

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Contrôle-santé de structures aéronautiques par corrélation de champ acoustique ambiant : principe, conditions d'application et voies d'optimisation.

Najib Abou Leyla¹, Emmanuel Moulin¹, Jamal Assaad¹

¹ IEMN, UMR CNRS 8520, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, F-59313 Valenciennes cedex 9

La corrélation d'un champ acoustique diffus constitue un moyen de retrouver de façon passive la fonction de Green entre deux points d'une structure. L'idée est ici d'exploiter le champ produit dans la structure par les sources de bruit ambiant dans un contexte de vol aéronautique. Nous cherchons alors, en réalisant de façon périodique l'intercorrélation des signaux enregistrés par deux capteurs acoustiques (dits « de mesure ») fixés sur la structure, à réaliser un suivi de l'évolution de son état. En particulier, nous avons considéré le cas défavorable où les sources sont localisées et présentent éventuellement des caractéristiques variables (position, spectre émis). Ceci pourrait être le cas, par exemple, pour le champ produit par un turboréacteur ou par des phénomènes aéroacoustiques locaux (structures cohérentes d'écoulements, décollement de couche limite). Dans cette situation, il s'avère alors impossible de séparer dans l'information mesurée les contributions des caractéristiques de la structure et des caractéristiques de la source. Nous avons montré que ce problème pouvait être contourné en utilisant un troisième capteur (dit « de référence ») permettant d'identifier au préalable la configuration de source en cours au moment de la mesure. La condition pour que cette technique fonctionne convenablement est que le signal reçu par ce capteur soit le moins sensible possible à l'apparition d'un endommagement dans la zone d'inspection. Le travail présenté ici met particulièrement l'accent sur ce point critique. Un certain nombre de paramètres physiques pertinents ont été identifiés et leur influence sur la mesure réalisée a été quantifiée. En particulier, le rôle prépondérant joué par le positionnement relatif de la source et des capteurs (de mesure et de référence) par rapport à la zone d'inspection, mais aussi les caractéristiques de la structure (atténuation, réverbération), a été mis en évidence.

1 Introduction

Depuis plusieurs années, des recherches menées pour la plupart dans les domaines de l'acoustique sous-marine et sismique ont démontré la possibilité de retirer à partir du bruit ambiant naturel des informations quantitatives sur la nature du milieu de propagation [1]. La théorie prédit en effet que, dans l'hypothèse où le champ acoustique est parfaitement diffus, la fonction d'intercorrélation des signaux enregistrés en deux points de mesure n'est autre que la fonction de Green entre ces deux points.

Le but des travaux présentés dans ce papier est d'appliquer ce principe au contrôle-santé des structures aéronautiques. En effet, en condition de vol, les turbo-réacteurs et les phénomènes aéroacoustiques de couplage fluide-structure constituent des sources acoustiques naturelles. Les bénéfices attendus d'une méthode de détection passive sont avant tout un allègement de l'électronique embarquée dans son aspect matériel et l'optimisation de la consommation d'énergie. Il deviendrait alors réaliste d'envisager un réseau de capteurs autonomes conçu pour réaliser un contrôle-santé intégré (CSI).

La difficulté pour cette application réside dans le fait que le champ acoustique exploité peut d'une part être assez éloigné d'un champ théorique parfaitement diffus,

et d'autre part présenter des caractéristiques instationnaires. Néanmoins, la faisabilité d'une telle technique a été vérifiée il y a quelques années [2, 3] et une solution permettant de contourner le problème évoqué ci-dessus a été proposée et évaluée [4]. L'idée première retenue ici est que même si l'information recueillie de façon passive n'est pas la fonction de Green, il est tout de même possible de réaliser de cette manière un suivi de l'état du matériau. Il est intéressant de remarquer que ces résultats rejoignent tout à fait les conclusions de travaux récents réalisés par ailleurs en acoustique sismique [5].

2 Principe de la méthode

Considérons une source ponctuelle, supposée unique et placée en un point O, émettant un signal acoustique aléatoire stationnaire $e(t)$ dans un milieu fermé (Fig. 1). On notera h_{XY} la fonction de Green entre deux points X et Y quelconques. Si deux récepteurs sont placés en deux points A et B, l'intercorrélation entre les deux signaux reçus peut alors s'exprimer par :

$$R_{u_A u_B}(t) = h_{OA}(-t) * h_{OB}(t) * R_{ee}(t) \quad (1)$$

où $R_{xy} = \langle x(\tau) y(t+\tau) \rangle$ correspond à la définition classique de la corrélation de deux signaux aléatoires $x(t)$ et $y(t)$, la notation $\langle . \rangle$ représentant l'espérance

mathématique. Le symbole $*$ indique l'opération de convolution.

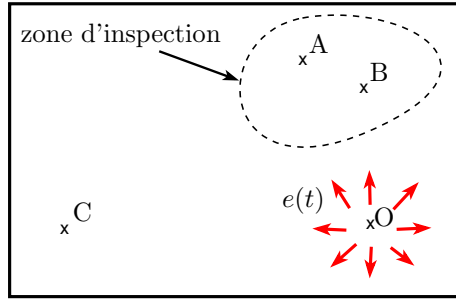


FIGURE 1 – Schéma descriptif du problème.

Si les caractéristiques liées à la source (position du point O et signal émis e) sont stationnaires, alors la fonction d'intercorrélation $R_{u_A u_B}$ (Eq. 1) est potentiellement porteuse d'une information sur l'état de la structure. La condition pour cela est que l'une ou l'autre des fonctions de Green h_{OA} ou h_{OB} soit affectée de façon significative par l'apparition d'un endommagement dans la structure. L'idée sous-jacente ici est que le champ acoustique, sans nécessairement être diffus au sens rigoureux du terme, est « bien réparti ». Le matériau doit donc être suffisamment peu atténuant pour que la présence d'un grand nombre de multi-trajets de propagation rende improbable la non-détection d'un endommagement apparaissant à une position donnée. Ce point sera abordé plus en détails dans la section 3.

Les signaux recueillis étant aléatoires, seule une estimation de la fonction de corrélation peut bien entendu être obtenue en pratique. Le raisonnement exposé ci-dessus reste valable, pourvu que l'estimateur choisi fournisse un résultat expérimentalement reproductible. Ce point particulier avait été mis en évidence et présenté dans [3]. Concrètement donc, les signaux sont enregistrés sur une durée limitée (supérieure au temps de réverbération dans la structure, afin de recueillir toute l'information contenue dans les fonctions de Green) et leur intercorrélation est calculée. Afin d'améliorer le rapport signal à bruit, cette intercorrélation est ensuite moyennée sur un nombre N_m d'acquisitions indépendantes.

Lorsque les caractéristiques de source sont susceptibles d'évoluer d'une mesure à l'autre (situation réaliste), il devient hasardeux d'interpréter une modification de la fonction d'intercorrélation par l'apparition d'un défaut. La solution proposée est alors de discrétiser le nombre de configurations de sources possibles, puis de mettre en œuvre une méthode permettant de déterminer la configuration courante au moment de la mesure, indépendamment de la présence ou non d'un endommagement.

Le principe du miroir à retournement temporel (MRT) [6, 7] apporte une piste de solution à ce problème. Si l'on imagine en effet qu'un ensemble de récepteurs est disposé de façon à former un MRT parfait, alors il est théoriquement possible de refocaliser spatialement le champ acoustique à sa source [7]. Ceci signifie que les signaux enregistrés sur ces récepteurs contiennent toute l'information utile sur la position de la source. Dans les cas favorables, un récepteur unique

peut même être suffisant [8]. C'est sur ce principe que reposent les « interfaces acoustiques tangibles » [9, 10], permettant de localiser l'impact d'un doigt à la surface d'un objet de forme quelconque à partir d'une opération de retournement temporel virtuelle effectuée numériquement. Cette opération consiste en réalité à réaliser une série d'intercorrélations entre le signal reçu et des signaux de référence enregistrés au préalable dans une base de données pour chacune des positions sur l'objet.

En appliquant le même raisonnement, on peut donc supposer que l'autocorrélation du signal relevé sur un capteur de « référence » (noté C sur la figure 1) judicieusement placé permettra d'identifier les caractéristiques de la source. Une base de données contenant les signatures de toutes les configurations possibles (ou du moins d'un certain nombre d'entre elles amenées à se reproduire) devra donc être constituée pour cela. Cette base de données devra également contenir les intercorrélations des signaux en A et B enregistrées pour l'état sain de la structure (avant endommagement). Le principe est alors qu'à chaque mesure, l'intercorrélation soit comparée à sa référence pour la configuration de source identifiée. Une synthèse de l'ensemble de ces traitements est donnée sur la figure 2.

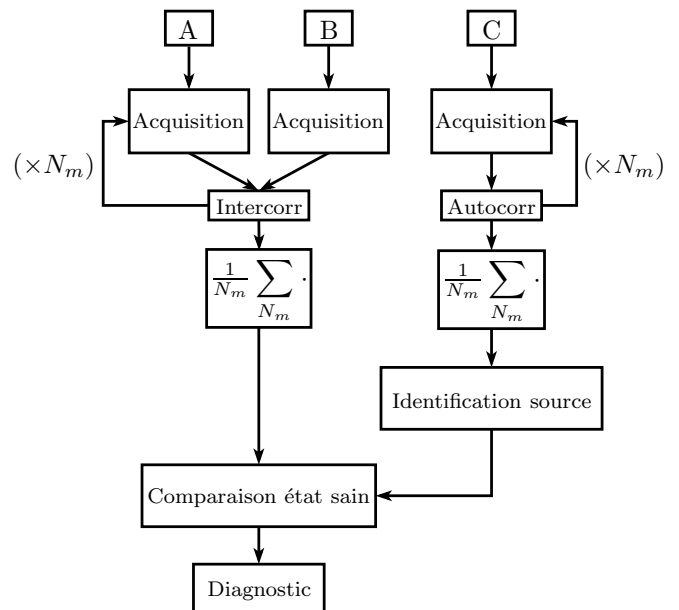


FIGURE 2 – Organigramme des traitements.

Les résultats préliminaires obtenus précédemment avaient permis de montrer la validité des hypothèses mentionnées et, par suite, la faisabilité du principe de détection passif pour l'application CSI [3, 4].

3 Sensibilité et placement des capteurs

Comme nous l'avons vu, le principe même de la méthode proposée repose sur la possibilité de disposer à la fois sur la structure d'étude des capteurs de mesure sensibles à l'apparition d'un endommagement dans leur voisinage et un (ou des) capteur(s) de référence aussi insensible(s) que possible. Dans un souci d'optimisation de

la technique, il est donc essentiel de pouvoir quantifier précisément cette sensibilité en fonction de paramètres expérimentaux tels que la position des capteurs par rapport à la source et la taille de la zone d'inspection.

3.1 Théorie

Une description déterministe très simplifiée avait permis de prévoir les ordres de grandeurs de l'évolution de la sensibilité à un défaut localisé, ainsi qu'un certain nombre de paramètres globaux associés [4]. Cette description s'est cependant avérée peu pertinente dans certaines conditions (variation de la fréquence de filtrage, notamment). En outre, elle ne permet pas une compréhension précise des phénomènes physiques mis en jeu.

Une description plus satisfaisante a alors été obtenue à partir d'un modèle statistique. L'idée est de considérer une situation expérimentale donnée comme une réalisation d'un processus aléatoire. Ce que nous obtenons alors est une estimation du comportement « moyen » pour l'ensemble des conditions du même type. Nous nous contenterons ici de donner le principe de ce développement théorique, ainsi que les résultats principaux obtenus. Le développement complet, trop long pour être détaillé ici, est disponible dans la thèse de N. Abou Leyla [11] et devrait être publié prochainement.

La méthode des source-images (voir par exemple [12]) permet de considérer la fonction de Green dans un milieu réverbérant comme une superposition de toutes les fonctions de Green entre les images du premier point et le second, dans le même milieu supposé infini. Après filtrage passe-bande par convolution avec un signal $s_{\omega_0}(t)$ de spectre centré sur la pulsation ω_0 (ce qui présente un intérêt pratique, comme nous le verrons dans la section 4), la réponse impulsionnelle filtrée h_0 obtenue peut donc être donnée de façon approchée par :

$$h_0(t) = A \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\tau_i/\tau} s_{\omega_0}(t - \tau_i) \quad (2)$$

où les τ_i sont les temps d'arrivée successifs, associés aux distances entre les source-images et le récepteur (ou multi-trajets). τ est le temps caractéristique associé à l'atténuation sur un trajet de propagation. Il est lié au temps de réverbération dans la structure. A est une constante dépendant notamment de la nature du matériau. Sa valeur exacte ne présente pas d'intérêt ici. On notera que l'effet de la dispersion est ici négligé (le signal s_{ω_0} conserve sa forme au cours de la propagation sur les multi-trajets ; ce qui ne représente pas une erreur importante si s_{ω_0} est à bande suffisamment étroite) et que les réflexions aux frontières du domaine sont supposées totales et sans conversion de mode (spéculaire).

Pour $i \geq 1$, les temps d'arrivée τ_i peuvent être considérés comme des réalisations d'une variable aléatoire dont le comportement est décrit par une densité $\lambda(t)$. Celle-ci correspond à la probabilité par unité de temps d'obtenir un des τ_i dans un intervalle de durée élémentaire dt (processus de Poisson non-stationnaire). Le temps d'arrivée initial τ_0 est quant à lui déterministe et dépend uniquement de la distance source-récepteur.

Lorsqu'un endommagement modéré apparaît dans la structure, la fonction de Green filtrée est légèrement modifiée et peut alors s'écrire $h(t) = h_0(t) + \Delta h(t)$. En considérant que le défaut agit comme une source secondaire, Δh peut être approché par une expression du même type que celle de l'équation (2) :

$$\Delta h(t) = \alpha A \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\tau'_i/\tau} s_{\omega_0}(t - \tau'_i) \quad (3)$$

où les τ'_i ($i \geq 1$) sont de la même manière des réalisations d'une variable aléatoire de densité $\lambda'(t)$ et τ'_0 est lié à la somme des deux distances source-défaut et défaut-récepteur. Le paramètre α représente l'intensité globale de la réponse du défaut aux ondes incidentes.

On peut montrer aisément que la densité des temps d'arrivée λ pour la fonction h_0 croît de façon asymptotiquement linéaire avec le temps [12]. Pour Δh , nous avons mis en évidence le fait que la directivité de la diffusion sur le défaut avait une influence importante sur la densité $\lambda'(t)$. Plus précisément, l'expression de $\lambda'(t)$ évolue entre une fonction linéaire du temps lorsque le défaut a un rayonnement préférentiellement unidirectionnel (réponse dans la direction de l'onde incidente et/ou la direction opposée) et un polynôme cubique en t lorsque le défaut présente des caractéristiques de rayonnement isotropes (réponse omnidirectionnelle) [11].

À partir des expressions (2) et (3), il est possible de formuler les autocorrélations R_0 et R de h_0 et h respectivement. On définit alors l'erreur $\Delta R = R - R_0$ introduite sur la corrélation par la présence du défaut, puis on calcule les espérances mathématiques des énergies de ΔR et R_0 . Le rapport entre les deux, noté r [4, 11], permet alors de quantifier la sensibilité moyenne de la fonction de corrélation au défaut, en fonction des différents paramètres introduits dans le modèle (α , τ , $\tau_d = \tau'_0 - \tau_0$, caractéristiques de la structures et caractéristiques de rayonnement du défaut). Les valeurs des paramètres τ et α peuvent être estimées à partir des signaux expérimentaux relevés sur une réalisation de la mesure.

Les courbes obtenues dans les deux cas extrêmes de directivité du défaut, évoqués plus haut, sont tracées sur la figure 3. Pour comparaison, la courbe fournie par le modèle déterministe préliminaire développé dans [4] est également tracée. Cette courbe apparaît être associée à un comportement de défaut intermédiaire. On montre qu'elle correspond en réalité au résultat qu'on obtiendrait avec le modèle statistique en prenant des densités λ et λ' uniformes.

Pour le cas d'un défaut idéalisé de diffusion unidirectionnelle, et lorsque la structure d'étude est une plaque rectangulaire, on montre [11] que l'expression approchée suivante est obtenue :

$$r(\tau_d) = \alpha^2 \frac{1 + \frac{1}{4}\gamma\tau(2\tau_d + 2\tau_0 + \tau)}{\frac{1}{4}\beta\tau(2\tau_0 + \tau)} e^{-2\tau_d/\tau} \quad (4)$$

avec β et γ les coefficients de proportionnalité des densités de temps d'arrivée $\lambda(t)$ et $\lambda'(t)$ respectivement. Ces paramètres dépendent des caractéristiques de la structure et du défaut. Ils sont donnés par les expressions suivantes :

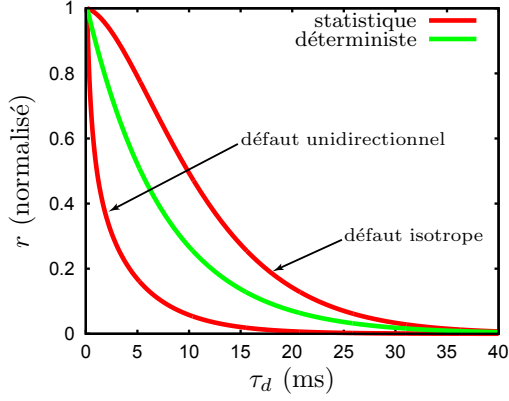


FIGURE 3 – Sensibilité à l’endommagement en fonction des caractéristiques de directivité.

$$\begin{cases} \beta = \frac{2\pi c^2}{S} \\ \gamma(\tau_d) \simeq \frac{4R}{\pi c(\tau_d + \tau_0)} \beta \end{cases} \quad (5)$$

où c est la vitesse de propagation acoustique à la fréquence considérée, S est la surface de la plaque et R est le rayon du défaut.

3.2 Résultats expérimentaux

La structure considérée ici est une plaque d’aluminium de surface $2 \times 1 \text{ m}^2$ et de 6 mm d’épaisseur. Un émetteur et un récepteur piézoélectriques ont été fixés à des positions quelconques en surface de la plaque. Afin de permettre la répétition de l’expérience et le déplacement du défaut, celui-ci est en réalité un petit cylindre d’aluminium de 1,25 cm de rayon couplé à la plaque au moyen d’un gel visqueux. Le signal d’excitation est une sinusoïde fenêtrée par une fenêtre de Hanning. Les signaux reçus en l’absence et en présence du défaut sont enregistrés sur une durée supérieure au temps de réverbération (500 ms) et leurs autocorrélations R_0 et $R = R_0 + \Delta R$ sont calculées numériquement. Le paramètre r expérimental peut alors être estimé à partir de l’équation suivante :

$$r = \frac{\int_0^{+\infty} \Delta R^2 dt}{\int_0^{+\infty} R_0^2 dt} \quad (6)$$

En effectuant plusieurs fois l’expérience avec des positions de défaut différentes, un balayage sur les valeurs de τ_d peut alors être réalisé. Dans la gamme de fréquences considérée ici (5-15 kHz), le défaut présente des caractéristiques de rayonnement préférentiellement unidirectionnelles (diagramme de directivité mesuré constitué principalement de deux lobes importants dans les directions 0° et 180°). Nous pouvons donc comparer les résultats expérimentaux à l’expression théorique donnée dans l’équation (4). Cette comparaison est présentée dans la figure 4.

L’évolution de la sensibilité en fonction de τ_d est donc très correctement prédite par la théorie. La valeur de τ_d étant directement liée aux positions relatives de la source, du défaut et des capteurs, l’expression de l’équation 4 pourra être mise à profit pour optimiser le

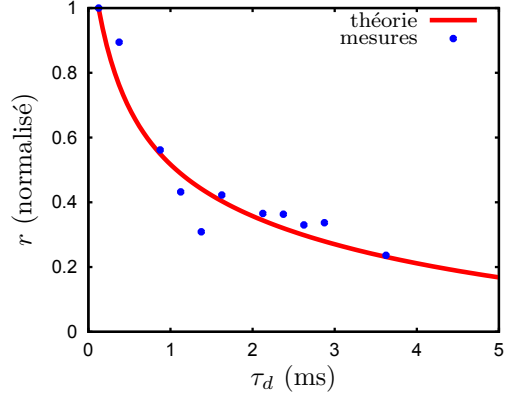


FIGURE 4 – Sensibilité à l’endommagement pour le cas unidirectionnel et comparaison avec l’expérience.

placement d’un réseau de capteurs en fonction des caractéristiques connues de la structure.

4 Application

L’application pratique du principe de CSI passif est illustrée ici en utilisant la même plaque que dans la section précédente et une source supposée représentative d’une situation réelle (turbo-réacteur émettant un bruit large bande dans la structure à laquelle il est fixé, par exemple). Le champ acoustique est en effet généré par un haut-parleur amplifié, fonctionnant dans le domaine audible (jusqu’à environ 8 kHz), placé sous la plaque. Un générateur de bruit électrique large bande, émettant en continu, est connecté à l’entrée du haut-parleur. Trois récepteurs piézoélectriques ont été collés en surface, à des positions notées respectivement A, B et C. Le défaut utilisé étant le même que dans l’étude précédente, la courbe tracée sur la figure 4 permet de définir un placement convenable pour les capteurs. Ainsi, en se donnant un critère sur la valeur de r , on peut définir précisément une zone d’inspection autour des capteurs A et B. Le capteur C étant quant à lui placé bien entendu hors de cette zone (voir figure 1).

L’intercorrélation des signaux reçus en A et B ainsi que l’autocorrélation du signal reçu en C sont effectuées en parallèle. La procédure est alors répétée N_m fois, puis les moyennes des N_m intercorrélations et des N_m autocorrélations sont calculées (voir figure 2). Dans l’exemple présenté ici, une valeur de N_m de 150 s’est avérée nécessaire pour atteindre un rapport signal à bruit suffisant pour garantir la reproductibilité du résultat et la mise en évidence de l’influence du défaut. Enfin, plutôt que de travailler sur les corrélations brutes, une analyse par gammes de fréquence est plus judicieuse pour mettre en évidence les effets intéressants. Ainsi, un filtrage passe-bande par simple convolution avec un signal sinusoïdal de fréquence f_0 fenêtré sur N périodes par une fenêtre de Hanning a été appliqué à chaque inter- ou autocorrélation moyennée. En faisant un balayage sur les valeurs de f_0 , on arrive naturellement à une représentation temps-fréquence contenant l’ensemble des informations pertinentes.

Les résultats obtenus à l’issue de ces traitements sont présentés sur les figures 5 et 6 pour les inter- et autocorrélations, respectivement. Sur chacune de ces deux

figures, la mesure effectuée sur la plaque sans défaut est représentée à gauche et la mesure après ajout du défaut est représentée à droite.

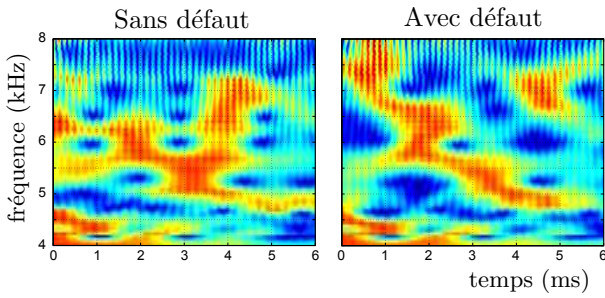


FIGURE 5 – Détection de l’endommagement : représentation temps-fréquence de la fonction d’intercorrélation sur les capteurs A et B.

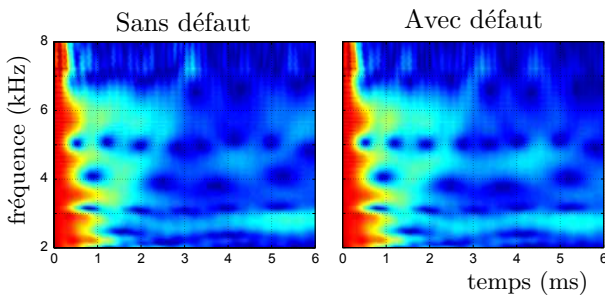


FIGURE 6 – Reconnaissance des caractéristiques de source : représentation temps-fréquence de la fonction d’autocorrélation sur le capteur C.

Il est manifeste, d’après la figure 5, que la présence du défaut a une influence très significative sur la fonction d’intercorrélation. Comme dans le cas d’une mesure classique en émission-réception, le défaut induit à la fois des variations d’amplitude et de phase sur le signal mesuré.

A l’inverse, conformément aux attentes, la fonction d’autocorrélation sur le capteur C (figure 6) est très peu affectée. Les structures en niveau de couleur visibles sur les deux images sont en effet globalement similaires. Or, ces structures (et notamment la position des minima locaux - les zones sombres - dans le plan temps-fréquence) sont directement liées aux caractéristiques de la source. Des mesures du même type (non présentées ici par souci de concision) réalisées en déplaçant légèrement la source et/ou en modifiant son contenu spectral, mettent en effet en évidence la sensibilité du résultat obtenu aux caractéristiques de source. En mettant en place une reconnaissance automatisée de l’information contenue dans l’autocorrélation, parmi un certain nombre de cas de référence stockés au préalable dans une base de données, la variabilité de ces caractéristiques ne posera effectivement plus de problème pour la détection d’endommagement.

5 Conclusion et perspectives

Les résultats présentés dans ce papier permettent d’envisager la mise en place de réseaux de capteurs pas-

sifs pour la détection d’endommagement dans des structures excitées par un champ acoustique ambiant. Les principes de la méthode de détection ont été exposés et validés, et un modèle statistique permettant une optimisation des paramètres a été présenté. Si ce travail est visiblement prometteur, un certain nombre d’aspects devront encore être approfondis aussi bien sur le plan expérimental que théorique.

La partie algorithmique, notamment, est un élément important pour une mise en application pratique. Comme évoqué plus haut, les comparaisons entre auto- et inter-corrélations pour l’identification de source (procédures de classification) et la détection d’endommagement devront être automatisées. Les probabilités de fausse alarme et fausse détection devront également être précisément évaluées pour les algorithmes choisis.

Un autre point fondamental à moyen terme est l’interprétation quantitative des résultats obtenus en terme de caractérisation du défaut. Si, comme nous l’avons vu, le principe permet clairement sa détection, la possibilité d’aller plus loin que cette simple détection n’est pour l’instant pas très claire. Le fait que les fonctions d’intercorrélation diffèrent des fonctions de Green ne facilite bien sûr pas l’interprétation. La simulation pourra apporter une aide précieuse sur cette question.

Il conviendra également d’étudier en détails la sensibilité de la méthode aux paramètres d’environnement (en particulier la température). Si besoin, certains de ces paramètres pourraient être inclus dans la base de données. Quelques publications récentes tendent à montrer qu’une séparation explicite de l’influence des changements de température et du défaut sur les champs ultrasonores de nature diffuse est envisageable [13, 10, 5].

Plus généralement, l’application du principe présenté ici peut dépasser le cadre de la corrélation d’un champ ambiant créé par une source « naturelle ». L’utilisation de sources acoustiques artificielles, pourrait en effet permettre d’élargir le champ d’application. Ceci peut rester extrêmement intéressant par rapport aux techniques conventionnelles de CSI dans la mesure où, les récepteurs restant intégrés à demeure, la source acoustique en question n’a besoin d’être ni intégrée, ni même synchronisée avec le réseau de récepteurs.

Enfin, puisque la propriété de corrélation de champ est essentiellement liée à la phase des signaux, la perte de l’information d’amplitude ne doit pas altérer de façon importante les résultats obtenus. Ainsi, comme l’ont montré Larose *et al.* [14], le calcul numérique des corrélations sur un bit permet même sous certaines conditions d’améliorer la convergence vers la fonction de Green. L’application à notre problème pourrait être très avantageuse, puisque le calcul d’une corrélation mono-bit peut être effectué en temps réel par des circuits très simples.

Références

- [1] E. Larose, L. Margerin, A. Derode, B. van Tiggelen, M. Campillo, N. Shapiro, A. Paul, M. Stehly, and M. Tanter. Correlation of random wavefields : An interdisciplinary review. *Geophysics*, 71 :SI11–SI21, 2006.

- [2] 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 :1987–1995, 2007.
- [3] N. Abou Leyla, E. Moulin, J. Assaad, S. Grondel, and P. Poussot. Structural Health Monitoring using cross-correlation of an ambient noise field. In *Program abstracts Acoustics'08, J. Acoust. Soc. Am.*, volume 123, page 3698, Paris, France, 2008.
- [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] C. Hadziioannou, E. Larose, O. Coutant, P. Roux, and M. Campillo. Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation : Laboratory experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 125 :3688–3695, 2009.
- [6] D. Cassereau and M. Fink. Focusing with plane time-reversal mirrors : An efficient alternative to closed cavities. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94 :2373–2386, 1993.
- [7] G. Ribay, J. de Rosny, and M. Fink. Time reversal of noise sources in a reverberation room. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117 :2866–2872, 2005.
- [8] C. Draeger, J.-C. Aime, and M. Fink. One-channel time-reversal in chaotic cavities : Experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105 :618–625, 1999.
- [9] R. K. Ing, N. Quieffin, S. Catheline, and M. Fink. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Appl. Phys. Lett.*, 87 :204104, 2005.
- [10] G. Ribay, S. Catheline, D. Clorennec, R. K. Ing, N. Quieffin, and M. Fink. Acoustic impact localization in plates : properties and stability to temperature variation. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 54 :378–385, 2007.
- [11] N. Abou Leyla. *Contrôle Santé Intégré passif par corrélation de champ acoustique ambiant. Application aux structures aéronautiques*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2010.
- [12] J. Cuenca, F. Gautier, and L. Simon. The image source method for calculating the vibrations of simply supported convex polygonal plates. *J. Sound Vib.*, 322 :1048–1069, 2009.
- [13] J. E. Michaels, Y. Lu, and T. E. Michaels. Methodologies for quantifying changes in diffuse ultrasonic signals with applications to structural health monitoring. In *Proc. SPIE*, volume 5768, pages 97–105. T. Kundu, 2005.
- [14] E. Larose, A. Derode, M. Campillo, and M. Fink. Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse wave fields. *J. Appl. Phys.*, 95 :8393, 2004.