

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Localisation passive de défauts dans une plaque par identification des sources de bruit localisées

L. Chehami^a, E. Moulin^a, F. Benmeddour^a, J. Assaad^a, J. De Rosny^b et C. Prada-Julia^b

^aUniv. Valenciennes, CNRS, Univ. Lille, YNCREA, Centrale Lille, UMR 8520 - IEMN, DOAE, F-59313 Valenciennes, France

^bInstitut Langevin, ESPCI Paris, UMR CNRS 7587, 1 rue Jussieu, F-75005 Paris, France
lynda.chehami@univ-valenciennes.fr

La surveillance passive de l'état de santé des structures constitue une alternative intéressante aux méthodes ultrasonores actives. Elle consiste à exploiter les sources acoustiques naturellement existantes dans les conditions d'usage de la structure (bruits aérodynamiques, vibrations, etc.). En effet, les fonctions de Green dans une plaque réverbérante peuvent être reconstruites par corrélation d'un bruit ambiant dont les sources sont uniformément réparties sur la surface. Cette approche permet de localiser un défaut en exploitant la différence entre les corrélations des signaux acquis avant et après l'apparition du défaut. Dans les cas où les sources de bruit sont plus ou moins concentrées sur des zones limitées de la surface de la plaque, la qualité de reconstruction passive des fonctions de Green est réduite. La méthode de localisation s'avère néanmoins toujours applicable, à condition que les positions des sources de bruit coïncident avant et après l'apparition du défaut. Ce travail propose donc une méthode d'identification des zones de sources de bruit préalable à la localisation du défaut. Celle-ci consiste à construire un dictionnaire de référence qui contient toutes les fonctions de corrélations de bruit créé sur une zone localisée. L'identification de la zone de bruit est déterminée à partir de l'erreur quadratique entre la corrélation dans le cas d'un défaut et celles du dictionnaire. Afin de valider ce principe, des essais expérimentaux ont été effectués sur une plaque d'aluminium de 2 m x 1 m et 6 mm d'épaisseur. Le bruit est généré par frottement sur de petites zones de la plaque. Les résultats expérimentaux montrent une bonne identification de sources de bruit, permettant par conséquent une localisation correcte des défauts.

1 Introduction

Souvent, la propagation des ondes élastiques dans des milieux solides est soumise à des phénomènes de réverbération [1, 2, 3, 4, 5, 6] ou de diffusion multiple [7, 8, 9, 10], par les obstacles rencontrés. En particulier, dans les milieux clos à faible atténuation acoustique, les réflexions multiples par les bords engendrent des signaux réverbérés de longue durée à apparence aléatoire. Ces signaux résultent de la superposition de l'onde directe (les premiers paquets d'onde qui voyagent le long du chemin de la source au récepteur) et les ondes diffuses multiples réfléchies (codas de réverbération). Par conséquent, les ondes diffuses véhiculent plus d'informations sur les propriétés constitutives et les changements du milieu, que les premiers paquets d'ondes. Certaines de ces informations peuvent être extraites élégamment dans un contexte passif sans avoir recours à des sources ultrasonores. Le principe repose sur l'exploitation des champs acoustiques naturels (sources d'opportunité) afin de créer des ondes acoustiques dans le milieu. L'idée est que ce bruit ambiant contient de l'information sur l'ensemble des ondes qui se propagent entre deux points du milieu. Ainsi, en réalisant une moyenne des corrélations de ce bruit sur un intervalle de temps suffisant, la partie du signal qui correspond à la réponse impulsionnelle entre les deux points ou fonction de Green (FG) va émerger [11, 12].

La convergence des fonctions de Green vers les fonctions de corrélations repose généralement sur deux hypothèses : sources décorrélées et un champ diffus. L'hypothèse de sources décorrélées, nécessite que les sources de bruit soient suffisamment distantes (pas spatial minimal de l'ordre d'une longueur d'onde). Le champ diffus, quant à lui, peut être obtenu soit par une distribution particulière de sources, soit par des diffuseurs introduits dans le milieu (diffusion multiple), ou tout simplement par la nature réverbérante de celui-ci. Sous ces deux hypothèses, cette relation se traduit réellement par le fait que la corrélation croisée des signaux enregistrés par deux capteurs passifs contient essentiellement la même information sur le milieu que le signal que l'on aurait acquis, si un de ces capteurs était actif (émetteur) et l'autre était passif (récepteur).

Dans les systèmes de contrôle santé intégré (CSI), l'exploitation des sources acoustiques ambiantes (phénomènes acoustiques naturels comme les vibrations mécaniques,

frottements, contacts roue-rail, etc.), en lieu et place de l'émission d'ondes ultrasonores, ouvre la voie vers des systèmes de surveillance passifs (récepteurs uniquement), donc basse consommation et peu-intrusifs. En ce sens, notre contribution sur le sujet consiste en l'étude de la propagation réverbérante dans ce contexte passif pour le suivi de l'état de santé des plaques. Suivant cette idée générale, nous avons montré récemment qu'en combinant les techniques de corrélation de bruit et d'imagerie par réseau de capteurs, il était possible de révéler la présence ou non d'un défaut ainsi que sa position dans une plaque réverbérante [13, 14, 15, 16]. Cette méthode repose sur une exploitation des ondes diffusées par le défaut isolées par simple soustraction entre les corrélations des signaux acquis avant et après l'apparition du défaut. Dans le cas où les sources de bruit sont plus au moins concentrées sur des zones limitées de la surface de la plaque, la qualité de reconstruction des fonctions de Green est réduite. La localisation s'avère néanmoins toujours applicable, à condition que les positions de sources de bruit coïncident avant et après l'apparition du défaut. Pour s'en assurer, nous proposons une méthode d'identification des zones de sources de bruit préalable à la localisation de défaut.

Dans un premier temps, la relation entre la fonction de Green et la fonction de corrélation pour une plaque établie dans les travaux précédents, ainsi que ses résultats principaux sur la localisation, seront brièvement rappelés. Ensuite, la méthode d'identification des sources de bruit sera théoriquement établie. Cette méthode sera ensuite validée expérimentalement, avant de montrer comment elle peut être exploitée pour la localisation correcte des défauts.

2 Reconstruction passive des fonctions de Green dans une plaque finie

Nous rappelons tout d'abord les principaux résultats obtenus dans les travaux précédents concernant la reconstruction passive de fonctions de Green dans une plaque finie et leur utilisation pour la localisation d'un défaut [13, 15, 16]. Le champ diffus est créé par la superposition de paquets d'ondes issues d'une part : d'un ensemble de sources décorrélées distribuées sur la surface de la plaque, d'autre part des réverbérations multiples sur les bords de celle-ci. Pour un réseau de capteurs répartis sur la

surface de la plaque, la matrice de corrélations des signaux réverbérés, peut être écrite comme [13] :

$$C(t) = [G(t) - G(-t)] \otimes f(t) + n(t), \quad (1)$$

où \otimes est le symbole de convolution, $G(t)$ représente la fonction de Green du milieu et $n(t)$ est appelé résidu de corrélation (ou erreur de reconstruction). Ce second terme correspond à la partie de la corrélation qui n'est pas incluse dans le premier terme $[G(t) - G(-t)] \otimes f(t)$. Puisque ce premier terme peut être interprété comme une reconstruction passive de l'information contenue dans la fonction de Green, $n(t)$ correspond à un résidu parasite qui ne contribuera pas à la convergence vers la fonction de Green (plus de détails sur le terme parasite sont donnés dans les travaux de Chehami et al., [13]). La fonction $f(t)$ représente le terme de source équivalent et est donnée par

$$f(t) = \frac{N_S \tau_a}{2\rho h S} \int_{-\infty}^t R_n(\tau) d\tau, \quad (2)$$

avec h l'épaisseur de la plaque, ρ la densité volumique, S surface de la plaque, R_n l'autocorrélation de la source de bruit et τ_a la constante de temps caractéristique d'atténuation de la plaque.

Dans le cas de sources impulsionnelles localisées décorréliées réparties uniformément sur la surface de la plaque, $n(t)$ peut être décrit par un modèle statistique liant la qualité de reconstruction des fonctions de Green par corrélation aux propriétés structurales de la plaque. Ce modèle repose sur le calcul d'un niveau de bruit relatif appelé RNL (pour Relative to Noise Level en anglais) défini comme le rapport d'énergie du bruit résiduel de reconstruction à la fonction de Green. Dans le cas d'une plaque rectangulaire, celui-ci peut se mettre sous la forme suivante [15] :

$$RNL(N_s) = \frac{1}{N_s} \left(\frac{5}{4} + \frac{S}{4\tau_a} \sqrt{\frac{\rho h}{D}} \right), \quad (3)$$

où D est la rigidité en flexion de la plaque.

A partir de la relation (3), on tire 3 conclusions intéressantes sur les conditions de reconstruction des fonctions de Green. En particulier, l'erreur de reconstruction diminue lorsque :

- le nombre de sources de bruit N_s augmente ;
- le temps d'atténuation τ_a augmente ;
- l'aire de la plaque S diminue.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux existants dans la littérature dans d'autres cas de figure par exemple les milieux multi-diffusants [9].

Dans le cas des plaques réverbérantes, cette idée générale a été exploitée pour la localisation passive d'un défaut. Certains de ces résultats sont obtenus par corrélation de signaux réverbérés issus de frottement sur la surface de la plaque. La localisation du défaut est réalisée par rétro-propagation de la matrice de corrélations différentielle notée par ΔC . Sur la figure 1 est montré deux exemples de localisation de défaut : (a) quand les zones de bruit coïncident avant et après l'apparition du défaut, et (b) quand ces zones sont distantes. Les zones de frottement

sont indiquées par des rectangles. La position du défaut est indiquée par un cercle. Enfin, les positions du réseau de capteurs sont indiquées par "X".

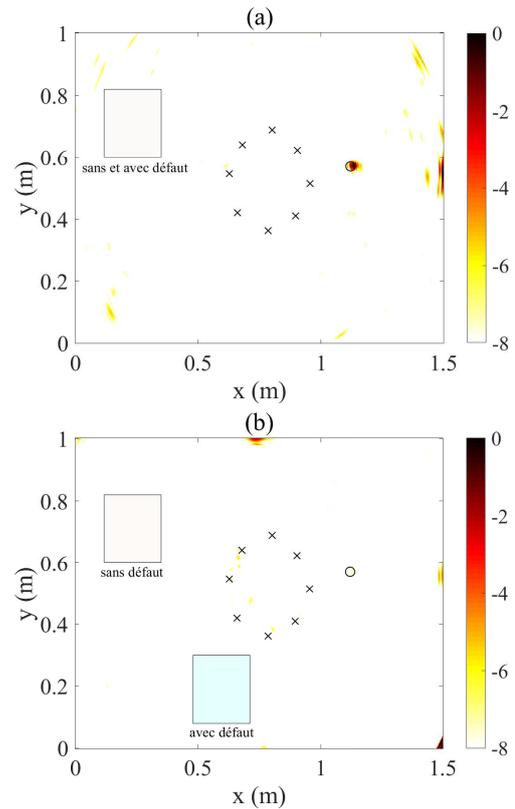


FIGURE 1 – Images de localisation de défaut (en décibel) par corrélation de bruit de frottement quand les zones de frottement : (a) coïncident avant et après apparition de défaut, (b) distantes, respectivement. Les rectangles indiquent les zones de frottement.

Dans le premier cas, lorsque les zones de génération de bruit sont les mêmes, le lobe sur la position de défaut est dominant (figure 1-(a)). Cependant, quand les zones de bruit sont suffisamment distantes les unes des autres, le défaut n'est plus localisé (figure 1-(b)).

Ces résultats peuvent être interprétés de la manière suivante. Appelons A (respectivement, B) le zone de génération de bruit utilisée pour l'acquisition de la matrice de corrélation sans (respectivement, avec) le défaut. L'expression de la matrice différentielle peut alors s'écrire ainsi

$$\Delta C(t) = [\Delta G(t) - \Delta G(-t)] \otimes f(t) + n_B(t) - n_A(t) + \delta n_B(t), \quad (4)$$

avec ΔG est la partie de la fonction de Green due au défaut. Les termes n_A et n_B sont les contributions parasites, sans le défaut, obtenus pour les zones de bruit A et B, respectivement. Enfin, δn_B est la différence entre les termes parasites obtenus avec et sans défaut quand le bruit est généré sur la même zone de la plaque. Ainsi, quand les zones de bruit sont identiques dans le cas avec et sans défaut ($A = B$), même si $n_A(t)$ est assez important car la zone A est petite par rapport à la surface totale de la plaque, la différence entre la matrice de corrélations annule cette contribution et seule la petite contribution $\delta n_B(t)$ subsiste. En effet, $\delta n_B(t)$ n'augmente que légèrement les lobes parasites sur la figure 1-(a) par rapport au lobe principal du défaut dû

à $[\Delta G(t) - \Delta G(-t)]$. Cependant, pour le cas avec des zones différentes ($A \neq B$), $n_B - n_A$ pourrait être la partie dominante, rendant éventuellement le défaut non localisable, comme en atteste la figure 1-(b). Par conséquent, la condition de stationnarité des sources constitue un paramètre important pour une détection optimale du défaut. Dans la section suivante, un développement va être appliqué pour identifier ces zones de bruit pour une estimation correcte de la matrice $\Delta C(t)$.

3 Identification théorique des sources de bruit étendues

Ici, on propose une méthode permettant d'identifier les zones de sources. Le but de cette étude est d'identifier d'une manière passive les zones où le bruit a été créé avant et après l'apparition de défaut afin de faire le calcul de la corrélation différentielle sur la bonne référence.

Considérons une plaque mince réverbérante de faible atténuation acoustique d'épaisseur e , ainsi que deux récepteurs R_i et R_j .

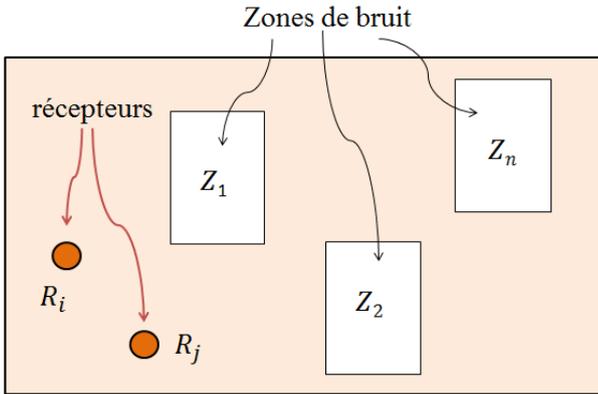


FIGURE 2 – Vue schématique d'une réalisation donnée de l'expérience.

Le bruit est supposé être créé sur des zones localisées Z_n de mêmes dimensions, sur la surface de la plaque (figure 2). Lorsque le bruit est créé sur la zone Z_n , la corrélation des signaux enregistrés sur la paire de récepteurs est notée $C_{Z_n,ij}(t)$. On construit ainsi un dictionnaire de référence contenant toutes les intercorrélations estimées pour différentes zones de bruit Z_n .

Notons maintenant par B, la zone qu'on cherche à identifier (une plaque avec défaut) dans le dictionnaire de référence (une plaque sans défaut), la corrélation des signaux enregistrés sur la paire de récepteurs est notée $C_{B,ij}(t)$. Dans le cas expérimental qui nous intéresse, cette dernière peut être celle sur laquelle est créé le frottement et pour laquelle est estimée la matrice des corrélations avec défaut C^{def} .

Dans ce cas, la relation (4) peut s'écrire ainsi :

$$C_{Z_n,ij}(t) = [\mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, t) - \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, -t)] \otimes f(t) + \mathbf{n}_{Z_n,ij}(t), \quad (5)$$

où $\mathbf{n}_{Z_n,ij}$ est le résidu de reconstruction associé à la zone de frottement Z_n .

Il peut être tentant ici d'utiliser la technique de localisation par retournement temporel mono-voie [2, 17] consistant à localiser la position d'un impact à partir de l'autocorrélation maximale entre la réponse enregistrée après l'impact et toutes les réponses impulsionnelles du milieu à imager avant l'impact. Cependant, dans notre cas, les zones de sources étant relativement étendues (frottement), la partie déterministe $[\mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, t) - \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, -t)] \otimes f(t)$ est le terme dominant dans la relation (5). Ce terme étant le même pour toutes les zones Z_n , toutes les réponses reconstruites $C_{Z_n,ij}(t)$ seront très similaires entre elles. Dans ce cas, l'identification de la zone B à partir de l'intercorrélacion entre $C_{B,ij}(t)$ et $C_{Z_n,ij}(t)$ ne permettra pas une distinction claire de la zone de sources. Une solution plus satisfaisante ici consiste donc à travailler sur la différence $C_{B,ij}(t) - C_{Z_n,ij}(t)$ pour annuler le terme stationnaire $[\mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, t) - \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, -t)] \otimes f(t)$ de l'équation (5).

Un traitement simple pour l'identification de la zone de bruit, consiste à calculer l'erreur quadratique de la différence $C_{B,ij}(t) - C_{Z_n,ij}(t)$ notée par \mathcal{E} .

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_n &= \int_t [C_{B,ij}(t) - C_{Z_n,ij}(t)]^2 dt \\ &= \int_t [\mathbf{n}_{B,ij}(t) - \mathbf{n}_{Z_n,ij}(t) + \delta \mathbf{n}]^2 dt, \end{aligned} \quad (6)$$

où $\delta \mathbf{n}$ est la différence des termes parasites entre le cas avec et sans défaut.

Pour des raisons de commodité, on définit r , l'inverse de l'erreur quadratique, i.e, $r = \frac{1}{\mathcal{E}_n}$.

Dans le cas sans défaut ($\delta \mathbf{n} = 0$), lorsque la zone B coïncide avec une des zones Z_n du dictionnaire de référence, l'erreur quadratique \mathcal{E}_n tend vers zéro. Dans les autres cas, \mathcal{E}_n aurait une valeur non nulle ($\delta \mathbf{n} \neq 0$). Le principe d'identification consistera donc à rechercher la valeur de n pour laquelle l'inverse de l'erreur quadratique r est maximale. On s'attend alors à un maximum d'amplitude à l'indice n de la zone Z_n du dictionnaire de référence.

4 Validation expérimentale

Pour valider ce principe, quelques essais expérimentaux ont été effectués. Le dispositif expérimental utilisé est composé d'une plaque d'aluminium rectangulaire de dimensions 2 m \times 1 m et d'épaisseur 6 mm. La plaque est disposée horizontalement et isolée de son support par des petits blocs en polystyrène pour limiter le couplage (conditions aux limites libres).

La surface de la plaque est divisée en cinq zones $Z_1 \dots Z_5$ distantes (voir figure 3).

Un réseau de huit capteurs piézoélectriques est intégré à la surface de la plaque dont deux (R_1 et R_2) collés sur la surface de la plaque aux positions (0,334, 0,095) m et (0,151, 0,135) m, respectivement). Les six autres capteurs sont utilisés pour la localisation de défaut.

On définit deux surfaces de bruit, une relativement large $A_1 = 15 \times 15 \text{ cm}^2$ et une petite $A_2 = 5 \times 5 \text{ cm}^2$, respectivement pour chaque zone. Le bruit est créé en

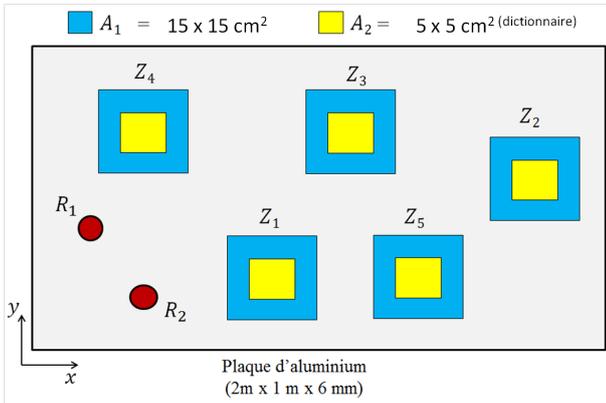


FIGURE 3 – Description de la configuration expérimentale testée.

frottant continuellement avec une éponge grattante sur l'aire A_2 de chaque zone pendant $T = 30$ s. Les signaux enregistrés sur les capteurs sont échantillonnés à 192 kch/S. Ces derniers sont ensuite blanchis en fréquence entre 5 kHz et 30 kHz avant la corrélation [14]. Dans cette plage de fréquences, le mode antisymétrique de Lamb A0 est dominant (ondes de flexion). On construit ainsi le dictionnaire de référence contenant toutes les réponses $C_{Z_n,12}(t)$ obtenues pour une plaque saine (sans défaut) et pour l'aire A_2 . On cherche alors à identifier la réponse $C_{B,12}(t)$ estimée à partir de la zone B pour une plaque contenant un défaut, dans le dictionnaire de référence.

Dans un premier temps, on a testé ce principe sur une plaque saine. La courbe d'identification pour chaque surface de frottement obtenue grâce à l'expression (6) a été tracée sur la figure 4. Les valeurs de r sont normalisées par rapport au minimum de l'inverse de l'erreur quadratique.

Les zones de frottement sont correctement localisées. Par ailleurs, lorsque l'aire de la zone de frottement B est plus large que celles enregistrées dans le dictionnaire de référence, la valeur de r est beaucoup plus faible que lorsque les aires A sont identiques. On constate néanmoins une identification sans ambiguïté de la zone incluse.

Dans un second temps, on a testé la méthode pour une plaque contenant un défaut (le dictionnaire référence est obtenu pour une plaque sans défaut et en frottant sur l'aire A_2). Ici, le défaut testé est une paire d'aimants collés de part et d'autre de la plaque. Ceci consiste à simuler la présence d'une hétérogénéité dans plaque sans l'endommager. Le défaut a été fixé à la position (1,308, 0,697) m de la plaque. De même, les résultats sont tracés sur la figure 5.

Pour une plaque contenant un défaut en revanche, les résultats paraissent à première vue moins satisfaisants. En effet, on peut remarquer sur la figure 5 que l'amplitude de r est beaucoup plus faible que dans le cas sans défaut (cf. figure 4). Ceci peut s'expliquer simplement par le fait que la contribution du terme parasite différentiel δn est non négligeable. Néanmoins, les résultats obtenus laissent une dynamique suffisante pour une identification correcte des zones de frottement.

Ainsi, grâce à cette méthode d'identification, nous avons pu faire l'imagerie différentielle sur la bonne référence. Un

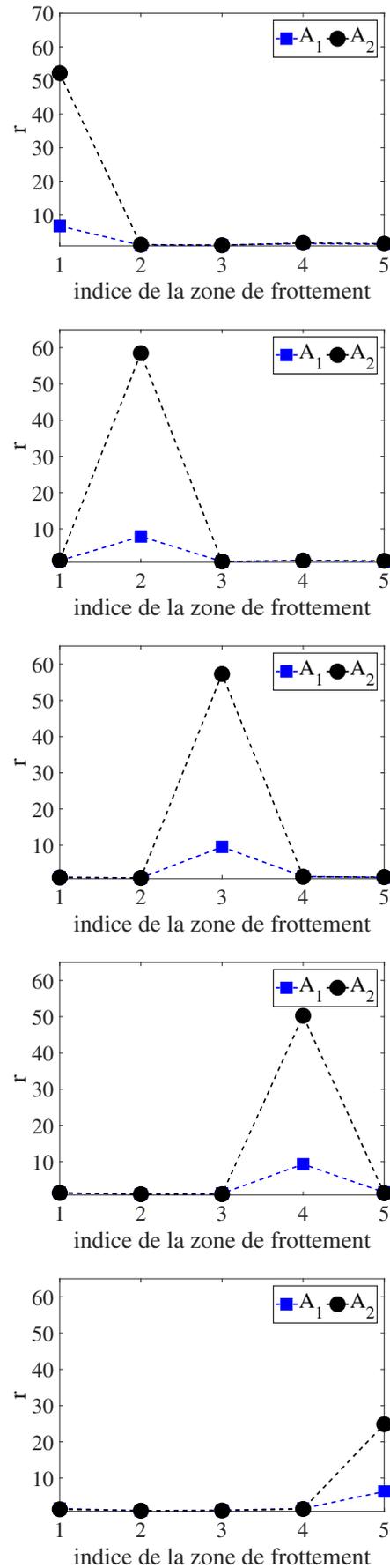


FIGURE 4 – Évaluation de r en fonction de l'indice de la zone de frottement dans une plaque saine ne contenant pas de défaut.

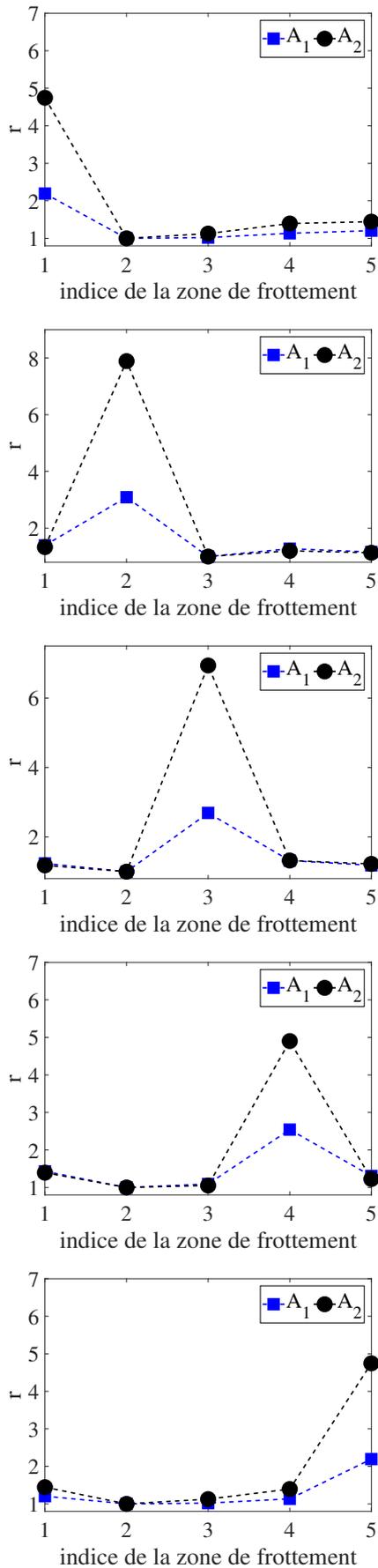


FIGURE 5 – Évaluation de l'inverse de l'erreur quadratique r en fonction de l'indice de la zone de frottement dans une plaque contenant un défaut.

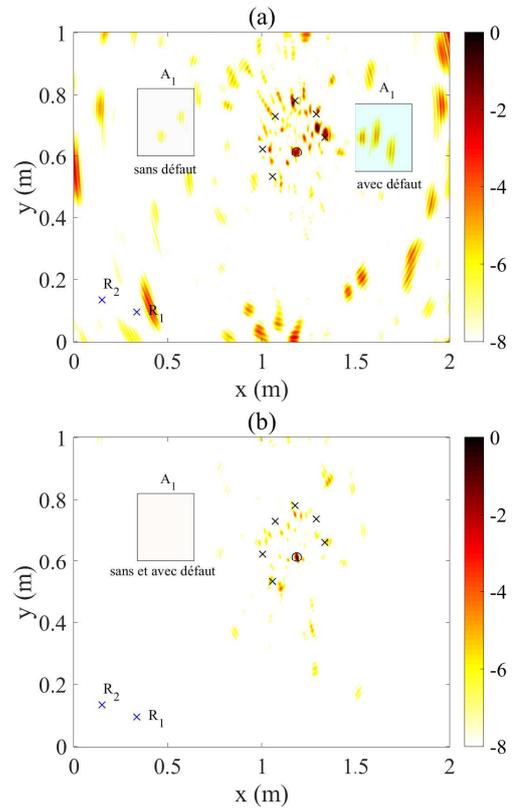


FIGURE 6 – Images de localisation de défaut (en db) par corrélation de bruit de frottement sur l'aire A_1 . (a) avant et (b) après identification des zones de bruit, respectivement. Les rectangles indiquent les zones de bruit.

exemple d'imagerie obtenue en utilisant les six capteurs, avant et après identification des zones de frottement est montré ci-dessous. Les zones de bruit sont indiquées par de petits rectangles.

Ces résultats expérimentaux témoignent donc de la robustesse de cette méthode d'identification des sources de bruit et de son utilité pratique dans le cadre du contrôle santé des structures.

5 Conclusion

Le travail présenté ici a permis d'établir un calcul simple pour l'identification des sources étendues de bruit dans une plaque réverbérante par corrélation de champs acoustiques (cf. équation. (6)).

L'approche de corrélation de bruit ambiant a été appliquée aux ondes de flexion (mode A_0) réverbérées par les bords de la plaque et diffusées par le défaut (une paire d'aimants de forme cylindrique). Ainsi, le comportement moyen de la qualité de reconstruction des fonctions de Green a été exprimée en fonction des propriétés de la plaque. Il a été montré en particulier que l'erreur de reconstruction théorique (RNL) était proportionnelle à l'inverse du nombre de sources de bruit. Néanmoins, pour la matrice de corrélations différentielle, nous avons montré que la capacité de localisation de défaut est plus sensible à la non-stationnarité des sources de bruit qu'à la qualité des fonctions de Green reconstruites.

L'équation. (6) a été validée expérimentalement sur une plaque d'aluminium dans deux cas d'état de santé de la

plaque : sans et avec défaut. Dans ces deux cas, l'erreur quadratique de la différence des corrélations estimées à partir de la zone B et celles du dictionnaire ($\mathbf{C}_{B,ij}(t) - \mathbf{C}_{Z_n,ij}(t)$) est minimale lorsque B coïncide avec celle du dictionnaire. Ces résultats sont en très bon accord avec les prédictions théoriques à condition que les signaux réverbérés soient acquis dans les mêmes conditions expérimentales.

Le problème inverse consiste à utiliser ces résultats pour identifier la zone où le bruit a été créé avant et après apparition de défaut. On montre de cette façon que le bruit de reconstruction des fonctions de Green permet d'identifier précisément les zones de bruit dans une plaque finie. Les travaux futurs seront orientés vers l'étude du comportement moyen de cette méthode d'identification en fonction de la position du couple de récepteurs par rapport aux zones de sources de bruit.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : ANR2011 BS0903901, Projet Blanc PASNI.

Références

- [1] J.-L. Davy. The ensemble variance of random noise in a reverberation room. *J. Sound Vib*, **107** :361–373, 1986.
- [2] C. Draeger, J-Christian Aime, and M. Fink. One-channel time-reversal in chaotic cavities : Experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, **105** :611–617, 1999.
- [3] S. Catheline, T. Gallot, P. Roux, G. Ribay, and J. de Rosny. Coherent backscattering enhancement in cavities : The simple-shape cavity revisited. *Wave motion*, **48** :214–222, 2011.
- [4] E. Moulin, H. Achdjian, J. Assaad, N. Abou Leyla, K. Hourany, and Y. Zaatar. Extraction of the statistical properties of the point source response of a reverberant plate and application to parameter estimation. *J. Acoust. Soc. Am.*, **132** :2165–2168, 2012.
- [5] H. Achdjian, E. Moulin, F. Benmeddour, J. Assaad, and L. Chehami. Source localisation in a reverberant plate using average coda properties and early signal strength. *Acta Acust. Acust*, **100** :834–841, 2014.
- [6] H. Achdjian, E. Moulin, F. Benmeddour, J. Assaad, L. Dupont, and L. Chehami. Reverberation of flexural waves scattered by a local heterogeneity in a plate. *J. Acoust. Soc. Am.*, **140**(1) :157–164, 2016.
- [7] P. C. Waterman and R. Truell. Multiple scattering of waves. *Journal of mathematical physics*, **2** :512–537, 1961.
- [8] Richard L. Weaver and Oleg I. Lobkis. Diffuse fields in open systems and the emergence of the green's function. *J. Acoust. Soc. Am.*, **116** :2731–2734, 2004.
- [9] E. Larose, P. Roux, M. Campillo, and A. Derode. Fluctuations of correlations and Green's function reconstruction : role of scattering. *J. App. Phys*, **103** :114907, 2008.
- [10] A. Aubry and A. Derode. Detection and imaging in a random medium : A matrix method to overcome multiple scattering and aberration. *J. Appl. Phys*, **106** :044903, 2009.
- [11] Richard L. Weaver and Oleg I. Lobkis. Ultrasonics without a source : Thermal fluctuation correlations at mhz frequencies. *Phys. Rev. Lett*, **87** :134301, 2001.
- [12] Oleg I. Lobkis and Richard L. Weaver. On the emergence of the green's function in the correlations of a diffuse field. *J. Acoust. Soc. Am.*, **110** :3011–3017, 2001.
- [13] Lynda Chehami, Emmanuel Moulin, Julien de Rosny, Claire Prada, Olivier Bou Matar, Farouk Benmeddour, and Jamal Assaad. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *Journal of Applied Physics*, **115**(10) :104901, 2014.
- [14] L. Chehami. *Surveillance passive des milieux réverbérants par corrélation de bruit ambiant : Application à la localisation de défauts*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Décembre 2015.
- [15] Lynda Chehami, Julien De Rosny, Claire Prada, Emmanuel Moulin, and Jamal Assaad. Experimental study of passive defect localization in plates using ambient noise. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **62**(8) :1544–1553, 2015.
- [16] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, E. Chatelet, G. Lacerra, K. Gryllias, and F. Massi. Nonlinear secondary noise sources for passive defect detection using ultrasound sensors. *Journal of Sound and Vibration*, **386** :283–294, 2017.
- [17] G. Ribay. *Localisation de source en milieu réverbérant par retournement temporel*. PhD thesis, Université Paris 7, Décembre 2006.