

Comparaison quantitative des méthodes d'imagerie de défauts à ultrasons multiéléments

Baptiste Gauthier, Pierre Bélanger

Laboratoire PULÉTS
Département de Génie Mécanique
École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest
H3C 1K3, Montréal, QC
Canada
E-mail :
baptiste.gauthier@pulets.ca
pierre.belanger@pulets.ca

Guillaume Painchaud-April, Alain Le Duff

Olympus NDT Canada
3415, rue Pierre-Arduin
G1P 0B3, Québec, QC
E-mail :
guillaume.painchaud-april@olympus.com
alain.leduff@olympus.com

Résumé

Les méthodes d'inspection par ultrasons multiéléments sont largement utilisées dans l'industrie pour la détection et l'identification de défauts à une cadence élevée. Cependant, l'image qui résulte d'une telle inspection n'est en réalité qu'une représentation indirecte de la structure matérielle des spécimens et il convient de bien interpréter les indications affichées. Si les différentes méthodes d'imagerie ont souvent été comparées de manière qualitative, nous nous attachons ici à établir des indicateurs permettant une comparaison quantitative entre le balayage linéaire, le balayage sectoriel et les méthodes de focalisation en tout point par chemin direct ou indirect. L'étendue de l'indication relative au défaut, sa localisation et son amplitude sont ici évaluées sur un bloc d'acier comportant des trous percés latéralement de 3 mm de diamètre situés à différentes profondeurs. L'étude révèle notamment que l'évaluation de la taille du défaut est grandement affectée par la profondeur de focalisation lors de l'utilisation du balayage linéaire ou sectoriel, ce qui n'est pas le cas pour la méthode de focalisation en tout point qui en plus d'afficher une relative constance dans la représentation du défaut permet un dimensionnement accru lorsque des chemins indirects sont employés pour la reconstruction de l'image.

Abstract

Phased array ultrasonic testing techniques are widely used in the industry for accurate and fast detection as well as identification of defects. However, the resulting image is an indirect representation of the specimen material structure and it must be interpreted correctly. Phased array ultrasonic testing techniques have often been compared on a qualitative basis. In this paper we have defined several indicators allowing a quantitative comparison of the linear scan method, the sectorial scan method and the total focusing method using direct and indirect paths. Geometric size of the defect indication, its location and its amplitude are evaluated for a steel bloc with 3 mm side drilled holes located at different depths. The study highlights the fact that the evaluation of defect size strongly relies on the focusing depth for linear and sectorial scanning. On the other hand, the total focusing method displays a more homogenous representation of defects across the thickness and allows an accurate sizing when indirect paths are used for image reconstruction.

Utilisée depuis des décennies dans le domaine médical, et ce notamment, à travers les systèmes d'échographie, l'inspection ultrasonore par sondes multiéléments a réellement fait son apparition dans le milieu industriel qu'au début des années 2000 [1]. Si la technologie des sondes n'a que peu évolué, les appareils d'inspection, le pilotage des sondes et le traitement du signal a lui connu des avancées majeures et fait encore à ce jour l'objet de recherches poussées. En effet, contrairement aux technologies concurrentes du milieu industriel comme la radiographie, la recherche de défauts par technologie ultrasonore utilise une représentation indirecte des structures inspectées. L'opérateur doit ainsi interpréter les signaux et images qui lui sont renvoyées en s'appuyant sur sa connaissance de la pièce, des éventuels défauts attendus ou déjà rencontrés et son expérience passée.

Cette particularité pousse les industriels du domaine à développer de nouvelles méthodes d'inspection et d'imagerie afin de faciliter la lecture de l'information par l'opérateur et améliorer la probabilité de détection (POD : Probability of Detection) [2].

Une sonde multiéléments (PA : *Phased Array*), telle qu'illustrée sur la figure 1, est composée de plusieurs éléments piézoélectriques pilotables indépendamment disposés dans une matrice d'assemblage, d'une couche absorbante ayant pour rôle d'annuler l'onde qui pourrait se propager à l'intérieur même de la sonde et d'une couche de couplage dont l'impédance acoustique est sélectionnée afin de maximiser l'énergie transmise entre la sonde et la pièce inspectée [3]. Plusieurs longueurs caractéristiques sont identifiables comme l'ouverture active (A), l'élévation (E), la largeur d'un élément (e), l'espace inter-

éléments (g) et le pas élémentaire (p). Ces dimensions sont sélectionnées en fonction de multiples critères comme la fréquence centrale de la sonde, la procédure d'inspection ou la géométrie de la structure inspectée. Elles auront également une influence significative sur la détectabilité, la sensibilité, la résolution et le contraste qui pourra être obtenu lors de l'inspection. Pour des questions de coût, la plupart des sondes commerciales possèdent des caractéristiques permettant de s'adapter à une multitude de cas d'inspection tout en offrant une mesure relativement fiable. Précisons que nous considérons dans le cadre de cette étude une sonde linéaire, c'est-à-dire définie selon une seule dimension. Des sondes matricielles, dont les éléments sont disposés sur une grille 2D, peuvent également être utilisées. Néanmoins, les composants ainsi que le principe de fonctionnement demeurent le même que pour une sonde linéaire.

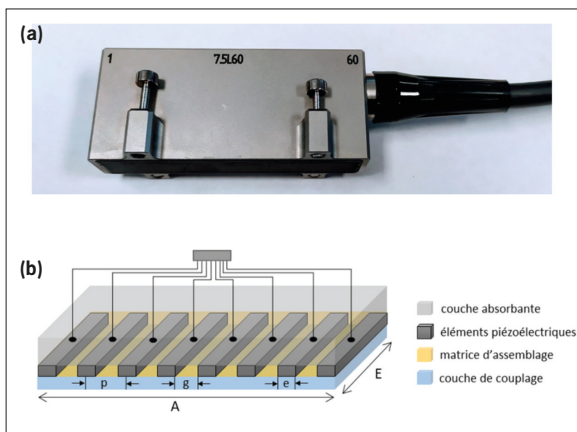


Fig. 1 : (a) Sonde multiéléments comportant 60 éléments. (b) Composants et dimensions caractéristiques d'une sonde ultrasonore multiéléments
(a) 60 elements phased array probe. (b) Components and main dimensions of an ultrasonic phased array probe

Il existe deux méthodes que nous qualifierons de conventionnelles et relatives au contrôle des éléments de la sonde pour l'inspection ultrasonore multiéléments (PAUT : *Phased Array Ultrasonic Testing*) : le balayage linéaire (L-Scan) et le balayage sectoriel (S-Scan). Le balayage linéaire consiste en un balayage électronique à travers les éléments de la sonde. Une certaine ouverture mobile, inférieure au nombre d'éléments de la sonde, est définie et se déplace d'un certain incrément entre chaque tir. La figure 2(a) illustre deux tirs pour lesquels l'ouverture est de 3 éléments et l'incrément de 2 éléments. En appliquant des lois de retard lors du pilotage de chaque élément, il est possible d'orienter le faisceau d'un certain angle mais également de le focaliser à une certaine profondeur. Les mêmes éléments sont utilisés en émission et en réception. Le balayage sectoriel (figure 2(b)) consiste lui à utiliser une ouverture fixe qui, grâce à des lois de retard, va balayer un secteur angulaire de la pièce inspectée. Ce balayage est notamment caractérisé par un angle initial, un angle final et un pas angulaire. Comme pour le balayage linéaire, il est possible de focaliser le faisceau à une certaine profondeur et les mêmes éléments sont utilisés pour l'émission et la réception du signal ultrasonore.

Enfin, la combinaison d'un balayage linéaire, et donc électronique, et d'un balayage mécanique, qu'il soit manuel ou automatisé, permet de générer un C-Scan, représentatif non plus d'une tranche mais d'une succession de tranches de la structure. Ces méthodes sont largement utilisées dans l'industrie (pétrolière, nucléaire et aéronautique principalement) et encadrées par de nombreuses normes.

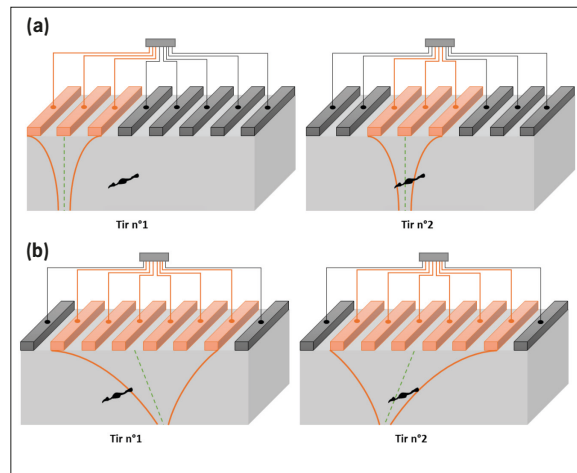


Fig. 2 : Balayage linéaire (a) et sectoriel (b) par une sonde ultrasonore multiéléments
Linear (a) and sectorial (b) scan using a phased array probe

Dernièrement, la méthode de focalisation en tout point (FTP : Focalisation en Tout Point – TFM : *Total Focusing Method*) [4], plus avancée mais nécessitant une puissance de calcul importante pour la reconstruction de l'image, tend à se démocratiser. Contrairement aux méthodes conventionnelles introduites précédemment où l'image résultante est une simple représentation des signaux reçus sur chaque élément et disposés les uns à la suite des autres, celle-ci réalise une focalisation virtuelle en de multiples points d'une zone de reconstruction définie au préalable. L'acquisition des données nécessaires à cette reconstruction procède comme illustré sur la figure 3, page suivante, où deux séquences de mesure sont illustrées. L'émission est tout d'abord effectuée sur le premier élément de la sonde puis tous les autres éléments de la sonde mesurent le signal reçu. Cette opération est répétée pour tous les éléments de la sonde. Considérant un nombre d'éléments N , l'on obtient N^2 traces temporelles qui seront ensuite traitées. Pour limiter la quantité de données acquises et considérant le principe de réciprocité relatif à la propagation des ondes mécaniques dans un milieu homogène, l'on préfère généralement garder la moitié de la matrice d'émission-réception (HMC : *Half Matrix Capture*), plutôt que l'entièreté (FMC : *Full Matrix Capture*). Remarquons également que le temps d'acquisition des données est plus important pour cette méthode que pour les méthodes conventionnelles, ce qui peut parfois représenter un inconvénient majeur lorsqu'une cadence d'inspection élevée est requise.

Après acquisition, l'image obtenue est calculée à l'aide d'un algorithme de type délai et somme (DAS : *Delay And Sum*) en prenant en considération le temps de vol total (TOF : *Time Of Flight*) entre l'élément émetteur, le point cible dans le spécimen, et l'élément utilisé en réception.

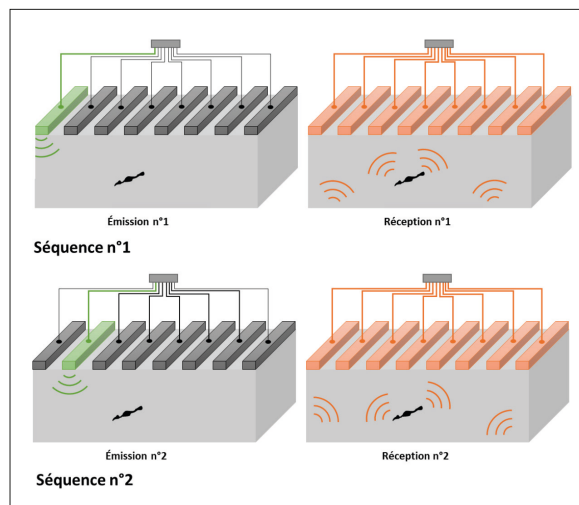
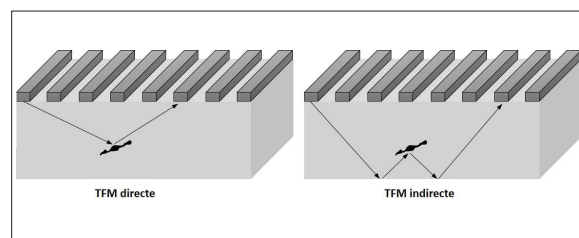


Fig. 3 : FMC

On peut considérer soit un chemin direct entre le point d'émission, le point de reconstruction (ou focalisation) xz et le point de réception, ou bien un chemin indirect comportant des réflexions sur les faces de la pièce. Par la suite, on utilisera les termes de TFM ou TFM directe pour désigner un mode de reconstruction utilisant seulement le chemin direct et TFM indirecte pour un mode de reconstruction utilisant la réflexion du fond de la pièce pour la reconstruction de l'image (figure 1, figure 4). D'autres réflexions pourraient être considérés [5], comme celles ayant lieu sur la surface de la pièce. Ces parcours ne seront pas considérés dans le cadre de cette étude.


 Fig. 4 : Différents modes de propagation considérés pour la reconstruction de l'image par méthode TFM
 Different modes considered for the TFM image reconstruction

Une fois le temps de vol calculé $\tau_{RE}(x, z)$ pour une position xz suivant tous les éléments émetteurs E et les éléments récepteurs R, les contributions en amplitude $h_{RE}(\tau_{RE})$ au temps de vol correspondant à cette position xz pour chaque paire émetteur-récepteur sont sommées :

$$I_{xz} = \sum_{R=1, T=1}^{R=N, T=N} h_i(\tau_i)$$

I_{xz} représente l'intensité de l'image à la position $x y$.

Plus la zone de reconstruction est grande et dense, plus le temps de calcul est important. Si les ressources électroniques nécessaires pour le calcul de l'image ont longtemps été une limitation à l'utilisation cette méthode, elle est depuis quelques années progressivement introduite dans les équipements commerciaux portatifs.

La norme ASME (livre V, section 4) a été mise à jour en conséquence en 2019 et la norme IIW/ISO devrait suivre dans les 2 ou 3 années à venir.

Dans cette étude, nous nous intéresserons à une comparaison quantitative des différentes méthodes précédemment introduites, à savoir (1) le balayage linéaire, (2) le balayage sectoriel et (3) la focalisation en tout point. Si plusieurs études [6, 7] permettent de constater les différences existantes entre ces méthodes de manière qualitative, très peu se penchent sur l'aspect quantitatif.

Matériel et méthode

Méthode

Compte tenu de la différence de traitement du signal ultrasonore utilisé pour restituer une image de la pièce inspectée entre les méthodes comparées, des critères généralisables à chacune d'elle doivent être établis pour évaluer leurs performances. Ainsi, et dans un premier temps, nous allons, pour chaque méthode, évaluer un indicateur d'étendue de défaut (IED) vertical et horizontal. Cet indicateur adimensionnel sera calculé à partir de l'étendue de l'indication relative au défaut au-dessus d'un seuil de -6dB défini par rapport au maximum de l'intensité de cette indication mesurée, $L_{Image -6dB}$, normalisée par rapport à la dimension réelle du défaut (horizontale ou verticale). Cet indicateur est inspiré de l'indicateur API introduit par C. Holmes et al. [4, 8] pour un défaut ponctuel. Il permet de rendre compte de l'étendue imagée du défaut par rapport à son étendue réelle. Une valeur de 1 sera par exemple une restitution idéale, une valeur de 0,5 rendra compte d'une sous-estimation et une valeur de 3 d'une exagération de l'étendue du défaut sur l'image.

$$IED_{x,z} = \frac{L_{x,z} |Image -6dB|}{L_{x,z} |défaut|}$$

Nous évaluerons ensuite le ratio entre l'amplitude maximale de l'indication relative au défaut et l'amplitude maximale relative au fond de la pièce (RDM : Ratio Défaut Mur). Ce second indicateur permet de rendre compte de l'ampleur perçue du défaut par rapport au plus intense réflecteur présent dans la pièce. Ainsi, pour assurer une bonne détectabilité du défaut, on tendra à minimiser ce ratio.

$$RDM = 20 \log \left(\frac{|A_{Max défaut}|}{|A_{Max fond de la pièce}|} \right)$$

Pour ce dernier critère, il est à noter que des courbes de compensation du gain en fonction de la distance (DAC : Distance Amplitude Correction) ou du temps (TGC : Time Gain Compensation) sont communément utilisées pour contre balancer les effets d'atténuation et de dispersion géométrique du signal ultrasonore lors de sa propagation dans le matériau. Aucune courbe de ce genre n'a été utilisée lors de cette étude afin de ne pas introduire de biais supplémentaire. Enfin, on estimera l'erreur relative de positionnement verticale, E_{pos}^z , du barycentre de l'indication relative au défaut (au-dessus d'un seuil de -6dB défini par rapport au maximum de l'intensité de cette indication) par rapport à la position réelle de celui-ci :

$$E_{pos}^z = \left| Z_{mesuré} - Z_{réel} \right|$$

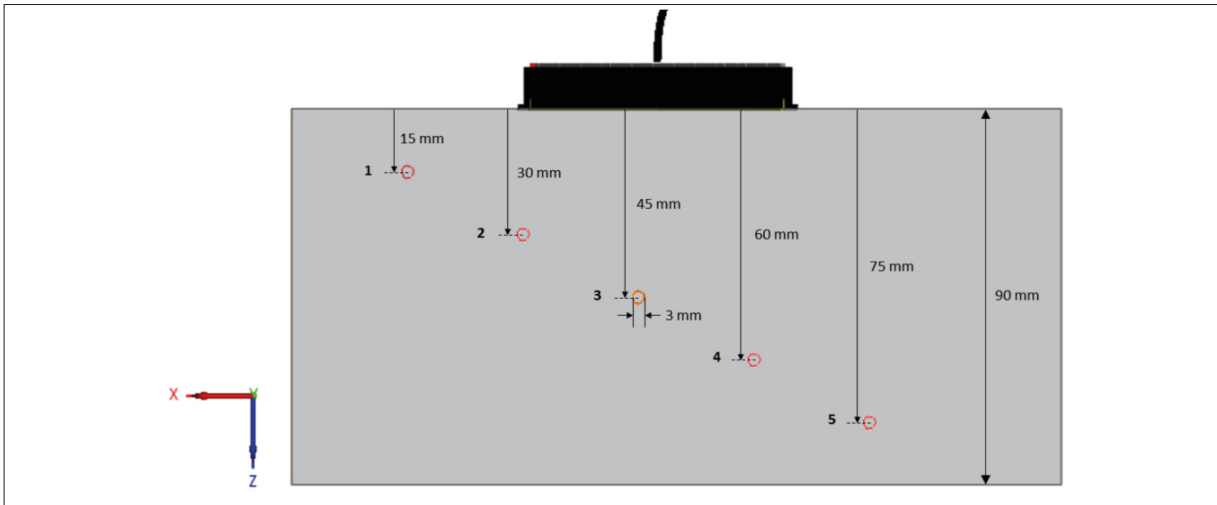


Fig. 5 : Schéma de la pièce étudiée
Schematic of the studied sample

À noter que la position du centre de l'indication du défaut est mesurée à partir du fond de la pièce qui est pris pour référence. Pour cette étude, un bloc d'acier de 90 mm d'épaisseur, comportant cinq trous de 3 mm de diamètre numérotés de 1 à 5 et situés à différentes profondeurs est étudié (figure 5). La vitesse de propagation des ondes longitudinales dans ce matériau est de 5 900 m/s. La sonde sera centrée au-dessus de chaque trou pour toutes les acquisitions.

Matériel

L'étude menée expérimentalement utilise une sonde Olympus® modèle PWZ1. Elle dispose de 60 éléments et sa fréquence centrale est de 7,5 MHz. Pour les balayages linéaires et sectoriels, l'acquisition est réalisée à l'aide de l'appareil commercial portable Olympus® Omniscan®SX. Pour la méthode de focalisation en tout point, la plateforme de développement Verasonics®, modèle 64 LE a été utilisée couplée à l'utilitaire BRAIN développé par le groupe de recherche en contrôle non destructif de l'université de Bristol (UK) ne pouvant effectuer une telle acquisition sur un matériel commercial Olympus® à l'écriture de ces lignes. Elle a permis l'acquisition de la matrice complète d'émission-réception. Le traitement des données est effectué sur MATLAB® et deux types de reconstructions sont réalisées : une focalisation en tout point utilisant uniquement le chemin direct et une focalisation en tout point utilisant le chemin direct ainsi que le chemin indirect utilisant le rebond sur le fond de la pièce, les deux reconstructions étant sommées. Le couplage entre la sonde et la pièce inspectée est réalisé à l'aide d'une mince couche d'eau et la sonde est déplacée manuellement (Figure 6).

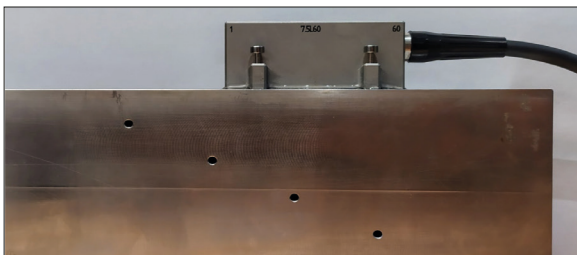


Fig. 6 : Dispositif expérimental
Experimental setup

Les paramètres d'acquisition pour chaque méthode d'imagerie sont précisés dans le tableau 1. Ils ont été sélectionnés afin de (1) rendre la meilleure image possible du défaut et (2) garder le plus de paramètres d'inspections semblables entre les différentes méthodes.

	Balayage linéaire	Balayage sectoriel	TFM directe	TFM indirecte
Tension (V)	40	40	40	40
Gain (dB)	8	8	8	8
Nombre d'éléments en émission/réception	16/16	16/16	1/60	1/60
Incrément entre chaque tir	1 élément	0,5°	1 élément	1 élément
Premier élément – Dernier élément	1-60	22-41	1-60	1-60
Focalisation	Milieu (45 mm)	Milieu (45 mm)	-	-
Nombre de points	640	640	1000	3000

Tabl. 1 : Principaux paramètres d'acquisition pour chaque méthode d'imagerie

Enfin, bien que la plateforme d'acquisition ne soit pas la même pour toutes les méthodes comparées, nous souhaitons ici quantifier les différences entre images réalisées à l'aide des technologies les plus abouties disponibles sur le marché. Les délais spécifiques à chaque équipement ont été ajustés pour les différentes reconstructions présentées par la suite afin de présenter des images comparables.

Résultats expérimentaux et discussion

Focalisation en tout point et focalisation fixe

Le choix des paramètres d'acquisition pour le balayage linéaire et sectoriel, et en particulier ceux relatifs à la focalisation, sont importants. À la lecture des figures 7 et 8 où pour chaque méthode les mêmes paramètres sont utilisés pour représenter respectivement le trou n°3 et le trou n°1, on remarque une différence significative en ce qui concerne l'étendue de l'indication relative au défaut. Ainsi, cette indication semble plus étendue lorsque située en dehors de la zone de focalisation pour le L-Scan et le S-Scan, ce qui ne semble pas être le cas pour la méthode TFM où l'étendue n'est pas affectée.

Les différents indicateurs introduits précédemment ont été calculés et résumés sur la figure 10 pour chaque trou et méthode. L' IED_x est en effet constant pour la méthode TFM peu importe la profondeur du défaut alors qu'il double pour le S-Scan et triple pour le L-Scan. L' IED_z peut en revanche être considéré constant pour tous les défauts par L-Scan et TFM alors qu'il est triplé pour le balayage sectoriel.

Ainsi, la focalisation imposée au milieu de la pièce lors de l'acquisition des signaux par les méthodes conventionnelles affecte grandement l'étendue de l'indication relative au défaut et donc l'évaluation de sa taille réelle. Si la localisation du défaut est complètement inconnue, le choix de la profondeur de focalisation devient alors complexe et une méthode TFM serait à privilégier.

Évaluation de la taille du défaut

L'étendue horizontale du défaut restituée par l'image est fidèle au défaut réel en ce qui concerne le L-Scan et le S-Scan lorsque le défaut est situé proche de la zone de focalisation (pour les trous n°2-4, $IED_x \approx 1$) et surestimée lorsque l'on s'en éloigne (pour les trous n°1 et n°5, $IED_x \geq 2$). Une sous-estimation de l'étendue du défaut est globalement observée pour la méthode TFM indirecte ($IED_{x,z} \leq 0.4$) ainsi que pour L-Scan et le S-Scan en ce qui concerne l'étendue verticale ($IED_z \leq 0.5$). Ceci s'explique par le fait que ces indications sont principalement relatives à la réflexion de l'onde sur le haut de chaque trou et non sur l'ensemble de sa géométrie.

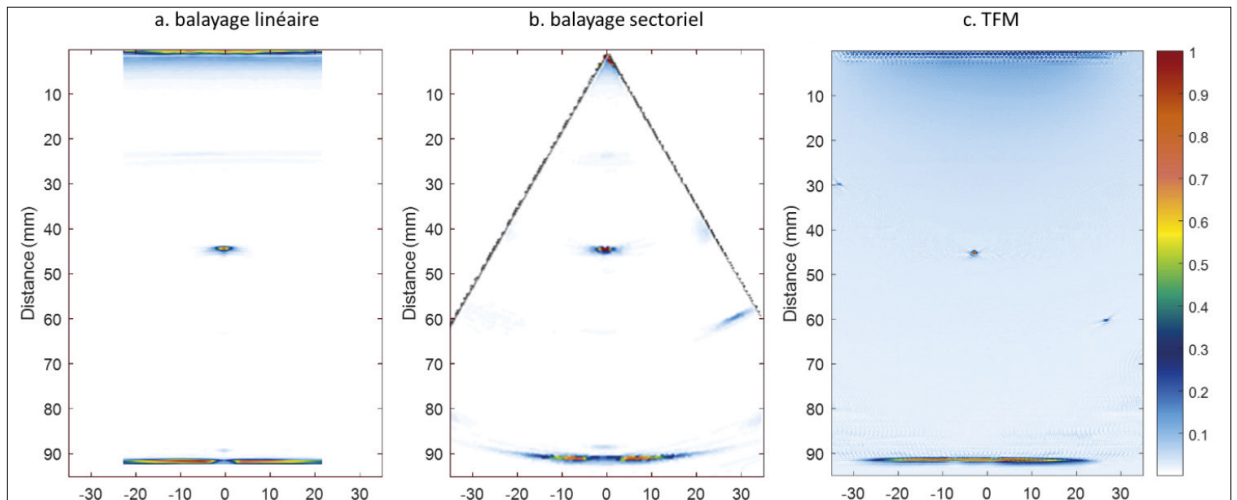


Fig. 7 : Différentes images obtenues pour le trou n°3 avec pour a) et b) une focalisation dans le milieu de la pièce et c) une focalisation en tout point.
Different images of SDH n°3, with a) and b) focused at the center of the test piece and c) the total focusing method

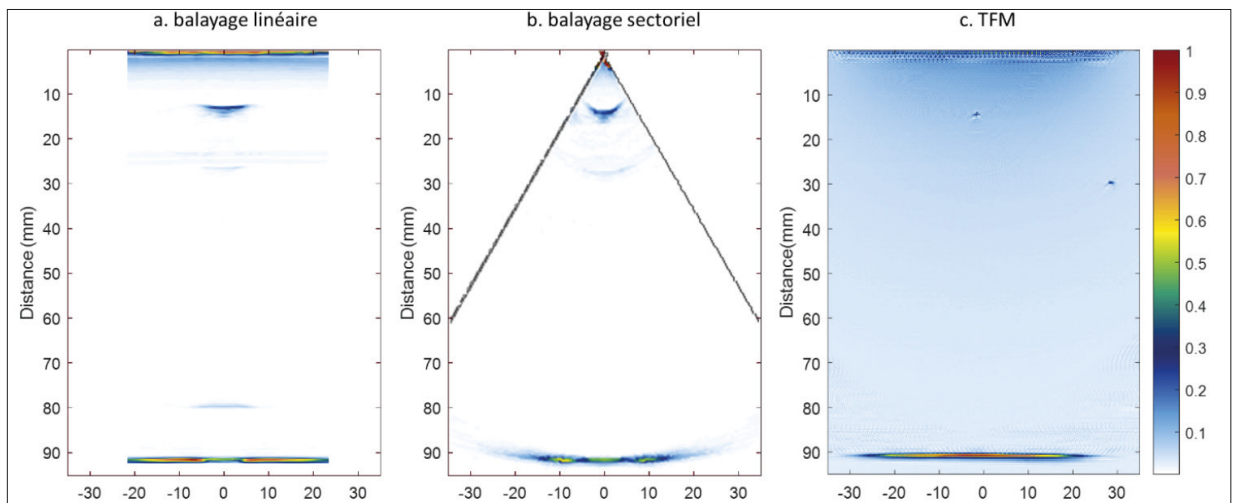


Fig. 8 : Différentes images obtenues pour le trou n°1 avec pour a) et b) une focalisation dans le milieu de la pièce et c) une focalisation en tout point.
Different images of SDH n°1, with a) and b) focused at the center of the test piece and c) the total focusing method)

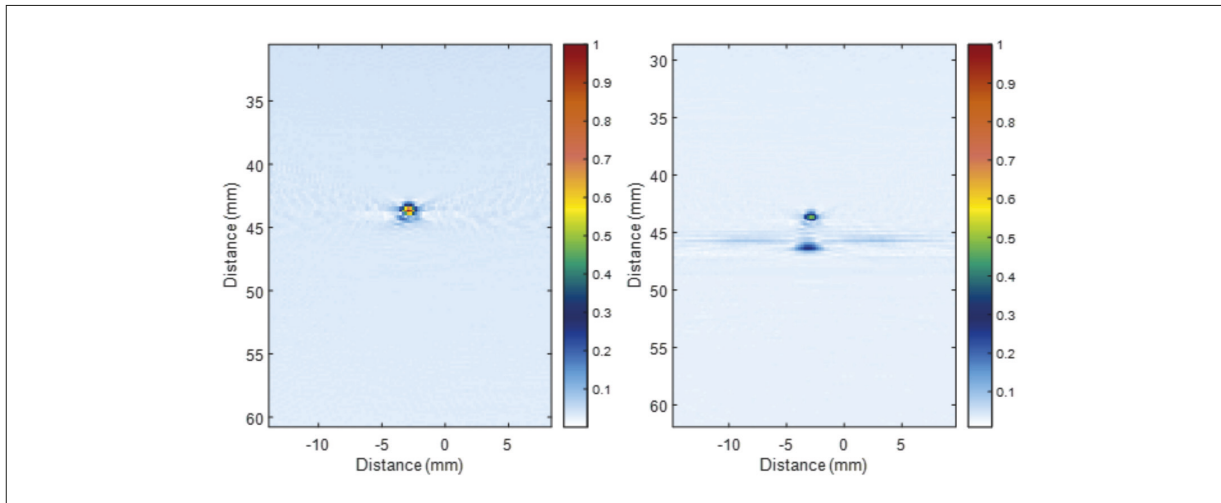


Fig. 9 : Comparaison entre la méthode TFM utilisant le chemin direct (gauche) et la méthode TFM utilisant le chemin direct ainsi que la réflexion sur le fond de la pièce (droite) pour imaginer le trou n°3
Comparison between the direct path TFM (left) and the full skip TFM (right)

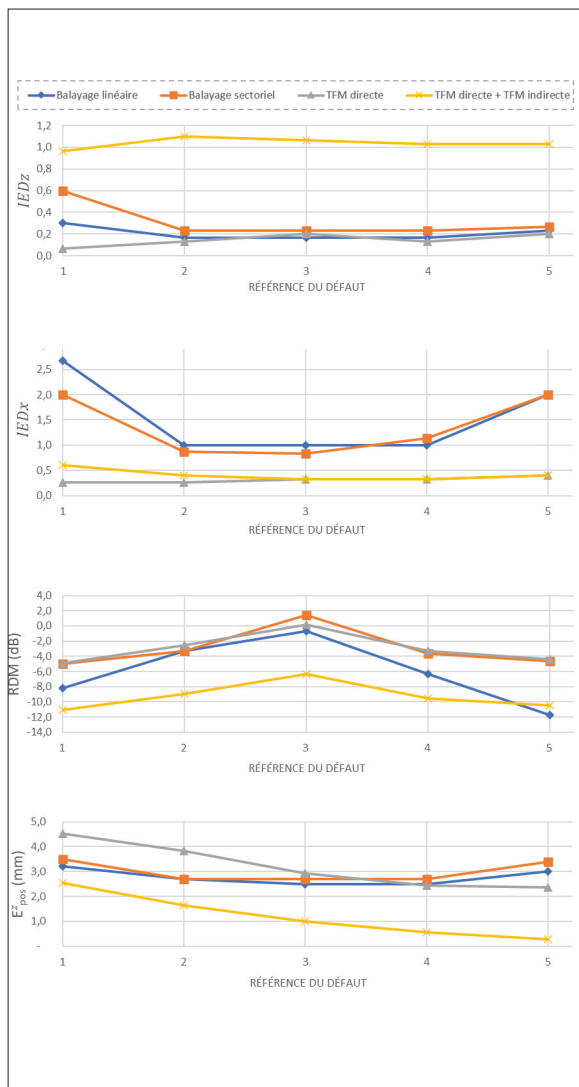


Fig.10 : Résultats expérimentaux, évolution des différents indicateurs pour chaque trou
Experimental results, for each SDH evolution of indicators is plotted

Enfin, la méthode TFM composée du chemin direct et du chemin utilisant le chemin passant par le fond de la pièce (noté TFM directe + TFM indirecte - Figure 4) permet une bien meilleure évaluation de la taille du défaut en ce qui concerne son étendue verticale ($IED_z \approx 1$), car la réflexion du bas du trou est également restituée (Figure 9).

Amplitude relative à l'indication du défaut

L'intensité de l'indication relative au défaut sur l'image est une donnée importante permettant de juger de la détectabilité de composantes qui pourraient être moins évidentes que les trous de ce bloc d'acier. L'indicateur RDM relatif à l'amplitude du défaut par rapport à l'écho de fond a été évalué pour chaque méthode et défaut (Figure 10) et met en lumière deux aspects : le balayage sectoriel et la méthode TFM ont sensiblement le même comportement, soit une bonne intensité de l'indication du défaut en milieu de pièce et une dégradation de celle-ci sur les bords du bloc jusqu'à une différence de -5dB. Un comportement encore plus prononcé est observé pour le balayage linéaire avec une différence d'amplitude pouvant aller jusqu'à -12dB lorsque proche du fond de la pièce. Enfin, la méthode TFM directe + TFM indirecte permet certes une meilleure estimation de la taille du défaut mais la simple sommation de ces deux contributions tend à diminuer l'intensité globale de l'indication relative au défaut. Une meilleure méthode de sommation pourrait être développée afin de maximiser l'amplitude des indications sans pour autant perdre en capacité de détection.

Positionnement du défaut

L'erreur de positionnement de l'indication relative au défaut par rapport à la position réelle du défaut est comprise entre 2,5 mm et 3,5 mm pour le L-Scan et le S-Scan avec un minimum d'erreur lorsque proche du niveau de focalisation. Les deux méthodes TFM ont une tendance à la baisse avec l'augmentation de la profondeur du défaut mais celle combinant les deux chemins (TFM directe + TFM indirecte) permet la meilleure localisation du défaut parmi toutes les méthodes analysées (jusqu'à une erreur de positionnement de moins de 0,5 mm).

Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes attachés à établir des indicateurs permettant de comparer de façon quantitative différentes méthodes d'imagerie de défauts par sondes à ultrasons multiéléments : le balayage linéaire, le balayage sectoriel et les méthodes de focalisation en tout point par chemin direct ou indirect. L'étendue de l'indication relative au défaut, sa localisation et son amplitude ont été évaluées sur un bloc d'acier comportant des trous percés latéralement de 3 mm de diamètre situés à différentes profondeurs.

Nous avons mis en lumière les caractéristiques suivantes :

- L'importance du choix de la profondeur de focalisation pour les méthodes L-Scan et S-Scan, en particulier pour ce qui concerne l'évaluation de la taille du défaut, qui peut, dans le pire des cas, être doublée, et son positionnement, qui peut souffrir d'une erreur allant jusqu'à 3,5 mm pour notre configuration d'inspection.
- La constance de représentation du défaut pour la méthode TFM, qui même si elle ne représente pas l'étendue réelle du défaut permet de fournir des indications semblables pour une même configuration et à travers toute la profondeur de la pièce.
- L'intérêt d'utiliser plusieurs chemins différents pour la reconstruction TFM (TFM directe + TFM indirecte) afin d'améliorer le positionnement et le dimensionnement du défaut et ce peu importe sa localisation (gains d'un facteur 2 minimum).

Remerciements

Nous souhaitons remercier Olympus NDT Canada pour avoir financé ce projet dans le cadre de la chaire de recherche industrielle Olympus sur le contrôle non destructif ultrasonore.

Références bibliographiques

- [1] Drinkwater, B.W. and P.D. Wilcox, *Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review*. *NDT & E International*, 2006. 39(7): p. 525-541
- [2] Schmerr, L.W., S.-J. Song, and SpringerLink (Service en ligne), *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Models and Measurements*. 2007, Springer Science+Business Media, LLC.: Boston, MA
- [3] Schmerr Jr, L.W. and SpringerLink (Service en ligne), *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*. *Solid Mechanics and Its Applications*. 2015, Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer. 1 ressource en ligne (XII, 377 p.)
- [4] Holmes, C., B.W. Drinkwater, and P.D. Wilcox, *Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation*. *NDT & E International*, 2005. 38(8): p. 701-711
- [5] Zhang, Y.D., et al., *Ultrasonic Flaw Imaging via Multipath Exploitation*. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012. 2012: p. 1-12
- [6] Chahbaz, A. and R. Sicard, *Comparative Evaluation between Ultrasonic Phased Array and Synthetic Aperture Focusing Techniques*. *AIP Conference Proceedings*, 2003. 657(1): p. 769-776
- [7] Reverdy, F., G. Benoist, and L.L. Ber, *Advantages and Complementary of Phased-Array Technology and Total Focusing Method in 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*
- [8] Fan, C., et al., *A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation*. *Ultrasonics*, 2014. 54(7): p. 1842-1850