



## **Source impulsionnelle focalisée pour des mesures ultrasonores sans contact dans l'air**

F. Cohen Tenoudji, D. Busquet et J.-F. Mourey

Institut Jean le Rond d'Alembert CNRS/UPMC, UMR 7190, 2 Place de la Gare de Ceinture, 78210 Saint  
Cyr L'Ecole, France  
fcohenoudji@yahoo.fr

Les sources ultrasonores à étincelle présentent des qualités propices au contrôle non destructif des matériaux dans l'air. Elles sont puissantes, elles génèrent une impulsion acoustique courte dont la bande s'étend de quelques centaines de Hertz à plusieurs centaines de kilohertz. Nous montrons ici qu'en focalisant à l'aide d'un miroir elliptique le front d'onde de symétrie cylindrique généré par l'étincelle, il est possible de concentrer l'énergie acoustique sur la ligne focale image de l'étincelle. On dispose ainsi d'une source virtuelle puissante, de faible dimension, localisable sur la surface du matériau à inspecter. Les performances de cette source pour le contrôle en transmission sans contact de matériaux composites sont évaluées par des mesures sur des échantillons test. La résolution spatiale latérale et la limitation en haute fréquence de cette technique de mesure sont déterminées.

## 1 Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) des matériaux par ultrasons est principalement effectué en plaçant directement les transducteurs au contact des matériaux à inspecter ou en immergeant la pièce à étudier dans l'eau (ou avec un couplage par un jet d'eau). L'eau agit alors comme un milieu de couplage entre les transducteurs et le matériau. La perte d'insertion de l'énergie ultrasonore due à l'inadaptation des impédances acoustiques des transducteurs (généralement des céramiques piézoélectriques de type PZT) et des matériaux généralement étudiés est aisément compensée par la chaîne électronique d'amplification des signaux. Le contrôle par us se fait alors avec un rapport signal sur bruit très satisfaisant.

Dans un nombre restreint de cas, la pièce ne peut être immergée dans l'eau sous peine de son endommagement, ou bien le contact direct du transducteur à la pièce est difficile ou conduit à des mesures fastidieuses, coûteuses en temps et peu fiables. C'est le cas des matériaux légers utilisés dans l'aviation, composites, nids d'abeille...

La solution généralement utilisée est la concentration de l'énergie us par focalisation. Cependant le rapport signal sur bruit reste faible et on perd beaucoup des avantages du CND classique.

La solution alternative proposée ici est d'utiliser une source sonore à étincelle et de concentrer l'énergie sur la pièce à l'aide d'un miroir elliptique. Les exigences à respecter sont un bon pouvoir de discrimination des zones saines et endommagées, une bonne résolution spatiale et temporelle fournie par les fréquences élevées du spectre ultrasonore. Ces différents aspects sont détaillés dans la suite.

## 2 Problème du contrôle par us dans l'air

Pour un contrôle, il est nécessaire de disposer d'une source impulsionnelle générant des fréquences au-delà de 50 kHz. Pour un couple de transducteurs PZT dans l'air, les pertes d'insertion dans l'air sont de 86 dB. Elles résultent de l'énorme différence d'impédance acoustique entre le PZT et l'air.

S'ajoute à cela la perte d'insertion dans la plaque placée dans l'air. Dans la figure 1 on représente à titre d'exemple l'atténuation en fonction de la fréquence à la traversée d'une plaque de PMMA de 3 mm d'épaisseur placée dans l'air.

Pour l'inspection de la plaque de PMMA avec des PZT, l'atténuation minimale due aux pertes d'insertion est ainsi de 140 dB pour les fréquences utilisées en CND.

Il en résulte dans ce cas un très faible rapport signal sur bruit qui nécessite un système de focalisation et un

fonctionnement en bande étroite qui entraîne une perte de résolution temporelle.

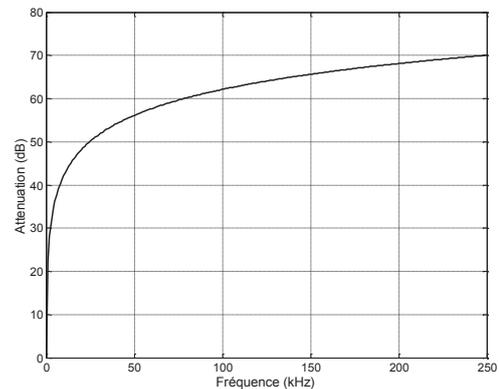


Figure 1: Perte d'insertion pour une plaque de PMMA de 3 mm d'épaisseur placée dans l'air.

## 3 Génération par étincelle et réception par microphone capacitif

### 3.1 Génération par bobine inductive

La solution choisie est d'utiliser une bobine d'allumage de moteur à essence et l'électronique associée [1]. Cette bobine est un autotransformateur dont le primaire est alimenté en continu sur 12V. Lorsque l'alimentation du primaire est coupée brusquement par le circuit rupteur, il apparaît une force électromagnétique induite au secondaire de plusieurs dizaines de milliers de Volts (figure 2). Il en résulte une étincelle brève entre deux électrodes dans le circuit secondaire. L'écart inter électrode utilisé ici est de 1 cm environ. Dans cette situation l'énergie dans l'étincelle est estimée à 1/10 Joule. Les signaux acoustiques ont une large bande allant de l'audio jusqu'à plusieurs centaines de kilohertz, comme il est montré dans la suite.

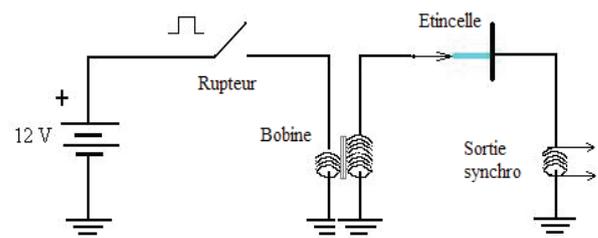


Figure 2 : Alimentation de la bobine et création de l'étincelle.

### 3.2 Miroir elliptique

Son rôle est d'augmenter l'amplitude des signaux acoustiques envoyés dans la pièce. Il utilise la propriété fondamentale de l'ellipse où tous les chemins allant d'un foyer à l'autre après avoir rencontré le périmètre de l'ellipse ont même longueur. Tous les rayons émis en phase en un foyer arrivent en phase au second foyer. Le miroir a une hauteur de 2,5 cm environ. L'axe de l'étincelle est placé au premier foyer de l'ellipse. Le miroir est nécessairement tronqué pour permettre la focalisation sur la surface de la pièce à inspecter. Le second foyer est un peu en avant de la troncature du miroir. La **source virtuelle** ainsi constituée est positionnée sur la surface de la pièce.

La figure 3 représente le miroir avec les paramètres de l'ellipse suivants :  $2a = 6$  cm et une distance inter foyers de 4 cm.



Figure 3 : Miroir elliptique sous deux angles différents.

La figure 4 représente le système de génération de l'étincelle et le miroir. L'axe de l'électrode inférieure constituée par une pointe est placé au premier foyer du miroir.

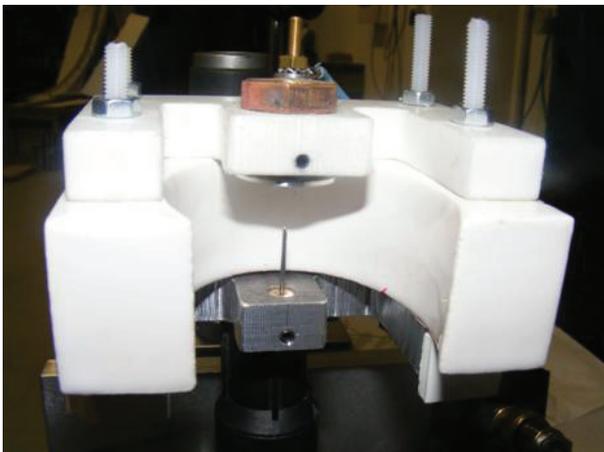


Figure 4 : Positionnement de l'étincelle au premier foyer du miroir.

### 3.3 Propriétés des signaux obtenus

Un microphone capacitif à air dont la surface sensible est une membrane métallisée tendue de polyéthylène d'un diamètre de 5 mm est utilisé à la réception.

Sur la figure 5 on représente à titre d'exemple deux signaux enregistrés par le micro placé à 11,5 cm de l'étincelle. Les traces sont quasiment superposées, ce qui traduit l'excellente stabilité des signaux acoustiques générés par l'étincelle. On pourra augmenter le rapport signal sur bruit par accumulation des signaux sans nuire à

leur contenu spectral. On note principalement 2 impulsions : la première arrivant vers 340 microsecondes est le signal acoustique provenant directement de l'étincelle. Le second signal est retardé de 55 microsecondes environ. Ce signal a une amplitude plus importante car il provient de la source virtuelle située au second foyer, qui est plus proche du micro de 2 cm.

Lorsque la face du micro est positionnée au niveau de la source virtuelle, le gain en amplitude observé du signal provenant de la source virtuelle est de 8 (18 dB) par rapport au signal provenant directement de l'étincelle.

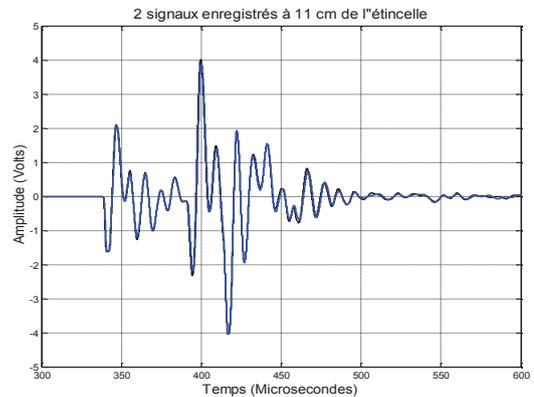


Figure 5 : Deux signaux enregistrés par le micro placé à 11,5 cm de l'étincelle (traces noire et bleue quasiment superposées).

L'analyse spectrale des signaux de tête provenant directement de l'étincelle représentés sur la figure précédente, prouve que l'étincelle est capable de générer des composantes spectrales au delà de 500 kHz et que le micro est capable de les restituer. On établit ainsi la possibilité d'utiliser ce couple de génération et réception pour le CND.

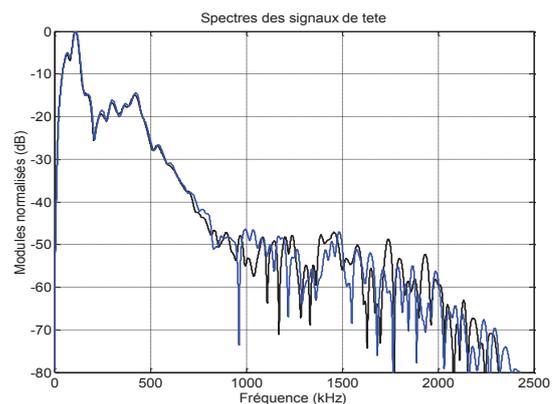


Figure 6 : Amplitude spectrale de deux signaux enregistrés par le micro placé à 11,5 cm de l'étincelle. Les traces se superposent en deçà de 1 MHz. Au delà, le bruit l'emporte.

## 4 Résultats expérimentaux ; Mesures en transmission

### 4.1 Détection d'un défaut de collage de deux plaques de circuit imprimé

Un échantillon test a été fabriqué. Il est constitué de 2 plaques de verre-epoxy utilisées dans la fabrication des circuits imprimés. L'épaisseur de l'une d'entre elles a été réduite sur des bandes parallèles de différentes largeurs. Les plaques sont ensuite collées, les bandes d'épaisseur réduite ne l'étant pas, simulant une délamination d'un matériau lamellaire.

La plaque est positionnée entre l'étincelle et le micro qui est placé à quelques millimètres de la surface. Le balayage est effectué par pas de 1 mm en partant d'une zone collée vers une zone non collée (figure 7). Depuis la position 1,5 cm jusqu'à 2,5 cm, la plaque est collée et les signaux la traversent. Elle ne l'est plus au-delà de la position 2,5 cm. Les signaux ne sont plus transmis de 2,5 à 3 cm. On voit apparaître dans la suite du balayage des signaux dont le retard augmente. Ces signaux apparaissent être les signaux diffractés à travers l'échantillon par le bord de la transition collage-décollage.

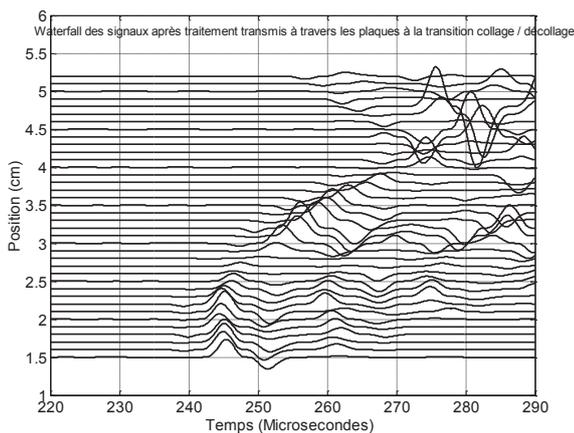


Figure 7 : Waterfall des signaux transmis dans la plaque présentant un défaut de collage.

On peut voir sur la figure 8 un schéma décrivant la situation précédente.

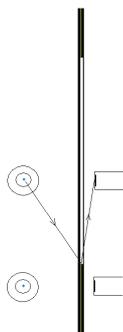


Figure 8 : 2 positions du couple étincelle-micro par rapport à la transition des zones collage-décollage. En bas la transmission est possible à travers la partie collée. Plus haut la transmission à travers la zone décollée étant très faible, les signaux reçus proviennent de la diffraction par

le bord du décollement et sont ainsi retardés. Les flèches matérialisent un rayon diffracté.

### 4.2 Défaut dans un composite Carbone-carbone

La figure 9 présente une éprouvette constituée d'une plaque de composite C-C de 2,5 mm d'épaisseur et présentant un défaut dans sa partie médiane où apparaît un gonflement.

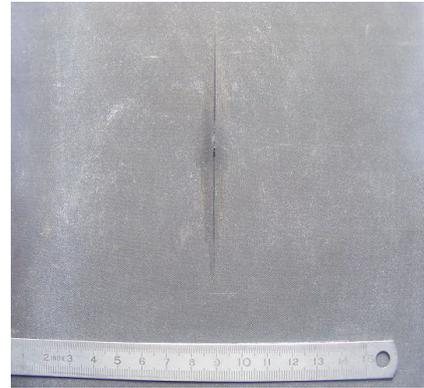


Figure 9 : Epreuve de carbone-carbone présentant un défaut dans sa partie centrale.

La figure 10 représente une ligne de balayage dans l'axe du réglé sur la photo et à 2,5 cm environ du centre du défaut. La délamination se traduit par une perte de signal.

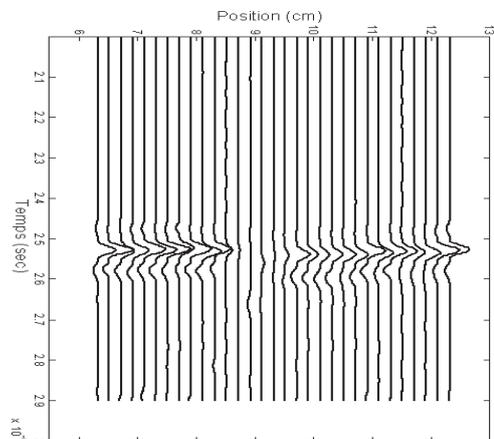


Figure 10 : Waterfall des signaux transmis à travers la plaque de carbone endommagée (pas du balayage 2 mm).

### 4.3 Endommagement d'une plaque composite en nid d'abeille

La figure 11 présente la surface d'un composite en nid d'abeille (épaisseur 14 mm) utilisé en aéronautique comportant un défaut artificiel (zone blanche centrale).

Les résultats du balayage sur une ligne horizontale au pas de 2 mm sont donnés sur la figure 12. La surface d'entrée de l'onde dans la plaque est placée à la position du second foyer de l'ellipse (source virtuelle).

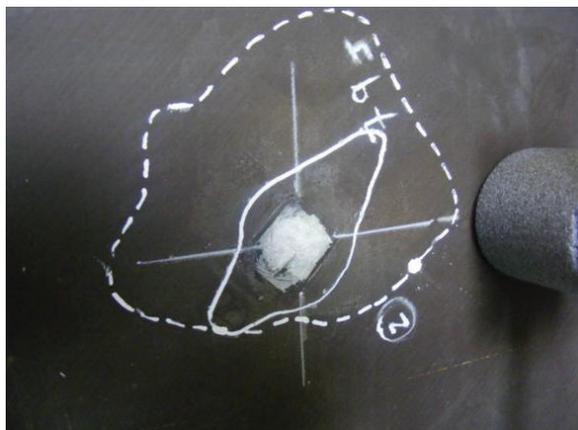


Figure 11 : Photographie d'une plaque nid-d'abeille présentant un endommagement. La ligne blanche horizontale représente la ligne balayée. L'enveloppe du micro apparaît sur la droite de l'image.

L'abscisse choisie dans la représentation est la distance parcourue par l'impulsion ultrasonore dans l'air. Les premiers signaux apparaissant à la distance 4,7 cm proviennent directement de l'étincelle. Les signaux apparaissant 2 cm plus loin sont ceux générés par la source virtuelle. Comme attendu, leur amplitude est nettement plus importante. L'absence de signaux transmis pour les positions du couple émetteur récepteur entre 28 cm et 36 cm correspond à la zone d'endommagement révélée par une méthode classique.

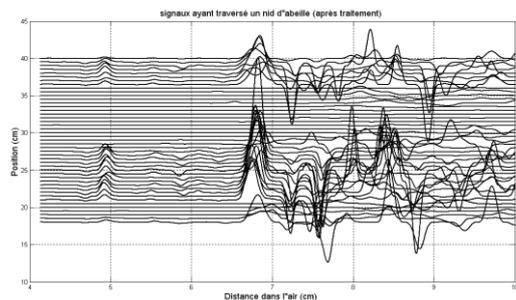


Figure 12 : Waterfall des signaux transmis à travers la plaque de nid d'abeille (pas du balayage 2 mm).

La figure suivante représente les résultats du même balayage avec un gain vertical moins important. On voit principalement les signaux apparaissant pour une distance parcourue de 6,5 cm provenant de la source virtuelle. L'absence de signaux pour les positions autour de 30 cm révèle bien aussi la présence du défaut. La focalisation par le miroir apporte un gain notable sur l'amplitude des signaux. Les avantages de la localisation de la source virtuelle sur la surface de la pièce restent à préciser.

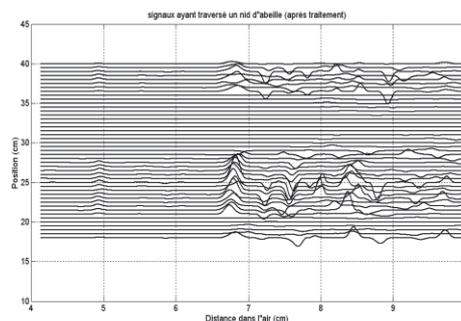


Figure 13 : Waterfall des signaux transmis à travers la plaque de nid d'abeille (pas du balayage 2 mm ; Gain vertical des signaux inférieur à celui de la figure 12).

## 5 Conclusion

La génération d'impulsions soniques par étincelle et la réception par microphone capacitif apparaissent comme une alternative possible aux méthodes classiques de CND par ultrasons dans l'air. La largeur de bande élevée des signaux permet de travailler en régime purement impulsif. Le gain apporté par l'utilisation d'un miroir elliptique peut s'avérer précieux dans les cas où les pertes d'insertion dans la pièce et l'atténuation dans le matériau sont élevées. Il est à souligner que le positionnement de la pièce dans le champ ultrasonore est aisé et que cette technique peut être aisément adaptée pour des mesures in situ.

## Remerciements

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre d'une collaboration avec Airbus Group Innovations.

## Références

- [1] F. Cohen Tenoudji, V. Dewailly, J.F. Mourey, J.P. Frangi et G. Théron, Ultrasonic Tomography ; Application to the Visualization of Air Flow, IEEE 50<sup>th</sup> Conference in UFFC, Montreal, August 2004