

SIMULATION ET APPLICATION DE FONCTIONS AVANCÉES EN TECHNIQUES MULTI-ÉLÉMENTS ULTRASONORES

SIMULATION AND APPLICATION OF ADVANCED ULTRASONIC PHASED-ARRAY TECHNIQUES

F. Reverdy, S. Mahaut, P. Dubois, CEA, LIST, SYSSC, CEA Saclay bâtiment 611, GIF-SUR-
YVETTE, F-91191 France;
L. Le Ber, O. Roy, ²M2M, Les Ulis, 91940.
Tél : 01 69 08 37 67
Email : frederic.reverdy@cea.fr

Résumé

Les techniques multi-éléments, désormais largement utilisées en CND ultrasonore, permettent de focaliser ou dévier le faisceau à travers des composants canoniques ou complexes grâce à l'application de lois de retards. Outre ces capacités, des techniques d'inspection spécifiques peuvent être appliquées. La commutation électronique (utilisation d'un ou plusieurs groupes d'éléments actifs en émission/réception se déplaçant au sein d'un réseau) offre en particulier des cadences d'acquisition très rapides et peut également simplifier les déplacements mécaniques nécessaires pour l'inspection complète du composant. Les techniques de balayage sectoriel, utilisant un ensemble d'angles d'inspection, permettent d'insonifier une zone complète sans déplacement du capteur. La combinaison de ces deux techniques est également possible. Des développements récents ont été intégrés dans CIVA afin d'étendre ces techniques, généralement mises en œuvre sur des transducteurs linéaires (découpe 1D), au cas de transducteurs matriciels (découpe 2D). L'application de lois focales dynamiques en réception, sur une ouverture dynamique du capteur (accroissement ou diminution du motif élémentaire du capteur) permettant d'homogénéiser la résolution latérale sur la profondeur d'inspection, a également fait l'objet de développements. Ce papier présente des cas d'applications de ces techniques, sur données simulées ou expérimentales, dans des configurations complexes.

Abstract

Phased-array techniques now commonly used in ultrasonic non destructive testing can steer and focus a beam through planar, curved or irregular profile through the application of delay laws. In addition to these features, specific phased-array acquisition schemes can also be applied. Electronic commutation (a group of elements over a large array transmits the ultrasonic beam, then neighbored elements are activated) allows very fast inspection times and can make the inspection easier by limiting the mechanical displacement of the probe necessary to do the inspection. Sectorial scanning (several delay laws are applied to sweep the beam over various refraction angles) allows the inspection of a complete area without moving the probe. Combination of these two techniques is also feasible. Recent developments have been added in CIVA to extend those techniques, used in the past with linear probe (1D) to matrix probes (2D). The application of dynamic delay laws over a dynamic aperture (increase or decrease of the pattern size) allowing a beam homogenisation at several depths has also been developed. This paper presents various cases that illustrate those techniques.

INTRODUCTION

Les capteurs multi-éléments trouvent de plus en plus d'applications dans le domaine du contrôle non destructif grâce notamment à leur flexibilité. Les progrès effectués sur les systèmes d'acquisition et les capteurs couplés à cette souplesse intrinsèque de la technologie permettent d'effectuer le contrôle de composants de formes de plus en plus complexes avec de nouvelles configurations d'inspection. Il est désormais possible de combiner les configurations classiques de type commutation, balayage, focalisation électronique...jusqu'à là utilisées avec des capteurs linéaires (1D) ; à des capteurs 2D. Ceci permet d'exploiter la focalisation et le balayage 3D là où les capteurs linéaires étaient limités à l'inspection dans le plan d'incidence. La mise en œuvre de ces nouvelles techniques 3D nécessite le développement d'outils de simulation capables de prédire les performances des capteurs 2D pour concevoir de nouvelles procédures d'inspection.

Une des premières étapes pour la qualification d'une procédure de contrôle basée sur une technique multi-éléments consiste à prédire les performances mais aussi les limitations des capteurs ; limitations principalement causées par la taille des éléments (perte d'amplitude, lobes de réseaux...). Afin d'évaluer ces performances et limitations, le CEA a développé depuis plusieurs années un modèle semi-analytique dédié au contrôle ultrasonore [1]. Ces outils de simulation réunis au sein du logiciel CIVA permettent le calcul de lois de retard, le calcul du champ ultrasonore et l'interaction de ce champ avec des défauts. Ces outils sont disponibles pour un ensemble de capteurs simples (1D) ainsi que pour des capteurs plus complexes (1.5D ou 2D).

Les outils de simulation disponibles dans CIVA sont brièvement décrits dans ce papier. Dans une deuxième partie, des exemples de calcul pour des capteurs 2D (sectoriel et matriciel) sont présentés. Enfin une technique de reconstruction par focalisation en tout point basée sur une acquisition de type « full matrix capture » est présentée.

MODÉLISATION DE CAPTEURS MULTI-ÉLÉMENTS DANS CIVA

Calcul de champ et réponse défaut

Les outils semi-analytiques développés dans CIVA visent à prédire entièrement un contrôle. En fonction du type de contrôle (émission/réception, tandem ou TOFD) et du type de défauts (volumiques, fissures ou inclusions), un certain nombre d'approximations est fait au niveau du code de calcul [2-3]. La modélisation du champ incident est réalisée par une intégrale de surface sur l'ouverture du capteur [4]. La synthèse du signal reçu est faite à l'aide du principe de réciprocité de Auld [5]. Le calcul est accompli pour chaque position du capteur, pour chaque paramètre appliqué au capteur (loi de retard et loi d'amplitude) et pour chaque mode (direct, spéculaire, longitudinal, transverse, mode converti). Finalement, le signal à la réception est la somme de toutes ces contributions.

Calcul de loi et mode opératoire

Des calculs de lois de retard complexes sont accessibles pour divers types de capteurs (linéaire, matriciel, annulaire, sectoriel, encerclant et encerclé) et pour divers types de modes opératoires (contact, immersion, flexible et SE). Ces lois de retard permettent de focaliser et/ou de dévier le champ dans n'importe quelle direction (en fonction de la symétrie du capteur) dans des composants de formes quelconques (canoniques ou définies par CAO) et de structures variées (homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope). Ces lois de retard peuvent être appliquées à tous les éléments d'un capteur dans un mode uniséquentiel ou à un groupe d'éléments pour permettre une commutation électronique suivant une trajectoire

quelconque (groupes successifs d'éléments en émission et/ou réception permettant de balayer un capteur virtuel au sein de l'ouverture du capteur). En plus des commutations électroniques standards généralement utilisées avec des capteurs 1D, des motifs et des trajectoires plus complexes peuvent être définis (manuellement ou à partir de lois définies par l'utilisateur) grâce aux développements récents dans CIVA. Un ensemble de lois peut aussi être appliqué à la réception pour permettre une homogénéisation de la tache focale à différentes profondeurs avec un motif d'ouverture fixe ou variable.

Imagerie et outil de reconstruction

L'application de lois de retard engendre un ensemble de trajets ultrasonores (par exemple : plusieurs angles dans un balayage sectoriel) et donc potentiellement une large quantité de données collectées (acquisition et stockage de signaux élémentaires reçus pour chaque voie du capteur en vue de post-traitement). Pour chaque loi de retard et d'amplitude appliquée, il est possible de déterminer les trajets ultrasonores, les temps de vol et amplitude du champ rayonné ou diffracté au sein de la pièce. La connaissance des trajets permet de créer des images vraies (représentation des données ultrasonores dans la pièce) et de post-traiter les signaux élémentaires dans une reconstruction de focalisation en tous points. La figure suivante illustre certains des outils développés : mesure de tâche focale du champ rayonné par un capteur multi-éléments annulaire, évaluation des angles de réfraction (les deux outils utilisent un calcul de champ complet) et tracé de rayons d'un capteur matriciel utilisé dans un mode de focalisation et de déviation sur un trou génératrice.

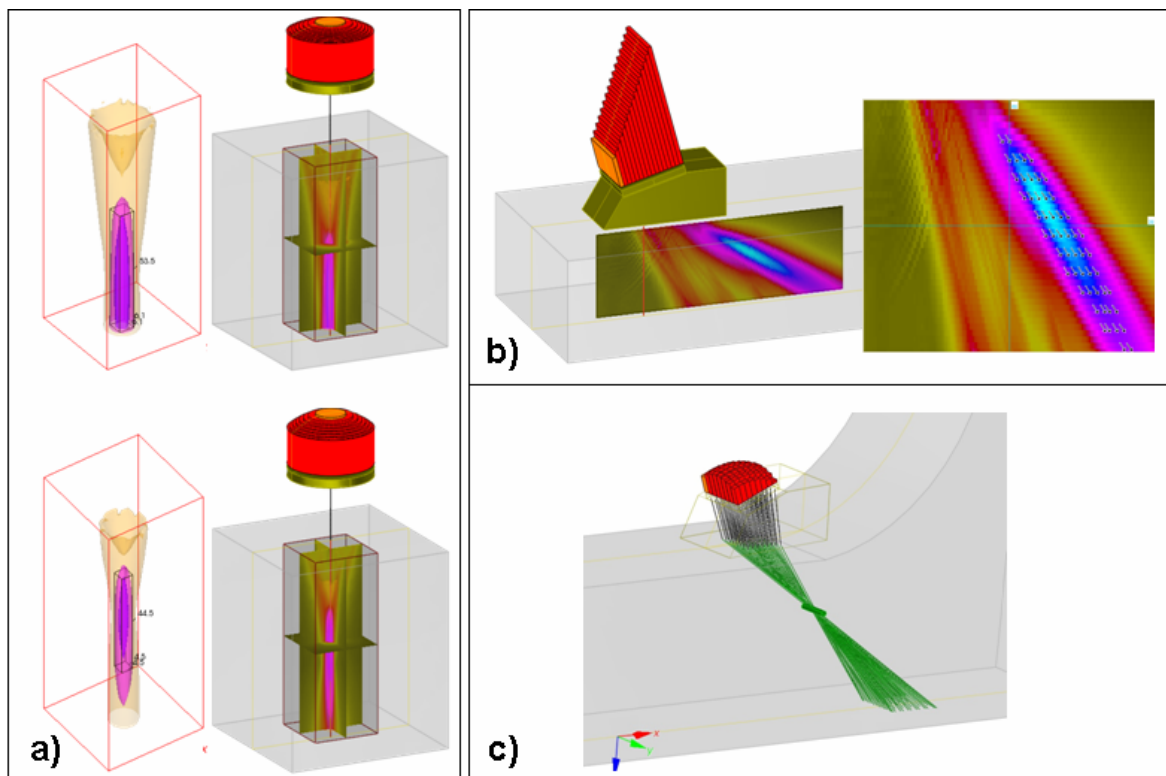


Figure 1 : Outils d'évaluation des techniques multi-éléments : (a) mesure de la tâche focale, (b) estimation de l'angle réfracté et (c) tracé de rayons

EXEMPLES DE SIMULATION DE TECHNIQUES MULTI-ÉLÉMENTS

Design de motifs matriciels pour des applications 3D

La première étape dans la conception de capteurs multi-éléments est la définition de la découpe. Un des intérêts de la simulation est de pouvoir prédire l'amplitude des lobes de réseaux. Ces lobes peuvent apparaître si la découpe du capteur n'est pas assez fine créant des interférences des éléments dans des directions différentes de la zone de focalisation désirée.

Des critères empiriques peuvent être utilisés en première approximation pour vérifier la validité de la découpe. Le critère généralement utilisé est le rapport entre la longueur d'onde et le pas interélément (distance centre à centre entre deux éléments voisins):

- Si le pas est inférieur à une demi-longueur d'onde : aucun lobe de réseau n'est généré.
- Si le pas est compris entre une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde : des lobes de réseau apparaissent ; leur amplitude et position varient en fonction de la loi de retard et de la symétrie du multi-éléments.
- Si le pas est supérieur à une longueur d'onde : des lobes de réseau d'amplitude supérieure à celle du lobe principal sont générés.

Le design d'un capteur multi-éléments est un compromis entre le nombre d'éléments qui dépend de contraintes économiques (coût du capteur et du système d'acquisition) et les performances d'inspection désirées (résolution spatiale, angle réfracté, déviation 2D ou 3D...). Des solutions simples existent pour réduire le nombre d'éléments requis, comme par l'exemple l'utilisation d'un sabot pour limiter les limites de déviation du capteur ou une mise en forme de la pastille piézoélectrique pour obtenir une tâche focale très petite. Cependant, la simulation constitue le moyen le plus versatile pour concevoir le design d'un capteur multi-éléments et vérifier ses performances.

La figure suivante montre les calculs de champs pour deux capteurs multi-éléments 2D : un capteur matriciel (8x8 éléments) et un capteur sectoriel (6 anneaux) divisés en 61 éléments, chaque anneau étant divisé en un nombre croissant de secteurs. Ces différents capteurs ont une ouverture similaire (à peu près 256 mm²), ont une fréquence centrale de 3 MHz et possèdent approximativement un même nombre d'éléments. Ces capteurs sont utilisés dans un mode de déviation volumique et focalisation en un point sur une pièce plane. Ces calculs ont été effectués pour une zone de calcul 3D parallèle à la surface de l'échantillon. Les champs sont affichés dans des courbes iso-amplitude 3D (de 0 à -20 dB). Sur ces figures, nous observons un lobe principal ainsi que des lobes de réseau. On constate que la distribution spatiale de ces lobes est différente entre les deux capteurs multi-éléments. On voit ici l'utilité de la simulation sur deux capteurs de caractéristiques *a priori* assez proches.

Il faut préciser que la simulation des lobes de réseau n'est pas suffisante pour prédire *in fine* les performances de l'inspection. Ces lobes de réseau interagissant avec les différents défauts et la géométrie de la pièce, il est donc nécessaire de simuler ces interactions.

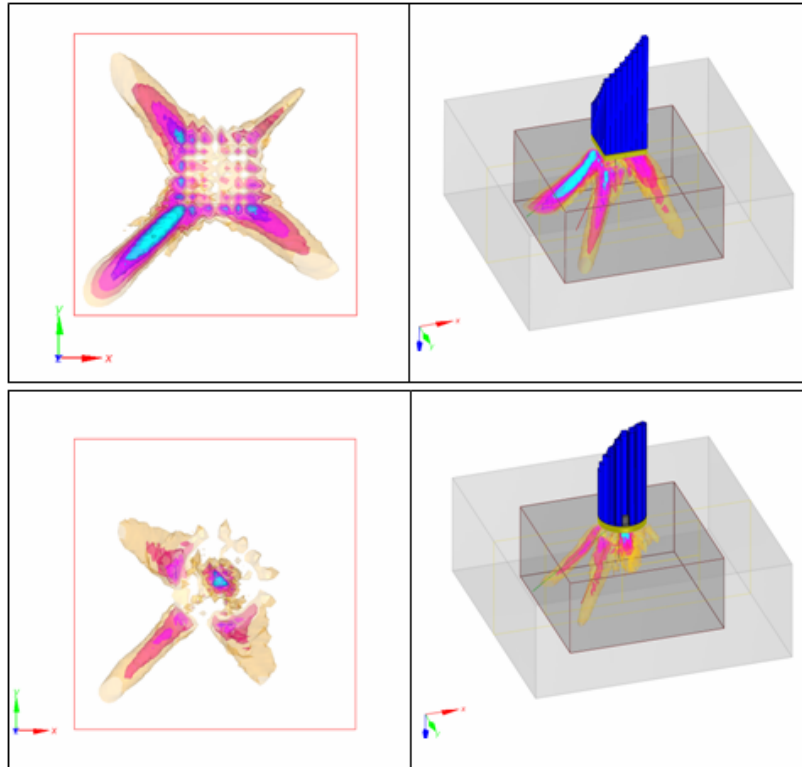


Figure 2 : Exemples de calcul de champ 3D pour deux capteurs multi-éléments 2D (matriciel 8x8 et sectoriel avec 61 éléments).

Focalisation et déviation à travers une soudure bimétallique

Dans l'exemple précédent, les champs ont été calculés sur une pièce plane. L'exemple suivant correspond à des calculs de champ sur une pièce complexe : une soudure bimétallique dans une tuyauterie décrite comme un ensemble de milieux homogènes isotropes et anisotropes. La pièce est définie à l'aide d'un profil CAO 2.5D (profil complexe avec une extension cylindrique). Cette pièce est constituée de deux parties isotropes (une en acier inox et une autre en acier ferritique) jointes par une soudure anisotrope austénitique. Un revêtement anisotrope se trouve aussi sur la partie en acier ferritique.

La figure montre le tracé de rayons ainsi que le champ rayonné par un capteur matriciel (11x11 éléments, fréquence centrale 1.5 MHz, mise en forme sphérique) pour deux configurations différentes : loi de retard nulle (vue du haut) et avec une loi de retard pour focaliser dans la soudure avec des ondes longitudinales à 40°. Nous constatons que pour le cas de loi de retard nulle, la focalisation du champ se fait proche de la surface. L'outil de tracé de rayon permet de montrer intuitivement cette focalisation (la majorité des rayons converge dans cette zone) ; il ne peut cependant pas être utilisé pour prédire de manière quantitative la position et l'amplitude de la zone focale. En utilisant des lois de retard pour focaliser dans la soudure (le point focal est indiqué en rouge sur la figure), il est possible de contrôler le faisceau pour focaliser l'énergie à la racine de la soudure et inspecter des défauts éventuels dans cette zone.

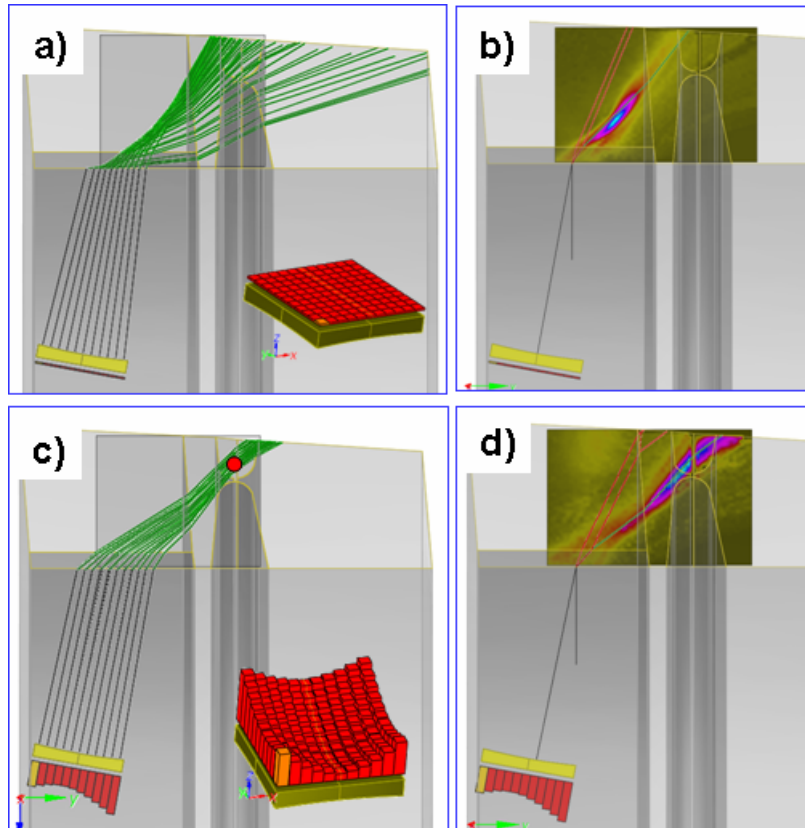


Figure 3 : Exemple de tracé de rayon et calcul de champ pour un capteur matriciel utilisé pour focaliser à travers une soudure bimétallique

Combinaison de commutation et de balayage angulaire électronique pour l'inspection de zone d'attache de pale de turbine

L'exemple suivant représente un calcul d'interaction champ/défaut sur une autre pièce complexe ; le profil CAO montré sur la figure suivante est représentatif points d'attaches d'ailettes de turbine. La géométrie de ce type de pièce rend difficile le déplacement d'un capteur. Une façon de contourner cette limite est d'utiliser un capteur multi-éléments et des lois de retard adaptées : par exemple un balayage angulaire, pour inspecter la pièce. Dans cet exemple, un capteur matriciel flexible 8x8 est utilisé pour balayer le faisceau ultrasonore entre 30° et 60° en mode longitudinal. Une ouverture de 8 par 2 éléments et une commutation électronique dans une direction perpendiculaire au profil sont utilisés pour permettre une inspection volumique de la pièce sans avoir à déplacer le capteur. Sept balayages sectoriels sont ainsi obtenus procurant un balayage 3D de la pièce. L'inspection est schématiquement représentée sur la figure suivante. La dernière vue montre la superposition de balayages angulaires simulés obtenus pour trois séquences différentes de la commutation électronique. Cette vue montre les échos de fond sur le profil complexe ainsi que l'écho de coin provenant d'un défaut de type fissure localisé sur le fond.

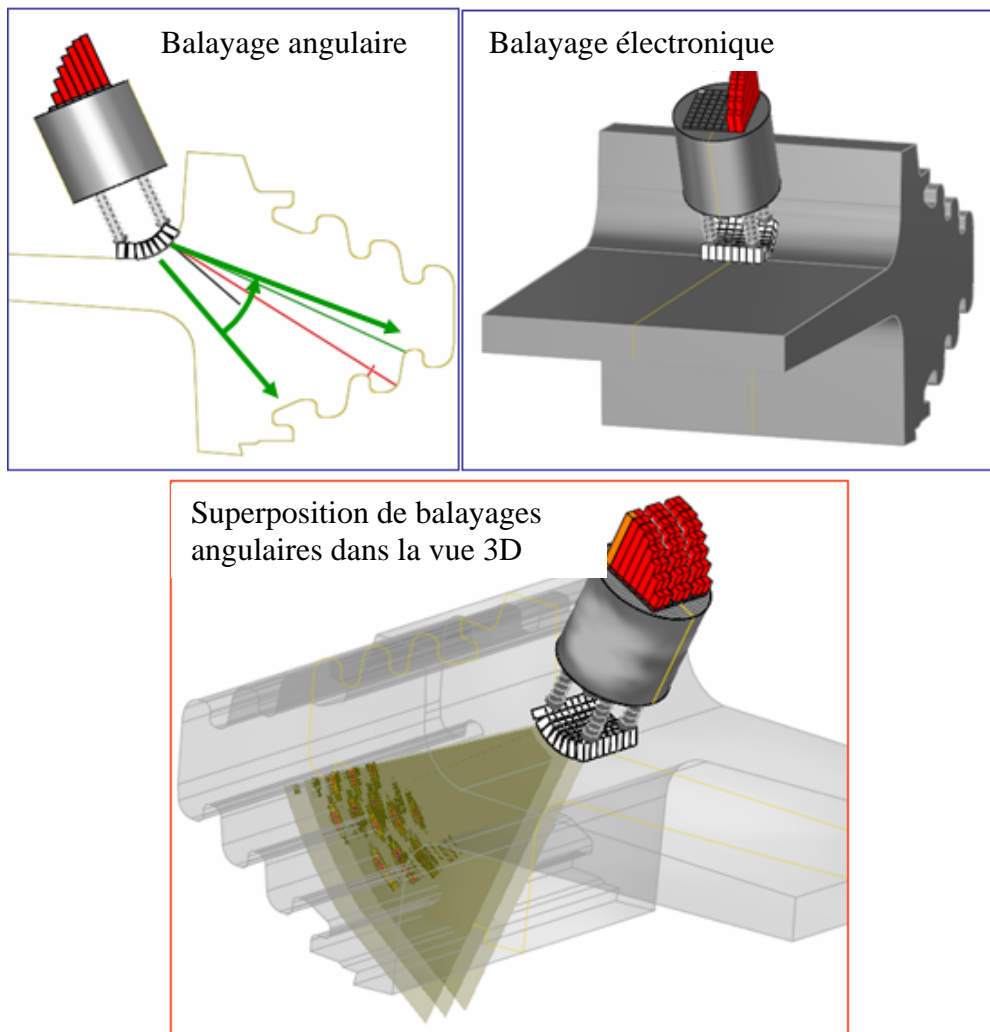


Figure 4 : Illustration d'une inspection multi-éléments combinant un balayage électronique à un balayage angulaire sur une pièce complexe et reconstruction 3D de trois balayages simulés.

RECONSTRUCTION DE DONNÉES PROVENANT D'UN CAPTEUR MULTI-ÉLÉMENT SUR SURFACE COMPLEXE

De nouveaux outils dédiés à la gestion de données provenant de capteurs multi-éléments (à la fois simulées et expérimentales en utilisant des systèmes d'acquisition développés par M2M [6]) ont été ajoutés à la plateforme CIVA dans la version 9. Ces outils permettent le post-traitement de données acquises sur chaque voie d'un capteur multi-éléments [7]. La technique de post-traitement dite de focalisation en tout point consiste à sommer les contributions élémentaires de chaque voie, pour focaliser à la réception l'énergie en tout point d'une zone. La technique repose sur le calcul de trajets ultrasonores à partir de l'élément émetteur vers un point de la zone de calcul et le trajet de ce point vers l'élément récepteur. Ces trajets sont modélisés en utilisant les outils de simulation décrits précédemment. L'illustration de cette technique de reconstruction est présentée pour une expérience faite sur un profile complexe caractéristique d'un état de surface observable aux abords de soudures. Un capteur multi-élément linéaire composé de 64 éléments est utilisé sur un bloc ferritique contenant huit trous génératrices (4 trous génératrices sont situés sous une surface régulière plane et 4 autres sont situés sous une surface complexe). L'acquisition consiste à exciter le premier élément du capteur et à recevoir avec tous les autres ; puis à commuter électroniquement à l'excitation sur l'ensemble de la barète tout en recevant à chaque fois sur l'ensemble de la barrette. Une base de 64 x 64 signaux élémentaires est

ainsi créée. Ce type d'acquisition s'appelle « full matrix capture » ou « transfer matrix » dans la littérature. La figure suivante montre le bscan obtenu en réception après excitation du premier élément. Les quatre échos liés à la présence des quatre trous génératrices sont visibles sur le bscan sous la forme d'échos paraboliques. Cette configuration n'est pas favorable à leur détection, le capteur étant décalé par rapport à la position des trous génératrices.

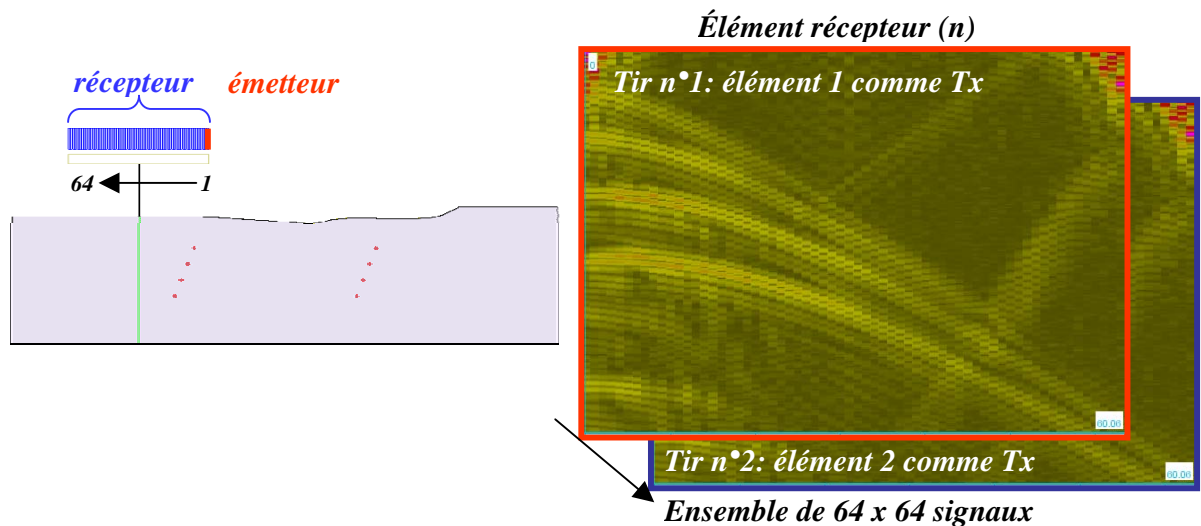


Figure 5 : Exemples de signaux acquis par le capteur multi-élément en utilisant une acquisition de type « full matrix capture »

Un algorithme de focalisation en tout point est appliqué à cette base de signaux élémentaires dans une zone respectivement centrée autour des quatre trous génératrices les plus proches. Nous pouvons constater que la reconstruction donne d'excellents résultats en termes de positionnement des échos (les cercles noirs représentent les positions réelles des trous génératrices), de résolution et de rapport signal à bruit. Cette technique a aussi été appliquée à l'ensemble de trous génératrices situés en dessous de la surface complexe ; nous constatons que les mêmes résultats sont obtenus malgré l'irrégularité de la surface.

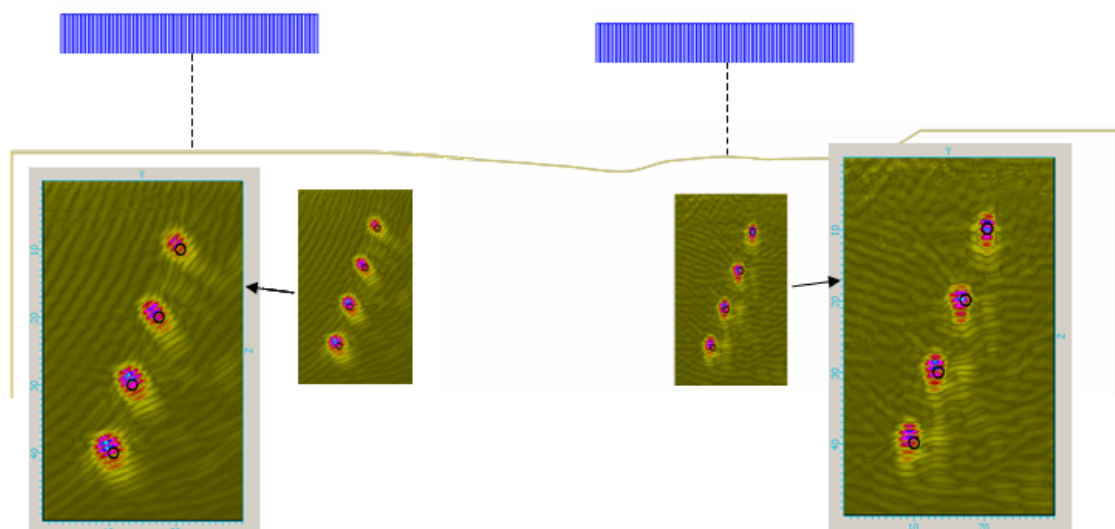


Figure 6 : Reconstruction de focalisation en tout point sur une partie plane régulière et une partie complexe.

CONCLUSION

Ce papier a illustré certains des outils de simulation disponibles dans CIVA pour la modélisation de capteurs multi-éléments. Ces outils permettent le calcul de lois de retard, le tracé de rayons, le calcul de champ, le calcul de la réponse de défauts, le post-traitement de données pour faire de la reconstruction dans des pièces de géométrie et de structure simples ou complexes. Les développements récents disponibles dans CIVA 9 permettent l'application de tous ces outils aux capteurs 2D. L'apparition d'outils de simulation pour ces capteurs avancés permet d'entrevoir de nouveaux moyens d'inspection.

REFERENCES

- 1) Plus de détails disponibles sur <http://www-civa.cea.fr>.
- 2) Raillon R and Lecœur-Taïbi I, "Transient Elastodynamic Model for Beam Defect Interaction. Application to NonDestructive Testing", *Ultrasonics*, 2000, Vol 38, 527-530.
- 3) Darmon M, Calmon P, Bèle B, "An integrated model to simulate the scattering of ultrasounds by inclusions in steels", *Ultrasonics*, 2004, Vol 42, pp. 237-241
- 4) Gengembre N, "Pencil method for ultrasonic beam computation", dans *proceedings of the 5th World Congress on Ultrasonics*, 2003, pp. 1533-1536.
- 5) Auld B, *Wave Motion* **1**, 3 (1979).
- 6) O. Roy, M. Bouhelier, "3D beam steering for improved detection of skewed crack", EPRI Piping & Bolting/Phased Array Inspection Conference, 2005
- 7) Calmon P, Iakovleva E, Fidahoussen A, Ribay G, Chatillon S, "Model based reconstruction of UT Array Data", à paraître dans le proceedings of the 34th Review of Progress in QNDE, 2007