Tomographie passive des ondes acoustiques Prédiction et identification à partir du bruit ambiant

O. Chaouch, K. Raoof, M. Chekroun et L. Simon
LAUM UMR CNRS 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France
olfa.chaouch.etu@univ-lemans.fr

Le but de ce travail consiste à détecter des anomalies ou des défauts, à partir de la réponse de la structure lorsque celle-ci est sollicitée par un bruit ambiant, qui joue donc ici le rôle de la source d'excitation (non contrôlée).L'analyse des signaux issus du réseau de capteurs positionnés sur la structure permet de lier l'apparition d'événements et le défaut. Parmi les méthodes testées, existe celle qui consiste à estimer la fonction d'inter-corrélation entre chaque paire de capteurs du réseau. Néanmoins, il reste à vérifier de manière systématique que la fonction d'inter-corrélation est reproductible et que le changement de celle-ci est bien indépendant de la méthode aléatoire d'excitation. Une expérience sur une plaque d'aluminium est réalisée pour la validation de cette méthode de contrôle passif.

1 Introduction

La dégradation au cours du temps des constructions du génie civil, de l'aéronautique, ou du secteur automobile est un problème majeur pouvant causer des accidents graves.

Cette dégradation, qu'elle soit liée aux propriétés mécaniques, physiques ou chimiques du matériau a plusieurs origines (intérieures et extérieures), et il est indispensable de pouvoir suivre et de contrôler les structures afin d'en assurer la sécurité.

De nombreuses études ont montré le potentiel d'extraction d'informations d'un milieu donné par l'exploitation du bruit ambiant naturel présent dans ce milieu. En particulier, les structures aéronautiques sont de bons candidats pour une telle application, car elles sont soumises à des sources de bruit acoustique intenses pendant les vols.

Dans cet article, on s'intéresse aux techniques de corrélations pour le contrôle non destructif en mode passif. Un état d'art sur ces techniques sera fait en première partie ensuite, à l'aide d'une expérience académique en laboratoire, nous allons vérifier l'efficacité de ces techniques.

2 État de l'art sur les techniques de corrélations pour le SHM passif

Si on mesure un champ d'ondes diffus en deux points arbitraires dans l'espace, l'inter-corrélation des deux signaux de mesure fournit les mêmes informations qu'une configuration source en un point/récepteur en l'autre point. Ainsi, par simple écoute passive du bruit ambiant et par l'application d'une corrélation, on obtient les mêmes informations que celles obtenues dans une expérience contrôlée à l'aide d'une source impulsive. Dans le cas du bruit ambiant, on parle donc de source virtuelle [1].

Théoriquement, en présence d'un champ parfaitement diffus (uniformité spatiale et temporelle), il est possible d'estimer la fonction d'inter-corrélation des signaux reçus simultanément à ces points [2,3]. Ce principe a été récemment appliqué au SHM [4].

L'un des points faibles des techniques de corrélation de bruit ambiant est leur extrême sensibilité aux conditions réelles acoustiques. Si, dans le cas d'un champ parfaitement diffus, les fonctions de corrélation ne dépendent que des propriétés structurelles du milieu, dans d'autres cas, les corrélations sont influencées par les caractéristiques des sources acoustiques, qui peuvent fluctuer d'une mesure à l'autre. Dans d'autres travaux, ce problème spécifique est généralement contourné, soit en contrôlant les sources acoustiques, soit en augmentant artificiellement le caractère diffus du champ [5].

À noter que seul un faible nombre d'études récentes [6] ont directement mis l'accent sur la nature non diffuse du champ.

En particulier, l'utilisation d'une "référence" capteur a été proposée [7,8] afin d'identifier les caractéristiques des sources acoustiques, à l'instant de la mesure. Cette solution est inspirée par la technique de localisation d'impact basée sur une chaine de retournement temporel [9].

3 Travail expérimental

3.1 Description de l'expérience

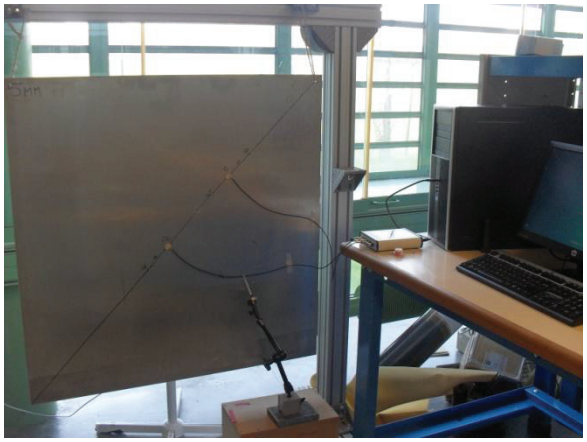

Figure 1 : Photo de l'expérience en cours

Nous avons monté une expérience (voir figure 1) sur une plaque d'aluminium de dimensions 1 m*1 m et d'épaisseur de 5 mm suspendue à un support avec deux fils, la plaque est instrumentée par 3 pastilles piézoélectriques PZ27 de diamètre 20 mm et d'épaisseur 2mm.

Nous excitons la plaque avec un marteau d'impact, cette source est activée manuellement, avec acquisition à partir d'un seuil de déclanchement de 10 N, pour avoir des signaux synchrones. Chaque acquisition dure 500 ms, et se fait avec un système d'acquisition 24 bits, ayant une fréquence d'échantillonnage de 102,4 KHz.

Au lieu de générer un défaut dans la plaque, ce qui peut s'avérer compliquée et irréversible, nous allons coller avec de la pate une pièce en aluminium rectangulaire 27*35*2 mm, sur celle-ci, ainsi nous pouvons changer la position et même la taille du défaut et voir son effet sur les signaux.

3.2 Traitement des signaux

Les signaux acquis par les différents capteurs sont moyennées, puis filtrés par un filtre RIF passe haut avec une fréquence de coupure de 3 KHz, pour éliminer les résonances de la plaque sur ses modes propres.

La figure 2 montre l'allure des signaux temporels acquis. En haut le signal source et en bas le signal acquis par le capteur.

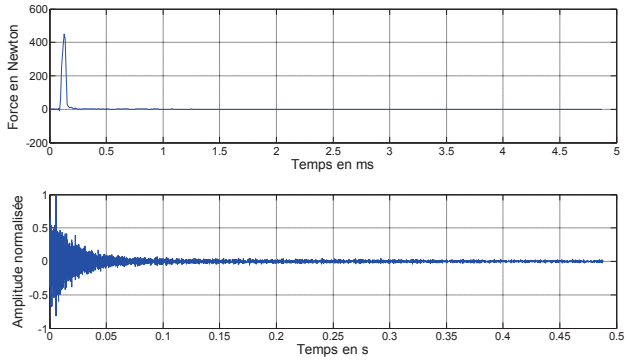

Figure 2 : Allure des signaux acquis

Puisque chaque signal est normalisé avant le filtrage, nous éliminons plusieurs effets indésirables qui sont :

- Les atténuations en amplitude dues aux distances entre les capteurs
- La non reproductibilité de la source en amplitude.

Par la suite, nous procédons à une estimation baisée de la fonction d'inter-corrélation entre deux capteurs récepteurs (entre deux points A et B de la plaque). Cette fonction est donnée par l'Eq. (1)

$$\hat{R}_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} \; y_n^* \qquad (1)$$

Où x et y sont respectivement les signaux acquis par le récepteur en A et le récepteur en B, et $\hat{R}_{xy}$ est l'estimation de la fonction d'inter-corrélation.

Nous allons montrer dans le paragraphe suivant la reproductibilité de cette estimation.

4 Reproductibilité de la fonction d'inter-corrélation

Si on veut exploiter la fonction d'inter-corrélation pour détecter l'existence d'un défaut, il faut que celle-ci dépende uniquement de l'intégrité de la structure. Autrement dit, pour différentes mesures faites dans les mêmes conditions, nous devons obtenir la même fonction d'inter-corrélation en dépit de la nature non reproductible de la source.

En répétant plusieurs fois la même mesure dans les mêmes conditions, nous traçons pour chaque acquisition les courbes d'inter-corrélation entre deux récepteurs.

La fonction d'inter-corrélation est bien reproductible sur la partie du signal représentée en figure 3 et c'est pareil sur la totalité de signal d'inter-corrélation.

Il reste à vérifier si la fonction d'inter-corrélation est sensible au défaut.

Par la suite, un indicateur chiffré sera donné pour mesurer la différence entre les courbes d'inter-corrélation.

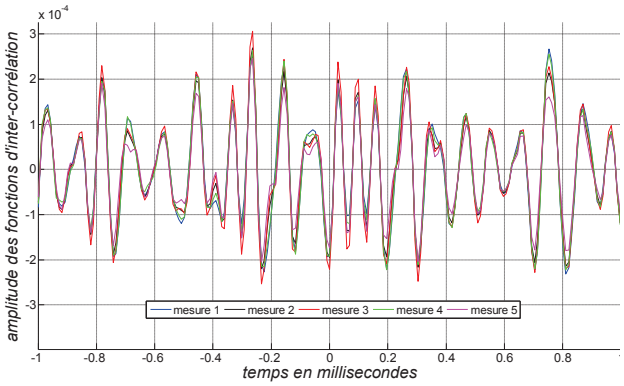

Figure 3 : Reproductibilité de la fonction d'inter-corrélation pour plusieurs mesures

5 Sensibilité de la fonction d'inter-corrélation au défaut

Dans cette partie, nous allons voir si la fonction d'inter-corrélation est sensible à l'apparition d'un défaut, pour cela nous avons réalisé deux mesures. La première mesure consiste à faire 5 acquisitions sur une plaque considérée saine, et dans la deuxième mesure nous avons refait 5 acquisitions sous les mêmes conditions (même position de source) mais avec l'ajout de défaut (voir figure 4).

Le défaut ici étant un rectangle en aluminium qu'on place tantôt entre C1 et C3, tantôt entre C1 et C2

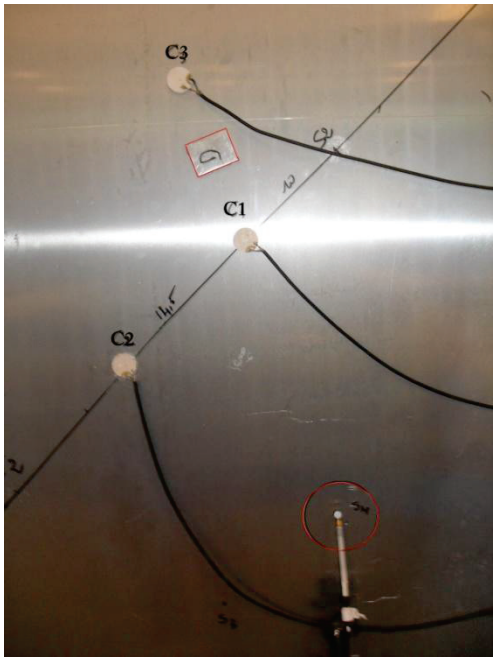

Figure 4 : Image montrant l'emplacement des capteurs sur la plaque, la position de la source (entouré par un cercle) ainsi que le défaut D (rectangle rouge)

Pour obtenir une bonne estimation de la fonction d'inter-corrélations, nous moyennons sur 5 acquisitions.

Les fonctions d'inter-corrélation obtenues entre les signaux en C1 et C3, avec et sans défaut sont présentées dans la figure 5.

La courbe bleue de la figure 5 correspond à une mesure faite sans défaut, tandis que la courbe rouge est une mesure avec défaut, les deux courbes sont parfaitement en phase.

Nous remarquons sur l'ensemble des signaux d'inter-corrélation une diminution de l'amplitude en présence d'un défaut. Pour que le lecteur puisse voir ceci nous avons présenté un zoom dans la figure 5.

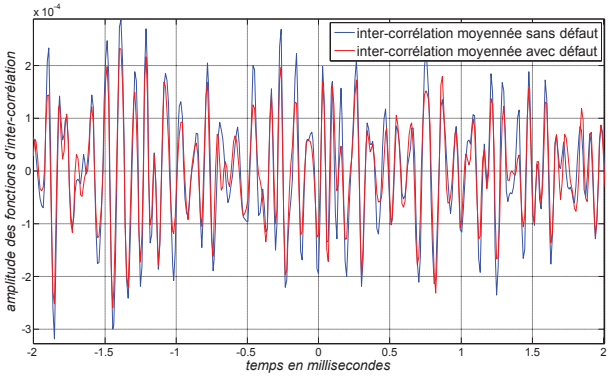

Figure 5 : Sensibilité de la fonction d'inter-corrélation à l'apparition d'un défaut

Néanmoins, il est un peu difficile de remarquer la différence entre les signaux d'inter-corrélation sur la totalité du signal, d'où la nécessité de trouver un autre critère de comparaison.

5.1 Proposition d'un critère visuel de comparaison

Vu que le défaut agit sur l'amplitude de signal d'inter-corrélation, nous avons eu l'idée de tracer l'enveloppe des signaux d'inter-corrélation et de s'en servir comme critère de comparaison et d'identification de défaut.

Nous avons choisi d'utiliser la transformée de Hilbert pour déterminer l'enveloppe de nos signaux

On note *x(t)* le signal analysé, dont on veut extraire l'enveloppe. Cette enveloppe est égale au module du signal analytique associé à *x(t)*. Le signal analytique est un signal complexe ayant comme partie réelle le signal *x(t)* et comme partie imaginaire sa transformée de Hilbert.

La définition mathématique de la transformée de Hilbert est la suivante :

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi}\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t).\frac{1}{(t-\tau)}.d\tau\right] \quad (2)$$

Le signal analytique associé est :

$$Z(t)=x(t)+j\,\hat{x}(t) \quad (3)$$

L'enveloppe est définie ainsi :

$$e(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (4)$$

Nous appliquons un filtre passe bas de type Butterworth d'ordre 2, avec une fréquence de coupure 510 Hz sur les enveloppes afin de les lisser.

Pour voir l'efficacité de ce critère, nous devons nous assurer de sa reproductibilité. Nous avons tracé l'enveloppe filtrée de deux fonctions d'inter-corrélation obtenues par moyennage sur 5 acquisitions sous les mêmes conditions. La figure 6 montre les enveloppes filtrées obtenues pour les deux mesures, nous remarquons une bonne ressemblance entre les enveloppes et nous constatons aussi que l'on pourrait observer cela sur une large tranche du signal (100 ms), contrairement à nos observations sur les fonctions d'inter-corrélations (4 ms).

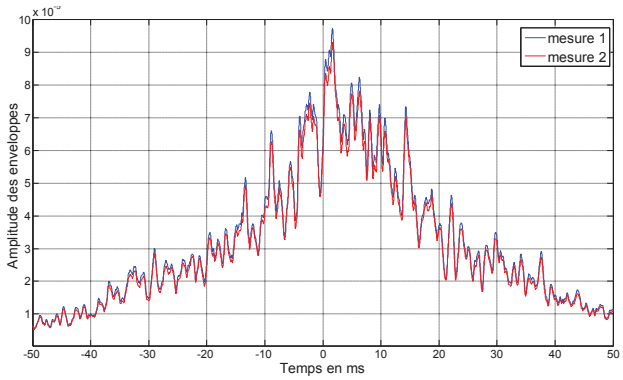

Figure 6 : Enveloppes des fonctions d'inter-corrélation pour 2 mesures identiques sans défaut

Dans la figure 7 nous illustrons l'influence de la présence d'un défaut sur ce nouveau critère. Comme attendu, le critère de comparaison nous montre une diminution de l'amplitude d'inter-corrélation en présence d'un défaut.

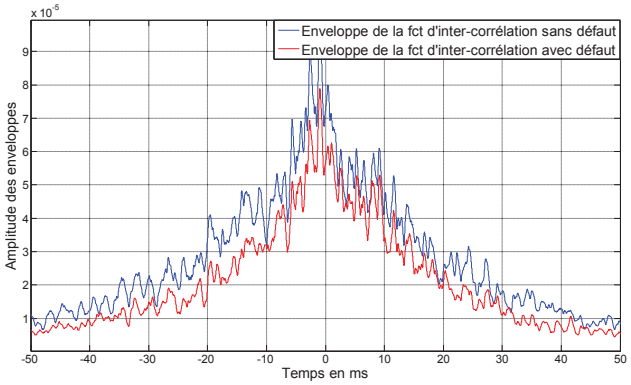

Figure 7 : Sensibilité du critère enveloppe à l'apparition de défaut

6 Sensibilité au changement de la position de la source

Nous allons nous intéresser à l'effet du changement de position de la source sur le critère proposé. Il est très important de pouvoir distinguer des variations provenant d'un défaut à celles issues d'un changement de position de source.

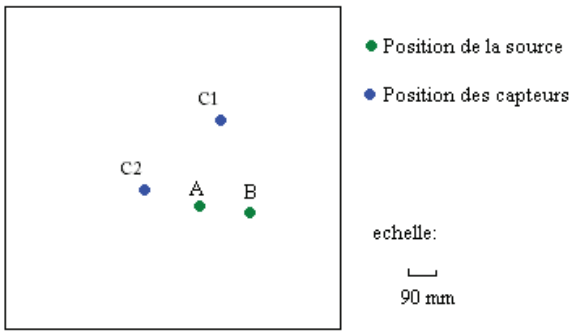

Figure 8 : Emplacement des sources sur la plaque

Deux mesures sans défaut sont faites pour deux positions de source différentes A et B (voir figure 8).

Les courbes d'inter-corrélation correspondant à deux positions de source sont totalement différentes en phase et en amplitude (voir figure 9).

Nous rappelons que pour avoir le critère d'identification de défaut, les signaux acquis sont moyennés, filtrés, ensuite la fonction d'inter-corrélation entre le capteur C1 et C2 est calculée, moyennée, et à la fin l'enveloppe est calculée avec la transformée de Hilbert et lissée avec un filtre passe bas.

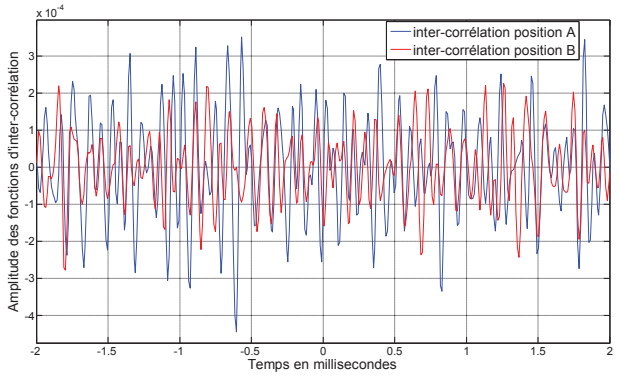

Figure 9 : Influence du changement de la position de source (quelques centimètres) sur la fonction d'inter-corrélation

Quand nous regardons (figure 10) le comportement du critère correspondant aux inter-corrélations de la figure 9, nous constatons que le changement de la position de source influence les inter-corrélations. La variation est du même ordre de grandeur (voire pire) que lors d'un défaut.

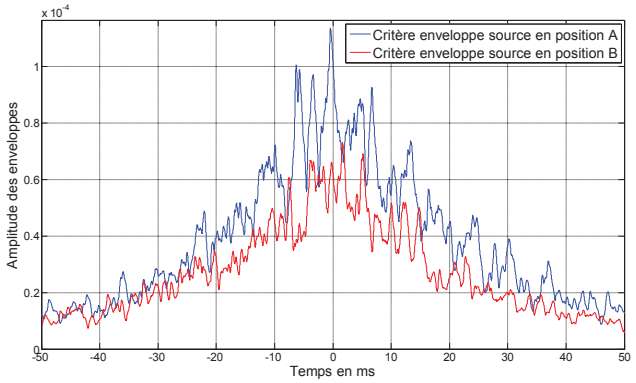

Figure 10 : Influence du changement de la position de source (quelques centimètres) sur le critère enveloppe

Nous avons vu qu'un changement de la position de la source de l'ordre de quelques centimètres à une grande influence sur les fonctions d'inter-corrélation, qu'en est-il alors d'un changement de l'ordre de quelques millimètres ?

Pour le savoir, nous avons fait d'autres mesures.

La figure 11 montre le résultat pour ce changement, les courbes se ressemblent un peu mais pas parfaitement, l'influence est moins importante que celle observée précédemment. Et en particulier, cette différence est moins importante que celle observée lors de la présence d'un défaut.

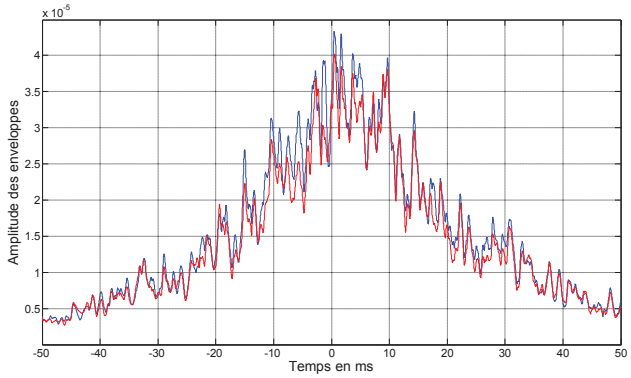

Figure 11 : Influence du changement de la position de source (quelques millimètres) sur le critère enveloppe

Vu l'importante influence de la source sur la fonction d'inter-corrélation, nous allons essayer de trouver un critère numérique pour quantifier cette influence.

7 Proposition d'un critère numérique

Il n'est pas évident de mesurer visuellement la ressemblance entre les enveloppes filtrées des fonctions d'inter-corrélation, pour cela, nous proposons un critère numérique que nous allons appeler critère enveloppe d'inter-corrélation CEI.

Si on nomme $e_i(t)$, l'enveloppe normalisée en amplitude correspondante à une configuration i, CEI sera donnée par l'équation (5).

$$CEI = \frac{100}{N} \sum_N \left| e_i(t) - e_j(t) \right| \qquad (5)$$

N étant le nombre de points de l'enveloppe filtrée.

Dans la figure 12, nous montrons la disposition des 3 capteurs C1, C2 et C3, ainsi que les emplacements de la source sur la plaque. Les Carreaux rouges indiquent l'endroit où nous avons placé à chaque fois le défaut.

Nous allons essayer 3 type de défauts, le défaut A et une grande pastille de diamètre 35mm en acier, c'est le plus lourd et le plus grand des défauts, le défaut B est le rectangle en aluminium en figure 4, et le défaut C le plus petit consiste à une petite pastille en aluminium avec 15 mm de diamètre.

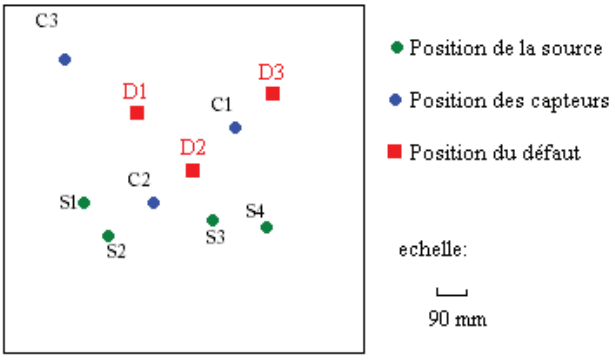

Figure 12 : Disposition des capteurs, et emplacement des sources et défauts sur la plaque

Nous avons fait plusieurs mesures, ou nous changeons à chaque fois la position de la source, la position du défaut et/ou le type de défaut. Nous avons calculé le CEI

correspondant à chaque configuration de mesure, et nous avons résumé tout cela dans le tableau 1.

CEI12 correspond au critère calculé à partir des fonctions d'inter-corrélation entre les capteurs C1 et C2, tandis que CEI13 correspond aux capteurs C1 et C3.

Tableau 1: Valeurs des CEI pour différentes configurations

Position source	Position défaut	Type défaut	CEI12	CEI13
S1	D1	A	1,02	0,69
S1	D1	B	0,85	0,80
S4	D2	C	0,36	-
S4	D3	C	0,49	-
S3 S4	-	-	1,23	-
S2 S4	-	-	1,97	-

Dans la première ligne du tableau 1, nous constatons deux choses importantes, premièrement le CEI augmente quand la taille du défaut est plus grande, deuxièmement lorsque la distance capteurs/défaut diminue le CEI augmente. CEI12 correspondant aux inter-corrélations entre les capteurs C1 et C2, qui sont plus proches de défaut, est supérieur au CEI13 correspondant aux capteurs C1 et C3, qui le sont moins.

La seconde ligne du tableau, nous donne une idée sur l'influence de l'emplacement du défaut sur le CEI, nous remarquons que plus le défaut est loin de la source plus le critère est grand, de plus, vu que nous utilisons dans cette ligne le défaut le plus petit nous avons les valeurs de CEI les plus faibles, d'où la possibilité que ce critère puisse nous donner une information sur la traille du défaut.

Nous allons regarder maintenant le comportement du critère face à un changement de position de source (sans mettre de défaut).

Le CEI à des valeurs plus élevées que celles observées avec le défaut le plus grand que nous avons utilisé. D'autre part, plus la distance entre les 2 sources est grande, plus grand est le CEI, 1,23 pour une distance de 10 cm et 1,97 pour une distance d'à peu prés 35 cm.

Les valeurs de CEI trouvés sont prometteuses, nous avons trouvé que ce critère est non seulement influencé par la taille du défaut, mais aussi par la distance séparant le défaut des capteurs.

Notre critère est aussi influencé par la position de la source, mais avec des valeurs plus grandes, il va falloir faire plus de mesures pour vérifier les performances de ce critère.

8 Conclusion et perspectives

Les résultats présentés dans ce papier montrent l'intérêt d'exploiter encore les techniques de corrélations pour le SHM passif. Nous avons montré que la fonction d'inter-corrélation est non seulement reproductible mais aussi sensible aux défauts. L'inconvénient de cette méthode est sa sensibilité à l'emplacement de la source.

Un critère visuel pour l'identification des défauts a été proposé, il s'agit d'une enveloppe filtrée de la fonction d'inter-corrélation obtenue par transformée de Hilbert. Nous avons aussi proposé un critère numérique, obtenu à partir du critère visuel, que nous avons appelé CEI. Les premières mesures effectuées ont permis de tester en partie les performances de ce critère numérique. Néanmoins, nous devons tester encore plusieurs configurations de mesure pour vérifier les capacités du CEI.

En perspectives de ces travaux, nous voulons trouver une solution pour palier le problème de l'influence de la position de sources sur les fonctions d'inter-corrélations. Il faudra aussi trouver comment simuler un bruit ambiant.

Les performances des critères proposés doivent être testées avec d'autres types de sources, et nous espérons qu'avec un réseau de capteurs plus large, ces critères vont nous permettre de localiser le défaut.

Références

[1] R. Sneider, K. Wapenaar, Imaging with ambient noise, American Institute of Physics, *Physics today* **44**, (September 2010).

[2] O. Lobkis, R. Weaver, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am*. **110**, 3011 (2001).

[3] R. Weaver and O. Lobkis, Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 2731 (2004).

[4] E. Moulin, N. Abou Leyla, J. Assaad, and S. Grondel, Applicability of acoustic noise correlation to Structural Health Monitoring in non-diffuse field conditions, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 094104 (2009).

[5] K. Sabra, E. Winkel, D. Bourgoyne, B. Elbing, S. Ceccio, M. Perlin, and D. Dowling, Using cross correlations of turbulent flow-induced ambient vibrations to estimate the structural impulse response. Application to structural health monitoring, *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 1987 (2007).

[6] C. Hadziioannou, E. Larose, O. Coutant, P. Roux, and M. Campillo, *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 3688 (2009).

[7] N. Abou Leyla, E. Moulin, J. Assaad, S. Grondel, and P. Poussot, in Program abstracts Acoustics'08, *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 3698 (2008).

[8] N. Abou Leyla, E. Moulin, And J. Assaad, Influence of a localized defect on acoustic field correlation in a reverberant medium, American Institute of Physics, *Journal of Applied Physics* **110**, 084906 (2011)

[9] G. Ribay, S. Catheline, D. Clorennec, R. K. Ing, N. Quieffin, and M. Fink, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54**, 378 (2007).