

Exploitation de la propagation réverbérante des ondes élastiques dans les structures : vers un concept de réseau de capteurs SHM à basse consommation.

J. Assaad, F. Benmeddour, E. Moulin,
H. Achdjian, L. Chehami, L. Sadoudi
and M. Bocquet
IEMN UMR CNRS 8520
University of Valenciennes
F-59313 Valenciennes
France

J. de Rosny and C. Prada
Institut Langevin
1 rue Jussieu
F-75000 PARIS
France

S. Djili
Welding and NDT
Research Center
Route de Daly Brahim
16000 Algiers (Chéraga)
Algeria

Résumé—Les méthodes de CND et d'imagerie ultrasonores classiques utilisent des sources contrôlées et synchronisées avec les récepteurs et n'exploitent en général que les premiers paquets d'onde des signaux enregistrés après propagation dans le milieu. À l'inverse, les travaux que nous présentons ici consistent à exploiter les signaux acoustiques dans toute leur complexité, afin d'extraire le maximum d'information à partir d'un nombre limité de capteurs. Les codas ultrasonores, notamment, issues de trajets de propagation multiples et entrelacés dans les structures offrent un moyen original d'extraire des propriétés structurelles utiles (propriétés des matériaux, dimensions, localisation des sources, détection et caractérisation de défaut) des signaux de réverbération excités par des sources connues ou non. En particulier, la possibilité d'utiliser des sources acoustiques naturelles (on parle également de sources « ambiantes », ou encore « sources d'opportunité ») en lieu et place de l'émission d'ondes ultrasonores, ouvre la voie vers des réseaux de capteurs ultrasonores passifs (récepteurs uniquement), donc basse consommation et potentiellement autonomes et peu-intrusifs. Nous présenterons tout d'abord quelques résultats sur l'extraction d'informations globales à partir des moyennes d'ensemble des codas de réverbération. Puis nous illustrerons la détection de défauts par la méthode de corrélation de bruit par des exemples d'applications sur différentes structures (plaques, tubes, rails, ...).

I. INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années, le concept du Contrôle-Santé Intégré CSI ou SHM en anglais (Structural Health Monitoring) se développe. Le CSI a pour but de contrôler de façon autonome et permanente l'intégrité (l'état de santé) des matériaux et des structures au cours de leur utilisation normale. Les capteurs utilisés doivent alors être fixés ou intégrés dans la structure. La propagation des ondes de Lamb (ondes élastiques guidées dans les plaques) est considérée comme un bon candidat pour le concept de CSI, grâce à leur sensibilité aux défauts, la propagation sur de longues distances, la facilité d'émission et de détection par des transducteurs acoustiques. Notre groupe a contribué significativement à ce champ disciplinaire sur les

aspects modélisation de la propagation et de la génération des ondes [1], [2], de l'interaction onde-défait [3] et des techniques de traitement du signal associées [4].

Dans ce type de méthodes de contrôle, comme d'ailleurs dans le CND classique, on s'intéresse en général aux premiers échos du signal et les éventuelles réflexions multiples ne sont pas exploitées. Or dans un tel contexte, il est nécessaire de trouver les moyens d'extraire le maximum d'informations utiles tout en minimisant autant que possible le nombre et l'encombrement des capteurs. Les travaux présentés dans ce papier visent à proposer une contribution originale à cette problématique, en exploitant les signaux réverbérants dans toute leur durée.

Dans une première partie, nous présenterons les études menées récemment sur la moyenne des enveloppes de réverbération dans une structure de type plaque. Un modèle statistique est établi pour prédire les caractéristiques moyennes des signaux dispersifs reçus par quelques récepteurs localisés. Par identification des moyennes expérimentales aux paramètres de ce modèle, il est possible de remonter à des informations utiles sur la structure telles que des propriétés du matériau, l'aire, ou encore la localisation d'une source acoustique avec très peu de ressources matérielles (faible densité de capteurs) [5], [6]. Nous présenterons ici quelques exemples de localisation de source et d'estimation d'aire de plaques.

La seconde partie sera consacrée à la détection de défauts à partir des champs acoustiques ambiants sur des plaques réverbérantes. Le principe est l'extraction des fonctions de Green par corrélation de bruit ambiant sur un réseau de récepteurs [7], [8], [9], [10], [11]. Le travail présenté ici est une application de cette technique dédiée à la surveillance passive de l'apparition du défauts dans une plaque mince de faibles dimensions.

II. ESTIMATION DE PARAMÈTRES À PARTIR DES PROPRIÉTÉS DE RÉVERBÉRATION

A. Théorie et principe de la mesure

Considérons un signal $s_0(t)$ de courte durée et à bande étroite centrée sur ω_0 émis par un point source placé sur la surface d'une plaque à faible atténuation acoustique. Après propagation réverbérante dans la plaque, les signaux sont prélevés en N capteurs arbitrairement répartis sur la plaque (Fig. 1). Dans nos applications, la source sera soit contrôlée (signal émis par un générateur de fonction), soit produite naturellement et imparfaitement reproductible (cassure de mine).

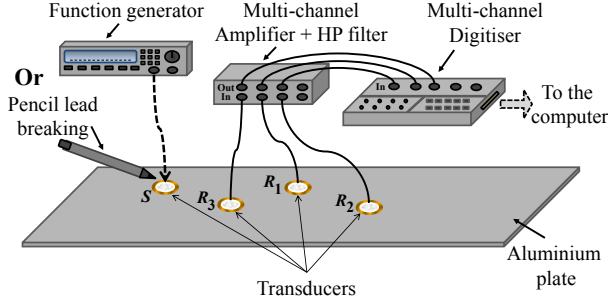


FIGURE 1. Description de la configuration d'étude

L'espérance mathématique $E[\cdot]$ de l'enveloppe des signaux reçus par les capteurs est caractérisée par une fonction exponentielle décroissante de la forme suivante (pour plus de détails voir les travaux précédents [5], [10]) :

$$E[|H^R(t)|^2] \simeq A e^{-2t/\tau}, \quad (1)$$

où $h^R(t)$ est le signal réverbérant reçu et $H^R(t)$ sa représentation analytique complexe. τ est une constante d'atténuation liée au temps de réverbération de la plaque. L'amplitude A est reliée à la fois aux caractéristiques structurales du milieu et aux propriétés de la source acoustique :

$$A = \frac{2\pi v_{g0} D_s}{S}, \quad (2)$$

avec S l'aire de la plaque et D_s un terme lié à l'énergie acoustique injectée par la source dans le milieu, donné par :

$$D_s \simeq 2 r_m I_m^D, \quad (3)$$

où I_m^D est l'énergie du premier paquet d'onde reçu par le $m^{\text{ème}}$ récepteur :

$$I_m^D = \int_0^{T_{0m}} [h_m^D(t)]^2 dt, \quad (4)$$

avec r_m la distance de la source au récepteur et $h_m^D(t) = s(r_m, t)$ le signal correspondant au trajet direct de la source vers le récepteur (premier paquet d'onde).

Un exemple de moyenne des enveloppes des signaux expérimentaux reçus par quelques points sur une plaque est présenté dans la figure 2 (courbe en bleu).

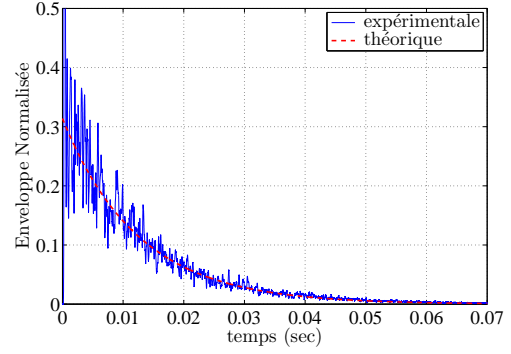


FIGURE 2. Moyenne des enveloppes des signaux mesurés sur cinq capteurs et comparaison avec l'espérance théorique.

Un bon accord est observé entre la courbe théorique (courbe en pointillés rouge), donnée par la relation (1), et celle mesurée.

L'expression théorique de l'équation (1) étant en exponentielle, on peut réaliser un simple ajustement de courbe linéaire par moindres carrés (régression) sur son logarithme, afin d'en déduire les valeurs expérimentales de A et τ , que nous appelons dans la suite A_{fit} et τ_{fit} .

Nous présentons ci-dessous deux applications possibles de ce principe d'estimation de paramètres : la localisation d'une source impulsionnelle et la mesure d'aire d'une plaque.

B. Exemples d'application

1) *Localisation de source*: Si v_{g0} et S sont connues, alors d'après les équations (3) et (2), la distance entre la source et le $m^{\text{ème}}$ récepteur peut être estimée par la relation suivante :

$$r_{m_{est}} \simeq \frac{A_{fit} S}{4\pi v_{g0} I_m^D}. \quad (5)$$

À partir de ces estimations de distances, nous pouvons alors localiser la source en minimisant par méthode de moindres carrés une fonctionnelle calculée sur un ensemble de pixels (x, y) définis sur la plaque. Les détails sur cette technique sont donnés dans la référence [6].

Quelques exemples de résultats expérimentaux de localisation de source sont présentés dans la figure 3. On remarquera ici que la localisation est correcte, même lorsque l'on n'utilise que trois capteurs. Dans les techniques classiques de localisation, un minimum de quatre capteurs est généralement requis pour une localisation sans ambiguïté. C'est ici l'exploitation de la réverbération qui apporte le complément d'information permettant de se contenter de trois capteurs.

2) *Estimation d'aire*: Lorsque la position de la source est connue, ainsi que v_{g0} , l'aire de la plaque S peut être estimée suivant un principe similaire. Pour simplifier les traitements, on dispose dans ce cas les N capteurs sur un cercle centré sur la source (contrôlée dans ce cas, le signal émis étant typiquement une sinusoïde fenêtrée) et de rayon r_0 au minimum de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Nous obtenons à partir des équations (3) et (2) :

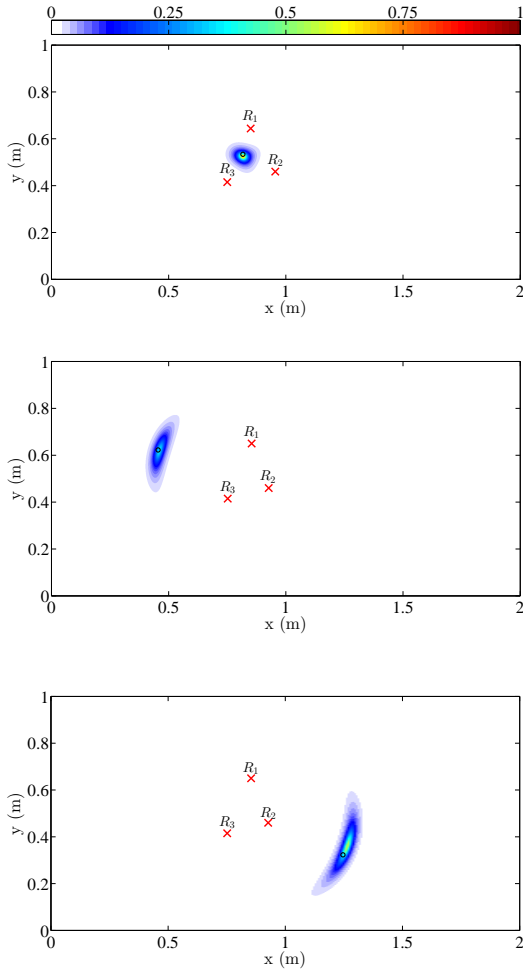


FIGURE 3. Exemples expérimentaux de localisation de source. Le cercle noir représente la position de la source réelle.

$$S = \frac{4\pi r_0 v_{g0}}{A_{fit}} I_M \quad (6)$$

avec $I_M = \frac{1}{N} \sum I_m^D$, la valeur moyenne des termes I_m^D calculés pour chaque capteur à partir de la relation (4).

Des essais expérimentaux ont été menés sur des vitres montées sur les fenêtres de notre laboratoire, de formes géométriques diverses (rectangulaires et polygonales). Au cours de ces essais, cinq capteurs sont placés sur chacune de ces vitres et les signaux sont enregistrés et traités afin de pouvoir estimer les aires de ces vitres. Le rayon r_0 du dispositif est ici de quelques cms. Les résultats du tableau (I) représentent les valeurs des surfaces des vitres estimées, les valeurs réelles et l'erreur relative entre les deux. Nous constatons une bonne concordance entre les valeurs estimées et les valeurs réelles.

	estimée	réelle	Err. rel.
vitre 1	1.214	1.216	0.17
vitre 2	1.86	1.84	1.08
vitre 3	2.79	2.66	4.88
vitre 4	4.21	4.02	4.7
vitre 5	1.28	1.25	2.4

TABLE I
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX D'ESTIMATION D'AIRES DES VITRES (EN M²) ET COMPARAISON À LEURS VALEURS RÉELLES. LA DERNIÈRE COLONNE REPRÉSENTE L'ERREUR RELATIVE (EN %) ENTRE LES DEUX.

III. IMAGERIE PAR CORRÉLATION DE BRUIT

A. Relation théorique entre matrice de corrélation passive et signaux actifs

Nous avons montré dans une publication récente [12], qu'il existait une relation simple entre $h(\mathbf{r}_l^R, \mathbf{r}_l^R, t)$ et la matrice de corrélations mesurée dans une plaque.

Cette relation peut s'écrire :

$$C_{ll'}(t) = [h(\mathbf{r}_l^R, \mathbf{r}_{l'}^R, t) - h(\mathbf{r}_l^R, \mathbf{r}_{l'}^R, -t)] \otimes g(t) + n_{ll'}(t), \quad (7)$$

avec

$$g(t) = \frac{N_S \bar{\phi}^2 \tau_a}{2\rho_s} \int_{-\infty}^t q(-\tau) d\tau. \quad (8)$$

et $n_{ll'}(t)$ un terme additif incohérent qui converge vers 0 lorsque le nombre de sources de bruit augmente.

Ainsi les temps positifs de la fonction de corrélation peuvent être interprétés comme la réponse que l'on reçoit sur le récepteur $\mathbf{r}_{l'}$ quand l'autre récepteur à la position \mathbf{r}_l émet $g(t)$, et vice versa (par réciprocité acoustique). C'est ce principe que nous allons utiliser pour réaliser la détection et la localisation d'un endommagement apparaissant dans la plaque.

B. Détection et localisation passive d'un défaut

Dans cette partie, on montre qu'à partir de l'ensemble des fonctions de corrélation entre chaque couple de récepteurs, il est possible d'utiliser des algorithmes classiques comme la formation de voies, pour localiser le défaut.

1) *Description du dispositif expérimental*: Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 4.

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). Comme excitation, un générateur de fonctions (modèle Agilent 33120A) engendre un signal transitoire $q(t)$ qui consiste en une période de sinusoïde à 20 kHz.

Vingt-huit transducteurs piézoélectriques (E/R) ont été collés sur la surface de la plaque. Vingt d'entre eux 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 Instrument) de huit voies qui échantillonne les signaux à 2MEch/s pendant 40msec. Les signaux enregistrés

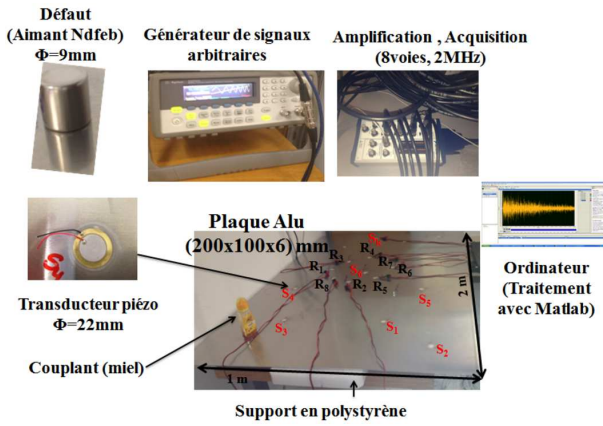


FIGURE 4. Dispositif expérimental.

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.

2) *Images de localisation d'un défaut*: L'algorithme utilisé ici 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 de pixels sondées. 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 .

Cet algorithme 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 (Fig. 5) et (0.146,0.155)m (Fig. 6).

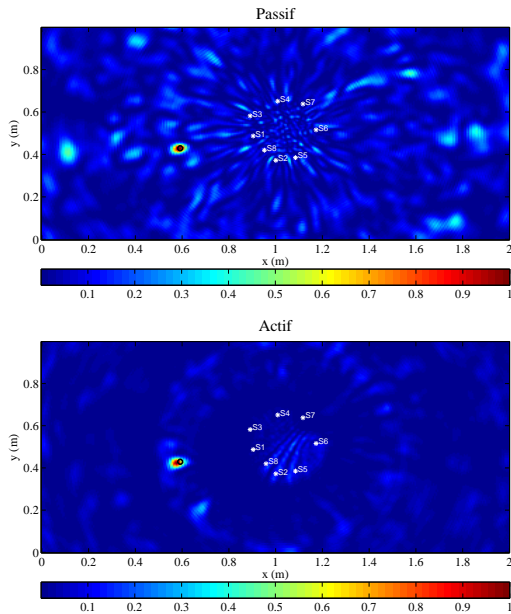


FIGURE 5. Image du défaut obtenue à partir de $\Delta C(t)$ (acquise pour 20 sources de bruit) et de $\Delta h(t)$ (Actif).

Comme moyen de contrôle, on dispose également de la

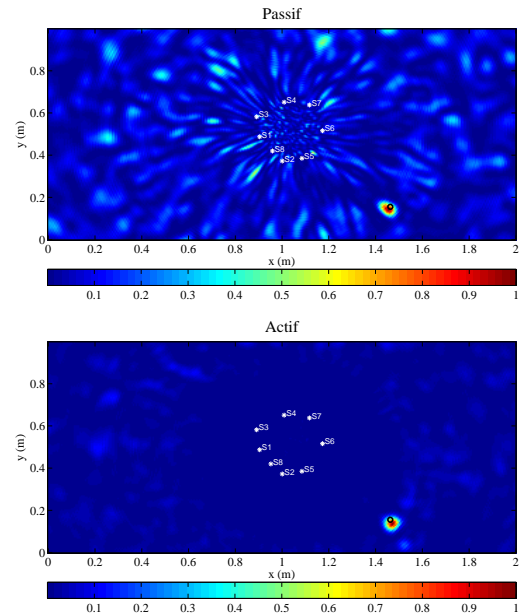


FIGURE 6. Image du défaut obtenue à partir de $\Delta C(t)$ (acquise à partir de 20 sources de bruit) et de $\Delta h(t)$ (Actif).

matrice des réponses inter-éléments $\Delta h(t)$ (méthode active). L'angle gauche bas de la plaque a été choisi comme origine, la position du défaut est indiquée par un cercle noir (Figure 5). Les positions des récepteurs sont indiquées par '*'.

La qualité des images obtenues avec $\Delta C(t)$ moyennées sur 20 sources aléatoires sont naturellement moins bonnes que celles obtenues 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.

IV. CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce papier montrent que l'exploitation des propriétés des signaux de réverbération acoustique de longues durées enregistrés dans une structure permettent d'extraire des informations utiles sur ses caractéristiques avec un nombre limité de capteurs. Deux méthodes permettant d'exploiter ces propriétés de réverbération sont illustrées : (1) une identification de courbes sur l'enveloppe moyenne et (2) la corrélation du champ de réverbération.

La première méthode est d'abord appliquée à la localisation d'une source acoustique à partir de seulement trois capteurs, puis à l'estimation de l'aire d'une plaque sans aucune mesure géométrique. Ces deux applications à notre sens tout à fait originales se caractérisent par des traitements relativement simples, un faible nombre de capteurs, aucune mesure temporelle ou géométrique et la non-nécessité de synchronisation entre les capteurs.

La seconde méthode est appliquée à la détection et la localisation d'un défaut dans une plaque d'aluminium. 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.

REMERCIEMENTS

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

RÉFÉRENCES

- [1] E. Moulin, J. Assaad, C. Delebarre, H. Kaczmarek, and D. Balageas. Piezoelectric transducer embedded in a composite plate : Application to Lamb wave generation. *J. Appl. Phys.*, 82 :2049–2055, 1997.
- [2] E. Moulin, S. Grondel, J. Assaad, and L. Duquenne. Modeling of a surface-mounted Lamb wave emission-reception system : Applications to structural health monitoring. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 :3521–3527, 2008.
- [3] F. Benmeddour, S. Grondel, J. Assaad, and E. Moulin. Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches. *Ultrasonics*, 49 :202–205, 2009.
- [4] S. Grondel, J. Assaad, F. El Youbi, E. Moulin, and N. Abou Leyla. Experimental Lamb mode identification in a plate containing a hole using dual signal processing. *Meas. Science Technol.*, 19 :125703, 2008.
- [5] E. Moulin, H. Achdjian, J. Assaad, N. Abou Leyla, K. Hourany, and Y. Zaatari. 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.
- [6] 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.
- [7] R. Weaver and O. Lobkis. Ultrasonics without a Source : Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies. *Phys. Rev. Lett.*, 87 :134301, 2001.
- [8] A. Derode, E. Larose, M. Tanter, J. de Rosny, A. Tourin, M. Campillo, and M. Fink. Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 :2973–2976, 2003.
- [9] E. Larose, O. Lobkis, and R. Weaver. Passive correlation imaging of a buried scatterer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119 :3549–3552, 2006.
- [10] N. Abou Leyla, E. Moulin, and J. Assaad. Influence of a localized defect on acoustic field correlation in a reverberant medium. *J. Appl. Phys.*, 110 :084906, 2011.
- [11] 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.
- [12] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. Bou Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *J. Appl. Phys.*, 115 :104901, 2014.