HAL
open science

Confrontation simulations et expériences pour le contrôle de santé structurale d'une barre en acier ferritique entaillée suivant l'épaisseur

Elhadji Barra Ndiaye, Philippe Guy, Thomas Monnier

To cite this version:

Elhadji Barra Ndiaye, Philippe Guy, Thomas Monnier. Confrontation simulations et expériences pour le contrôle de santé structurale d'une barre en acier ferritique entaillée suivant l'épaisseur. 13e Congrès Français d'Acoustique, Apr 2016, Le Mans, France. hal-01469213

HAL Id: hal-01469213

https://hal.science/hal-01469213v1

Submitted on 16 Feb 2017

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.

CFA/VISHNO 2016

Confrontation simulations et expériences pour le contrôle de santé structurale d'une barre en acier ferritique entaillée suivant l'épaisseur

E.B. Ndiaye, P. Guy et T. Monnier
INSA de Lyon -LVA, Bât Saint Exupéry, 69621 Villeurbanne, France
elhadji-barra.ndiaye@insa-lyon.fr

Dans de nombreux secteurs industriels, on constate un besoin croissant d'inspecter des parties difficilement accessibles de structures. Il est donc important de mettre en place des moyens d'investigation non destructifs permettant de réaliser ce genre de contrôles. Les ondes guidées répondent à cette problématique et sont grandement utilisées pour le suivi de l'état de santé des structures (barres, plaques, coques, cylindres, etc.). Ces ondes ultrasonores guidées peuvent par exemple être générées et détectées par des pastilles piézoélectriques (PZT) collées sur la structure à inspecter et excitées en basse fréquence sur leur mode de résonance radiale. La réception peut se faire soit avec une autre pastille collée à un autre endroit soit avec la même pastille émettrice. Dans ce papier, nous montrons la faisabilité de la détection d'un défaut de corrosion (perte d'épaisseur) au moyen de ces ondes guidées sur une barre en acier ferritique de dimensions finies. Dans un premier temps, des simulations par éléments finis 2D au moyen du logiciel commercial Comsol Multiphysics© sont réalisées en utilisant un signal burst de 5 périodes à la fréquence de résonance radiale (170kHz) des pastilles utilisées dans les expérimentations. A partir des signaux simulés une quantification de la profondeur de l'entaille, basée sur des critères énergétiques est proposée. Dans un second temps, les expérimentations sont menées dans les mêmes conditions que les simulations et les mêmes traitements fréquentiels sont réalisés. Un bon accord simulation/expérience est observé et commenté, aussi bien en émission/réception sur un seul capteur, qu'en transmission entre deux capteurs. La perte d'épaisseur peut être quantifiée avec une bonne approximation. Ceci constitue une validation de la simulation qui peut donc être utilisée pour explorer d'autres types d'interaction mode guidé/défaut.

1 Introduction

Parmi les différentes approches de contrôle de santé intégré (SHM), l'utilisation des ondes de Lamb excitées par de minces pastilles piézoélectriques est une technique très intéressante en raison de son faible coût, de la surveillance directe ainsi que de la sensibilité élevée [1]–[3]. Les ondes de Lamb sont des ondes guidées qui restent confinées à l'intérieur d'une structure mince (épaisseur de l'ordre de quelques longueurs d'onde) et peuvent se propager sur de longues distances avec une faible perte d'énergie. Il existe deux types de modes de Lamb à savoir les modes antisymétriques A_n et les modes symétriques S_n avec n = 1,2,3,… obtenus après résolution de l'équation de Rayleigh-Lamb. Ces modes sont dispersifs c'est-à-dire que leurs vitesses dépendent de la fréquence.

La simulation numérique par éléments finis est un moyen de prédiction permettant notamment d'étudier l'interaction des ondes de Lamb avec des défauts présents dans certaines structures [4], [5]. En effet des études antérieures ont permis de mettre en évidence la diffraction par un défaut de l'onde incidente, générant des conversions de modes lors de l'interaction [6]–[8].

Dans le cas de notre étude, nous montrons la faisabilité de la détection d'un défaut (corrosion) dans une barre en acier ferritique entaillée suivant son épaisseur, d'étendue constante et placé à une distance *d* différente selon que l'on le repère par rapport à ses extrémités. Dans un premier temps, des simulations éléments finis avec des profondeurs d'entaille différentes, sont menées sous le logiciel commercial Comsol Multiphysics© avec son module *Mécanique des Structures*. Dans un second temps, l'étude l'expérimentale consistant à exciter des pastilles piézoélectriques collées sur la base en acier est faite. En simulation comme en expérience, des bilans d'énergie de l'onde générée en émission/réception et en transmission sont évalués dans les deux sens.

2 Simulation éléments finis

La modélisation par éléments finis (MEF) permet de simuler des problèmes multiphysiques, elle est particulièrement adaptée à des géométries complexes dans de nombreux domaines d'application. La structure dont il s'agit de faire sa caractérisation est une barre en acier ferritique entaillée suivant son épaisseur. Dans un premier temps, nous montrons la faisabilité de la simulation de la propagation des différents modes de Lamb à la fréquence $f = 170$kHz sur une barre saine de longueur totale $L = 1280$mm et d'épaisseur $e = 11$mm.

Afin de générer et de détecter les différents modes qui se propagent à cette fréquence, deux pastilles piézoélectriques PZT1 et PZT2 sont modélisées de part et d'autre de la barre avec une largeur de 25mm et fonctionnant en mode radial.

Une fois la géométrie de la barre réalisée, il reste à la mailler et à définir un échantillonnage temporel suffisant. Les critères de nombre de mailles par longueur d'onde et de pas temporels préconisés sont affinés d'un facteur de l'ordre de 10 relativement au critère de Shannon comme suit :

- $\Delta x \leq 2.\lambda_{\min}$ en pas spatial
- $f_e \geq 2.f_{\max}$ en pas temporel.

Pour simuler la propagation d'ondes de Lamb en régime transitoire, certains auteurs estiment qu'il est nécessaire d'avoir au moins 10 mailles par longueur d'onde mais cet ordre de grandeur est à relativiser selon la méthode de résolution. La connaissance des ondes susceptibles de se propager dans le domaine à étudier se fait en se référant aux courbes de dispersion théoriques. Ainsi la plus petite longueur d'onde $\lambda_{\min}$ recherchée se propageant dans la barre permet de dimensionner le maillage de manière adaptée telle que :

$$\begin{cases} \Delta x \leq \dfrac{\lambda_{\min}}{10} & \text{avec} \quad \lambda_{\min} = \dfrac{V_{\min}}{f_{\max}} \\ \Delta t \leq \dfrac{1}{10.f_{\max}} & \text{avec} \quad \Delta t = \dfrac{\Delta x}{V_{\min}} \end{cases} \tag{1}$$

avec $V_{\min}$ la plus petite vitesse de phase correspondante et $f_{\max}$ la valeur maximale de la plage de fréquences dans la simulation.

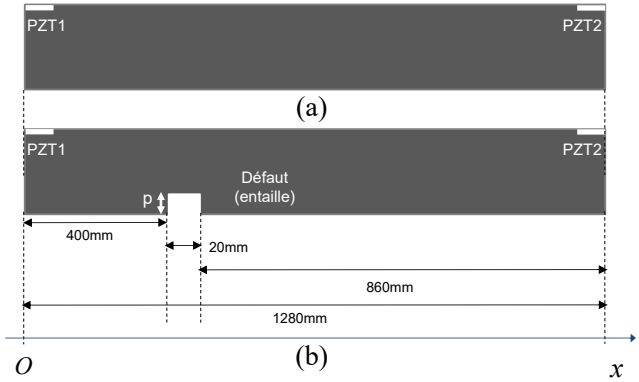


Figure 1 : Schéma des plaques d'acier à simuler avec les deux pastilles piézoélectriques collées PZT1et PZT2 d'épaisseur e = 11mm. Plaques « saine » (a) et avec défaut (b) de profondeur d'entaille p.

Le choix d'un nombre optimal d'éléments, permet, en d'autres termes de minimiser les temps de calculs. Suivant la géométrie de la structure, le choix du type de maillage est fait, dans le cas de la barre « saine » un maillage rectangulaire s'impose. Le signal d'excitation pour générer les différents modes aux alentours de la fréquence de travail est un burst de 5 périodes. Ainsi la durée du signal d'excitation est de $5/f = 29{,}412\mu s$ et la durée totale du temps de propagation est de 1000µs.

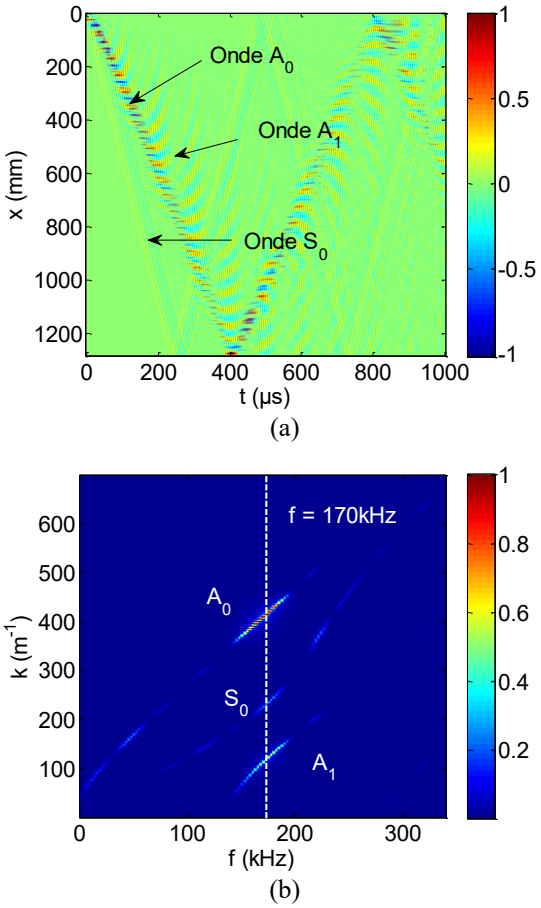


Figure 2 : Simulation de la propagation d'ondes de Lamb dans une plaque en acier ferritique d'épaisseur 11mm. Visualisation des différents modes dans l'espace temps-position (t, x) (a) et dans l'espace dual fréquence-nombre d'onde (f, k) (b).

La Figure 2(a) montre les différents modes de propagation en présence. On peut voir le premier mode symétrique S_0 en premier puis le premier mode antisymétrique A_0 (dominant) et aussi des traces du mode A_1. Les temps d'arrivée respectivement d'un écho S_0 et A_0 ayant effectué un aller-retour dans la plaque sont 440µs et 860µs. Une identification de ces modes en présence est possible en superposant sur la représentation « tout fréquence » Figure 2(b) les courbes de dispersion théoriques. Cette représentation « tout-fréquence » est obtenue en effectuant une double transformées de Fourier (FFT2D) de l'image spatio-temporelle.

Dans le but de simuler l'interaction des modes guidés de Lamb avec un défaut, des entailles de profondeurs $p = 1$, 3 et 5mm ont été réalisées. Le mode d'excitation est toujours le même c'est-à-dire un déplacement radial appliqué en deux points, sous forme d'un burst de 5 cycles à $f = 170$kHz. Des analyses en émission/réception (ER1 et ER2) et en transmission (Trans12 et Trans21) entre les pastilles PZT1 et PZT2 sont menées. Dans ces conditions pour une épaisseur de 11mm de la plaque d'acier, les trois modes guidés A_0, S_0 et A_1 sont générés et ils se propagent à des vitesses de phase différentes. Leurs interactions avec le défaut lorsque l'excitation est faite avec PZT1 ou avec PZT2 sont illustrées sur la Figure 3(a) et (b) respectivement. On peut remarquer clairement que le mode dominant (A_0) lorsque le défaut est plus proche de la pastille émettrice ($d = 400$mm) subit plus de réflexions que lorsqu'il est plus éloigné ($d = 860$mm).

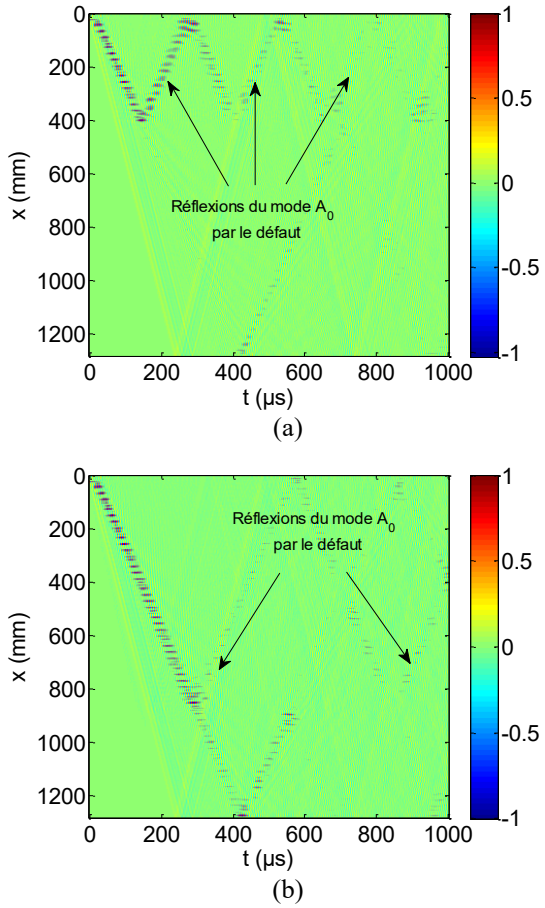


Figure 3: Simulation de la propagation des différents modes de Lamb. Visualisation de l'interaction du mode de Lamb A_0 avec le défaut, propagation de PZT1 *vers* PZT2 *(a) et de* PZT2 *vers* PZT1 *(b).*

Pour une quantification beaucoup plus significative de l'interaction des ondes de Lamb sur le défaut, une analyse modale basée sur le calcul des bilans énergétiques se trouve être un moyen d'analyse adéquat. Par la suite, nous générerons le mode guidé dominant A_0 par un autre moyen d'excitation. Cette excitation est faite sur une seule arête en utilisant les valeurs des déplacements théoriques en imposant les composantes normales et tangentielles du mode. Contrairement aux simulations faites en excitant deux points, c'est toute une frontière qui vibre pour générer le mode.

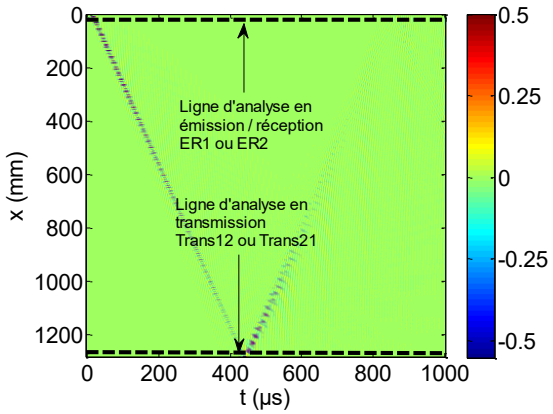


Figure 4: Simulation de la propagation du mode de Lamb A_0 à f = 170kHz sur une plaque « saine ». Excitation frontière par ses déplacements théoriques suivant l'épaisseur.

Sur la Figure 4 est représentée la cartographie des déplacements radiaux le long de la barre d'acier. En effet à chaque pas temporel, les déplacements des nœuds positionnés sur la surface de la plaque sont calculés et mémorisés avec le logiciel de simulation. Sur cette représentation spatio-temporelle, nous constatons que l'onde incidente générée à l'extrémité de la plaque prise comme référence (x = 0mm), se propage et est réfléchie par l'autre extrémité (x = 1280mm) à t = 430µs. On note aussi une conversion de mode de A_0 vers A_1 lors de la réflexion sur l'autre extrémité de la barre à environ t = 430µs.

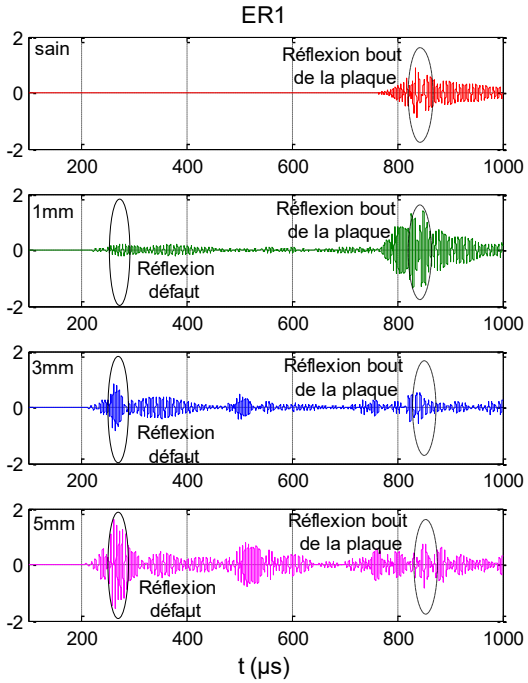
Nous développons ci-après une méthode de quantification des énergies réfléchies ou transmises en fonction de la profondeur du défaut. Dans un premier temps les analyses en émission/réception son menées. On notera ER1 et ER2 les analyses effectuées en émettant et recevant sur le PZT1 ou PZT2 respectivement. Les signaux recueillis le sont à x = 12,5mm. De même on notera Trans12 et Trans21 les analyses effectuées en émettant sur PZT1 (respectivement PZT2) et en recevant sur PZT2 (respectivement PZT1). Dans ce cas les signaux recueillis sont alors des coupes des représentations spatio-temporelles effectuées à x = 1267,5mm (Figure 4).

En émission/réception, les signaux recueillis sont tracés sur la Figure 5. Pour l'analyse ER1, le premier écho du mode A_0 renvoyé par le défaut situé à une distance d = 400mm de PZT1 arrive à environ t = 270µs alors que l'écho renvoyé par le bout de la barre à environ t = 860µs. Pour l'analyse ER2 (défaut à d = 860mm de PZT2), l'écho renvoyé par le bout de la plaque arrive au même moment que dans le cas précédent c'est-à-dire t = 860µs et que l'écho renvoyé par le défaut arrive à environ t = 580µs.

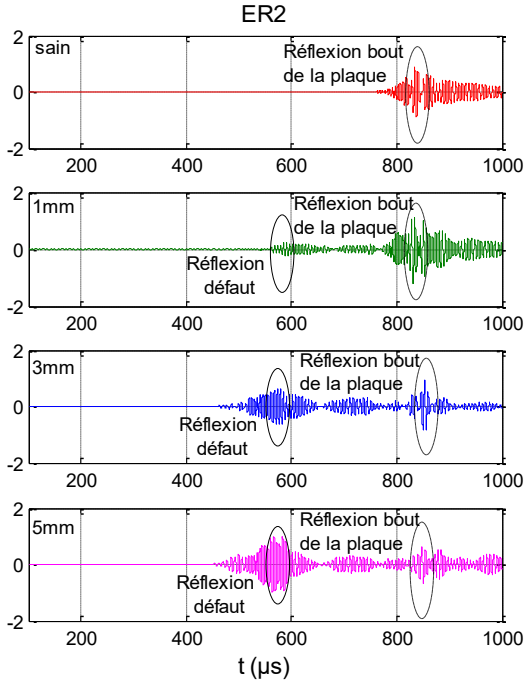
Dans les deux cas, en plus du mode A_0 reçu, on note aussi la présence du mode S_0 obtenu par conversion de mode sur la zone corrodée. Le mode S_0 étant beaucoup plus rapide que le mode A_0, l'écho correspondant arrive avant l'écho A_0. On peut d'ores et déjà remarquer que plus la profondeur de l'entaille est grande, plus l'amplitude du mode A_0 réfléchi est importante et aussi plus la présence d'autres échos est notée (conversion en S_0 et A_1, présence de modes de bout, réflexions multiples).

En transmission, les signaux recueillis sont tracés sur la Figure 6. En analyse Trans12 comme Trans21, l'écho du mode A_0 transmis arrive à environ t = 430µs. Comme en analyse en émission/réception, des conversions en S_0 et A_1 sont notées ainsi que l'existence de modes de bout, d'amplitudes relativement faibles comparées à celle de l'écho A_0.

Dans la suite de l'analyse, nous effectuerons, que ce soit en émission/réception ou en transmission, le calcul des énergies des spectres en fonction de la profondeur des entailles des défauts. Pour cela nous avons défini des fenêtres temporelles commençant à l'instant d'arrivée de l'onde A_0 et de largeur la durée de ces échos. Les énergies réfléchies ou transmises sont évaluées par transformées de Fourier des signaux dans ces fenêtres.

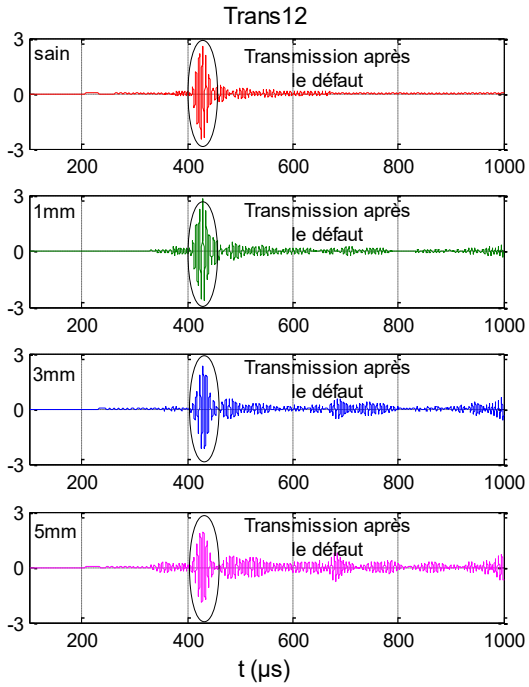


(a)

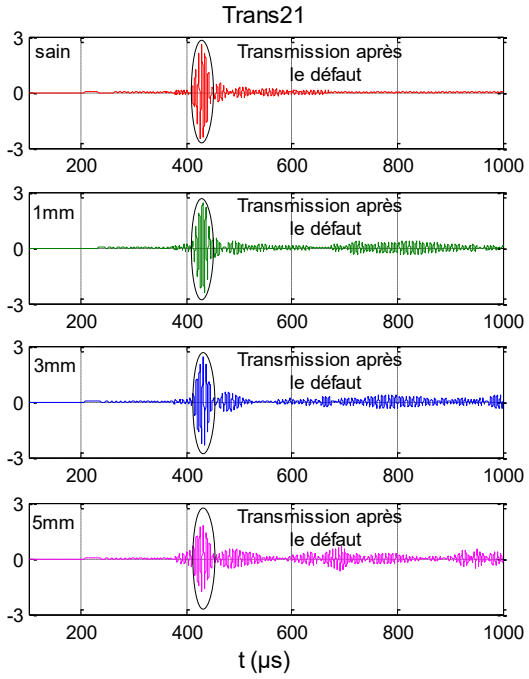


(b)

Figure 5: Simulation - analyse en émission/réception ER1 et ER2



(a)



(b)

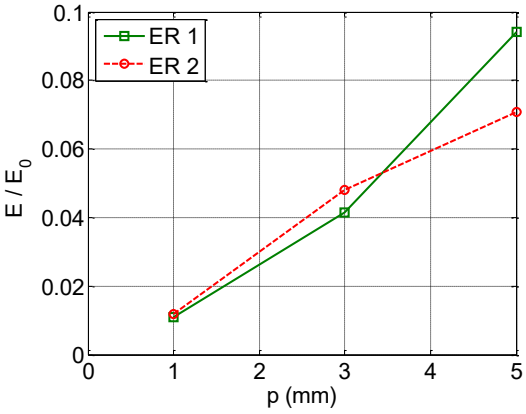
Figure 6: Simulation - analyse en transmission Trans12 et Trans21

3 Bilans énergétiques

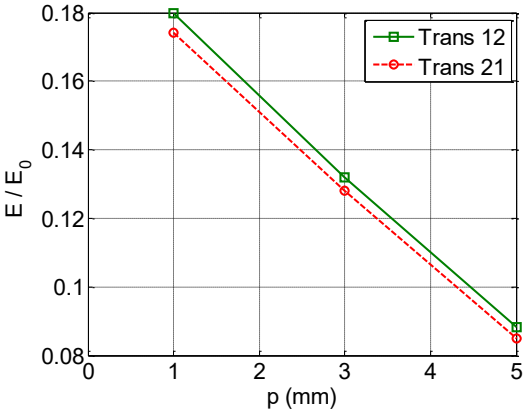
Le calcul des énergies des signaux reçus et transmis est un moyen de quantification de l'état d'endommagement de la barre. Théoriquement pour un signal continu $u(t)$, dont la transformée de Fourier (FFT) est $U(f)$, l'énergie E s'exprime comme suit :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |u(t)|^2 \, dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |U(f)|^2 \, df \qquad (2)$$

Cette relation représente la densité spectrale d'énergie *DSE*. Elle nous permettra par la suite de quantifier l'énergie des signaux et d'interpréter les diminutions ou augmentations d'amplitude de l'écho du mode A_0 que ce soit en émission/réception ou en transmission.



(a)



(b)

Figure 7: Simulation - évolution de l'énergie normalisée en fonction de la profondeur de l'entaille. Tracés en émission-réception (a) et en transmission (b).

Pour l'analyse en émission/réception, on voit bien que l'énergie E normalisée par E_0 (l'énergie du signal d'excitation burst) reçue en fonction d'épaisseur de l'entaille augmente (Figure 7(a)). Les tendances de ces augmentations pour ER1 ou ER2 sont sensiblement identiques, même si les valeurs des énergies à une profondeur p donnée peuvent être légèrement différentes.

Pour l'analyse en transmission, on voit que l'énergie transmise diminue lorsque la profondeur de l'entaille augmente. Les tendances de cette diminution d'énergie pour Trans12 et Trans21 sont aussi les mêmes d'après la Figure 7(b) illustrant les contributions de la profondeur de l'entaille sur le signal transmis.

De manière générale, les bilans des énergies en émission/réception ou en transmission renseignent sur la présence éventuelle de l'entaille et aussi de son épaisseur. Cependant l'étendue ainsi que la position suivant la longueur de la plaque contribuent à la variation de l'énergie du signal (reçu ou transmis) car des conversions ainsi que l'établissement de mode de bout ou de modes stationnaires peuvent s'ajouter dans les spectres des signaux à analyser.

4 Configurations expérimentales

Afin de valider les résultats de simulations numériques, nous effectuons une étude sur une barre en acier ferritique de longueur $L = 1280$mm avec une entaille de largeur $l = 20$mm et de profondeur p suivant l'épaisseur et disposée de la même manière que dans les modélisations numériques précédentes. Deux pastilles piézoélectriques PZ29 de chez Ferroperm sont collées de part et d'autre suivant la longueur. La pastille numéroté 1 est plus proche du défaut à la position $d = 400$mm alors que celle numérotée 2 est à $d = 860$mm. Un burst de 5 périodes délivré par un générateur de fonction Agilent®,est utilisé pour exciter une des pastilles, générant ainsi les modes guidés. Un oscilloscope ainsi que des câbles coaxiaux sont utilisés pour cette expérience afin de visualiser et récupérer les signaux. Le signal d'émission est envoyé à la pastille 1 dans un premier temps et les signaux recueillis sont : ER1 (signal d'émission/réception) et Trans12 (signal transmis) puis dans un second temps à la pastille 2. De la même manière, le signal recueilli en émission/réception est noté ER2 et le signal recueilli en transmission Trans21.

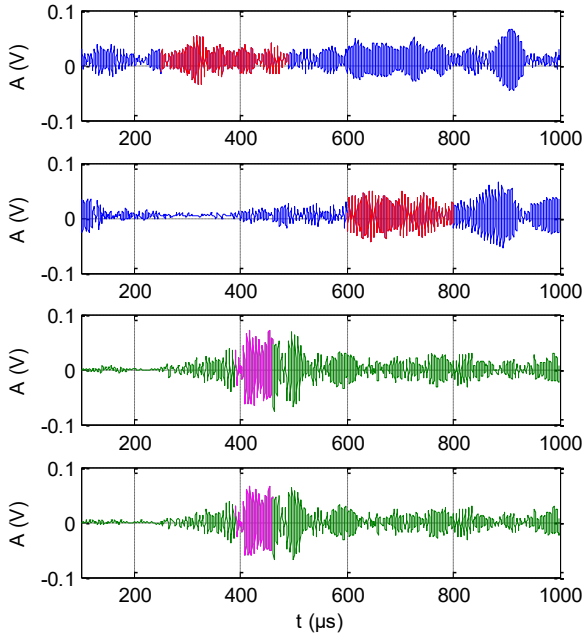


*Figure 8: Relevés expérimentaux des signaux d'acquisition en émission/réception (*ER1 *et* ER2*) et en transmission (*Trans12 *et* Trans21*) sur la barre entaillée de profondeur p = 5mm (voir de haut en bas).*

La Figure 8 montre, pour $p = 5$mm, les signaux acquis (ER1, ER2, Trans12 et Trans21). On peut constater une ressemblance de ces signaux expérimentaux avec les signaux obtenus par simulations avec des temps d'arrivée de l'écho du mode A_0 réfléchi par le défaut et ayant effectué un aller-retour dans la barre, respectivement égaux à $t = 430$µs et $t = 860$µs. Pour les signaux obtenus en émission/réception (bleu) comme pour les signaux obtenus en transmission (vert), nous avons défini une fenêtre d'analyse (rouge et magenta respectivement) sur l'écho la plus importante en amplitude c'est-à-dire le mode A_0 comme dans le cas des simulations. Les courbes d'évolution des bilans d'énergie à partir des spectres obtenus sont tracées à la Figure 9.

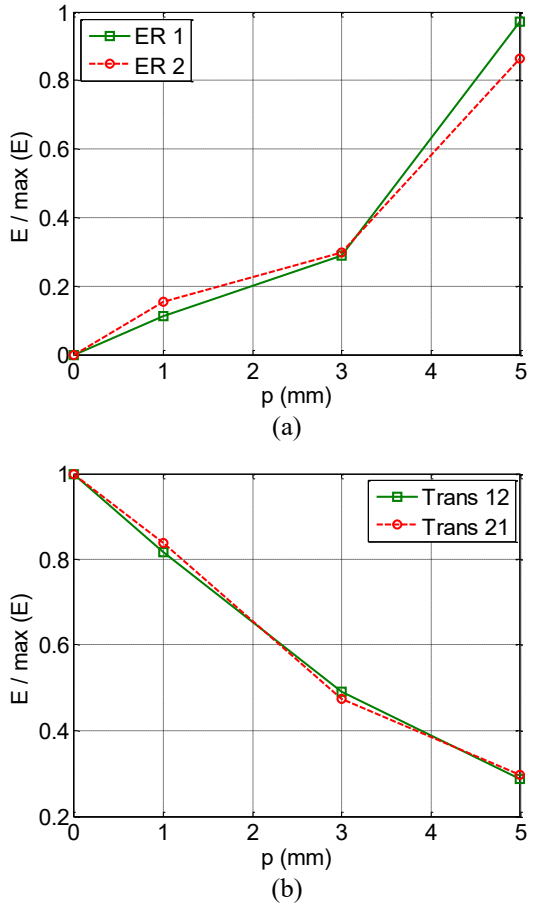


Figure 9: Expérimentation - évolution de l'énergie normalisée en fonction de la profondeur de l'entaille. Tracés en émission-réception (a) et en transmission (b).

On note une augmentation croissante de l'énergie reçue au fur et à mesure que la profondeur de l'entaille *p* augmente en émission réception dans les deux sens et une décroissance de l'énergie lorsque l'analyse est réalisée en transmission. On peut cependant noter en émission/réception et pour une même profondeur d'entaille ($p = 5$mm) selon que l'on travaille de la pastille1 (ER1) vers la pastille2 (ER2) les valeurs des énergies reçues soient différentes. Ceci peut probablement s'expliquer, par des différences de taux de conversion dans les deux configurations. En analyse par transmission, on observe que les énergies transmises à travers le défaut dans les deux cas sont sensiblement les mêmes car les fenêtres d'analyse sont les mêmes et il n'y pas d'atténuation dans la barre en acier. Comme dans les résultats de simulations numériques, on observe des tendances d'évolutions inverses entre l'analyse en émission/réception et l'analyse en transmission.

5 Conclusion

L'étude de la propagation d'ondes de Lamb est réalisée dans un premier temps par la modélisation éléments finis avec le logiciel commercial Comsol Multiphysics© et dans un second temps par l'expérimentation avec des pastilles piézoélectriques collées. Dans les deux cas, à la fréquence de travail (170kHz) des acquisitions de signaux en émission/réception ou en transmission sont réalisées afin de calculer le bilan énergétique permettant de quantifier la contribution du défaut (entaille) présent dans la plaque.

L'ordre de grandeur de la profondeur de l'entaille est quantifiable avec l'étude énergétique. En effet, plus la profondeur est importante, plus la réflexion est importante (i.e moins la transmission est importante).

En analyse en émission/réception comme en analyse en transmission respectivement, on note une évolution de l'énergie (respectivement croissante et décroissante) quasi-monotone en fonction de la profondeur du défaut.

Cette étude montre donc la faisabilité de la détection de défauts de corrosion dans une structure en acier, dont les tailles peuvent être comparées pendant la surveillance et au cours de sa durée de vie.

Références

[1] F. Song, G. L. Huang, and K. Hudson, "Guided wave propagation in honeycomb sandwich structures using a piezoelectric actuator/sensor system," *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 12, p. 125007, 2009.

[2] Y. L. Koh, W. K. Chiu, and N. Rajic, "Integrity assessment of composite repair patch using propagating Lamb waves," *Compos. Struct.*, vol. 58, no. 3, pp. 363–371, Nov. 2002.

[3] J. B. Harley and J. M. Moura, "Data-driven matched field processing for Lamb wave structural health monitoring," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 135, no. 3, pp. 1231–1244, 2014.

[4] E. Le Clezio, M. Valentin Predoi, M. Castaings, B. Hosten, and M. Rousseau, "Numerical predictions and experiments on the free-plate edge mode," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 1, pp. 25–40, Jan. 2003.

[5] R. Basri and W. K. Chiu, "Numerical analysis on the interaction of guided Lamb waves with a local elastic stiffness reduction in quasi-isotropic composite plate structures," *Compos. Struct.*, vol. 66, no. 1–4, pp. 87–99, Oct. 2004.

[6] N. Terrien, D. Osmont, D. Royer, F. Lepoutre, and A. Déom, "A combined finite element and modal decomposition method to study the interaction of Lamb modes with micro-defects," *Ultrasonics*, vol. 46, no. 1, pp. 74–88, Mar. 2007.

[7] N. Terrien, D. Royer, F. Lepoutre, and A. Déom, "Numerical predictions and experiments for optimizing hidden corrosion detection in aircraft structures using Lamb modes," *Ultrasonics*, vol. 46, no. 3, pp. 251–265, juin 2007.

[8] E. Le Clézio, M. Castaings, and B. Hosten, "The interaction of the S0 Lamb mode with vertical cracks in an aluminium plate," *Ultrasonics*, vol. 40, no. 1–8, pp. 187–192, mai 2002.