

CONTRÔLE ULTRASONORE DE COMPOSITES AÉRONAUTIQUES AVEC DES RÉSEAUX MATRICIELS 2D

ULTRASOUND TESTING OF AERONAUTICAL COMPOSITE COMPONENTS WITH 2D ARRAYS

ITHURRALDE G. – EADS France Innovation Works - Parc d'Activités Saint Martin du Touch
18, rue Marius Terce - BP 13050 – 31025 Toulouse Cedex 03
Tél. 05 61 16 88 34 – Fax. 05 61 16 88 05
E-mail : guillaume.ithurralde@eads.net

Résumé

Le contrôle des composites aéronautiques constitue un défi permanent, du fait de la complexité grandissante des matériaux et des structures, mais aussi de la croissance vertigineuse des surfaces à balayer. Depuis dix ans, EADS Innovation Works s'est employé à développer les techniques ultrasonores multivoies pour les applications d'Airbus et d'Eurocopter notamment, en étant persuadé qu'elles apportent des solutions extrêmement performantes en termes de cycles.

Cet article présente les dernières avancées dans le domaine, en particulier celles obtenues avec des réseaux multiéléments à découpage matriciel, dont l'intérêt est démontré pour :

- Le suivi de profils de pièces non planes, immergées dans une cuve de contrôle ;
- Le diagnostic sur la porosité via l'atténuation des échos de fond sur les pièces comportant des faces non-parallèles avec une direction et une valeur de pente non constante.

Abstract

The testing of aeronautical composite components is a continuous challenge, because materials and structures get more and more complex, but also because surfaces to scan get more and more important. For ten years, EADS Innovation Works has been developing multichannel techniques for the ultrasound testing of components manufactured by Airbus and Eurocopter in particular, since we are convinced that they are very fast.

This paper presents the latest results obtained with 2D matrix arrays, which are interesting for:

- *Profiles follow-up of non planar components positioned in immersion tanks;*
- *Evaluation of porosity through the attenuation of back wall echoes for components with non parallel faces and changing slopes.*

INTRODUCTION

Les réseaux multiéléments 2D permettent de mettre en œuvre des fonctions évoluées (balayage électronique volumique, focalisation électronique volumique, ...) qui présentent des avantages certains pour le CND.

De nombreux centres de recherche et universités ont conçu des matrices prototypes, modélisé leurs performances, et mené des investigations en laboratoire (cf. [2], [5], [6], [7], [8] & [9]). Mais encore peu d'applications industrielles se sont imposées à ce jour.

Avec la baisse continue des électroniques multivoies et l'apparition de logiciels de pilotage de réseaux 2D (cf. [2], [8], [9] & [10]), cette situation ne perdurera pas, d'autant plus que les fabricants de sondes ont déjà résolu bon nombre de problèmes liés à la connectique, en réalisant des réseaux de 64x64 éléments notamment pour le médical (cf. [10]).

Cet article présente un concept de matrice 2D visant à améliorer le contrôle des structures aéronautiques en composites stratifiés (renforts : nappes ou de tissus de fibres de carbone ; matrice : résine organique) dont les faces ne sont pas parallèles. Il est également adapté aux pièces courbes inspectées par réflexion et sans contact (en immersion ou par jet d'eau) car son fonctionnement offre une bonne tolérance aux écarts de normalité faisceau/pièce.

La première partie rappelle rapidement la problématique actuelle liée à l'inspection des pièces composites aéronautiques. La deuxième présente le réseau 2D, en commençant par les quatre grandes idées à l'origine du concept, le découpage et le fonctionnement retenus, ses avantages et ses inconvénients. Enfin la troisième partie synthétise les essais principaux réalisés en laboratoire avec ce réseau, et les résultats associés.

PROBLEMATIQUE

Courbures et désalignements sonde/pièce

L'aérodynamique impose bien souvent aux aérostructures des formes complexes, notamment des courbures qui, d'un point de vue du contrôle par réflexion ultrasonore sans contact (immersion complète ou jet d'eau), nécessitent des fonctions de suivi de profils précis pour les automates de balayage. Le moindre écart, par rapport à une incidence normale du faisceau émis, induit des déviations de faisceaux aux interfaces d'autant plus importantes que le composite est épais, et la hauteur de colonne d'eau est élevée (cf. moitié gauche de la figure 1). De fait, les échos perçus chutent en amplitude, et peuvent même disparaître du A-scan si l'on préfère utiliser des traducteurs très directifs et/ou ayant une faible ouverture active afin d'obtenir des cartographies résolues.

Pour outrepasser ces problèmes, les techniques au contact, avec immersion locale et tête compliant, sont séduisantes. Mais elles présentent bien souvent d'autres inconvénients : zones mortes sur les contours de pièces, découplage acoustique ou trajectoires complexes dès que les pièces comportent des trous

Faces non parallèles

Par ailleurs, les bureaux d'étude tendent à optimiser les épaisseurs en chaque zone, en fonction des efforts qui y passent, pour réduire la masse des composants. Cela se traduit par des plans de drapage complexes avec des lâchers de plis et des reprises de plis, et au final par des pièces dont les faces ne sont pas parallèles. Ainsi on observe très fréquemment des pentes de 2.5%, voire localement 5%, 10% et 20% (respectivement sur des longueurs de 12mm, 6mm et 3mm). Leur direction varie, souvent progressivement, mais parfois aussi rapidement (comme dans les zones de renfort autour des trous d'homme ou des trappes de servitudes hydrauliques et électriques).

Les ondes réfléchies par le fond sont de fait déviées, d'autant plus que la pente est raide, l'épaisseur du composite est importante, et la hauteur de colonne d'eau est élevée (cf. partie droite de la figure 1). La chute consécutive de l'amplitude des échos de fond pose alors de sérieux problèmes pour évaluer le taux de porosité, dans la mesure où ce diagnostic est justement basé sur l'atténuation des échos de fond.

Combinaisons

La plupart des pièces des derniers aéronefs comportant à la fois des courbures et des faces non parallèles, la problématique actuelle est en fait une combinaison des deux décrites précédemment.

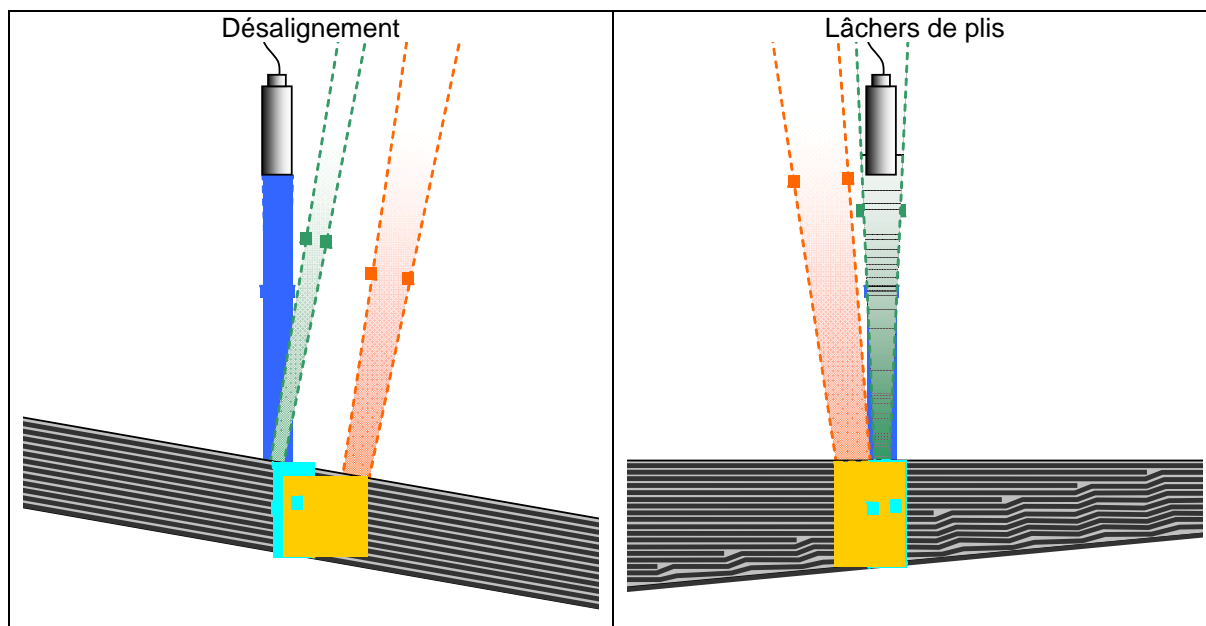


Figure 1 : Déviations des faisceaux acoustiques générés pas un transducteur monolithique directif

RESEAU 2D

A l'origine du concept

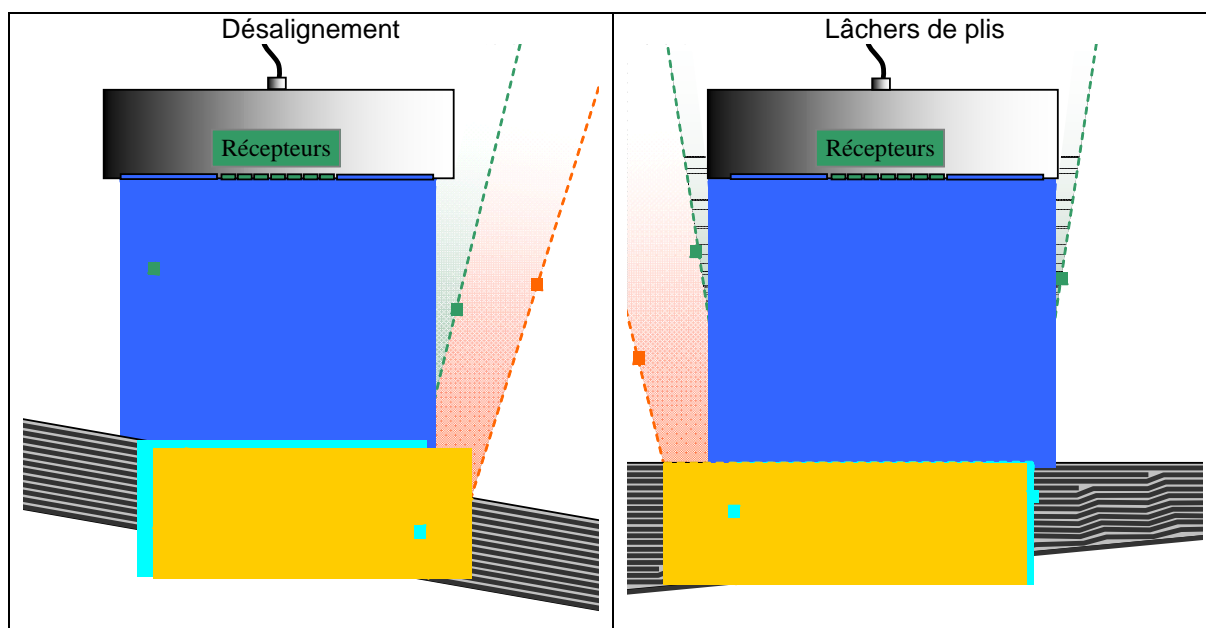


Figure 2 : Solution proposée pour outrepasser la déviation des faisceaux acoustiques avec un réseau

Quatre idées sont à la base du concept d'un réseau 2D adapté à la problématique :

1. La première consiste à générer un faisceau très large, grâce à une ouverture active étendue à l'émission, afin qu'au moins une partie du faisceau réfléchi revienne toujours vers le centre du transducteur (cf. figure 2).
2. La deuxième consiste à concentrer les éléments récepteurs au centre du réseau, et à définir leurs dimensions, en fonction de la fréquence, pour que les fronts d'onde réfléchis légèrement inclinés soient convertis en signaux de façon pas complètement destructive à la surface du piézo.

3. La troisième consiste à minimiser le nombre total d'éléments pour des questions de coûts, à la fois celui du réseau lui-même, mais aussi celui de l'électronique multivoies associée. Ceci amène à élargir les éléments périphériques du réseau qui ne fonctionnent qu'à l'émission.
4. Enfin la dernière consiste à raffiner les éléments périphériques dans une direction donnée afin de permettre le contrôle des grands rayons (cornières, bords tombés, etc.) avec une technique simplifiée de renversement temporel [12] (cf. figure 3).

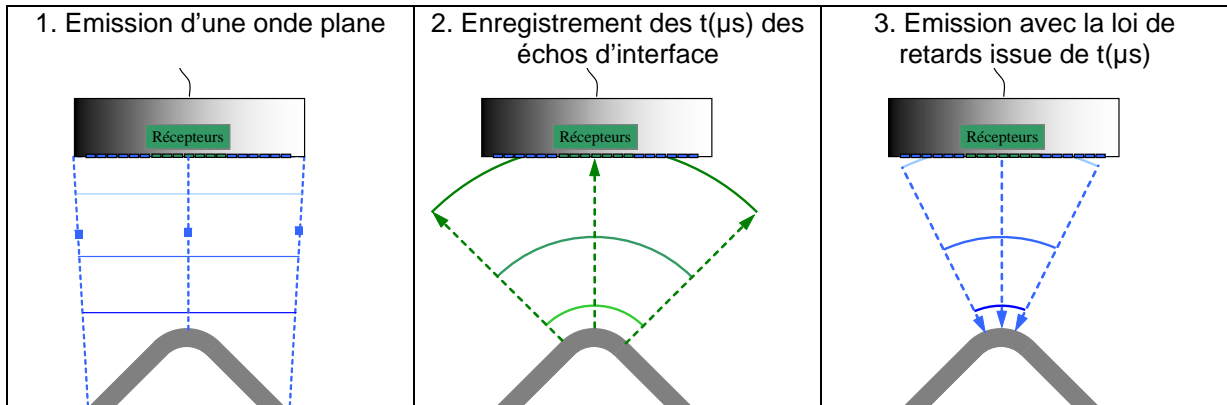


Figure 3 : Principe de la technique simplifiée de renversement temporel appliquée aux rayons

Découpage et fonctionnement

Les quatre idées précédentes ont mené au découpage illustré par la figure 4. Ce réseau 2D est constitué de 63 éléments. Il peut ainsi être piloté par une électronique de 64 voies parallèles (idéalement incluant 64 synchronisation indépendantes pour la correction amplitude distance). A l'émission, tous les éléments sont activés. S'ils sont fabriqués avec le même matériau piezocomposite, une loi d'apodisation en tension peut être nécessaire pour compenser les différences de rendement dues aux différences d'impédance liées aux différences de surface. A la réception en revanche, seuls les 49 éléments carrés (de côté e) du centre sont utilisés.

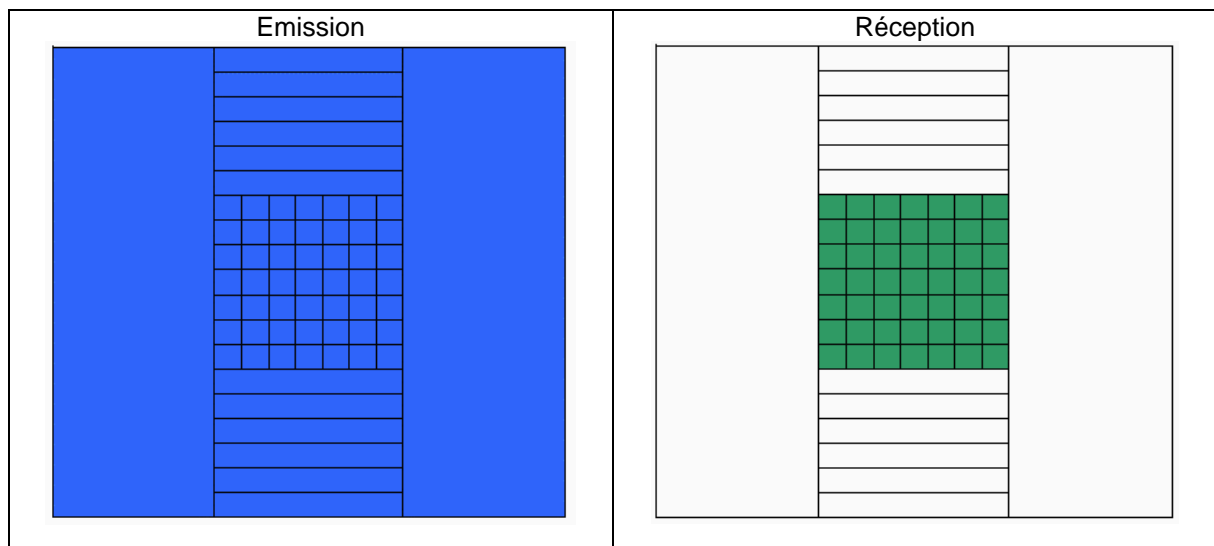


Figure 4 : Découpage du réseau 2D – Eléments actifs à l'émission et à la réception

Avantages

Si aucune sommation n'est réalisée, un tir génère 49 signaux et permet d'inspecter une zone dont la surface correspond à $(7 \times 7 \times e)$ mm². Les pas d'acquisition valent $(7 \times e)$ mm dans les

deux directions (balayage et incrément), ce qui autorise des vitesses de balayage excessivement élevées :

- 20 à 60 fois supérieures par rapport à celles obtenues avec un traducteur monolithique ;
- 2 à 4 fois supérieures par rapport à celles des techniques de balayage électronique classiques avec les électroniques multiplexées, limitées par la fréquence de récurrence des tirs et les échos fantômes.

Ces ratios ont été mesurés dans des conditions industrielles sur une pièce de 15m de long, avec une sonde différente mais un fonctionnement similaire, une électronique de 64 voies et une hauteur de colonne d'eau de 50mm. Ils augmentent avec le nombre de voies de façon quasi-linéaire.

Précisons que l'objectif n'est pas seulement de gagner du cycle sur l'acquisition, car dans certains cas le temps de balayage est déjà faible par rapport à celui nécessaire à la manutention des pièces ou à l'analyse des données. L'intérêt réside surtout dans la possibilité de balayer les pièces aussi vite qu'aujourd'hui, mais avec des éléments récepteurs plus fins, en vue de diagnostiquer plus finement certaines discontinuités qui peuvent passer au travers d'un maillage de 2mm x 2mm : à titre d'exemples citons la porosité isolée et les ondulations de plis.

Inconvénients

En contrepartie de la bonne tolérance aux désorientations des interfaces réfléchissantes, la faible dimension des éléments récepteurs engendre une résolution spatiale relativement pauvre, du moins avec les données brutes.

Si les interfaces réfléchissantes sont bien orientées et/ou si la hauteur de colonne d'eau est importante, des sommations multiples peuvent être réalisées, par exemple sur des ouvertures de (2x2) éléments, pour rendre les ouvertures plus directives en réception. Un tir génère alors un nombre réduit de signaux, en l'occurrence 36, et permet d'inspecter une zone de surface un plus petite, en l'occurrence (6x6xe) mm².

Si non, des techniques de focalisation électronique adaptative par post-traitement 2D sont envisageables. Elles sont basées sur des critères de cohérence spatiotemporelle des pics détectés [11].

ESSAIS ET RESULTATS

Tolérance aux désalignements sonde / pièce

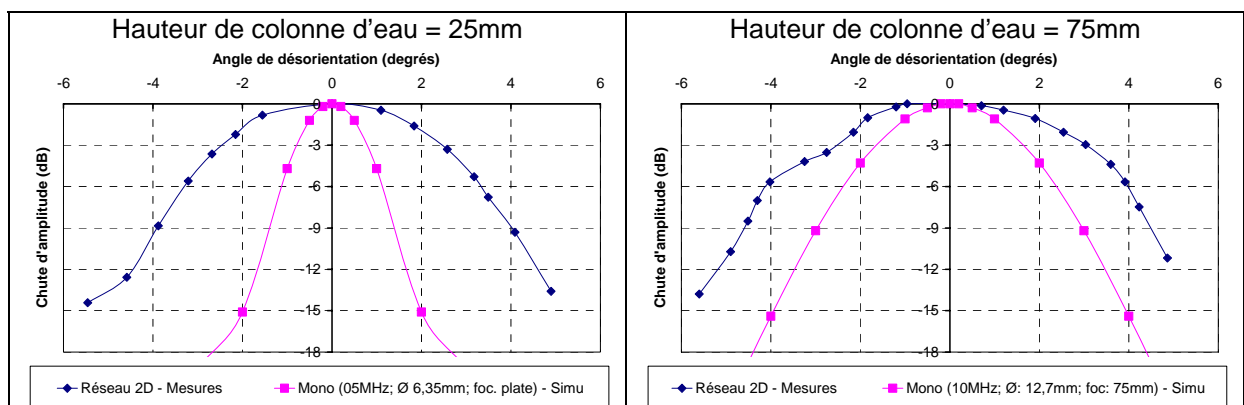


Figure 5 : Graphes traduisant la tolérance aux désalignements sonde / pièce

Les graphes de la figure 5 représentent la chute d'amplitude des échos réfléchis par une interface plane, correspondant à l'entrée des ultrasons dans une plaque, en fonction de l'angle de désalignement de la sonde (0° correspondant à un faisceau parfaitement normal à la pièce). Ils ont été obtenus par mesures et simulation pour deux hauteurs de colonne d'eau et trois transducteurs. Notre réseau 2D montre une tolérance aux désalignements bien supérieure par rapport à deux transducteurs monolithiques directs. Il permet donc de relâcher la précision nécessaire sur le suivi de profils par l'automate de balayage.

Résolution spatiale

Pour commencer à appréhender la résolution spatiale de ce réseau 2D, plusieurs coupes de faisceau ont été réalisées, en réflexion, sur une bille en acier de diamètre 3mm. La figure 6 en donne un aperçu. Le "diamètre" de la tâche focale à -6dB varie entre 3.5mm et 16.0mm selon le nombre d'éléments récepteurs (1R ou 4R) et la hauteur de colonne d'eau (25mm ou 75mm).

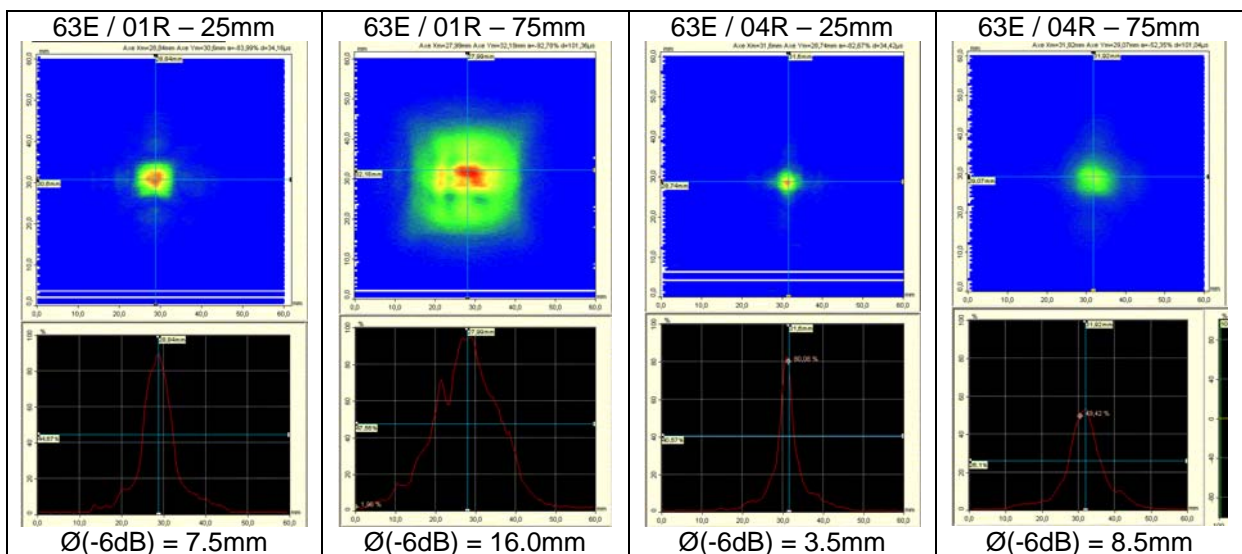


Figure 6 : Coupes de faisceau obtenues en réflexion sur une bille $\text{Ø}3\text{mm}$

Des acquisitions ont par ailleurs été réalisées dans le mode réceptions élémentaires, sur des blocs de référence à gradins dont les épaisseurs sont des multiples de 24 plis de $256\mu\text{m}$. Chacun comporte huit trous à fond plat (TFP) non bouchés, de diamètre compris entre 3mm et 16mm. La hauteur de colonne d'eau valait 25mm. Une correction amplitude distance (DAC) était appliquée pour rendre homogènes les amplitudes des échos de fond autour de 0dB.

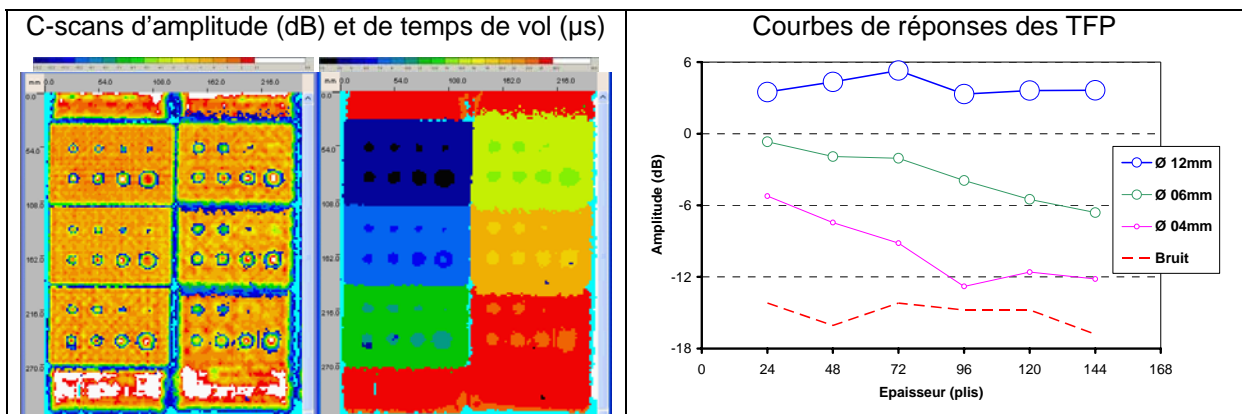


Figure 7 : C-scans des 1ers échos sur les blocs de référence à gradins avec TFP

La figure 7 montre les résultats obtenus. Le plus petit TFP détecté en écho direct quelle que soit l'épaisseur d'un gradin a un diamètre de 4mm. Celui de 3mm aurait été détecté s'il avait été bouché.

Pièces à faces non parallèles

Des acquisitions ont été réalisées avec le réseau 2D sur un bloc de référence comportant une pente usinée de 3.9°. Son épaisseur varie continument de 10 plis à 168 plis de 256µm. Il a été placé à côté des mêmes référentiels à gradins.

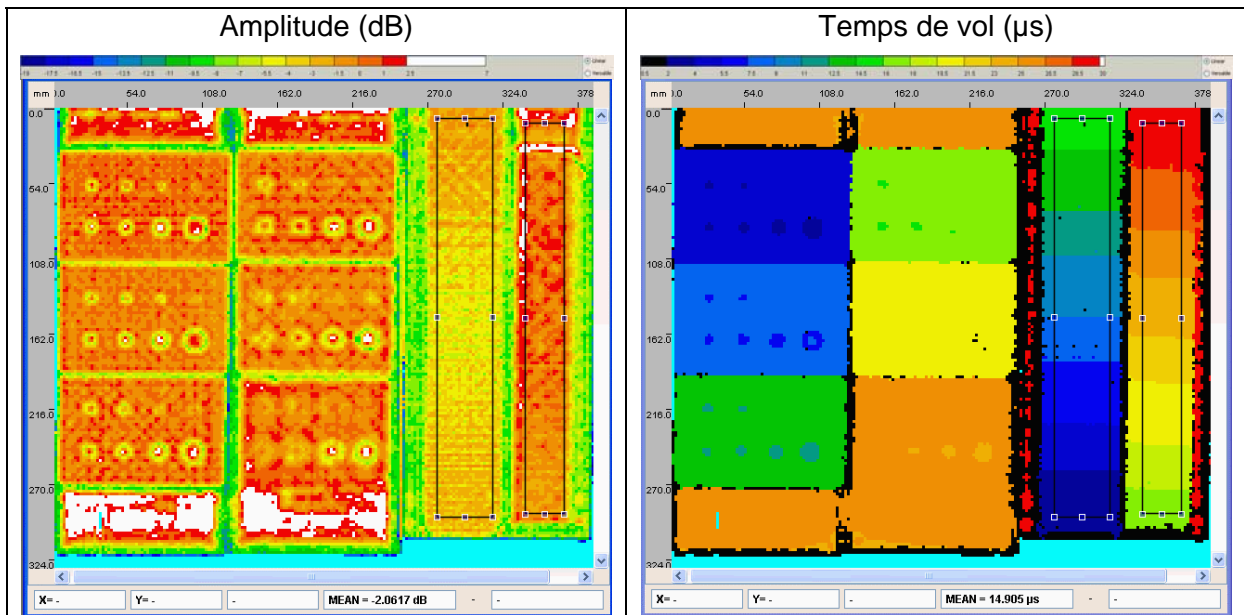


Figure 8 : C-scans des échos max sur les blocs de référence (à gradins et avec pente usinée de 3.9°)

La figure 8 montre les cartographies des échos de discontinuités et de fond résultantes. Le fond pentu réfléchit des échos inférieurs de -2.1dB seulement en moyenne, par rapport aux fonds plans des gradins.

Rayons

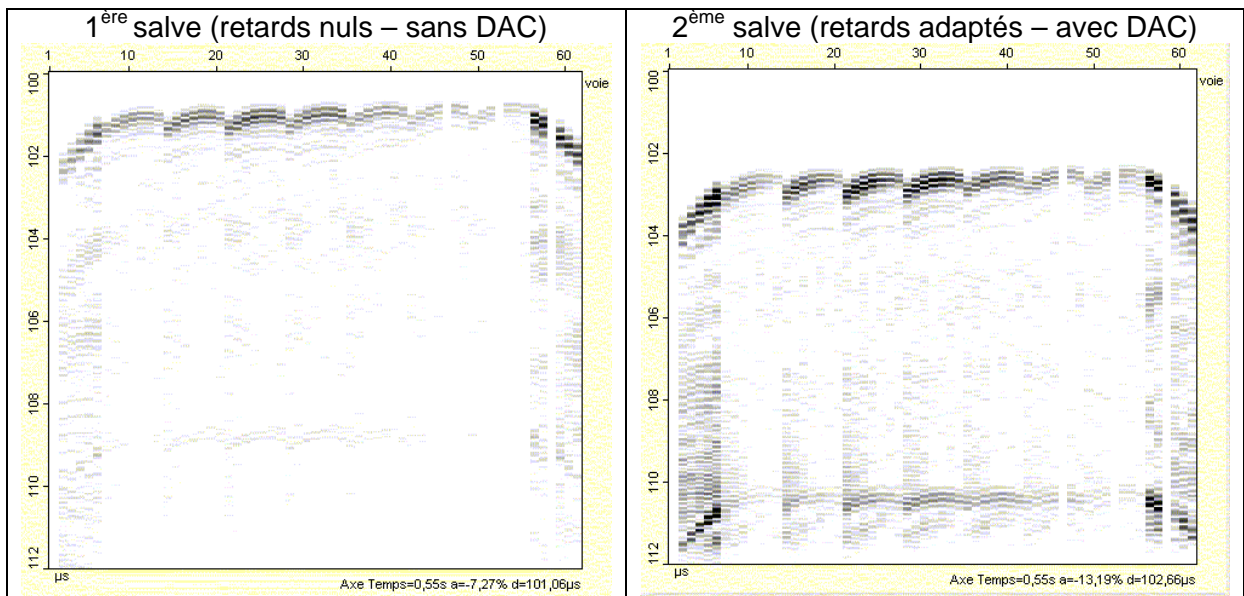


Figure 9 : B-scans acquis par la technique simplifiée de renversement temporel sur un rayon de 28mm

Des acquisitions ont été réalisées avec le réseau 2D sur un rayon de cornière de 28mm, avec une technique simplifiée de renversement temporel.

La figure 9 montre les B-scans obtenus après la première salve de reconnaissance du profil, puis après la seconde salve émise avec la loi de retards adaptée.

CONCLUSIONS

Le contrôle des composites aéronautiques constitue un défi permanent, du fait de la complexité grandissante des matériaux et des structures, mais aussi de la croissance vertigineuse des surfaces à balayer. Pour le relever, EADS Innovation Works a conçu et testé un réseau matriciel 2D spécifique. Son intérêt est quadruple :

- Sa tolérance aux désalignements relâche la précision nécessaire pour le suivi de profils de pièces non planes, immergées dans une cuve de contrôle ;
- Sa capacité à recevoir des échos réfléchis par des interfaces non planes lui confère la possibilité de diagnostiquer la porosité via l'atténuation des échos de fond, sur les pièces comportant des faces non-parallèles, même lorsque la direction et la valeur de la pente varient ;
- Son fonctionnement dans un mode combinant "émission large champ" (i.e. avec tous les éléments) et réceptions élémentaires ou sommations multiples, permet d'atteindre des vitesses de balayage inégalées, ce qui autorise la réduction des pas de balayage, pour une meilleure définition des cartographies ;
- Son découpage donne la possibilité de contrôler les rayons en quelques passes seulement, avec une technique simplifiée de renversement temporel.

Parallèlement à ces travaux de conception de nouveaux capteurs, EADS IW poursuit son effort de spécifications auprès des fournisseurs de systèmes qui acceptent des partenariats "gagnant gagnant", pour faciliter le pilotage des réseaux 2D.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] « Advanced functions of PAUT (phased arrays for ultrasound testing) in aeronautics », Ithurralde G., ECNDT, 2006
- [2] « Balayage électronique 3D pour le contrôle par ultrasons multiéléments de défauts inclinés », Roy O. & Bouhelier M., Journées Cofrend, 2005
- [3] « Design & evaluation of two dimensional phased array ultrasonic transducers », Mondal S.C., Wilcox P.D. & Drinkwater B.W., QNDE, 2005
- [4] « A 3MHz Two Dimensional Array based on Piezocomposite for Medical Imaging », Ratsimandresy L. & al., IEEE Ultrasonics Symposium, 2002
- [5] « Application of different spatial sampling patterns for sparse array transducer design », Nikolov S.I. & Jensen J.A., Ultrasonics 37, 2000
- [6] « 64 Elements two-dimensional piezoelectric array for 3D imaging », Akhnak M., Martinez O., Ullate L.G., Montero de Espinosa F., Ultrasonics 40, 2003
- [7] « Control of complex components with Smart Flexible Phased Arrays », Casula O., Poidevin C., Cattiaux G. & Dumas Ph., Ultrasonics 43, 2006
- [8] « A Conclusive Concept for Three-Dimensional Imaging Based on Efficient Steering and Focusing of an Ultrasonic 2D-Array », Spies M., Rieder H. & al, ECNDT, 2006
- [9] « Ultrasonic testing with matrix arrays - Applications in non-destructive testing », Heckel T., Brekow G. & Mrasek H., ECNDT, 2006
- [10] « Detection of sub wavelength flaws by 64-element matrix phased array, using FlashFocus© instrumentation », Braconnier D., ECNDT, 2006
- [11] « FFAST – Focalisation Auto Adaptative Spatio Temporelle », Coperet P., Journées CND de Beaune, 2005

[12] « Phased Array Application in Industrial Scanning Systems », Maurer A., Haase W., De Odorico W., ECNDT, 2006

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier ses collègues d'AIRBUS France SAS, qui ont sponsorisé les travaux présentés ici et pris à leur charge le dépôt du brevet #FR20060054651.