



HAL
open science

Evaluation d'algorithmes d'imagerie rapide pour le contrôle de pièces épaisses en transmission

Guillemette Ribay, Ekaterina Iakovleva, Hugues Lourme, Maxance Marmonier,
Sébastien Robert, Manon Chastaing, Pierre-Emile Lhuillier

► **To cite this version:**

Guillemette Ribay, Ekaterina Iakovleva, Hugues Lourme, Maxance Marmonier, Sébastien Robert, et al.. Evaluation d'algorithmes d'imagerie rapide pour le contrôle de pièces épaisses en transmission. e-Journal of Nondestructive Testing, 2023, Session: Phased array imaging (III), 28 (9), <10.58286/28513>. <hal-04556143>

HAL Id: hal-04556143

<https://hal.science/hal-04556143v1>

Submitted on 19 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Evaluation d’algorithmes d’imagerie rapide pour le contrôle de pièces épaisses en transmission

Guillemette Ribay¹, Ekaterina Iakovleva¹, Hugues Lourme¹, Maxance Marmonier¹, Sébastien Robert¹, Manon Chastaing², et Pierre-Emile Lhuillier²

¹Université Paris Saclay/CEA List, France;

²EdF, France

*corresponding author, E-mail: Guillemette.ribay@cea.fr

Résumé

Ce travail s’inscrit dans le cadre du contrôle de composants de forte épaisseur, en particulier dans l’industrie nucléaire. Les conditions de fonctionnement sévères (température, pression, irradiation...) peuvent être à l’origine de divers types de défauts mettant en jeu la sûreté des installations. Si les défauts volumiques sont aisément détectables, les fissures de faible ouverture orientées perpendiculairement aux surfaces accessibles pour le contrôle sont plus problématiques, plus particulièrement si elles sont localisées à cœur. Si elles ne sont pas détectées à temps, elles peuvent s’étendre selon l’épaisseur du composant et rompre l’étanchéité de ce dernier. Dans cette étude, on s’intéresse en particulier aux méthodes d’imagerie par ultrasons multiéléments de ces fissures dans des composants métalliques. L’objectif principal consiste à mettre au point une méthode de contrôle efficace de ces défauts à un stade précoce, tout en réduisant au minimum la durée du contrôle. La combinaison des contraintes de dimensions de défaut visé, nombre d’éléments du transducteur acceptable, et épaisseur des composants conduit à l’exploitation d’une configuration en transmission, dans laquelle on dispose une paire de capteurs multiéléments situés de part et d’autre de la pièce à inspecter, profitant de l’accessibilité de deux faces parallèles du composant. Des algorithmes d’imagerie basés sur l’émission d’ondes planes sont alors évalués, d’une part sur des données simulées à l’aide du logiciel CIVA, et d’autre part sur des données expérimentales sur une pièce en acier contenant des fissures électro-érodées dans toute son épaisseur. La couverture de zone atteignable dans une telle configuration est étudiée. Les algorithmes d’imagerie existant dans des configurations mono-capteur multiéléments sont étendus à la configuration en transmission, tout d’abord dans le domaine temporel (imagerie PWI), puis dans le domaine fréquentiel (imagerie fk), ce qui constitue une première étape vers une imagerie en temps réel de ces structures.

1. Introduction

Les composants métalliques de forte épaisseur, notamment dans le domaine nucléaire, peuvent être le siège de

l’apparition de défauts liés aux conditions de fonctionnement sévères. Dans ce travail, on se focalise sur les défauts les plus pénalisants à contrôler de façon non-destructive, à savoir des fissures potentiellement de faible ouverture situées dans un plan perpendiculaire à la surface des pièces, et à toute profondeur possible. L’enjeu est également de réaliser un contrôle le plus rapidement possible afin de limiter l’immobilisation de la structure. C’est pourquoi on s’intéresse ici aux méthodes de contrôle ultrasonores multiéléments, en particulier à l’émission d’ondes planes ultrasonores pour imager des défauts dans une zone étendue à partir d’une unique position de capteurs.

Les algorithmes d’imagerie de la littérature (PWI, TFM) sont appliqués à des données expérimentales acquises sur une maquette en acier ferritique (revêtue d’acier inoxydable) de forte épaisseur (Figure 1) contenant des entailles électro-érodées (Figure 2) de forme demi-elliptique de 10x20mm², et un quart d’ellipse de 10x10mm², afin de mettre en évidence l’apport d’un contrôle en transmission (avec accès à deux faces parallèles du composant) plutôt qu’avec un unique capteur multiélément. Un nouvel algorithme de reconstruction dans le domaine fréquentiel est ensuite proposé et évalué sur données simulées avec le logiciel CIVA dans des configurations en transmission.

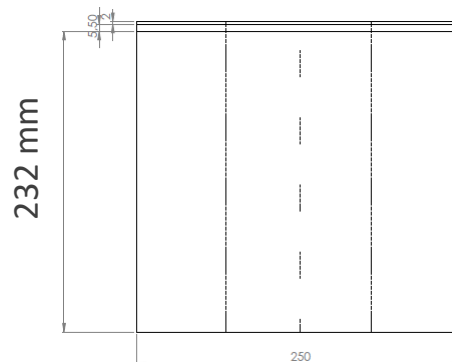


Figure 1 : Dimensions de la maquette

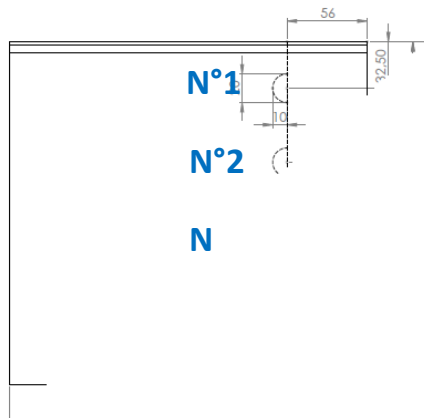


Figure 2: Entailles électro-érodées dans la maquette étudiée

2. Imagerie ultrasonore 2D sur données expérimentales avec accès d'un ou de deux côtés

2.1. Dispositif expérimental

Les essais sont menés avec une paire de transducteurs multiélément de 128 éléments chacun, avec une fréquence centrale de 2MHz, un pitch de 0.8 mm et une taille d'élément de 0.55mm x 18mm, pilotés par une électronique Panther à 256 voies. La fréquence a été choisie suite à une étude des effets d'atténuation dans les deux matériaux constitutifs de la maquette. Les transducteurs sont disposés en regard l'un de l'autre et directement au contact de chacune des faces de la maquette (voir Figure 3). Les positions des capteurs relativement aux défauts sont indiquées Figure 4. Les acquisitions sont ensuite réalisées soit avec un seul des transducteurs, soit avec les deux (l'un émettant des ondes planes, le second recevant les signaux).



Figure 3 : photographies du dispositif expérimental

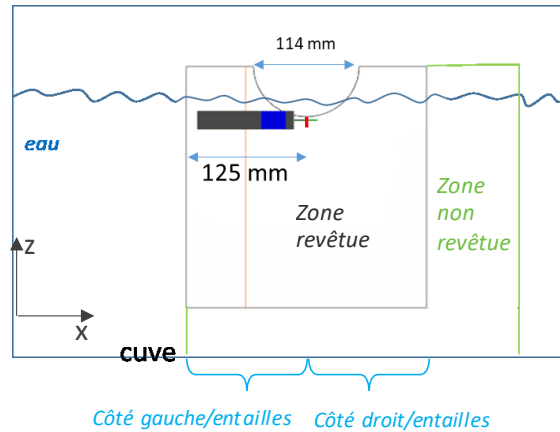


Figure 4: Vue de côté du dispositif de contrôle en transmission et espace disponible sur le revêtement (ce dernier couvre en partie l'une des faces dans le plan x-z)

2.2. Algorithmes d'imagerie

Les algorithmes d'imagerie dans le domaine temporel appliqués aux données ultrasonores sont tout d'abord l'imagerie TFM (Total Focusing Method) [1] et l'imagerie PWI (Plan Wave Imaging) [3]. L'imagerie TFM consiste à reconstruire les données enregistrées lors d'une acquisition de type FMC (Full Matrix Capture, matrice des réponses impulsionnelles inter-éléments) en sommant les signaux dans le domaine temporel avec des déphasages calculés afin de reproduire une focalisation électronique en émission et en réception en tout point d'une zone à imager.

Dans la méthode PWI, l'acquisition de la Full Matrix Capture est remplacée par une émission d'ondes planes avec tous les éléments du transducteur, selon des directions couvrant la zone à imager ; à chaque onde plane émise, les signaux élémentaires reçus sur chacune des voies sont enregistrés. Enfin, les signaux élémentaires sont sommés avec un déphasage adapté à une focalisation en réception en tout point de la zone.

Le coût de ces algorithmes de reconstruction réside dans le calcul des temps de vol théoriques depuis l'émetteur (méthode TFM) ou les émetteurs (PWI) jusqu'à chacun des points de la zone à imager, puis retour jusqu'à chaque élément récepteur.

Pour accélérer la reconstruction par l'algorithme PWI, on définit une zone effective (correspondant à la zone réellement illuminée par une onde plane émise), cf Figure 5.

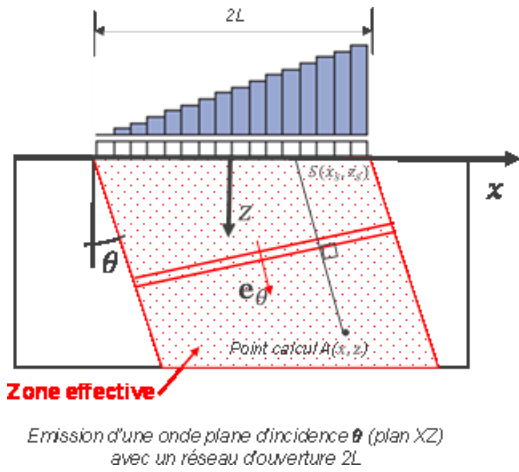


Figure 5 : Zone effective de reconstruction pour le calcul des lois de retard géométrique nécessaires à l'application de l'algorithme PWI-2D pour tout point A de coordonnées (x,z) de l'image à reconstruire.

Dans les essais présentés aux paragraphes suivants, une version dite 'en transmission' de ces algorithmes est utilisée ; les temps de vol sont calculés en prenant en compte les positions distinctes du transducteur multiélément émetteur et du transducteur multiélément récepteur, situés chacun d'un côté de la pièce à contrôler.

2.3. Imagerie classique (un seul côté accessible)

On évalue tout d'abord les possibilités d'un contrôle depuis un seul côté. Une série de 70 ondes planes d'onde longitudinale est émise avec un pas régulier entre 10° et 80° en onde longitudinale. L'image reconstruite en PWI (Figure 6) montre les échos de diffraction sur le haut et le bas des entailles. L'orientation des arêtes des ellipses n'est pas favorable au retour de l'écho de diffraction [2] vers le capteur émetteur, ce qui explique le faible rapport signal sur bruit obtenu (maximum 12dB). On note également que les défauts situés à l'opposé de l'émetteur sont de faible amplitude. Le défaut n°5 en quart de cercle débouchant en fond de pièce est lui bien détecté en mode écho de coin via une contribution spéculaire. Quant à la reconstruction FMC-TFM (Figure 7), elle ne permet pas de détecter tous les défauts, pénalisée par le bruit électronique, contrairement aux images PWI pour lesquelles l'émission d'onde plane avec tous les éléments du capteur permet par rapport à une FMC un gain d'énergie à chaque tir égal au nombre d'éléments du transducteur émetteur.

PWI en pulse echo (70 OP)

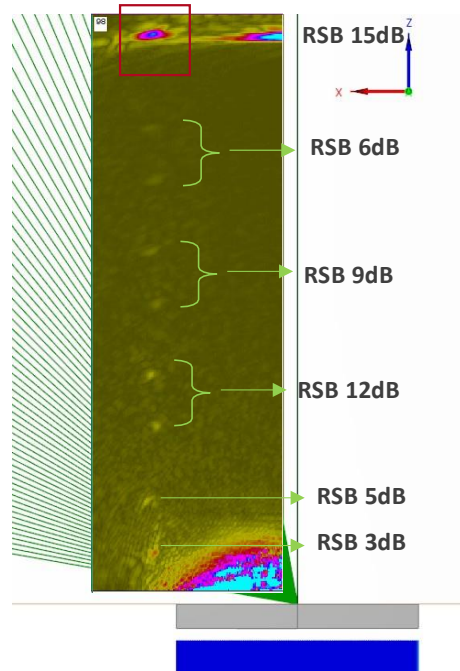


Figure 6 : contrôle des défauts de la maquette D dans une configuration 'pulse écho' avec un unique transducteur linéaire, émission de 70 ondes planes et reconstruction PWI-2D. Le revêtement se trouve en bas côté capteur.

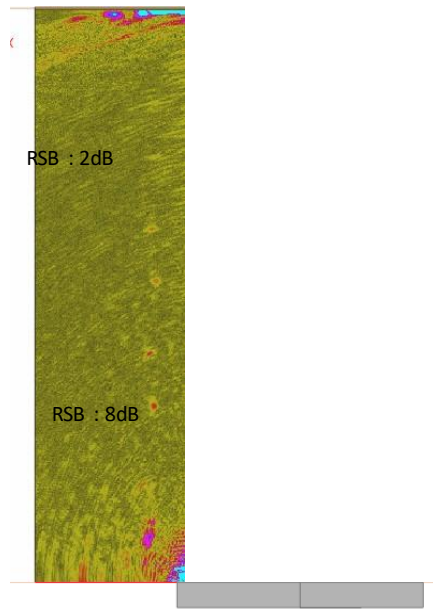


Figure 7 : contrôle des défauts de la maquette D dans une configuration 'pulse écho' avec un unique transducteur linéaire, en TFM. Le revêtement est en bas côté capteur.

2.4. Imagerie si contrôle en transmission

Comme montré au 2.3, sur des composants aussi épais, et avec des défauts elliptiques dont les arêtes ne sont pas orientées favorablement par rapport au faisceau incident, la détection de la diffraction est délicate. En revanche, un contrôle ultrasonore qui détecterait la réponse spéculaire sur la surface du défaut permettrait de contourner cette difficulté.

Avec un unique capteur en mode demi-bond, un recul important entre capteur et défaut serait nécessaire pour des défauts à mi-épaisseur ; de plus, pour un retour selon les lois spéculaires de la réflexion, un second traducteur multiélément devrait être positionné du même côté de la pièce (cf Figure 8 à droite). Dans le cas où des éléments de géométrie sur le composant empêcheraient de placer des capteurs aussi loin de la zone à inspecter, et si inversement deux faces opposées de la pièce sont accessibles, une solution consiste à placer deux traducteurs multiéléments en regard l'un de l'autre, ce que nous appellerons dans la suite 'configuration en transmission'.

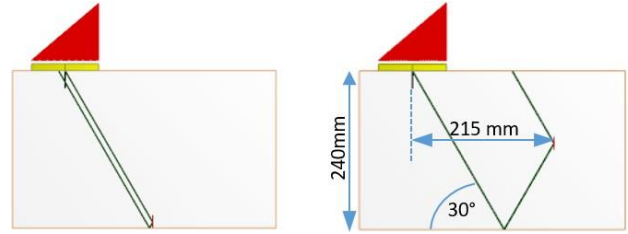


Figure 8 : Contraintes géométriques liées à une détection d'écho spéculaire sur un défaut à cœur (situé dans un plan perpendiculaire aux faces accessibles pour le contrôle). Le défaut représenté en rouge fait 20mm de haut.

Une première acquisition de type FMC en transmission est réalisée, et l'image TFM obtenue est visible Figure 9. Outre les échos de 4 des cinq défauts, un écho indésirable est observé : il est dû aux contributions directement transmises à 0° entre les émetteurs et les récepteurs. En revanche, une émission de type ondes planes évitant l'illumination à 0° permet d'imager les défauts en limitant la présence de cet écho (Figure 10).

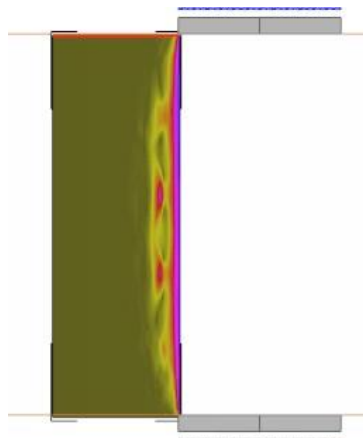


Figure 9 : imagerie TFM expérimentale en transmission

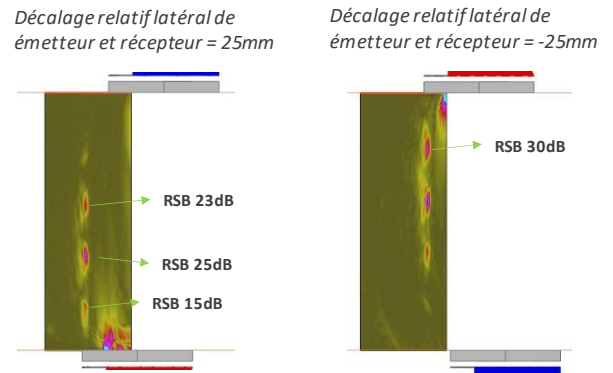


Figure 10 : contrôle des défauts de la maquette dans une configuration en transmission (le revêtement est en bas sur ces images) : images PWI-2D transmission avec émission côté revêtu (à gauche) ou non-revêtu (à droite), avec décalage optimal du transducteur linéaire émetteur par rapport au transducteur linéaire récepteur.

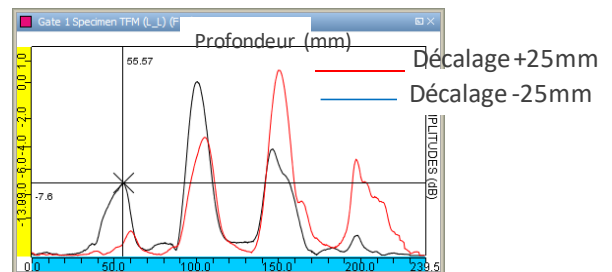


Figure 11 : Amplitudes des échos de défauts extraites de l'image PWI-2D en transmission expérimentale, relevées le long d'une ligne verticale passant par les défauts

En outre, pour mieux couvrir toute la profondeur de la pièce, le contrôle est fait en deux temps, avec un simple décalage selon l'axe horizontal du récepteur par rapport à l'émetteur de +/-25mm : les échos spéculaires des 4 défauts à cœur sont localisés avec un RSB compris entre 15dB et 30dB. Les amplitudes relevées (Figure 11) varient au maximum de 8dB.

3. Développement d'un algorithme de reconstruction fréquentiel en transmission

Les expériences précédentes ont montré l'intérêt d'une configuration en transmission lorsque les contraintes géométriques empêchent une détection efficace avec un ou deux transducteurs positionnés d'un seul côté de la pièce. On souhaite maintenant adresser la contrainte de temps de reconstruction minimal, qui permettrait à terme de réaliser le contrôle avec imagerie en temps réel. Les méthodes de reconstruction dans le domaine fréquentiel permettent justement une réduction de la complexité algorithmique, ce que nous rappelons ci-après.

3.1. Algorithme d'imagerie fk en transmission

La méthode dite PWI-fk, initialement introduite par L. Méribet [4] consiste à reconstruire dans le domaine fréquentiel les signaux enregistrés par chacune des voies élémentaires d'un transducteur suite à l'émission d'ondes planes. Tout d'abord, la transformée de Fourier des signaux reçus est calculée à la fois en temps et selon les dimensions d'espace du transducteur récepteur. Dans la version dite en transmission de l'algorithme développée dans le présent travail, le champ reçu est approché par un modèle de propagation faisant intervenir d'une part la fonction de Green entre le transducteur émetteur et un point de l'image, et d'autre part la fonction de Green entre ce même point de l'image et chaque élément du transducteur récepteur. En prenant en compte les coordonnées distinctes des centres du transducteur émetteur et du transducteur récepteur, le spectre de l'image est calculé avant de remonter à l'image elle-même par transformée de Fourier spatiale inverse.

3.2. Simulations CIVA d'un contrôle en transmission

L'algorithme est alors évalué sur des données simulées dans le logiciel CIVA. La géométrie de la maquette (Figure 2) est reproduite (Figure 12), ainsi que les transducteurs multiéléments. La réponse des ondes de volume émises avec les entailles est calculée selon le modèle PTD (Physical theory of diffraction), capable de simuler aussi bien les contributions spéculaires que de diffraction [5], les entailles étant supposées infiniment fines. Dans une première configuration simulée, des ondes planes longitudinales sont émises entre 10° et 60° avec un pas optimal de 1°; il est nécessaire de vérifier la qualité de l'image reconstruite lorsque le nombre d'ondes planes est réduit (pour réduire à la fois le temps d'acquisition et la reconstruction).

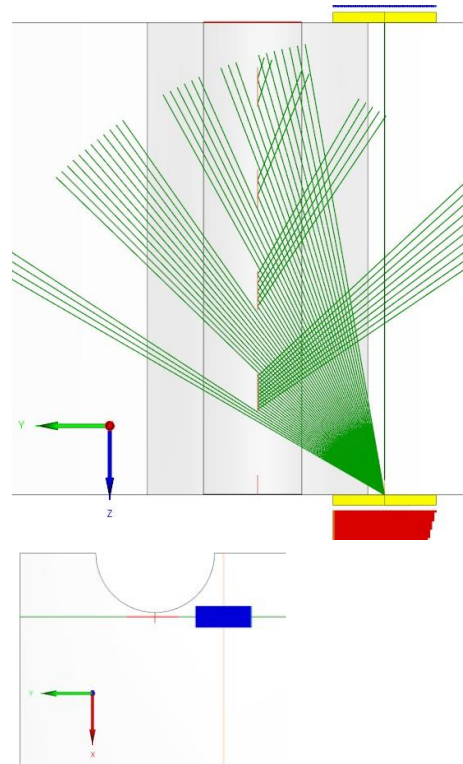


Figure 12 : configuration simulée en transmission : contrôle de quatre demi ellipses de 10x20mm² avec une paire de barrettes, émission d'ondes planes de 10° à 60°.

3.3. Reconstruction fk sur données simulées

Ainsi, les figures 13 et 14 présentent les images reconstruites avec ce nouvel algorithme PWI-fk en transmission en fonction du nombre d'ondes planes émises (elles balayent dans tous les cas les angles compris entre 10° et 60°).

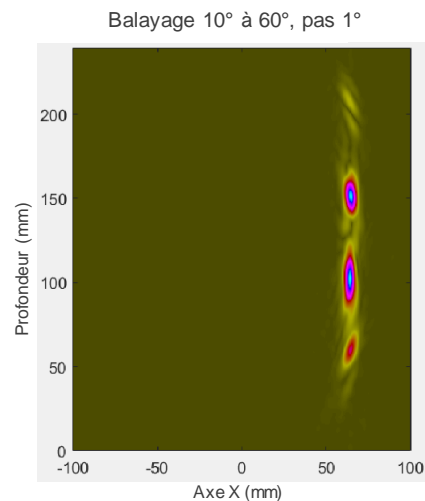


Figure 13 : reconstruction PWI-fk 2D en transmission sur données simulées avec une paire de capteurs de 48 éléments

On observe une dégradation de l'image, surtout visible lorsque le pas entre les tirs atteint 10°.

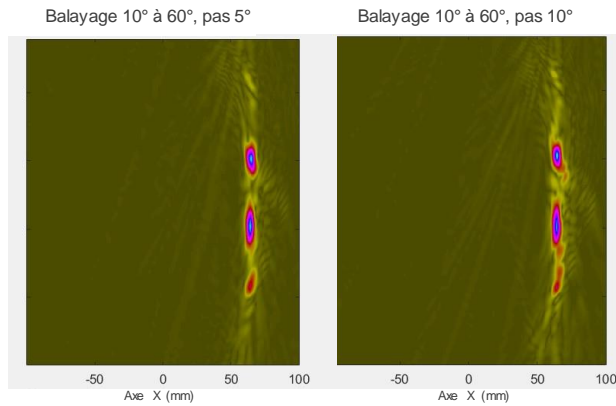


Figure 14 : reconstruction PWI-fk 2D en transmission sur données simulées avec une paire de capteurs de 48 éléments, réduction du nombre de tirs

En revanche, des artefacts indésirables d’amplitude négligeable (à -43dB par rapport à l’écho de défaut le plus fort) apparaissent lorsque le pas de balayage d’ondes planes est de 5°. Il est donc possible de réduire le nombre de tir à 13. Ces artefacts sont analogues aux lobes de réseaux qui peuvent apparaître sur les images TFM lorsque le pas spatial du réseau est trop grand devant la demi-longueur d’onde. Des traitements sont envisageables pour les corriger (et donc réduire le nombre de tirs à 7), ce qui n’a pas été testé ici.

4. Discussion

Les algorithmes de reconstruction ultrasonores multiéléments reposant sur les méthodes fk permettent de réaliser une image 3D d’un certain volume d’un milieu en temps réel [4]. Outre le gain de complexité apporté par le passage en fréquentiel, il est nécessaire à ce jour de limiter le nombre d’ondes planes émises et le volume reconstruit pour assurer une cadence compatible avec le temps réel. La configuration étudiée dans cet article est particulièrement pénalisante car la surface à reconstruire dans le plan de contrôle est très grande. De plus, l’imagerie en temps réel dans un volume 3D impose l’utilisation d’un transducteur matriciel comportant maximum 256 éléments (limite fixée par le coût des électroniques de pilotage), soit de l’ordre de 16 éléments selon une direction donnée.

En outre il est important de réduire le nombre de tirs à son minimum pour gagner en temps de reconstruction (ce qui est d’autant plus nécessaire lorsque les ondes planes doivent couvrir un angle solide en 3D et non seulement un angle dans un plan). Au préalable, il est nécessaire de vérifier la capacité de ces méthodes d’imagerie PWI-fk 2D en transmission à imager des défauts avec un nombre d’éléments N_e et de tirs N_t le plus faible possible ; ce qui permet par extrapolation d’estimer les capacités d’imagerie d’un capteur matriciel à $N_e \times N_e$ éléments avec N_t angles de tirs dans le plan d’incidence.

C’est ce que nous présentons Figure 15 et Figure 16. Pour comparaison, les images PWI 2D en temporel sont données Figure 17 avec un nombre d’éléments et de tirs identiques. On en déduit qu’il est possible de réaliser l’image dans un plan à partir de seulement 16 éléments en émission et 16 en réception (Figure 16). Lorsque le nombre de tirs est réduit (pas de 5° au lieu de 1°), des artefacts apparaissent sur les images fk, mais qui ne gênent pas la détection et localisation des défauts à mi-profondeur. De même, des artefacts d’allure différente apparaissent sur les images reconstruites en temporel (Figure 17 à droite), d’amplitude là aussi assez faible.

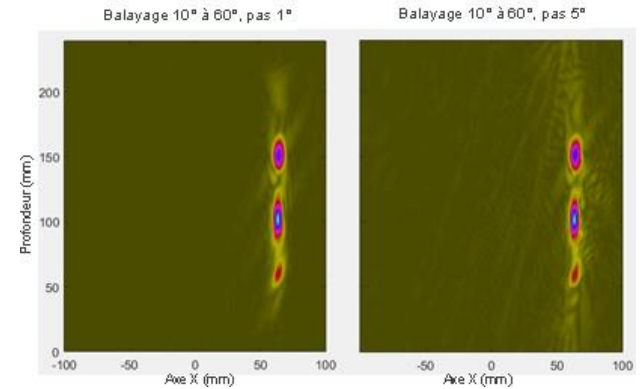


Figure 15: reconstruction PWI-fk 2D en transmission sur données simulées avec une paire de capteurs de 24 éléments

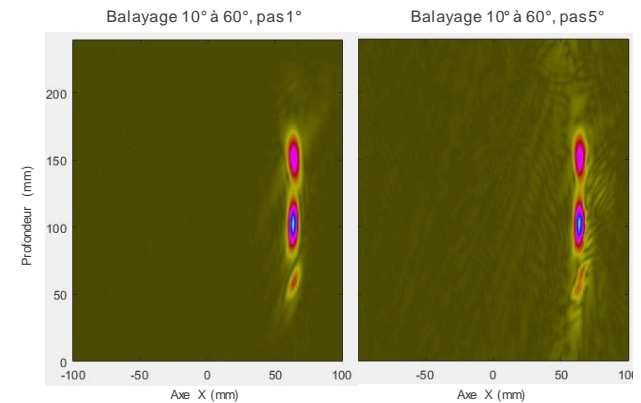


Figure 16: reconstruction PWI-fk 2D en transmission sur données simulées avec une paire de capteurs de 16 éléments, pour différents pas angulaire de balayage en ondes planes

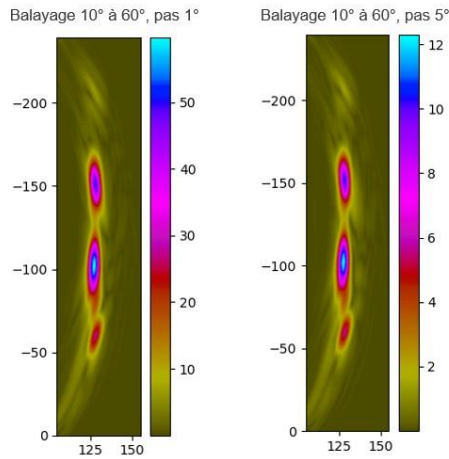


Figure 17 : image en transmission avec le traducteur 16 éléments pitch 2.25mm, algorithme PWI avec à la fois interpolation linéaire des retards et suppression de la zone effective pour le calcul des lois de retard.

5. Conclusions

Le contrôle non destructif par ultrasons de composants métalliques très épais (plus de 200mm) présente plusieurs enjeux. Tout d'abord, les fissures planes orthogonales à la surface accessible, et de forme elliptique, sont difficilement contrôlables par leur signature de diffraction. Lorsque l'accès à deux faces parallèles est possible, il est montré qu'un contrôle avec une paire de traducteurs multiéléments permet leur détection et localisation via un écho spéculaire, s'affranchissant également des difficultés apportées par des pointes de fissure partiellement refermées. L'imagerie PWI-2D en temporel permet en seulement deux positions du couple émetteur-récepteur le contrôle de l'intégralité de l'épaisseur du composant. Un second enjeu est celui de la cadence d'imagerie. Pour cela, une méthode de

reconstruction dans le domaine fréquentiel notée PWI-fk en transmission est développée et évaluée sur des données simulées. En outre, il est montré que, lorsque le nombre d'éléments des traducteurs selon une direction est réduit à 16, la qualité de reconstruction est suffisante, ouvrant ainsi la voie à une généralisation pour l'imagerie 3D en transmission en temps réel.

De futurs travaux porteront sur la validation expérimentale des algorithmes PWI-fk en transmission 2D d'une part, et son extension à une configuration 3D d'autre part. De plus, les temps de reconstruction seront quantifiés.

Références

- [1] Holmes et al, 'Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation', NDT&E Int, 2005
- [2] Thèse de Laurent Butin, « Etude et modélisation de l'interaction d'un faisceau ultrasonore large bande avec un défaut plan - prise en compte des effets de diffraction d'ondes de volume et de surface pour la caractérisation de défauts par méthodes échographiques et tandem », 1999
- [3] "Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging", L. Lejeune et al, Ultrasonics 2016
- [4] « 2-D and 3-D Reconstruction Algorithms in the Fourier Domain for Plane-Wave Imaging in Nondestructive Testing », L. Merabet et al, IEEE-TUFFC 2019
- [5] "Models Comparison for the scattering of an acoustic wave on immersed targets", B. Lu et al, Journal of Physics : conference series, AFPAC 2011.