

CFA/VISHNO 2016

Caractérisation de la performance et de la robustesse des techniques d'imagerie par ondes guidées

J. Moriot^a, N. Quaegebeur^a, P.-C. Ostiguy^a, A. Le Duff^b et P. Masson^a

^aGroupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), 2500 boul. de l'Université, Sherbrooke, Canada J1K 2R1

^bGroupe ESEO - GSII, 10 Boulevard Jean Jeanneteau, CS 90717, 49107 Angers, France
jeremy.moriot@gmail.com



LE MANS

Les techniques d'imagerie acoustique par ondes guidées sont en développement depuis plusieurs décennies. Aujourd'hui leur application dans les secteurs civils et militaires nécessite le développement d'outils permettant d'évaluer leur performance et leur robustesse. Les courbes de probabilité de détection sont largement utilisées pour évaluer la performance des systèmes de contrôle non destructif vis-à-vis de la détection de défaut mais aucun indicateur ne rend compte de la performance de la localisation d'un défaut. De plus de telles courbes sont difficile à obtenir pour les techniques de surveillance de la santé des structures en raison du caractère reproductible de ces techniques. Deux nouvelles métriques ont été récemment introduites et permettent d'évaluer la robustesse de la localisation d'un défaut sur une structure. Ces métriques ont été testées sur trois techniques d'imagerie. Une étude paramétrique numérique est d'abord présentée. Les métriques sont calculées pour différentes positions d'un réflecteur, simulant un défaut. La robustesse des techniques pour différents niveaux de bruit est étudiée. Enfin, une validation expérimentale a été réalisée et permet de valider l'utilisation de ces métriques.

1 Introduction

Les méthodes de Contrôle Non-Destructif (CND) sont largement utilisées pour caractériser l'état des structures dans dans de nombreux secteurs industriels [1]. Dans le secteur aérospace, les inspections périodiques d'un appareil par un opérateur nécessitent son immobilisation et le démontage des pièces qui ne sont pas directement accessibles, ce qui peut représenter un temps d'immobilisation important et un manque à gagner pour l'exploitant. Les méthodes d'imagerie Structural Health Monitoring (SHM), en plus de limiter les opérations de maintenance uniquement lorsqu'un défaut est suspecté, autorisant l'utilisation de matériaux plus légers [2]. Les techniques basées sur la propagation d'ondes guidées transmises par des capteurs piézoélectriques s'avèrent particulièrement peu coûteuses et permettent une inspection « à la demande » et très rapide de structures complexes [3–5].

Aujourd'hui, les techniques SHM sont suffisamment matures pour être appliquées à grande échelle dans les domaines militaires et civils. Les recommandations du document ARP6461 préconisent l'utilisation de courbes de Probabilité de Détection (PDD) pour caractériser la capacité des techniques SHM à détecter un défaut. Pour être obtenues, ces courbes nécessitent un nombre important de tests sur une structure donnée, affectée par différents types et tailles de défauts [6]. Contrairement aux techniques de CND, en SHM chaque test est répétable tant que les conditions d'opération (température, humidité, vitesse du vent, conditions de chargement,...) restent inchangées. La production de courbes de PDD nécessite donc nombre significatif d'échantillons instrumentés de façon identique, ce qui en fait un indicateur difficilement applicable en SHM. De plus, les courbes de PDD ne rendent pas compte des performances d'une méthode en terme de localisation de défaut. Deux métriques ont été développés pour les besoins de cette étude : L'Erreur de Localisation Absolue (ELA) et l'Indicateur de Performance d'Antenne Dimensionnel (IPAD). Ces métriques permettent de caractériser la robustesse des méthodes SHM basées sur la diffusion des ondes guidées pour localiser un défaut.

Dans ce papier, trois techniques d'imagerie acoustique par réflexion d'ondes guidées sont considérées. Ces techniques, ainsi que les métriques

permettant de les caractériser, sont présentées dans la seconde partie de ce papier. Une étude paramétrique a été réalisée numériquement et validée expérimentalement. Dans cette étude, la performance de la localisation des méthodes ainsi que leur robustesse vis-à-vis du niveau de bruit de fond des signaux résiduels sont évaluées. Cette étude est présentée dans la troisième partie.

2 Présentation des techniques d'imagerie et du système expérimental

2.1 Imagerie par réflexion d'ondes guidées

Les méthodes d'imagerie par réflexion, dont le fonctionnement est représenté sur la Figure 1.a, permettent d'obtenir des images de grandes structures avec un faible nombre de transducteurs. Une onde acoustique générée au niveau d'un transducteur se propage dans la structure, est réfléchi par le défaut, puis mesurée au niveau des autres transducteurs. Le signal réfléchi (aussi appelé signal résiduel) est obtenu en soustrayant la réponse en présence du défaut et la réponse obtenue sur la structure saine. La procédure est répétée de sorte que chacun des capteurs agissent tour à tour comme émetteur. Un algorithme d'imagerie, dont l'expression générale est donnée par l'Eq.(1), permet de générer l'image de la structure à partir des signaux résiduels.

$$\mathbf{I} = \left| \sum_E \sum_R \Delta^{\mathbf{A}} \{ \mathcal{H} [\mathbf{r}_{ER}] \} \right|. \quad (1)$$

Dans cette expression, \mathbf{I} est l'index (i.e. la valeur) de chaque pixel de l'image de coordonnées (x, y) . $\mathbf{r}_{ER}(t)$ est le signal résiduel au temps t associé à un couple d'émetteur-récepteur, notés respectivement E et R . $\mathcal{H} [\mathbf{r}_{ER}(t)] = \mathbf{r}_{ER}(t) + j\hat{\mathbf{r}}_{ER}(t)$ est la transformée de Hilbert du signal résiduel. $\Delta^{\mathbf{A}}$ est le processus d'imagerie et $\mathbf{A}(x, y, t)$ est la librairie de signaux utilisés pour générer une image telle que représentée sur la Figure 1.b. Trois techniques d'imagerie ont été sélectionnées.

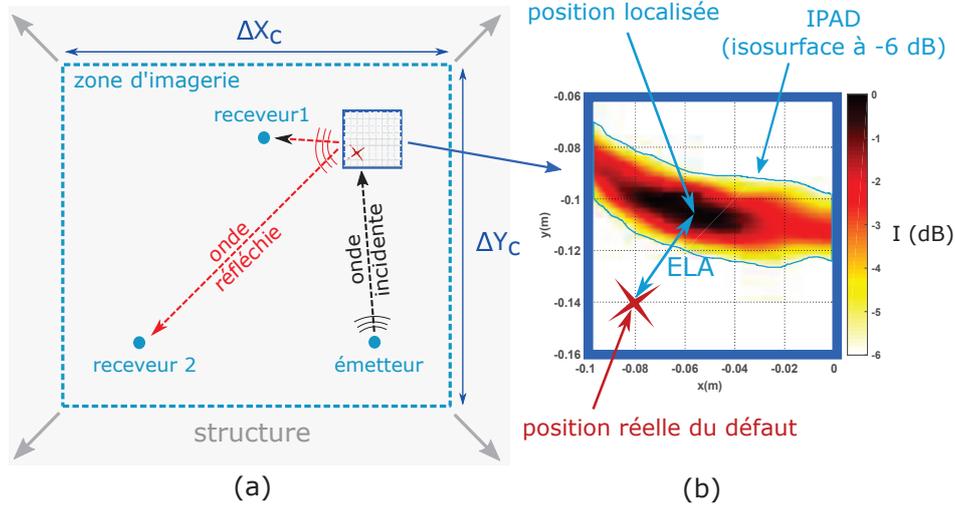


FIGURE 1 – Illustration du processus d'imagerie par réflexion d'ondes guidées (a) ; exemple typique d'une image générée (b).

2.1.1 Delay-and-Sum avec compensation de la dispersion (DAS-DC)

La première méthode consiste à effectuer une opération de compensation de la dispersion du signal résiduel [7] puis à appliquer la technique de Delay-and-Sum, c'est à dire une corrélation du signal compensé $\mathbf{r}^c(t)$ avec une fonction de Dirac retardée du temps de vol correspondant au pixel visé et au mode considéré :

$$\mathbf{I} = \left| \sum_E \sum_R \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{H}[\mathbf{r}_{ER}^c(t)] \delta\left(t - \left[\frac{d_E}{c_g} + \frac{d_R}{c_g} + t_b\right]\right) dt \right|. \quad (2)$$

Dans l'Eq.(2), d_E , d_R et t_b sont respectivement la distance entre l'émetteur et le défaut, entre le défaut et le récepteur et la demi-durée de l'excitation. Seul le calcul des courbes de dispersion est nécessaire pour générer la librairie des fonctions de Dirac et pour effectuer l'opération de compensation de la dispersion. Cette méthode s'avère très rapide mais ne permet pas de prendre en compte la conversion de modes par le défaut.

2.1.2 Excitelet

Dans cette technique, le signal résiduel est corrélé avec les signaux de la librairie \mathbf{A} , appelés atomes, correspondant aux signaux résiduels calculés avec le modèle pin-force couplé à un modèle de propagation [8]. Les atomes ainsi calculés prennent en compte la propagation de plusieurs modes, l'effet dispersif du matériau, l'impédance électro-mécanique des transducteurs, en faisant l'hypothèse d'un profil uniforme de la contrainte de cisaillement sous le transducteur. L'Eq. (1) devient alors :

$$\mathbf{I} = \left| \sum_E \sum_R \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{H}[\mathbf{r}_{ER}(t)] \mathbf{A} dt \right|, \quad (3)$$

Le calcul des atomes nécessite plus de temps que le simple calcul des courbes de dispersion mais peut être effectué une seule fois avant l'imagerie.

2.1.3 Reconstruction parcimonieuse

Dans cette technique, la structure est supposée avoir très peu de défauts (hypothèse de parcimonie), ce qui est le cas ici. Un algorithme itératif cherche à reproduire le signal résiduel avec le moins d'entrées possibles dans la librairie. Dans le cas de signaux bruités, la reconstruction parfaite est impossible. L'algorithme block-sparse *Basis Pursuit Denoise* (BPDN) permet d'obtenir une solution approchée [9] :

$$\underline{\mathbf{I}} = \underset{\Psi}{\operatorname{argmin}} \|\Psi\|_1 \text{ subject to } \|\underline{\mathbf{r}} - \underline{\mathbf{A}}\Psi\|_2 \leq \sigma. \quad (4)$$

Dans cette équation, σ est une borne de bruit que nous choisirons égal à $\|\mathbf{r}(t)\|_2/1.2$. $\underline{\mathbf{A}}$ et $\underline{\mathbf{I}}$ sont respectivement la forme vectorielle de la matrice \mathbf{A} et de la matrice \mathbf{I} . $\underline{\mathbf{r}}$ est la forme vectorielle du signal résiduel \mathbf{r} dans laquelle les signaux correspondant aux différents couples E-R sont mis l'un à la suite de l'autre.

2.2 Système expérimental

Le système expérimental est présenté sur la Figure 2. Une plaque d'aluminium de 60 cm de côtés et de 1,54 mm d'épaisseur est instrumentée avec 3 transducteurs piézoélectriques formant un triangle équilatéral de 20 cm de côté. Une pastille visco-élastique de 5 mm de diamètre sur laquelle une force transversale de 3,4 N est appliquée est utilisée pour simuler un défaut sur la plaque. Un dispositif permet de déplacer la pastille sur l'ensemble des positions constituées du maillage noir et de la partie gauche du maillage rouge sur la Figure 2 et qui représentent la moitié de la zone d'imagerie. Le système possède une symétrie par rapport à l'axe des ordonnées, de sorte que les valeurs des indicateurs pour les abscisses allant de 1 cm à 15 cm sont les valeurs obtenues respectivement aux positions allant de -1 cm à -15 cm. Les dimensions de la zone d'imagerie sont

finalement $\Delta X = \Delta Y = 30$ cm.

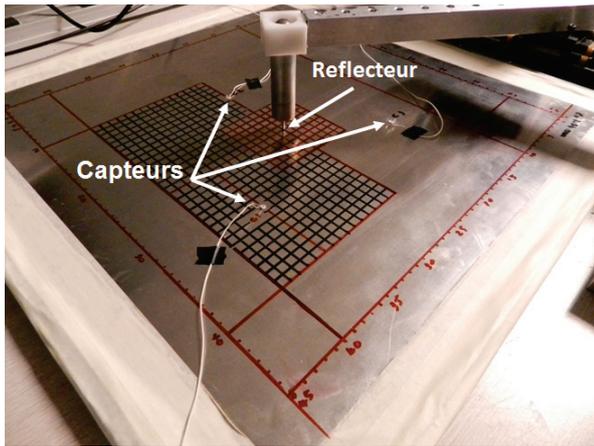


FIGURE 2 – Système expérimental.

Un générateur de fonction HP 33120A et amplificateur Novo Electronics UA8200 sont utilisés pour générer le signal excitateur. Une carte d'acquisition National Instrument NI-5105 permet de mesurer la tension en sortie de chacun des récepteurs et de synchroniser l'acquisition avec l'émission.

3 Résultats

En raison de la taille finie des transducteurs, une sélection fréquentielle est opérée naturellement [10]. Les longueurs d'onde d'amplification et de d'atténuation d'un mode se calculent de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{amplification : } \lambda_a &= \max_{\lambda} \left| J_1 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) \right|, \\ \text{atténuation : } \lambda_r &= \min_{\lambda} \left| J_1 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

Dans l'Eq.(5), a est le diamètre des transducteurs. Les courbes de dispersion ainsi que les longueurs d'onde d'intérêt et les fréquences correspondantes sont représentées sur la Figure 3.

Pour le système considéré ici, le mode A_0 est théoriquement amplifié à 175 kHz. Pour cette raison, l'excitation qui sera considérée par la suite sera un burst sinusoïdal de 3,5 cycles à 175 kHz pondéré par une fenêtre de Hann.

3.1 Cartographie des métriques et taux de localisation

Deux métriques permettent de caractériser la performance de la localisation d'un défaut. L'ELA, qui est la distance euclidienne entre la position réelle du défaut et celle donnée par l'image, correspondant à la position du pixel portant la valeur maximale de l'index et l'IPAD, qui correspond à la surface de l'image à -6 dB, normalisée par rapport à la valeur maximale. Une image est générée pour chacune des positions du réflecteur sur la zone d'imagerie. Ce procédé est réalisé de façon purement numérique puis expérimentalement.

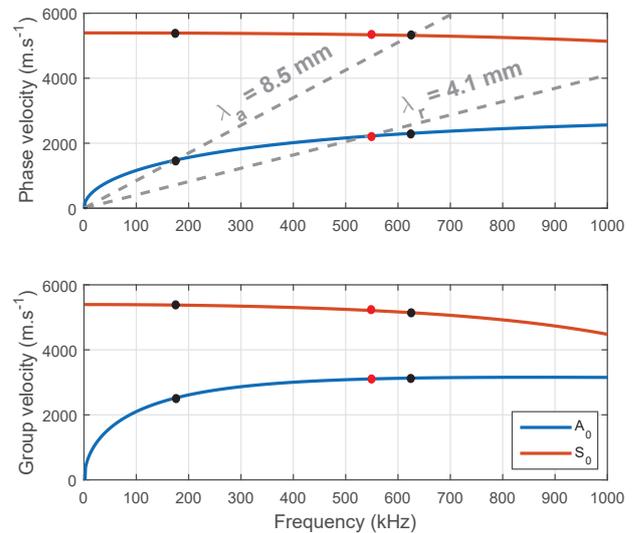


FIGURE 3 – Courbes de dispersion des modes A_0 et S_0 . Points noirs : vitesses relative à une amplification de mode; points rouges : vitesses relative à une atténuation de mode.

Dans les deux cas, les cartographies des valeurs de l'ELA et de l'IPAD sont présentées respectivement sur les Figures 4 et 6. Une valeur seuil de 20 mm a été choisie pour l'ELA. Cette valeur correspond généralement à la distance entre deux rivets sur une aile d'avion par exemple. Les cas pour lesquels l'ELA est supérieure à 20 mm sont considérés comme une non localisation.

Les résultats numériques montrent une ELA égale à 0 quel que soit la position du défaut dans la zone d'imagerie, ce qui correspond à une localisation parfaite. Ce résultat n'est pas surprenant avec les méthodes Excitelet et BPDN puisque le signal résiduel est calculé avec le modèle servant à construire la librairie. En revanche, on s'aperçoit que la compensation de la dispersion du signal dans la méthode DAS-DC est telle qu'une simple formation de voies suffit à obtenir des résultats équivalents aux deux autres méthodes. Expérimentalement, les trois méthodes affichent des résultats très similaires entre elles et très différents des résultats numériques. Les positions situées à l'intérieur de la zone formée par les transducteurs semblent être plus propices à une bonne localisation tandis que les positions situées à proximité des transducteurs sont globalement moins favorables. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le signal est en grande partie masqué lorsque le défaut est situé proche de l'émetteur qui ne contribue alors que faiblement à l'imagerie. Dans ce cas, augmenter le nombre de transducteurs pourrait permettre de diminuer la contribution relative de chaque transducteur et donc d'augmenter l'ELA pour ces positions.

Afin de faciliter la comparaison des performances de ces méthodes en terme de localisation, le taux de positions pour lesquelles l'ELA est inférieure où égale à une certaine valeur est représenté sur la Figure 5. On remarque que le taux de localisation à 2 mm est égal à 15% avec la méthode DAS-DC, à 20% avec la

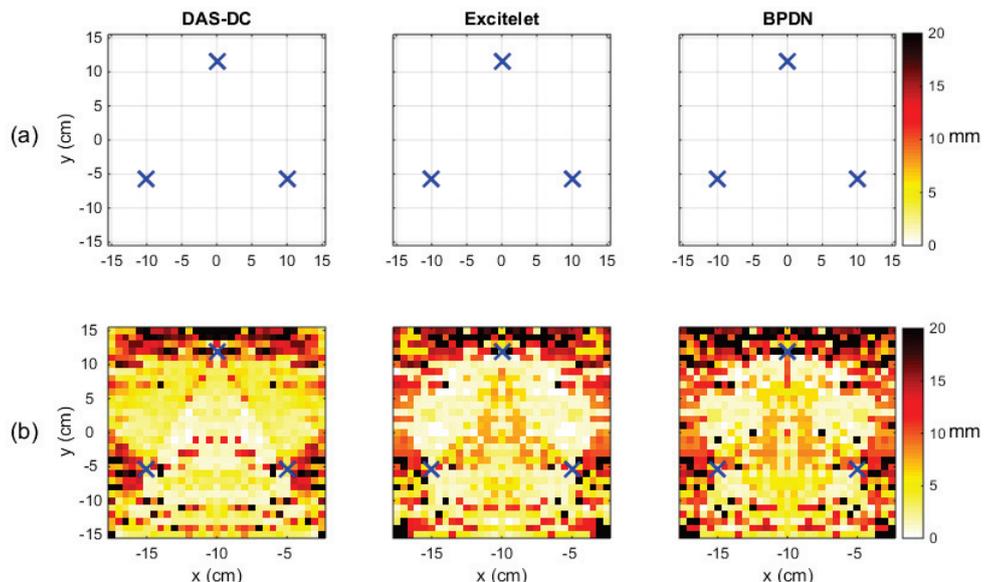


FIGURE 4 – Cartographie des ELA obtenus avec les trois méthodes (a) numériquement et (b) expérimentalement ; les croix bleues représentent la position des transducteurs.

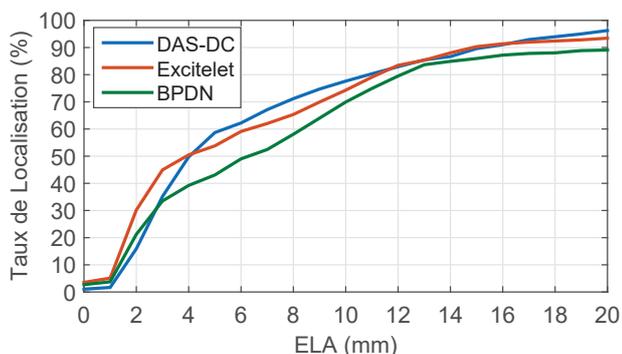


FIGURE 5 – Taux de localisation obtenus expérimentalement.

méthode BPDN et à 30% avec la méthode Excitelet. L'ELA médian (i.e. pour lequel un taux de localisation de 50% est atteint) est de 4 mm pour les méthodes DAS-DC et Excitelet et de 6 mm pour la méthode BPDN. Enfin, pour les trois méthodes, le taux de localisations correctes (i.e. $ELA \leq 20$ mm) est égal à 90%. Les trois méthodes offrent donc des performances similaires en terme de localisation correcte et la méthode Excitelet s'avère plus précise que les méthodes DAS-DC et BPDN.

Dans le cas méthodes Excitelet et DAS-DC, les cartographies des IPAD présentées sur la Figure 6 montrent un comportement très similaire. La valeur de l'IPAD augmente lorsque le défaut est situé sur le chemin entre deux capteurs. Ce résultat est en accord avec l'expérience et est dû au fait que les ellipses correspondant à ces positions et à la paire de capteurs définissant les extrémités du chemin sont très aplaties, de sorte qu'elles forment un segment dont l'épaisseur est d'autant plus importante que le mode considéré est dispersif. Or, le mode A_0 considéré ici pour l'imagerie est très dispersif. Ce résultat a déjà été démontré par le calcul exact des bornes de Cramér-Rao et confirmé par des simulations Monte-Carlo [11]. La méthode

BPDN fait apparaître des valeurs de l'IPAD très faibles quel que soit la position du défaut, ce qui n'est pas surprenant puisque l'intérêt de cette méthode est justement de produire une localisation la moins étendue possible. Pour les trois méthodes, les cartographies obtenues expérimentalement sont en accord avec celles obtenues numériquement.

3.2 Robustesse des méthodes par rapport au bruit de fond

Dans cette section, la robustesse de la localisation est caractérisée en fonction du niveau de bruit du signal résiduel. Le signal résiduel sélectionné correspond à une position de défaut pour laquelle l'ELA est nulle en l'absence de bruit. Un bruit blanc gaussien a été ajouté artificiellement au signal résiduel. Le niveau de bruit est défini par le Rapport Signal sur Bruit en Amplitude (RSBA) défini comme :

$$RSBA = 20 \log_{10} \left(\frac{\max |Sig|}{\max |BdF|} \right), \quad (6)$$

où sig et BdF représentent respectivement l'amplitude du signal et l'amplitude du bruit de fond en fonction du temps. Cette définition est préférée au RSB classiquement employé car il a été observé que les trois méthodes sont capable de très bien localiser le défaut tant que le pic d'amplitude du signal temporel correspondant au mode A_0 ressortait du bruit de fond. L'imagerie est effectuée sur 50 versions du signal résiduel bruité. Pour les trois techniques, la valeur moyenne et l'écart-type de l'ELA et de l'IPAD en fonction de niveau de bruit sont présentés sur la Figure 7 dans le cas numérique et sur la Figure 8 dans le cas expérimental.

Les résultats numériques montrent une très bonne robustesse des trois méthodes puisque l'ELA est toujours inférieure à 15 mm de -10 dB à 20 dB. Pour la méthode Excitelet, l'ELA moyenne est toujours égale à 0, ce qui en fait la méthode la plus robuste des trois.

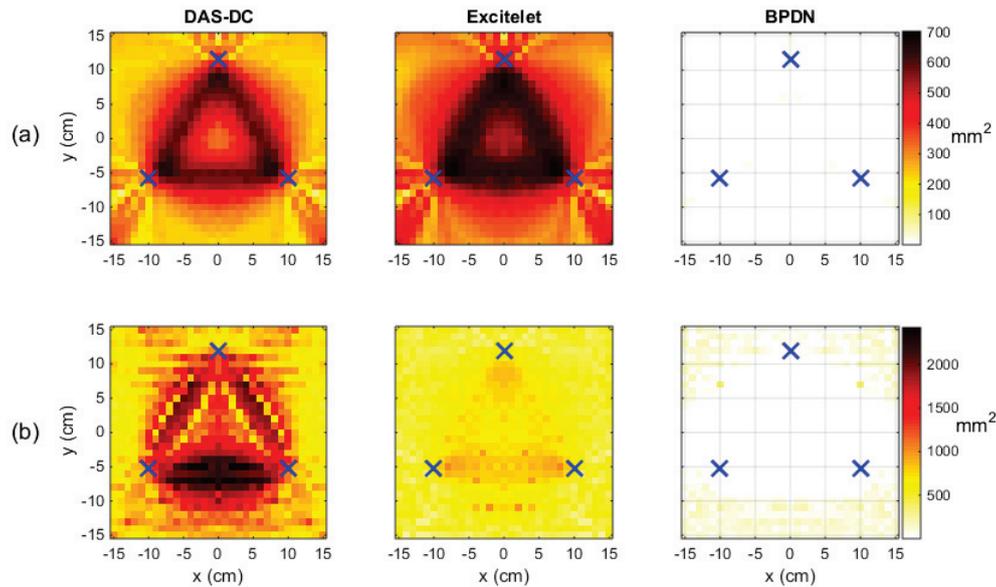


FIGURE 6 – Cartographie des IPAD obtenus avec les trois méthodes (a) numériquement et (b) expérimentalement ; les croix bleues représentent la position des transducteurs.

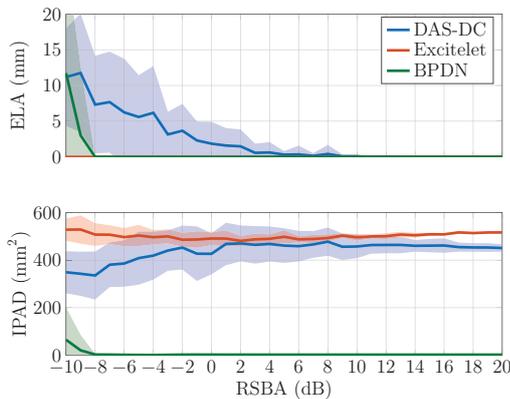


FIGURE 7 – Valeur moyenne (trait plein) et intervalle de confiance (zone transparente) des indicateurs, en fonction du niveau de bruit du signal résiduel modélisé numériquement.

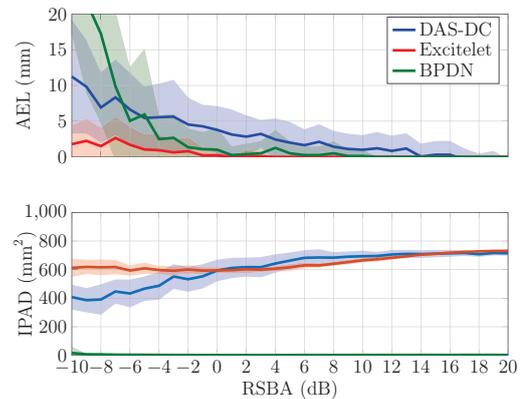


FIGURE 8 – Valeur moyenne (trait plein) et intervalle de confiance (zone transparente) des indicateurs, en fonction du niveau de bruit du signal résiduel mesuré expérimentalement.

La méthode BPDN voit son ELA moyenne décroître rapidement pour atteindre une valeur nulle à partir de -8 dB. En revanche, la méthode DAS-DC a une ELA moyenne qui décroît progressivement pour passer sous les 5 mm à -4 dB et atteindre une valeur nulle à 6 dB. Un IPAD inférieur à 100 mm² avec une très faible dispersion est toujours observé pour la méthode BPDN alors qu'il fluctue autour de 500 mm² pour les méthodes Excitelet et DAS-DC.

Les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 8 montrent un bon accord avec les résultats numériques. La méthode Excitelet est la plus robuste avec une ELA moyenne qui vaut environ 2 mm à -10 dB et qui décroît progressivement pour atteindre une valeur nulle à 0 dB. Dans le cas de la méthode DAS-DC, l'ELA moyenne vaut environ 10 mm à -20 dB et décroît progressivement pour passer en-dessous de 5 mm à -2 dB et atteindre une valeur nulle à 16 dB. La méthode BPDN a une ELA moyenne qui passe sous le seuil de localisation aux alentours de -8 dB et qui chute rapidement pour passer

en-dessous de 5 mm à -5 dB et atteindre une valeur nulle à 6 dB. Les valeurs expérimentales d'IPAD sont plus élevées d'environ 200 mm² que dans le cas numérique pour les techniques Excitelet et DAS-DC. Dans le cas de la méthode BPDN, un IPAD inférieur à 50 mm² est toujours observé.

4 Conclusion

Dans ce papier, deux indicateurs permettant de caractériser la performance et la robustesse des systèmes SHM en terme de localisation de défauts ont été proposés et testés sur trois techniques d'imagerie par ondes acoustiques guidées. Un système constitué d'une plaque d'aluminium instrumentée par trois transducteurs piézoélectriques a été considéré. La cartographie des indicateurs pour différentes positions du défaut sur la plaque montre un bon accord de l'IPAD entre les résultats numériques et expérimentaux. Des

variations notables sont observées dans le cas de l'ELA. Ces écarts peuvent être réduits en augmentant le nombre de transducteurs et en recherchant expérimentalement la fréquence optimale pour effectuer l'imagerie. Les cartographies permettent de comparer la performance des techniques dans un cas où le bruit de fond n'est pas significatif. Dans ce cas, la méthode de reconstruction parcimonieuse avec l'algorithme BPDN s'avère donner les meilleurs résultats. Une étude de robustesse a permis de mettre en évidence les performances des trois techniques alors qu'un bruit de fond était ajouté aux signaux résiduels. Les résultats expérimentaux sont en accord avec les résultats numériques, tant pour l'ELA que pour l'IPAD. La méthode Excitelet s'avère être la plus robuste par rapport au bruit de fond puisqu'elle permet d'obtenir l'ELA la plus faible même lorsque les signaux sont fortement bruités. La méthode BPDN, permet cependant d'obtenir des valeurs d'IPAD très faibles et donc une interprétation plus simple des images obtenues. Cependant, l'ELA observée expérimentalement est supérieure au seuil fixé dans le cas de signaux très bruités. Ces indicateurs permettront dans un futur travail, de relier le niveau de bruit du signal résiduel à la taille du défaut et à l'ELA, ce qui permettra de générer des courbes de probabilité de localisation.

Remerciements

Cette étude a été financée par l'institut Le Mans Acoustique (LMAc). Les auteurs remercient aussi le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).

Références

- [1] A. S. Birks, Robert E. Green, and Paul McIntire. *Ultrasonic Testing : 7 (Nondestructive Testing Handbook)*. Amer. Society for Nondestructive, 1991.
- [2] Guidelines for implementation of structural health monitoring on fixed wing aircraft. Technical report, SAE International, 2013.
- [3] N. Quaegebeur, P.-C. Ostiguy, and P. Masson. Correlation-based imaging technique for fatigue monitoring of riveted lap-joint structure. *Smart Mater. Struct.*, 23(5) :055007, 2014.
- [4] J.-B. Ihn and F.-K. Chang. Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures. *Struct. Heal. Monit.*, 7(1) :5–19, 2008.
- [5] James S Hall, Paul Fromme, and Jennifer E Michaels. Ultrasonic guided wave imaging for damage characterization. In *Aircr. Airworthiness Sustain. Conf.*, pages 1–13, San Diego, CA, 2011.
- [6] G. A. Georgiou. Probability of Detection (PoD) curves : Derivation, applications and limitations. *Insight - Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, 49(7) :409–414, 2007.
- [7] Paul D. Wilcox. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE T. Ultrason Ferr.*, 50(4) :419–427, 2003.
- [8] N. Quaegebeur, P. Masson, D. Langlois-Demers, and P. Micheau. Dispersion-based imaging for structural health monitoring using sparse and compact arrays. *Smart Mater. Struct.*, 20(2) :025005, 2011.
- [9] Ross M. Levine and Jennifer E. Michaels. Block-Sparse Reconstruction and Imaging for Lamb Wave Structural Health Monitoring. *IEEE T. Ultrason Ferr.*, 61(6) :1006–1015, 2014.
- [10] Ajay Raghavan and Carlos E S Cesnik. Finite-dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring. *Smart Mater. Struct.*, 14(6) :1448–1461, 2005.
- [11] Alain Le Duff, Nicolas Quaegebeur, Pierre-Claude Ostiguy, and Patrice Masson. Precision of imaging algorithms based on ToF estimation of guided waves. In *EWSHM 7th Eur. Work. Struct. Heal. Monit.*, pages 615–622, France, 2014.