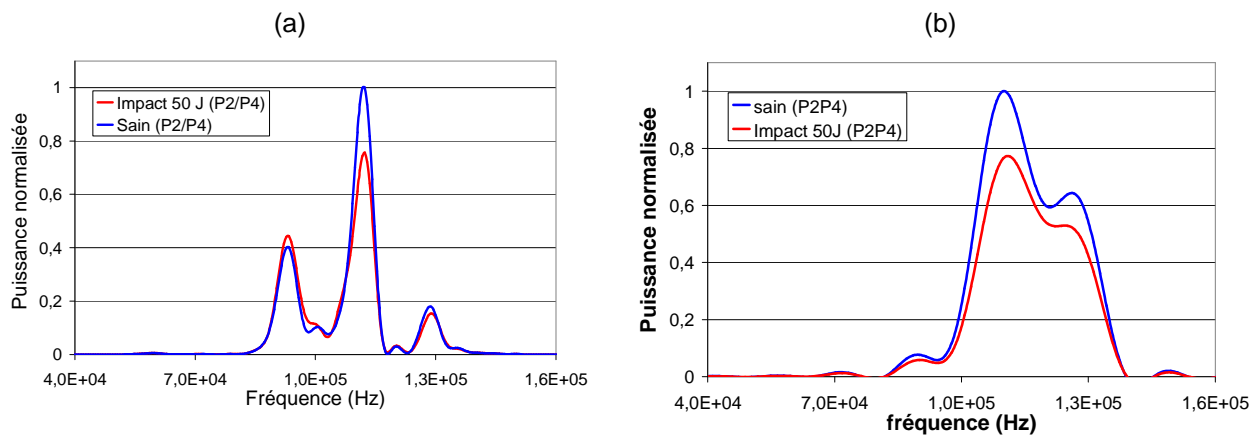


Fig. 8 : FFT des signaux reçus sur le chemin de propagation P2/P4 avant et après impact pour (a) le matériau M1 et (b) matériau M2.

Dans le cas de l'excitation préférentielle du mode  $S_0$ , nous représentons sur la figure 9 l'évolution du paramètre d'endommagement en fonction de l'énergie d'impact pour les deux matériaux étudiés. Nous remarquons tout d'abord la bonne sensibilité du paramètre DI à l'apparition et à l'évolution de l'endommagement. En outre, l'index d'endommagement est légèrement plus important pour le matériau M2 à partir d'un impact de 30 Joules, ceci est dû à la fragilité apportée par l'insertion du grillage métallique dans le composite à renforts de fibres de verre.

## 4.3 Localisation de l'endommagement

Pour localiser l'endommagement, nous utilisons la méthode décrite par Lemistre et al. [14-15]. Pour ce faire nous utilisons la relation fondamentale (Eq. 2) :

$$t_d = \frac{d_1}{v_0} + \frac{d_2}{v_1} - \frac{D_0}{v_0} \quad (\text{eq. 2})$$

Où  $D_0$  est la distance directe entre l'émetteur et le récepteur ;  $d_1$  est la distance entre l'émetteur et l'impact (1<sup>ère</sup> inconnue) ;  $d_2$  est la distance entre l'impact et le récepteur (2<sup>ème</sup> inconnue) ;  $v_0$  est la vitesse de propagation du mode  $S_0$  et  $v_1$  est la vitesse de propagation du mode interférant le plus avec ce type d'endommagement, c'est à dire le mode  $A_0$ .



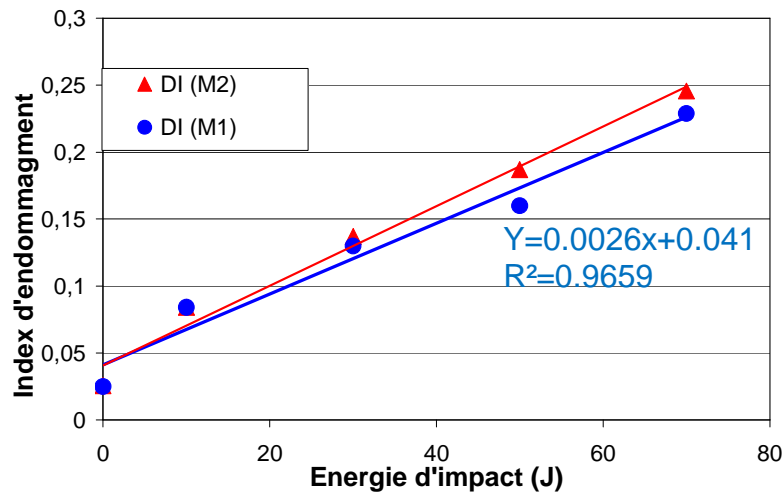


Fig. 9 : Index d'endommagement sur le chemin direct d'un impact sur les matériaux M1 et M2.

En utilisant un système de coordonnées cartésiennes, l'origine étant le coin gauche bas de la plaque, l'équation fondamentale devient (Eq. 3):

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{v_0} + \frac{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}}{v_1} - \frac{\sqrt{(x_r - x_e)^2 + (y_r - y_e)^2}}{v_0} - t_d = 0 \quad (\text{eq. 3})$$

Où  $x_r$  et  $y_r$  sont les coordonnées du récepteur ;  $x_e$  et  $y_e$  sont les coordonnées de l'émetteur ;  $x$  et  $y$  sont les inconnues (c.à.d. les coordonnées de l'impact).

Le résultat de ce calcul est donné sur la figure 10 et représente le barycentre de chaque solution calculée pour le matériau M2. Nous observons une bonne approximation de la zone impactée. La zone d'impact calculée représente 7.2% de la surface totale de la plaque. Pour les impacts supérieurs à 10 J, la surface de localisation est inférieure à 5% de la surface totale de la plaque.

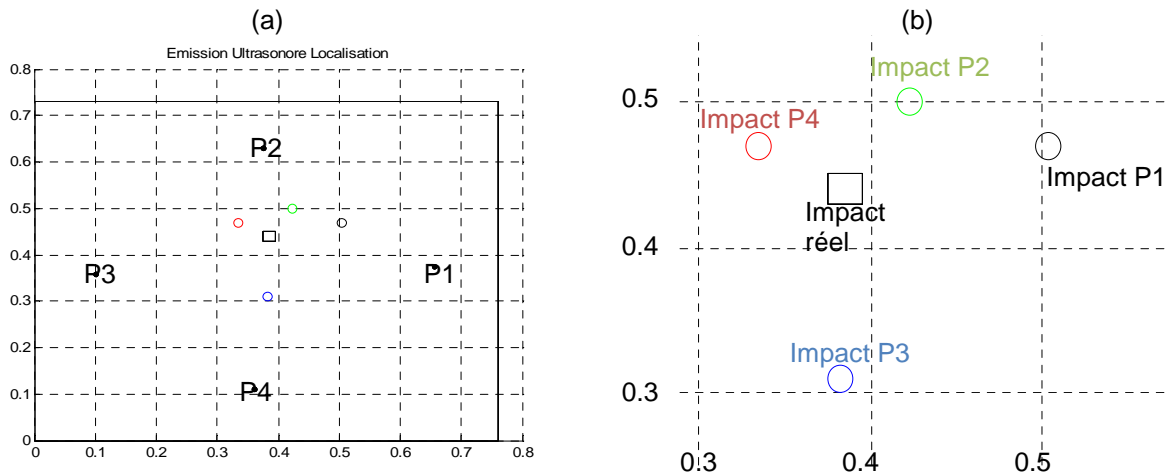


Fig.10 : Localisation de l'impact de 10 J pour le matériau M2.

## 5. Simulation de la propagation des ondes de Lamb par éléments finis

Dans cette section, la propagation des ondes de Lamb a été modélisée en 2D par les éléments finis à l'aide du logiciel multi physique Comsol 3.4. L'excitation du capteur piézoélectrique sera directement simulée par l'application d'une tension électrique. Pour cela nous rentrons dans le modèle les caractéristiques de notre matériau piézoélectrique ; sa constante d'élasticité  $C$ , sa constante piézoélectriques  $e$ , sa constante diélectrique  $\epsilon$  et sa densité  $\rho$  (données constructeur).

Nous avons utilisé cette modélisation pour une fréquence d'excitation de 120 kHz afin de mesurer la vitesse de propagation des ondes  $S_0$  et  $A_0$  afin de les comparer avec la partie expérimentale et le calcul

analytique. La figure 11 montre l'évolution dans le temps de la contrainte de Von Mises pour une fréquence de 120 kHz. L'onde est générée au bord gauche et se propage vers la droite de la plaque composite.

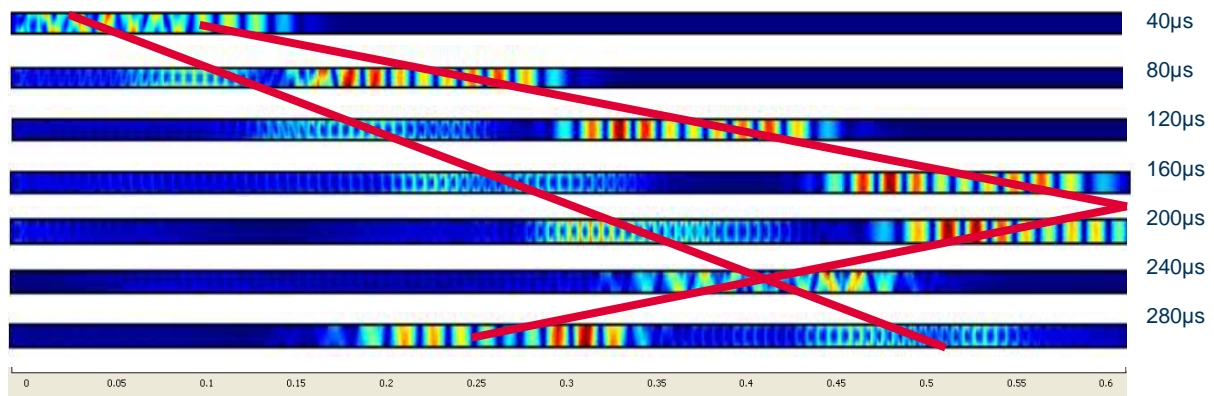


Fig. 11 : Simulations montrant l'évolution des ondes de Lamb à 120 kHz pour différents temps allant de 40 à 280 μs pour le matériau M1. Les couleurs indiquent la contrainte de Von Mises.

Le tableau 4 nous montre une bonne corrélation de la vitesse des modes A0 et S0 entre l'expérimentation, le calcul analytique et les éléments finis.

Matériaux	Mode	Vitesse expérimentale (km/s)	Vitesse analytique (km/s)	Vitesse Comsol (km/s)
M1	S0	3,606	3,773	3,6
	A0	-	1,195	1,3
M2	S0	3,298	3,478	3,3
	A0	-	1,119	1,2

Tab. 4 : Comparaison expérimentale, analytique et par éléments finis des vitesses de groupe des modes S<sub>0</sub> et A<sub>0</sub> pour les matériaux M1 et M2.

Sur la figure 12a et 12b, nous avons représenté le signal reçu théoriquement et expérimentalement pour le matériau M1 et M2, respectivement. Nous observons une bonne corrélation entre ces deux signaux, notamment sur la première salve. Néanmoins, un déphasage se crée à partir de la deuxième salve. Ce déphasage peut être dû au fait que le bord de la plaque est en biseau non régulier alors que cette modélisation ne prend pas en compte cette configuration géométrique.

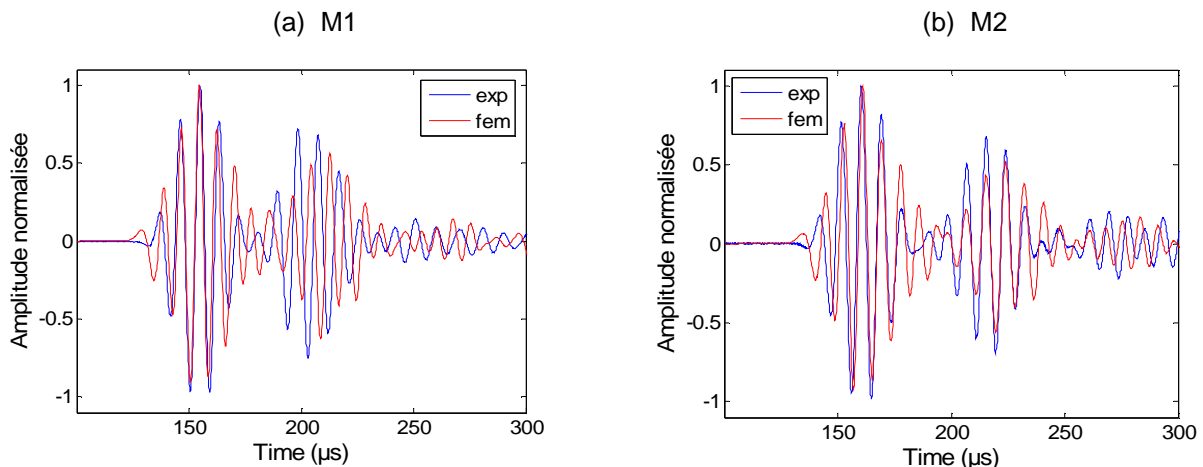


Fig. 12 : Comparaison expérimentation et simulation des signaux obtenus pour le chemin de propagation P2P4; (a) pour le matériau M1 ;(b) pour le matériau M2.

## 6. Conclusion

Dans cette étude, la caractérisation de la propagation des ondes de Lamb a été réalisée dans deux matériaux composites ; l'un composé de fibres de verre et l'autre réalisé avec des fibres de verre avec une insertion d'un grillage métallique pouvant servir de blindage électromagnétique. Ces expériences ont été menées avec l'examen d'un système de surveillance basé sur des transducteurs piézoélectriques intégrés dans les matériaux. Par l'étude de la propagation des ondes de Lamb dans les matériaux anisotropes, nous

avons dégagé les principales vitesses de groupe des modes fondamentaux symétrique et antisymétrique. Dans la perspective de la mise en œuvre d'une procédure de contrôle non destructif basée sur les ondes de Lamb, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux modes fondamentaux. Nous avons exposé la stratégie que nous avons retenue pour le développement d'un système de contrôle de santé intégré de structure en temps réel et à grande distance. En particulier, la définition d'un paramètre d'endommagement fin nous a permis de démontrer la faisabilité de la détection de défauts réalistes, dus à des impacts, et ce pour les deux matériaux étudiés ici. La méthode de transmission-réception a un potentiel pour l'utilisation d'un diagnostic de l'intégrité structurelle, car nous n'avons pas besoin de soustraire les deux signaux. Par conséquent, il pourrait être employé comme méthode de diagnostic permettant d'identifier et de quantifier des endommagements.

En outre, nous avons montré l'apport indéniable de la méthode des éléments finis pour une meilleure compréhension de la propagation des ondes de Lamb. Par cette méthode de simulation, nous avons obtenu une bonne corrélation avec l'expérimentation. Par la suite, nous nous intéresserons à l'insertion de défauts simulant des impacts pour les comparer avec les résultats expérimentaux afin de calculer l'index d'endommagement théorique et également pour mieux comprendre l'interaction des ondes de Lamb avec ces types de défauts.

Pour conclure, nous avons démontré la faisabilité de l'utilisation des ondes de Lamb pour la détection et la localisation de différents impacts dans un matériau composite bi-fonctionnel, c'est-à-dire possédant à la fois une protection électromagnétique et un contrôle de santé intégré.

## Références

- [1] P. Ferdinand, « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg ». Technique de l'ingénieur R 6 735-1.
- [2] E. Dieulesaint et D. Royer, « Ondes élastiques dans les solides- Tome 1: Propagation libre et guidée ». Paris, Masson, 1996.
- [3] A.H. Harker, « Elastic waves in solids ». Bristol, British gas, 1987
- [4] S.V. Kuznetsov, « Subsonic lamb waves in anisotropic layers ». Journal of Applied Mathematics and Mechanics, **65**(2): 291-299, 2001.
- [5] A.D. Nayfeh, « Wave propagation in layered anisotropic media with applications to composite ». Amsterdam, Elsevier, 1995.
- [6] L. Wang and S. I. Rokhlin, « Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media ». Ultrasonics, **39**(6): 413-424, 2001.
- [7] S. Grondel et al. « The propagation of Lamb waves in multilayered plates: phase-velocity measurement ». Measurement Science and Technology **10**(5): 348-353, 1999.
- [8] P. Wilcox, M. Lowe, et al. « The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves ». NDT & E International **34**(1): 1-9, 2001.
- [9] Y.S. Roh and F-K. Chang, « Built in diagnostics for identifying an anomaly in plates using wave scattering » *PhD Dissertation* Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1999.
- [10] C.S. Wang and F-K. Chang, « Built-in diagnostics for impact damage identification of composite structures ». *Proc. 3rd Int. Workshop on Structural Health Monitoring (Stanford, USA, 1999)* pp 612-21
- [11] D.N. Alleyne and P. Cawley, « The interaction of Lamb waves with defects ». *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **39** 381-97, 1992.
- [12] Z. Chang and al., « Scattering of Lamb waves from a rivet hole with edge cracks ». *Mech. Mater.* **21** 197-204, 1999.
- [13] S.S. Kessler, S.M. Spearing and C. Soutis, « Structural health monitoring in composite materials using Lamb wave methods ». *Smart Mater. Struct.* **11** 269-78, 2002.
- [14] M. Lemistre and al., « Damage localization in composite plate using wavelet transforms processing on Lamb wave signal ». F-K Chang editor, Structural Health monitoring, p861, 1999.
- [15] M.Lemistre and D. Balageas, « Structural health monitoring system based on diffracted lamb wave analysis by multi-resolution processing », *Smart Materials and Structure*, 16, p504-511, 2001.
- [16] C. Boller and al., « Design principles and inspection techniques for long life endurance of aircraft structures », *Proc. 3rd Int. Workshop on Structural Health*, 2001
- [17] A.D. Nayfeh, D.E. Chimenti, « The general problem of elastic waves propagation in multilayered », anisotropic media. *J Acoust Soc Am* 1521-31, 1991.
- [18] T. Monnier, « Ondes de Lamb dans les milieux stratifiés application à la surveillance in situ et en temps réel de l'endommagement de structures composites », Thèse de doctorat :Universités Pierre et Marie Curie et Denis Diderot, 2001.