



HAL
open science

Etude expérimentale d'un système de contrôle santé intégré dans un composite aéronautique pour la détection de défauts par ondes guidées

Nina Kergosien, Ludovic Gavérina, Guillemette Ribay, Florence Saffar, Pierre
Beauchêne, Olivier Mesnil, Olivier Bareille

► To cite this version:

Nina Kergosien, Ludovic Gavérina, Guillemette Ribay, Florence Saffar, Pierre Beauchêne, et al.. Etude expérimentale d'un système de contrôle santé intégré dans un composite aéronautique pour la détection de défauts par ondes guidées. COFREND 2023 -, Jun 2023, Marseille, France. hal-04299560

HAL Id: hal-04299560

<https://hal.science/hal-04299560v1>

Submitted on 22 Nov 2023

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.

Etude expérimentale d'un système de contrôle santé intégré dans un composite aéronautique pour la détection de défauts par ondes guidées

Nina Kergosien^{1,2,3}, Ludovic Gavérina¹, Guillemette Ribay²,
Florence Saffar¹, Pierre Beauchêne¹, Olivier Mesnil² et Olivier Bareille³

¹DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay, F-92322 Châtillon, France ;

²Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120 Palaiseau, France ;

³Ecole Centrale Lyon, LTDS, CNRS UMR 5513, F-69134 Ecully, France ;

*corresponding author, E-mail: nina.kergosien@onera.fr

Résumé

L'utilisation des méthodes de contrôle non-destructif (CND) est essentielle pour assurer l'intégrité des structures aéronautiques, et les systèmes de contrôle santé intégré des structures (SHM) offrent la possibilité de surveiller en temps réel l'état des structures ou de contrôler des pièces difficiles d'accès. Les matériaux composites, de plus en plus utilisés pour la fabrication des avions, permettent d'intégrer des systèmes SHM directement à cœur du matériau. L'étude se concentre sur l'intégration d'un transducteur piézoélectrique (PZT) à cœur du composite stratifié. L'intégrité du PZT intégré est vérifiée par radiographie X, et sa capacité d'émission et de réception des ondes ultrasonores guidées est vérifiée avec un banc de vibrométrie laser et des essais pitch-catch. Les résultats montrent que l'intégration du PZT à cœur du composite est réussie, et que le système SHM intégré est capable de générer et détecter des ondes ultrasonores guidées. Les paramètres optimaux pour réaliser un essai de détection de défauts sont ensuite déterminés. L'amplitude des ondes de flexion est favorisée par un positionnement du PZT intégré près de la surface du composite. De plus, la fréquence d'excitation optimale du PZT est déterminée pour permettre une détection efficace des défauts. Les résultats ouvrent la voie à l'utilisation de cette méthode pour assurer la surveillance et la maintenance des structures aéronautiques de manière fiable et plus efficace.

1. Introduction

Afin de vérifier l'intégrité des avions, ceux-ci sont inspectés grâce à des méthodes de contrôle non-destructif (CND). L'utilisation de systèmes de contrôle santé intégré (SHM) permet d'optimiser la

maintenance car ils donnent la possibilité de suivre l'état des structures en temps réel ou de contrôler ponctuellement des pièces difficiles d'accès par les méthodes de CND courantes. Les matériaux composites, utilisés de manière croissante pour la fabrication des avions, offrent de par leur méthode d'élaboration, la possibilité d'intégrer un système SHM à cœur du matériau. L'instrumentation à cœur de systèmes SHM présente plusieurs avantages comme la protection des transducteurs face à l'environnement [1], la résolution des difficultés engendrées par le collage de l'instrumentation en surface [2], et une information à cœur pendant toute la durée de vie de la pièce [3].

Les objectifs de cette étude sont l'évaluation de la capacité d'un transducteur à émettre et recevoir des ondes ultrasonores lorsqu'il est inséré dans un composite stratifié de type aéronautique. Il s'agit donc d'élaborer des plaques en optimisant l'intégration d'un système SHM à cœur et d'évaluer les performances de l'instrumentation intégrée. L'étude est ensuite validée par la réalisation d'un essai de détection de défauts sur un matériau composite instrumenté à cœur.

2. Intégration du système SHM

Afin de se rapprocher des méthodes de fabrications industrielles de structures pour les avions, le matériau composite therm durcissable T700/M21, à fibres de carbone unidirectionnelles et matrice Epoxy, a été utilisé pour la fabrication de plaques planes. $[0,90,0,90,0]_s$ est l'empilement retenu pour le stratifié. Les élaborations en autoclave ont aussi été réalisées suivant un cycle de pression comprenant un palier à 7 bars et un cycle de température avec deux paliers (1h à 130°C et 1h à 180°C). L'instrumentation intégrée doit donc résister

aux conditions de fabrication du matériau composite. Parmi le large panel des transducteurs proposés pour les applications SHM, les disques piézoélectriques (PZT : Plomb Zirconate Titanate), couramment employés pour les systèmes SHM en surface, ont été retenus. Leur polyvalence leur permet de générer et réceptionner des ondes de Lamb [4], permettant la détection des défauts dans les plaques. Les ondes de Lamb sont composées de modes quasi-symétriques et quasi-antisymétriques, sensibles chacun à certains types de défauts. La méthode d'intégration de transducteurs PZT (10 mm de diamètre et 0,2 mm d'épaisseur) employée consiste en une découpe d'un pli de composite (environ 0,27 mm d'épaisseur) aux dimensions du transducteur pour l'intégrer directement dans le pli et non entre deux plis de composite.

3. Evaluation des performances du système SHM intégré

3.1. Vérification de l'intégrité du système SHM intégré

Afin d'assurer l'intégrité du PZT intégré durant le cycle d'élaboration du matériau composite, les travaux ont d'abord consisté à optimiser l'intégration de l'instrumentation à cœur du composite. Différents essais de soudure entre les électrodes du transducteur et les fils de connexion ont été réalisés [5]. Des observations microscopiques ont mis en évidence que les fibres de carbone peuvent être en contact avec l'instrumentation intégrée et engendrer des pertes d'énergies dans le matériau. Pour cette raison, une isolation électrique des fils et des électrodes du transducteur a été mise en œuvre. Une observation microscopique après découpe d'un PZT intégré avec la méthode d'intégration dans un pli et les connexions retenues est présentée en Figure 1.

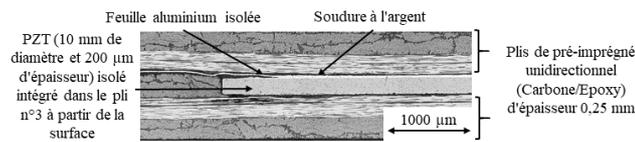


Figure 1 : Observation microscopique de l'intégration d'un PZT à cœur de matériau composite

Des radiographies X (Figure 2) ont permis de valider cette méthode de connexion et d'isolation électrique car elle préserve l'intégrité des transducteurs lors de l'élaboration.

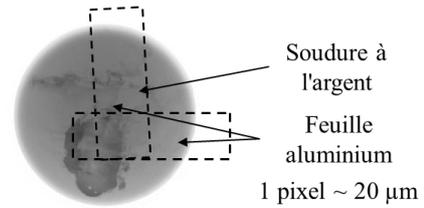


Figure 2 : Radiographie X d'un PZT intégré

3.2. Vérification de la capacité du système SHM intégré à générer des ondes guidées

Un banc de vibrométrie laser par effet Doppler (LDV) a ensuite été utilisé pour mesurer le déplacement hors plan généré par un transducteur intégré dans une plaque composite. Un signal sinusoïdal de 10 V crête à crête modulé en fréquence entre 30 et 200 kHz a été généré par le transducteur. Cette plage de fréquence est utilisée pour éviter les modes d'ordre supplémentaire lors d'un futur essai de détection de défaut. Une surface de 10x10 cm² a été scannée avec un pas de 1 mm.

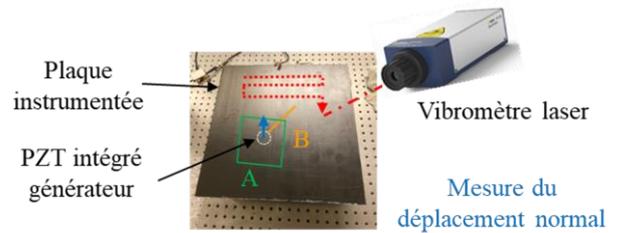


Figure 3 : Banc de vibrométrie laser : la zone A correspond au scan réalisé pour la cartographie présentée en Figure 4 et la zone B pour le scan utilisé pour la comparaison d'amplitude de la Figure 7 et pour le calcul de la Bi-FFT de la Figure 8

La cartographie par émission du transducteur intégré dans le 3^{ème} pli (Figure 4) confirme la capacité du transducteur intégré à émettre des ondes ultrasonores guidées. L'axe X correspond aux 6 plis orientés à 0 degré.

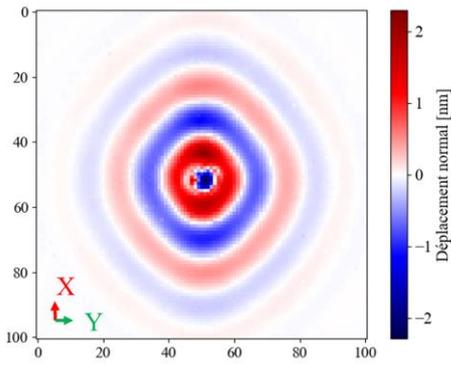


Figure 4 : Cartographie issue d’enregistrement du déplacement hors plan en vibrométrie laser pour l’émission d’un PZT intégré à cœur de composite (plis à 0 degré correspondent à l’axe X – cartographie adapté de l’article [6])

La propagation d’ondes observée est anisotrope en raison de l’orientation des plis du stratifié et correspond au premier mode quasi-antisymétrique des ondes de Lamb (noté qA0) d’après le calcul théorique réalisé par méthode SAFE (Semi-Analytique Finite Element) (

Figure 5). Ce mode quasi-antisymétrique sera choisi pour la détection de défauts, car pour ce stratifié, il est moins dépendant de la direction de propagation dans le composite, ce qui facilite l’interprétation des signaux lors d’un essai de détection de défaut. De plus, sa longueur d’onde est suffisamment courte pour une étude dans une plaque de 400x400 mm² (Figure 6) et est compatible avec la détection de défauts de plus petite taille que le premier mode quasi-tisymétrique.qS0 (un défaut de diamètre D étant détecté par un mode si la longueur d’onde du mode est au maximum égale à 2D).

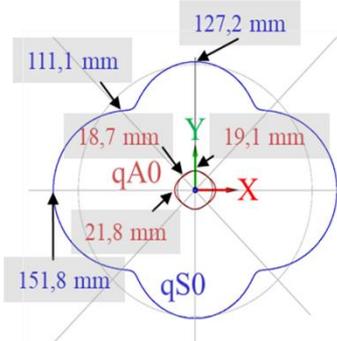


Figure 5 : Diagramme polaire des longueurs d’onde des modes quasi-symétrique (qS0) et quasi-antisymétriques (qA0) à 50 kHz

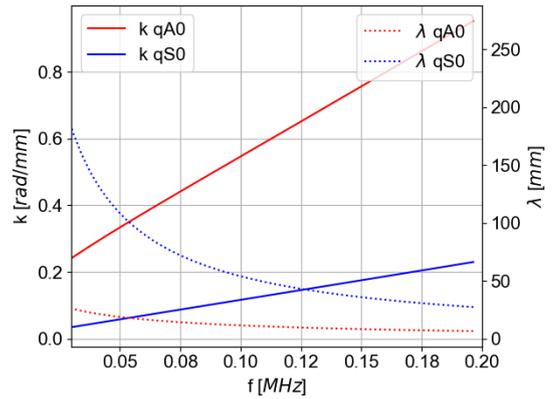


Figure 6 : Longueur et nombre d’onde des modes de Lamb se propageant dans la plaque à 45° calculés avec la méthode SAFE (graphe extrait de l’article [6])

3.3. Effet de l’intégration sur l’amplitude des ondes émises

Deux scans sont réalisés pour une émission d’un PZT couplé au Salol en surface de composite et d’un PZT intégré. Pour comparer les amplitudes de l’enveloppe de chaque méthode d’émission, la Figure 7 est tracée.

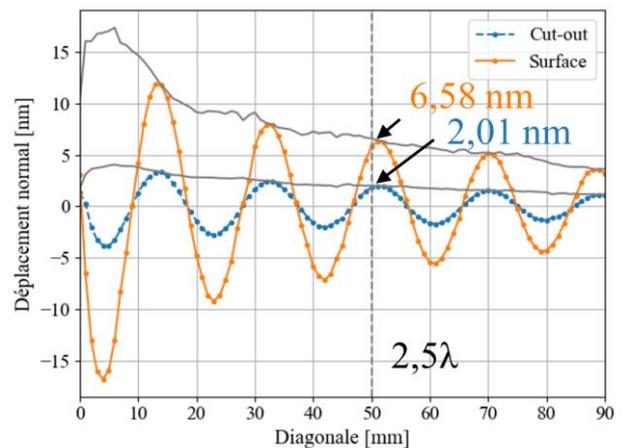


Figure 7 : Déplacement normal en diagonale acquis par vibrométrie laser à 50 kHz et 110 µs pour une émission avec un PZT intégré ou en surface

On observe un rapport d’amplitude d’environ 3 entre onde générée par PZT en surface versus PZT intégré (mesure réalisée à 50 mm de la source, soit à $2,5\lambda$, une distance suffisamment longue pour que les modes évanescents soient négligeables). Cette différence s’explique en partie par la position du PZT relative à la fibre neutre du composite. Le mode qA0 est généré avec plus d’amplitude lorsque le PZT est placé proche de la surface du composite.

3.4. Détermination de la fréquence d’essai optimale pour une détection de défaut

La fréquence optimale d’excitation d’un disque PZT est bien connue dans la littérature pour les transducteurs collés [7], mais pas pour les disques PZT intégrés. Ces fréquences dépendent de la nature et de l’épaisseur du matériau composite, de la géométrie du transducteur et des conditions limites entre la plaque et le transducteur. Réciproquement, sachant que pour détecter des défauts d’une certaine taille, il est nécessaire de réaliser le contrôle à des fréquences appropriées (taille du défaut $\sim \lambda/2$), connaître l’excitabilité théorique d’un PZT intégré permettra un choix adéquat du diamètre de ce dernier pour l’intégration, sous condition de préserver son intégrité. L’excitabilité est alors étudiée expérimentalement par calcul de Bi-FFT à partir du signal mesuré selon une direction (Figure 8).

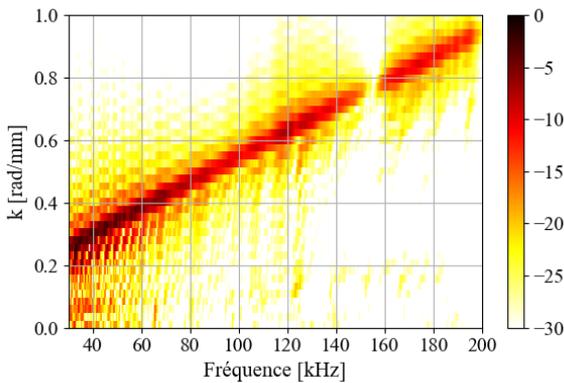


Figure 8 : Bi-FFT d’un scan effectué dans un direction à 45° dans la plaque pour une émission par un PZT intégré dans un 3^{ème} pli de composite

Par comparaison avec le nombre d’onde (k) théorique présenté en Figure 6, le nombre d’onde obtenu par calcul de Bi-FFT confirme la propagation préférentielle du mode $qA0$ sur cette plage de fréquences. L’amplitude du mode est extraite et tracée sur la Figure 9.

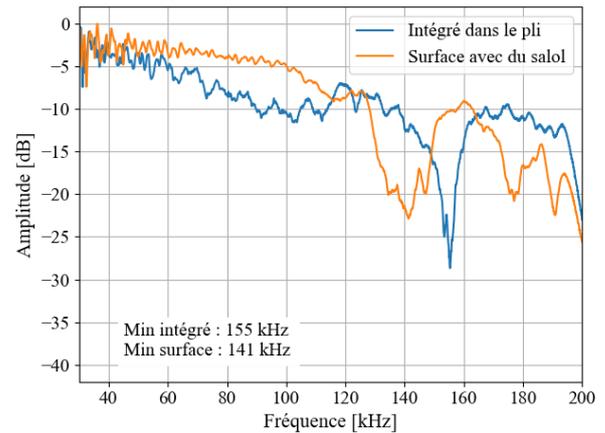


Figure 9 : Fréquences de coupure d’un PZT intégré dans un pli et d’un PZT couplé au salol en surface de composite (courbe intégré extrait de l’article [6] et nouveau cas en surface)

Une diminution générale de l’amplitude émise entre 30 et 200 kHz s’explique par l’atténuation du matériau composite qui affecte plus particulièrement les petites longueurs d’onde (λ) se propageant aux hautes fréquences. Les fréquences préférentiellement émises se trouvent entre 30 et 140 kHz pour le PZT intégré. Cette observation met en évidence des fréquences de coupures des PZT auxquelles ils n’émettront pas d’onde s’ils sont excités. Ces fréquences de coupure ne sont pas positionnées aux mêmes fréquences pour le PZT intégré et le PZT couplé en surface, ce qui traduit l’effet du couplage des transducteurs car les deux PZT utilisés ainsi que la plaque ont la même géométrie.

4. Essai de détection de défaut

Afin de vérifier la capacité du système intégré à détecter des défauts, des essais d’émission/réception (pitch catch) sont réalisés selon le montage présenté en Figure 10. Plusieurs configurations sont testées. Il s’agit A) d’un essai avec un PZT en surface comme émetteur et un PZT intégré comme récepteur, B) un deuxième essai avec un PZT intégré comme émetteur et un PZT en surface comme récepteur et C) un dernier essai avec deux PZT en surface comme émetteur et récepteur. Les essais sont réalisés à 50 kHz.

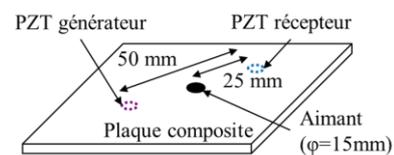


Figure 10 : Montage des essais pitch catch avec et sans défaut simulé par un aimant

Les signaux générés et enregistrés dans la configuration A) sont présentés sur la Figure 11. Les temps de vol des modes qS0 et qA0 sont calculés à partir du t0 déterminé sur le maximum de l'enveloppe du signal émis. Le paquet d'onde qS0 arrive à 42 μ s et qA0 à 68 μ s.

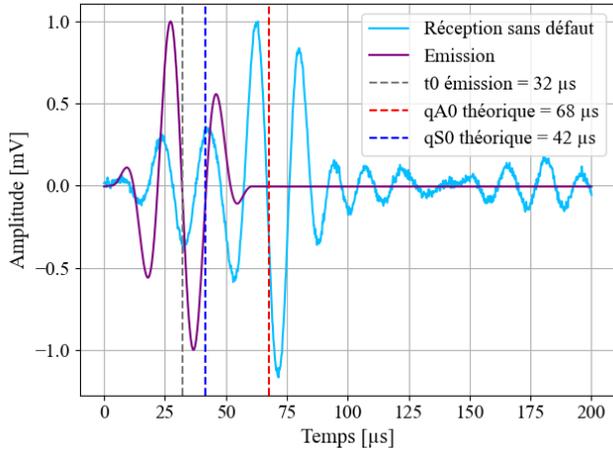


Figure 11 : Signaux générés (violet) et reçu (bleu) normalisés pour un essai en configuration A) sans défaut

Pour chaque configuration, les signaux reçus dans les configuration avec et sans défaut sont soustraits et présentés en Figure 12 pour la configuration A), en Figure 13 pour la configuration B) et en Figure 14 pour la configuration C).

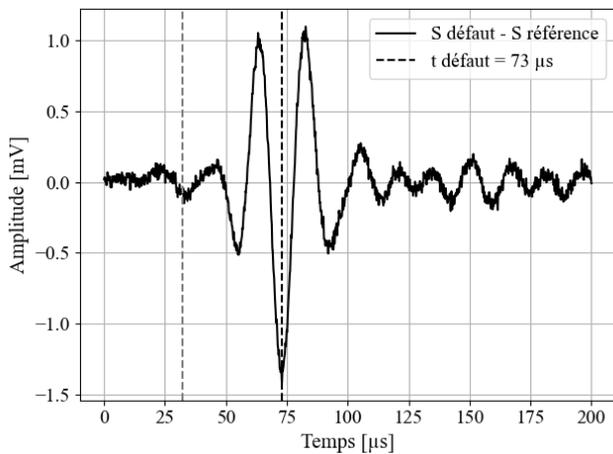


Figure 12 : Signaux soustraits pour la configuration A) émission avec un PZT en surface et réception avec un PZT intégré

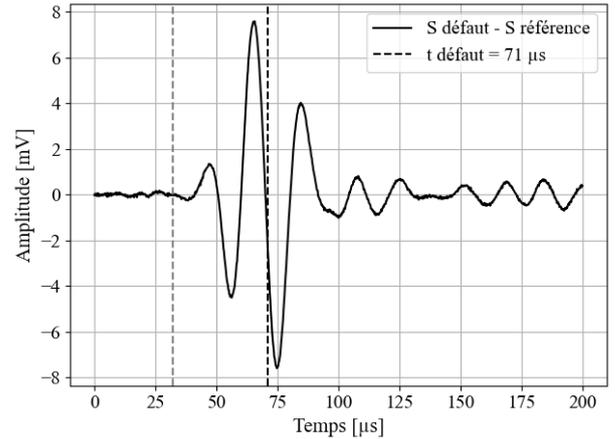


Figure 13 : Signaux soustraits pour la configuration B) émission avec un PZT intégré et réception avec un PZT en surface

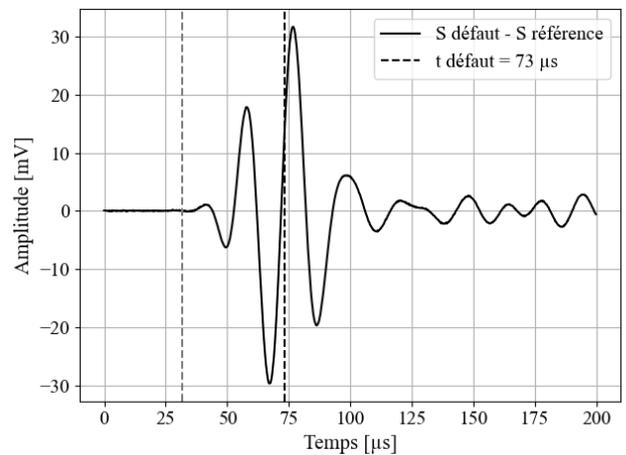


Figure 14 : Signaux soustraits pour la configuration C) émission et réception avec deux PZT en surface

La présence de l'aimant apparaît via un paquet d'onde du mode qA0 résiduel après soustraction de l'état de référence. La détection de défaut est donc bien permise par un PZT intégré. L'amplitude de détection est plus importante lorsque les PZT émetteur et récepteur sont positionnés en surface de composite. Avec un PZT intégré en réception, l'amplitude mesurée est plus faible que lorsqu'il est utilisé en émission ou avec un système SHM couplé en surface.

5. Discussion

Ces travaux ont permis de voir que les fréquences d'émission de nos PZT intégrés les plus adaptées pour une inspection par onde guidée qA0 sont d'au maximum 140 kHz sans rencontrer de fréquence de coupure, ce qui permet une détection de défaut d'une taille jusqu'à 5 mm. Cette fréquence peut être utilisée à condition que l'atténuation du matériau ne soit pas trop importante par rapport à la distance entre les transducteurs utilisés pour une détection de défaut.

Que ce soit en émission ou en réception, la position selon la profondeur du PZT intégré a un impact sur l'amplitude des ondes générées et reçues.

6. Conclusions

Cette étude a révélé que les fréquences d'émission les plus appropriées pour l'inspection par onde guidées avec nos PZT intégrés (10 mm de diamètre) sont de 140 kHz maximum, sans rencontrer de fréquence de coupure, ce qui permet la détection de défauts d'une taille allant jusqu'à 5 mm. Cependant, cette fréquence peut être utilisée à condition que l'atténuation du matériau ne soit pas excessive par rapport à la distance entre les transducteurs utilisés pour la détection des défauts. En outre, la position en profondeur du PZT intégré a un impact sur l'amplitude des ondes générées et reçues, tant en émission qu'en réception.

La suite de cette étude consistera en la compréhension des paramètres physiques mis en jeu par l'intégration et impactant la transduction. Les résultats permettront de réaliser une modélisation simplifiée d'une détection de défauts au sein du logiciel CIVA.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Katia Denis avec qui les plaques ont été élaborés en autoclave, Philippe Nunez pour l'ébavurage des plaques et Adrien Stolidi pour les radiographies par rayons X.

References

- [1] M. S. Salmanpour, Z. Sharif Khodaei, and M. H. Aliabadi, "Airborne Transducer Integrity under Operational Environment for Structural Health Monitoring," *Sensors*, vol. 16, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2016, doi: 10.3390/s16122110.
- [2] G. Lanzara, Y. Yoon, Y. Kim, and F.-K. Chang, "Influence of Interface Degradation on the Performance of Piezoelectric Actuators," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 20, no. 14, pp. 1699–1710, Sep. 2009, doi: 10.1177/1045389X09341198.
- [3] H.-K. Kang, D.-H. Kang, H.-J. Bang, C.-S. Hong, and C.-G. Kim, "Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 11, no. 2, pp. 279–287, Apr. 2002, doi: 10.1088/0964-1726/11/2/311.
- [4] H. Lamb, "On the Vibrations of an Elastic Sphere," *Proc. Lond. Math. Soc.*, vol. s1-13, no. 1, pp. 189–212, 1881, doi: <https://doi.org/10.1112/plms/s1-13.1.189>.
- [5] N. Kergosien *et al.*, "Optimization of a Structural Health Monitoring systems integration in laminated composite cured in autoclave," 2021.
- [6] N. Kergosien *et al.*, "Lead Zirconate Titanate Transducers Embedded in Composite Laminates: The Influence of the Integration Method on Ultrasound Transduction," *Materials*, vol. 16, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2023, doi: 10.3390/ma16083057.
- [7] V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors - 2nd Edition*, Elsevier, 2014. Accessed: May 31, 2021. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/structural-health-monitoring-with-piezoelectric-wafer-active-sensors/giurgiutiu/978-0-12-418691-0>