

CFA/VISHNO 2016

Détection de défauts plans dans un alliage diffusant par sonde ultrasonore multi-élément

C. Trottier^a, S. Shahjahan^a, A. Schumm^a, A. Aubry^b et A. Derode^b

^aEDF R&D, Site des Renardières, Ecuelles, 77818 Moret Sur Loing, France

^bInstitut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

camille.trottier@edf.fr



LE MANS

Lors du contrôle ultrasonore de matériaux polycristallins, les signaux enregistrés peuvent présenter un bruit de structure lié à la diffusion multiple des ondes acoustiques sur les joints de grains. Ceci conduit à une dégradation mal maîtrisée du faisceau, limitant les performances des méthodes ultrasonores classiques à détecter la présence de défauts. De plus, l'application des techniques de filtrage de la diffusion multiple telles que la technique MSF-DORT peut se révéler difficile surtout dans le cas d'acquisitions réalisées en incidence oblique. En effet, bien que cette méthode présente de très bons résultats pour la détection de défauts volumiques, elle ne permet pas de différencier des échos de diffusion double (provenant du rebond des ondes sur le fond de la pièce puis sur un défaut plan) de la diffusion multiple (provenant de la structure du matériau). La méthode Smart-UCT présentée ici a pour objectif de permettre l'imagerie de défauts plans en milieu fortement diffusant. Les résultats sont obtenus à l'aide d'une barrette linéaire de 128 voies et 5 MHz lors de tir en incidence oblique (à 60°) et montrent que l'utilisation de cette technique d'imagerie « intelligente » rend la détection de défaut plan possible à forte profondeur contrairement à d'autres techniques multiéléments choisies comme références telles que la FTP (Focalisation en Tout point) ou la méthode MSF-DORT.

1 Introduction

Le contrôle ultrasonore des matériaux polycristallins que l'on peut trouver dans l'industrie nucléaire représente un défi scientifique important pour EDF. En effet, ces matériaux (soudures en acier inoxydable austénitique, alliages à base nickel, aciers austéno-ferritiques moulés...) sont couramment utilisés dans les composants du circuit primaire, mais restent difficiles à contrôler, car l'interaction de l'onde incidente avec la microstructure est complexe et conduit à une dégradation mal maîtrisée du faisceau lors de sa propagation. En particulier, dans le cas où la taille caractéristique des grains est de l'ordre de la longueur d'onde, la diffusion de l'onde ultrasonore aux joints de grains a pour conséquence une atténuation de l'onde et l'apparition d'un bruit dit « de structure » qui gêne sensiblement l'inspection de la pièce [1, 2].

La propagation des ondes en milieux diffusants a fait l'objet de nombreuses études avec pour but à la fois d'améliorer le rapport signal sur bruit dans les matériaux fortement diffusants et de développer des modèles théoriques ou numériques de bruit de structure [3-7]. Dans le cas des contrôles ultrasonores, l'utilisation des capteurs multiéléments a ouvert la voie à de nouvelles études expérimentales en permettant d'enregistrer une quantité importante d'informations sur les matériaux sondés. Une approche de plus en plus utilisée dans le monde des CND est fondée sur l'acquisition de la matrice de transfert, \mathbf{K} , mesurée à l'aide d'un réseau d'éléments à la fois émetteurs et récepteurs. Cette technique, parfois appelée « Full Matrix Capture » ou FMC, permet d'obtenir une matrice qui contient toute l'information disponible sur le milieu inspecté. Un certain nombre d'opérations de traitement de signal peut alors lui être appliqué en post-traitement de façon à en retirer l'information considérée comme pertinente.

L'objet de ce travail est de mettre en place un filtrage de la diffusion afin de parvenir à imager un défaut plan enfoui à forte profondeur dans un milieu fortement diffusant. La méthode d'imagerie Smart-UCT, présentée ici, sera tout d'abord comparée à la technique MSF-DORT, développée par Aubry et al [8, 9] et validé par Shahjahan [10], dans le cas de l'imagerie de défauts volumiques en milieu fortement diffusant. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la détection d'une entaille, d'ouverture 0.5 mm et de hauteur 20 mm, usinée dans un bloc de 90 mm d'épaisseur. Cette expérience est réalisée dans des conditions ne permettant pas l'utilisation de la méthode MSF-DORT.

2 Principes et méthode

Initialement développée pour des applications en optique, la méthode Smart-UCT a pour objectif de détecter des objets à travers un milieu fortement diffusant [11]. Dans sa déclinaison à l'acoustique, cette technique exploite la matrice de diffusion du milieu. Cette matrice, notée \mathbf{R} , est construite par sommation à partir de la matrice de transfert du milieu \mathbf{K} . Cette dernière peut être acquise à l'aide d'une barrette linéaire à N éléments par FMC (Full Matrix Capture). La FMC consiste en l'émission d'une impulsion par un élément de la barrette puis en la réception de la réponse du milieu par tous les éléments simultanément. L'opération est ensuite renouvelée pour les N éléments du capteur. Les N^2 signaux ainsi obtenus sont rangés dans une matrice $\mathbf{H}(t)$. Un passage dans le domaine fréquentiel (via une analyse temps-fréquence adaptée) permet alors d'obtenir une nouvelle matrice complexe, notée $\mathbf{K}(T, f)$ de dimension N par N pour chaque temps T et fréquence f .

La matrice de diffusion \mathbf{R} est construite à partir de \mathbf{K} comme la somme des contributions de toutes les ondes arrivant au transducteur à un temps T . T étant le temps nécessaire à une onde pour parcourir la distance entre un émetteur i et un point m du plan focal puis entre un point p du plan jusqu'au récepteur j . Pour une fréquence donnée, la matrice \mathbf{R} s'exprime donc ainsi :

$$R_{mp}(f) = \sum_{m,p,i,j} k_{ij}(T = t_{im} + t_{pj}, f) \quad (1)$$

Avec t_{im} et t_{pj} respectivement les temps des trajets associés au parcours de l'onde de l'émetteur i au point m du plan et au parcours de l'onde du point p au récepteur j de la barrette.

Cette matrice $\mathbf{R}(f)$ contient toute l'information disponible sur les points focaux choisis à une fréquence donnée. En milieu homogène ou lorsque la diffusion multiple est faible devant la diffusion simple, l'écho spéculaire d'un réflecteur se trouvant dans le plan focal observé apparaît sur la diagonale de la matrice \mathbf{R} . Si le réflecteur est de dimension supérieure à la distance séparant deux points focaux δ , l'écho associé s'étale aussi hors diagonale, comme le montre la figure 1. Une façon directe d'imager ce plan consiste à sommer la diagonale centrale de \mathbf{R} pour toutes les fréquences, l'image ainsi formée est la Focalisation en Tout Point.

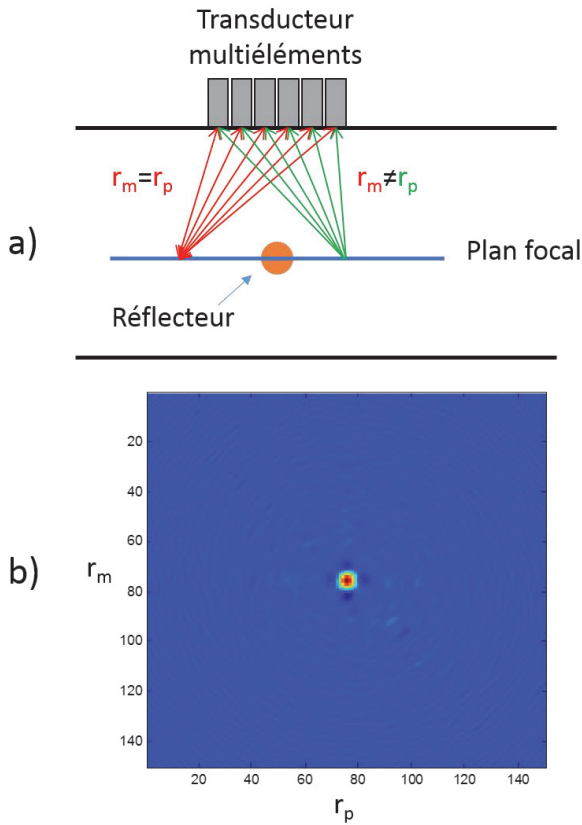


Figure 1: a) schéma du principe de construction de la matrice R associée à un plan focal donné. b) exemple de matrice R construite au niveau d'un réflecteur circulaire situé au centre du plan focal.

Cependant, en milieu hétérogène ou si la diffusion multiple domine devant la diffusion simple, la FTP ne parvient pas à imaginer correctement le milieu. En effet, la matrice $R(f)$ contient toutes les contributions des ondes arrivant au transducteur au temps T et à la fréquence f . En général, ces signaux contiennent à la fois une contribution de diffusion simple (SS, pour single scattering) et une contribution de diffusion multiple (MS, pour multiple scattering), de telle sorte que l'on peut écrire $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{SS} + \mathbf{R}^{MS}$. L'écho spéculaire provenant d'un défaut enfoui dans un milieu multiplement diffusant est contenu dans \mathbf{R}^{SS} . Au contraire, le bruit de structure est contenu à la fois dans \mathbf{R}^{SS} et \mathbf{R}^{MS} . Pour améliorer la détection de l'écho direct, il est nécessaire de diminuer au maximum la contribution de \mathbf{R}^{MS} .

La signature de la diffusion multiple est différente de celle de la diffusion simple sur \mathbf{R} . \mathbf{R}^{MS} ne contient que des contributions aléatoires présentes sur l'ensemble de la matrice. Une façon de filtrer les contributions de diffusions multiple est de projeter la matrice \mathbf{R} sur une base caractéristique de la diffusion simple que nous appellerons \mathbf{S} et qui est défini ainsi :

$$S(r_m, r_p) = \exp\left(-|r_m - r_p|^2 / l_c^2\right) \quad (2)$$

Avec l_c le paramètre permettant de tenir compte de l'apparition sur et hors diagonale des échos de diffusion simple. Le choix de l_c est régi par deux éléments :

- La longueur de cohérence de l'onde balistique dans le plan focal : en plus de l'atténuation, la diffusion

induit aussi des aberrations qui dégradent la qualité de la focalisation du front d'onde et provoquent l'étalement des échos spéculaires.

- La taille de la cible : en l'absence de diffusion multiple, une cible n'apparaît pas seulement sur la diagonale de la matrice R . Cela survient si la taille de la cible est supérieure à la cellule de résolution.

Mathématiquement, la projection de \mathbf{R} sur \mathbf{S} peut s'écrire comme :

$$\mathbf{R}^S = \mathbf{R} \circ \mathbf{S} \quad (3)$$

Cette nouvelle matrice \mathbf{R}^S contient les contributions de diffusion simple et un résidu de diffusion multiple persistant autour et sur la diagonale de la matrice.

Une fois cette matrice de diffusion simple obtenue, nous pouvons utiliser la méthode DORT (Décomposition de l'Opérateur de Retournement Temporel). Cette méthode repose sur la décomposition en valeurs singulières (SVD – Singular Value Decomposition) de la matrice de diffusion. En effet, la matrice \mathbf{R} peut être écrite comme $\mathbf{R} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}$ où \mathbf{U} et \mathbf{V} sont des matrices unitaires contenant les vecteurs singuliers et \mathbf{S} est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières de \mathbf{R} . Dans le cas simple d'un milieu homogène contenant un nombre de diffuseurs (de petite taille devant la longueur d'onde) inférieur à N et où la diffusion multiple peut être négligée, il est possible d'associer de façon biunivoque chaque diffuseur à une valeur singulière et un vecteur singulier [12]. La valeur singulière λ_i est proportionnelle à la réflectivité du $i^{\text{ème}}$ diffuseur. Le vecteur singulier correspond au jeu d'amplitudes et de retards à transmettre à la barrette multiéléments pour focaliser sur ce diffuseur précis. Cependant, la méthode DORT ne peut être utilisée dans le cas de milieu diffusant en raison de la prédominance de la diffusion multiple. L'astuce est de tirer avantage de la matrice filtrée \mathbf{R}^S .

Dans le cas où le milieu inspecté ne contiendrait qu'un seul défaut, la variable d'intérêt est la plus grande valeur singulière λ_1 issue de la SVD. Toutefois, même lorsque le milieu ne présente aucun défaut, il sera toujours possible de réaliser une SVD et d'obtenir des valeurs singulières non nulles. En particulier, dans le cas d'un milieu diffusant, même après filtrage, λ_1 peut être vue comme une variable aléatoire dont la valeur ne va, idéalement, dépasser un certain seuil qu'en présence de défaut. Il est donc nécessaire, pour associer λ_1 à la cible (et non au bruit de structure), de définir un critère de détection adapté [8, 9, 13]. Pour déterminer ce critère de détection, la fonction de répartition $F1$ de la variable aléatoire λ_1 doit être connue. Elle est déterminée par l'inspection d'une zone du milieu ne contenant aucun défaut. En construisant l'histogramme cumulé des premières valeurs singulières, on obtient un estimateur de la fonction de répartition $F1$. Une fois que $F1$ est connue, l'opérateur choisit une probabilité de fausse alarme (PFA) qu'il juge acceptable (1% par exemple) et en déduit le seuil α correspondant, tel que $F1(\alpha) = 1 - \text{PFA}$.

Lors de l'inspection de la zone contenant potentiellement des défauts, si une valeur de λ_1 supérieure à α est observée elle est associée à la présence d'un défaut. La méthode DORT peut alors être appliquée : le vecteur singulier correspondant à λ_1 est utilisé pour obtenir l'image du défaut. L'image du plan focal s'écrit donc :

$$I = \lambda_1 |U_1 \circ V_1| \quad (4)$$

Cette méthode de filtrage peut ensuite être appliquée à une succession de plans focaux afin d'obtenir une image du milieu. Nous verrons dans la section suivante une utilisation de cette méthode d'imagerie pour la détection de défauts plans.

3 Application à la détection de défauts

Dans cette partie, nous présenterons deux applications de la méthode Smart-UCT pour la détection de défauts dans des maquettes en Inconel 600. L'Inconel 600 est un alliage à base nickel couramment utilisé dans le secteur nucléaire. Le tableau 1 indique les proportions des éléments principaux composant ce matériau. Ce matériau a été choisi pour l'isotropie de sa structure en termes de propriétés élastiques.

Tableau 1: Composition chimique de l'Inconel 600.

Élément	Ni	Cr	Fe	Mn
Taux %	74.09	15.9	8.8	0.3
Élément	Si	Ti	Al	Cu
Taux %	0.29	0.22	0.17	0.027
Élément	Co	P	S	
Taux %	0.07	0.008	0.005	

La première application de l'imagerie Smart-UCT consiste en la détection de défauts cylindriques usinés à forte profondeur dans un milieu fortement diffusant. La seconde est une application du même processus d'imagerie pour la détection de défauts plans. Les images obtenues seront comparées aux images FTP. La FTP présente l'avantage d'utiliser les mêmes données d'acquisition que la méthode Smart-UCT.

3.1 Application à la détection de défauts volumiques

Cette première application est réalisée sur un bloc en Inconel 600 de dimensions $90 \times 90 \times 280$ mm³. Cette maquette a été traitée thermiquement afin de modifier sa microstructure. Le bloc a été monté à 1200 °C pendant 4 heures puis refroidi à l'eau pour augmenter la taille des grains qui le compose. Une analyse métallographique réalisée sur ce bloc permet de déterminer que la taille moyenne de ses grains est de 750 µm. De plus, quatre trous cylindriques ont été usinés, de sorte qu'ils soient à des profondeurs allant de 10 à 70 mm par une face et de 20 à 80 mm par la face opposée par pas de 20 mm.

La matrice de réponse du milieu \mathbf{H} est ensuite enregistrée par FMC. Les acquisitions sont réalisées à l'aide d'une barrette linéaire de 128 éléments de dimensions 0.5×15 mm² et une fréquence centrale de 5 MHz. L'expérience consiste à placer le capteur au-dessus de chaque trou cylindrique pour l'acquisition. La matrice \mathbf{H} est ensuite utilisée pour obtenir les images TFM, MSF-DORT et Smart-UCT. La Figure 2 présente les images obtenues à l'aide des trois traitements. Ces images montrent les performances des méthodes MSF-DORT et

Smart-UCT comparées à la FTP. Sur les images MSF-DORT et Smart-UCT le trou cylindrique à 70 mm de profondeur est clairement visible. Ces deux techniques de traitement avancées permettent donc la détection de défauts volumiques à forte profondeur et bien que le milieu soit fortement diffusant. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à la détection de défauts plans.

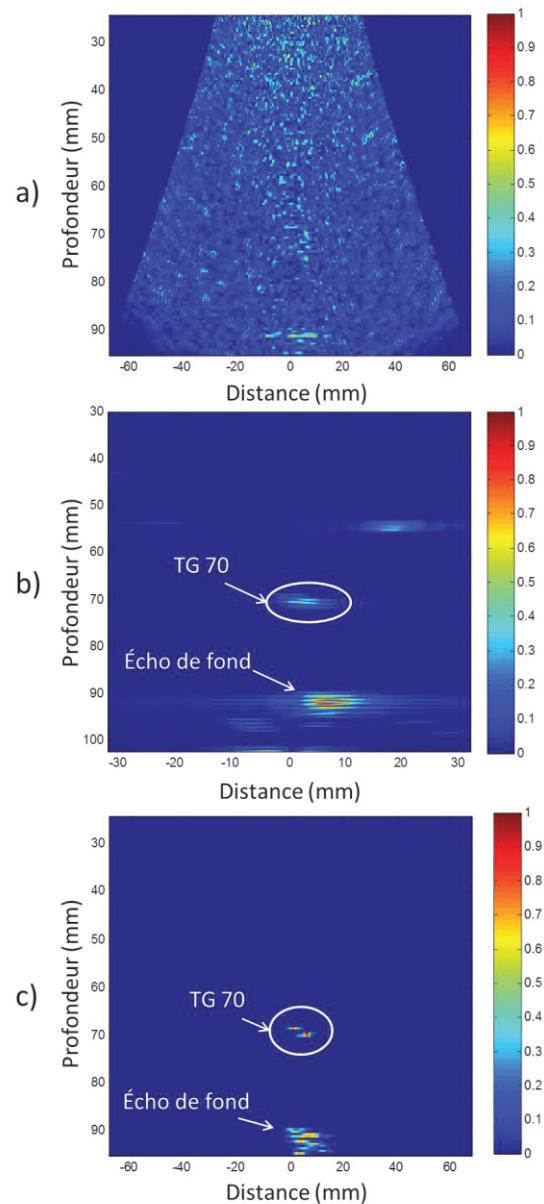


Figure 2 : images FTP (a), MSF-DORT (b) et Smart-UCT (c) du bloc à gros grains avec quatre trous cylindriques. Les trois traitements utilisent les mêmes données d'acquisition réalisées à l'aplomb du trou situé à 70 mm de profondeur par FMC à l'aide d'une barrette linéaire de 128 voies et 5MHz de fréquence centrale.

3.2 Application à la détection de défauts plans

Cette deuxième étude expérimentale a été réalisée sur deux maquettes en Inconel 600 de dimensions $90 \times 90 \times 360$ mm³, chacune avec une taille de grains différente. Les deux blocs sont issus de la même barre forgée. Un de ces blocs a subi un traitement thermique afin d'augmenter la taille de

ces grains. Une analyse micrographique réalisée sur les deux blocs nous donne une taille moyenne de grains de 90 μm pour le bloc non traité et de 750 μm pour le bloc traité thermiquement. Une entaille débouchante de 20 mm de hauteur et 0.5 mm d'ouverture a été usinée dans chacun des blocs. Le contrôle est effectué par la face opposée.

La matrice de réponse du milieu \mathbf{H} est ensuite enregistrée par FMC. Les acquisitions sont réalisées à l'aide d'une barrette linéaire de 128 éléments de dimensions 0.5 \times 15 mm² et une fréquence centrale de 5 MHz.

Une précédente étude [14] a montré l'inefficacité de la méthode MSF-DORT à détecter un défaut plan en incidence normale. Une solution classique consiste à utiliser un sabot afin de mieux « éclairer » l'entaille. Expérimentalement, il a été choisi d'utiliser un sabot permettant un tir oblique avec un angle de réfraction de 60° dans le bloc étudié. Dans cette configuration, la méthode MSF-DORT n'est plus applicable, les conditions de l'approximation paraxiale n'étant plus respectées. Les acquisitions seront seulement traitées par TFM et Smart-UCT. Les deux traitements sont réalisés et les images obtenues sont présentées sur les figures 3 et 4.

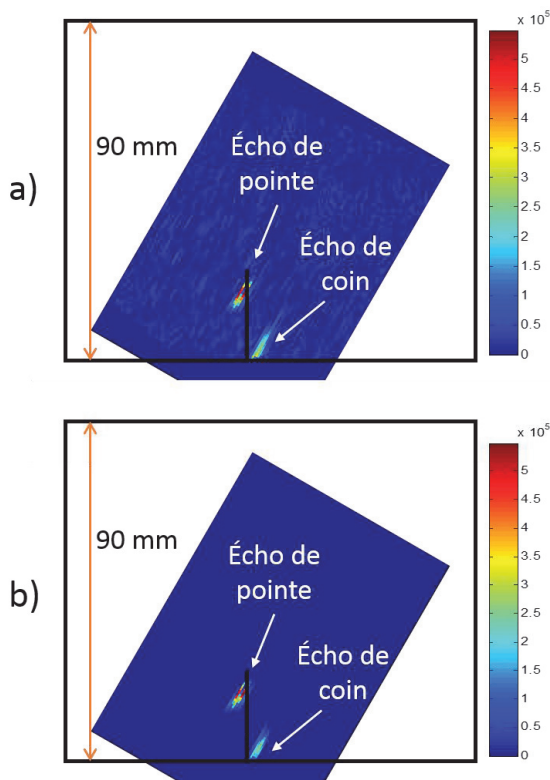


Figure 3 : images FTP (a) et Smart-UCT (2) du bloc à petits grains contenant une entaille de 20 mm de hauteur et 0.5 mm d'ouverture. Les deux traitements utilisent les mêmes données d'acquisition réalisée avec un sabot d'angle de réfraction de 60° par FMC à l'aide d'une barrette linéaire de 128 voies et 5MHz de fréquence centrale.

Dans le bloc à petits grains, les images 3.a et 3.b montrent deux échos. Le premier correspondant à la pointe de l'entaille et le second provenant de la base de l'entaille. Il est à noter que l'écho de la base de l'entaille a une intensité bien inférieure à celui de la tête. Cette différence peut s'expliquer par la nature différente des deux échos et la nature du filtrage. En effet, l'interaction de l'onde avec

l'entaille est surtout de type coin. L'onde va rebondir sur le fond du bloc avant d'atteindre l'entaille ou inversement. L'interaction entre l'onde et l'entaille est alors principalement de type diffusion double. Or le filtrage est conçu pour filtrer les contributions de diffusion multiple et notamment celles de diffusion double. Cependant, l'écho de la base de l'entaille reste visible, car une onde arrivant exactement à la base de l'entaille pourra revenir au capteur sans autre interaction. Il y a donc une contribution de diffusion simple à la base de l'entaille qui sera conservée lors du filtrage. La présence de l'écho de pointe et celui de la base de l'entaille permet à la fois le positionnement et le dimensionnement du défaut. Il est donc important de retrouver ces deux échos sur les images en milieu diffusant.

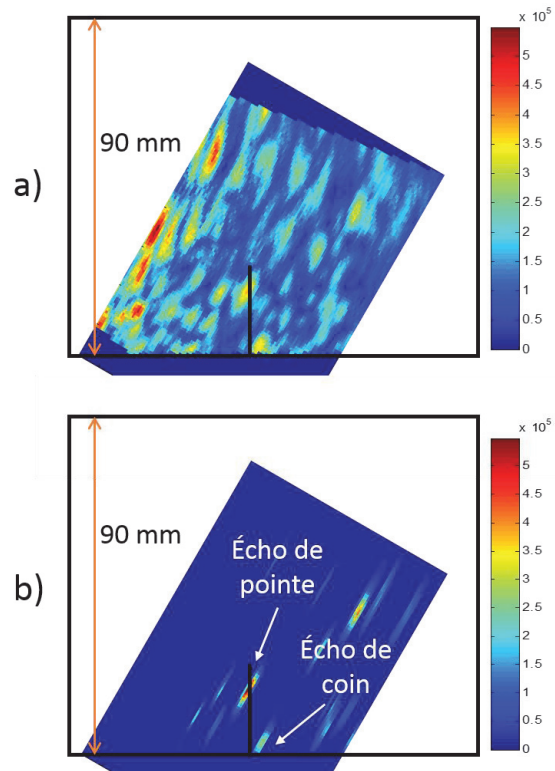


Figure 4 : images FTP (a) et Smart-UCT (2) du bloc à gros grains contenant une entaille de 20 mm de hauteur et 0.5 mm d'ouverture. Les deux traitements utilisent les mêmes données d'acquisition réalisée avec un sabot d'angle de réfraction de 60° par FMC à l'aide d'une barrette linéaire de 128 voies et 5MHz de fréquence centrale.

Dans le bloc à gros grains, la FTP ne parvient pas à faire ressortir les échos provenant de l'entaille du bruit de structure ambiant comme le montre la figure 4. Cependant, le traitement Smart-UCT présente des résultats intéressants, deux échos sont présents sur l'image 4.b et clairement discernables. Ces échos sont respectivement à la position attendue de l'écho de pointe et de la base de l'entaille. De plus, le rapport d'intensité entre ces deux échos est semblable à celui constaté en milieu peu diffusant. L'imagerie Smart-UCT pourrait donc permettre la détection de défauts plans en milieu fortement diffusant.

4 Conclusion

Pour la détection de défauts volumiques, la technique Smart-UCT présente des résultats équivalents à ceux de la méthode MSF-DORT. Ces deux méthodes d'imageries permettent la détection de défauts volumiques enfouis à de fortes profondeurs dans un milieu fortement diffusant.

En ce qui concerne la détection de défauts plans, la méthode MSF-DORT ne peut être utilisée. L'imagerie Smart-UCT peut cependant être utilisée en remplacement et semble apporter une solution. D'autres expérimentations doivent être mises en place afin de confirmer les performances de cette nouvelle méthode et d'étudier ses limites.

Références

- [1] J. A. Turner and R. L. Weaver, "Time dependence of multiply scattered diffuse ultrasound in polycrystalline media," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, pp. 2639-2644, 1995.
- [2] J. A. Turner and R. L. Weaver, "Radiative transfer and multiple scattering of diffuse ultrasound in polycrystalline media," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 96, pp. 3675-3683, 1994.
- [3] Y. Chen, *et al.*, "Use of a Wavelet Analysis Technique for the Enhancement of Signal-to-noise Ratio in Ultrasonic NDE," *Insight*, vol. 38, pp. 800-803, 1996.
- [4] J. Chen, *et al.*, "Noise analysis of digital ultrasonic system and elimination of pulse noise," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 75, pp. 887-890, 1998.
- [5] A. Abbate, *et al.*, "Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: application to ultrasonic flaw detection," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 14-26, 1997.
- [6] L. Yue and Y. Chong-Fu, "Two signal processing techniques for the enhancement of the flaw-to-grain echo ratio," *Ultrasonics*, vol. 25, pp. 90-94, 1987.
- [7] S. Shahjahan, *et al.*, "Comparison between experimental and 2-D numerical studies of multiple scattering in Inconel600® by means of array probes," *Ultrasonics*, vol. 54, pp. 358-367, 2014.
- [8] A. Aubry and A. Derode, "Random matrix theory applied to acoustic backscattering and imaging in complex media," *Physical review letters*, vol. 102, p. 084301, 2009.
- [9] A. Aubry and A. Derode, "Detection and imaging in a random medium: A matrix method to overcome multiple scattering and aberration," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, p. 044903, 2009.
- [10] S. Shahjahan, A. Aubry, F. Rupin, B. Chassignole and A. Derode, "A random matrix approach to detect defects in a strongly scattering polycrystal: How the memory effect can help overcome multiple scattering", *APP. PHYS. LETT.* 104, 234105, 2014.
- [11] A. Badon, D. Li, G. Lerosey, A. C. Boccara, M. Fink, and A. Aubry, "Smart optical coherence tomography for ultra-deep imaging through highly scattering media", arXiv:1510.08613, 2015.
- [12] C. Prada, S. Manneville, D. Spoliansky, M. Fink, "Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers," *J. Acoust. Soc.*, pp. 2067–2076, 1995.
- [13] A. Aubry and A. Derode, "Singular value distribution of the propagation matrix in random scattering media," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 20, pp. 333-363, 2010.
- [14] C. Trottier, S. Shahjahan, A. Schumm, A. Aubry and A. Derode, "Multiple scattering filter : application to plane defect detection in a nickel alloy," *AIP Conf. Proc.* 1706, 040004, 2016