



**HAL**  
open science

## Traducteurs ultra-sonores multi-éléments : nouveaux champs d'applications en CND

Olivier Casula, Gwenael Toullelan, Arnaud Nadim

► **To cite this version:**

Olivier Casula, Gwenael Toullelan, Arnaud Nadim. Traducteurs ultra-sonores multi-éléments : nouveaux champs d'applications en CND. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00550541

**HAL Id: hal-00550541**

**<https://hal.science/hal-00550541>**

Submitted on 28 Dec 2010

**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.

## Transducteurs ultrasonores multi-éléments : nouveaux champs d'applications en CND

Olivier Casula, Gwenael Toullelan, Arnaud Nadim

CEA-LIST, Gif-sur-Yvette, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, olivier.casula@cea.fr

Le contrôle non destructif par ultrasons est souvent réalisé à l'aide de transducteurs mis en contact avec le composant. Pour des raisons de couplage acoustique, ce type de contrôle est efficace lorsque la face avant du capteur est correctement plaquée sur la surface de la pièce. Dans ce cas, la transmission des ondes est maximale. Toutefois, la plupart des géométries sont variables, voire à accessibilités limitées. Ces effets induisent donc des difficultés dans la transmission des ondes ultrasonores et limitent la détection, la localisation ou la caractérisation des défauts. Pour optimiser le contact sur les géométries 2D et 3D, des transducteurs multi-éléments flexibles ont été développés et intègrent un profilomètre. Un calculateur embarqué dans le système d'acquisition recalcule en temps réel la déformation de la surface et les lois de retards pour maintenir les caractéristiques du faisceau en toute position de la pièce inspectée.

Après le rappel du principe du dispositif, ce papier décrira des résultats de simulations obtenus à l'aide de CIVA ainsi que des résultats expérimentaux récents acquis sur des configurations de contrôle réalistes (soudures de raccord de Tés de mélange, piquages). Les outils de reconstruction de CIVA seront également présentés pour positionner et dimensionner les défauts dans les scènes de contrôle 3D. Enfin, les nouvelles possibilités de pilotage temps réel du capteur seront présentées comme la reconstruction temps réel de pièces de géométrie 2D exploitant les moyens de profilométries externe et interne de ces méthodes.

## 1 Introduction

Le contrôle ultrasonore de pièces complexes est souvent effectué au contact, au moyen de transducteurs monolithiques munis de sabots rigides adaptés à la surface à contrôler. Ce préformage, adapté à un type de surface, ne peut épouser toutes les zones inspectées et entraîne ainsi des variations de sensibilité liées au mauvais couplage du transducteur avec la pièce. Il en résulte alors une détérioration de la sensibilité en détection due à une désorientation et/ou une division du faisceau. Cette modification du champ transmis peut se traduire par une couverture partielle de la zone inspectée. Ci-dessous, les champs ultrasonores simulés avec CIVA (Figure 1) illustrent la détérioration d'un faisceau ultrasonore due à un mauvais couplage capteur/pièce.

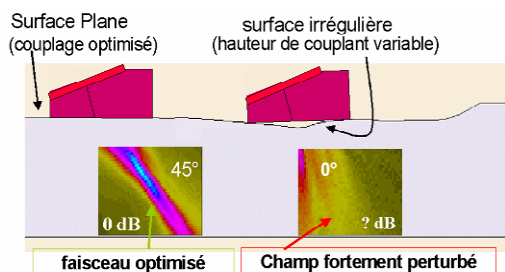


Figure 1 : Contrôle d'une pièce complexe à l'aide d'un capteur monolithique.

L'amélioration de la localisation et de la caractérisation des défauts nécessite d'optimiser le couplage entre la surface émettrice du transducteur et la pièce contrôlée. Les capteurs multi-éléments flexibles répondent bien à cette demande. Les capteurs 2D appropriés aux pièces 2D ou 2.5D ont été présentés précédemment [1]. Leurs capacités à focaliser des ondes longitudinales ou transversales, à

mesurer la déformation de la surface émettrice avec une bonne précision, et à calculer les lois de retards en temps réel ont été démontrées. Les capteurs flexibles 3D ont été développés plus récemment et permettent l'amélioration significative de la détection de défauts dans des pièces de géométries 3D telles que des raccords coniques ou des piquages. Ces capteurs flexibles sont aujourd'hui commercialisés par la société IMASONIC.

Ce papier présente trois applications de capteurs multi-éléments flexibles qui présentent leur intérêt. La première application est l'utilisation d'un transducteur 2D dans une configuration multi-tirs pour l'inspection d'une pièce 2D présentant un profil complexe réaliste et dans laquelle sont implémentés des défauts artificiels. Pour les deux autres applications, un capteur 3D est utilisé. Ce dernier est utilisé dans un premier temps pour le contrôle d'un piquage le long de trajectoires complexes, puis, pour le contrôle de défauts à proximité d'une soudure. Pour finir, ce papier présente un outil de reconstruction de géométries complexes reposant sur l'instrumentation des capteurs flexibles.

## 2 Principe du transducteur flexible

Comme précisé ci-dessus, la flexibilité d'un transducteur permet d'assurer la bonne adaptation entre la partie active et la surface d'entrée irrégulière du composant inspecté. Cependant, bien que le couplage soit optimisé, la loi de retards doit intégrer la déformation du capteur pour compenser les effets de surface. En effet, si la loi de retards initiale est appliquée, le résultat de la simulation menée à l'aide de CIVA montre que le champ transmis n'est plus focalisé et subit une dégradation du faisceau ultrasonore (Figure 2).

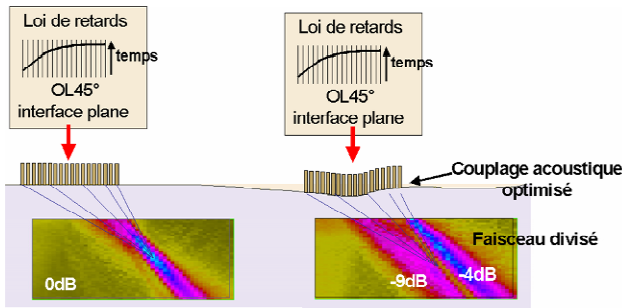


Figure 2 : Simulation du champ acoustique transmis à travers une interface plane (a) et une surface irrégulière.

Pour conserver une focalisation optimale, un profilomètre est intégré au traducteur multi-éléments et mesure les déformations de la surface émettrice. Un algorithme permet ensuite le calcul des lois de retards adaptées en fonction des variations du profil rencontré par le traducteur. Ces retards sont enfin appliqués aux éléments ultrasonores. La Figure 3 présente le résultat de champ transmis dans ce cas, simulé à l'aide de CIVA. Ces deux étapes assurent la transmission d'un faisceau ultrasonore ayant des caractéristiques maîtrisées (orientation et profondeur de focalisation). Les caractéristiques du faisceau sont optimales et identiques à celles du faisceau focalisé sous l'interface plane.

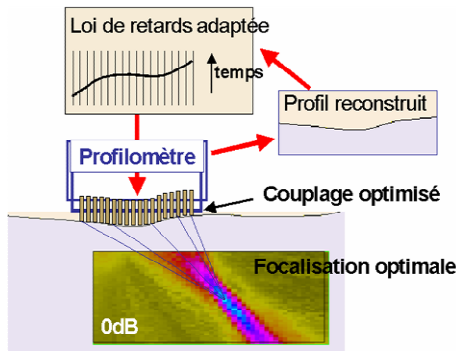


Figure 3 : Principe du traducteur multi-éléments flexible couplé à un profilomètre.

En pratique, lors du déplacement du capteur, la profilométrie, le re-calcul et l'application des retards s'exécutent en temps réel par le système d'acquisition MultiX, commercialisé par la société M2M (Figure 4).

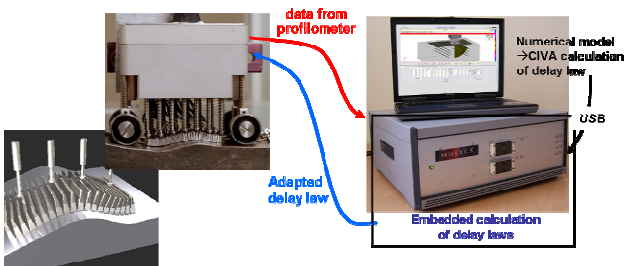


Figure 4 : Traducteur multi-éléments flexible 2D et système d'acquisition MultiX 128 voies parallèles.

### 3 Traducteur flexible 2D

#### 3.1 Description du capteur

Le traducteur flexible 2D (Figure 4) est composé de 32 éléments piézoélectriques linéaires indépendants, mécaniquement assemblés pour former une structure mécanique articulée pouvant se déformer suivant des rayons de courbure supérieurs à 15 mm. Le capteur est composé du dispositif mécanique assurant le plaquage des éléments sur la pièce et du profilomètre mesurant la déformation locale de la surface émettrice.

#### 3.2 Détection de défauts sous une surface irrégulière

Pour valider les performances du traducteur flexible en fonctionnement multi-tirs, des essais expérimentaux ont été menés sur une maquette de géométrie complexe et dans laquelle sont implémentés des défauts artificiels (Figure 5). La maquette, en acier ferritique, est représentative d'un composant soudé de surface irrégulière (profil mesuré sur une pièce réaliste). Les défauts sont répartis suivant deux séries identiques de 4 trous génératrices (TG), de 2 mm de diamètre, localisés à 20, 30, 40 et 50 mm de profondeur. La première série est localisée sous une surface plane (génératrices de référence), tandis que la seconde est située sous le profil irrégulier.

Les acquisitions ont été réalisées, à l'aide d'un balayage sectoriel de 30 tirs, en focalisant des ondes longitudinales de 0 à 55° à 40 mm de profondeur. Pour cette configuration, le temps nécessaire pour reconfigurer les 30 lois de retards est d'environ 2.5ms.

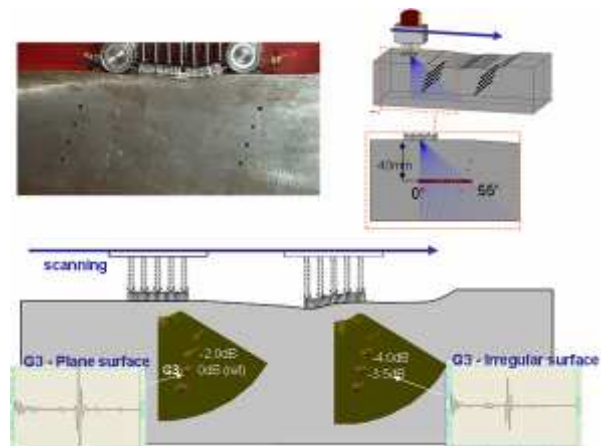


Figure 5 : Détection de défauts dans une pièce de géométrie 2D complexe.

La Figure 5 illustre la configuration de contrôle et présente les signatures ultrasonores obtenues pour deux positions du capteur. Dans les deux cas, les défauts sont détectés et bien repositionnés dans la pièce. Les allures temporelles des signaux de détection des trous G3 situés sous les surfaces planes et irrégulières sont très proches. Seule une atténuation de 3dB est constatée. Ces résultats montrent les capacités du système à maîtriser les caractéristiques du faisceau acoustique sous une surface irrégulière admettant une variation de 5mm dans une configuration de contrôle multi-tirs.

## 4 Traducteur flexible 3D

### 4.1 Description du capteur

Dans le cas d'une pièce de géométrie 3D, un capteur flexible matriciel est utilisé (Figure 6). La surface émettrice de ce dernier est composée d'une matrice d'éléments piézoélectriques noyés dans une résine souple. Il est constitué de 84 éléments pour une ouverture globale de 32 x 26 mm<sup>2</sup>. Un réseau de 3x3 détecteurs assure les fonctions de plaquage (pistons et ressorts) et de profilomètre 3D. Cette combinaison de ces 3x3 points de mesures est suffisante pour reconstruire des déformations plane, cylindrique, conique et torique du capteur.

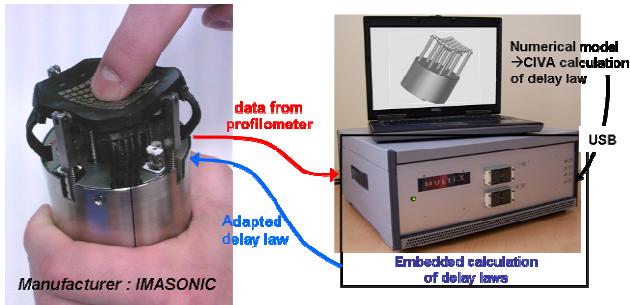


Figure 6 : Traducteur multi-éléments flexible 3D et système d'acquisition MultiX 128 voies parallèles.

### 4.2 Détection d'un défaut dans la jonction cône/cylindre d'un piquage

La maquette présentée ci-dessous (Figure 7) reproduit la géométrie de la partie supérieure des jonctions de tuyauteries (piquages) rencontrées dans les circuits de refroidissement de réacteurs nucléaires (étude menée en collaboration avec EDF). La maquette est en acier inoxydable homogène, et comporte plusieurs défauts dont un trou à fond plat (TFP) situé sous la jonction cône/cylindre. Le TFP a un diamètre de 3 mm et admet un ligament de 40 mm.

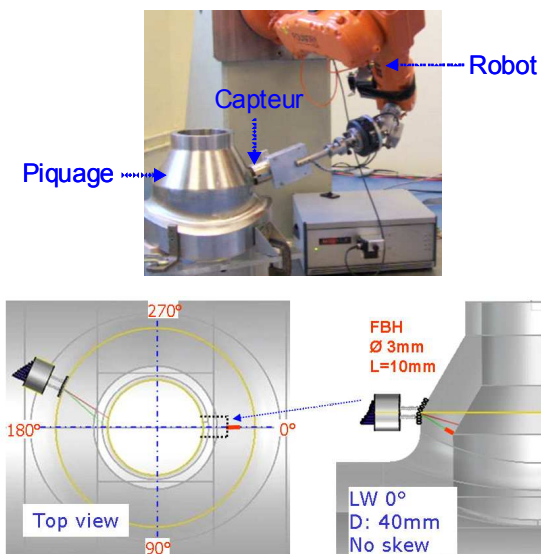


Figure 7 : Maquette représentative d'un piquage et configuration de contrôle.

Pour assurer des trajectoires mécaniques complexes sur des pièces de géométries 3D, les acquisitions sont réalisées

à l'aide d'un robot industriel, mis à disposition sur la plateforme fédérative R&D GERIM [2]. L'acquisition est réalisée en onde longitudinale orientée à 0° (normale locale au défaut). La Figure 8 ci-dessous présente le résultat de contrôle obtenu quand le capteur décrit une trajectoire circulaire, de 0 à 50°, autour du TFP.

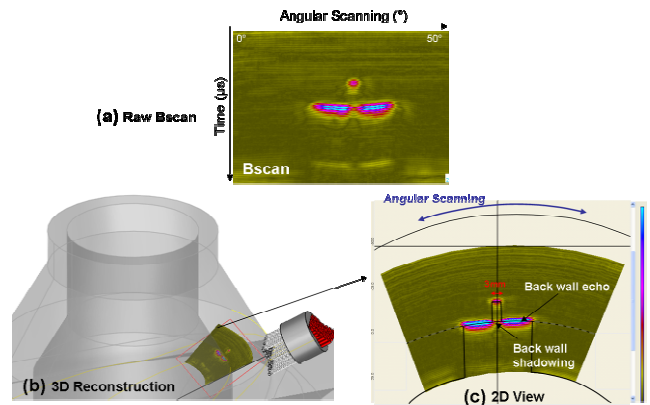


Figure 8 : Détection, positionnement et caractérisation d'un TFP.

Les résultats expérimentaux de la Figure 8a sont représentés sous la forme d'un Bscan brut (scan balayage mécanique/temps), pour lequel des travaux de synchronisation entre le système d'acquisition et l'électronique du robot ont été réalisés. Dans ce mode, on enregistre, de façon synchrone, les ASCAN associés aux 6 coordonnées du capteur durant la trajectoire. Sur cette vue, le TFP et l'écho de fond sont bien visualisés. Ces données peuvent aussi être reconstruites dans la scène 3D décrivant la configuration de contrôle à l'aide des outils de reconstruction 3D de CIVA. La Figure 8b montre ces mêmes données intégrées dans la vue virtuelle du piquage. L'utilisation de curseurs 2D est alors possible lorsqu'on projette les données contenues dans la nappe 3D dans le cadre rouge (Figure 8c). Les informations fournies par les curseurs nous permettent de relever et de confirmer le diamètre du TFP, sa position ainsi que le fond de la pièce.

L'image ainsi reconstruite dans la géométrie 3D facilite l'interprétation des échos (échos du défaut et de la paroi interne de la pièce) et fournit une localisation précise du défaut (position angulaire et profondeur).

Ce résultat valide la partie mécanique du capteur flexible, capable d'épouser une surface complexe 3D, et démontre toute l'efficacité acoustique du couple "matrice flexible- système embarqué" pour la reconstruction de la surface 3D et le calcul temps réel des lois de retards.

### 4.3 Détection/caractérisation de défauts à proximité d'un joint de soudure

La deuxième configuration représente la géométrie d'un "T de mélange" rencontré dans les circuits de refroidissement des réacteurs nucléaires. Cette étude a été effectuée en collaboration avec EDF et s'intéresse à l'inspection du joint de soudure situé entre les deux conduites réalisée à l'aide d'un traducteur flexible 3D positionné à proximité (15 mm à gauche ou à droite de la jonction). La figure 9 illustre également le problème de

couplage et d'accessibilité rencontré quand un capteur à sabot rigide est utilisé pour l'inspection de cette zone.

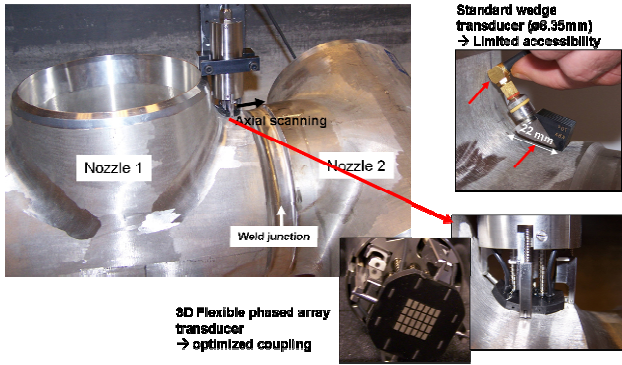


Figure 9 : Maquette représentative d'un "T de mélange".

La détection d'entailles débouchantes en paroi interne est évaluée (Figure 10). Les entailles mesurent 2 mm de hauteur et sont positionnées respectivement à 0, 3, 6 et 9 mm à gauche du joint de soudure.

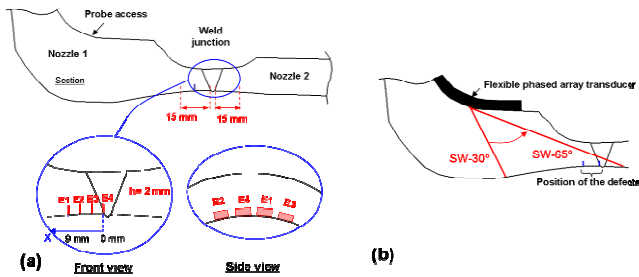


Figure 10 : Schéma de la maquette, description des défauts et configuration de tir pour l'inspection.

Pour couvrir toute la zone d'intérêt avec une seule position mécanique du capteur, les acquisitions ont été réalisées en ondes transversales en utilisant 30 points focalisant à 15mm de profondeur et couvrant un secteur angulaire allant de 30 à 65°. Le capteur a été déplacé selon l'axe de révolution afin d'optimiser la détection des échos.

Pour un couplage optimal avec la surface irrégulière de la pièce (exigeant un rayon de courbure allant jusqu'à 20 mm) et pour inspecter la zone d'intérêt en ondes transversales avec des angles supérieurs à 60°, un capteur spécifique a été développé : la diamètre externe du traducteur a été réduit pour répondre aux contraintes d'accessibilité et sa surface émettrice a été modifiée pour pouvoir générer des grands angles de tir. La partie mécanique du traducteur est composée de 3x3 pistons plaquant le réseau d'éléments sur la surface de la maquette et mesurant sa déformation à l'aide de capteurs de déplacement.

La Figure 11 illustre la détection et la caractérisation des 2 entailles situées à 9 mm (entaille E<sub>1</sub>) et 6 mm (entaille E<sub>2</sub>) du joint de soudure. Les vues Bscans sectorielles reconstruits dans la géométrie et les Ascans associés aux détections sont présentés. Les résultats obtenus montrent que les 2 entailles sont détectées avec un bon rapport signal-sur-bruit (RSB). Pour l'entaille E<sub>1</sub>, la plus éloignée du joint de soudure, la détection est optimisée pour un angle de 45° et atteint un niveau de détection de -9 dB par rapport à la référence (détection du bas d'une entaille de hauteur 2mm et située sous une surface plane à 15mm de

profondeur). Pour la seconde entaille E<sub>2</sub>, la détection est optimale pour un angle de 50° et le niveau de détection maximal est de -10 dB. Les deux images sectorielles révèlent également la présence d'échos de diffraction qui peuvent éventuellement être exploités pour le dimensionnement des entailles (2 mm).

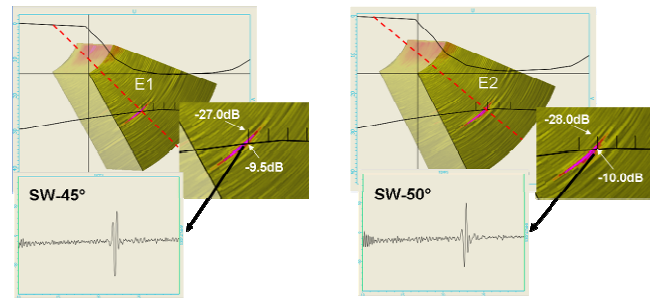


Figure 11: Détection des entailles E<sub>1</sub>, et E<sub>2</sub> à 9 mm et 6 mm du joint de soudure.

La Figure 12 présente les résultats obtenus pour les 2 autres entailles, E<sub>4</sub>, et E<sub>3</sub>, situées respectivement à 0 et 3 mm du joint de soudure. Pour ces deux entailles, la détection est optimisée à 55° (E<sub>3</sub>) et 60° (E<sub>4</sub>), et leurs niveaux de détection respectifs est de -13 et -20 dB. Le niveau de détection plus faible de l'entaille E<sub>4</sub>, qui est la plus proche du joint de soudure, peut s'expliquer par la géométrie surfacique qui provoque un effet d'ombrage.

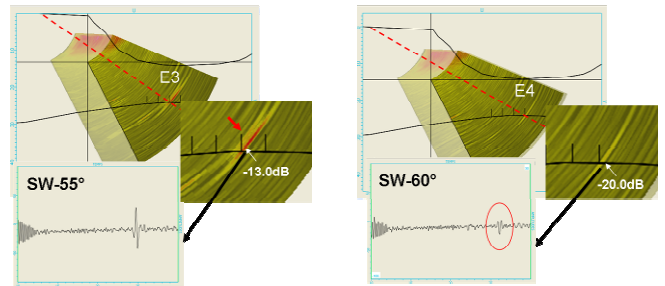


Figure 12 : Détection des entailles E<sub>3</sub> et E<sub>4</sub> à 3 et 0 mm du joint de soudure.

L'ensemble de ces résultats montre que le capteur flexible développé pour le contrôle de cette pièce répond en termes d'accessibilité, de conformation et possède une directivité suffisante pour pouvoir détecter des entailles à proximité du joint de soudure. Le capteur, même éloigné du joint de soudure, est donc capable de couvrir une large zone d'inspection et de détecter des défauts situés à proximité, voire éventuellement à l'intérieur du joint.

## 5 Reconstruction temps réel de géométries complexes

La maîtrise temps réel des caractéristiques d'un faisceau ultrasonore lors du déplacement d'un capteur permet de développer de nouveaux outils embarqués, comme la reconstruction temps réel de géométries de pièces complexes. Plus précisément, cet outil reconstruit la surface et le fond d'une pièce 2D. La fonctionnalité exploite le profilomètre pour reconstruire le profil externe de la pièce

ainsi que la maîtrise d'un faisceau focalisé  $L0^\circ$  pour mesurer les variations d'épaisseur de la pièce sur la base d'une mesure de temps de vol capteur/fond de pièce. La Figure 13 illustre la reconstruction temps réel de la géométrie d'une maquette représentative d'un bourrelet de soudure.

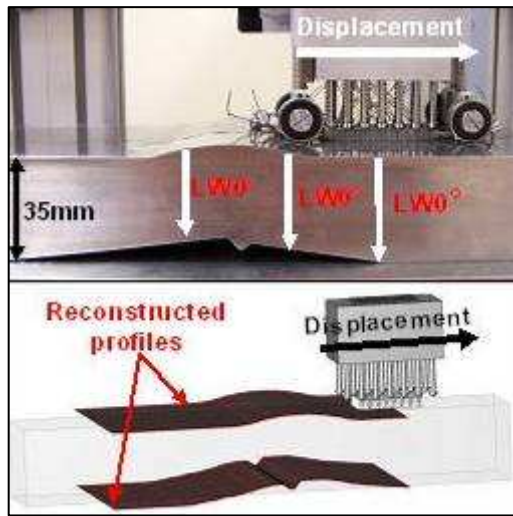


Figure 13 : Reconstruction temps réel de la géométrie 2D d'une pièce complexe.

Les profils externe et interne sont respectivement reconstruits avec des précisions de  $\pm 0,1$  mm et  $\pm 0,4$  mm. Cette géométrie reconstruite peut être sauvegardée sous la forme d'un fichier CAO au format standard pour éventuellement être exploitée par le logiciel CIVA.

## 6 Conclusion

Les traducteurs multi-éléments flexibles ont été conçus pour améliorer les contrôles ultrasonores des composants de géométries complexes. Le traducteur flexible 3D instrumenté constitue une extension du traducteur flexible 2D, qui a déjà été validé sur des géométries 2D. Ces nouveaux dispositifs permettent l'utilisation d'une sonde unique pour contrôler une pièce présentant une géométrie variable.

Le contrôle de tuyauteries constitue une application potentielle du traducteur flexible. Cette technologie a montré sa capacité à détecter différents types de défauts avec un bon RSB. D'autre part, les fonctionnalités embarquées du système d'acquisition offrent de nombreuses perspectives de développement temps réel des traducteurs multi-éléments qui sont facilement mises en œuvre car aucune modification matériels n'est nécessaire.

Des développements récents ont été réalisés sur l'algorithme embarqué pour permettre le contrôle de composants avec une configuration de contrôle multi-tirs (focalisation multipoints). Les résultats obtenus sur des profils irréguliers montrent les performances de compensation des variations de surfaces et de maîtrise des caractéristiques du faisceau dans le composant (orientation et profondeur de focalisation).

Les performances de détection du traducteur flexible couplées aux outils de reconstruction disponibles dans

CIVA ont montré les capacités à localiser et dimensionner précisément les défauts dans une géométrie 3D.

## Références

- [1] O. Casula, C. Poidevin, G. Cattiaux and Ph. Dumas, "Control of Complex Components with Smart Flexible Phased Arrays", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 25, op. cit. (2006), pp. 829-836.
- [2] L. de Roumilly, P. Bouteille, D. Hamel, A. Lebrun, J. Plu, S. Poutonnet, O. Roy, H. Tretout, H. Voillaume, "Une plateforme pour le CND par multi-éléments en île de France", Journées COFREND, Toulouse 2008, actes publiés en CD-ROM, 2008.