

EXTRACTION DES FONCTIONS DE GREEN PAR CORRÉLATION DE BRUIT: APPLICATION POUR LA DÉTECTION ET L'IMAGERIE DE DÉFAUT DANS DES PLAQUES MINCES RÉVERBÉRANTES

L. Chehami^{1,2}, E. Moulin¹, J. Assaad¹, J. de Rosny², C. Prada², F. Benmeddour¹
et H. Achdjian¹

¹ IEMN UMR CNRS 8520, Université de Valenciennes, F-59313 Valenciennes, France

² ESPCI ParisTech, PSL Research University, UMR CNRS 7587, institut Langevin, 1 rue
Jussieu, F-75005 Paris, France

lynda.chehami@univ-valenciennes.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est d'illustrer l'apport du CSI (contrôle santé intégré) passif pour la détection et la localisation de défauts in situ, dans des structures minces réverbérantes. La méthode que nous proposons s'inspire des travaux sur l'extraction des fonctions de Green par corrélation de bruit acoustique. Un ensemble de sources sont disposées aléatoirement à la surface de l'échantillon et émettent entre [20-40] kHz. Les ondes élastiques ainsi générées dites de 'flexion' sont dominantes. Un réseau de transducteurs piézoélectriques collecte les données et permet ainsi d'estimer la matrice de corrélation inter-éléments. La signature acoustique du défaut apparaît clairement sur la différence des matrices de corrélations acquises sur la plaque saine et endommagée. Pour localiser le défaut, la matrice différentielle ainsi obtenue est injectée dans un algorithme de formation de voies. En dépit de la reconstruction infidèle des réponses impulsionnelles, la technique proposée s'avère comparable aux méthodes actives 'pulse-écho' avec une très bonne résolution (limite de diffraction). Enfin, nous montrons qu'un filtrage DORT (décomposition de l'opérateur de retournement temporel) sur la matrice différentielle peut améliorer la détection.

Mots-clés: détection de défaut, SHM passif, corrélation de bruit, ondes de Lamb

ABSTRACT

The aim of this paper is to illustrate an original passive SHM technique for detecting and locating defects in thin reverberating plates. The proposed method is based on the extraction of the Green's functions from acoustic noise correlation. A set of sources are picked at random on the specimen surface. In the considered frequency range [20-40] kHz, the flexural elastic waves were preferentially generated. A piezoelectric transducer array collected data and allows estimating the correlation matrix. The acoustic signature of the defect appeared clearly on the difference between the correlation matrices acquired on the healthy and the damaged plate. To locate the defect, the differential matrix thus obtained is then beamformed. Despite the imperfect Green's function reconstruction, the proposed

technique was comparable to active 'pulse-echo' methods with a very good resolution (diffraction limit). Finally, applying the TROD filtering (Time Reversal Operator Decomposition) on the differential matrix improved the localization images.

Keywords: defect detection, passive SHM, noise correlation, Lamb waves

INTRODUCTION

À l'inverse des méthodes d'évaluation actives dites 'pitch-catch' gourmandes en énergie et sollicitant un grand nombre de capteurs (Ihn & Chang, 2008), des travaux théoriques et expérimentaux ont montré le potentiel prometteur d'une technique acoustique économique purement passive, fondée sur l'approche de corrélation de bruit ambiant. Cette idée qu'on qualifie de 'smart' a été introduite en héliosismologie par (Duvall *et al.*, 1993) pour l'imagerie du soleil. Quelques années plus tard (Weaver & Lobkis, 2001) montrent expérimentalement que sous l'hypothèse de l'équipartition de l'énergie entre deux capteurs, la dérivée temporelle de la moyenne des intercorrélations enregistrée en ces deux points est proportionnelle à la différence entre la fonction de Green avancée et retardée. Et ce pour la première fois dans un solide (précisément dans un bloc d'aluminium). Ils mettent ainsi en évidence la complexité de cette extraction vis-à-vis de nombre de sources de bruits participant à la reconstruction des fonctions de Green dans un milieu assez complexe 'réverbérant'. Par la suite (Shapiro & Campillo, 2004) ont déduit l'intérêt universel d'une telle séduisante technique pour l'imagerie sismique. Ces travaux ont trouvé de nombreuses applications par la suite comme en acoustique sous-marine (Roux *et al.*, 2004; Sabra *et al.*, 2007), en imagerie médicale (Sabra *et al.*, 2007), en ingénierie civile (Gueguen *et al.*, 2011) et enfin en contrôle non destructif (Larose *et al.*, 2006; Moulin *et al.*, 2009; Chehami *et al.*, 2014).

Le travail présenté ici est une application de cette technique dédiée à la surveillance passive de l'apparition des défauts dans des structures de type plaques, tels que les voilures et composants aéronautiques. L'objectif ultime est dans ce contexte le développement d'un système embarqué de surveillance en temps réel de l'état des structures, qui aurait un impact quasi-nul sur la consommation de l'avion. Ceci constituerait un gain certain par rapport à des systèmes actifs plus classiques, plus gourmands en énergie et plus lourds.

Ce papier est organisé comme suit: dans la deuxième section nous montrons comment est influencée l'extraction des fonctions de Green lorsque le nombre de sources de bruit est limité. À cette fin, le résultat des corrélations est comparé aux fonctions de Green directement mesurées. Dans la troisième section, un algorithme de localisation et d'imagerie du défaut est appliqué avec succès sur la matrice différentielle de corrélations. Enfin, un filtrage DORT est appliqué pour réduire les lobes secondaires engendrés par le bruit de mesure et ainsi améliorer la localisation.

ESTIMATION DES FONCTIONS DE GREEN PAR UN NOMBRE FINI DE SOURCES DE BRUIT

Relation théorique entre la matrice de corrélations et la fonction de Green

Comme l'épaisseur de la plaque est très fine devant la longueur d'onde, le champ de déplacement normal w est dominé par le mode de Lamb A_0 dit de flexion. A très basses fréquences, ce mode est solution de l'équation de Kirchhoff-Love (Edward Hough Love, 1888):

$$D\Delta^2 w(\mathbf{r}, t) + \rho_s \left[\partial_t^2 w(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{\tau_a} \partial_t w(\mathbf{r}, t) \right] = -s(\mathbf{r}, t). \quad (1)$$

Où ' \mathbf{r} ' est un vecteur de position, ' D ' est la rigidité en flexion, ' ρ_s ' est la densité de masse surfacique, ' τ_a ' est le temps caractéristique d'atténuation et ' s ' la force excitatrice normale.

Considérons N_s sources de bruit non-corrélées qui émettent la même densité spectrale $\langle |q(\omega)|^2 \rangle$. La transformée de Fourier de la fonction d'intercorrélation peut s'écrire (Chehami *et al.*, 2014):

$$C_{ll'}(\omega) = \sum_{k=1}^{N_s} G(\mathbf{r}_k^S, \mathbf{r}_l^R, \omega) G^*(\mathbf{r}_k^S, \mathbf{r}_{l'}^R, \omega) \langle |q(\omega)|^2 \rangle. \quad (2)$$

Les plaques minces représentent des modes très résonants. On montre que la fonction de Green peut être décomposée selon ces modes propres (Barton, 1989). Cette décomposition conduit à:

$$G(\mathbf{r}_k^S, \mathbf{r}_l^R, \omega) = \frac{1}{\rho_s} \sum_n \frac{\varphi_n(\mathbf{r}_k^S) \varphi_n(\mathbf{r}_l^R)}{(\omega^2 - \omega_n^2) - \frac{j\omega}{\tau_a}}. \quad (3)$$

Où $\varphi_n(\mathbf{r})$ est le mode propre à la fréquence propre ω_n . En injectant l'équation 2 dans l'équation 3 on montre que (Chehami *et al.*, 2014) la matrice de densité interspectrale peut être écrite sous la forme suivante:

$$C_{ll'}(\omega) = 2j \text{Im} G(\mathbf{r}_l^R, \mathbf{r}_{l'}^R, \omega) F(\omega) + N(\omega). \quad (4)$$

Le terme de 'source' équivalent s'écrit comme suit:

$$F(\omega) = \frac{\langle |q(\omega)|^2 \rangle N_s \overline{\varphi^2} \tau_a}{2j\omega\rho_s}. \quad (5)$$

Où $\overline{\varphi^2}$ est la valeur moyenne sur la surface de la plaque de $|\varphi_n(\mathbf{r})|^2$ qui est approximativement égale à l'inverse de la surface de la plaque S car les modes sont normalisés, *i.e.* $\int |\varphi_n(\mathbf{r})|^2 d^2\mathbf{r} = 1$. La quantité $N(\omega)$ est un terme 'incohérent' qui dégrade l'extraction cohérente de la fonction de Green (Chehami *et al.*, 2014). Ce terme dépend fortement du nombre de sources non-corrélées, *i.e.*, ce terme tendrait vers 0 dans le cas où l'on disposerait d'un nombre important de sources de bruit.

Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 1. Il s'agit d'une plaque d'aluminium de 2m par 1m et 6mm d'épaisseur. La plaque disposée horizontalement est isolée de son support par des blocs en polystyrène pour limiter le couplage (conditions aux limites libres).

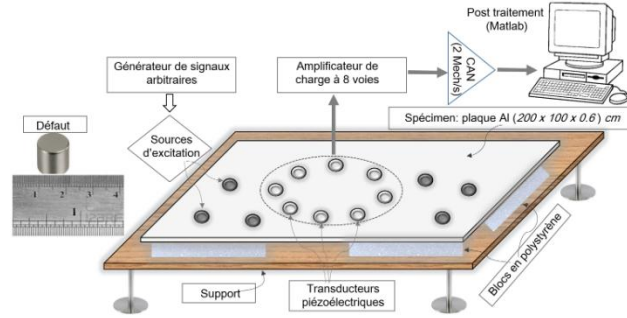


Figure 1. Dispositif expérimental: Les 8 transducteurs sont utilisés comme récepteurs (cas passif), et émetteurs/récepteurs (cas actif). Les autres pastilles sont utilisées pour générer le bruit dans la plaque.

Comme excitation, un générateur de fonctions (modèle Agilent 33120A) engendre un signal transitoire $q(t)$ qui consiste en une période de sinusoïde à 20kHz. Huit transducteurs piézoélectriques (E/R) ont été collés sur la surface de la plaque et sont utilisés comme émetteurs pour reproduire la configuration active et uniquement comme récepteurs pour simuler la manipulation passive. Vingt autres sont utilisés comme sources de bruit de bande passante [10-40] kHz où le mode de Lamb A_0 est dominant. L'acquisition des signaux se fait par une carte de numérisation (technologie National Instruments) de huit voies qui échantillonne les signaux à 2 MEch/s pendant 40 msec. Les signaux enregistrés sur les capteurs piézoélectriques sont conditionnés par un amplificateur de charge à 8 voies avant d'être numérisés par la carte d'acquisition. Les données sont traitées avec Matlab.

Pour N_S acquisitions, on obtient $N_S \times N_R$ réponses $h(\mathbf{r}_i^R, \mathbf{r}_i^S, t)$. On construit ainsi la matrice de corrélations dite 'passive' notée $\mathbf{C}(t)$ à partir de:

$$C_{ll'}(t) = \sum_k h(\mathbf{r}_k^S, \mathbf{r}_l^R, t) \otimes h(\mathbf{r}_k^S, \mathbf{r}_{l'}^R, -t). \quad (6)$$

Comme outil de contrôle, on mesure également les réponses transitoires entre chaque couple de récepteurs. À cette fin, l'une des deux pastilles est utilisée comme un émetteur. On obtient ainsi la matrice de contrôle dite 'active' notée $\mathbf{h}(t)$. Ainsi on peut étudier l'effet du nombre de sources sur la qualité de reconstruction des réponses impulsionnelles. Sur la Figure 2-a un exemple d'une intercorrélacion $C_{12}(t)$ moyennée sur plusieurs sources de bruits localisées à des positions différentes est donné. On observe que plus le nombre de sources de bruit est important, meilleure est la qualité de reconstruction. Notons que la symétrie de corrélation est un bon indicateur de la qualité de reconstruction de la fonction de Green. La fonction d'intercorrélacion résultant de l'émission de 20 sources de bruit non-corrélées, est en excellent accord avec la réponse transitoire mesurée directement $h_{12}(t)$ (voir Figure 2-b). Cependant la qualité de reconstruction n'est pas suffisante afin de détecter un faible défaut dans la plaque. Pour cette raison on propose le mode différentiel entre les deux états référentiel et endommagé.

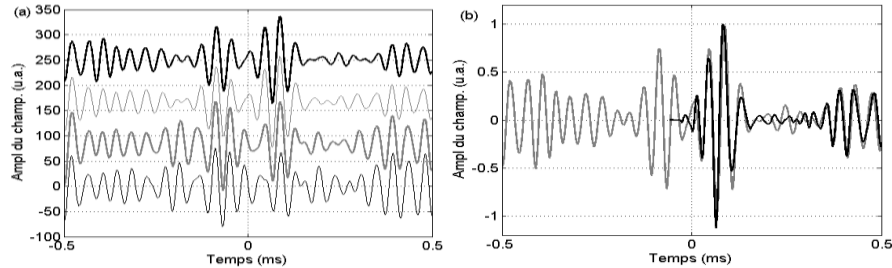


Figure 2. (a) Intercorrélations moyennées sur 3 (trait continu noir fin), 5 (trait continu gris foncé), 10 (trait continu gris clair) et 20 (trait continu noir foncé) sources, respectivement, (b) un résultat typique d'une intercorrélacion entre deux capteurs $C_{12}(t)$ moyennée sur 20 sources (courbe grise) comparée à la réponse transitoire directement mesurée et enregistrée quand un des deux transducteurs agit comme une source (courbe noire).

À cette fin, la matrice de corrélations ainsi que la matrice active sont mesurées lorsque la plaque est saine, on obtient ainsi les matrices référentielles notées par C^{ref} et h^{ref} , respectivement. Ensuite, un défaut artificiel qui consiste en deux aimants qui se font face a été collé sur la surface de plaque. Ces aimants en niobium sont des cylindres de 10mm de diamètre ($\approx \frac{\lambda}{7}$). Un couplant visqueux (du miel alimentaire) permet d'améliorer l'adhésion sur la plaque. Les deux matrices sont à nouveau acquises ainsi on obtient C^{def} et h^{def} . Ce défaut est un moyen simple et reproductible de simuler une inclusion massive qui est un bon diffuseur (Xeridat, 2011)¹. La soustraction entre les matrices acquises avec et sans défaut permet d'éliminer les réponses directes entre transducteurs. De cette manière l'écho de défaut est clair (à partir du moment où il interagit de façon non négligeable avec les ondes incidentes). Ces matrices différentielles s'écrivent ainsi:

$$\begin{aligned} \Delta h_{ij}(t) &= h^{def}(r_i^R, r_j^R, t) - h^{ref}(r_i^R, r_j^R, t), \\ \Delta C_{ij}(t) &= C^{def}(r_i^R, r_j^R, t) - C^{ref}(r_i^R, r_j^R, t). \end{aligned} \quad (7)$$

Les intercorrélations avec et sans défaut entre les transducteurs 2 et 5 sont représentées sur la Figure 3. La figure 4 montre que l'écho du défaut qui arrive à 0.15ms apparaît clairement sur la soustraction des intercorrélations. Néanmoins on observe que la différence sur les trajets directs (les cent premières microsecondes) n'est pas nulle (Figure 4). Ceci est une confirmation de la reconstruction imparfaite de la fonction de Green qui est due au nombre de sources limité, *i.e.* au terme additif $N(\omega)$.

¹ Une étude numérique a été faite par O. Xeridat durant sa thèse, où il a montré que l'amplitude de l'onde de flexion rétrodiffusée en champ lointain pour une inclusion rigide, massive est très importante par rapport à un trou traversant ou borgne.

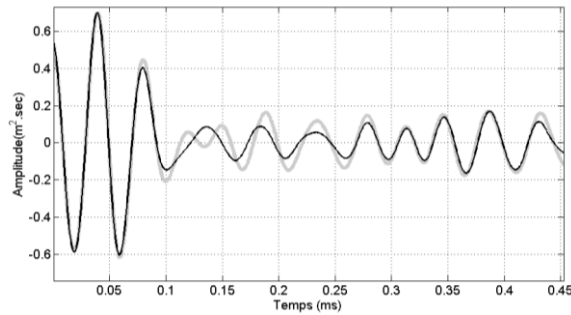


Figure 3. Comparaison entre $C^{ref}(r_5^R, r_2^R, t)$ (courbe grise) et $C^{def}(r_5^R, r_2^R, t)$ (courbe noire).

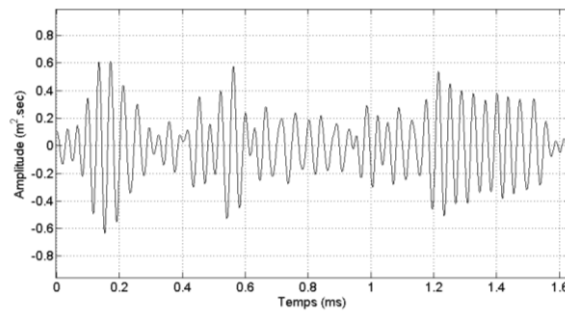


Figure 4. La corrélation différentielle entre les transducteurs 2 et 5 ($\Delta C_{52}(t)$).

LOCALISATION ET IMAGERIE DE DÉFAUT

Dans cette partie, on montre qu'à partir de l'ensemble des fonctions de Green extraites entre chaque couple de récepteurs, il est possible d'utiliser des algorithmes classiques comme la formation de voies, pour localiser un défaut dans la plaque. De ce fait, les matrices différentielles obtenues $\Delta C(t)$ et $\Delta h(t)$ sont injectées dans un algorithme d'imagerie classique pour détecter et imager le défaut.

Description de l'algorithme d'identification du défaut structurel

L'algorithme est basé sur la rétropropagation numérique (on parle de migration en sismologie) des signaux $\Delta C_{ij}(t)$ et $\Delta h_{ij}(t)$ sur l'ensemble des positions sondées (Figure 5). De cette manière lorsque la position sondée correspond à celle du défaut, les signaux se somment de manière constructive. Cet algorithme prend en compte le caractère dispersif du mode de Lamb A_0 .

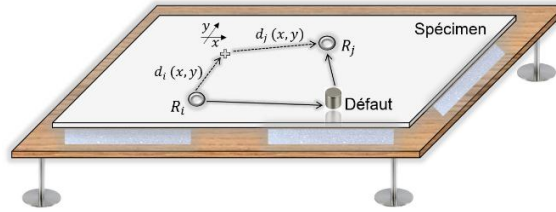


Figure 5. Principe de l’algorithme de localisation.

Le champ rétropropagé bpf au point (x, y) et à la pulsation ω est donné par:

$$bpf_{(x,y)}(\omega) = \sum_{i=1, j=1 (i \neq j)}^{N_R, N_R} \Delta K_{ij}(\omega) e^{j [d_i(x,y) + d_j(x,y)] k(\omega)}, \quad (8)$$

où $d_i(x, y)$ est la distance entre le $i^{\text{ème}}$ récepteur et le pixel à la position (x, y) . Le vecteur d'onde k est déduit de la relation de dispersion du mode A_0 . L'élément de la matrice $\Delta K_{ij}(\omega)$ est la transformée de Fourier de $\Delta C_{ij}(t)$ dans le cas passif et de $\Delta h_{ij}(t)$ dans le cas actif. Dans ce dernier cas, à cause du système d'acquisition, les réponses des transducteurs sur eux-mêmes ne sont pas prises en compte. En d'autres termes, les éléments diagonaux de la matrice $\Delta h(t)$ ne sont pas pris en compte dans le calcul de la fonction bpf . L'intensité du pixel est obtenue en intégrant dans le domaine temporel la fonction de propagation (bpf) sur une fenêtre allant de $-\frac{T_0}{2}$ à $+\frac{T_0}{2}$ ($\approx \frac{1}{BPF}$), c.-à-d.,

$$I(x, y) = \int_{-\frac{T_0}{2}}^{+\frac{T_0}{2}} |bpf_{(x,y)}(t)|^2 dt. \quad (9)$$

Ainsi pour les pixels se trouvant sur la position du défaut, le processus est équivalent à une rétropropagation des signaux au temps zéro (instant d'émission) suivi par une sommation cohérente des signaux rétropropagés (le maximum d'intensité).

Résultats et discussions

L'algorithme de localisation est appliqué à la matrice de corrélations $\Delta C(t)$ (cas passif) pour deux positions différentes du même défaut, à savoir $(0.529, 0.429)$ m (Figure 6) et $(1.46, 0.155)$ m (Figure 7). Comme moyen de contrôle, on dispose également de la matrice des réponses inter-éléments $\Delta h(t)$. L'angle gauche bas de la plaque a été choisi comme origine, la position du défaut est indiquée par un cercle noir. Les positions des récepteurs sont indiquées par '*'.

² Bande passante

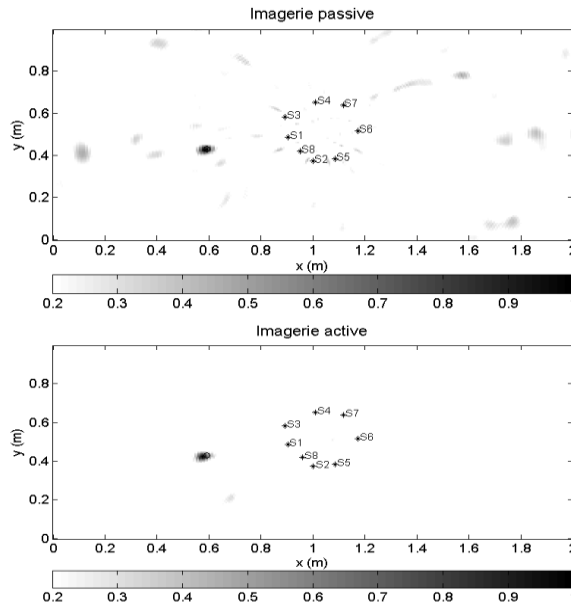


Figure 6. Image du défaut obtenue à partir de $\Delta C(t)$ (acquise pour 20 sources de bruit) et de $\Delta h(t)$ (cas actif). Le défaut est localisé avec succès à la position (0.529,0.429) m.

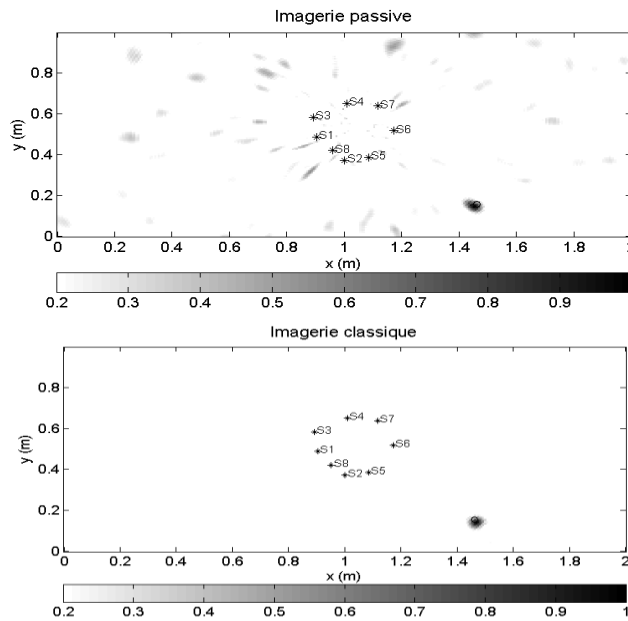


Figure 7. Image du défaut obtenue à partir de $\Delta C(t)$ (acquise pour 20 sources de bruit) et de $\Delta h(t)$ (cas actif). Le défaut est localisé avec succès à la position (1.46, 0.155) m.

La qualité des images obtenues dans le cas passif est naturellement moins bonne que celle obtenue pour le cas actif. Cependant, la réduction des contributions non cohérentes en dehors de la position du défaut est suffisamment efficace pour faire apparaître clairement le spot sur le défaut. Un élargissement de la tâche focale peut être observé, cela est dû à la distance focale entre le centre du réseau et le point focal du défaut (formule de diffraction), plus cette distance est grande, plus la résolution est mauvaise.

FILTRAGE PAR LA MÉTHODE DORT

La méthode DORT (décomposition de l'opérateur de retournement temporel) consiste à décomposer la matrice $\Delta\mathbf{K}(\omega)$ en valeurs singulières (SVD). Pour chaque pulsation ω , la décomposition SVD de la matrice $\Delta\mathbf{K}(\omega)$ peut-être écrite sous la forme suivante:

$$\Delta\mathbf{K}(\omega) = \sum_{i=1}^{N_R} \mathbf{U}_i(\omega) \mathbf{S}_i(\omega) \mathbf{V}_i^\dagger(\omega). \quad (10)$$

Où $\mathbf{U}_i(\omega)$ et $\mathbf{V}_i^\dagger(\omega)$ sont le $i^{\text{ème}}$ vecteur singulier associé à l' $i^{\text{ème}}$ valeur singulière $\mathbf{S}_i(\omega)$. Ainsi, l'image filtrée par la méthode DORT est obtenue en remplaçant $\Delta\mathbf{K}(\omega)$ par $\mathbf{U}_i(\omega) \mathbf{S}_i(\omega) \mathbf{V}_i^\dagger(\omega)$. Comme nos mesures présentent un très bon rapport signal sur bruit, nous rajoutons un bruit artificiel sur la matrice différentielle de corrélations $\Delta\mathbf{C}(\omega)$ acquise avec 20 sources aléatoires. La matrice bruitée s'écrit par:

$$\Delta\mathbf{C}^{\text{bruit}}(\omega) = \Delta\mathbf{C}(\omega) + \sigma(\omega) \times \mathbf{B}. \quad (11)$$

Avec

$$\sigma(\omega) = \varepsilon \times \max(|\Delta\mathbf{C}(\omega)|). \quad (12)$$

Où ε est un paramètre qui représente le rapport bruit sur signal. Les éléments de la matrice \mathbf{B} sont des nombres complexes aléatoires (qui suivent une loi normale), de moyenne nulle et non-corrélés entre eux. Pour une valeur de $\varepsilon = 0.05$, l'image obtenue sans filtrage DORT avec la matrice $\Delta\mathbf{C}(t)$ (domaine temporel) est représentée sur la Figure 8.

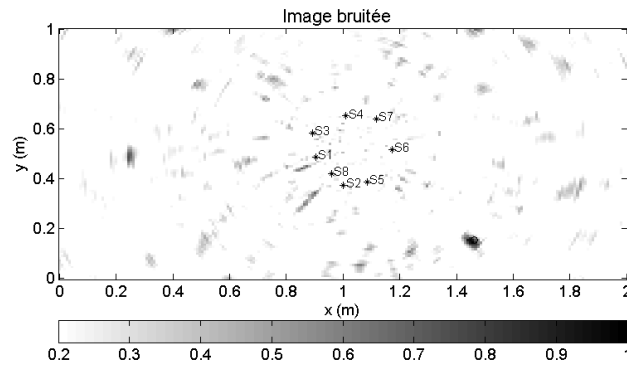


Figure 8. Image du défaut obtenue lorsque $\Delta\mathbf{K}(\omega)=\Delta\mathbf{C}^{\text{bruit}}(\omega)$ pour 20 sources aléatoires.

L'effet de bruitage se voit par l'apparition des lobes secondaires notamment à la position (0.24, 0.45) m. La Figure 9 représente la distribution normalisée des valeurs singulières de la matrice $\Delta C(\omega)$ et $\Delta C^{bruit}(\omega)$, moyennées sur toutes les fréquences de la bande passante du signal d'excitation. On observe sur cette courbe que le bruit engendre une remontée des valeurs singulières de rang élevé.

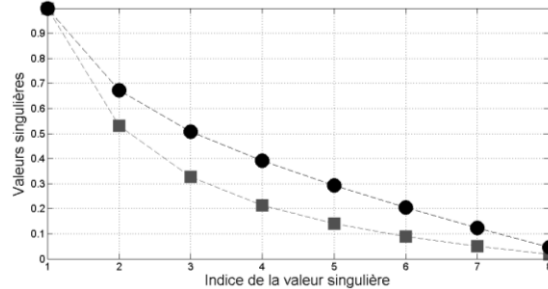


Figure 9. Valeurs singulières normalisées, moyennées sur toutes les fréquences obtenues avec $\Delta C(\omega)$ (courbe grise) et $\Delta C^{bruit}(\omega)$ (courbe noire).

Pour limiter l'influence du bruit, la méthode DORT consiste à ne repropager que le vecteur singulier associé à la valeur singulière la plus élevée, *i.e.*,

$$\Delta K(\omega) = U_1(\omega)S_1(\omega)V_1^\dagger(\omega) . \tag{13}$$

L'application de l'algorithme de localisation sur la matrice $\Delta K(\omega)$ est représentée sur la Figure 10.

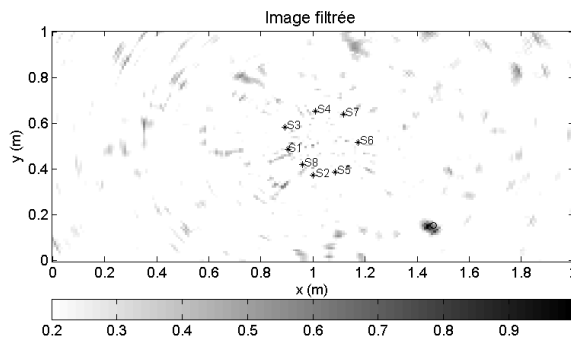


Figure 10. Image de localisation obtenue par la version filtrée de $\Delta C^{bruit}(\omega)$ en ne repropageant que le premier vecteur singulier.

On observe bien un abaissement des lobes secondaires liés au bruit de mesure. Par exemple, le lobe secondaire localisé à la position (0.24, 0.45) m est fortement atténué. En effet, on peut montrer que le rapport de l'amplitude des lobes secondaires et du lobe principal est proportionnel à ε lorsque toutes les valeurs singulières sont utilisées et est proportionnel à ε^2 quand uniquement le premier vecteur singulier est considéré. Lorsque le rapport signal sur

bruit n'est pas trop mauvais, *i.e.*, $\varepsilon < 1$, la méthode DORT permet bien d'atténuer les lobes secondaires.

CONCLUSION

Dans ce travail, la relation théorique entre la corrélation des signaux enregistrés entre chaque couple de récepteurs et la réponse transitoire dans une plaque réverbérante a été établie. Sur la base de ce résultat, on a proposé une méthode originale pour contrôler d'une manière passive l'apparition d'un endommagement dans l'échantillon. À partir du mode différentiel, on a pu détecter et localiser avec succès le défaut avec une très bonne résolution. Par comparaison aux résultats obtenus dans l'expérience active, on confirme que cette méthode reste efficace, prometteuse et présente des résultats comparables à l'imagerie classique. Finalement, la méthode DORT s'est avérée très utile pour minimiser l'effet du bruit de mesure.

REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par l'agence nationale de la recherche (ANR): ANR2011 BS0903901, PASNI project.

RÉFÉRENCES

- Barton, G. 1989. *Elements of Green's functions and propagation*. Oxford science publications, Clarendon Press.
- Chehami, L., Moulin, E., De Rosny, J., Prada, C., Matar, O.B., Benmeddour, F. and Assaad, J. 2014. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *J. Appl. Phys.*, 115 : 104901.
- Chehami, L., Moulin, E., De Rosny, J., Prada, C. 2014. Estimation des fonctions de Green par corrélation de bruit: application pour la localisation et l'imagerie des défauts dans des plaques minces réverbérantes. *Proceeding CFA.*, 22-25 Avril Poitiers, p. 33-38.
- Duvall, T.L., Jefferies, S.M., Harvey, J.W. and Pomerantz, M.A. 1993. Time distance helioseismology. *Nature*, 362(6419): 430–432.
- Edward Hough Love, A. 1888. The small free vibrations and deformation of a thin elastic shell. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 179: 491-546.
- Gueguen, P., Langlais, M., Foray, P., Rousseau, C. and Maury, J. 2011. A natural seismic isolating system: the buried mangrove effects. *Bulletin of the Seismological Society of America.*, 101(3): 1073-1080.
- Ihn, B., Chang, K.J. 2008. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures. *Struct. Health Monit.*, 7: 5-19.
- Larose, E., Lobkis, O.I. and Weaver, R.L. 2006. Passive correlation imaging of a buried scatterer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119: 3549–3552.
- Moulin, E., Abou Leyla, N., Assaad, J. and Grondel, S. 2009. Applicability of acoustic noise correlation for structural health monitoring in non-diffuse field conditions. *Appl. Phys. Lett.*, 95: 094104.
- Roux, P., Kuperman, W. and the NPAL Group 2004. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116: 1995–2003.
- Sabra, K.G., Conti, S., Roux, P., and Kuperman, W. 2007. Passive *in vivo* elastography from skeletal muscle noise. *Appl. Phys. Lett.*, 90: 194101.
- Sabra, K.G., Winkel, E.S., Bourgoyne, D.A., Elbing, B.R., Ceccio, S.L., Perlin, M. and Dowling, D.R. 2007. 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: 1987-1995.
- Shapiro, N.M. and Campillo., M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Res. Lett.*, 31: L07614.
- Weaver, R.L. and Lobkis, O.I. 2001. On the emergence of the Greens function in the correlations of a diffuse field. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110: 3011-3017.
- Xeridat, O. 2011. *Étude expérimentale de la propagation, de la diffusion et de la localisation des ondes de Lamb*. Université de Nice Sophia Antipolis, pp. 245.