

Inspection de pièces de géométrie complexe à l'aide d'un transducteur contact intelligent

Sylvain Chatillon, Olivier Roy et Steve Mahaut
Commissariat à l'Energie Atomique,
CEA/CEREM, CE Saclay France

INTRODUCTION

Les circuits de refroidissement primaires et secondaires des réacteurs à eau pressurisée français comportent de nombreux composants avec des géométries complexes : coudes, piquages, états de surface accidentés. Les inspections en service de ces composants avec des transducteurs ultrasonores contacts traditionnels présentent des performances limitées. En premier lieu, des variations de sensibilité, dues à un contact inadapté, résultent en des faibles performances de détection. En second lieu, la direction de propagation du faisceau transmis au travers d'interfaces irrégulières ne peut être maîtrisée en raison de désorientations subies par le transducteur au cours de son déplacement. Il en résulte des difficultés de localisation et de caractérisation des défauts détectés. Enfin, la géométrie de certains composants, par exemple les piquages (raccord entre tubulures), perturbe le déplacement du transducteur. La zone d'intérêt ne peut ainsi être que partiellement contrôlée.

Pour résoudre ces difficultés, et améliorer les performances de ces inspections, nous proposons un nouveau concept de transducteur contact multi-éléments. Sa surface émettrice est flexible pour épouser la surface de la pièce et ainsi optimiser le contact acoustique. La position de chaque élément du réseau est mesurée à l'aide d'une instrumentation spécifique intégrée au transducteur. Cette information est injectée dans un algorithme d'optimisation des lois de retards qui permet alors de préserver les caractéristiques focales du champ transmis tout au long du contrôle. Cette procédure améliore ainsi la détection, la localisation et la caractérisation des éventuels défauts. Après une brève description du modèle de calcul de champ ultrasonore, nous présentons le système et des acquisitions en transmission et en mode impulsion-écho validant ses performances.

SIMULATION DU CHAMP ULTRASONORE

Un modèle nommé 'Champ-Sons' est développé par le CEA pour simuler le champ transmis par un transducteur ultrasonore à travers une interface quelconque [1-2]. Ce modèle permet de traiter des transducteurs de géométrie quelconque, monolithiques ou multi-éléments, plans ou mis en forme. Initialement destiné au cas d'un transducteur émettant à travers un couplant liquide (transducteur en immersion) ou solide (transducteur contact avec sabot), ce modèle a été étendu pour cette étude au cas

d'une source ultrasonore placée directement au contact d'un solide [3].

DESCRIPTION DU SYSTEME

Le système comporte trois parties principales : un transducteur multi-éléments souple et la chaîne d'acquisition multi-voies associée, une instrumentation de mesure de la déformation de sa surface émettrice et un algorithme d'optimisation des lois de retards.

Transducteur contact multi-éléments souple

Le transducteur est composé de 24 palpeurs ultrasonores élémentaires rigides (les éléments), assemblés mécaniquement à l'aide de câbles et de ressorts pour obtenir une structure articulée (Figure 1).

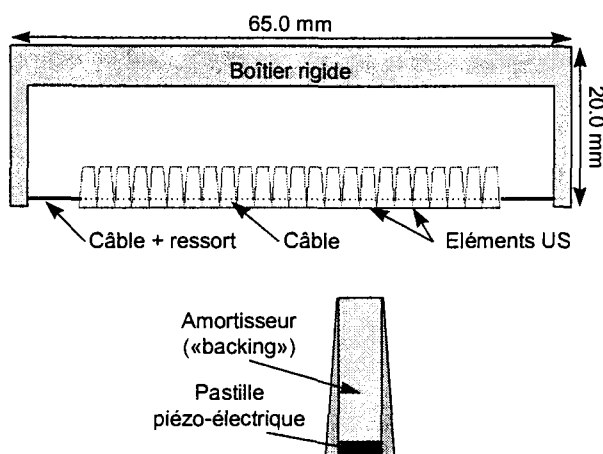


Figure 1 : structure mécanique du transducteur souple

La géométrie et les dimensions des éléments autorisent des déformations de la surface émettrice avec des rayons de courbure locale de 15,0 mm (Figure 2).

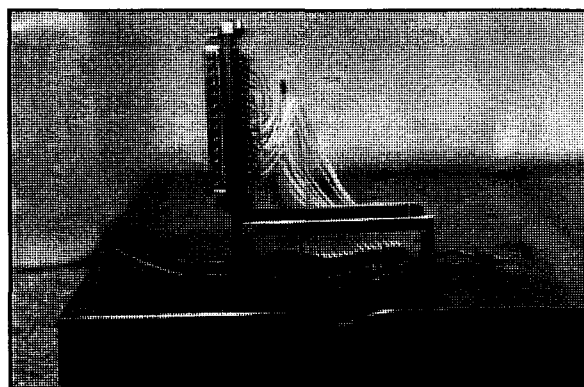


Figure 2 : déformation avec un rayon de courbure locale de 15,0 mm.

Mesure de la déformation de la surface émettrice

Pour maîtriser le faisceau transmis à l'aide des techniques multi-éléments, la position de l'ensemble des éléments doit être connue. Dans ce but, une instrumentation spécifique fondée sur une technologie micro-ondes a été développée en collaboration avec Supélec. Elle est constituée de deux antennes fixées sur le boîtier rigide

du traducteur et d'un ensemble de sondes modulées placées derrière quelques éléments US (Figure 3).

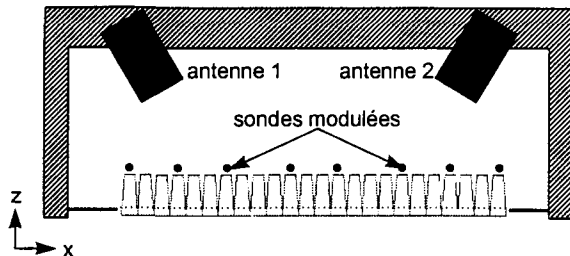


Figure 3 : description de l'instrumentation de mesure

La distance séparant chaque sonde modulée des deux antennes est déterminée à partir d'une mesure de phase [4]. La position des éléments sélectionnés est déduite par triangulation et le profil de la surface émettrice est obtenu par une interpolation. La validation expérimentale d'un premier prototype est en cours.

Algorithme d'optimisation des lois de retards

De manière courante, le processus de focalisation avec un traducteur multi-éléments est le suivant : la profondeur focale et l'angle de déflexion définissent le "point focal géométrique", et la loi de retards associée est calculée de sorte à assurer des interférences constructives en ce point. Cependant, des différences significatives entre caractéristiques focales "acoustiques", mesurées sur le champ transmis, et "géométriques", imposées par la loi de retards, sont observées [3]. Ainsi, l'orientation du faisceau est systématiquement inférieure à l'angle de déflexion, l'écart augmentant lorsque la profondeur focale diminue. De même, la profondeur focale acoustique (profondeur du maximum d'amplitude du champ transmis), devient rapidement inférieure à la profondeur focale géométrique, l'écart augmentant avec la profondeur ou l'angle de déflexion. Ce comportement provient de l'ouverture limitée du traducteur [5]. Pour résoudre ce problème, un algorithme d'optimisation de lois de retards est développé pour maîtriser le faisceau transmis [3]. Cet algorithme est suffisamment rapide pour mettre en oeuvre, avec le système "F.A.U.S.T." (Focusing Adaptive UltraSonic Tomography) [6-7], une procédure de focalisation dynamique adaptative en temps réel.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Afin de valider le comportement mécanique et acoustique du prototype ainsi que la méthode de détermination des lois de retards, les essais suivants ont été réalisés sur des échantillons de profil parfaitement connu (CAO). La position des éléments est calculée à partir d'un modèle simulant la déformation de la surface émettrice du traducteur.

Acquisitions en transmission

Le champ transmis à travers différentes interfaces complexes est comparé à celui mesuré sous une surface plane. L'objectif est d'estimer la capacité du système à s'adapter à de fortes variations de géométrie. L'exemple

représenté sur la Figure 4 est obtenu pour une focalisation à une profondeur de 40.0 mm et un angle de déflexion de 45° pour une configuration très défavorable : une interface concave/convexe avec un rayon de courbure de 25.0 mm. Le niveau du lobe de réseau en décibels et la largeur focale en millimètres, sont reportés sur la courbe échodynamique.

Pour toutes les configurations de focalisation étudiées (profil, profondeur, angle), la comparaison entre l'expérience et la modélisation est satisfaisante. Les caractéristiques de la zone focale (position, orientation, largeur, amplitude) sont correctement prédites. Seule une légère sous-estimation du niveau du lobe de réseau est observée pour une interface concave/convexe. En outre, en comparaison à une interface plane, les dégradations des caractéristiques focales du champ transmis restent acceptables malgré les fortes déformations subies par la surface émettrice. L'augmentation maximale de la largeur focale est de 40 %, la perte maximale de sensibilité est de 3-4 dB et l'accroissement maximal du niveau du lobe de réseau est de 3 dB. Enfin, l'algorithme d'optimisation des lois de retards permet d'obtenir l'orientation souhaitée, avec une erreur moyenne inférieure à 2°.

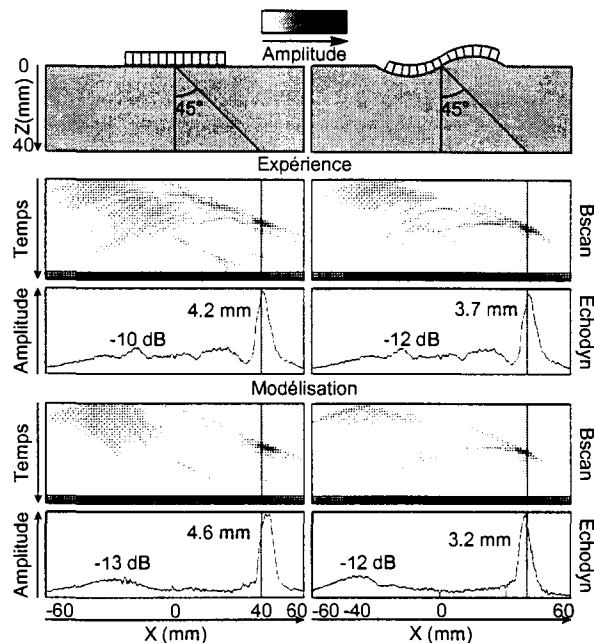


Figure 4 : champ transmis à travers une interface concave/convexe pour une focalisation à 40 mm et 45°.

Pour estimer les performances du traducteur lors du contrôle d'une pièce de géométrie irrégulière, le champ transmis est mesuré en cinq positions distinctes du traducteur le long d'une pièce comportant une cuvette avec un rayon de courbure locale de 20.0 mm. Pour chaque position, séparées de 10.0 mm, l'amplitude et la largeur focale, l'orientation du faisceau et le niveau du lobe de réseau sont mesurés. La Figure 5 représente les résultats obtenus pour une focalisation à 30 mm sous une incidence de 45°. L'amplitude de la tache focale est exprimée en décibels, la référence étant celle obtenue à travers une interface plane.

Les caractéristiques focales du champ transmis aux différentes positions le long de la cuvette sont très proches de celles obtenues à travers l'interface plane. L'orientation est sensiblement constante au cours du déplacement, les variations sont inférieures à 2° . La variation de sensibilité est de 1 dB, la largeur focale est constante et aucune augmentation significative du niveau du lobe de réseau n'est observée (inférieure à 2 dB).

Ces résultats montrent la capacité du traducteur souple associé à l'optimisation des lois de retards à corriger les variations géométriques de la surface contrôlée pour transmettre un faisceau maîtrisé et homogène.

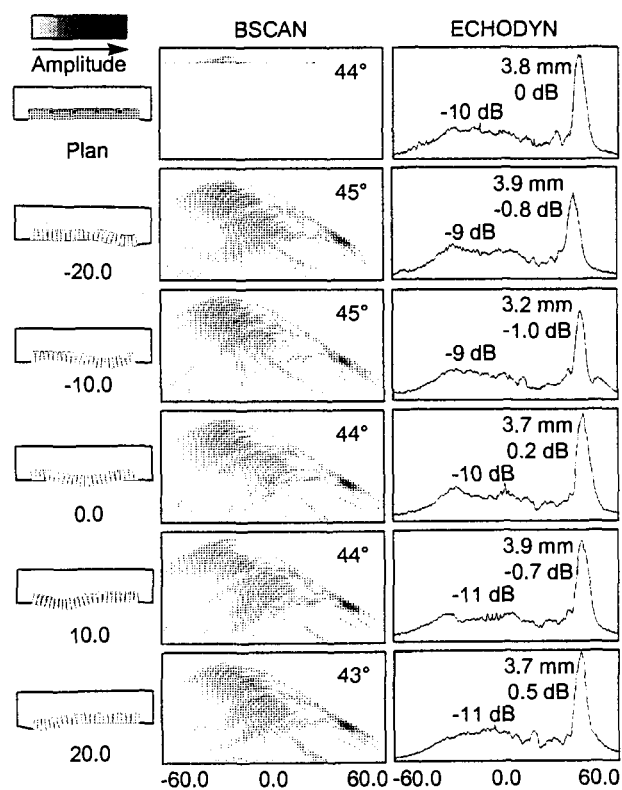


Figure 5 : champ transmis en 5 positions le long d'une cuvette pour une focalisation à 30.0 mm et 45° .

A présent, des acquisitions en mode impulsion-écho sont présentées. Elles présentent les performances de ce système en termes de détection, localisation et caractérisation de défauts implantés sous un profil irrégulier.

Acquisitions en mode impulsion-écho

Le profil de l'échantillon d'acier comporte deux parties : une zone plane et une zone irrégulière, représentative d'un composant contrôlé sur site. Afin d'obtenir une référence, les mêmes défauts sont implantés sous le profil plan et sous le profil irrégulier. Les inspections sont réalisées selon deux modes. Pour le "mode statique", les déformations de la surface émettrice ne sont pas prises en compte : les lois de retards calculées dans le cas d'une interface plane sont appliquées durant tout le déplacement du traducteur. Pour le mode de "focalisation dynamique adaptative", la position réelle des éléments est supposée connue à partir de la géométrie du bloc et

la loi de retards est adaptée dynamiquement en fonction du profil rencontré.

Les premières acquisitions sont réalisées sur un ensemble de trous génératrices implantés à différentes profondeurs. La Figure 6 représente les résultats de l'inspection en ondes longitudinales à 45° pour une profondeur de focalisation de 30 mm. Avec le mode statique, les trous implantés sous le profil irrégulier sont partiellement détectés et ne sont pas correctement localisés dans la pièce. Par contre, les résultats obtenus en mode dynamique adaptatif sont comparables à ceux obtenus au travers de l'interface plane : tous les défauts sont détectés et correctement repositionnés dans la pièce.

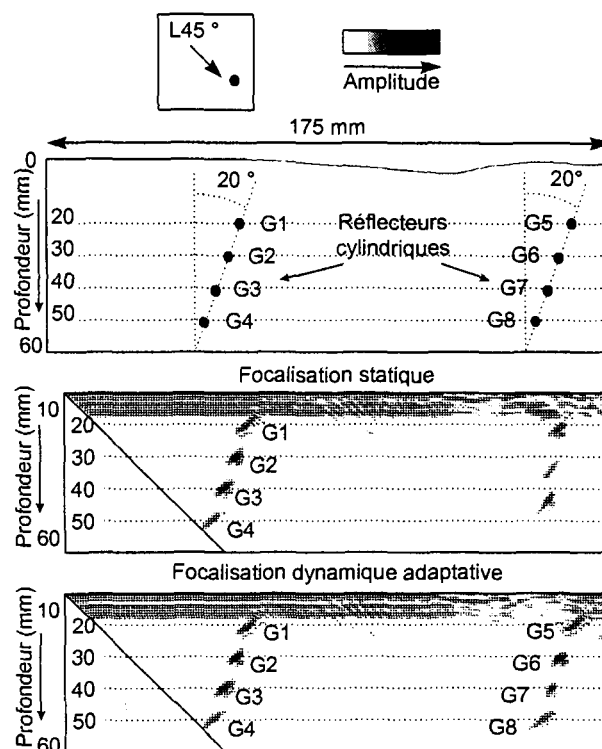


Figure 6 : inspection de trous génératrice en ondes L45.

De la même façon, des inspections d'entailles inclinées de 5.0 mm de hauteur sont réalisées avec des ondes longitudinales se propageant à 45° (L45) et à 70° (L70) (Figure 7 et 8). En mode statique, le faisceau transmis est perturbé par le profil irrégulier et l'entaille n'est pas détectée. La seule optimisation du couplage de la surface émettrice du traducteur avec la surface de la pièce n'est donc pas suffisante pour obtenir des performances d'inspection satisfaisantes. En mode dynamique adaptatif, l'entaille est effectivement détectée et les échos détectés sont similaires à ceux observés sous le profil plan. Pour l'inspection menée en ondes L45 (Figure 7) nous observons deux indications : un écho de diffraction, situé à une profondeur de 35 mm, provenant de l'extrémité supérieure de l'entaille et un écho de coin, situé à une profondeur de 40 mm, issu de la réflexion sur l'entaille et le fond de la pièce.

L'acquisition menée en ondes L70 (Figure 8) engendre un écho unique, de forte amplitude et étalé, provenant

de la réflexion en incidence normale sur le plan de l'entaille. A paramètres d'acquisition identiques, l'amplitude de cet écho est supérieure à celle des indications obtenues lors de l'inspection en ondes L45, ce qui confirme le caractère plan du défaut. Ces deux acquisitions sont donc complémentaires. Celle menée en ondes L45 permet de détecter et de localiser avec précision deux indications et celle menée en ondes L70 permet d'interpréter ce groupe d'échos comme provenant des deux extrémités d'un même défaut plan.

Ces acquisitions valident ainsi la capacité du système à améliorer la détection, la localisation et la caractérisation de défauts implantés sous une interface irrégulière.

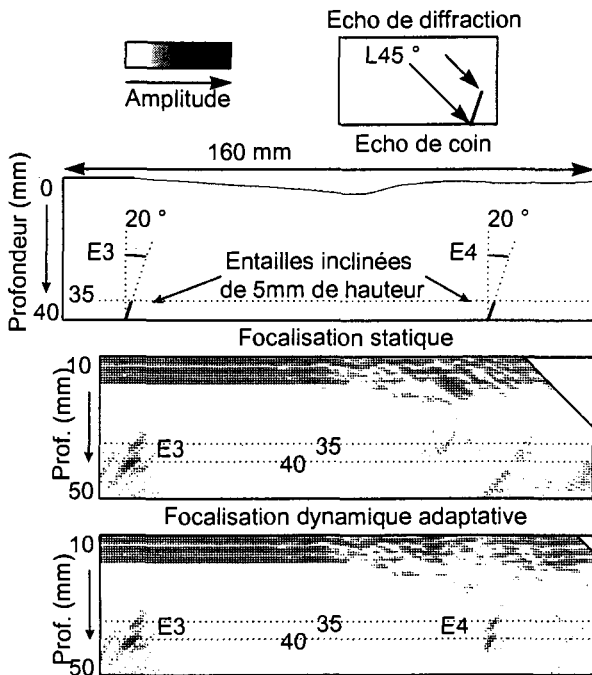


Figure 7 : inspections d'une entaille inclinée de 5 mm de hauteur en ondes L45.

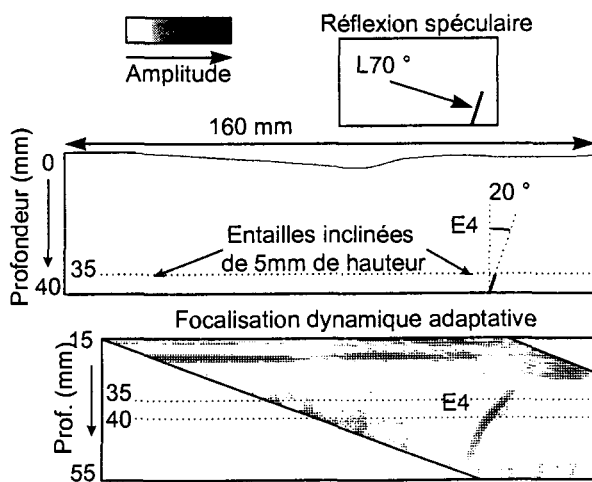


Figure 8 : inspections d'une entaille inclinée de 5 mm de hauteur en ondes L70.

CONCLUSION

Nous proposons un nouveau concept de traducteur contact multi-éléments destiné à améliorer l'inspection de composants de géométrie complexe. La surface émettrice est flexible afin d'optimiser le contact le long de pièces de géométrie complexe ou comportant un état de surface accidenté. Un algorithme, fondé sur un modèle géométrique simplifié, est utilisé pour déterminer, de manière rapide, la loi de retards assurant la maîtrise des caractéristiques focales du champ transmis.

Des acquisitions menées en transmission avec un traducteur articulé valident le comportement satisfaisant prévu par la modélisation. Ainsi, l'optimisation des lois de retards assure la transmission d'un faisceau homogène et maîtrisé au cours du déplacement du traducteur le long d'une pièce comportant un profil accidenté. Des inspections en mode impulsion-écho sont réalisées sur un échantillon comportant un profil de composant contrôlé sur site. Les résultats montrent que l'adaptation dynamique de la loi de retards au profil de la pièce conduit à de très bonnes performances quelle que soit l'interface traversée. Tous les réflecteurs artificiels plans et volumiques sont détectés, localisés et caractérisés de façon identique sous le profil irrégulier et sous la surface plane.

REFERENCES

1. P. Calmon, A. Lhémy, and J. Nadal, 'Broadband fields radiated in a solid by water-coupled transducers: a comparison of approximate models, numerical approaches and experiments', *Rev. of Prog. in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti Plenum Press, New-York, Vol 15, (1996), p. 1019.
2. N. Gengembre and A. Lhémy, 'Calculation of wideband ultrasonic fields radiated by water coupled transducers into heterogeneous and anisotropic media', *Rev. of Prog. in QNDE, op. cit.*, Vol 19, (2000), à paraître.
3. S. Chatillon, G. Cattiaux, M. Serre and O. Roy, 'Ultrasonic nondestructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer', *Proc. of UI99/WCU 99*, à paraître.
4. J. Ch. Bolomey, 'La méthode de diffusion modulée: une approche au relevé des cartes de champs micro-ondes en temps réel', *l'onde électrique*, 1982, vol 62, n°5, p. 73.
5. M. El Amrani, 'Etude de différentes méthodes de focalisation ultrasonore appliquées au contrôle non destructif', Thèse de l'Université Paris 7, 1996.
6. S. Mahaut, G. Cattiaux, O. Roy, and Ph. Benoist, 'Self-focusing and defect characterization with the Faust system' *Rev. of Prog. in QNDE, op.cit.*, Vol 16B, (1997), p. 2085.
7. O. Roy, S. Mahaut, and M. Serre, 'Application of ultrasonic beam modeling to phased array testing of complex geometry component', *Rev. of Prog. in QNDE, op.cit.*, Vol 18B, (1999), p. 2017