



Evaluation des coefficients d'atténuation par optimisation des constantes d'élasticité complexes dans un acier inoxydable austénitique

N. Alaoui Ismaili^a, P. Guy^b, T. Monnier^b et B. Chassignole^c

^aMATEIS - INSA de Lyon, 7 av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

^bINSA de Lyon, 25 bis, av. J. Capelle, 69621 Villeurbanne, France

^cEDF R&D Les Renardières, Département MMC Avenue des Renardières, F77818 Moret Sur Loing, France

naima.alaoui-ismaili@insa-lyon.fr

Les circuits primaires des centrales nucléaires possèdent de nombreuses soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique. Le contrôle non destructif par ultrasons de telles soudures est complexe du fait du caractère anisotrope et hétérogène de ces structures. Cela conduit à des phénomènes de déviation et de division du faisceau ultrasonore. Pour améliorer la compréhension des phénomènes de propagation, l'utilisation d'un code de simulation du contrôle non destructif ultrasonore est préconisée. La simulation nécessite de disposer, comme données d'entrée, les constantes d'élasticité et les coefficients d'atténuation. L'objet de cet article consiste à proposer et évaluer une méthode d'inversion des données ultrasonores pour caractériser les propriétés du matériau. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un algorithme génétique et permet d'optimiser les constantes d'élasticité complexes dont les parties réelles caractérisent l'élasticité du matériau tandis que les parties imaginaires caractérisent l'atténuation. La stratégie d'identification des constantes d'élasticité complexes est effectuée selon deux étapes. La connaissance des vitesses de phase permet d'identifier les parties réelles des constantes d'élasticité, tandis que l'analyse des spectres fréquentiels permet d'identifier les parties imaginaires. Par ailleurs, les résultats obtenus à partir de cette approche sont comparés aux valeurs fournies par une deuxième méthode basée sur une décomposition du faisceau transmis à travers la soudure en spectre angulaire d'ondes planes.

1 Introduction

Les composants des circuits primaire et secondaire des centrales à eau sous pression font l'objet d'un important programme d'examen non destructifs mettant en œuvre diverses techniques de contrôles : ultrasons, radiographie, courants de Foucault, ressuage[1-4].

Ces composants sont souvent constitués de matériaux fortement anisotropes et hétérogènes (soudures ou revêtements en acier inoxydable austénitique et en alliages à base nickel, tuyauteries en acier austéno-ferritique moulé par centrifugation, ...), ce qui rend leur contrôle très délicat.

En effet les microstructures polycristallines de ces matériaux peuvent être à l'origine de perturbations significatives lors de la propagation du faisceau ultrasonore. Pour améliorer la compréhension des phénomènes mis en jeu, l'utilisation d'un code de simulation du contrôle non destructif ultrasonore est préconisée. La simulation nécessite de disposer des constantes d'élasticité et des coefficients d'atténuation, comme données d'entrée.

Nous présentons dans ce papier une méthode d'inversion basée sur l'utilisation d'un algorithme génétique qui permet d'optimiser les constantes d'élasticité complexes. Après avoir validé la méthode grâce à des données simulées, nous effectuons la comparaison de l'atténuation obtenue à partir des constantes d'élasticité complexes optimisées et celles obtenus par une deuxième méthode basée sur une décomposition du faisceau transmis à travers la soudure en spectre angulaire d'ondes planes.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de deux plateaux tournants à très hautes performances RVS80CC avec moteur à courant continu équipés de codeurs 8000 pts/tr et une précision absolue de 0.01°. Les deux plateaux sont solidaires d'une plaque métallique rectangulaire en dural, constituant le porte échantillon. Dans la partie basse de la plaque, un support placé dans une fenêtre permet de positionner les échantillons (Figure 1)

Un premier moteur dont l'axe de rotation, 'PV' est vertical et colinéaire à la grande médiane de la plaque assure la rotation qui permet de sélectionner l'angle d'incidence du faisceau dans le plan d'incidence horizontal.

Un second moteur, grâce à un système de transmission par courroie, assure la rotation de l'échantillon autour d'un axe horizontal 'PH'. Cette rotation permet de sélectionner

un plan d'incidence particulier lors de l'étude de matériaux anisotropes.

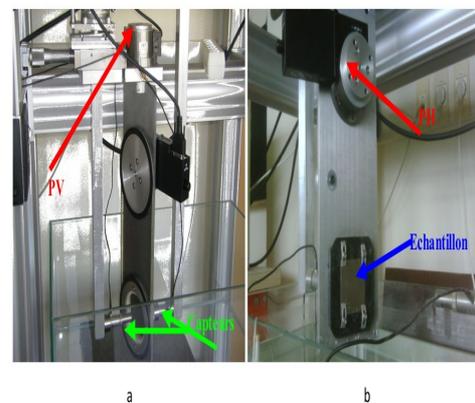


Figure 1: Dispositif expérimental.

Une impulsion électrique brève est appliquée au transducteur émetteur. L'onde ultrasonore produite se propage dans l'eau et arrive en incidence oblique sur la surface de l'échantillon. Elle est alors réfractée en respectant la loi de Snell-Descartes. Typiquement à l'interface entre le fluide de couplage et un solide anisotrope, trois ondes peuvent être excitées et se propager dans trois directions différentes avec des vitesses de propagation différentes. Ces trois ondes correspondent respectivement, à une onde quasi-longitudinale, et deux ondes quasi-transversales de polarisations horizontale (perpendiculaire au plan d'incidence) et verticale (dans le plan d'incidence).

À la seconde interface entre l'échantillon et le fluide de couplage, chacune des trois ondes est réfractée et donne naissance à une onde longitudinale qui se propagera dans l'eau jusqu'au récepteur. Le signal est ensuite échantillonné par un oscilloscope numérique et stocké.

À partir des signaux acquis, on détermine les temps de vol des différentes ondes et on en déduit les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales pour un grand nombre d'angles d'incidence dans plusieurs plans d'incidence.

3 Optimisation des constantes d'élasticité à partir de mesures de vitesses ultrasonores

La stratégie d'identification des constantes d'élasticité complexes est effectuée selon deux étapes, la connaissance des vitesses de phase permet d'identifier les parties réelles des constantes d'élasticité, celle de l'évolution de l'amplitude des spectres avec la fréquence permet d'identifier les parties imaginaires.

3.1 Optimisation des parties réelles des constantes d'élasticité

La procédure d'optimisation des parties réelles des constantes d'élasticité consiste à minimiser l'écart quadratique moyen entre les vitesses théoriques et expérimentales, à l'aide d'un algorithme génétique. Elle est détaillée dans les références [6,7].

Des mesures de vitesses sont réalisées sur un échantillon, parallélépipédique, prélevé dans un revêtement en acier inoxydable austénitique de type 316L, de symétrie orthotrope et de masse volumique $\rho = 7,8 \text{ g.cm}^{-3}$. L'épaisseur de l'échantillon est $e = 9,16 \text{ mm}$. Le diamètre du capteur ultrasonore est de 1,3 cm et sa fréquence centrale $f_c = 5 \text{ MHz}$.

La résolution du système de Christoffel permet de calculer les vitesses de propagation théoriques à partir d'un tenseur de constantes d'initialisation, Un algorithme génétique permet, par approximations successives, de minimiser l'écart quadratique moyen entre les valeurs calculées et expérimentales, et donc de converger vers les valeurs optimales des constantes d'élasticité, compte tenu d'un seuil préalablement fixé.

Dans le Tableau 1, nous présentons les valeurs de constantes d'élasticité évaluées pour cet échantillon.

Tableau 1: Constantes d'élasticité (GPa) et angles d'Euler (°) déterminés par optimisation.

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{23}	C_{13}	C_{12}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	φ	θ	ψ
224	244	242	140	138	139	57	104	103	-1,87	-0,27	0

La principale difficulté que l'on rencontre dans les matériaux étudiés ici, réside dans la méconnaissance de l'orientation du repère principal du matériau et donc dans la prise en compte des angles d'Euler qu'il convient d'optimiser également.

3.2 Optimisation des parties imaginaires des constantes d'élasticité

Notre méthode d'optimisation a été modifiée par rapport à celle proposée par Leymarie [12] et qui est basée sur la reconstruction de formes d'ondes. Dans notre cas, nous avons choisi de reconstruire les spectres des signaux, afin d'éviter le calcul d'une transformée de Fourier inverse.

Comme pour les parties réelles, la procédure d'optimisation est basée sur l'utilisation d'un algorithme génétique [8].

L'optimisation des parties imaginaires des constantes d'élasticité consiste donc à rechercher les valeurs complexes

du tenseur d'élasticité qui minimisent l'écart quadratique moyen entre les modules des spectres théoriques et expérimentaux dans une bande de fréquence donnée.

Cette procédure d'optimisation est schématisée sur la Figure 2.

Les spectres transmis théoriques sont calculés en multipliant le spectre, $R(f)$, d'un signal expérimental de référence, $r(t)$ par le coefficient de transmission $T(f, \theta, \phi, \tilde{C}_{ij}, \rho, e)$ de l'échantillon, calculé pour une fréquence f , et une incidence θ dans un plan d'incidence φ soit, $S(f, \theta, \phi, \tilde{C}_{ij}, \rho, e) = R(f) * T(f, \theta, \phi, \tilde{C}_{ij}, \rho, e)$

Le tenseur complexe d'élasticité utilisé pour ce calcul est constitué d'une partie réelle fixe, C'_{ij} , préalablement obtenue comme au paragraphe 3.1, et d'une partie imaginaire C''_{ij} à déterminer.

Afin de prendre en compte, les réflexions multiples dues à l'épaisseur limitée, dans le calcul du coefficient de transmission, nous avons mis en œuvre une méthode hybride combinant le formalisme de Stroh et la méthode de la matrice de rigidité récursive. Cette dernière consiste à reformuler la matrice de transfert sous la forme d'une matrice de rigidité [9-11].

Les spectres expérimentaux, $S_{exp}(f, \theta, \phi, \tilde{C}_{ij}, \rho, e)$ sont obtenus par FFT des signaux transmis pour différentes incidences dans différents plans d'incidence.

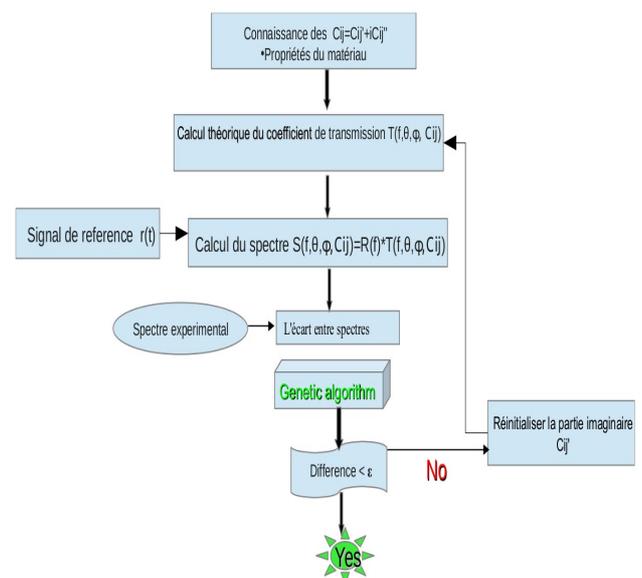


Figure 2: Principe d'identification des parties imaginaires des C_{ij} .

3.3 Validation à partir de signaux simulés

Dans cette partie, nous allons valider la méthode décrite ci-dessus par la méthode dite du crime inverse. Cette démarche consiste à valider la technique de résolution du problème inverse en fabricant de pseudo données expérimentales à partir d'un tenseur d'élasticité connu.

Le processus d'optimisation est alors alimenté avec ces signaux simulés et l'on cherche à retrouver le tenseur d'origine.

Pour cette validation, nous avons choisi un matériau composite anisotrope de symétrie orthotrope déjà étudié dans la littérature [4]. le tenseur des constantes d'élasticité complexes de ce matériau sont donnés dans le tableau 2, sous la forme : $\tilde{C}_{ij} = C'_{ij} + \eta \omega$

Tableau 2: Constantes d'élasticité (GPa) et de viscosités optimisés du composite à 2.424 MHz

	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₃	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆
C' (GPa)	12,10	12,30	132,00	5,50	5,90	6,90	6,15	98,00	77,00
η (GPa μs)	0,043	0,037	0,04	0,021	0,006	0,001	0,020	0,015	0,009

A partir de ces constantes d'élasticités complexes données dans le Tableau 2, l'épaisseur et la masse volumique il est possible d'effectuer un calcul du coefficient de transmission en fonction de la fréquence, à une incidence fixée, dans différents plans d'incidence (0, 30, 45, 90), dans un domaine fréquentiel qui correspond à la bande passante du capteur.

Sur la figure 3 on présente la confrontation des parties imaginaires des constantes d'élasticités optimisées et initiales en utilisant les .

La figure 3 montre que notre procédé d'optimisation donne des résultats très satisfaisants avec un écart relatif entre les valeurs estimées et les valeurs exactes inférieurs à 1%.

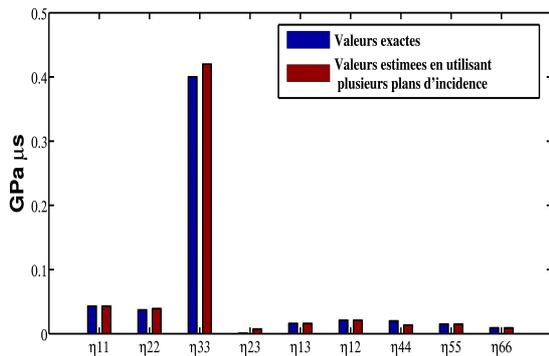


Figure 3: Coefficients de viscosités optimisés du composite en utilisant plusieurs plans d'incidence

Pour étudier la fiabilité de la méthode et nous rapprocher des conditions expérimentales, nous avons bruité les données avec des niveaux de bruit allant de 0.5 % à 2.5 %. ces niveaux de bruit sont choisis car ils sont proches des incertitudes expérimentales estimées sur la mesure de vitesses. Les résultats de simulation sont présentés sur la Figure 4 et montrent que les valeurs optimisées sont en très bon accord avec les valeurs recherchées.

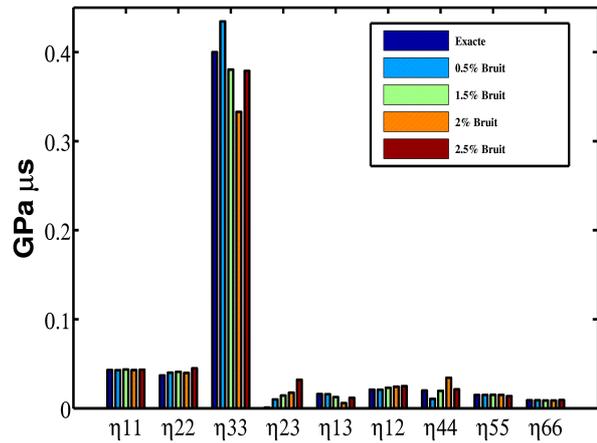


Figure 4: Coefficients de viscosités optimisés pour différentes valeurs de bruit

4 Résultats expérimentaux de l'atténuation pour un échantillon prélevés dans un revêtement en Acier 316 L

Dans cette section nous aborderons tout d'abord la détermination des constantes d'élasticité complexes . Puis nous présenterons les résultats de l'atténuation obtenus à partir de ces constantes.

4.1 Détermination des Constantes d'élasticité complexes

L'optimisation des constantes d'élasticité complexes est effectuée suivant la méthode décrite à la section 3, Nous rappelons que la première phase d'optimisation consiste à optimiser les parties réelles de ces constantes en minimisant l'écart quadratique moyen entre les vitesses théoriques et expérimentales, puis la procédé d'identification est relancé en utilisant le même algorithme d'optimisation pour optimiser la partie imaginaire des constantes d'élasticités à partir des modules des spectres transmis. Les constantes d'élasticité complexes et les angles d'Euler obtenus sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Constantes d'élasticité complexes (GPa) optimisés du composite pour Acier 316 L

	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₃	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆
C' (GPa)	224	244	242	140	138	139	57	104	103
C'' (GPa)	3,58	4,88	9,68	14	2,76	2,09	5,70	8,32	8,24

Une comparaison entre les amplitudes expérimentales et théoriques est présentée sur les Figures 5 et 6. on constate une bonne concordance entre les spectres expérimentaux et les spectres théoriques recalculés, à partir du tenseur optimisé.

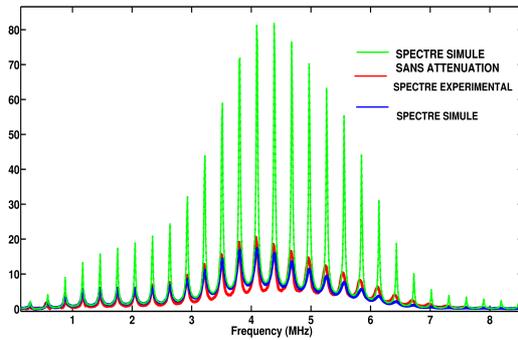


Figure 5: Spectres expérimental et simulés (avec et sans atténuation) à partir des paramètres optimisés pour l'acier 316L (plan 0, angle d'incidence 0)

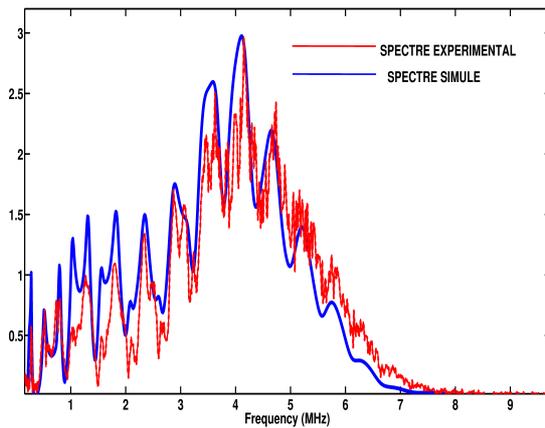


Figure 6: Spectres expérimentale et simulé à partir des paramètres optimisés pour l'acier 316L (plan 45, angle d'incidence 10°)

4.2 Détermination de l'atténuation à partir de l'optimisation des constantes d'élasticité complexes

A partir des constantes d'élasticité complexes présentées dans le tableau 3, nous recalculons les vitesses de phase complexes \tilde{V} avec $\tilde{C}_{ij} = \rho V^2$, puis les nombres d'onde $\tilde{K} = \frac{\omega}{\tilde{V}}$, puis nous déduisons le coefficient d'atténuation par la relation $\alpha = 20 \log(e^{K''})$.

Nous avons obtenu ce coefficient d'atténuation par une deuxième méthode basée sur une décomposition du faisceau transmis à travers la soudure en spectre angulaire d'ondes planes.

Le principe de cette méthode consiste à comparer l'énergie totale contenue dans un faisceau transmis à travers une lame à faces parallèles à celle calculée à l'aide d'un modèle d'ondes planes n'incluant pas l'atténuation, le rapport entre ces deux quantités est justement relié à l'atténuation du faisceau [6,7].

La figure 7 présente les résultats d'atténuation obtenus par les deux méthodes.

La confrontation des résultats du coefficient d'atténuation obtenus par les deux méthodes montre que l'évolution du coefficient d'atténuation des ondes longitudinales sont en très bon accord. En ce qui concerne l'atténuation pour les ondes transversales, nous constatons que les ordres de grandeurs ainsi que l'évolution fréquentielle sont très proches. Cependant, les écarts observés entre les deux méthodes semblent plus importants que pour les ondes longitudinales. Ceci est probablement dû

au plus faible nombre de signaux expérimentaux exploitables pour les ondes transversales.

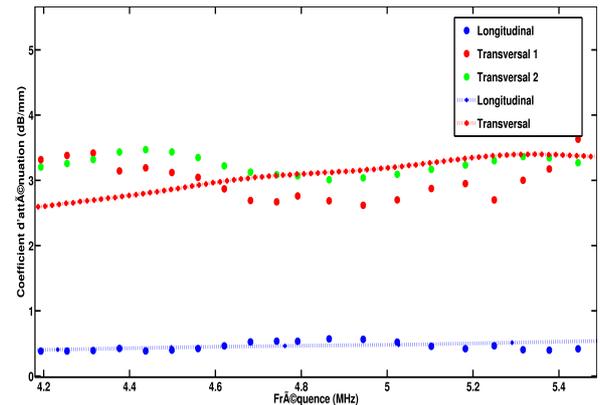


Figure 7: Evolution de coefficient d'atténuation des ondes longitudinales et transversales en fonction de la fréquence (trait continu: méthode de décomposition spectrale, nuage de points: optimisation des constantes d'élasticité complexes)

Conclusion

Dans ce travail les résultats des mesures expérimentales ont été effectuée sur un échantillon prélevé dans un revêtement en acier 316L pour déterminer les constantes d'élasticité complexes ainsi que le coefficient d'atténuation. Une méthode d'inversion des données ultrasonores pour caractériser les propriétés du matériau a été présentée et validée sur des données simulées.

Les spectres calculés à partir des constantes d'élasticité complexes ont été comparés avec les spectres expérimentaux afin de montrer l'efficacité de notre méthode de résolution du problème inverse.

L'évolution du coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence, a été comparée à celle obtenue par une deuxième méthode basée sur une décomposition du faisceau transmis à travers la soudure en spectre angulaire d'ondes planes, et ont été trouvées en bon accord.

L'avantage de la méthode proposée ici, est qu'elle utilise le même jeu de signaux expérimentaux pour optimiser les parties réelles et imaginaires, alors que la méthode de décomposition en spectre angulaire d'ondes planes nécessite un jeu de signaux obtenus en incidence oblique pour la partie réelle et des images de type C-Scan des faisceaux transmis pour l'atténuation.

Remerciements

Ce travail a été pour partie réalisé au sein du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007)

Références

- [1] B. Kumar and A. Kumar, Evaluation of Ultrasonic Attenuation without Invoking the Diffraction Correction Separately, *Ultrasonics*, Vol 34, pp 847-853, 1996.
- [2] S. Ahmed and P.D. Panetta, Ultrasonic Attenuation and Backscattering in Polycrystalline Materials with Nonspherical Grains, *NDE Proceedings, National Seminar of ISNT*, 2002.
- [3] A. Badidi Bouda, S. Lebaili and A. Benchaala, Grain Size Influence on Ultrasonic Velocities and Attenuation, *NDT&E International*, Vol 36, pp 1-5, 2003.
- [4] E R Generazio, 'The Role of the Reflection Coefficient in Precision Measurement of Ultrasonic Attenuation, *Materials Evaluation*', Vol 43, No 8, pp 995-1004, 1985.
- [5] B. Chassignole, V. Duwig, M.A. Ploix, P Guy and R El Guerjouma, Modelling the Attenuation in the ATHENA Finite elements Code for the Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Welds, *Ultrasonics*, Vol. 49, No 8, pp 653-658, 2009.
- [6] M.A. Ploix, Étude de L'atténuation des Ondes Ultrasonores: Application au Contrôle Non Destructif des Soudures en Acier Inoxydable Austenitique, PhD, Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006.
- [7] P. Arago Bodian, Propagation des Ultrasons en Milieu Hétérogène et Anisotrope: Application à l'Evaluation des propriétés d'Elasticité d'Atténuation d'Aciers Moules Par Centrifugation et de Soudures en Inconel PhD, Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [8] N. Alaoui-Ismaili, P. Guy, and B. Chassignole, Experimental determination of the complex stiffness tensor and Euler angles in anisotropic media using ultrasonic waves, *IP Conference Proceedings* 1581, 934, 2014.
- [9] S. I. Rokhlin and L. Wang, Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: stiffness matrix method, *J. Acoust. Soc. Am.* 112, 822 (2002).
- [10] X. D. Deng, T. Monnier, P. Guy, and J. Courbon, *J. Appl. Phys.* 113, 224508 (2013).
- [11] S. I. Rokhlin, T. K. Bolland and L. Adler, Reflection and Refraction of Elastic Waves on a Plane Interface Between Two Generally Anisotropic Media, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 79, No 4, pp 906-918, 1986.
- [12] N. Leymarie, C. Aristegui, B. Audoin, and S. Baste, Identification of complex stiffness tensor from waveform reconstruction, *J. Acoust. Soc. Am.* 111, 1232 (2002).