

CFA/VISHNO 2016

Capteur ultrasonore multi-élément dédié à la caractérisation quantitative haute résolution

P.-A. Meignen, E. Le Clézio et G. Despaux
IES Université Montpellier, Campus St Priest, 860 Rue Saint Priest, CC 05 003, 34095
Montpellier, France
pierre-antoine.meignen@umontpellier.fr



LE MANS

La microscopie acoustique peut être appliquée à la caractérisation non destructive de matériaux aux échelles microscopiques. L'interaction, par le biais d'une lentille convergente, d'ondes de surface et d'ondes de volume permet en effet l'obtention d'une courbe d'interférence, la signature acoustique, dont la pseudo période peut être assimilée à la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh, cette dernière pouvant être reliée aux propriétés locales mécaniques du matériau (module d'Young, de cisaillement, de compressibilité et coefficient de Poisson). Cependant, malgré son efficacité, cette méthode impose l'obtention d'un grand nombre d'acquisitions. En effet, pour chaque point du plan ausculté, un ensemble de signaux temporels doit être acquis afin d'autoriser la reconstruction de la figure d'interférence. Cet aspect hautement chronophage est actuellement rédhibitoire au développement d'une imagerie quantitative. Une des solutions envisagées pour pallier ce problème est de décorrélérer la génération et la réception des ondes spéculaires (en incidence normale) et des ondes de surface au moyen d'un capteur focalisé multi-éléments. Cette dé-corrélation permet théoriquement de récupérer des informations sur l'onde de Rayleigh sans avoir recours à une signature acoustique complète et donc en réduisant considérablement le nombre d'acquisitions nécessaires. Dans le présent article, la modélisation du rayonnement d'un capteur focalisé multi-éléments fonctionnant en hautes fréquences et de son interaction avec un matériau plan sera tout d'abord présentée. Elle se base sur la résolution de l'intégrale de Rayleigh par le principe de Huygens-Fresnel. Une attention particulière sera portée à la mise en œuvre d'une géométrie de capteur autorisant l'émission et la réception privilégiées de l'onde Rayleigh. Dans un second temps, la réalisation de capteurs sera exposée ainsi que la caractérisation de leur rayonnement par vibrométrie laser. Le potentiel de ce dispositif en matière d'imagerie simultanée de l'état de surface et des propriétés mécaniques du matériau sera enfin discuté.

1 Introduction

La quantification des propriétés mécaniques de matériaux est possible en utilisant les ondes acoustiques. Ces dernières ont l'avantage d'être non destructives comparées à d'autres méthodes bien connues telles que l'essai de flexion ou la méthode d'indentation qui impliquent toutes les deux des déformations du matériau. Les méthodes acoustiques sont basées sur la mesure des vitesses de propagation dans un matériau, la vitesse longitudinale et la vitesse transversale ou la vitesse de Rayleigh. Ces trois paramètres sont reliés par la formule de Viktorov Eq. (1) :

$$V_R = V_T \frac{0.718 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}{0.75 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}. \quad (1)$$

Une première méthode acoustique possible est la technique pulse-écho qui mesure les vitesses longitudinales et transversales d'un matériau par propagation acoustique dans les directions adéquates [1]. L'inconvénient de cette méthode est sa non applicabilité à de petits objets ou à des objets possédant une géométrie irrégulière.

Le Microscope Acoustique à Balayage (MAB) appliqué à la quantification des propriétés mécaniques ne souffre pas des inconvénients précédemment cités. Ce dispositif permet de mesurer à la fois la vitesse longitudinale et la vitesse de Rayleigh. De plus, son intérêt principal réside dans son évaluation ponctuelle des propriétés mécaniques dont la résolution est directement proportionnelle à la fréquence des transducteurs utilisés. Cette technique se base sur la mesure de la signature acoustique (aussi appelée courbe $V(z)$) d'un matériau, mesure qui est faite par des multiples acquisitions de signaux à différentes focalisations. Celles-ci rendent cependant impossible une cartographie des propriétés mécaniques étant donné le fait qu'une évaluation sur un seul point nécessite plusieurs secondes d'acquisition, ce qui, à grande échelle, est extrêmement chronophage.

La présente communication expose le développement d'un transducteur multi-éléments haute fréquence pour MAB qui devrait permettre une réduction conséquente du nombre d'acquisitions nécessaires et donc du temps de mesure. Ce capteur permettrait une imagerie à la fois de la

topographie et des propriétés mécaniques d'un matériau. De plus un avantage indéniable de cette méthode serait sa résolution supérieure à celle de la signature acoustique [2]. L'acquisition d'un $V(z)$ avec plusieurs pseudo-périodes demande une grande défocalisation là où la mesure de temps de vol ne nécessiterait que de faibles déplacements.

La première partie de cette communication détaillera la mesure de propriétés mécaniques par MAB avant d'exposer les caractéristiques du capteur multi-éléments dans une deuxième partie. Une modélisation du champ du capteur sera présentée et mise en parallèle d'une caractérisation par vibrométrie laser du champ rayonné dans la troisième et la quatrième partie.

2 Mesure de propriétés mécaniques

Le MAB utilise un capteur focalisé (avec lentille) permettant de cartographier une surface point par point. La taille de la tache focale du capteur est inversement proportionnelle à sa fréquence donc plus sa fréquence sera élevée, plus sa résolution sera grande. Le capteur focalisé peut être utilisé pour mesurer les propriétés mécaniques d'un matériau en utilisant les ondes de Rayleigh générées. Ces dernières sont des ondes de surface qui ont une vitesse de propagation V_R qui peut être reliée directement à la vitesse longitudinale V_L et transverse V_T par la formule de Viktorov [3] Eq. (1). L'obtention de V_R permet de s'affranchir de la mesure de la vitesse transverse.

L'onde de Rayleigh est générée en excitant un matériau sous un certain angle, l'angle de Rayleigh θ_R , et au cours de sa propagation, cette onde va réémettre des ondes de volume dans le milieu couplant. Selon la théorie des rayons [4], présentée sur la Figure 1, deux trajets seulement sont possibles au sein du capteur ultrasonore, les autres trajets étant déviés par la lentille en dehors du transducteur. Ces deux trajets correspondent à deux ondes, l'onde spéculaire I et l'onde de Rayleigh II qui se recombinent au niveau du transducteur. En changeant la focalisation du capteur, la distance parcourue par chacune des deux ondes est modifiée ce qui induit une variation de leur phase respective au moment de leur recombinaison. En changeant la focalisation du capteur, le signal de sortie du transducteur présentera des minimums (ondes en opposition de phase) et

des maximums (ondes en phase). Cette figure d'interférence est appelée signature acoustique d'un matériau (voir Figure 2). Elle permet l'extraction de la vitesse de l'onde de Rayleigh qui peut être reliée, en calculant la vitesse transverse du matériau, aux propriétés mécaniques et notamment au module d'Young E :

$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}. \quad (2)$$

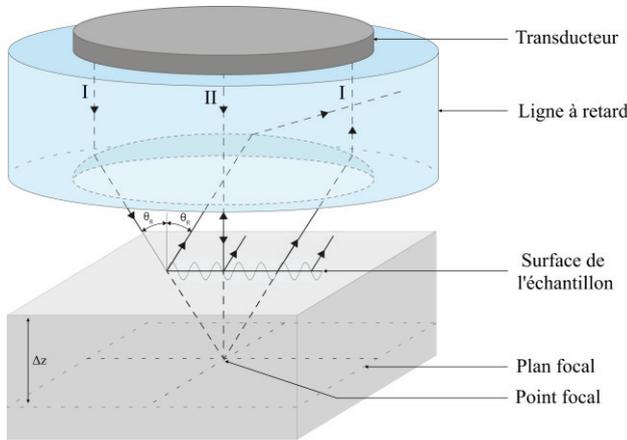


Figure 1 : Schéma d'un capteur focalisé, génération de l'onde de Rayleigh et interférences avec l'onde spéculaire.

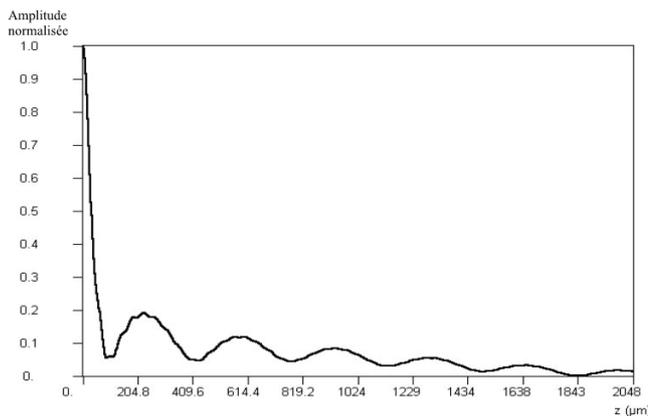


Figure 2 : Signature acoustique.

Cette méthode nécessite une succession d'acquisitions à différentes focalisations dans le matériau. Ce déplacement suivant l'axe z est généralement assuré par des moteurs linéaires pas à pas. Par conséquent, une imagerie de propriétés mécaniques est équivalente à de l'imagerie 3D, très chronophage, ce qui n'est pas envisageable pour des applications industrielles.

La solution considérée pour pallier ce problème est de décorréler l'onde spéculaire et l'onde de Rayleigh à partir d'un capteur multi-élément permettant leur acquisition séparée.

3 Capteur multi-éléments

Un capteur multi-élément a été dimensionné pour séparer l'émission et la réception de l'onde spéculaire et de l'onde de Rayleigh. L'objectif de ce capteur est de mesurer le temps de vol de ces deux ondes sans les interférences qui ont normalement lieu quand est utilisé un capteur classique mono-élément. Le transducteur est séparé en trois éléments piézoélectriques sur la Figure 3 : une électrode centrale et

deux électrodes latérales qui généreront et recevront respectivement l'onde spéculaire et l'onde de Rayleigh.

Une fois la différenciation faite entre les deux ondes, une mesure de temps de vol de l'onde de Rayleigh devrait permettre de remonter à la vitesse de Rayleigh.

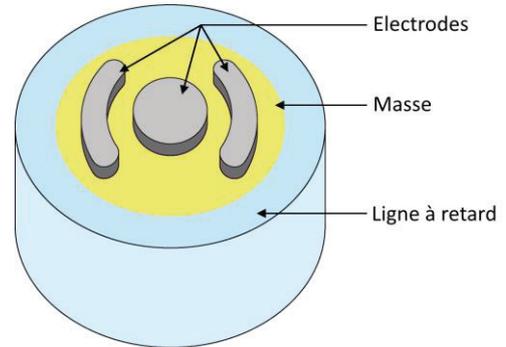


Figure 3 : Design des électrodes.

Le dimensionnement des électrodes va dépendre principalement de la résolution recherchée et donc de la fréquence utilisée. Le champ rayonné par chacune des électrodes doit être suffisamment directif, une électrode latérale rayonnant fortement sur le centre de la lentille générerait une onde spéculaire importante, ce qui n'est pas souhaité.

La section suivante présente le modèle développé afin d'appréhender les diagrammes de directivité des différents éléments du capteur.

4 Modélisation du champ rayonné par intégrale de Rayleigh

La résolution de l'intégrale de Rayleigh par la méthode de discrétisation des sources, principe d'Huygens-Fresnel [5], permet de définir toutes formes de sources. L'intégrale de Rayleigh (Eq. 3) permet de déterminer la pression p en un point r séparé par une distance R d'une surface S :

$$p(r, t) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} e^{j\omega t} \int_S \frac{e^{-jkR}}{R} dS. \quad (3)$$

Le champ rayonné par chacune des électrodes est présenté sur la Figure 5. Chaque rayonnement a été calculé indépendamment avant d'être regroupé sur la même figure pour une meilleure appréciation. Chacune des électrodes illumine par son lobe principal une partie spécifique de la lentille qui correspond à une zone d'incidence permettant d'exciter soit l'onde spéculaire (pour l'électrode centrale) soit l'onde de Rayleigh (pour les électrodes latérales). La taille de la ligne à retard est légèrement supérieure à la distance de Fresnel afin d'observer les vibrations en champ lointain.

Le calcul du champ rayonné sur la lentille a ensuite permis de simuler par champ angulaire [7] les échos reçus par le capteur multi-éléments après une réflexion sur un échantillon de verre. Quelques paramètres de simulation sont définis dans le tableau 1. Le coefficient de réflexion des ondes ultrasonores à l'interface eau/verre a été calculé en utilisant le formalisme de Stroh [8] pour l'ensemble du spectre angulaire du capteur.

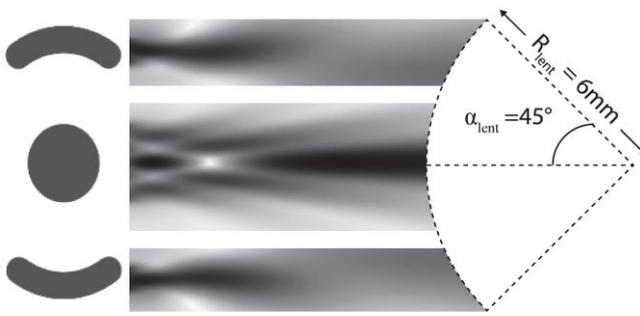


Figure 4 : Champ rayonné par les électrodes latérales (en haut et en bas) et par l'électrode centrale (au centre). La lentille est représentée en pointillés.

Tableau 1 : Paramètres de simulation.

Fréquence centrale du transducteur	7 MHz
Ligne à retard	4 mm
Vitesse longitudinale de la ligne à retard (silice)	5850
Angle d'ouverture de la lentille α_{lent}	45°
Rayon de la lentille	6 mm
Vitesse longitudinale du couplant (eau)	1500 m.s^{-1}
Vitesse longitudinale du verre	5968 m.s^{-1}
Vitesse transverse du verre	3764 m.s^{-1}
Densité	2.3 g.cm^{-3}

La fréquence de 7MHz est utilisée pour la comparaison avec les mesures par vibrométrie laser présentées dans la partie suivante. A terme, les fréquences utilisées seront de plusieurs centaines de MHz.

Lorsque le capteur est focalisé à la surface (Figure 6.a), les échos reçus par les deux électrodes sont en phase étant donné que les deux échos ont parcouru la même distance. Maintenant si le capteur est focalisé à l'intérieur du matériau, un décalage temporel se distingue nettement entre l'électrode centrale et l'électrode latérale. Ce décalage est dû à la différence de trajet des deux ondes qui normalement donne lieu à des interférences comme montré sur les échos reçus par l'élément entier (Figure 6.b).

Pour vérifier que les échos de l'électrode latérale correspondent bien à l'onde de Rayleigh, l'angle d'ouverture α_{lent} de la lentille a été réduit sur le modèle pour ne plus exciter le matériau sous l'angle de Rayleigh. Sur la Figure 7 sont présentés les échos reçus par l'électrode latérale lorsque le capteur est focalisé dans le matériau pour deux angles d'ouverture de la lentille, 45° et 20° . Dans ce dernier cas, qui n'atteint pas l'angle de Rayleigh du verre ($\sim 26^\circ$), l'écho reçu est très faible ce qui confirme l'hypothèse.

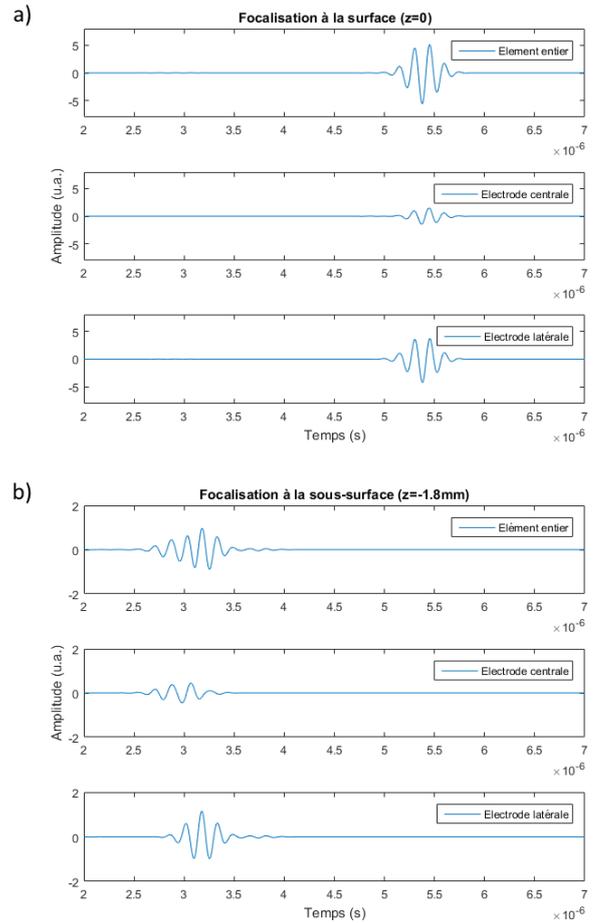


Figure 5 : Simulation des signaux reçus pour chaque électrode d'un capteur multi-éléments après émission et réflexion sur le verre, à la focale (a) et défocalisé de 1.8mm (b). $F=7\text{MHz}$.

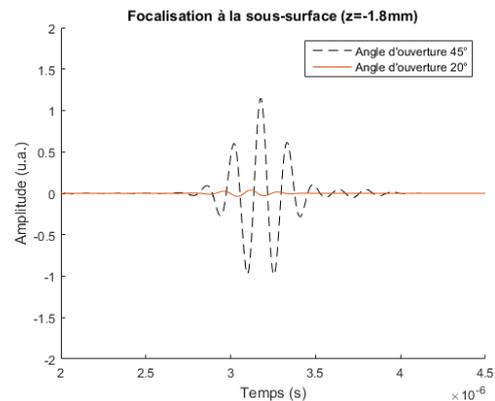


Figure 6 : Echos de l'électrode latérale, comparaison de deux angles d'ouverture α_{lent} de lentille à une même focalisation, en pointillés $\alpha_{\text{lent}}=45^\circ$ et en trait plein $\alpha_{\text{lent}}=20^\circ$.

La section suivante expose les résultats relatifs à la mesure, par vibrométrie laser à effet Doppler [9], du rayonnement acoustique d'un prototype du capteur précédemment exposé.

5 Caractérisation du champ rayonné par vibrométrie laser

Le dispositif schématisé sur la Figure 8 émet un faisceau laser qui va se réfléchir en un point d'une surface vibrante réfléchissante avant d'être recueilli par l'interféromètre. En fonction des vibrations de ce point, la fréquence des ondes de retour va varier du fait de l'effet Doppler. Ces vibrations pourront donc être mesurées par interférométrie.

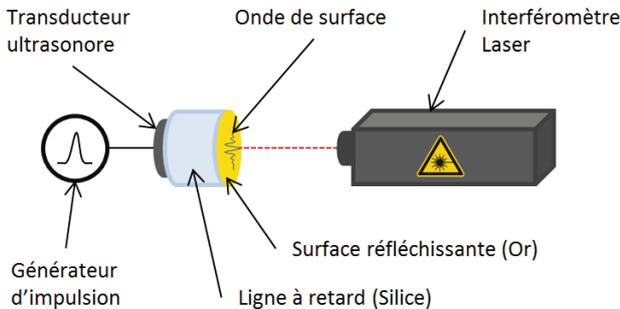


Figure 7 : Vibrométrie laser par effet Doppler.

Cette méthode a permis de mesurer les vibrations générées par le transducteur de la Figure 5 sur l'extrémité de la ligne à retard. Le champ rayonné est présenté sur la Figure 8. Afin de réaliser une imagerie "temporelle" de la surface, les acquisitions sont synchronisées par rapport au moment où le générateur d'impulsion excite le transducteur. Une fois l'image terminée et en faisant défiler temporellement chaque point, il est possible de visualiser l'impact initial des ondes sur la surface puis leur propagation sur cette même surface. Pour remonter au champ du transducteur, seule la première demi-période est conservée afin de supprimer le champ issu de la propagation des ondes de surface. Il peut tout d'abord être observé que la vibration expérimentale de l'extrémité de la ligne à retard est très proche du motif des électrodes, tant en termes de dimensions que de position. De plus, il apparaît clairement un découplage des sources acoustiques confirmant, dans une optique d'imagerie acoustique, la possibilité de générer et recevoir indépendamment la réflexion spéculaire et l'onde de Rayleigh.

Afin d'appréhender le comportement d'un tel capteur, les résultats précédents ont été de plus comparés à des simulations numériques. La Figure 9 présente en particulier le champ issu du capteur et présent au sein de la ligne à retard après propagation de 0,5 mm, 2 mm, 4 mm et 6 mm. Il peut y être observé que le champ modélisé proche de l'électrode (Figure 9.a) est en bon accord avec les données expérimentales. Au cours de sa construction (Figure 9.b,c), l'onde générée par les électrodes latérales va ensuite donner naissance à un champ interférentiel décalant progressivement le maximum d'énergie acoustique vers le centre du capteur (Figure 9.d). Ce décalage est dû à la forme des électrodes qui semble induire une certaine focalisation. Ces éléments devront être pris en compte dans un futur proche afin de concevoir un design optimisé du transducteur.

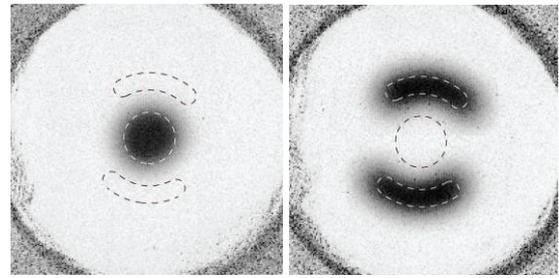


Figure 8 : Champs mesurés par vibrométrie laser sur une extrémité de ligne à retard plane excitée par un transducteur ultrasonore ($f_{\text{centrale}}=7\text{MHz}$). Les électrodes sont dessinées en pointillés.

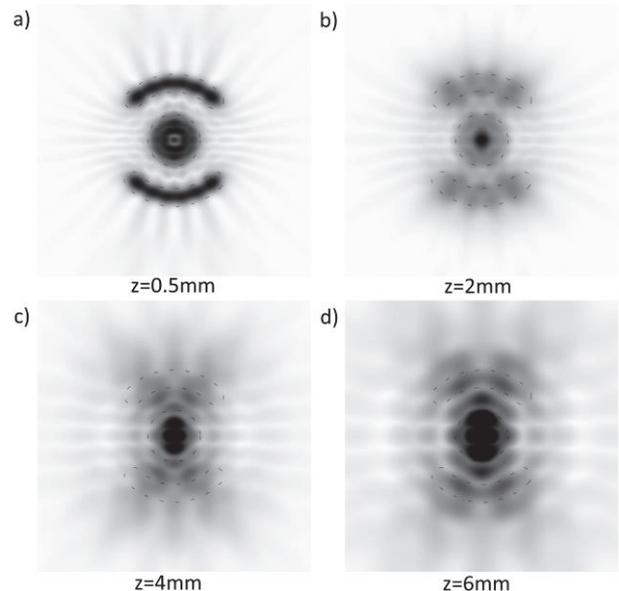


Figure 9 : Modélisation du champ émis par les trois électrodes sur différents plans parallèles au transducteur.

6 Conclusion

Un design de capteur ultrasonore multi-élément dédié à la cartographie de propriétés mécaniques a été présenté dans ce document. Une modélisation du champ émis par ce motif ainsi que des échos temporels a permis de confirmer qu'il était possible de séparer l'émission et la réception des ondes spéculaires et des ondes de Rayleigh. Ceci n'est possible qu'à la condition d'avoir des électrodes suffisamment directives et de travailler avec une ligne à retard de taille proche de la distance de Fresnel des électrodes. Les perspectives de ce travail concernent le développement d'un traitement du signal adapté permettant d'utiliser efficacement cette séparation d'onde afin d'autoriser une imagerie quantitative des propriétés microscopiques des milieux contrôlés.

Références

- [1] W. Weglewski, K. Bochenek, M. Basista, Th. Schubert, U. Jehring, J. Litniewski, S. Mackiewicz, Comparative assessment of Young's modulus measurements of metal-ceramic composites using mechanical and non-destructive tests and micro-CT based computational

- modeling, *Computational Materials Science* 77, 19-30 (2013).
- [2] D. Laux, G. Despau, F. Augereau, Improvement of the minimal characterisation size available by acoustic microscopy for mechanical parameters evaluation, *Applied Physics* 17, 163-169 (2002).
- [3] E. Dieulesaint, D. Royer, *Ondes Elastiques dans les solides*, Volume 1, Propagation libre et guidée (1974).
- [4] J. Attal, L. Robert, G. Despau, R. Caplain, J.M. Saurel, New developments in scanning acoustic microscopy, *Acoustical Imaging* 19, 607-616 (1992).
- [5] S. Kolkoori, K. C. Venkata, K. Balasubramaniam, Quantitative simulation of ultrasonic time of flight diffraction technique in 2D geometries using Huygens–Fresnel diffraction model: Theory and experimental comparison, *Ultrasonics* 55, 33-41 (2015).
- [6] K. G. Makris, D. Psaltis, Huygens–Fresnel diffraction and evanescent waves, *Optics Communications* 284, 1686-1689 (2011).
- [7] D. Frenet, *Application de la technologie multi-éléments à la caractérisation des matériaux par ondes acoustiques de surface en régime impulsionnel*, 2000.
- [8] M. Lam et al., Acoustic wave transmission through piezoelectric structured materials, *Ultrasonics* 49, 424–431 (2009).
- [9] M. Johansmann, G. Wirth, Laser Doppler vibrometry for measuring vibration in ultrasonic transducers, *Ultrasonic transducers*, 277-313 (2012).