

Imagerie ultrasonore par corrélation à partir d'une antenne de transducteurs posée sur sabot

Maxime Bilodeau, Nicolas Quaegebeur et Patrice Masson

GAUS
Département de génie mécanique
Université de Sherbrooke
Sherbrooke, QC, J1K 2R1,
Canada
E-mail : Maxime.Bilodeau2@USherbrooke.ca

Résumé

Une nouvelle méthode d'imagerie ultrasonore est proposée pour des applications de Contrôle Non Destructif (CND) utilisant des antennes d'éléments piézoélectriques posées sur des sabots. L'approche propose d'utiliser la totalité de l'information disponible pour une antenne donnée, tout comme le fait la Total Focusing Method (TFM), technique d'imagerie considérée comme référence en imagerie ultrasonore. La méthode est basée sur la corrélation des signaux mesurés avec une banque de signaux théoriques précalculés pour une grille d'imagerie donnée. Par sa formulation, la technique prend en compte la directivité et la dynamique des transducteurs, les phénomènes de réfraction, de réflexion et de transmission à l'interface entre le sabot et la structure à inspecter. Conséquemment, il est possible de réduire le nombre de transducteurs nécessaires pour obtenir des images de résolutions équivalentes à celles obtenues à l'aide de l'algorithme TFM. L'inspection d'une structure isotrope à l'aide d'une antenne posée sur un sabot à angle de 36° par rapport à la structure est considérée numériquement et expérimentalement en utilisant un nombre réduit de transducteurs.

Abstract

This paper describes a novel array post-processing method for Non-Destructive Evaluation (NDE) using phased-array ultrasonic probes mounted on an angled wedge. The approach uses the capture and processing of the full matrix of all transmit-receive time-domain signals from a transducer array as in the case of the Total Focusing Method (TFM), referred as the standard of imaging algorithms. The novel technique implements the correlation of measured signals with theoretical propagated signals computed over a given grid of points. The proposed technique takes into account transducer directivity and dynamics, and also the refraction and transmission at the interface between the wedge and the host structure, such that the number of required array elements for a given imaging performance can be greatly reduced. Theoretical and experimental application to inspection of isotropic structure using a phased-array probe mounted on a 36° angle wedge is presented using a reduced set of transducers.

Les ultrasons sont utilisés dans une panoplie d'applications [1]. On les retrouve dans le domaine médical, où ils peuvent être utilisés pour effectuer des échographies ou même à des fins thérapeutiques (en physiothérapie par exemple). Le principe derrière l'échographie est bien simple: des ondes se propageant dans un milieu vont interagir et être en partie réfléchies lorsqu'elles rencontrent des discontinuités. En mesurant la position temporelle de ces réflexions (ou échos), il est possible de déterminer la provenance de ces réflexions. Ce principe est aussi utilisé en Contrôle Non Destructif (CND), où il est souvent souhaitable de vérifier l'état de santé d'une structure sans en affecter l'intégrité. Dans ce cas, les ultrasons (ou vibrations) interagissant avec des défauts ou endommagements dans la structure (défaut, fissure, délamination, etc.) ont une signature bien propre à cette anomalie. En mesurant

ces signatures ultrasonores avec plusieurs capteurs, il est possible d'en identifier la position et de construire une cartographie des défauts. Malgré les diverses technologies permettant de vérifier l'intégrité de structures métalliques et composites, les ultrasons sont fréquemment utilisés en raison de leur grande sensibilité, de leur flexibilité, de leur portabilité ainsi que de leur efficacité à couvrir de grandes surfaces.

Les tâches d'inspection n'utilisant qu'un seul capteur nécessitent le balayage de la sonde ultrasonore sur la surface de la structure afin d'obtenir une image. Cette procédure est la plus répandue pour l'inspection d'oléoducs par exemple puisqu'elle permet d'obtenir un diagnostic *in situ* en temps réel. Toutefois, comme présentée à la figure 1, page suivante, cette technique requiert une expertise bien précise étant donné la subjectivité des signaux à interpréter.



Fig. 1 : Inspection d'oléoduc par ultrasons
Pipeline ultrasound testing

En utilisant une antenne munie de plusieurs transducteurs, il est possible de reconstruire des images sans avoir recours à un balayage mécanique de la sonde. En effet, en programmant des délais appropriés sur les différents capteurs, il est possible de contrôler la direction du front d'onde généré dans la structure. Ainsi, il est possible de « pointer » vers un endroit précisément, et de répéter cette procédure pour tous les points d'une région d'intérêt. Pour les applications nécessitant une imagerie en temps réel, les signaux mesurés à l'antenne sont généralement enregistrés en parallèle et accumulés avec leurs délais appropriés. Cette technique d'imagerie, nommée formation de voies (*Beamforming - BF*), est répandue en raison de sa faible complexité algorithmique, mais est limitée quant à la qualité des images reconstruites.

En traitement de signal, la *Full-Matrix Capture* (FMC) réfère à la mesure des traces temporelles pour toutes les combinaisons de paires émetteurs-récepteurs possibles [2]. Plusieurs algorithmes, tels que le *Time-of-Flight* (ToF), le *Inverse Wave Field Extrapolation*, le *Synthetic Aperture Focusing Technique* (SAFT) ou les techniques de super-résolution peuvent être implantés en post-traitant une partie de la FMC. L'algorithme *Total Focusing Method* (TFM), qui nécessite l'utilisation de l'entièreté de l'information comprise dans la FMC, est désormais considéré comme le standard de référence [2]. Cette méthode utilise tous les éléments d'une antenne afin de focaliser à l'émission et la réception sur tous les points de la zone d'inspection, résultant en un indicateur de défaut pour chacun de ces points. Des études récentes ont montré qu'il était possible d'adapter la TFM afin de considérer la propagation de modes multiples, de prendre en compte les incohérences entre transducteurs, de considérer une classification de défauts ainsi que d'inspecter des structures courbe. Toutefois, la grande complexité algorithmique de la TFM, associée au nombre élevé de combinaisons de paires émetteurs-récepteurs à considérer, fait de lui un mauvais candidat pour l'imagerie temps réel. Diverses stratégies visant à réduire le nombre de signaux considérés en post-traitement, ou à diminuer la complexité calculatoire afin de réduire le temps de calcul, ont été proposées. Pour permettre une imagerie temps réel, une diminution notable du nombre de

transducteurs doit être considérée tout en conservant une ouverture d'antenne équivalente afin de couvrir de larges structures et de générer assez d'énergie acoustique pour l'écoute des échos. Toutefois, dans ces conditions, les résultats d'imagerie obtenus à partir de la TFM sont dégradés en raison des phénomènes de diffraction et des patrons de directivité complexes non considérés dans la formulation.

Récemment, une nouvelle méthode d'imagerie nommée *Excitelet* a été appliquée à l'inspection à partir d'une antenne munie de plusieurs transducteurs en contact direct [3]. L'approche est basée sur la corrélation entre les signaux mesurés (extraits de la FMC) avec des prédictions théoriques. Pour chaque point d'une grille d'imagerie préalablement définie (zone à inspecter), des signaux théoriques sont calculés pour chaque paire émetteur-récepteur. Ceux-ci sont ensuite conservés en mémoire pour être ultérieurement corrélés avec les signaux mesurés en temps réel. L'avantage de la technique par corrélation réside en sa grande flexibilité du fait qu'elle permet de prendre en compte différents phénomènes dans le calcul des signaux théoriques, comme la directivité et la dynamique des transducteurs. Par conséquent, une meilleure corrélation, traduite par une imagerie plus fidèle, est obtenue. Ceci permet de diminuer le nombre de transducteurs nécessaires et ainsi d'envisager une imagerie de précision en temps réel.

La présente étude vise à étendre ce formalisme aux configurations où l'antenne de transducteurs pour l'inspection est posée sur un sabot à angle variable. Pour y parvenir, un modèle de propagation est développé pour différentes tailles de transducteurs en prenant en compte la réfraction des ondes à l'interface sabot-structure ainsi que l'angle du sabot. Dans la Section "Algorithme d'imagerie", la technique d'imagerie par corrélation nommée *Excitelet* est introduite et le modèle de propagation considéré pour le calcul des signaux théoriques est présenté. Dans la section "Validation de l'algorithme", une validation numérique de la méthode ainsi qu'une comparaison avec la TFM est présentée pour le cas de réflecteurs ponctuels. Enfin, la Section "Validation expérimentale" propose une validation expérimentale de l'algorithme en utilisant une antenne de transducteurs posée sur un sabot commercial.

Algorithme d'imagerie

Approche par corrélation

La figure 2, présente la géométrie considérée dans cet article pour l'inspection des structures isotropes à l'aide d'une antenne de transducteurs (aussi appelés « éléments ») montée sur un sabot conventionnel. Les transducteurs génèrent des ondes de pression se propageant dans le sabot qui sont réfractées et converties en ondes de pression (ondes P) ou ondes de cisaillement (ondes S) dans la structure hôte. Pour les applications de post-traitement, la FMC est réalisée en mesurant les signaux temporels pour chaque combinaison émetteur-récepteur possible. Le signal $\mathbf{M}_{AS}(t)$ représente le signal temporel généré par le transducteur A (émetteur), propagé dans le sabot et dans la structure, réfléchi par un défaut éventuel localisé à $O(x_0, y_0)$, rétro-propagé vers l'antenne, et finalement mesuré par le transducteur S (récepteur).

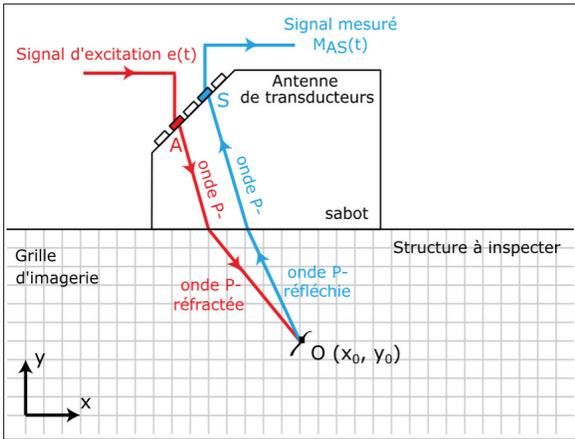


Fig. 2 : Schéma de propagation pour un émetteur (A) et un récepteur (S)
Schematic view of the single actuator (A) and single sensor (S) measurement

Pour chaque point d'observation $O(x_0, y_0)$ dans la structure, un indice d'endommagement représentant la probabilité de présence d'un défaut à ce point doit être calculé. Ceci est réalisé en corrélant, pour chaque paire émetteur-récepteur, le signal mesuré $M_{AS}(t)$ avec un signal théorique $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ calculé après propagation et réflexion sur un réflecteur simulé au point d'observation $O(x_0, y_0)$. Le coefficient de corrélation $C_{AS}(x_0, y_0)$ est donc défini par :

$$C_{AS}(x_0, y_0) = \int_0^{+\infty} M_{AS}(t) T_{AS}(x_0, y_0, t) dt \quad (1)$$

L'équation 1 représente une extension de la technique de référence (TFM) pour laquelle le signal théorique $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ est en fait une fonction delta de Dirac centrée à la position temporelle associée au temps que prennent les ondes à se propager entre l'émetteur et le récepteur tel que schématisé à la figure 3. Dans la formulation TFM, l'influence du signal d'entrée, de la dynamique du transducteur ou de la directivité ne sont pas pris en compte. Cependant, l'atténuation du signal par rapport à la profondeur d'inspection peut être prise en compte en considérant une version modifiée de l'algorithme.

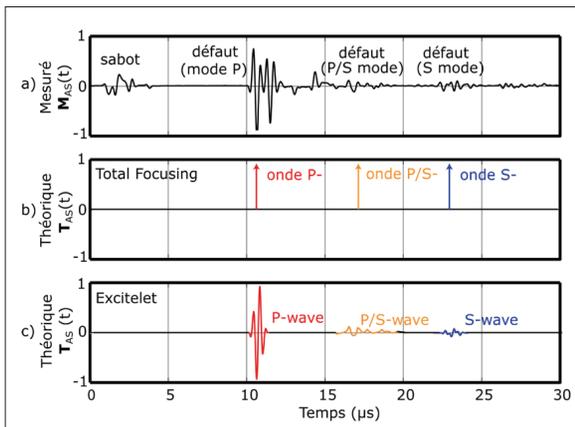


Fig. 3 : Description des signaux théoriques $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ considérés par les algorithmes TFM (b) ou Excitelet (c) pour corrélation avec un signal mesuré typique $M_{AS}(t)$
Description of different theoretical signals $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ considered in TFM (b) or Excitelet (c) for correlation with measured signals $M_{AS}(t)$

L'approche basée sur la corrélation utilise des fonctions temporelles élémentaires, appelées atomes, qui sont soumises à des opérations mathématiques dans les domaines temporels ou fréquentiels afin de créer un dictionnaire de fonctions qui sont ensuite corrélées avec les signaux mesurés. L'avantage de l'approche proposée est que le signal théorique $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ illustré à la figure 3c est calculé en supposant un modèle de propagation et peut donc intégrer divers paramètres tels que le signal d'entrée, la dynamique et la directivité du transducteur, la propagation multimodale, la conversion de mode, la réfraction à l'interface sabot-structure, etc., résultant en une reconstruction d'image plus fidèle. Cette méthode, aussi appelée *Excitelet*, a d'abord été dérivée pour l'inspection par ondes guidées ultrasonores. Elle a ensuite été adaptée à l'inspection de structures isotropes par ondes de volume en utilisant des sondes en contact direct, et une extension de ces travaux est proposée dans le présent article pour le cas où la sonde est posée sur un sabot à angle variable.

Modèle et formulation

Description du modèle de propagation

Afin de définir le signal théorique $T_{AS}(x_0, y_0, t)$ associé à une paire émetteur-récepteur et à un point d'observation $O(x_0, y_0)$, un modèle de propagation prenant en compte la propagation dans le sabot et dans la structure est nécessaire. Le modèle considéré dans cet article est schématisé à la figure 4.

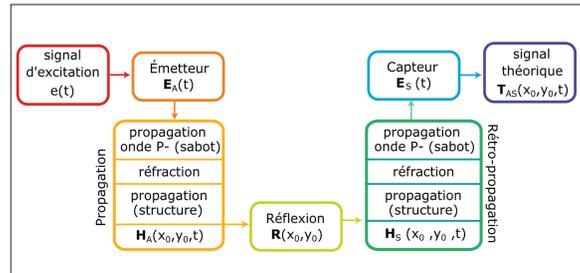


Fig. 4 : Définition de la procédure et des étapes intermédiaires considérées pour le calcul du signal théorique $T_{AS}(x_0, y_0, t)$
Definition of the procedure and intermediate functions used for calculation of theoretical signal $T_{AS}(x_0, y_0, t)$

Il est important de noter que les formulations dans le domaine des fréquences sont généralement plus compliquées, mais permettent de prendre en compte la propagation dans des milieux complexes (propagation anisotrope ou dispersive) alors que les modèles dans le domaine temporel permettent de réduire le temps de calcul, mais se limitent principalement à la propagation non dispersive dans des matériaux isotropes. Dans la présente étude, l'attention est portée sur la mise en œuvre de l'approche de corrélation pour les applications en temps réel, de sorte qu'une approche dans le domaine temporel utilisant le formalisme des réponses impulsionnelles spatiales (*Spatial Impulse Response - SIR*) est envisagée pour le calcul des $T_{AS}(x_0, y_0, t)$. Ces modèles de calcul de SIR ont d'abord été dérivés pour des sources circulaires planes rayonnant dans un milieu semi-infini et ont ensuite été dérivés dans le cas de géométries plus complexes pour prendre en compte la forme et la courbure des transducteurs [4-5].

Pour la suite du papier, seules les ondes de pression (mode P-) seront considérées puisque les ondes de cisaillement (mode S-) sont rarement utilisées lors d'inspections de volume en CND. Les prochaines sous-sections détaillent les différentes étapes de la procédure schématisée à la figure 4.

Réfraction à l'interface sabot-structure

La propagation dans le sabot et la réfraction dans la structure sont modélisées à l'aide de la loi de Snell-Descartes. Pour un point d'observation donné $O(x_o, y_o)$ et un transducteur dont les coordonnées sont $T(x_t, y_t)$, le point d'incidence $I(x_i, 0)$ est défini en fonction de l'angle de réfraction à l'interface sabot-structure θ_r :

$$\frac{\sin(\theta_r)}{c_P} = \frac{\sin(\theta_i)}{c_w} \quad (2)$$

où c_w désigne la vitesse de l'onde de pression P dans le sabot, c_P est la vitesse de l'onde de pression P dans la structure et θ_i l'angle d'incidence tel que défini à la figure 5a.

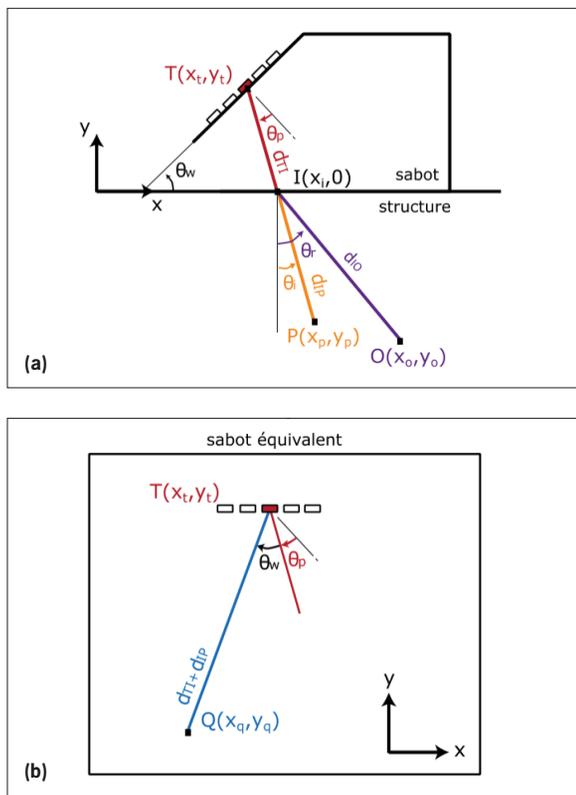


Fig. 5 : Définition de la configuration considérée, des angles et points utilisés pour le calcul du signal théorique (a). Configuration nécessaire pour le calcul des SIR (b)
Definition of the geometry, angles and points used for calculation of the theoretical signal (a). Configuration needed for SIR calculation procedure (b)

Le temps de propagation (ou temps de vol) Δt_{TO} du transducteur $T(x_t, y_t)$ au point d'observation $O(x_o, y_o)$ est donné à partir des distances définies à la figure 5a :

$$\Delta t_{TO} = \frac{d_{TI}}{c_w} + \frac{d_{IO}}{c_P} = \frac{d_{TI} + d_{IP}}{c_w} \quad (3)$$

où le point $P(x_p, y_p)$ et la distance d_{IP} sont introduits afin de simuler la propagation dans un matériau isotrope unique (sans interface et réfraction). Dans ce cas, la propagation du transducteur T au point d'incidence I , la réfraction à la structure et la propagation au point d'observation O peuvent être remplacées par une simple propagation dans un « sabot équivalent » du point T au point P .

Afin de prendre en compte le transfert d'énergie entre le sabot et la structure, un coefficient de transmission à cette interface doit être intégré dans le calcul. À cette fin, la continuité de la vitesse particulière et la continuité du champ de contraintes est considérée comme proposée dans [6]. Dans le cas de la propagation directe (émetteur vers point d'observation), on note F_P le coefficient de transmission de l'onde P, tandis que pour la rétropropagation (point d'observation vers le récepteur), on le note B_P . Les coefficients de transmission de l'acrylique (matériau typique pour les sabots) vers l'acier (structure considérée pour la suite du papier) sont présentés sur la figure 6 en fonction de l'angle d'incidence θ_i tant pour la propagation directe que pour la rétropropagation.

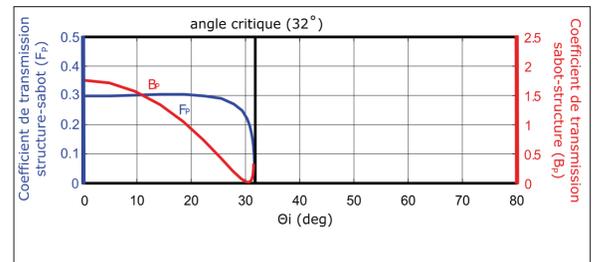


Fig. 6 : Coefficients de transmission lors de la propagation (F_P) et de la rétropropagation (B_P) en fonction de l'angle d'incidence dans le sabot θ_i
Transmission coefficients for the forward (F_P) and backward (B_P) propagation as a function of the incident angle in the wedge θ_i

Propagation dans la structure

L'actionneur A peut-être représenté par une réponse impulsionnelle électromécanique désignée $\mathbf{E}_A(t)$. En supposant un transducteur uniforme et plan, la vitesse normale à sa surface, $v(t)$, peut être exprimée comme :

$$v(t) = \mathbf{E}_A(t) * e(t) \quad (4)$$

où * désigne un produit de convolution dans le domaine temporel et $e(t)$ désigne le signal d'excitation envoyé à l'actionneur, tel qu'introduit à la figure 4. Le champ de pression $p_A(x_o, y_o, t)$ induit par l'actionneur au point d'observation $O(x_o, y_o)$ peut être dérivé à partir du principe de Huygens en introduisant la fonction de propagation de l'onde (ou SIR) $\mathbf{H}_A(x_o, y_o, t)$ dans la structure :

$$p_A(x_o, y_o, t) = \frac{dv(t)}{dt} * \mathbf{H}_A(x_o, y_o, t) \quad (5)$$

La fonction de propagation $\mathbf{H}_A(x_o, y_o, t)$ fait intervenir le coefficient de transmission F_P introduit à la figure 6 et est calculé dans le domaine temporel à l'aide d'un changement de variable pour accélérer le calcul [7]. Toutefois, afin de pouvoir utiliser la procédure décrite dans [7],

un point intermédiaire $Q(x_q, y_q)$ associé à la rotation du point $P(x_p, y_p)$ autour du point A avec un angle de θ_w doit être introduit afin de se retrouver dans la configuration présentée à la figure 5b. Ceci permet de considérer une configuration équivalente où le volume inspecté est directement sous les transducteurs et, par conséquent, de prendre en compte l'influence de l'angle du sabot θ_w sur le rayonnement de l'onde P- dans celui-ci.

Rétropropagation vers l'antenne

Le signal théorique $\mathbf{T}_{AS}(x_o, y_o, t)$ est défini comme le champ de pression diffusé par un réflecteur ponctuel en $O(x_o, y_o)$, intégré sur la surface du récepteur et convolué avec la réponse impulsionnelle électromécanique de retour $\mathbf{E}_S(t)$ du récepteur S . Ainsi, afin de calculer l'expression du champ de pression moyenné à la surface du récepteur, la fonction de propagation $\mathbf{H}_S(x_o, y_o, t)$ décrivant la propagation entre le réflecteur en $O(x_o, y_o)$ et le récepteur S est calculé en supposant une réflexion parfaite au point d'observation (même procédure que pour le calcul de $\mathbf{H}_A(x_o, y_o, t)$) [8], de telle sorte que la tension de sortie du récepteur puisse être exprimée sous la forme d'une combinaison de produits de convolution prenant en compte le signal d'excitation $e(t)$, la directivité des transducteurs, leur comportement électromécanique, la propagation et réflexion des ondes au point d'observation $O(x_o, y_o)$:

$$\mathbf{T}_{AS}(x_o, y_o, t) = R_P e(t) * \mathbf{E}_{AS}(t) * \mathbf{H}_{AS}(x_o, y_o, t) \quad (6)$$

où

$$\mathbf{H}_{AS}(x_o, y_o, t) = \frac{\partial \mathbf{H}_A(x_o, y_o, t)}{\partial t} * \frac{\partial \mathbf{H}_S(x_o, y_o, t)}{\partial t} \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_{AS}(t) = \mathbf{E}_S(t) * \mathbf{E}_A(t) \quad (8)$$

où $R_P = F_P B_P$ désigne les coefficients de transmission à l'interface entre le sabot et la structure à la fois vers l'avant et vers l'arrière, $\mathbf{E}_{AS}(t)$ est défini comme la réponse impulsionnelle électromécanique des transducteurs qui peut être estimée théoriquement ou mesurée en l'absence de structure hôte (utilisation du sabot seul) [9]. Classiquement, cette réponse impulsionnelle est équivalente à un filtre passe-bande dont les caractéristiques (fréquence centrale et largeur de bande) sont déterminées par les critères de conception des transducteurs. À l'équation 8, $\mathbf{H}_{AS}(x_o, y_o, t)$ représente la fonction de propagation en mode *pitch-catch* entre l'actionneur A et le récepteur S . Cette formulation dépend du point d'observation considéré et doit être évaluée numériquement pour chaque point du domaine d'imagerie. Cependant, ce calcul est très rapide dans le domaine temporel étant donné la géométrie simple des transducteurs (pistons plans rectangulaires) et le modèle de propagation simple (structure isotrope).

Métrie d'imagerie

Le calcul des coefficients de corrélation $\mathbf{C}_{AS}(x_o, y_o)$ est effectué en utilisant l'équation 1 pour chaque paire émetteur-récepteur, mais ce dernier est normalisé par la grandeur des signaux théorique et mesuré afin de compenser pour la distance entre l'antenne et le réflecteur (défaut):

$$\mathbf{C}_{AS}(x_o, y_o) = \frac{\mathbf{T}_{AS}(x_o, y_o, t) \cdot \mathbf{M}_{AS}(t)}{\left| \mathbf{T}_{AS}(x_o, y_o, t) \right| \cdot \left| \mathbf{M}_{AS}(t) \right|} \quad (9)$$

Ces coefficients de corrélation pour chaque paire émetteur-récepteur sont additionnés afin d'obtenir un indice d'endommagement associé au point d'observation $O(x_o, y_o)$ et cette routine est répétée pour chaque point de la zone d'inspection [2]:

$$\mathbf{D}(x_o, y_o) = \sum_{A=1}^N \sum_{S=1}^N \mathbf{C}_{AS}(x_o, y_o) \quad (10)$$

Pour la mise en œuvre de cet algorithme, le calcul de l'équation 8 ne doit être fait qu'une seule fois pour chaque point de la grille d'observation. Ainsi, seules la corrélation et la sommation pour la détermination de l'indice d'endommagement (équations 10 et 11) doivent être effectuées en temps réel, de sorte que l'inspection temps réel *in situ* peut être facilement réalisée.

Validation de l'algorithme

Validation numérique

Afin d'évaluer les avantages de l'algorithme d'imagerie par corrélation *Excitelet* par rapport au TFM, une analyse comparative est proposée dans cette section. À cette fin, la configuration d'inspection présentée à la figure 7 est considérée en simulation numérique, à l'aide d'un sabot en acrylique à 30° avec une élévation de 10 mm et une structure hôte en acier, résultant en une transmission des ondes à $\theta = 80^\circ$.

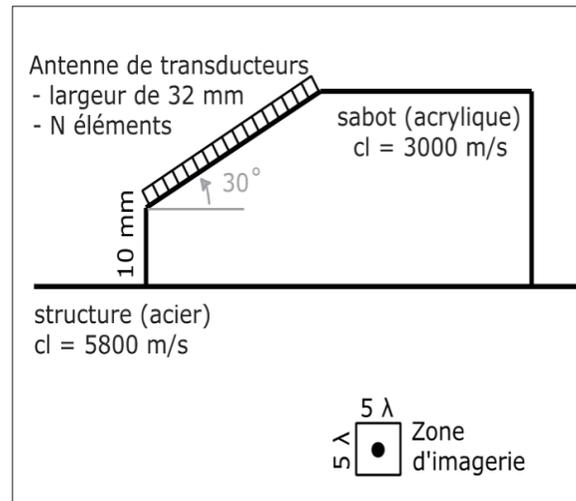


Fig. 7 : Configuration considérée pour la validation numérique
Setup considered for the numerical validation

Un réflecteur ponctuel unique situé en (0.03, 0.02) m est considéré pour différentes configurations d'antenne. Une impulsion de fréquence centrale de 5 MHz et fenêtrée avec une fonction de Hanning est utilisée à l'émission. La figure 8, page suivante, permet de comparer les résultats d'imagerie obtenus avec les algorithmes TFM et *Excitelet* pour différentes configurations. Dans tous les cas, une largeur totale d'antenne constante de 32 mm est utilisée, se traduisant par un nombre d'éléments variant de 32 à 4 éléments et une largeur d'élément variant de 1 à 8 mm.

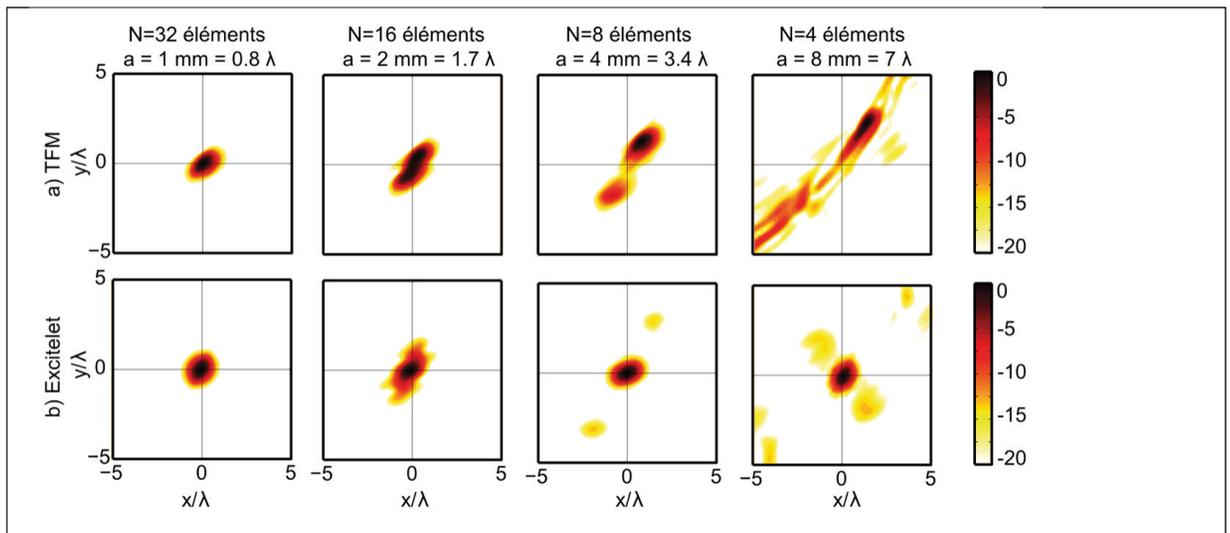


Fig.8 : Résultats d'imagerie obtenus en utilisant les algorithmes TFM (a) et Excitelet (b). Une ouverture totale constante de 32 mm est utilisée, résultant en une largeur d'élément variant de 1 mm (gauche) à 8 mm (droite).
Contour plot of the imaging results obtained for using TFM algorithm (a) and Excitelet algorithm (b). In each case, the imaging results obtained using a constant total aperture of 32 mm are presented for element widths varying from 1 mm (left) to 8 mm (right).

Afin de comparer quantitativement les deux algorithmes d'imagerie, la performance en termes de capacité de détection et d'imagerie d'un réflecteur ponctuel est présentée. À cette fin, un indicateur de performance d'antenne (Array Performance Indicator - API) est utilisé comme métrique de comparaison [2]. Cette métrique permet de quantifier la taille de la fonction d'étalement spatiale (Point Spread Function – PSF) qui caractérise la réponse d'une antenne face à un réflecteur ponctuel. Elle est définie comme la région $\mathcal{A}_{-6\text{ dB}}$ dans laquelle la PSF est supérieure à -6 dB par rapport à sa valeur maximale :

$$API = \frac{\mathcal{A}_{-6\text{ dB}}}{\lambda_P^2}$$

où la normalisation par λ_P^2 (longueur d'onde au carré du mode P-) permet d'obtenir une métrique adimensionnée. L'API estimée pour chacune des configurations présentées à la figure 8 est résumée dans le tableau 1.

Nombre d'éléments	32	16	8	4
Largeur (mm)	1	2	4	8
API – TFM	0.92	1.76	3.84	13.1
API - Excitelet	0.92	0.92	1.08	1.12

Tab. 1: Indicateur de performance (API) en fonction du nombre d'éléments et de la taille de ceux-ci.
Array Performance Indicator (API) metric with varying element size and number.

À partir du tableau 1, il est possible d'observer que l'API obtenu avec l'algorithme TFM augmente lorsque la largeur des éléments augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que le réflecteur ponctuel considéré est situé en dehors du faisceau réfracté à 80° dans l'acier. Ainsi, l'énergie maximale réfléchie ne provient pas nécessairement de la direction associée au réflecteur. Toutefois, il est notable

que l'API reconstruit en utilisant l'algorithme Excitelet est assez constant en fonction de la largeur des éléments considérés. D'ailleurs, les cartographies reconstruites en utilisant Excitelet offre une résolution (largeur d'étalement) quasi constante en fonction de la largeur d'élément.

Par sa formulation faisant intervenir une prédiction de la propagation des ondes, la méthode Excitelet permet d'imager avec précision des réflecteurs, même lorsque des transducteurs plus grands que la longueur d'onde sont utilisés. Afin de valider cette observation, l'API a été calculé pour plusieurs positions du réflecteur ponctuel dans une zone de 100 x 100 mm et les cartographies obtenues sont présentées sur la figure 9 pour la même configuration que précédemment (voir figure 7).

À partir de la figure 9, il est possible de remarquer que l'API augmente lorsque la distance entre l'antenne et le réflecteur augmente comme indiqué dans [10]. Lorsque la largeur de chaque élément du transducteur augmente, une réduction de l'API est globalement observée et des patrons de directivité propres à chaque configuration sont observés pour les reconstructions à partir des deux algorithmes d'imagerie. Il est aussi possible de remarquer que les performances d'imagerie obtenues avec l'algorithme Excitelet sont un peu plus uniformes (sur tout le domaine) que celles obtenues avec TFM pour une taille d'élément donnée.

Validation expérimentale

Configuration

Comme validation expérimentale, une antenne de transducteurs sur sabot, positionnée sur un bloc d'acier de dimensions 210 x 150 x 30 mm est considérée. Quinze trous de 1,5 mm de diamètre ont été percés à travers le bloc d'acier le long d'un arc de cercle de rayon de 100 mm tel qu'illustré à la figure 10.

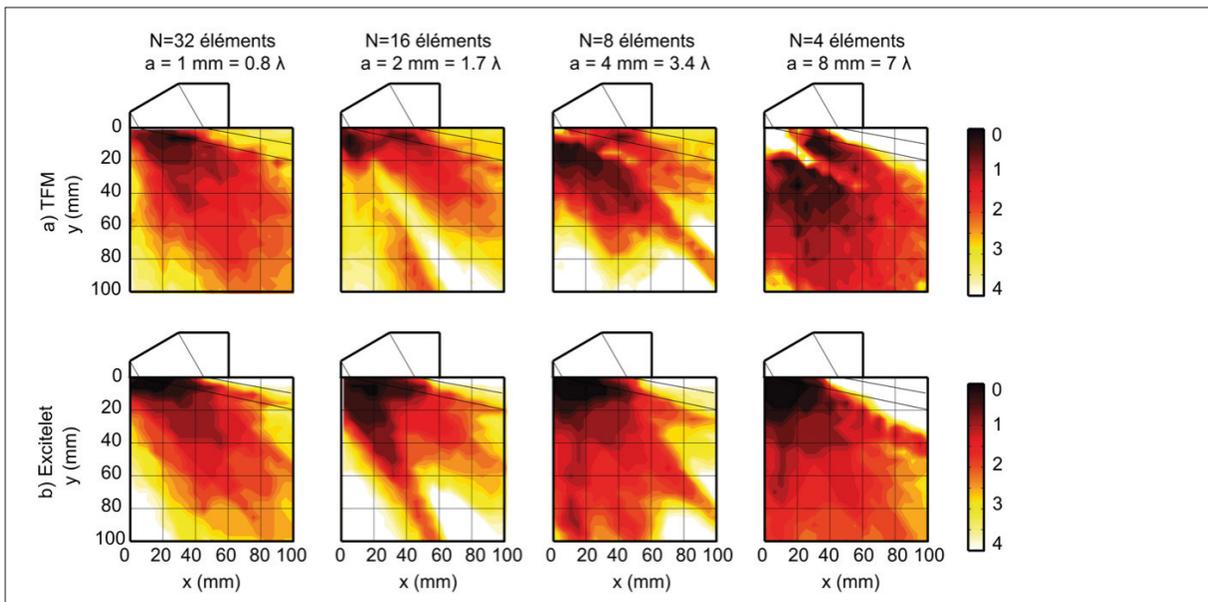


Fig. 9 : Cartographies de l'API obtenues en utilisant les algorithmes TFM (a) et Excitelet (b). Le nombre et la largeur des éléments varient de N=32 et 1 mm (gauche) à N=4 et 8 mm (droite).
Contour plot of the API results obtained using TFM (a) and Excitelet (b) algorithms with a 32 mm aperture array. In each case, the number and width of elements vary from N=32 of 1 mm width (left) to N=4 elements of 8 mm width (right).

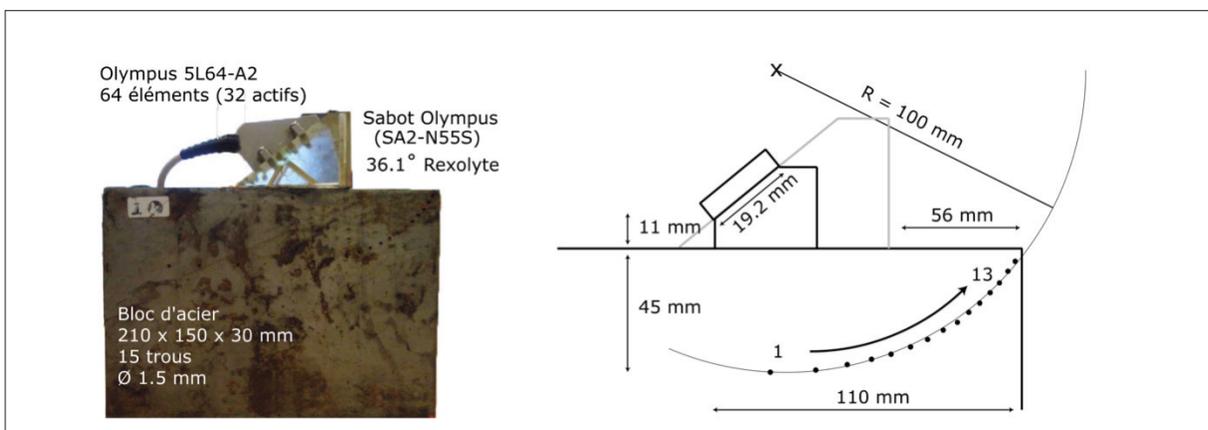


Fig. 10 : Photo de la configuration expérimentale considérée (a) et illustration et position des trous (b).
Photograph of the experimental setup used for imaging (a) and detail on the holes distribution (b).

L'inspection est effectuée à l'aide d'une sonde commerciale et de sa carte d'acquisition et de génération associée. La sonde (Olympus 5L64-A2) est composée d'une matrice piézo-composite de 64 éléments de 0,5 mm de largeur avec un pas de 0,6 mm, une élévation de 10 mm et une fréquence centrale de 5 MHz. Cette sonde est montée sur un sabot fixé à un angle de 36° (Olympus SA2-N55S-IHC) en Rexolyte (polystyrène) et un gel de couplage (Sonotech - Soundsafe) est utilisé afin d'assurer un contact uniforme. La génération du signal est assurée par une plateforme dédiée qui permet la génération d'impulsions de 100 ns de durée et de 80 V d'amplitude. Une fréquence d'échantillonnage de 80 MHz et un convertisseur 12 bits sont utilisés, permettant la mesure d'un seul canal (élément) à la fois. La matrice complète (FMC) sur 32 éléments voisins est mesurée, de sorte que seuls les 32 premiers éléments de la sonde ont été utilisés pour ce cas d'inspection, résultant en une largeur d'antenne totale de 19,2 mm.

Afin d'étudier l'influence de la largeur des éléments sur la résolution de l'image, les signaux enregistrés en utilisant des groupes d'éléments adjacents sont additionnés. Cette technique permet d'imiter une taille d'élément qui diffère des dimensions réelles des transducteurs utilisés. Cette méthode est connue sous le nom de *Summed Group Pulse-Echo* (SGPE) et permet de réduire le nombre de mesures nécessaires pour l'imagerie. Par conséquent, le temps d'acquisition ainsi que le coût calculatoire pour l'imagerie sont réduits. Ainsi, les configurations suivantes sont considérées:

- Largeur d'élément de 0,6 mm avec 32 éléments et 528 signaux;
- Largeur d'élément active de 1,2 mm avec 16 éléments et 136 signaux;
- Largeur d'élément de 2,4 mm avec 8 éléments et 36 signaux.

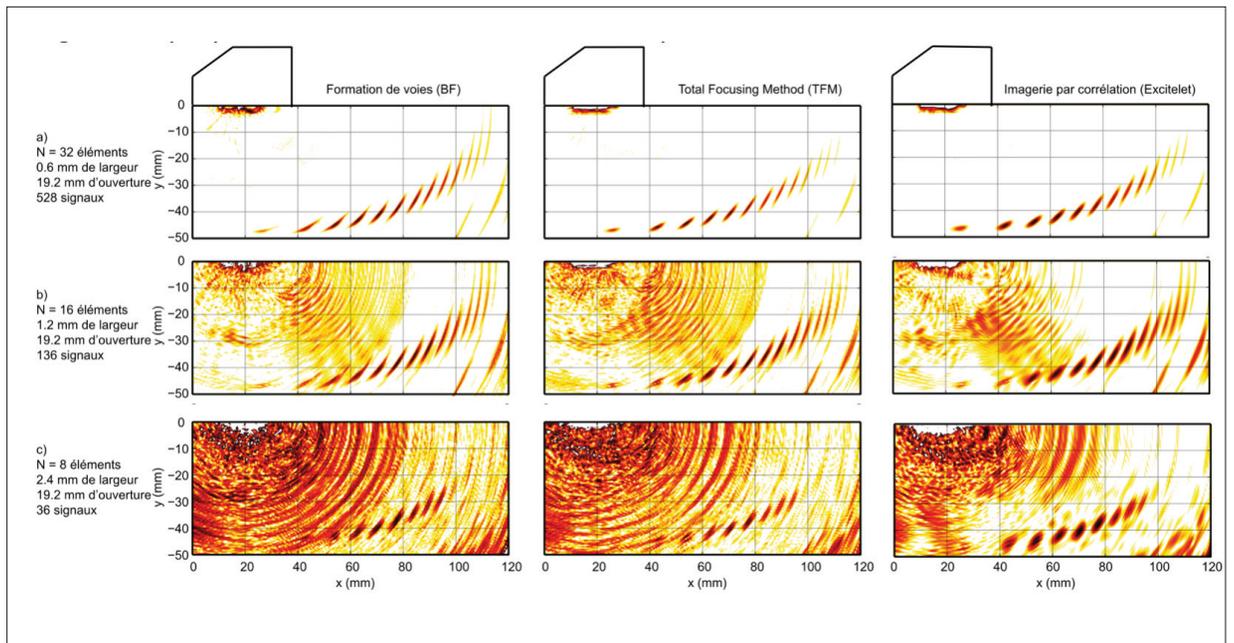


Fig. 11 : Résultats d'imagerie obtenus pour une ouverture d'antenne constante en utilisant les algorithmes de formation de voies (gauche), TFM (centre) et Excitelet (droite). Le nombre d'éléments utilisé varie de $N=32$ (a) à $N=8$ (c).
Imaging results obtained for constant total aperture using unfocussed Beamforming (left), Total Focusing Method (middle) and Excitelet algorithm (right). The influence of element number from $N=32$ (a) to $N=8$ (c) is represented.

Afin d'inclure la dynamique des transducteurs, une mesure à vide (sans structure hôte) a d'abord été effectuée, permettant de déterminer la réponse impulsionnelle électromécanique d'un seul élément $\mathbf{E}_{AS}(t)$ nécessaire pour le calcul de l'équation 8. Cette réponse impulsionnelle est utilisée pour la mise en œuvre de l'approche par corrélation et un retard correspondant à la moitié de la longueur de l'impulsion résultante ($2,5\mu\text{s}$) est ajouté à la formulation TFM. L'imagerie est réalisée sur une zone de 50×120 mm avec une résolution de $0,5$ mm, correspondant à une grille de 100×240 pixels. La vitesse de l'onde P de $5\,890$ m/s a été sélectionnée, résultant en une longueur d'onde de $1,2$ mm. Les résultats d'imagerie sont normalisés par la valeur maximale et représentés à l'aide d'iso courbes sur une échelle de 0 à -20 dB par pas de 1 dB.

Résultats d'imagerie

La figure 11 présente les résultats d'imagerie obtenus à l'aide des algorithmes : formation de voies (BF), TFM et corrélation (Excitelet). Le scénario de référence considérant l'ensemble des transducteurs ($N=32$ éléments) est présenté sur la ligne du haut, et les résultats d'imagerie obtenus en utilisant des éléments adjacents regroupés sont affichés sur les deux lignes inférieures afin de visualiser l'influence de la largeur des éléments sur les images reconstruites en utilisant les différents algorithmes. Pour la configuration de référence, les trois algorithmes permettent d'imager les 13 trous et l'algorithme Excitelet offre une résolution comparable aux deux autres techniques d'imagerie. En réduisant le nombre d'éléments actifs, une augmentation du bruit de fond est observable dans les cartographies obtenues avec les algorithmes BF et TFM. Toutefois, ce bruit de fond est notablement réduit en utilisant l'algorithme Excitelet (jusqu'à 10 dB de réduction du bruit de fond). De plus, si seulement 8 éléments actifs sont utilisés (Figure 11c), le bruit de fond imagé en utilisant les

algorithmes BF ou TFM est si important, que seulement 6 trous sont clairement détectés. Toutefois, l'algorithme Excitelet permet la détection adéquate de 8 trous.

Afin de quantifier les résultats d'imagerie présentés à la figure 11, l'amplitude d'imagerie reconstruite pour chacun des 13 trous en utilisant les algorithmes TFM et Excitelet est présentée à la figure 12. Pour chaque trou, l'amplitude maximale autour du centre est extraite et normalisée par l'amplitude maximale obtenue.

En observant les histogrammes présentés à la figure 12, page suivante, il est possible de remarquer que pour la majorité des trous, une diminution du bruit de fond est obtenue en utilisant Excitelet devant TFM. Le gain à utiliser l'algorithme Excitelet est d'autant plus notable lorsque le nombre d'éléments est réduit (Figure 12c). La réduction du bruit de fond associée à cette configuration permet de détecter les trous 12 et 13 tandis que les résultats de l'imagerie TFM sont confondus dans le bruit de fond. Une telle réduction du nombre de capteurs nécessaire se traduit par une complexité algorithmique plus faible et une mise en œuvre temps réel viable.

Tel que représenté sur la figure 8, la technique d'imagerie Excitelet devrait théoriquement être moins sensible à un changement de taille des éléments que TFM. Cette tendance est observée expérimentalement, mais n'est pas aussi prononcée que dans l'étude théorique. Cela peut être dû à la simplicité du modèle de propagation considéré, qui pourrait être amélioré en considérant la propagation de plusieurs modes (P- et S-), les réflexions dans le sabot et dans la structure d'acier, des phénomènes de diffusion par les trous ou en tenant compte de la dynamique exacte de la sonde. En effet, dans le cas de l'étude expérimentale, les éléments sont supposés plats et rectangulaires.

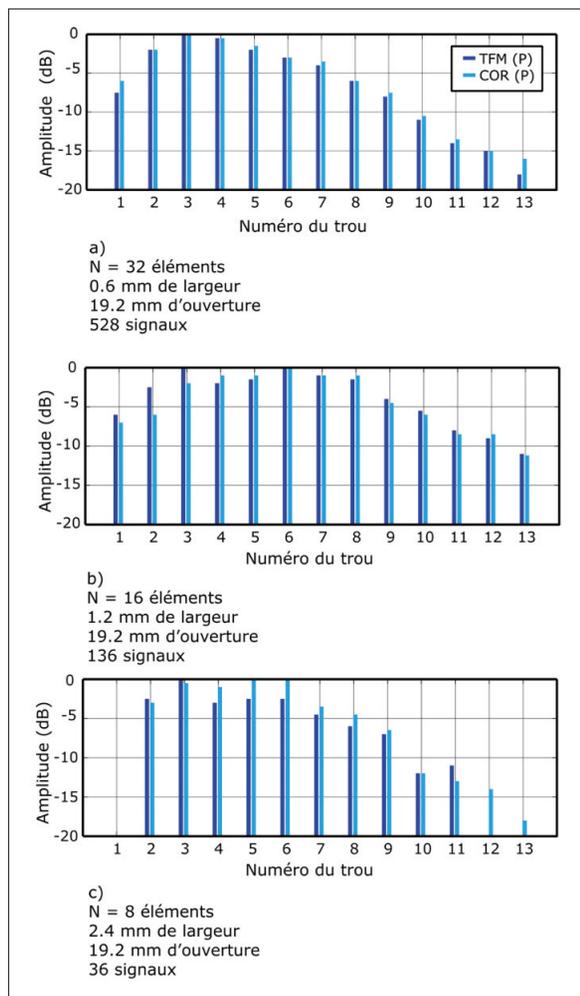


Fig. 12 : Amplitude maximale d'imagerie mesurée pour chaque trou en utilisant les algorithmes TFM (bleu foncé) et Excitelet (COR - bleu pâle). Le nombre d'éléments utilisé varie de N=32 (a) à N=8 (c) tout en conservant une ouverture totale d'antenne de 19 mm. Maximal imaging amplitude measured for each of the 13 holes using TFM (dark blue) and Excitelet (COR - light blue) algorithms. The influence of element number from N=32 (a) to N=8 (c) is represented considering a constant total array aperture of 19 mm.

Toutefois, l'utilisation de la méthode SGPE pour augmenter la taille d'antenne active est basée sur la somme de la contribution de transducteurs adjacents, de sorte que l'espacement entre éléments n'est pas pris en compte dans le modèle. Ainsi, le modèle pourrait être adapté afin de prendre en compte ce paramètre, ou une nouvelle sonde constituée d'un nombre inférieur d'éléments pourrait également être utilisée pour la mise en œuvre de l'algorithme Excitelet pour des applications en temps réel.

Conclusion

Dans ce papier, la formulation de l'algorithme d'imagerie par corrélation Excitelet a été adaptée pour prendre en compte l'utilisation d'un sabot lors de l'inspection de structures par ultrasons. L'approche proposée est basée sur la corrélation des signaux mesurés avec des signaux théoriques précalculés sur une grille de points.

Ces signaux théoriques sont calculés à l'aide d'un modèle de propagation qui inclut la directivité et la dynamique des transducteurs ainsi que la réfraction à l'interface sabot/structure, de sorte que le nombre d'éléments requis pour une performance d'imagerie donnée peut être considérablement réduit. Une validation numérique et expérimentale considérant une structure isotrope est présentée. Il est démontré qu'en utilisant un nombre réduit d'éléments, l'algorithme d'imagerie Excitelet donne des résultats similaires à ceux reconstruits à l'aide de l'algorithme TFM utilisant un plus grand nombre d'éléments. Conséquemment, l'implantation en temps réel peut être envisagée pour un développement futur.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés grâce au soutien financier du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) dans le cadre du programme De l'idée à l'innovation (INNOV).

Références bibliographiques

- [1] B. W. Drinkwater et P. D. Wilcox, « Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review », *NDT E Int.*, vol. 39, no 7, p. 525-541, 2006.
- [2] C. Holmes, B. W. Drinkwater, et P. D. Wilcox, « Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for guided wave pipe inspection », *AIP Conf. Proc.*, vol. 1096, p. 137-144, 2009.
- [3] N. Quaegebeur et P. Masson, « Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit-receive array for Non-Destructive Evaluation », *Ultrasonics*, vol. 52, no 8, p. 1056-1064, 2012.
- [4] J. A. Jensen, « A new calculation procedure for spatial impulse responses in ultrasound », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, no 6, p. 3266-3274, 1999.
- [5] J. L. S. Emeterio et L. G. Ullate, « Diffraction impulse response of rectangular transducers », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no 2, p. 651-663, août 1992.
- [6] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 1999.
- [7] J. Cheng, J. Y. Lu, W. Lin, et Y. X. Qin, « A new algorithm for spatial impulse response of rectangular planar transducers », *Ultrasonics*, vol. 51, no 2, p. 229-237, 2011.
- [8] J. A. Jensen, « A model for the propagation and scattering of ultrasound in tissue », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, no 1, p. 182-191, janv. 1991.
- [9] R. Huang et L. W. Schmerr, « Characterization of the system functions of ultrasonic linear phased array inspection systems », *Ultrasonics*, vol. 49, no 2, p. 219-225, 2009.
- [10] A. Velichko et P. D. Wilcox, « An analytical comparison of ultrasonic array imaging algorithms. », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no March 2009, p. 2377-2384, 2010.