

Contrôle santé intégré de patchs composites collés sur des structures métalliques par ondes de Lamb

Bastien Chapuis¹, Daniel Osmont¹, Nicolas Terrien², Daniel Royer³

¹ONERA Département Matériaux et Structures Composites, 29 Avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon

²CETIM, 74 route de la Jonelière, 44326 Nantes Cedex 3

³Laboratoire Ondes et Acoustique, ESPCI-Université Paris 7-CNRS UMR 7587, 10 Rue Vauquelin 75231 Paris Cedex 05

Les patchs composites collés constituent un moyen intéressant de réparer certaines structures aéronautiques fissurées ou corrodées grâce à leurs nombreux avantages par rapport aux réparations traditionnelles rivetées. Cependant des problèmes de certification limitent l'application de cette technologie. Nous présentons ici le développement d'un système de contrôle santé intégré pour détecter des défauts dans les réparations au cours de la vie de la structure. Des disques piézoélectriques minces sont intégrés entre le patch et la structure métallique mère. Ces disques sont utilisés pour exciter et détecter des ondes de Lamb. Des considérations sur le choix du mode de Lamb approprié et sur la génération et la détection de ces ondes guidées par les disques piézoélectriques sont présentées. Les premiers résultats de détection d'un défaut dans la réparation sont aussi exposés.

1 Introduction

L'apparition de fissures dans une structure aéronautique est une des principales préoccupations des opérateurs de maintenance. Afin d'éviter le remplacement de la structure endommagée, opération toujours longue et coûteuse, un patch métallique riveté est généralement appliqué afin de reprendre une partie des efforts. Cependant cette solution induit des concentrations de contraintes autour des rivets, devenant de nouveaux points de fragilisation. Une technique plus récente consiste à coller un patch composite sur la zone endommagée à l'aide d'une couche d'adhésif [1]. Ces patchs ont déjà été utilisés avec succès pour réparer des structures fissurées mais aussi corrodées. Ils sont généralement composés d'un empilement de plis de composite à fibres de carbone ou de bore (CFRP ou BFRP).

Cette technologie présente des avantages significatifs par rapport aux réparations mécaniques traditionnelles parmi lesquels :

- il n'y a pas d'endommagement supplémentaire de la structure ;
- comme l'interface est scellée, il n'y a pas de risque de corrosion au niveau de l'endommagement réparé ;
- ces patchs peuvent s'appliquer facilement sur des structures courbes ;
- leurs performances mécaniques sont excellentes.

Cependant des problèmes de certification limitent leur emploi à des structures non primaires car les techniques de contrôle non destructif classiques (ultrasons, thermographie infrarouge,...) ne permettent pas de vérifier assez fréquemment l'état de santé de la réparation. En effet, ces techniques ne peuvent être utilisées que lors d'opérations de maintenance. Un dispositif intégré pourrait permettre de répondre en partie à ces besoins. Les solutions les plus prometteuses de dispositif intégré dans la structure sont apportées par les fibres optiques à réseau de Bragg [2] ou les céramiques piézoélectriques [3].

Dans cet article nous présentons le développement d'un système de contrôle santé intégré basé sur des disques en céramique piézoélectrique de type PZT intégrés entre le patch et la structure (Fig. 1).

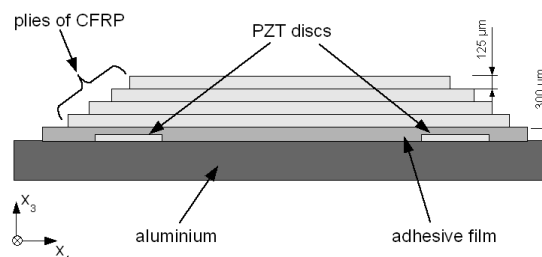


Figure 1: Coupe schématique d'une réparation par patch composite et intégration des disques PZT.

Les disques sont utilisés à la fois comme émetteur et comme récepteur d'ondes de Lamb. Nous cherchons à détecter un défaut à partir de l'écho émis lors de l'interaction entre une onde incidente et ce défaut (Fig. 2).

Une première partie de l'étude consiste à modéliser la propagation des ondes de Lamb dans cette structure complexe et à analyser l'émission et la détection de ces ondes guidées par des disques PZT. La seconde partie concerne la détection d'un défaut simple dans une réparation collée en utilisant le système de contrôle santé intégré.

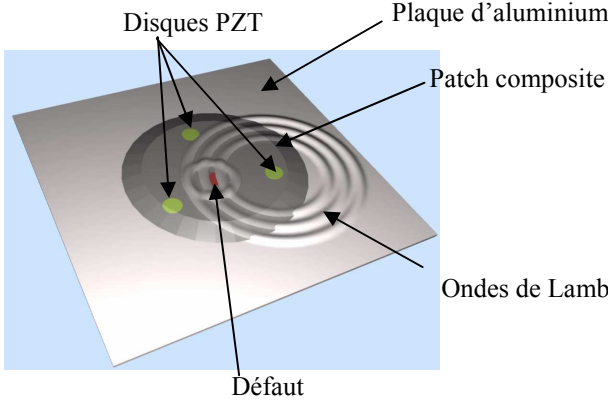


Figure 2 : Principe de la détection d'un défaut par ondes de Lamb engendrées et détectées par des disques PZT.

2 Modes de Lamb de la structure saine

La présence de différents matériaux dont certains sont anisotropes rend très complexe l'étude de la propagation des ondes guidées dans cette structure. Chaque couche (un pli de CFRP, le film d'adhésif ou la plaque d'aluminium) peut être considérée comme un cristal monoclinique avec x_1x_2 comme plan de symétrie.

2.1 Sélection et focalisation des ondes de Lamb dans une plaque anisotrope

Les ondes de Lamb sont des ondes guidées qui se propagent selon différents modes dans toute l'épaisseur d'une plaque mince. Les propriétés de ces modes sont données par les courbes de dispersion $\omega(k)$ dont il est possible de déduire les variations de la vitesse de phase $V = \omega/k$ en fonction de la fréquence. De nombreuses méthodes ont été développées pour calculer les courbes de dispersion d'une structure anisotrope multicouche. La méthode de la matrice de transfert est rapide mais présente des instabilités dans le domaine des hautes fréquences. La méthode de la matrice globale ne présente pas d'instabilité, mais est très lente lorsque le nombre de couches devient important [4]. Nous avons utilisé la méthode SAFE (méthode semi-analytique par éléments finis) qui est très simple à mettre en œuvre et stable [5]. La figure 3 montre un exemple de courbes de dispersion.

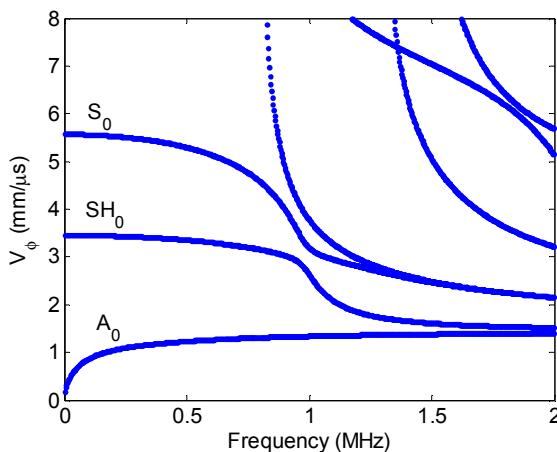


Figure 3 : Courbes de dispersion d'un composite croisé $[0^\circ/90^\circ]_s$ de type T700GC/M21 dans la direction 30° .

Ces courbes sont très importantes car elles permettent de préciser les conditions expérimentales. Elles indiquent les modes susceptibles de se propager dans la structure à condition qu'ils soient correctement excités, ce que nous verrons dans le paragraphe suivant. Par exemple, à basse fréquence seuls trois modes peuvent se propager : les deux modes de Lamb fondamentaux A_0 et S_0 et le mode transverse horizontal SH_0 qui n'est pas découplé des ondes de Lamb dans ce cas.

Une autre quantité importante se déduit de ces courbes : la vitesse de groupe qui, en milieu non dissipatif, est égale à la vitesse de propagation de l'énergie. Elle est définie par :

$$V_i^g = \left(\frac{\partial \omega}{\partial k_i} \right)_{k_j} \quad j \neq i \quad (1)$$

En milieu anisotrope cette équation devient :

$$\mathbf{V}^g = \frac{1}{\cos \psi} \left(\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} \right)_{n_i} \quad (2)$$

où $\mathbf{n}_i$ est le vecteur unitaire parallèle au vecteur d'onde $\mathbf{k}$ et ψ est l'angle entre le vecteur vitesse de groupe et $\mathbf{k}$. Dans un milieu isotrope ψ est nul, ainsi la surface d'onde, qui est la courbe joignant les vecteurs vitesse de groupe pour les différentes directions de propagation, est un cercle. Nous verrons dans le dernier paragraphe comment utiliser ces surfaces d'onde pour localiser un défaut.

La variation angulaire des vitesses est responsable de la focalisation des ondes de Lamb dans certaines directions d'un matériau anisotrope [6]. En effet, le vecteur vitesse de groupe est perpendiculaire à la courbe des lenteurs $s(\theta)$:

$$s(\theta) = 1/V_\phi(\theta) \quad (3)$$

où θ est la direction de propagation (Fig. 4).

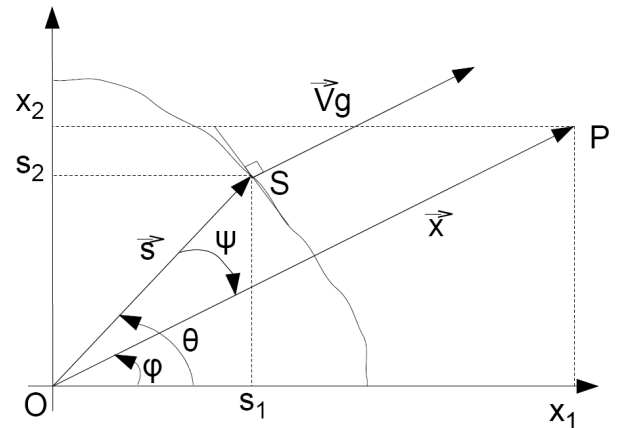


Figure 4: Le vecteur vitesse de groupe V_g au point d'observation P est normal la surface des lenteurs $s(\theta)$.

On peut montrer que le carré de l'amplitude spectrale du déplacement d'un mode de Lamb dans une direction donnée est approximativement proportionnel à la densité de rayons acoustiques dans cette direction [7]. Cette densité, présentée sur la figure 5, se calcule simplement à l'aide du facteur de Maris :

$$A = \left| \frac{d\theta}{d\varphi} \right| \quad (4)$$

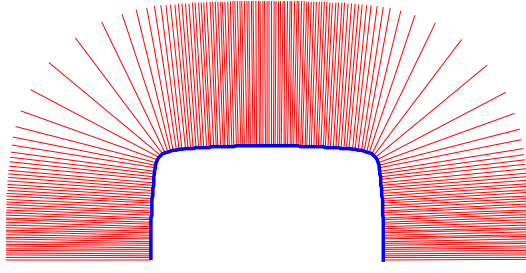


Figure 5 : Courbe des lenteurs (en bleu), rayons acoustiques (en rouge) pour le mode S_0 à 300 kHz dans un composite croisé $[0^\circ/90^\circ]_S$ (T700GC/M21).

Les figures 6 et 7 présentent le facteur de focalisation $\sqrt{A}$ pour les modes S_0 et A_0 dans une plaque de composite croisé. Pour chaque mode il y a focalisation dans la direction des fibres. Cependant, le rapport entre le minimum et le maximum du facteur $\sqrt{A}$ est de 8% pour le mode S_0 et de 23,4% pour le mode A_0 .

Dans les structures fortement anisotropes, afin d'éviter des zones « aveugles » dans lesquelles toute détection de défaut par le système de contrôle santé intégré serait difficile, le mode A_0 , moins sensible à l'anisotropie que le mode S_0 , est un bon candidat.

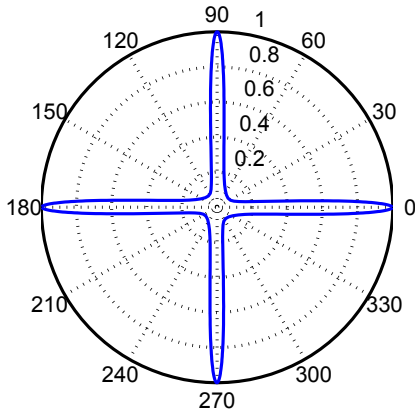


Figure 6 : Facteur de focalisation $\sqrt{A}$ pour le mode S_0 à 300 kHz dans un composite croisé $[0^\circ/90^\circ]_S$ (T700GC/M21).

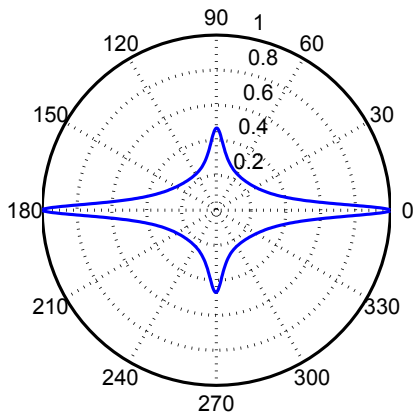


Figure 7 : Facteur de focalisation $\sqrt{A}$ pour le mode A_0 à 40 kHz dans un composite croisé $[0^\circ/90^\circ]_S$ (T700GC/M21).

2.2 Génération et détection par des disques PZT

Dans cette partie on étudie le comportement d'un disque PZT utilisé comme émetteur et détecteur d'ondes de Lamb. La réponse d'un disque PZT à une onde plane incidente est tout d'abord déterminée analytiquement. Ce calcul montre la présence de longueurs d'onde de coupure que le disque ne peut détecter. Des simulations par éléments finis et des mesures expérimentales montrent ensuite que le disque PZT vu comme émetteur génère des ondes de Lamb avec les mêmes longueurs d'onde de coupure.

Un disque PZT d'épaisseur h_{PZT} et de diamètre $D = 2R$ est collé sur une plaque d'épaisseur h_{plate} . D'après la géométrie ($h_{PZT} \ll h_{plate}$ et $R \gg h_{PZT}$) on peut faire l'hypothèse de contraintes planes dans le PZT : $T_{33} = 0$. Si on considère que l'impédance électrique du circuit de mesure est plus élevée que celle du PZT, on peut supposer que la composante D_3 du déplacement électrique est nulle. La simplification des équations constitutives du matériau piézoélectrique conduit à la relation [8] :

$$E_3 = -\tilde{h}_{31}(S_{11} + S_{22}) \quad (5)$$

où E_3 est le champ électrique dans la troisième direction, $\tilde{h}_{31}$ est le coefficient piézoélectrique du disque PZT bloqué par la plaque d'aluminium et S_{ij} le tenseur des déformations.

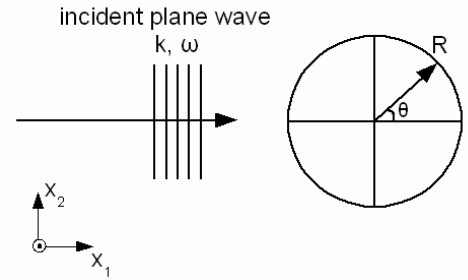


Figure 8 : Onde plane incidente sur un disque de PZT.

Le déplacement créé par une onde plane incidente (Fig. 8) est maintenant considéré :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{U}_0 e^{j(kx_1 - \omega t)} \quad (6)$$

La dilatation est donnée par :

$$S_{11} + S_{22} = \text{div}(\mathbf{u}) \quad (7)$$

La tension mesurée V est moyennée sur toute la surface du PZT :

$$V = -\tilde{h}_{31} \frac{h_{PZT}}{\pi R^2} \int_s \text{div}(\mathbf{u}) ds \quad (8)$$

Le théorème de Stokes appliqué à l'équation précédente conduit à :

$$V = -\tilde{h}_{31} \frac{h_{PZT}}{\pi R^2} \int_{\partial s} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (9)$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} V &= -\tilde{h}_{31} \frac{h_{PZT}}{\pi R^2} 2U_0 e^{-j\omega t} \int_0^\pi e^{jkR \cos \theta} R \cos \theta d\theta \\ &= -2j\tilde{h}_{31} \frac{h_{PZT}}{\pi R} U_0 e^{-j\omega t} J_1(kR) \end{aligned} \quad (10)$$

où J_1 est la fonction de Bessel de première espèce et du premier ordre. La tension aux bornes du PZT est donc proportionnelle à la fonction $|J_1(kR)| = |J_1(\pi D / \lambda)|$.

L'onde plane incidente est détectée de façon optimale pour la longueur d'onde λ égale à $1,7 D$ (maximum de la fonction de Bessel) et n'est pas détectée pour λ égale à $0,8 D$ (premier zéro de la fonction de Bessel).

Le comportement du disque en PZT comme émetteur est maintenant étudié. La réponse impulsionnelle d'un disque PZT collé sur une plaque d'aluminium est déterminée par simulations éléments finis et comparée à des mesures expérimentales. Le modèle éléments finis est constitué d'une plaque d'aluminium 2D axisymétrique avec une couche absorbante afin de limiter les réflexions à l'extrémité de la plaque. Comme l'épaisseur de colle entre l'aluminium et le PZT est très faible, le cisaillement est transmis à la structure uniquement à la périphérie du disque [10]. L'action du PZT est donc modélisée par une force ponctuelle à l'extrémité du disque.

Afin d'étudier l'influence d'un seul mode, on s'intéresse à la vitesse hors plan à la surface de la plaque d'aluminium pour des produits fréquence-épaisseur petits. Une Bi-FFT confirme que, sous ces hypothèses, seule la contribution du mode A_0 doit être prise en compte (Fig. 9).

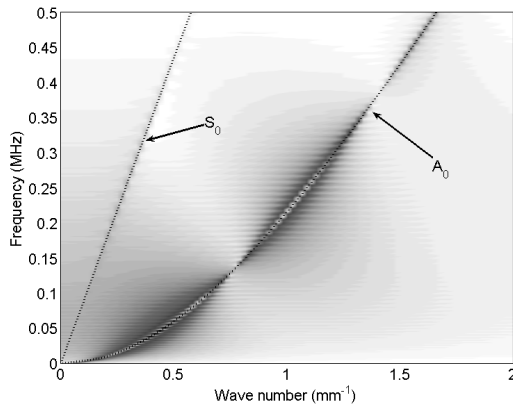


Figure 9 : BiFFT de la vitesse normale calculée à la surface d'une plaque d'aluminium de 1 mm d'épaisseur excitée par un disque PZT de 10 mm de diamètre soumis à un burst constitué d'un cycle de sinusoïde à 300 kHz, les points correspondent aux courbes de dispersion théoriques.

Les simulations ont été effectuées dans le domaine fréquentiel et converties ensuite en fonction de λ_{A_0} en utilisant la courbe de longueur d'onde déduite des courbes de dispersion d'une plaque d'aluminium. Les résultats des simulations éléments finis sont comparés à des mesures expérimentales réalisées à l'aide d'une sonde hétérodyne (Fig. 10). La position des longueurs d'onde de coupure est clairement visible et correspond bien aux résultats numériques. Comme on pouvait s'y attendre, les longueurs d'onde de coupure sont les mêmes, que l'on considère le PZT comme un émetteur (simulations éléments finis) ou comme un récepteur (fonction $|J_1|$) d'ondes de Lamb.

Cette étude montre la nécessité d'adapter le diamètre du disque PZT à la longueur d'onde des modes de Lamb que l'on veut engendrer ou détecter dans la structure.

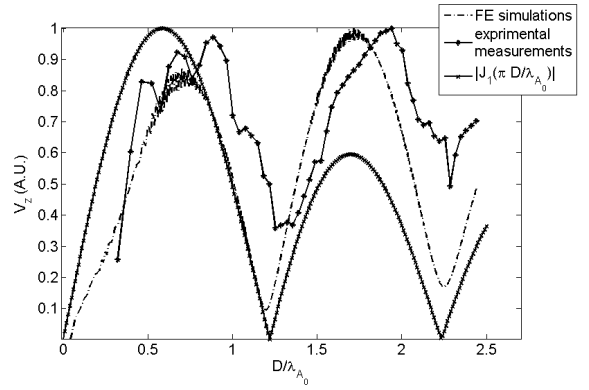


Figure 10 : Vitesse normale à la surface d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 2 mm excitée par un disque PZT de 10 mm de diamètre, comparaison entre des simulations éléments finis et des mesures réalisées à l'aide d'une sonde hétérodyne.

3 Localisation d'un trou sous un patch

Des essais préliminaires ont été réalisés afin de mettre en place les outils nécessaires pour localiser et pour évaluer la taille d'un défaut sous un patch ainsi que pour définir la stratégie de contrôle à mettre en place. Un patch circulaire, constitué de quatre plis de composite fibres de carbone/résine époxy ($[0^\circ/90^\circ]_S$) et de deux plis de composite fibres de verre/résine époxy ($[0^\circ/90^\circ]$), de diamètre 190 mm a été collé au centre d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 2 mm. Le système de contrôle santé intégré comprend trois disques PZT minces de diamètre 10 mm intégrés entre le patch et la plaque d'aluminium. Trois disques PZT supplémentaires ont été collés de l'autre côté de la plaque d'aluminium, juste en dessous des précédents. La distance entre les paires de disques est respectivement de 93 mm, 103 mm et 102 mm. Le but de ces tests était de détecter correctement un trou de diamètre croissant percé dans l'aluminium sous le patch (Fig. 11). Un trou n'est pas un défaut rencontré couramment dans l'industrie aéronautique mais c'est un défaut étendu facile à réaliser.

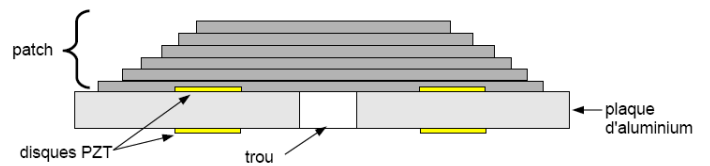


Figure 11 : Coupe schématique de l'échantillon utilisé pour les essais expérimentaux.

Les mesures ont été réalisées en mode échographique avec un générateur de fonctions arbitraires Agilent 33220A et un oscilloscope Lecroy Waverunner 44Xi. Le signal appliqué aux disques de PZT est constitué d'un cycle de sinusoïde, d'amplitude 10 Vcc et de fréquence centrale 40 kHz. Le choix de la fréquence, basé sur les considérations précédentes, a été déduit des courbes de dispersion. Selon les conclusions du paragraphe 2.1, le mode A_0 , moins sensible à l'anisotropie de la structure, est préféré au mode S_0 . Le disque PZT intégré dans le patch est utilisé comme

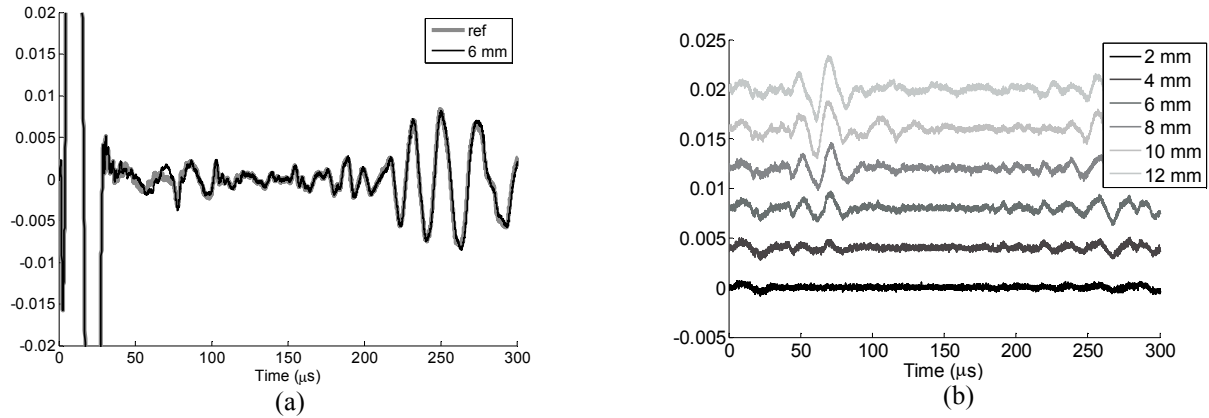


Figure 12: (a) Signal pulse-écho typique émis par un disque PZT de diamètre 10 mm intégré dans la réparation et mesuré par un disque PZT situé juste en dessous, de l'autre côté de la plaque d'aluminium. Le disque PZT est excité par un burst constitué d'un cycle de sinusoïde à 40 kHz et localisé à 52 mm d'un trou de 6 mm de diamètre (courbe noire), comparaison avec le signal mesuré sur la structure avant endommagement (courbe grise, pratiquement superposée). (b) Différence entre les signaux mesurés pour différents diamètres de trou et le signal de référence.

émetteur et le disque situé en vis-à-vis, de l'autre côté de la plaque d'aluminium, comme récepteur. Les signaux ont été mesurés initialement sur une plaque saine et comparés ensuite à ceux mesurés après le perçage un trou de diamètre croissant de 2 à 12 mm. La figure 12(a) montre un signal échographique typique mesuré sur une réparation saine puis sur la même réparation après perçage d'un trou de diamètre 6 mm. Après le burst initial d'émission, le signal est relativement compliqué à interpréter : le paquet d'onde à 250 μs est le premier écho de bord de plaque et l'écho correspondant au trou (vers 65 μs) est mélangé à d'autres oscillations. La figure 12(b) montre la différence entre les signaux mesurés lorsque la structure est endommagée et ceux mesurés dans l'état initial. La présence du trou est désormais clairement mise en évidence si son diamètre est supérieur à 4 mm. La mesure, à l'aide des trois paires de disques PZT, du temps de vol de l'écho venant du trou permet de localiser le trou par triangulation [figure 13(a)]. La structure est anisotrope, mais dans une première approximation la vitesse du mode A_0 est peu modifiée par l'anisotropie. La position est estimée par l'intersection de trois cercles centrés sur les disques PZT et dilatés par le temps de vol correspondant. En effet les surfaces d'onde sont pratiquement circulaires. L'estimation de la position du trou correspondant bien à sa position réelle, l'hypothèse d'une propagation isotrope pour le mode A_0 est justifiée. La figure 13(b) représente l'amplitude spectrale de l'écho pour différents diamètres de trou. La variation quasi-linéaire de cet indicateur donne une information significative sur la

taille du trou.

Ces essais montrent la capacité du système de contrôle santé intégré à détecter un défaut et à fournir des informations sur celui-ci. Cependant l'utilisation d'un état de référence semble indispensable pour interpréter les signaux.

4 Conclusion

Dans cet article nous avons présenté le développement d'une « réparation composite intelligente » à l'aide d'ondes de Lamb émises et détectées par des disques en céramique PZT intégrés entre le patch et la structure mère. La focalisation des modes de Lamb dans les matériaux anisotropes constitutifs du patch a conduit à sélectionner le mode A_0 , moins sensible à l'anisotropie du patch que le mode S_0 . Une étude du comportement des disques PZT comme émetteur et récepteur d'ondes de Lamb a montré qu'il est nécessaire d'adapter le diamètre du disque à la longueur d'onde du mode de Lamb utilisé par le système de contrôle santé intégré. Cela nous a fourni les conditions expérimentales pour détecter et localiser un trou sous le patch. Le système de contrôle santé intégré s'est aussi avéré sensible à la taille du défaut. Un pas important consisterait toutefois à mettre au point une méthode ne nécessitant pas de comparaison par rapport à un état de référence pour interpréter correctement les signaux ; ceci est l'objet de recherches en cours.

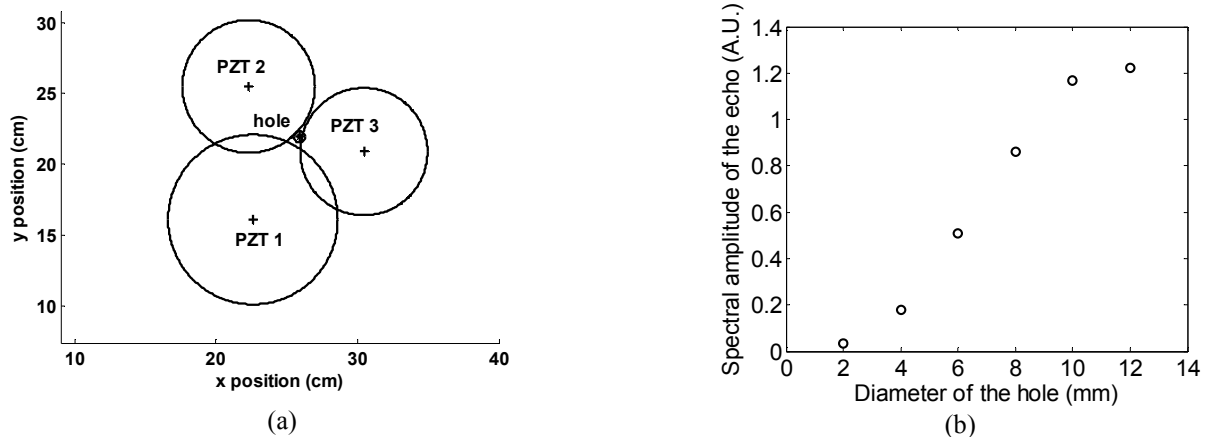


Figure 13 : (a) Localisation du trou par triangulation, (b) Variation de l'amplitude de l'écho en fonction du diamètre du trou

Références

- [1] A. Baker. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. *Compos. Struct.*, 47:431–443, 1999.
- [2] Y. Botsev, E. Arad, M. Tur, I. Kressel, U. Ben-Simon, S. Gail et D. Osmont. Structural health monitoring using an embedded PZT-FBG ultrasonic sensor array. In T. Uhl, W. Ostachowicz, and J. Holnicki-Szulc, editors, *Proc. Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring, Cracow*, 2008.
- [3] Y.L. Koh, W.K. Chiu et N. Rajic. Integrity assessment of composite repair patch using propagating Lamb waves. *Compos. Struct.*, 58:363–371, 2002.
- [4] M. Lowe. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media. *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.*, 42:525–542, 1995.
- [5] G.R. Liu, J. Tani, T. Ohyoshi et K. Watanabe. Transient waves in anisotropic laminated plates, part 1: Theory. *J. Vib. Acoust.*, 113:230–234, 1991.
- [6] H. Maris. Enhancement of Heat Pulses in Crystals due to Elastic Anisotropy. *J. Acoust. Soc. Am.*, 50:812–818, 1971.
- [7] B. Chapuis, N. Terrien et D. Royer. Excitation and focusing of Lamb waves in a multilayered anisotropic plate. *J. Acoust. Soc. Am.* 127:198–203, 2010.
- [8] E. Fribourg-Blanc. *Actionneurs en couches minces pour le contrôle santé de structures aéronautiques - étude de films de PZT et de PMNT*-. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003.
- [9] D. Royer et V. Kmetik. Measurement of piezoelectric constants using an optical heterodyne interferometer. *Electron. Lett.*, 28:1828–1830, 1992.
- [10] F. Lanza di Scalea, H. Matt et I. Bartoli. The response of rectangular piezoelectric sensors to Rayleigh and Lamb ultrasonic waves. *J. Acoust. Soc.*, 121:175–187, 2007.