



HAL
open science

Tomographie passive par ondes élastiques guidées pour le Contrôle Santé des Structures

Bastien Chapuis, Tom Druet, Huu Tinh Hoang, Emmanuel Moulin

► **To cite this version:**

Bastien Chapuis, Tom Druet, Huu Tinh Hoang, Emmanuel Moulin. Tomographie passive par ondes élastiques guidées pour le Contrôle Santé des Structures. *Acoustique et Techniques : trimestriel d'information des professionnels de l'acoustique*, 2020, 93, pp.16-21. cea-03250592

HAL Id: cea-03250592

<https://cea.hal.science/cea-03250592>

Submitted on 17 Jun 2021

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.

Tomographie passive par ondes élastiques guidées pour le Contrôle Santé des Structures

Bastien Chapuis¹, Tom Druet¹, Huu Tinh Hoang^{1,2}, Emmanuel Moulin²

¹Département Imagerie et Simulation pour le Contrôle, CEA-LIST
91191 Gif-sur-Yvette, France

²IEMN/DOAE, Université Polytechnique Hauts-de-France
59313 Valenciennes, France

Résumé :

Les ondes élastiques guidées sont particulièrement adaptées pour les applications de contrôle santé de structures minces (type plaques, tubes ou cuves) grâce à leur capacité à se propager sur de longues distances. Cet article présente le développement d'une approche originale de contrôle santé des structures appelée tomographie passive par ondes élastiques guidées. Cette technologie est basée sur la combinaison d'algorithmes de tomographie par ondes élastiques guidées et de la technique de corrélation du champ élastique diffus. Elle permet d'obtenir des cartographies absolues et très précises de l'épaisseur d'une zone entourée par une distribution de capteurs, sans émettre d'ondes, simplement en analysant le bruit élastique qui existe naturellement dans la structure (dû aux vibrations, aux turbulences aérodynamiques, etc.). Nous présentons ici des images de tomographie passive sur plaque et tuyauterie par ondes guidées utilisant des signaux expérimentaux mesurés par des transducteurs piézoélectriques. Les développements futurs de cette technique sont basés sur l'utilisation de capteurs à réseaux de Bragg sur fibre optique (FBG) pour opérer dans des environnements difficiles (températures élevées ou cryogéniques, radiations) avec une intrusivité minimale grâce aux grandes capacités de multiplexage de ces capteurs.

Abstract:

Elastic guided elastic waves show great potential for Structural Health Monitoring (SHM) of thin structures (plate-like, pipes or tanks) thanks to their ability to propagate over long distances. This article presents the development of a new approach for SHM called elastic guided waves passive tomography. This technology is based on the combination of elastic guided waves tomography algorithms and cross-correlation of ambient noise technique. It provides high-resolution and reference-free thickness maps of an area surrounded by a distribution of sensors, without emitting waves, just by analyzing the elastic noise that naturally exists in the structure (due to vibrations, aerodynamic turbulences, etc.). This offers a low power and robust sensing unit for SHM systems. Passive tomography images produced by state of the art guided waves tomography algorithm using experimental signal produced by piezoelectric transducers are presented with application to corrosion detection on plates and pipes. Future development of this technique are based on the use of Fiber Bragg Gratings (FBG) sensors on optical fibers in order to operate in harsh environments (high or cryogenic

temperatures, radiations) with minimal intrusiveness thanks to the high multiplexing capabilities of such sensors.

1. Introduction :

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un élément central dans les stratégies de maintenance des structures, composants critiques et installations industrielles. Sa mise en œuvre consiste aujourd'hui à réaliser des inspections souvent périodiques qui visent à obtenir des informations sur la santé du composant ou de la structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à son utilisation ultérieure. L'enjeu industriel est d'être capable de garantir l'intégrité des structures, et l'importance de ces contrôles est considérable puisque qu'ils permettent de garantir un haut niveau de qualité et de sécurité des matériels.

Quel que soit le domaine industriel, les enjeux économiques associés à ces contrôles sont très importants. Dans certains secteurs comme les transports, en particulier aéronautiques, et le nucléaire, ces contrôles se doublent d'un enjeu majeur de sécurité du public.

Un nouveau paradigme est en train d'émerger dans le domaine de la maintenance et du contrôle industriel avec la perspective aujourd'hui réaliste de solutions industrielles à base de capteurs intégrés. L'idée est de remplacer des inspections périodiques réalisées par un opérateur (ou un robot) amenant son matériel par une interrogation en continu de ces capteurs. Cette révolution qui se profile est bien entendu portée par les progrès fulgurants de ces dernières années des technologies du numérique : miniaturisation des capteurs et des électroniques, mise à disposition de protocoles de communication (type LoRA, Sigfox) adaptés à ces situations (basse consommation, bas coût), puissances de calcul, etc. Ce flux d'informations, à l'image de ce qui est promis par l'internet des objets (ou Internet of Things, IoT) dans le domaine de la maintenance des machines industrielles, offre la possibilité d'utiliser des outils algorithmiques (par exemples d'intelligence artificielle, ou d'aide à la décision) que les techniques de CND traditionnelles ne permettent pas. Le but final est de réaliser un pronostic de la durée de vie résiduelle des structures critiques, permettant ainsi d'optimiser les stratégies de maintenance sans remettre en question la sécurité.

Cette nouvelle stratégie est appelée « contrôle santé des structures », parfois plus connue sous son acronyme anglais « SHM » pour Structural Health Monitoring. Ce vocable recouvre un périmètre qui peut varier d'une communauté à l'autre. Ici sous ce terme on considère l'instrumentation d'une structure pour une application de type « Damage monitoring », c'est-à-dire la mise au point de capteurs intelligents visant à détecter et caractériser de manière directe des défauts dans la structure (fissure, corrosion, ...) [1].

Le SHM est un sujet en plein essor tiré par un besoin dans différents secteurs industriels pour des structures anciennes dont on veut prolonger l'exploitation (par ex. ponts, centrales nucléaires, infrastructures ferroviaires) ou de structures récentes sujettes malgré tout à des défaillances potentiellement graves (par ex. avions, éoliennes) ainsi que d'une attente sociétale accrue de la part des utilisateurs en termes de disponibilité des infrastructures. En effet, le SHM, de par un monitoring en continu, permet d'anticiper les besoins de réparation

et de les planifier à un moment non pénalisant pour l'utilisateur et ainsi éviter des désagréments tels qu'un avion cloué au sol pour cause de pièce à changer de manière imprévue, ou la circulation automobile détournée à cause d'une fissure critique détectée de manière tardive sur un pont.

Le SHM est une discipline relativement récente, les premiers congrès scientifiques dans le domaine datent d'un vingtaine d'année et les premières applications industrielles commencent à émerger. On peut citer par exemple le cas du capteur appelé CVM (*Comparative Vacuum Monitoring*) qui est la première solution certifiée dans le domaine aéronautique (en 2017) pour la détection de fissures sur certaines pièces d'avion [2].

Parmi les solutions les plus prometteuses pour des applications SHM de structures minces (type plaques tuyaux ou cuves) figurent les ondes élastiques guidées. En effet, ces ondes peuvent se propager sur de longues distances, si bien qu'un nombre limité de capteurs embarqués peut contrôler de grandes surfaces de la structure, tout en présentant une grande sensibilité aux défauts les plus critiques comme les délaminages de matériaux composites ou les fissures dans des matériaux métalliques. La Figure 1 présente la démarche typique employée pour détecter des défauts à l'aide de ce type d'ondes élastiques. Une plaque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur (représentative de fuselage d'avion), est munie d'un disque piézoélectrique mince de 10 mm de diamètre et 250 μm d'épaisseur. Ce disque est excité par une impulsion constituée d'un cycle de sinusoïde à 40 kHz. Les signaux mesurés en mode échographique (le disque est employé à la fois comme émetteur et comme récepteur) sur la plaque à l'état sain (en bleu) et suite au perçage d'un trou de 10 mm à quelques dizaines de centimètre du disque piézoélectrique sont présentés Figure 1 (a). La différence due au défaut est minime, et difficile à mettre en évidence. Il est courant de soustraire du signal courant, la mesure effectuée à l'état sain, ce qui donne le résultat de la Figure 1 (b), plus facilement interprétable. Aux fréquences de travail, et pour l'épaisseur de plaque considérée, les ondes mesurées sont des ondes de Lamb (sur la Figure 1 le premier mode anti-symétrique appelé A_0), qui mettent en mouvement toute l'épaisseur de la plaque.

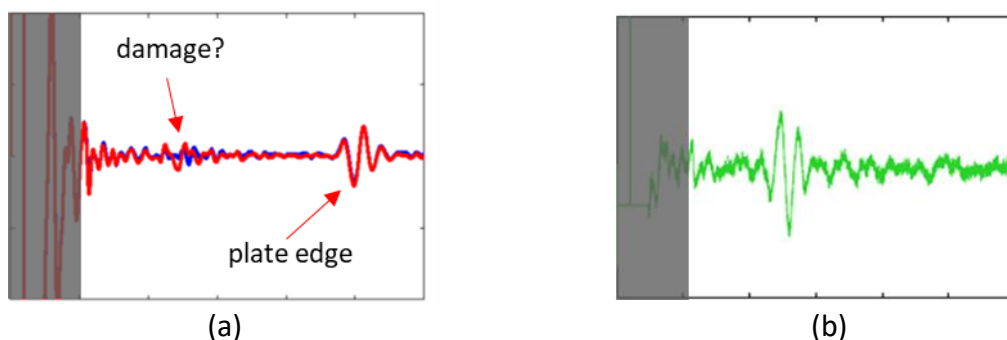


Figure 1 : (a) Signaux mesurés en mode échographique sur une plaque de 2 mm d'épaisseur à 40 kHz : en bleu signal à l'état sain, en rouge signal après perçage d'un trou de 10 mm, (b) différence entre les deux signaux précédents.

(a) Signals measured in pulse-echo mode on a 2 mm thin aluminium plate at 40 kHz: blue signal measured on a pristine state, red signal measured after drilling a 10 mm hole, (b) difference between the previous two signals.

L'opération de soustraction de l'état sain (dit « état de référence »), est toutefois risquée, car peut révéler d'autres variations du système que l'apparition du défaut de la structure, par exemple une défaillance du capteur. Souvent, une simple variation de température peut

conduire à des signaux résiduels suffisamment importants, susceptibles de créer des fausses alarmes très pénalisantes pour le système SHM [3].

Afin de rendre plus robuste le diagnostic, les approches plus récentes consistent à augmenter le nombre de capteurs, au détriment de l'intrusivité du système SHM. Différents algorithmes d'imagerie peuvent alors être mis en œuvre afin d'exploiter les signaux obtenus par la multiplication des chemins de propagation des ondes offerts par les divers couples émetteurs/récepteurs [4] [5] [6]. Lorsqu'on s'intéresse à une zone particulièrement critique (déduite d'une analyse préliminaire ou d'un retour d'expérience sur des structures similaires), une approche particulièrement robuste consiste à entourer cette zone d'un grand nombre de transducteurs. Des algorithmes de tomographie par ondes élastiques guidées, présentés dans la section 3 peuvent alors fournir des images de très grandes résolutions de la zone inspectée. Certains de ces algorithmes ne nécessitent pas l'opération de soustraction par rapport à l'état de référence, et sont donc très appropriés pour des applications industrielles en environnement variable. Dans nombre d'applications l'encombrement et l'intrusivité d'un tel système SHM avec une grande densité de capteurs constituent toutefois un frein majeur pour le déploiement de ce type de solutions.

Le CEA-LIST, en collaboration avec l'Université Polytechnique Hauts-de-France, travaille depuis plusieurs années à coupler ces algorithmes de tomographie avec une approche dite « passive », qui exploite le bruit élastique ambiant, et ne nécessite pas de circuit d'émission d'ondes. Cette approche, décrite à la section 2 présente de nombreux avantages et notamment celui d'un système électronique plus simple et moins encombrant.

Nous allons décrire ici dans un premier temps comment l'exploitation du bruit ambiant permet sous certaines conditions d'obtenir des signaux équivalents à ceux qui pourraient être obtenus avec une émission active d'ondes par le système SHM. Dans une deuxième partie nous présenterons les principes généraux de la tomographie par ondes élastiques guidées. Enfin, nous illustrerons le couplage méthode passive / tomographie, par des applications de détection de corrosion dans des plaques et dans des tuyaux et finirons par évoquer les travaux de recherches en cours menés pour réduire encore l'intrusivité du système et élargir le spectre d'application de cette technique.

2. Mesures actives et mesures passives

Considérons deux points A et B dans la structure. On appelle mesure active entre A et B la mesure du signal S_{AB} émis en A et reçu en B après propagation dans la structure. En actif, la

source positionnée en A émet un signal maîtrisé (typiquement une impulsion courte de quelques cycles de sinusoïde).

La mesure passive entre A et B consiste à mesurer simultanément le bruit élastique ambiant S_A en A et S_B en B. On peut montrer que sous certaines conditions¹, l'inter-corrélation des signaux S_A et S_B permet d'estimer la fonction de Green entre A et B (Figure 2) [7]. Dans les applications considérées, on considère qu'il faut typiquement quelques secondes de bruit pour que l'inter-corrélation permette une estimation de la fonction de Green de bonne qualité [8]. La fonction de Green est alors exploitée pour récupérer les mêmes informations que dans le cas actif, par exemple le temps de vol ou l'amplitude des ondes, en entrées des algorithmes de tomographie. Formellement, une fois la reconstruction de la fonction de Green assurée via l'étape d'inter-corrélation, on se ramène exactement au cas actif pour l'analyse des signaux et le diagnostic de la structure.

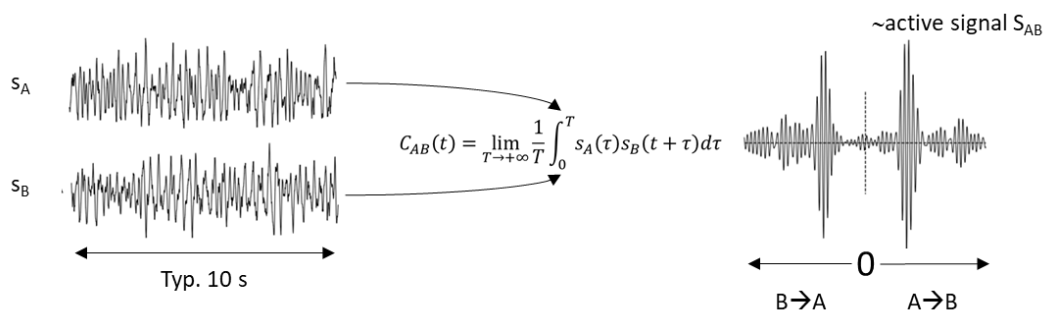


Figure 2 : L'inter-corrélation des signaux de bruit mesurés simultanément en A et en B permet (sous certaines hypothèses) d'obtenir un signal très similaire à celui qui serait mesuré en B si un émetteur était placé en A (pour les temps positifs) ou réciproquement pour les temps négatifs.

The cross-correlation of simultaneous noise measurements in A and B can (under certain hypothesis) leads to a very similar signal than those measured in B if an emitter was placed in A (for positive times) and reciprocally for negative times.

L'intérêt de cette approche passive est de simplifier le système à déployer sur la structure, puisque l'électronique ne nécessite plus que des circuits de mesure et non d'émission. Par ailleurs, comme il n'y a pas besoin d'injecter de l'énergie dans la structure, la consommation d'énergie est réduite, ce qui est particulièrement avantageux pour les systèmes devant être autonomes et/ou pour lesquels la masse embarquée est particulièrement critique (batterie plus légère).

En pratique, dans les structures industrielles, il y a plusieurs sources de bruit ambiant exploitables (vibrations, frottements, turbulences aérodynamiques, ...) et les structures sont naturellement complexes (présences de rivets, de changements d'épaisseurs par exemple qui diffractent les ondes et favorisent le caractère diffus du champs). Lorsque le champ diffus ne respecte pas la condition d'équipartition [9] (ce qui est fréquent : par exemple dans une tuyauterie le sens de circulation du fluide rompt la symétrie du système, tout comme le sens des turbulences aérodynamiques sur le fuselage d'un avion), il est possible de montrer

¹ Le champ d'ondes doit notamment être diffus et en équipartition énergétique (l'énergie totale de ce champ est répartie en parts égales en moyenne entre ses différentes composantes). Par ailleurs, le temps d'intégration de l'inter-corrélation doit être suffisamment long.

qu'une autre approche que la corrélation, basée sur le Filtre Inverse Passif développé par Gallot et al. [10], permet de traiter les signaux de bruits pour retrouver la fonction de Green dans les configurations de contrôle santé des structures [11].

3. Tomographie par ondes élastiques guidées

La tomographie par ondes élastiques guidées permet d'imager de manière quantitative une partie d'une structure jugée suffisamment critique pour qu'il soit décidé de la contrôler. Cette inspection se fait à l'aide de transducteurs situés autour de la zone critique. Ils émettent et reçoivent des ondes élastiques guidées qui constituent, sous forme de signaux généralement complexes, les données d'entrée des algorithmes de tomographie. Ces derniers résolvent un problème inverse qui consiste en l'inversion des signaux mesurés pour produire une cartographie de la zone inspectée.

Historiquement, il existe deux approches différentes concernant le problème direct basées sur des phénomènes impliquant des physiques différentes :

- La réfraction : causée par la non-uniformité du champ de vitesse d'énergie au sein de la zone inspectée.
- La diffraction : causée par un défaut présentant des variations de propriétés (par exemple d'épaisseur) rapides, c'est-à-dire typiquement inférieures à la longueur d'onde.

Il existe deux grandes classes d'algorithmes de tomographie par ondes guidées. La première, les algorithmes de « tomographie en temps de vol », est basée sur un modèle rayon, i.e. qui suppose une propagation géométrique des ondes élastiques [12]. Elle fait l'hypothèse que les défauts n'introduisent pas de diffraction et est adaptée aux défauts de grandes dimensions variant lentement dans l'épaisseur.

La deuxième catégorie exploite le signal complet (i.e. les informations d'amplitude et de phase sont utilisées) et est basée sur un modèle ondulatoire pour la propagation des ondes [13]. Elle permet d'imager des défauts diffractants (d'où le nom « tomographie par diffraction »), mais est en revanche basée sur d'autres approximations, par exemple l'approximation de Born. En pratique, ces hypothèses limitent les reconstructions tomographiques aux cas de petits défauts.

Ces approches ont été couplées ces dernières années par Huthwaite pour donner naissance à une troisième approche hybride qui réunit les avantages des deux précédentes [14]. Cette approche, ayant été développée initialement dans le domaine médical, porte le nom d'Hybrid Algorithm for Robust Breast Ultrasound Tomography (HARBUT). L'algorithme HARBUT présente à la fois les avantages du modèle rayon et du modèle ondulatoire et permet d'imager de grandes variétés de défauts. Par ailleurs, il est possible de rendre cet algorithme HARBUT totalement indépendant de signaux mesurés à l'état de référence, à l'aide d'une procédure

d'autocalibration, ce qui en fait une approche extrêmement robuste vis-à-vis des variations des conditions de mesure au cours du temps [15].

Sur une plaque la distribution de capteurs est généralement circulaire mais peut être aussi rectangulaire selon la géométrie imposée par la structure à contrôler. Sur une tuyauterie, on dispose en général deux couronnes de capteurs, espacées de l'ordre de quelques diamètres de la tuyauterie. Dans les deux cas, la reconstruction de l'épaisseur est obtenue sur l'intégralité de la zone entourée par les capteurs. On distingue deux types de trajets dans une tuyauterie : les ondes dites « directes » qui se propagent selon le trajet le plus court entre émetteur et récepteur. Les ondes dites « hélicoïdales » font au moins un tour de la circonférence avant de rejoindre le récepteur (Figure 4).

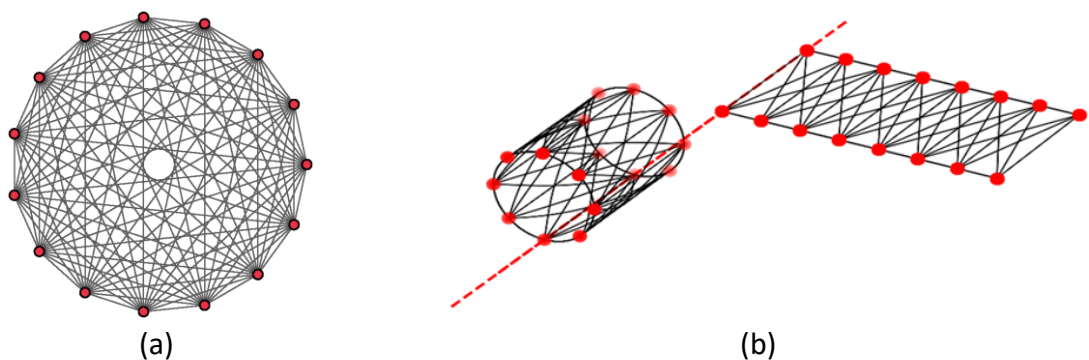


Figure 3 : (a) Disposition des capteurs pour une tomographie sur structure plaque et ensemble des couples possibles, (b) disposition des capteurs sur tuyauterie, vue réelle à gauche et déroulée à droite.

(a) Arrangement of the sensors for a tomography on a plate structure and all possible couples, (b) arrangement of the sensors on pipe, actual view on the left and unrolled view on the right.

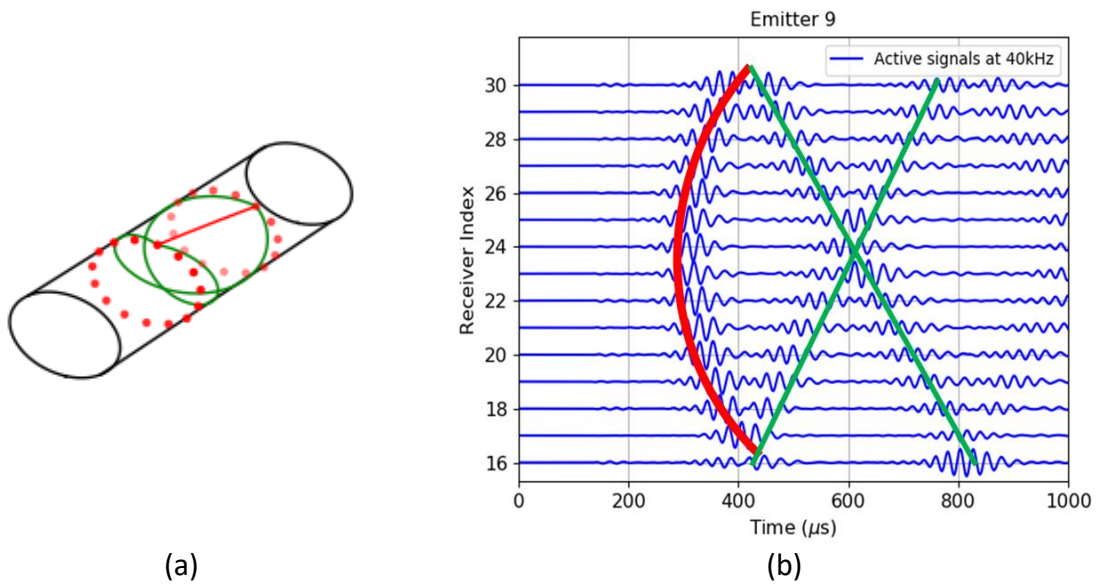


Figure 4 : (a) Trajets directs en rouge, et trajet hélicoïdal en vert entre deux anneaux de capteurs, (b) signaux mesurés (en actif) sur un tuyau en acier de 2,15 mm d'épaisseur et 254 mm de diamètre équipé de 2 anneaux de 15 disques piézoélectriques de 8 mm de diamètre. Les disques numérotés de 1 à 15 sont situés sur la première couronne, ceux numérotés de 16 à 30 sur la deuxième. Le disque 9 est ici utilisé pour émettre un signal à 40 kHz. Les signaux mesurés sur la deuxième couronne sont représentés. En rouge les ondes correspondent au trajet direct, en vert les ondes correspondent au trajet hélicoïdal.

(a) Direct paths in red, and helical paths in green between two sensor rings, (b) signals measured (in active mode) on a steel pipe 2.15 mm thick and 254 mm diameter equipped with 2 rings of 15 piezoelectric discs of 8 mm diameter. The discs numbered 1 to 15 are located on the first ring, those numbered 16 to 30 on the second ring. Disc 9 is used to emit a signal at 40 kHz. The signals measured on the second ring are shown. In red the waves correspond to the direct path, in green the waves correspond to the helical path.

4. Applications expérimentales

Nous présentons dans cette partie des résultats de tomographie passive obtenus expérimentalement sur plaque et sur tuyauterie.

a. Tomographie passive sur plaque

Dans cette première expérience une plaque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur est munie de 30 disques piézoélectriques de 18 mm de diamètre disposés selon un cercle de 60 cm de diamètre. Une zone localisée de 10 cm de diamètre a été poncée artificiellement pour simuler une perte d'épaisseur de profondeur maximale 0,7 mm.

Pour les acquisitions passives, la source de bruit utilisée était un jet d'air comprimé balayé à la surface de la plaque [16]. Dix secondes de bruits ont été mesurées simultanément sur toute la distribution de capteurs à une fréquence d'échantillonnage de 2 MHz. Les inter-corrélations pour tous les couples de capteurs ont ensuite été calculées et les données d'entrée des algorithmes de tomographie ont été extraites à 30 kHz que ce soit pour estimer les temps de vol ou bien calculer les champs mono-fréquentiels correspondant au mode guidé d'intérêt. L'algorithme HARBUT a enfin été utilisé à partir de ces données pour produire la cartographie d'épaisseur de la Figure 5(b). La coupe au niveau du défaut (Figure 5(c)) montre l'excellente

qualité de la reconstruction comparée à une mesure d'épaisseur de référence effectuée par scan ultrasonore en immersion de la plaque. Rappelons que cette procédure ne nécessite pas de comparaison avec un état de référence et est donc extrêmement robuste vis-à-vis de variations des conditions expérimentales au cours du temps.

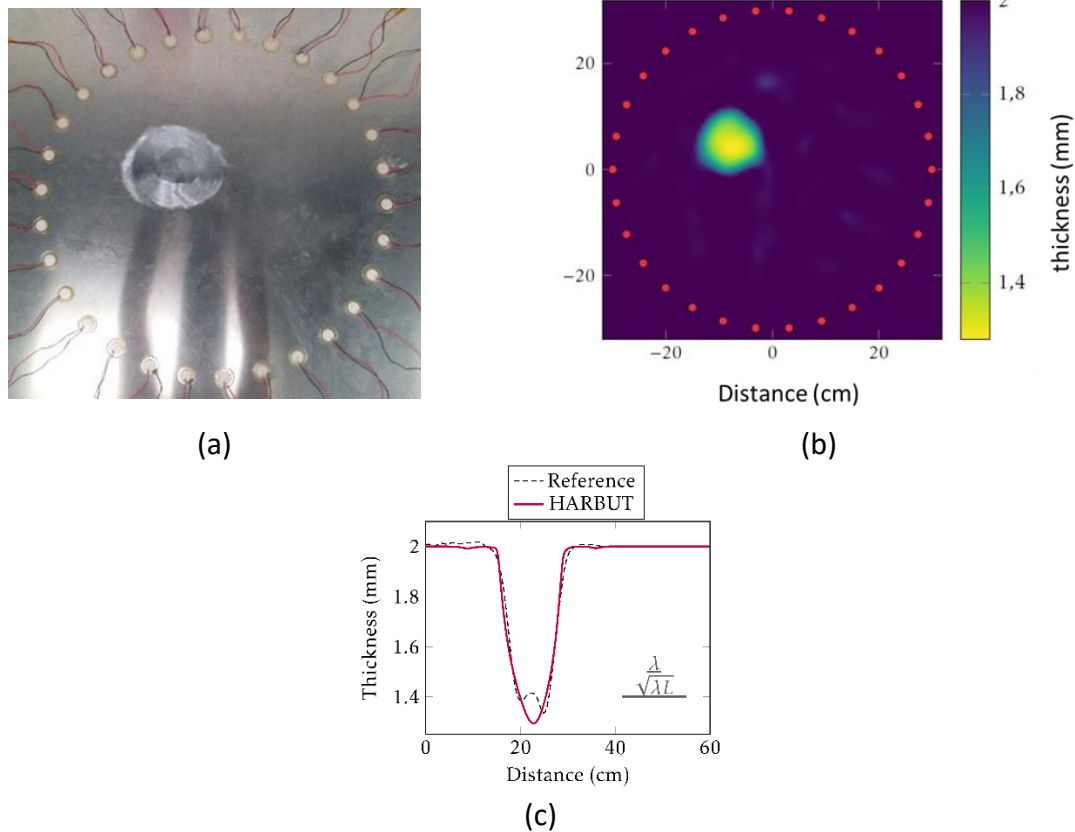


Figure 5 : (a) Plaque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur équipée de 30 disques piézoélectriques de 18 mm de diamètre, (b) cartographie d'épaisseur reconstruite à l'aide de l'algorithme HARBUT à partir de 10 secondes de bruit ambiant et (c) coupe de la cartographie au niveau du défaut artificiel.

(a) 2 mm thick aluminium plate equipped with 30 piezoelectric disks of 18 mm diameter, (b) thickness cartography reconstructed using HARBUT algorithm from 10 seconds of ambient noise and (c) cross-section of the cartography on the artificial defect.

b. Tomographie passive de tuyauteries

Nous présentons ici une expérience menée sur une tuyauterie d'acier inoxydable de 2,15 mm d'épaisseur et 254 mm de diamètre équipée de 2 anneaux de 15 disques piézoélectriques de 8 mm de diamètre espacés de 40 cm. Un défaut artificiel a été obtenu par électrolyse au sein d'un bain d'immersion local sur la surface externe du tuyau (Figure 6 (a)). Pour les acquisitions passives, la source de bruit utilisée était un jet d'air comprimé balayé à l'intérieur du tuyau, depuis une de ses extrémités. Dix secondes de bruits ont été mesurées simultanément sur toute la distribution de capteurs à une fréquence d'échantillonnage de 2 MHz. Les intercorrélations pour tous les couples de capteurs ont ensuite été calculées et filtrées à l'aide d'un

filtre passe-bande entre les fréquences 20 et 60 kHz (pour récupérer l'information de propagation à la fréquence centrale 40 kHz).

L'algorithme HARBUT a été utilisé pour produire la cartographie en vue déroulée et les coupes de la Figure 6. Seuls les trajets directs sont exploités à ce stade. L'exploitation de l'algorithme HARBUT qui exploite les trajets hélicoïdaux sur géométrie tubulaire ne présente pas de difficulté théorique particulière mais doit encore faire l'objet d'une implémentation. Là-encore la reconstruction est de très bonne qualité, la bande de fréquence employée ne permet pas, comme c'est attendu, de reconstruire la géométrie des variations plus petite que la longueur d'onde, mais la profondeur et l'extension globale du défaut sont bien captés. On peut noter toutefois la forme allongée selon l'axe du tuyau de la tâche représentant le défaut sur la cartographie, ce qui est confirmé sur la coupe Figure 6 (d). Cela vient d'une perte de résolution dans l'imagerie selon l'axe du tuyau, car contrairement au cas de la plaque où les capteurs entourent de manière uniforme le défaut, ici la distribution de capteurs n'est pas « fermée », la géométrie fait qu'il manque des capteurs situés dans l'axe du tuyau et donc des trajets pour « attaquer » le défaut de manière circonférentielle. Une possibilité pour améliorer cette résolution axiale serait d'utiliser les trajets hélicoïdaux, qui offrent un angle d'attaque différent sur le défaut, et donc de nouvelles informations [17]. Cela fera l'objet d'améliorations ultérieures de la méthode.

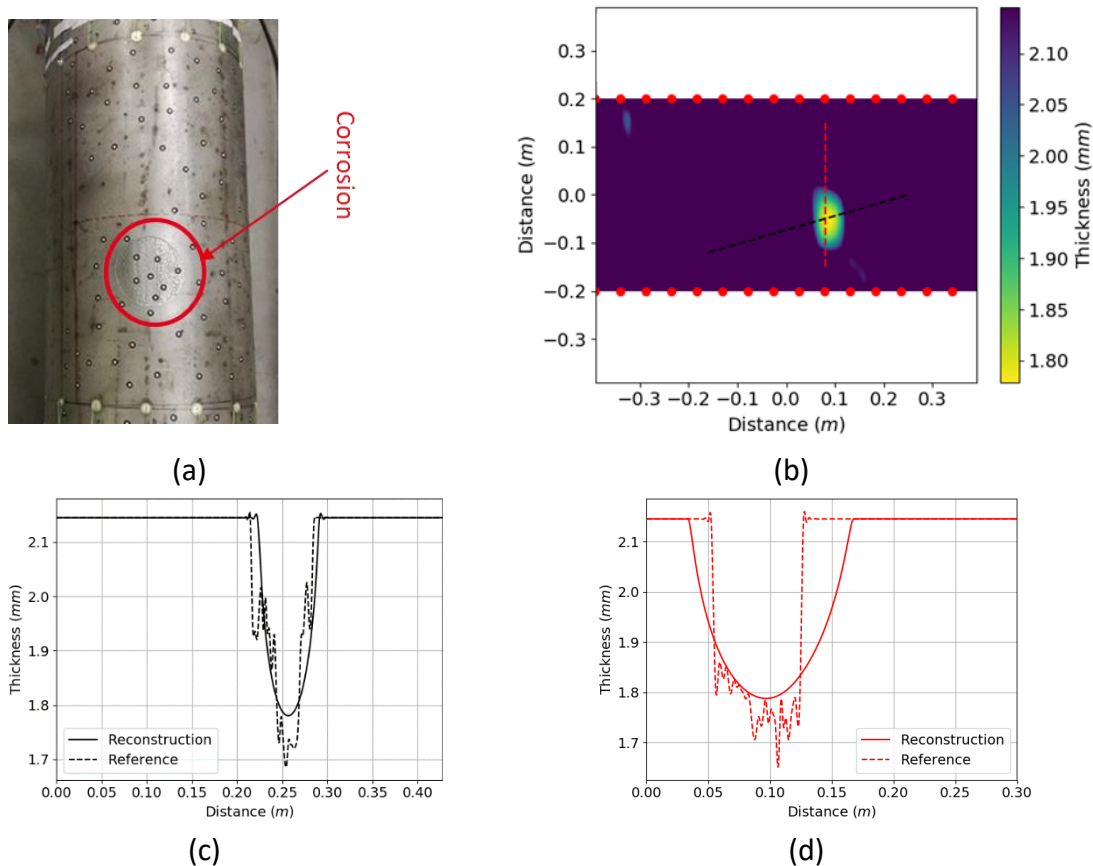


Figure 6 : (a) Tuyau en acier inoxydable de 2,15 mm d'épaisseur et 254 mm de diamètre équipé de 2 anneaux de 15 disques piézoélectriques de 8 mm de diamètre, (b) cartographie d'épaisseur reconstruite à l'aide de l'algorithme HARBUT à partir de 10 secondes de bruit ambiant, (c) coupe circconférentielle de la cartographie (noir) au niveau du défaut artificiel et (d) coupe axiale de la cartographie (rouge) au niveau du défaut artificiel.

(a) 2.15 mm thick and 254 mm diameter steel pipe equipped with 2 rings of 15 piezoelectric discs of 8 mm diameter, (b) thickness cartography reconstructed using HARBUT algorithm from 10 seconds of ambient noise, (c) circumferential cross-section of the mapping (black) on the artificial defect and (d) axial cross-section of the cartography (red) on the artificial defect.

5. Conclusions et perspectives

Nous avons présenté dans cet article une courte synthèse des travaux de tomographie passive pour le contrôle santé des structures effectués au CEA-LIST en collaboration avec l'Université Polytechnique Hauts-de-France. L'exploitation du bruit élastique ambiant permet de s'affranchir de l'émission d'ondes par le système et offre une simplification du système bienvenue pour les applications où l'intrusivité de la solution est un paramètre clé. Les cartographies d'épaisseur obtenues par tomographie passive permettent une mesure quantitative et absolue (sans comparaison à un état de référence) de l'état de santé de la structure.

Toutefois, à ce stade, le déploiement d'une telle densité de capteurs ne semble pas totalement réaliste pour nombre d'applications industrielles. En effet, chaque capteur ayant

besoin d'être individuellement relié au système d'acquisition, il en résulte une quantité de câbles souvent rédhibitoire.

C'est pourquoi les travaux s'orientent vers l'utilisation de capteurs de type réseaux de Bragg sur fibre optique. En effet, les réseaux de Bragg sont légers, peu intrusifs, insensibles aux perturbations électromagnétiques et résistants aux environnements sévères, ce qui en fait des capteurs de choix pour des applications SHM. En revanche, ils ne peuvent pas émettre d'ondes, ce qui empêche de réaliser de la tomographie active. Couplés à l'approche passive, il devient envisageable de réaliser des tomographies passives à l'aide de ces capteurs [18]. La force principale des réseaux de Bragg sur fibre optique est leur capacité de multiplexage : des recherches menées au CEA-LIST montre qu'il est envisageable à court terme d'interroger simultanément plusieurs dizaines de réseaux de Bragg disposés sur une même fibre optique aux fréquences d'intérêt pour nos applications [19]. Le système de mesure qui en résultera disposera alors de tous les avantages des fibres optiques en terme de facilité de déploiement, non intrusivité et de résistance aux environnements sévères, tout en offrant la très grande précision et robustesse du diagnostic par tomographie par ondes élastiques.

Références

- [1] B. Chapuis, «Introduction to Structural Health Monitoring,» chez *Sensors, Algorithms and Applications for Structural Health Monitoring*, Springer, 2017, pp. 1-11.
- [2] P. Swindell, J. Doyle et D. Roach, «Integration of Structural Health Monitoring Solutions onto Commercial Aircraft via the Federal Aviation Administration Structural Health Monitoring Research Program,» chez *AIP Conference Proceedings 1806*, 2017.
- [3] A. Kulakovskiy, «Développement d'un système SHM pour aéronef par ondes élastiques guidées,» Ecole doctorale de l'Ecole Polytechnique, Saclay, 2019.
- [4] C. H. Wang, J. T. Rose et F.-K. Chang, «A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring,» *Smart Materials and Structures*, vol. 13, p. 415, 2004.
- [5] J. E. Michaels et T. E. Michaels, «Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates,» *Wave Motion*, vol. 44, pp. 482-492, 2007.
- [6] N. Quaegebeur, P. Masson, D. Langlois-Demers et P. Micheau, «Dispersion-based imaging for structural health monitoring using sparse and compact arrays,» *Smart Materials and Structures*, vol. 20, p. 025005, 2011.
- [7] O. Lobkis et R. Weaver, «On the emergence of Green's function in the correlations of a diffuse field,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, p. 3011, 2001.

- [8] T. Druet, «Tomographie Passive par Ondes Guidées pour des Applications de Contrôle Santé Intégré,» Ecole doctorale de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, 2017.
- [9] L. Chehami, E. Moulin, J. De Rosny et C. Prada, «Accuracy of Green's function estimation from correlation of diffuse elastic waves on thin plates,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, p. 3505, 2019.
- [10] T. Gallot, S. Cateline, P. Roux et M. Campillo, «A passive inverse filter for Green's function retrieval,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, p. EL21, 2012.
- [11] T. Druet, A. Recoquillay, B. Chapuis et E. Moulin, «Passive guided wave tomography for structural health monitoring,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, p. 2395, 2019.
- [12] J. McKeon et M. Hinders, «Parallel projection and crosshole Lamb wave contact scanning tomography,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, p. 2568, 1999.
- [13] F. Simonetti et N. Huang, «From beamforming to diffraction tomography,» *Applied Physics*, vol. 103, p. 103110, 2008.
- [14] P. Huthwaite et F. Simonetti, «High-resolution imaging without iteration: A fast and robust method for breast ultrasound tomography,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, pp. 1721-1734, 2011.
- [15] T. Druet, J.-L. Tastet, B. Chapuis et E. Moulin, «Autocalibration method for guided wave tomography with undersampled data,» *Wave Motion*, vol. 89, pp. 265-283, 2019.
- [16] E. Larose, P. Roux et M. Campillo, «Reconstruction of Rayleigh-Lamb dispersion spectrum based on noise obtained from an air-jet forcing,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, p. 3047, 2007.
- [17] C. Willey, F. Simonetti, P. Nagy et G. Instanes, «Guided wave tomography of pipes with high-order helical modes,» *NDT&E International*, vol. 65, pp. 8-21, 2014.
- [18] T. Druet, B. Chapuis, M. Jules, G. Laffont et E. Moulin, «Passive guided waves measurements using fiber Bragg gratings sensors,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 144, pp. 1198-1202, 2018.
- [19] A. Recoquillay, T. Druet, S. Nehr, M. Horpin, O. Mesnil, B. Chapuis, G. Laffont et O. D'Almeida, «Guided wave imaging of composite plates using passive acquisitions by Fiber Bragg Gratings,» *The Journal of the Acoustical Society of America* (2020) 147 (5), pp.3565-3574.