

DÉVELOPPEMENT DE TECHNIQUES DE RECONSTRUCTION ULTRASONORE MULTI-ÉLÉMENTS POUR LA LOCALISATION ET LA CARACTÉRISATION DE DÉFAUTS DANS DES PIÈCES DE GÉOMETRIE COMPLEXE

ULTRASONIC ARRAY RECONSTRUCTION METHODS FOR THE LOCALIZATION AND THE CHARACTERIZATION OF DEFECTS IN COMPLEX GEOMETRY CONFIGURATIONS

A. Fidahoussen, P. Calmon,
CEA, LIST, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France ;

M. Lambert
L2S (CNRS-Supélec), 3 rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France ;

Résumé

Les travaux de thèses présentés dans cette communication visent à développer des méthodes de reconstruction de données ultrasonores multiéléments à des fins de localisation et de caractérisation de défaut. Les méthodes développées exploitent les modèles directs implémentés dans CIVA qui permettent de rendre compte de configurations complexes en particulier en ce qui concerne la géométrie des pièces inspectées. On présente ici différents algorithmes qui exploitent la connaissance des temps de vol évalués théoriquement, et on montre leur application sur des résultats simulés et expérimentaux.

Abstract

In this communication we present a study on methods of UT array reconstruction aiming at localizing flaws. This work is being done in the framework of a PhD thesis.

The forward models on which are based the methods developed here are the models implemented in CIVA software. These models allow to deal with complex configurations and in particular complex geometries. We present here different algorithms which use calculated times of flight and show their application on both simulated and experimental data.

INTRODUCTION

Les techniques multi-éléments sont de plus en plus utilisées en contrôle non-destructif par ultrasons en raison en particulier de la flexibilité qu'ils permettent et de leur adaptabilité à des configurations complexes. Un autre avantage de ces techniques est constitué par le fait qu'elles donnent accès à des données souvent beaucoup plus riches et complètes que les données fournies par les techniques traditionnelles. Exploiter de façon optimale ces données à des fins de localisation et de caractérisation de défaut demande que soient mises en œuvre des méthodes d'imagerie et de reconstruction s'appuyant sur une modélisation directe du contrôle. Les méthodes de reconstruction classiques fondées sur des hypothèses simples ne permettent pas toujours de localiser d'éventuels défauts dans des situations non canoniques, comme dans le cas de géométries complexes par exemple.

Les travaux de thèses présentés ici visent à développer des algorithmes de reconstruction qui exploitent une modélisation complète du contrôle et qui puissent s'appliquer à des configurations complexes. Les algorithmes proposés dérivent des méthodes dites de focalisation synthétique qui consistent à sommer de façon cohérente les signaux reçus afin d'obtenir des maxima d'amplitude là où sont effectivement localisés les défauts à l'origine des échos détectés. Ils s'appuient principalement sur l'exploitation des temps de vol évalués théoriquement, mais peuvent également utiliser une information d'amplitude. Ces paramètres (temps de vol et amplitudes) sont calculés à partir des modèles directs implémentés dans le logiciel CIVA qui permettent de traiter des cas complexes (état de surface irrégulier, pièce hétérogène, anisotropie, etc.). Ainsi les outils de reconstruction fondés sur ces modèles s'appliquent à de telles configurations. En outre, les algorithmes proposés sont tout à fait génériques et peuvent s'appliquer à tout type d'acquisition constituée d'une collection de signaux. Ainsi ils peuvent s'appliquer à différentes techniques multi-éléments: acquisition avec diverses lois de retards appliquées aux éléments à l'émission et/ou à la réception, balayages électroniques, acquisition multi-voies (un signal enregistré par élément) ou acquisition d'un signal sommé, etc...

Dans une première partie nous décrivons plus précisément l'approche adoptée, puis dans une seconde partie nous en montrons quelques exemples d'application.

PRINCIPE DES ALGORITHMES

Les algorithmes proposés ont pour but de localiser dans la pièce les échos détectés lors de l'acquisition. Le résultat de l'algorithme est une cartographie d'un estimateur $E(P)$ sur une zone d'intérêt définie dans la pièce. L'estimateur $E(P)$ est représentatif de la « plausibilité » de la présence d'un diffracteur en un point P .

Considérons que le résultat de la technique de contrôle que l'on cherche à reconstruire est constitué de N signaux $S_n(t)$. Ces signaux suivant les cas peuvent être des signaux élémentaires ou des signaux sommés. L'indice n se réfère à des conditions d'émission et de réception définissant les tirs ultrasonores.

Les algorithmes développés partent de l'idée que l'on peut associer à une localisation P dans la pièce un temps de vol que l'on notera T_{nP} , et la présence d'un défaut en P se traduira par des amplitudes élevées des échos en ces temps là.

Ainsi la première étape de la reconstruction consiste à calculer pour chaque tir $n=1 \dots N$ et pour chaque point P de la zone d'intérêt, les temps de vol T_{nP} , qui sont les temps de parcours émetteurs- P -récepteurs.

La deuxième étape consiste à distribuer les données expérimentales (les signaux $S_n(t)$) dans la zone d'intérêt en évaluant les amplitudes « localisées » $S_{nP} = S_n(T_{nP})$.

Le premier estimateur E_1 que nous utilisons consiste à calculer, pour un point donné de la zone, la somme sur tous les signaux des amplitudes S_{nP} , soit :

$$E_1(P) = \sum_{n=1}^N S_{nP} \quad (1)$$

avec $S_{nP} = S_n(T_{nP})$.

L'argument statistique exploité avec E_1 consiste à considérer i) que l'amplitude d'un écho reçu à l'instant T_{nP} est susceptible de correspondre à la diffraction du champ incident par un diffracteur situé en P , ii) que de ce fait une amplitude S_{nP} est une indication de la présence

d'un diffracteur en P et iii) que cette indication est d'autant plus significative que S_{nP} est importante.

Ce même estimateur couplé à une modélisation simplifiée a été historiquement appliqué à des contrôles mono-éléments dans le cadre de la technique SAFT [1]. Un estimateur équivalent, mais ici aussi couplé à une modélisation directe beaucoup plus limitée a également été utilisé par différents groupes pour imager des acquisitions multi-éléments de type « acquisition de la matrice inter-éléments » (voir plus bas) (voir par exemple [2]).

Comme il a été déjà été souligné plus haut, l'utilisation ici de la modélisation CIVA permet d'utiliser cet estimateur dans des cas plus complexes. Dans ce contexte, les signaux ultrasonores qui sont modélisés et à partir desquels sont extraits les paramètres de temps de vol et d'amplitudes théoriques correspondent aux signaux qui seraient obtenus en présence d'un diffracteur « quasi ponctuel » (c'est-à-dire petit devant la longueur d'onde et diffractant de façon isotrope). Ces signaux sont obtenus en effectuant la convolution du « champ en émission » décrivant l'onde incidente engendrée par le ou les éléments émetteurs et du « champ en réception », c'est-à-dire du champ qui serait incident si le ou les éléments récepteurs étaient activés en émission. On peut montrer que, dans le formalisme de la réponse impulsionnelle et dans l'hypothèse de champs scalaires, le signal théorique dû à la présence d'un diffracteur en P est proportionnel à:

$$S_n^{(th)}(P, t) = e(t) \otimes \sum_{i \in E} \sum_{j \in R} \{h_i^e(P, t - \tau_i^e) \otimes h_j^r(P, t - \tau_j^r)\} \quad (2)$$

où, afin d'avoir une expression générale, nous notons E et R les ensembles d'éléments actifs respectivement à l'émission et à la réception pour le tir correspondant à l'acquisition n , et τ^e , τ^r les retards électroniques qui sont éventuellement appliqués à ces éléments. $e(t)$ est la forme d'onde excitatrice qui est supposée ici identique pour tous les éléments, et h^e , h^r sont les champs scalaires en émission et en réception.

L'estimateur E_1 n'exploite que l'information temps de vol extraite de la modélisation directe. Nous proposons ici un second estimateur (E_2) qui vise à prendre en compte la corrélation entre la distribution d'amplitude expérimentale d'une part, et celle évaluée théoriquement en supposant un défaut en P d'autre part. Soit $S_{nP}^{(th)} = S_n^{(th)}(P, T_{nP})$ une telle amplitude théorique.

On définit le coefficient de corrélation $R(P)$:

$$R(P) = \frac{\left(\sum_{n=1}^N S_{nP} S_{nP}^{(th)} \right)^2}{\sum_{n=1}^N S_{nP}^2 \sum_{n=1}^N S_{nP}^{(th)2}} \quad (3)$$

et on pose

$$E_2(P) = R(P) \times \sum_{n=1}^N S_{nP} \quad (4)$$

Ainsi ce nouvel estimateur revient à pondérer l'estimateur précédent en considérant que les amplitudes des échos reçus aux instants T_{nP} ne sont réellement significatives que s'il y a une bonne corrélation entre les distributions d'amplitude expérimentale et théorique.

APPLICATION SUR DONNEES EXPERIMENTALES ET SIMULEES

Dans ce qui suit nous présentons des exemples d'application de ces deux algorithmes sur des acquisitions simulées et sur des acquisitions expérimentales. Afin d'illustrer leur caractère générique nous avons choisi trois techniques multi-éléments présentant des caractéristiques très différentes et qui sont le Balayage angulaire, les techniques dites d'Emission large champ et d'Acquisition de la matrice inter-élément. Le balayage angulaire est représentatif des techniques multi-éléments les plus utilisées et qui consistent à appliquer des lois de retards aux différents éléments afin d'obtenir un faisceau aux caractéristiques souhaitées. Les deux dernières constituent des exemples de techniques d'acquisition multi-voies pour lesquelles on enregistre les signaux élémentaires collectés sur les différentes voies réceptrices.

Les acquisitions expérimentales ont été effectuées avec un système MultiX [3] pour piloter l'électronique et un même transducteur multi-éléments linéaire de 64 éléments à la fréquence centrale de 2MHz. Les trois acquisitions ont été réalisées sur une même pièce en acier présentant une partie irrégulière sous laquelle ont été usinés une série de trous génératrices (voir Figure 1). Cette pièce permet ainsi de tester les algorithmes sur une configuration complexe.



Figure 1 : Pièce inspectée contenant un groupe de trous « génératrices » sous la surface complexe de la pièce

L'objectif ici en présentant ces différents exemples n'est pas de comparer entre elles ces différentes techniques (ce qui nécessiterait une étude spécifique), mais d'illustrer l'applicabilité des mêmes algorithmes de reconstruction à ces différentes situations.

Reconstruction sur des signaux sommés : exemple du balayage angulaire

Le premier exemple concerne la technique de balayage angulaire qui consiste à appliquer successivement différentes lois de retard afin de dévier le faisceau ultrasonore sous différents angles et balayer ainsi un secteur angulaire de la pièce inspectée. Les lois de retards sont appliquées en émission et en réception et les données expérimentales à traiter sont les signaux sommés.

On présente ici les résultats obtenus, le transducteur étant positionné en immersion au-dessus de la partie complexe de la pièce. Seuls les 16 éléments centraux de la barrette sont utilisés. Le balayage angulaire est effectué de 0° à 60° par pas de 1° .

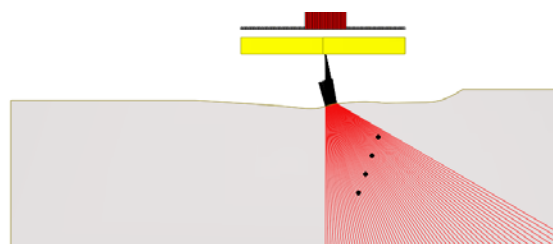


Figure 2 : Configuration de contrôle en balayage angulaire

Sur la figure 3 on peut voir l'image reconstruite de type Bscan angulaire (ou S-scan) obtenue dans CIVA sur les données simulées et expérimentales. Cette vue est le résultat d'une reconstruction qui consiste à repositionner les signaux reçus le long de rayons ultrasonores évalués théoriquement à partir des lois de l'acoustique géométrique. Cette technique de reconstruction classique se base implicitement sur un modèle « rayon » pour la formation des échos : i) on suppose que le faisceau transmis au cours d'un tir donné se distribue autour d'un rayon central (un « axe focal ») le long duquel se propage l'onde, et ii) on postule que le signal reçu provient d'un diffracteur situé sur ce rayon. Ici ce rayon est calculé en prenant en compte la géométrie de la surface [4], néanmoins on constate des imprécisions de localisation, en particulier sur le défaut le plus profond.

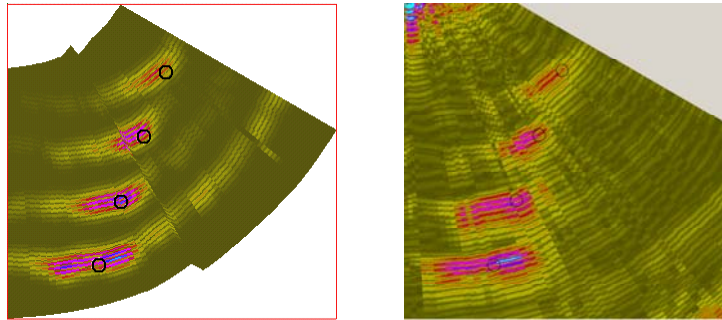


Figure 3 : Représentation B-scan angulaire des signaux ultrasonores simulés (à gauche) et expérimentaux (à droite)

On a appliqué sur cet exemple les deux algorithmes décrits plus haut. Sur la figure 4 on peut voir le résultat des reconstructions sur des données simulées et sur les données expérimentales. Les résultats sont très comparables, ce qui traduit la validité du modèle direct, déjà visible figure 3. On constate par ailleurs que, dans tous les cas (estimateur E_1 et estimateur E_2), on observe bien des maxima de l'estimateur à la position « vraie » des défauts. Ceci traduit le fait que ces estimateurs ne sont pas biaisés. Ceci n'est pas le cas de l'estimateur associé à la vue Bscan angulaire.

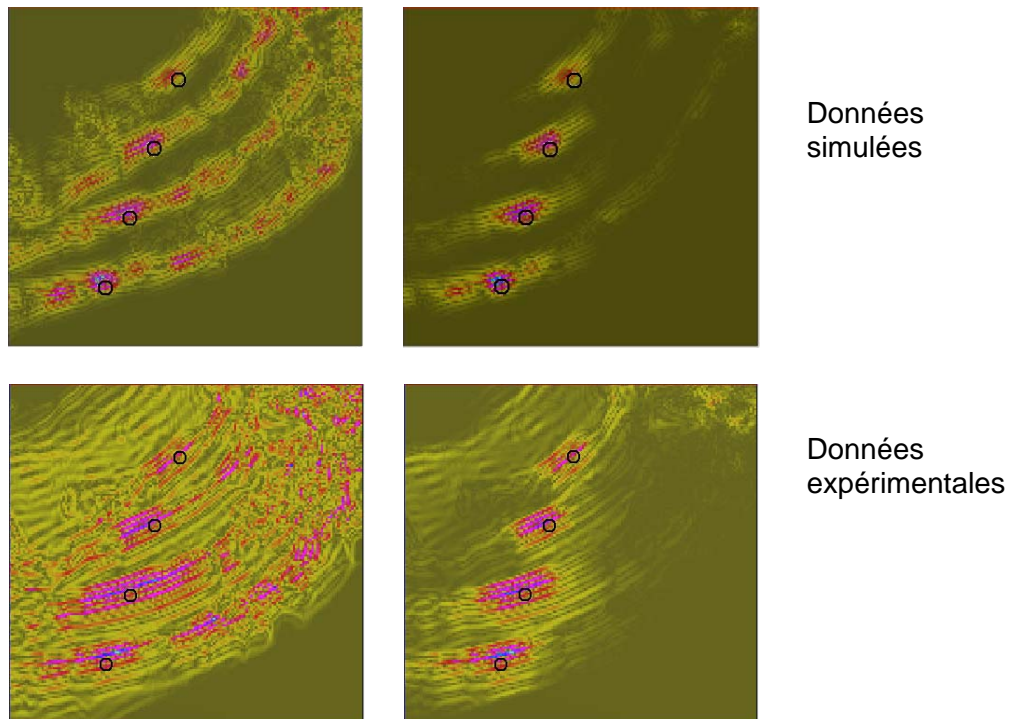


Figure 4 : Cartographies obtenues avec les estimateurs E_1 (à gauche) et E_2 (à droite)

La cartographie représentant le premier estimateur a un contraste très faible (Rapport Signal à Bruit (RSB) de 3 dB). En revanche, l'utilisation des amplitudes avec le deuxième estimateur améliore nettement le RSB (11 dB), et les trous sont correctement localisés.

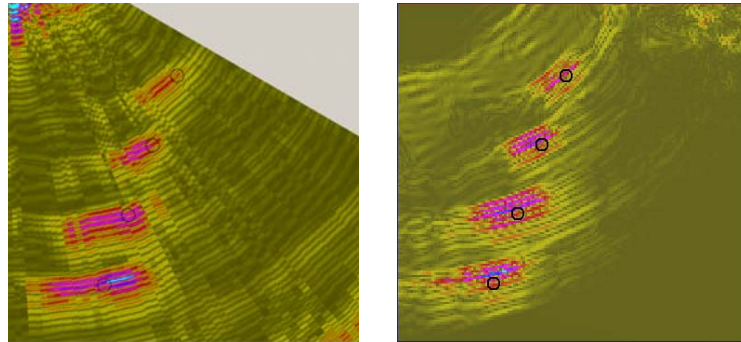


Figure 5 : B-scan angulaire (à gauche) et cartographie obtenue avec E_2 (à droite)

Reconstruction sur des signaux élémentaires

Dans l'exemple précédent, la reconstruction est appliquée à des signaux sommés, c'est-à-dire acquis après application d'une loi de retards à la réception sur les différents signaux élémentaires. Nous nous attachons maintenant à des exemples d'acquisitions de type « multi-voies » au cours desquelles on enregistre indépendamment tous les signaux élémentaires.

Considérons tout d'abord une première technique dite « Acquisition de la matrice inter-éléments ». Cette technique consiste à faire émettre l'un après l'autre les N éléments du capteur, et pour chacun des N tirs ainsi constitués à acquérir les N signaux élémentaires reçus. On obtient ainsi $N \times N$ signaux élémentaires qui constituent la matrice inter-éléments. Cette technique permet ainsi d'activer toutes les paires émetteur-récepteur possibles sur le capteur et maximise le nombre de post-traitements pouvant être appliquée aux données. En particulier, c'est à partir de cette technique que sont mises en œuvre les méthodes de focalisation adaptative ou de reconstruction s'appuyant sur une décomposition de l'opérateur retournement temporel (méthode DORT voir par exemple [5], algorithme MUSIC [6]).

Le capteur est placé en immersion au-dessus de la partie complexe comme illustré figure 6

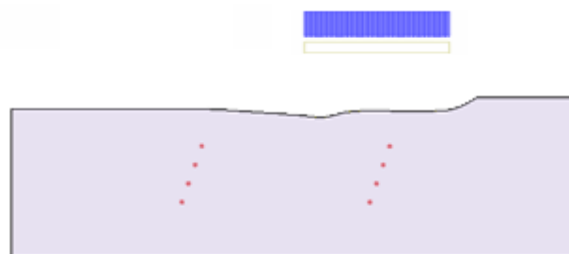


Figure 6 : Configuration de contrôle Large Champ

Figure 7 sont présentées les cartographies obtenues en appliquant les estimateurs E_1 et E_2 . Les deux estimateurs permettent de localiser correctement les défauts avec un très bon RSB (21dB et 25 dB respectivement avec E_1 et E_2). Ces résultats montrent que les algorithmes de focalisation synthétique sont très bien adaptés à ce type d'acquisition. En effet, le volume de données sommées est très important et les champs en émission et en réception très divergents. La localisation des défauts est déjà très performante en exploitant simplement l'information de temps de vol (estimateur E_1) et la prise en compte de l'information d'amplitude (estimateur E_2) n'est pas utile ici.

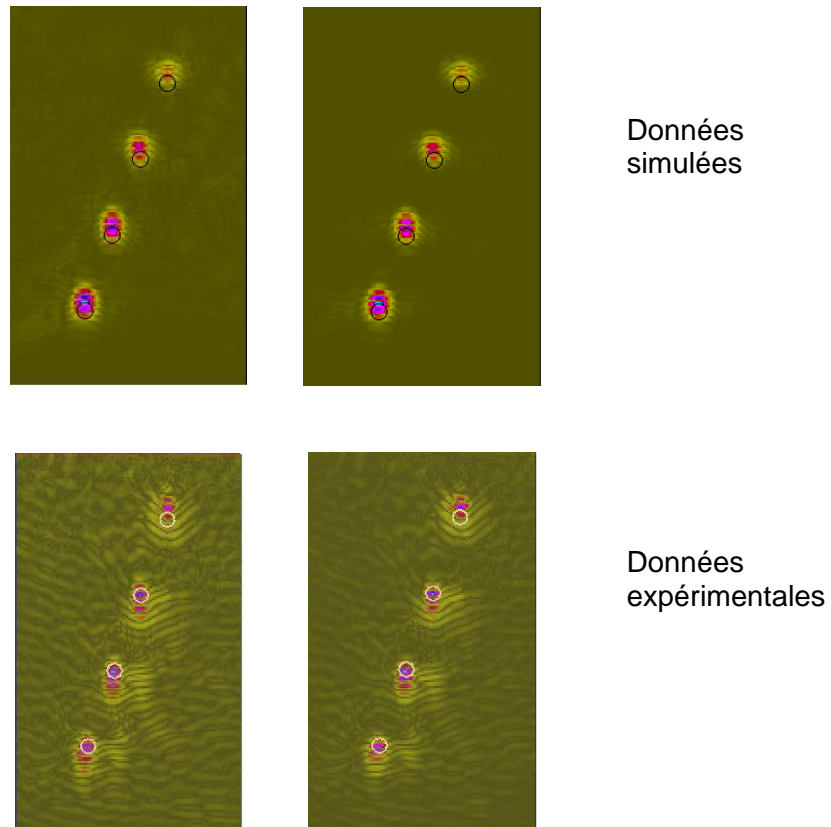


Figure 7 : Cartographies obtenues avec les estimateurs E_1 (à gauche) et E_2 (à droite) pour l'acquisition de la matrice inter-élément.

Le dernier exemple d'application présenté ici concerne la reconstruction de données acquises par la technique dite d' « Emission large champ ». Cette technique consiste à effectuer un tir en chaque position du capteur, tous les éléments fonctionnant en émission sans appliquer de loi de retards et à enregistrer tous les signaux élémentaires reçus. Le nombre de signaux à traiter correspond donc au nombre d'éléments actifs en réception, 64 dans la configuration expérimentale considérée ici. Il est clair que cette technique est mal adaptée à la détection des défauts dans notre cas puisque rien n'est fait pour corriger les effets aberrateurs de la surface. Ceci est illustré par la figure 8 qui montre une cartographie du champ transmis dans la pièce, calculée par le logiciel CIVA. Le capteur est positionné comme précédemment, en immersion au-dessus de la série de trous génératrices. On constate que le faisceau est très perturbé et les défauts peu insonifiés. L'exemple en est d'autant plus intéressant pour évaluer la capacité des algorithmes à repositionner les défauts.

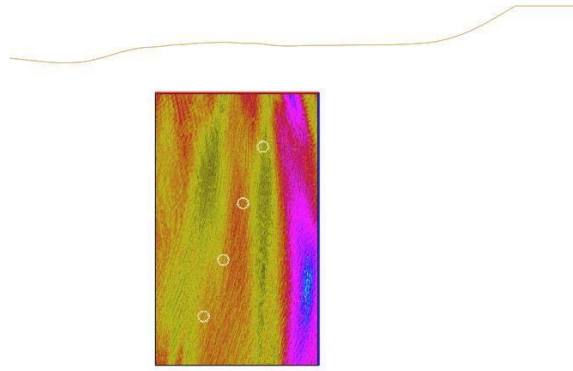


Figure 8 : Cartographie du champ ultrasonore dans la zone de reconstruction

Sur la figure 9 on a représenté les cartographies que l'on obtient en appliquant les estimateurs E_1 et E_2 .

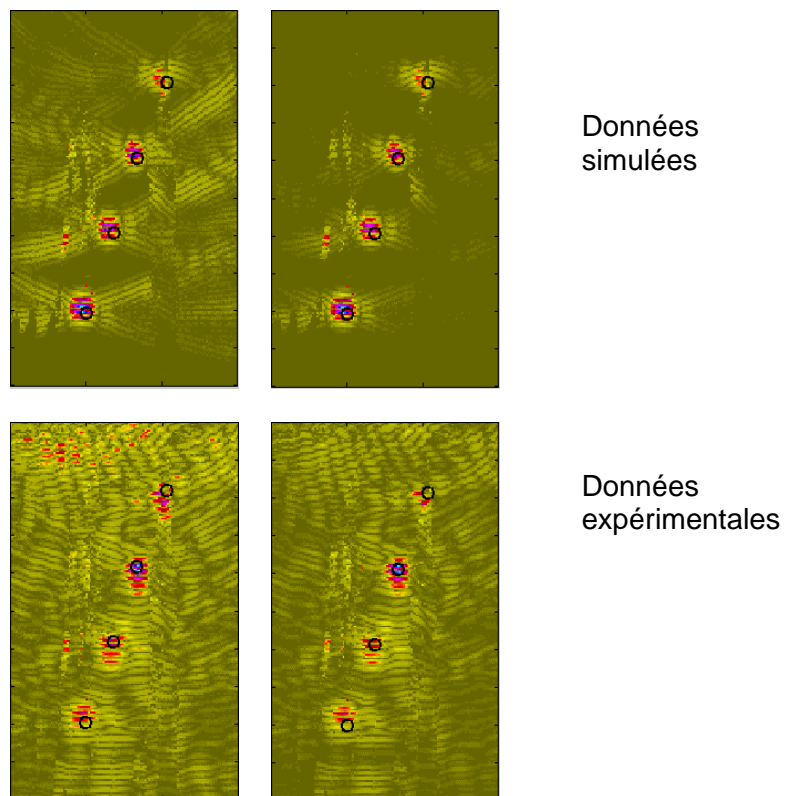


Figure 9 : Cartographies obtenues avec les estimateurs E_1 (à gauche) et E_2 (à droite) avec une acquisition Large Champ

Les deux algorithmes permettent de localiser correctement les défauts. On peut aussi noter une amélioration du RSB en appliquant le deuxième estimateur (RSB=7 dB et RSB=17dB dans les cartographies représentant respectivement E_1 et E_2). Néanmoins des artefacts restent présents. Ces artefacts traduisent la difficulté qu'il y a à évaluer théoriquement des temps de vol lorsque le champ incident est aussi perturbé.

CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons décrit des travaux de thèse en cours qui portent sur l'étude d'algorithmes de reconstruction adaptés aux acquisitions multi-éléments. L'étude a jusqu'à présent porté sur l'approche dite de focalisation synthétique. Les algorithmes décrits ici sont fondés sur l'exploitation des modèles directs de CIVA nous permettant de traiter des cas complexes, comme par exemple le contrôle de pièce avec une surface irrégulière. Les algorithmes ont été appliqués à des données simulées et expérimentales. Les exemples proposés illustrent le caractère très général de l'approche, les algorithmes pouvant être appliqués quelle que soit la technique d'acquisition. Des études sont actuellement en cours pour quantifier leurs performances en fonction de la technique d'acquisition. Les perspectives pour la suite de cette thèse concernent en particulier la prise en compte de trajets multiples et l'extension des algorithmes à la caractérisation de défauts étendus.

REFERENCES

- [1] Seydel J.A., Ultrasonic synthetic aperture focusing techniques in NDT, Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 6, R.S. Sharpe, Ed., New York Academic, 1983.
- [2] Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, NDT&E International, Vol. 38, 2005, pp 701-711.
- [3] <http://www.m2m-ndt.com/>
- [4] Porré J., Mahaut S., Chatillon S., Calmon, P., Simulation of phased array techniques and model based data reconstruction, Review of progress in QNDE, Vol. 24, 2004, pp.906-913.
- [5] Minonzio J.G., Prada C., Chambers D., Clorennec D., Fink M., Characterization of subwavelength elastic cylinders with the decomposition of the time-reversal operator, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 117(2), 2005, pp 789-798.
- [6] Lehman S.K., Devaney A. J., Transmission mode time-reversal super-resolution imaging, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113 (5), 2003, pp. 2742-2753.