

## CFA/VISHNO 2016

**Implantation efficace de l'acquisition pleine matrice en imagerie ultrasonore temps réel**P. Masson<sup>a</sup>, N. Quaegebeur<sup>a</sup> et F. Mainguy<sup>b</sup><sup>a</sup>Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), 2500 boul. de l'Université, Sherbrooke, Canada J1K 2R1<sup>b</sup>PRAGMA, 2925 avenue Kepler, Québec, AB, Canada G1X 3V4  
patrice.masson@usherbrooke.ca

LE MANS

L'acquisition pleine matrice (*Full-Matrix Capture* - FMC) réfère à l'acquisition de signaux dans le domaine temporel pour chaque combinaison d'éléments émetteurs et récepteurs dans une antenne. Le *Total Focusing Method* (TFM) est un exemple d'algorithme qui peut être réalisé en pratique par le post-traitement de la FMC, en utilisant tous les éléments de l'antenne pour focaliser en chaque point de la structure à inspecter. L'algorithme Excitelet présenté dans cet article exploite aussi les données brutes issues de la FMC, tout en permettant une implémentation en temps réel. Dans cet algorithme, pour chaque point (pixel) d'un maillage défini sur la structure à inspecter, des signaux théoriques sont calculés en utilisant la méthode de la réponse impulsionnelle spatiale (*Spatial Impulse Response* - SIR) et mis en mémoire de façon à être corrélés par la suite avec les signaux mesurés. L'algorithme Excitelet est ici implanté sur une plate-forme GPU pour démontrer quelques-uns de ses avantages, notamment: 1) sa flexibilité pour prendre en compte et compenser naturellement la directivité et la dynamique des transducteurs, les conditions aux frontières, la conversion de mode, la propagation dans un milieu multicouches, et les matériaux amortis et dispersifs, 2) sa capacité de réduire significativement le nombre de transducteurs sans perte de qualité de l'image, et 3) l'amélioration de la précision de l'imagerie en champ proche, i.e. pour des défauts localisés à une profondeur de l'ordre de grandeur de l'ouverture de l'antenne (focale  $f$  plus petite que 1). L'algorithme Excitelet a été validé pour l'inspection de structures métalliques en utilisant des sondes par formation de voies (*phased-array*) avec des sabots angulaires. Une amélioration de la résolution de l'imagerie est démontrée pour une charge de calcul approximativement équivalente à celle de la TFM. Des améliorations en termes d'étendue de région inspectée et de discrimination de réflecteurs sont aussi démontrées.

## 1 Introduction

La plupart des tâches d'inspection de structures sont à ce jour effectuées par des approches de Contrôle Non-Destructif (CND) nécessitant l'extraction, par un technicien qualifié, d'informations sur l'état de santé de la structure. Dans le seul secteur aéronautique, ces coûts atteignent plus de 10 milliards de dollars annuellement [1]. Parmi les techniques existantes, les méthodes fondées sur la propagation d'ondes ultrasonores transverses (S) ou longitudinales (P) par l'intermédiaire de sondes mono-éléments (A-Scan) sont utilisées depuis plusieurs décennies et tendent à être graduellement remplacées par des inspections à l'aide de sondes multi-éléments permettant l'obtention rapide d'images (B-Scan et C-Scan) représentatives des défauts d'une structure. La méthode classiquement utilisée repose sur l'analyse des temps de vol et la formation de voies dans le domaine temporel (*beamforming*) afin d'obtenir une image représentative des réflexions induites par de potentiels défauts.

L'intérêt porté par la communauté aéronautique pour les systèmes d'inspection in-situ des structures - *Structural Health Monitoring* (SHM) - ne cesse de s'accroître car ils permettront une réduction substantielle des coûts annuels d'inspection, actuellement conduite par des techniques CND [1]. La stratégie utilisée à l'heure actuelle repose sur le principe de propagation d'ondes guidées à travers la structure (ondes de Lamb) générées par une matrice de céramiques piézoélectriques utilisées comme émetteurs et récepteurs. L'évaluation de l'intégrité de la structure requiert l'analyse des signaux afin de détecter la présence éventuelle de défauts dans la structure. Aussi, un gain de temps d'utilisation ainsi que de fiabilité de la détection peut être atteint en améliorant les analyses des résultats d'inspection.

Aussi, dans toutes les technologies proposées en CND ou SHM, une solution logicielle robuste et fiable de localisation des défauts est requise. Ce point a fait l'objet de nombreuses recherches et des solutions fondées sur les variations des signaux temporels (méthodes de focalisation ou TFM [2-4], *Delay-and-Sum* [5-8], retournement temporel [9-10]) ont été proposées mais sont soumises à des limitations pratiques en termes de résolution d'imagerie en

champ proche, de fréquence d'utilisation et de complexité d'implantation en vue d'une application temps réel.

Dans cette étude, une méthode d'imagerie par corrélation intitulée « Excitelet » est proposée pour le CND [11-12] ou le SHM [13-14]. Le principe est de corréler les signaux mesurés par un réseau de capteurs à ceux calculés de manière théorique. Aussi, cette technologie permet l'imagerie des défauts potentiels dans la structure de manière plus précise, quelle que soit la configuration de la tâche d'inspection. En outre, même lorsque la structure est fortement dispersive, la technologie proposée demeure valide, ce qui permet une grande flexibilité d'utilisation et l'implantation temps-réel pour les ondes de volume ou les ondes guidées.

## 2 Imagerie par corrélation

### 2.1 Formulation générale

Dans cette section, nous considérons une tâche d'inspection typique en CND à l'aide d'une antenne de transducteurs. Le raisonnement est général, de manière qu'il peut être simplement transposé à n'importe quelle situation d'imagerie à l'aide d'une antenne de transducteurs.

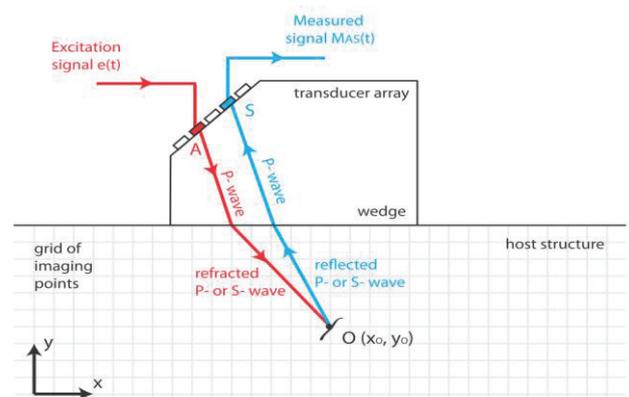


Figure 1: Schéma de la zone d'imagerie dans le cas d'une sonde ultrasonore (onde P ou S) montée sur un sabot.

Une grille d'observation  $(x,y)$  est tout d'abord définie pour la structure à inspecter tel que représenté à la Fig. 1. La méthode Excitelet vise à définir pour chaque point de la grille, la probabilité pour qu'un réflecteur (représentatif d'un défaut) soit présent. Pour ce faire, la méthode utilise une connaissance des propriétés de propagation dans la structure inspectée pour estimer, pour un mode de propagation donné, le signal  $T_{AS}(x,y,t)$  pour chaque émetteur  $A$ , capteur  $S$  et point de la grille d'observation.

Un modèle analytique, numérique ou expérimental de propagation dans la structure est donc requis. Le signal ainsi estimé est ensuite corrélé avec la mesure  $M_{AS}(t)$  afin de définir pour chaque point de la grille, la probabilité de présence d'un défaut ayant engendré une réflexion de l'onde incidente en mesurant l'indice de corrélation  $C(x,y)$  défini ci-dessous:

$$C(x,y) = \frac{1}{N^2} \sum_A \sum_S T_{AS}(x,y,t) * M_{AS}(t), \quad (1)$$

où  $N$  représente le nombre d'éléments de la sonde et  $*$  désigne l'opérateur de corrélation, qui peut être défini dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel en utilisant le formalisme de corrélation croisée généralisée (*Generalized Cross-Correlation - GCC*) [15].

L'Eq. (1) représente ainsi une extension de la méthode classique de *Total Focusing* ou de *Delay-and-Sum* qui ne considère que le temps de vol entre l'émetteur, le point d'observation et le capteur, ce qui revient à considérer :

$$T_{AS}(x,y,t) = \delta\left(t - \frac{\sqrt{(x-x_A)^2 + y^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x-x_S)^2 + y^2}}{c}\right) \quad (2)$$

où  $c$  désigne la vitesse de propagation des ondes dans le milieu considéré et  $\delta(\cdot)$  représente la fonction de Dirac. Le concept d'imagerie par la méthode Excitelet est d'augmenter la résolution et la versatilité de l'opération d'imagerie en créant une banque de signaux théoriques s'approchant au mieux des signaux mesurés tel que présenté à la Fig. 2.

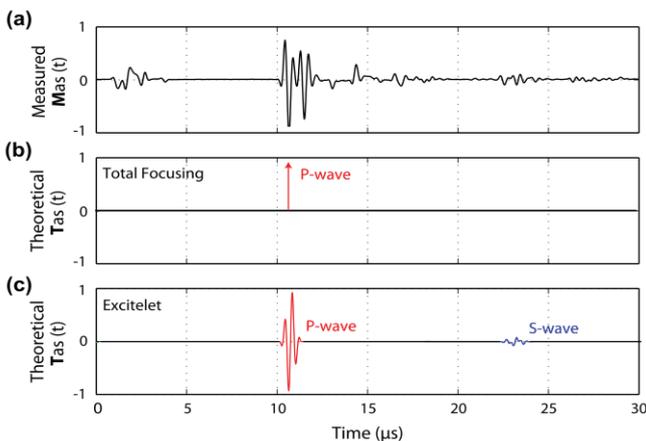


Figure 2: Principe de corrélation entre signal mesure (a), méthode de *Total Focusing* ou *Delay-and-Sum* (b) et Excitelet (c).

## 2.2 Application aux ondes de volume

Dans le cas d'inspection ultrasonore par ondes de volume, un modèle de propagation fondé sur le formalisme de Réponse Impulsionnelle Spatiale (*Spatial Impulse Response - SIR*) [16] apparaît comme la meilleure solution afin de construire efficacement une banque de signaux théoriques pour un réflecteur localisé en chaque point d'une grille.

Ce modèle direct peut inclure les réponses électromécaniques de l'émetteur et du récepteur, leur directivité, la conversion de mode éventuelle dans un sabot, l'atténuation ainsi que la dispersion des ondes dans les matériaux complexes et les réflexions multiples aux interfaces, tel que présenté à la Fig. 3.

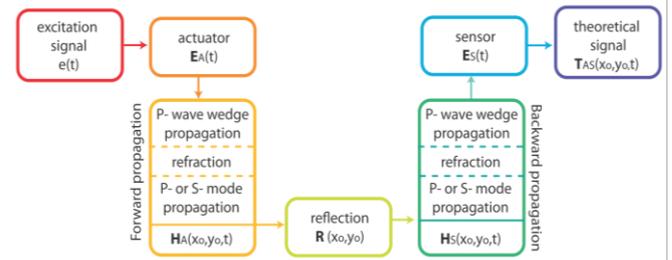


Figure 3: Principe de calcul du signal théorique  $T_{AS}(x,y,t)$  dans le cas d'une inspection par onde de volume.

## 2.3 Application aux ondes guidées

Dans le cas d'ondes guidées (ondes de Lamb dans le cas de matériaux isotropes), un modèle théorique de génération d'onde et de propagation peut être utilisé et inclure la dispersion des ondes, le caractère multimodal de la propagation, la dynamique des transducteurs, leur directivité ainsi que l'anisotropie dans le cas de structures composites.

Dans le cas de structures simples (plaques minces et dérivés), la modélisation de la fonction de transfert s'effectue en considérant les équations de Navier dont les termes d'excitation sont dérivés du patron de cisaillement à l'interface entre le transducteur et la structure hôte [17]. Dans le cas de structures plus complexes (extrusions, structures très courbées) ou lorsque la dynamique du transducteur doit être prise en compte de manière raffinée, un modèle par éléments finis peut être requis.

## 2.4 Performances et avantages

Le fait de prendre en compte la dynamique des transducteurs ainsi que leur directivité permet une augmentation de la résolution du résultat d'imagerie, mais surtout de s'affranchir de la contrainte de taille limite des éléments. En effet, afin de limiter la complexité des patrons de directivité, le dimensionnement des éléments est effectué en considérant que la largeur de chaque élément ne doit pas dépasser une longueur d'onde  $\lambda$ , limitant ainsi l'énergie transmise et mesurée. Le fait de considérer et de compenser la directivité des éléments permettrait ainsi de considérer des éléments plus larges et donc d'augmenter le rapport

signal à bruit, ou encore d'augmenter la gamme de fréquence utilisée et gagner en précision. De plus l'imagerie en champ proche, limitée par les effets de directivité complexes, devient également possible avec la technique d'imagerie par corrélation. Dans cette section, les performances de l'algorithme d'imagerie par corrélation sont évaluées à l'aide de simulations numériques pour lesquelles les signaux mesurés  $M_{AS}(t)$  sont estimés avec le même modèle que celui utilisé pour construire la banque de signaux théoriques  $T_{AS}(x, y, t)$  en considérant un point source. Afin d'illustrer les avantages de la méthode d'imagerie pas corrélation, les résultats d'imagerie obtenus dans le cas d'une inspection par onde de volume (onde S-) à l'aide d'un sabot à  $60^\circ$  sont présentés à la Fig. 4. L'ouverture de 32 mm est gardée constante et le nombre d'éléments est réduit de 32 à 4, de telle sorte que la taille de chaque élément augmente de 1 à 8 mm.

Un point réflecteur est considéré dans la zone illuminée par la sonde et le résultat d'imagerie (ou *Point Spread Function* - PSF) avec un contraste de 20 dB est représentée autour d'un point source sur une zone de  $\pm 5 \lambda$ . Tel qu'observé sur la Fig. 4, la méthode *Total Focusing* permet de garantir un bon résultat d'imagerie pour des tailles d'éléments de l'ordre de  $1.5 \lambda$ . Au-delà de  $3 \lambda$ , les résultats d'imagerie se détériorent et un fort étalement du point source est observé. En revanche, dans le cas de l'imagerie par la méthode de corrélation demeurent inchangés pour des tailles d'éléments allant jusqu'à  $12 \lambda$ .

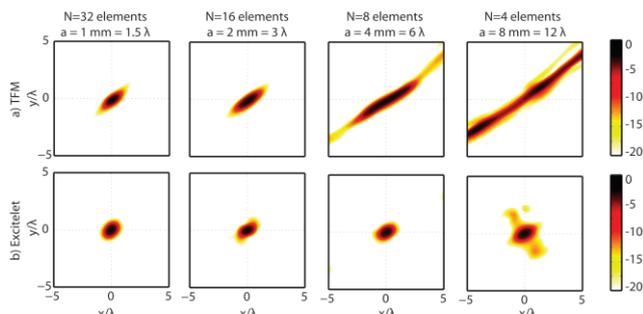


Figure 4: Résultats d'imagerie en champ lointain par onde S- en considérant une antenne de dimension totale fixe (32 mm) et dont la largeur des éléments augmente.

L'imagerie en champ proche apparaît comme une limitation des systèmes actuels que seule la technique par corrélation peut surmonter. En effet, l'étendue de la réponse temporelle mesurée lorsqu'un défaut (rupture d'impédance) est situé en champ proche (de l'ordre de 0 à  $5 \lambda$ ) rend l'imagerie par temps de vol inadaptée. En revanche, la formulation par corrélation permet de compenser cet étalement et un gain en termes de précision est même observé en champ proche.

Ceci est illustré à la Fig. 5 qui compare les résultats d'imagerie obtenus en champ lointain et champ proche avec l'approche TFM. Dans ce cas, une inspection par contact direct est utilisée et la profondeur d'un point source varie entre 50 et 5 mm (de  $50$  à  $5 \lambda$ ). Une dégradation de la zone d'imagerie est observée à partir de 10 mm et un décalage spatial du maximum d'imagerie ainsi qu'un étalement spatial sont observés, de telle sorte que la détection est biaisée en champ proche. En revanche, une augmentation de la précision du résultat d'imagerie est observée,

notamment due au fait que l'étalement spatial des signaux mesurés est bien compensé par l'utilisation d'une banque de signaux prenant en compte la directivité en champ proche.

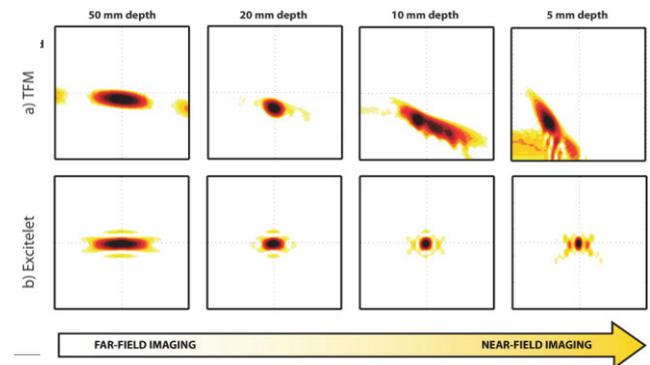


Figure 5: Résultats d'imagerie à différentes profondeurs dans le cas d'une inspection en contact par onde P- et d'une antenne de 32 mm composée de 32 éléments.

## 2.5 Implantation matérielle et logicielle

Dans le cas d'une solution de CND, la contrainte temps réel impose que le traitement de l'information et le calcul du résultat d'imagerie soit effectué en moins de 30 ms, ce qui impose des limitations pratiques en termes de nombre de pixels contenus dans chaque image et de nombre d'éléments disponibles pour l'imagerie. Dans le cas d'un système de surveillance embarquée (SHM), cette contrainte est levée, rendant la résolution de l'image obtenue illimitée.

Néanmoins, le formalisme de la formulation par corrélation décrit à l'Eq. (1) est compatible avec une implantation parallèle sur carte graphique (GPU). En effet, le calcul de corrélation peut être effectué par chaque cœur du processeur graphique, ce qui ne requiert que la mémorisation du signal théorique au pixel considéré. De cette façon, le signal mesuré peut être retenu dans la mémoire vive dédiée (DDR) et adressée par chaque cœur à l'aide de la cache (L1 ou L2 en fonction de l'opération). L'implantation ne requiert ainsi que d'enregistrer les signaux de référence et ensuite de faire une corrélation temporelle ou fréquentielle. Dans le cas d'une solution embarquée, tel que celle rencontrée en CND, l'utilisation d'une plateforme dédiée à faible consommation (NVIDIA TEGRA K1 [18]) rend ainsi possible l'exécution temps réel de l'algorithme par corrélation. L'implantation dans une solution matérielle et logicielle est en cours de finalisation par la société PRAGMA pour la gamme de produits PragmaLite Pro.



Figure 6: Processeur Nvidia Tegra K1 (gauche) pour l'implantation temps réel dans la solution PragmaLite Pro offerte par PRAGMA (droite).

### 3 Validation expérimentale

#### 3.1 Inspection par ondes de volume

Dans le cas d'ondes de volume, la validation expérimentale a été effectuée en champ lointain par ondes de cisaillement tel qu'illustré à la Fig. 7 [19]. Une sonde 64 éléments (dont 32 actifs) de fréquence centrale 5 MHz dont les éléments mesurent 0,6 x 10 mm est montée sur un sabot de Rexolyte d'angle 30° afin de générer principalement des ondes de cisaillement ( $\lambda \approx 0,6$  mm) dans un bloc d'acier contenant une série de 15 trous de part en part. La distance moyenne entre les trous et la sonde est d'environ 80 mm de telle sorte que l'hypothèse de champ lointain est validée pour cette tâche d'inspection. L'acquisition de la matrice plein (FMC) est effectuée pour les 32 premiers éléments de la sonde. L'imagerie est réalisée sur une zone de 100 x 50 mm avec une résolution de 0,5 mm.

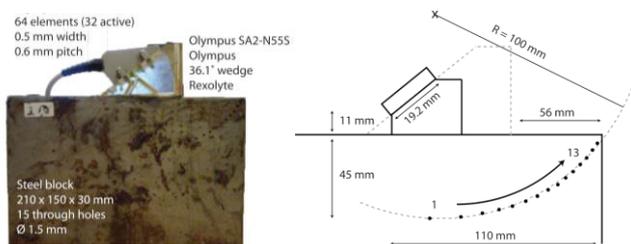


Figure 7: Configuration expérimentale pour la validation de l'algorithme d'imagerie par ondes de volume.

La Fig. 8 représente des résultats d'imagerie avec un contraste de 20 dB obtenus dans le cas où les 32 transducteurs sont utilisés en émission et réception (32 tirs UT et 512 signaux analysés). Afin de comparer les performances des différents algorithmes, les résultats d'imagerie autour du trou #3 sont également présentés dans différentes configurations :

- 32 émetteurs / 32 récepteurs (512 signaux)
- 1 émetteur / 32 récepteurs (32 signaux)
- 1 émetteur / 8 récepteurs (8 signaux)

Dans les trois cas, les deux algorithmes permettent d'obtenir une image nette et la résolution latérale des deux méthodes est similaire. En revanche, une réduction d'un facteur 2 sur la résolution axiale est observée avec la méthode par corrélation, permettant éventuellement une meilleure discrimination des défauts dans la profondeur.

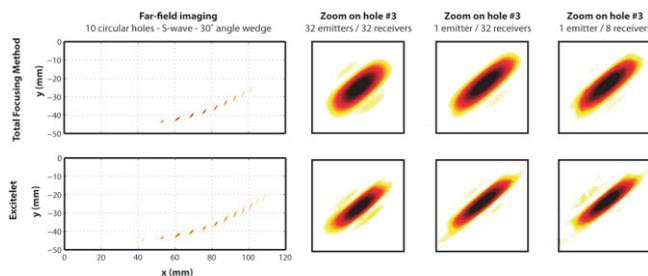


Figure 8: Résultats d'imagerie par les méthodes TFM et par corrélation et zoom sur le trou #3 [19].

En outre, le fait de diminuer le nombre d'émetteurs ne dégrade pas le résultat d'imagerie, de telle sorte que l'utilisation de 32 émetteurs et ainsi l'acquisition de la

matrice pleine (FMC) ne sont pas forcément requises pour obtenir des résultats de haute résolution.

#### 3.2 Inspection par ondes guidées

La validation par ondes guidées pour une application de surveillance embarquée (SHM) est effectuée sur un joint riveté représenté à la Fig. 9. La structure de taille 0,25 x 0,9 m est composée de deux plaques d'aluminium de 1,54 mm d'épaisseur assemblées par une ligne de 15 rivets d'un diamètre de 3,2 mm. La structure est instrumentée d'un côté à l'aide d'une antenne compacte de 8 céramiques piézoélectriques collée avec de l'époxy. La structure instrumentée est soumise à un test de fatigue en traction sous une charge de  $9 \text{ kN} \pm 7 \text{ kN}$ , de telle sorte qu'une fissure de fatigue apparaît à partir de 147 000 cycles entre les rivets 3 et 4 et s'étend après 150 000 cycles entre les rivets 3 et 6. Après 160 000 cycles, la rupture complète de la structure est observée.

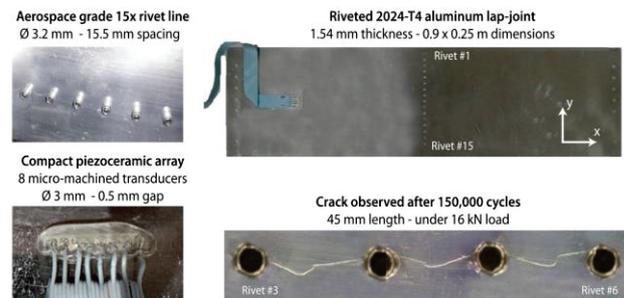


Figure 9: Configuration expérimentale pour la validation de l'algorithme d'imagerie par ondes guidées.

Des mesures FMC des réponses ultrasonores à une excitation à l'aide d'un burst (sinus de 350 kHz fenêtre par une Hanning the 3,5 cycles) sont effectuées à intervalle régulier (tous les 2 500 cycles environ). Ces mesures sont effectuées sous chargement nominal (fissure ouverte sous 9 kN) et en l'absence de chargement (fissure fermée). Les résultats d'imagerie sont présentés à la Fig. 10 pour les deux conditions de chargement.

Sur la Fig. 10, la zone endommagée est clairement identifiée comme une zone de grande corrélation entre la mesure et le signal obtenu théoriquement après réflexion. Dans le cas où la fissure est ouverte (sous chargement de 9 kN), la réflexion induite est très franche et visible au début de la phase de propagation (à 148 000 cycles, la fissure mesure 30 mm). Ensuite, le suivi de l'évolution de la taille de la fissure peut être effectué à l'aide du niveau de corrélation qui augmente avec la taille de la fissure (45 mm à 150 000 cycles et 60 mm à 155 000 cycles).

Dans le cas sans chargement, l'interaction de l'onde guidée avec la fissure fermée est moindre, de telle sorte que la zone affectée ressort du reste de la structure mais le niveau de corrélation est relativement faible (5 % à 148 000 cycles). En revanche, lorsque la zone affectée est étendue, le niveau de corrélation augmente et une bonne localisation de la zone endommagée est également relevée.

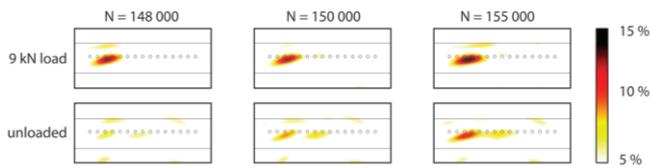


Figure 10: Résultats d'imagerie par la méthode de corrélation pour différents états d'endommagement et différents chargements.

### 3.3 Détection de sources acoustiques

La méthode par corrélation a également été appliquée pour la détection de sources acoustiques par une antenne de microphones dans le domaine audible [20]. Dans ce cas, il s'agit d'une approche passive puisque le signal émis n'est pas connu a priori et la localisation est classiquement effectuée par des méthodes de formation de voies (*beamforming*) dans le domaine temporel ou fréquentiel. L'utilisation de l'opérateur de corrélation croisée généralisée (GCC) en remplacement de l'opération de corrélation croisée permet ainsi d'introduire un fenêtrage spatial qui permet une augmentation de la résolution du résultat d'imagerie, tout en garantissant rapidité et flexibilité de l'approche.

Afin d'illustrer les performances de la méthode d'imagerie dans le domaine de l'acoustique audible, les cartographies de puissance acoustique estimées par une antenne spirale Underbrink de 91 microphones sont présentées à la Fig. 11. Pour ce faire, deux haut-parleurs identiques (M-Audio Studiophile DX-4) sont placés à 1m de l'antenne, espacés de 0,6 m et excités par deux bruits blancs décorrélés. La mesure est effectuée en chambre semi-anéchoïque mais des résultats similaires ont été obtenus en chambre réverbérante [20].

Les résultats d'imagerie en utilisant la formation de voies dans le domaine temporel (gauche) montrent un étalement spatial des sources acoustiques qui est bien compensé en utilisant le formalisme de corrélation croisée généralisée (GCC), particulièrement bien adapté à des mesures transitoires large-bande. Il est néanmoins nécessaire d'utiliser un fenêtrage spatial afin de pouvoir clairement discriminer les différentes sources acoustiques (haut-parleur des aigus - *tweeter* et haut-parleur des graves - *woofer*) et estimer correctement leur étendue spatiale.

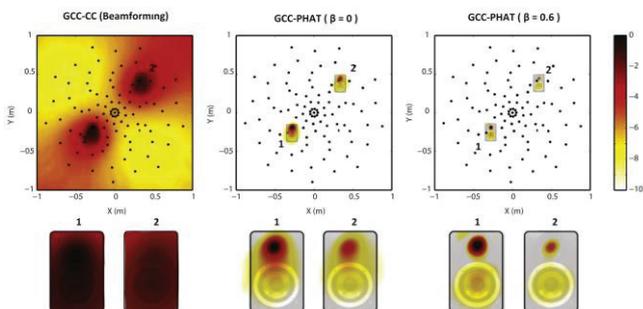


Figure 11: Résultats d'imagerie par la méthode de formation de voies (gauche) et par la méthode de corrélation sans fenêtrage spatial (milieu) et avec fenêtrage spatial (droite). Les résultats projetés sur les haut-parleurs sont présentés en dessous.

## 4 Conclusion

Une technique d'imagerie par corrélation a été proposée et validée dans différents cas utilisant les ondes de volume, les ondes guidées et les ondes acoustiques audibles. Le principe repose sur la corrélation des signaux mesurés en FMC avec une banque de signaux théoriques permettant de décrire la génération et la propagation des ondes dans le milieu considéré. Une amélioration des performances d'imagerie est observée tout en garantissant une implantation compatible avec les contraintes temps réel imposées par l'inspection en CND. L'implantation dans un système embarqué est en cours et devrait permettre une amélioration ainsi qu'une facilité de mise en œuvre des techniques d'imagerie pour l'industrie aéronautique, nucléaire et civile.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au support financier du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG). Les auteurs aimeraient remercier Pierre-Claude Ostiguy pour son aide lors de la réalisation des tests de fatigue en traction. Les auteurs aimeraient enfin remercier NVIDIA Corporation pour le don d'une carte GeForce GTX TITAN X.

## Références

- [1] C.R. Farrar, et K. Worden, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **365**, 303-315 (2007).
- [2] J. Zhang, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox et A.J. Hunter, Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method. *NDT & E International*, **43**(2), 123-133 (2010).
- [3] C. Holmes, B.W. Drinkwater, et P.D. Wilcox, The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **46**(11), 677-680 (2004).
- [4] G. Rougeron, J. Lambert, E. Iakovleva, L. Lacassagne, et N. Dominguez, Implementation of a GPU accelerated total focusing reconstruction method within CIVA software. In *40th Annual Review of Progress in QNDE*, **1581**(1), 1983-1990 (2014).
- [5] L. Yu, et V. Giurgiutiu, Optimized embedded ultrasonics structural radar system with piezoelectric wafer active sensor phased arrays for in-situ wide-area damage detection, *United States Patent Application US 2009/0048789 A1* (2009).
- [6] B. Xu, L. Yu, et V. Giurgiutiu, Lamb wave dispersion compensation in piezoelectric wafer active sensor phased-array applications. In *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, CA, **7295**, 729516 (2009).
- [7] J.S. Hall, J.E. Michaels, D.O. Thompson et D.E. Chimenti, Adaptive dispersion compensation for guided wave imaging. In *AIP Conference Proceedings*, **1430**(1), 623, (2012).
- [8] B. Xu, L. Yu, et V. Giurgiutiu, Advanced methods for time-of-flight estimation with application to Lamb

- wave structural health monitoring. In *7th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, Palo Alto, CA, 1202-1209 (2009).
- [9] J. Cai, L. Shi, S. Yuan, et Z. Shao, High spatial resolution imaging for structural health monitoring based on virtual time reversal. *Smart Materials and Structures*, **20**(5), 055018 (2011).
- [10] F. Ciampa et M. Meo, Impact detection in anisotropic materials using a time reversal approach. *Structural Health Monitoring*, **11**(1), 43-49 (2012).
- [11] N. Quaegebeur et P. Masson, Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit-receive array for Non-Destructive Evaluation. *Ultrasonics*, **52**(8), 1056-1064 (2012).
- [12] P. Masson, P. Micheau, N. Quaegebeur et D. Langlois Demers, Method for imaging a structural condition of a structure, *United States Patent Application US 61/310,996* (2010).
- [13] N. Quaegebeur, P.-C. Ostiguy et P. Masson, Correlation-based imaging technique for fatigue monitoring of riveted lap-joint structure. *Smart Materials and Structures*, **23**(5), 055007 (2014).
- [14] N. Quaegebeur, P. Masson, D. Langlois Demers et P. Micheau, Dispersion-based imaging for Structural Health Monitoring using sparse and compact arrays, *Smart Materials and Structures*, **20**, 025005 (2011).
- [15] C.H. Knapp et G.C. Carter, The generalized correlation method for estimation of time delay, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **24**(4), 320-327 (1976).
- [16] J.A. Jensen et N.B. Svendsen, Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **39**(2), 262-267 (1992).
- [17] N. Quaegebeur, P.-C. Ostiguy, et P. Masson, Hybrid empirical/analytical modeling of guided wave generation by circular piezoceramics. *Smart Materials and Structures*, **24**(3), 035003 (2015).
- [18] NVIDIA. *K1: A New Era in Mobile Computing*, NVIDIA White Paper (2014).
- [19] P. Masson, N. Quaegebeur et P. Lapierre, Méthode d'imagerie "Excitelet" par corrélation dispersive pour la surveillance des structures, *Rapport projet CRSNG INNOV I2IPJ 403196 – 10* (2013).
- [20] N. Quaegebeur, T. Padois, P.-A. Gauthier et P. Masson, Enhancement of time-domain acoustic imaging based on generalized cross-correlation and spatial weighting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **75**, 515-524 (2016).