Détection ultrasonore et localisation de défaut de contact sous sollicitations basses fréquences

Lynda Chehami, Emmanuel Moulin, Marina Terzi, Maxime Farin, Farouk Benmeddour

▶ **To cite this version:**

Lynda Chehami, Emmanuel Moulin, Marina Terzi, Maxime Farin, Farouk Benmeddour. Détection ultrasonore et localisation de défaut de contact sous sollicitations basses fréquences. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA 2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03661304v2

HAL Id: hal-03661304
https://hal.science/hal-03661304v2

Submitted on 6 May 2022 (v2), last revised 10 May 2022 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

16ème Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Détection ultrasonore et localisation de défaut de contact sous sollicitations basses fréquences

L. Chehami, E. Moulin, M. Terzi, M. Farin, et F. Benmeddour
Université Polytechnique des Hauts de France, IEMN-DOAE, Campus Mont Houy, 59313 Valenciennes, France

Une méthode de détection synchrone/asynchrone de défaut soumis à des sollicitations basses fréquences, est proposée ici, et permet une localisation sans état hypothétique « sans défaut ». Une série de tests « pompe-sonde » a été menée sur une plaque d'aluminium. Un pot vibrant est fixé sur cette dernière afin de la mettre en vibration à une fréquence de quelques Hz. Une bille solidaire d'une lame en acier est pressée contre la plaque (contact Hertzien) et joue le rôle d'un défaut (reproduisant ainsi un contact tel qu'on peut le rencontrer par exemple entre deux fronts d'une fissure). Un réseau de transducteurs piézoélectriques est utilisé pour faire l'imagerie ultrasonore. Le principe de la détection repose sur la modulation du contact entre la plaque et la bille par la vibration pompe basse fréquence. Des mesures ultrasonores répétées (onde sonde) permettent ainsi d'interroger le défaut dans plusieurs états de sollicitation. Un algorithme d'imagerie différentielle permet alors de mettre en évidence et localiser le défaut. Deux modes de détection ont été testés : 1) mode synchrone entre la pompe BF et les signaux ultrasonores et 2) mode asynchrone. Dans ce dernier cas, une correction par des coefficients de pondération ad-hoc permet d'améliorer la détection. Les résultats obtenus sont très prometteurs et montrent une localisation robuste de défaut. Une étude paramétrique a été également réalisée en calculant le contraste des images en fonction de la section de diffusion de défaut. Ceci a permis de définir un seuil minimal de détection d'un défaut de type contact variable. Enfin, l'application de cette méthode à l'imagerie passive par corrélation de bruit a donné de premiers résultats encourageants à condition d'augmenter la densité du réseau de capteurs ultrasonores.

1 Introduction

Les méthodes classiques de SHM reposent généralement sur le principe de l'échographie (pulse-echo ou pitch-catch). Ainsi, elles utilisent généralement un transducteur en émission/réception couplé à l'échantillon à inspecter. Les ondes ultrasonores se propageant dans ce dernier sont alors utilisées comme outil de diagnostic de l'état de santé des matériaux. Ainsi, à l'aide de post-traitement adapté on peut obtenir une cartographie de défauts. Dans des travaux antérieurs [1, 2, 3, 4, 5], une autre alternative d'imagerie ultrasonore a été proposée par les auteurs, et qui consiste à utiliser le bruit ambiant (frottement aéro-acoustique, contact roue-rail, etc.) en émission au lieu de sources ultrasonores utilisées classiquement. L'idée est que ce bruit contient de l'information sur l'ensemble des ondes qui se propagent entre deux points du milieu. De ce fait, l'intercorrélation des signaux enregistrés en ces deux points, permettra de remonter à la fonction de Green (ou réponse impulsionnelle) de celui-ci sans le besoin de sources contrôlables (actives). Ainsi, en utilisant ces réponses, on peut surveiller d'une façon passive l'apparition d'un défaut, d'où le nom d'*imagerie passive*. Suite aux différents avantages qu'elles présentent, notamment au vu de la faible consommation en énergie, ces méthodes d'acoustique physique emportent tous les suffrages dans la communauté de contrôle non destructif, en général, et de contrôle santé intégré (communément appelé SHM pour "Structural Health Monitoring" en anglais), en particulier. Dans le cadre de ce dernier, cette méthode nous a permis de déceler des fissures, des trous, dans des rails et des plaques [6, 7, 8].

Bien que des résultats académiques très prometteurs aient été obtenus en matière de détection et de localisation de défauts, ces travaux permettent d'envisager d'autres aspects complémentaires. Dans le cadre du contrôle santé des matériaux, l'utilisation de la réponse linéaire des défauts peut poser un problème de robustesse en conditions réelles, pour lesquelles l'influence des paramètres environnementaux sur les signaux enregistrés peut s'avérer rédhibitoire. Ainsi, afin d'étendre le champ d'application d'imagerie passive, on propose dans ce travail de tirer parti des phénomènes de non-linéarités acoustiques de contact au sein des endommagements, afin de développer des méthodes de détection robustes et sans référence pour le suivi de structures. Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été menés dans la littérature, on cite ici, par exemple, les travaux de Zhang et al., [9] qui combinent la technique non linéaire pompe-sonde avec l'interférométrie d'onde de coda (CWI : coda wave interferometry). Deux ondes ultrasonores sont envoyées dans l'échantillon : une basse fréquence dite "pompe", et une haute fréquence dite "sonde". Si les signaux de coda produits avec et sans onde de pompe sont différents, l'écart ne peut que être attribué au mélange de fréquences non linéaire dû au non-linéarité de contact, qui, à son tour, révèle la présence d'endommagement. En effet, cela résulte en une variation de la vitesse de l'onde coda due à l'interaction avec les ondes de pompe à basse fréquence. Cette méthode ne nécessite pas une base de signaux de référence qui peuvent être influencés par les changements environnementaux ou le vieillissement du matériau. Cependant, la CWI combinée avec la pompe-sonde, seule, ne fournit pas de possibilité de localiser les défauts.

On propose ici une méthode d'imagerie sans référence analogue a celle décrite plus haut et qui est capable de localiser la non-linéarité acoustique de contact (CAN : Contact Acoustic Nonlinearity) dans des plaques minces. Cette méthode est basée sur une interaction pompe-sonde, dans laquelle l'information sur les défauts est fournie par les différences dans les signaux de la sonde haute fréquence (HF) mesurés dans des conditions de contact variables induites par la vibration basse fréquence (BF). Dans cette série d'expériences, l'objectif est de localiser l'origine de la modulation due à un contact solide-solide (de type Hertz-Mindlin imitant le comportement d'un défaut non linéaire réel) sur une plaque mince réverbérante en utilisant un réseau de transducteurs ultrasonores. Ce défaut de contact est ensuite localisé à l'aide d'une technique de rétropropagation présentée dans [2]. Comme pour une fissure, la bille excitée par l'onde BF modifie légèrement

les conditions de propagation de l'onde de la sonde HF. Ces faibles changements sont considérablement renforcés par des effets cumulatifs sur plusieurs états de contact différents. Ce papier est organisé comme suit : Dans la Sec. 2, la configuration expérimentale est décrite et les résultats obtenus sont présentés. En Sec. 3, une étude paramétrique a été menée sur le contraste des images de localisation. En Sec. 4, une étude "preuve de concept" sur le SHM passif a été présentée avant de conclure en Sec. 5.

2 Essais expérimentaux : modulation non linéaire de CAN

La configuration expérimentale consiste en une plaque rectangulaire en aluminium (1 m × 0.5 m × 3 mm) suspendue horizontalement avec des cordes élastiques sur une structure de support métallique. Un pot vibrant est fixé sur cette dernière afin de la mettre en vibration à une fréquence de quelques Hz. Une bille solidaire d'une lame en acier est pressée contre la plaque (contact Hertzien) et joue le rôle d'un défaut (reproduisant ainsi un contact tel qu'on peut le rencontrer par exemple entre deux fronts d'une fissure). Un réseau de transducteurs piézoélectriques (modèle « KEPO FT-20T-4.0A1-465 ») est utilisé pour faire l'imagerie ultrasonore. Le principe de la détection repose sur la modulation du contact entre la plaque et la bille par la vibration pompe basse fréquence. Des mesures ultrasonores répétées permettent ainsi d'interroger le défaut dans plusieurs états de sollicitation. Un algorithme d'imagerie différentielle permet alors de mettre en évidence le défaut et de le localiser.

L'onde de sonde consiste en une période d'un sinus à f_{sonde}=10 kHz, émise à des intervalles de temps réguliers T, et l'onde pompe est une vibration harmonique de quelques Hertz ($f_{pompe} \ll f_{sonde}$).

Le signal de la sonde est émis à l'aide d'un des transducteurs piézoélectriques collés à la surface de la plaque. Les vibrations de la pompe sont excitées à l'aide d'un pot vibrant (TIRAvib 50018, alimenté par son amplificateur de puissance TIRA BAA60) relié à la plaque par une tige en acier munie à son extrémité d'une pince en mousse de polystyrène agrippée au bord de la plaque. De cette façon, le pot vibrant force un mouvement normal alternatif au point de serrage de la plaque (voir fig. 1)

En plus du transducteur piézoélectrique émetteur, 14 transducteurs sont utilisés comme des récepteurs ($R_n, n = 1, 2, 3...$) et sont collés à des positions connues sur la surface de la plaque. Les signaux de ces transducteurs sont enregistrés au moyen d'une carte d'acquisition numérique multivoies MOTU (24 I/O, 96 kéch/s, 24 bits) pendant 40 s. Les filtrages passe-bas et passe-haut permettent de récupérer facilement les vibrations de la pompe (BF) et les signaux de la sonde (HF), respectivement, à partir de ces signaux enregistrés.

Les signaux HF individuels sont ensuite obtenus en découpant les signaux filtrés passe-haut de chaque capteur

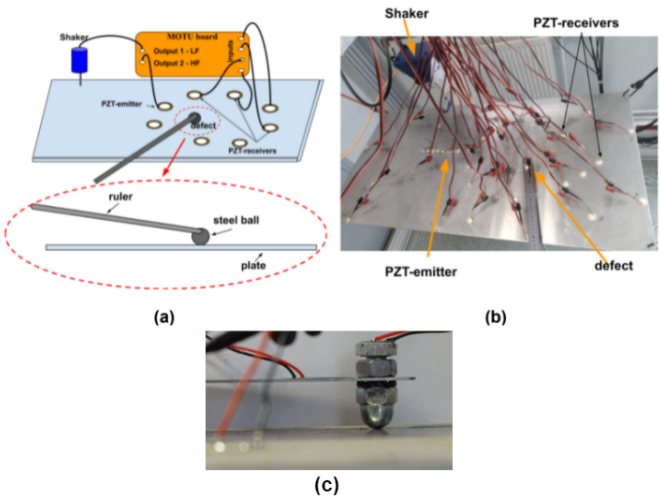

FIGURE 1 – Configuration expérimentale : a) vue schématique, b) photographie de l'expérience, c) agrandissement sur la zone de défaut.

en tranches de durée ΔT. Le signal HF dans la m$^{\text{ième}}$ tranche du n$^{\text{ième}}$ récepteur R_n est ainsi noté $s_{m,n}(t)$.

L'idée derrière ce montage expérimental est que chaque signal HF enregistré, contenant des composantes avec des trajectoires d'ondes ayant traversées la zone de contact, capteront des informations sur l'état du contact à l'instant de la mesure. En effet, ΔT étant beaucoup plus petite que la période de l'onde de pompe, comme indiqué ci-dessus, l'état de contact peut être supposé stationnaire pendant une tranche de signal HF. Étant donné que l'effet de la modulation de contact dans les signaux HF est relativement faible, nous recherchons à cumuler les informations acquises sur les différentes fenêtres des signaux HF (correspondant aux différents états de contact).

❒ Traitement de signal associé

On définit $\Delta s_{m,n}$ comme le signal différentiel en soustrayant les signaux HF extraits $s_{m,n}$ (signal dans la $m^{\text{ième}}$ tranche du $n^{\text{ième}}$ récepteur) et leurs moyennes sur toutes les tranches M.

$$\Delta s_{m,n}(t) = s_{m,n}(t) - \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} s_{i,n}(t) \qquad (1)$$

On s'attend à ce que la moyenne annule la contribution du défaut et ne retienne que les composantes des signaux associés à la plaque elle-même et à la configuration du réseau de capteurs. Par conséquent, les signaux différentiels $\Delta s_{m,n}$ doivent essentiellement contenir des contributions du défaut. Dans ce travail, deux types d'imagerie sont appliqués selon la manière dont l'onde de pompe est générée : 1) mode synchrone, les ondes pompe-sonde sont émises avec une base de temps commune, 2) mode asynchrone, les deux ondes sont excitées indépendamment.

2.1 Mode synchrone

La procédure de localisation est similaire à celle décrite, par exemple, dans [2]. Pour chaque tranche HF, les signaux différentiels sont rétropropagés et l'algorithme interroge le défaut pour chaque point (x,y) de la plaque. Ainsi, les fonctions de rétropropagation obtenues peuvent êtres sommées de manière cohérente,i.e,

$$BPF(x,y,\omega) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} a_m \left(\sum_{m=1,\,n=1}^{N,N} \Delta s_{m,n}(\omega)\, e^{\left[+j\,k(\omega)\,d_{mn}(x,y)\right]} \right) \tag{2}$$

avec $k(\omega)$, le nombre d'onde à la pulsation ω, son expression est déduite de la relation de dispersion du mode de Lamb A0. d_{mn}, est la distance caractérisant la propagation du transducteur T_m au transducteur T_n via le point (x,y).

Si le point (x,y) est sur la position de défaut, on s'attend à obtenir une somme constructive des paquets d'ondes rétropropagés. Cependant, comme le contact à l'emplacement du défaut est continuellement et alternativement modulé par la BF, la partie réelle de l'excitation $s_{pompe}(t)$, en moyenne avec une pondération unitaire ($a_m = 1$) devrait annuler la contribution du défaut. Au lieu de cela, nous appliquerons ici le principe de la détection synchrone, en définissant la pondération comme

$$a_m = s_{pompe}(T_m), \tag{3}$$

où a_m est un ensemble de coefficients de pondération (qui peuvent représenter l'amplitude de diffusion des défauts pour chaque état de sollicitation). $T_m = m\,\Delta T$ est l'instant de l'émission de l'onde HF m^{th} (tranche m). La vibration de la pompe s_{pompe} est facilement extraite par filtrage passe-bas des signaux.

L'intensité de l'image est ainsi calculée dans le domaine temporel sur une fenêtre T_0 (typiquement l'inverse de la bande passante) afin de minimiser l'influence des réverbérations, i.e ;

$$I_{coh}(x,y) = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \left[BPF(x,y,t)\right]^2 \,\mathrm{d}t. \tag{4}$$

2.2 Mode asynchrone

Contrairement au cas précédent, la détection synchrone n'est pas applicable ici puisque la pompe et la sonde sont excitées indépendamment, les signes de l'amplitude de diffusion de défaut sont arbitraires et inconnus. Pour y remédier, on propose ici, la technique dite de *compensation de signes aléatoires*. Cette méthode consiste à tirer aléatoirement les amplitudes $a_m = \pm 1$ des fonctions de rétropropagation pour chaque tranche HF, de manière à maximiser le contraste des images de localisation. On cherche alors à trouver l'ensemble des amplitudes $[a_m]$ qui maximise le contraste apparent de l'image défini par :

$$C([a_m]) = \frac{\max\limits_{(x,y)} \left[I_{\text{coh}}(x,y)|_{a_m} \right]}{\frac{1}{N_{\text{pixel}}} \sum\limits_{(x,y)} I_{\text{coh}}(x,y)|_{a_m}} - 1 \tag{5}$$

ici, N_{pixels} représente le nombre de positions de défaut considérées.
Un ensemble de vecteurs de signes sera sélectionné au hasard et le vecteur de signes retenu parmi cet ensemble est alors celui qui satisfait le mieux le problème d'optimisation.

2.3 Validation et résultats

Les résultats obtenus pour le cas synchrone [10] sont montrés sur la fig. 2 en considérant $\Delta T = 50$ ms, $f_{pompe} = 1$ Hz, pour M=700 tranches. La position de défaut est indiquée par un cercle, et celles des récepteurs par des ×.

Comme on peut l'observer, les deux positions de défaut sont correctement détectées. L'avantage de l'application de la détection synchrone, résultant en une sommation cohérente et constructive de la fonction de rétropropagation, sur la qualité de l'image est évident.

De même, sur la fig. 3 sont montrés les résultats de localisation en mode asynchrone. Tout d'abord, l'imagerie incohérente a été réalisée [10], ensuite, les résultats sont comparés à ceux obtenus après multiplication par des coefficients ad-hoc estimés par optimisation de l'éq. (5).

Ces résultats sont obtenus après un tirage de 1000 vecteurs signes différents et pour 20 différences. Comme, on peut l'observer, la compensation de signes conduit à une nette amélioration du contraste.

3 Étude paramétrique : contraste vs section de diffusion

❒ Développement théorique

Une étude paramétrique a été menée ici afin de cerner les limites de la technique de détection développée précédemment et quantifier les paramètres impliqués et leur influence sur le contraste des images de localisation. On s'intéresse, en particulier, à l'influence de la section de diffusion du CAN sous contrainte BF. Formellement, le signal enregistré au $i^{\text{ème}}$ récepteur lorsque le défaut est dans le $m^{\text{ième}}$ état de sollicitation, peut-être exprimé comme :

$$s_{m,i}(t) = s_{0,i}(t) + f_m(\theta_i)\,\Delta s_{0,i}(t) + n_{m,i}(t) \tag{6}$$

où $s_{0,i}$ est le signal de référence (sans défaut), f_m est l'amplitude de diffusion de défaut, θ_i est l'angle de diffusion, $n_{m,i}$ est un bruit additif de variance σ_n^2, et $\Delta s_{0,i}$ est la partie diffusée par le défaut, sa transformée de Fourier est donnée par

$$\Delta s_{0,i}(\omega) = \delta_i\, u_0(\omega)\, e^{-jk(\omega)\,(d_1+d_{2_i})} \tag{7}$$

avec $\delta_i = 1/\sqrt{d_1 d_{2_i}}$ un facteur géométrique, d_1 et d_{2_i} sont les distances de l'émetteur au récepteur R_i via le défaut, et u_0

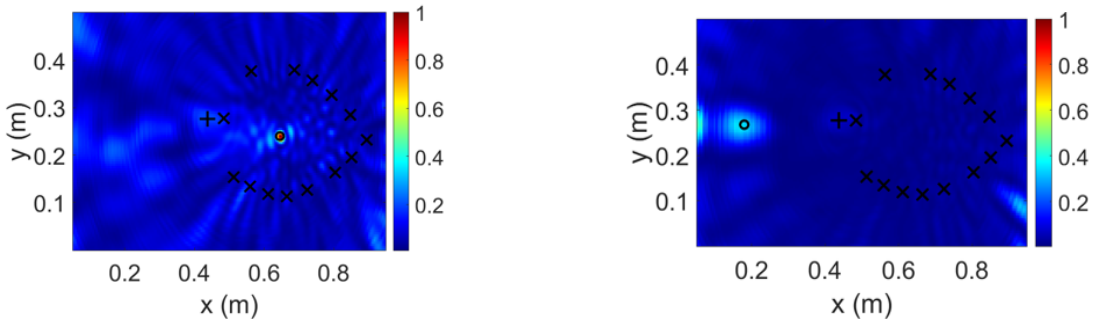

FIGURE 2 – Résultats d'imagerie de défaut situé à : (à gauche) (0.645, 0.24) m, et (à droite) (0.18, 0.268) m.

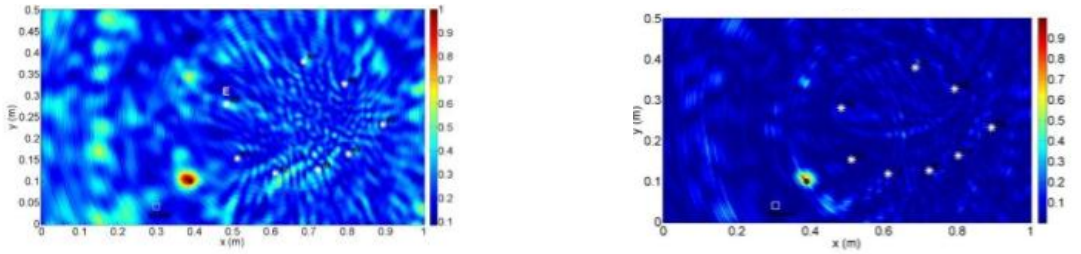

FIGURE 3 – Imagerie en mode asynchrone pour un défaut situé à (0.3, 0.02) m : (à gauche) imagerie incohérente, (à droite) après compensation de signes.

est le signal d'émission.
En combinant les équations. (1) et (6), on obtient

$$\Delta s_{m,i}(t) = (f_m - \bar{f}_m)\,\Delta s_{0,i}(t) + \Delta n_{m,i}(t) \tag{8}$$

où $\bar{f}_m$ est l'amplitude de diffusion moyenne du défaut sur les vibrations de la pompe, et $\Delta n_{m,i}$ est le bruit différentiel entre deux réalisations indépendantes de bruit $n(t)$, sa variance peut-être exprimée par $\sigma^2_{\Delta n} = 2\sigma^2_n$.

Le contraste des images est alors calculé comme

$$C = \frac{I_{def} - I_{fond}}{I_{fond}} \tag{9}$$

où I_{def} est l'intensité de défaut calculée par l'éq. (4), et I_{fond} est l'intensité moyenne sur le fond de l'image (en dehors de la position de défaut).

En calculant une intensité moyenne (voir éq. (4)), et en considérant que les bruits rétropropagés de chaque récepteur sont décorrélés (éq. (2)), on obtient l'intensité moyenne pour le fond de l'image, notée par I_{fond} :

$$I_{fond} = \frac{1}{M} N_r\, T_0\, \sigma^2_n \tag{10}$$

L'intensité du pixel à l'emplacement du défaut est estimée à partir des fonctions de rétropropagation définies par l'éq. (2) quand le pixel est sur le défaut. On montre alors, que l'intensité moyenne pour la position de défaut peut-être écrite ainsi

$$I_{def} = \frac{N_r^2\, \bar{\delta}^2\, E_0\, \bar{\sigma}_0}{4\pi} + \frac{N_r\, T_0\, \sigma^2_n}{M}, \tag{11}$$

où $\bar{\sigma_0}$ est la section de diffusion de défaut (donnée par $2\,\pi\,|f(\omega)|^2$ pour un défaut isotrope) moyennée sur les états modulés de défaut, E_0 est l'énergie émise par la source durant T_0, et $\bar{\delta}$ est un terme géométrique moyenné sur les récepteurs ($\propto 1/N_r$).

Enfin, le contraste pour le mode synchrone est calculé selon l'éq. (9) :

$$C_{syn} = M\gamma\chi\bar{\sigma}_0. \tag{12}$$

avec σ_0 la section de diffusion de défaut, γ un terme de géométrie de réseau, et χ le rapport signal à bruit.

On remarque que le contraste dépend linéairement de la section de diffusion (en négligeant les lobes secondaires). Par la suite, les mêmes calculs ont été faits pour le mode asynchrone, où on a montré que le contraste peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_{asyn} = \frac{N_r \bar{\delta}^2\, E_0 \int_0^{+\infty} x\, f_{Q_W}(x)\, dx}{2M\, T_0\, \sigma^2_n}, \tag{13}$$

où $f_{Q_W}(x)$ est la densité de probabilité des vecteurs signes aléatoires.

❒ Validation expérimentale : cas statique

Le banc expérimental utilisé est le même que celui décrit précédemment sur la fig. 1, à l'exception du mode

dynamique. En effet, pour des raisons de simplification, des séries de mesures ont été menées en statique pour différents états de défaut (on modifie manuellement le couple de serrage de la tige soutenant la bille contre la plaque). Quelques résultats obtenus en mode synchrone, sont illustrés sur la fig. 4. La section de diffusion est déduite par ajustement d'enveloppe de signal différentiel (avec et sans défaut) au carré moyenné sur les récepteurs avec une fonction exponentielle utilisant une régression non-linéaire au sens des moindres carrés (pour plus de détails, voir [5]).

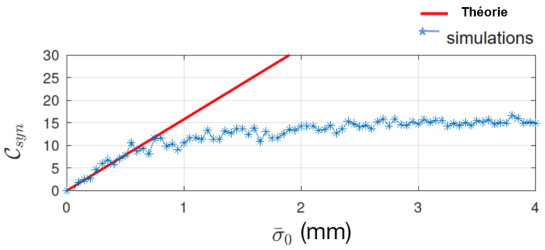

FIGURE 4 – Contraste de l'image en fonction de la section efficace de diffusion.

Comme prévu, le contraste augmente de manière monotone avec une augmentation de la section efficace de diffusion du défaut. Il est important de noter que la section efficace de diffusion dans les expériences statiques est de l'ordre du millimètre. La courbe en ligne continue représente le résultat théorique $\gamma\chi\bar{\sigma}_0$ (ici $M = 1$ car, il s'agit du mode statique). On observe qu'aux faibles valeurs de la section efficace de diffusion, l'approximation théorique est en accord avec l'expérience, alors que lorsque $\bar{\sigma}_0$ dépasse un certain seuil, la courbe expérimentale sature et s'écarte de la courbe théorique. En effet, la formule théorique du contraste permet d'estimer un seuil de détection pour la section de diffusion $\bar{\sigma}_0 > \sigma_s$. En supposant que le contraste minimal acceptable est égal à 1, $\bar{\sigma}_0 > \frac{1}{\gamma\chi}$, qui est approximativement $\bar{\sigma}_0 > 0.065\ mm$. Après la validation de la relation théorique, des expériences complémentaires ont été aussi conduites en dynamique (i.e, en activant l'onde de pompe).

❒ Validation expérimentale : cas dynamique

Le banc expérimental utilisé est le même que celui décrit précédemment sur la fig. 1 pour les expériences en dynamique. Sur la fig. 5, le contraste est représenté en fonction de la section efficace de diffusion.

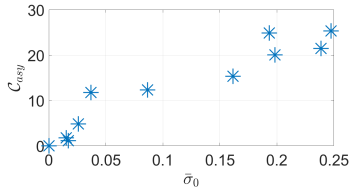

FIGURE 5 – Contraste de l'image de localisation en fonction de la section efficace de diffusion moyenne.

Il est intéressant de noter que l'ordre de grandeur de la section efficace de diffusion dans l'expérience dynamique est très inférieur à celui obtenu en mode statique : la section efficace de diffusion maximale est d'environ 0,19 mm, alors qu'elle était de 3 mm en statique. Cependant, cette valeur est largement supérieure au seuil de détection $\sigma_s = 0.065\ mm$ qui ne tient pas compte de M réalisations. Le contraste augmente linéairement avec la section efficace de diffusion pour les faibles valeurs de $\bar{\sigma}$, comme observé dans les expériences en statique. Ce qui montre que l'algorithme de localisation proposé est fiable pour le cas dynamique actif.

4 Imagerie passive sans référence

On a montré dans des travaux précédents [2] que la corrélation de champs enregistrés en deux points du milieu est proportionnelle à la fonction de Green (FG) de celui-ci, i.e ; $Cij = D_{ij} + n_{ij}$ où D_{ij} est la partie déterministe (FG) et n_{ij} est le bruit résiduel de reconstruction, qui tend vers zéro pour une infinité de sources de bruit. Cette idée est utilisée ici où l'onde sonde est reconstruite par corrélation de bruit. Pour ce faire, une série de mesures ont été effectuées en utilisant le même dispositif expérimental décrit précédemment. L'onde sonde est un bruit blanc gaussien non corrélé d'une durée de 40 s, émis simultanément par un ensemble de 14 transducteurs PZT. L'émission et la réception sont gérées par une carte d'acquisition multivoies MOTU (24 I/O, 96 kéch/s, 24 bits). La pompe est une onde sinusoïdale continue à $f_{pompe} = 1$ Hz. Un ensemble de 14 capteurs est utilisé pour écouter le bruit (mixage de fréquences basse de la pompe et haute de la sonde). Pour chaque enregistrement, un filtrage passe-bas est appliqué pour récupérer la vibration de la pompe $s_{pompe}(t)$. Pour les signaux sonde, un blanchiment en fréquence est réalisé sur les signaux entre 1 kHz et 30 kHz. Le reste de traitement de signal est exactement pareil que celui décrit précédemment pour le cas dynamique. Sur la fig. 6-(à gauche) est montré le résultat de localisation obtenu après une sommation cohérente des fonctions de corrélations.

Comme on peut l'observer, le défaut n'est pas détecté. En effet, le rapport signal à bruit pour le cas passif, est lié aussi au bruit résiduel de reconstruction des fonctions de Green (pour plus de détail voir [8]). Formellement, cette erreur de reconstruction lorsque le défaut est dans un état donné m peut s'écrire ainsi :

$$n_{ij,m} = n_{ij,0} + \delta n_{ij,m}\,, \tag{14}$$

où $n_{ij,0}$ est le bruit de reconstruction de la FG lorsque le défaut est dans l'état pris comme référence (moyenne sur une période de pompe ici). On peut alors définir un niveau de bruit relatif lié à la modulation du défaut par la pompe comme

$$\delta RNL = \left\langle \frac{\int \delta n_{ij,m}^2(t)dt}{\int D_{ij}^2(t)dt} \right\rangle. \tag{15}$$

L'estimation de δRNL n'est pas simple et nécessitera

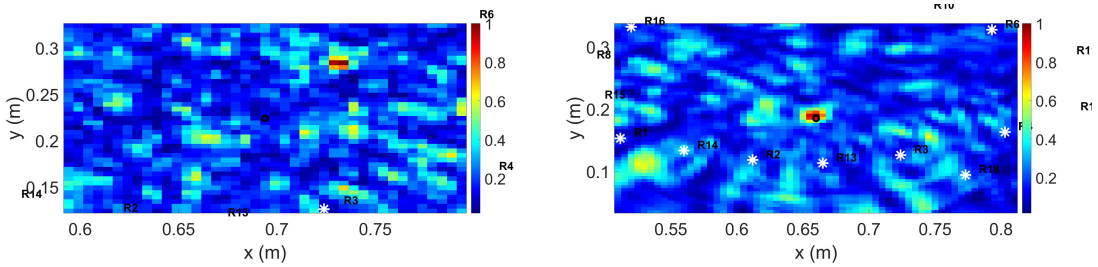

FIGURE 6 – Résultat de localisation pour l'expérience pompe-sonde passive : (à gauche) $N_s = N_r = 14$, (à droite) $N_s = 18$, $N_r = 19$. Le défaut est situé à (0.66, 0.185) m

d'autres travaux théoriques en perspective. Cependant, en remarquant que χ' est homogène à l'inverse de RNL [8], qui est lui-même homogène à l'inverse du nombre de sources, il semble raisonnable de supposer une proportionnalité entre χ' et N_s. Pour améliorer le contraste de l'image, on peut :

- augmenter χ' en rajoutant des sources de bruit N_s, et/ou γ en rajoutant des capteurs ;
- augmenter la section de diffusion $\bar{\sigma_0}$ en excitant la plaque avec une amplitude de pompe élevée.

En modifiant donc le dispositif expérimental (augmentant le nombre de sources à 18 et le nombre de récepteurs à 19), et en considérant $M = 3900$ fenêtres de durée $\Delta T = 10$ ms, on améliore nettement la détection (voir fig. 6-(à droite)).

5 Conclusion

Une méthode de détection de défaut sans référence dans des plaques élastiques réverbérantes basée sur une combinaison de sondage répétitif avec rétropropagation de signaux, est décrite [10]. La robustesse de la technique est démontrée au travers des différents résultats obtenus pour détecter un contact Hertzien. La plage de fréquences de travail est de quelques Hertz pour l'onde de pompe et de quelques dizaines de kHz pour l'onde de sonde. Deux variantes d'expérience ont été faites : lorsqu'une onde de pompe est synchronisée avec une onde de sonde (mode synchrone) et lorsqu'il ne l'est pas (mode asynchrone). Dans ce dernier cas, une correction par des coefficients de pondération ad-hoc a permis d'améliorer la détection. Des calculs théoriques ont été menés en mettant en évidence le lien entre les caractéristiques de diffusion de défaut et le contraste des images de localisation. Enfin, des expériences passives préliminaires ont été réalisées et les résultats obtenus montrent une validation du concept de SHM passif.

Remerciements

Ce travail est financé par l'Agence Nationale de la Recherche ANR-17-CE08-0013-01 (projet PANSCAN).

Références

[1] E. Moulin, S. Grondel, J. Assaad, and L. Duquenne. Modeling a surface-mounted Lamb wave emission-reception system : Applications to structural health monitoring. *J. Acoust. Soc. Am*, **124**(6) :3521–3527, 2008.

[2] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, Cl. Prada, O. Bou Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *Journal of Applied Physics*, **115**(10) :104901, 2014.

[3] L. Sadoudi, M. Boquet, E. Moulin, Y. Elhilali, F. Benmeddour, and J. Assaad. Contribution au développement d'un réseau sans fil pour le contrôle santé intégré (CSI) des structures. *17mes Journées nationales du réseau doctoral en Micro-Nanoélectronique, JNRDM 2014, 26-28 Mai, Villeneuve d'Ascq, Lille, France*, 2014.

[4] 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.

[5] 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.

[6] L. Chehami, J. De Rosny, C. Prada, E. Moulin, and J. 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.

[7] 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.

[8] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, and C. Prada. Accuracy of green's function estimation from correlation of diffuse elastic waves on thin plates. *J. Acoust. Soc. Am*, 146(5) :3505–3511, nov 2019.

[9] Yuxiang Zhang. *Controle de santé des matériaux et des structures par analyse de la coda ultrasonore*. PhD thesis, Université de Maine, 2013.

[10] M. Terzi, L. Chehami, M. Farin, E. Moulin, V. Aleshin, N. Smagin, J. De Rosny, and F. Benmeddour. Pump-probe localization technique of varying solid contacts. *J. Acoust. Soc. Am.*, **149**(5) :2943–2949, 2021.