

Évaluation non destructive des propriétés d'élasticité et d'atténuation ultrasonore dans des matériaux anisotropes

P.A. Bodian^a, P. Guy^a, B. Chassignole^b, O. Dupond^b et L. Doudet^b

^aMatériaux, ingénierie et sciences, 7, Avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne Cedex, {pape-arago.bodian,philippe.guy}@insa-lyon.fr

^bEDF R&D Matériaux et Mécanique des Composants Site des Renardières, {prenom.nom}@edf.fr

Dans le domaine du contrôle non destructif par ultrasons, il est de plus en plus fait recours à la simulation numérique. Ces simulations permettent d'une part, de limiter le nombre de maquettes expérimentales dans les projets de R&D, et d'autre part de mieux comprendre et d'interpréter les phénomènes ultrasonores complexes observés lors des contrôles sur site. Ces simulations sont d'autant plus réalistes que la description des structures à contrôler est précise, en particulier au niveau des constantes d'élasticité et de l'atténuation intrinsèque. Les résultats présentés dans ce papier s'inscrivent dans un travail de thèse dédié à l'adaptation des techniques de mesure existantes pour la caractérisation de matériaux anisotropes et à structures grossières, comme les soudures austénitiques et les aciers moulés par centrifugation. Le premier objectif de ce travail est d'améliorer les connaissances sur l'influence des caractéristiques métallurgiques des matériaux anisotropes et hétérogènes sur la propagation ultrasonore. Le second objectif est de proposer une méthode permettant de remonter de manière fiable aux constantes d'élasticité et à l'atténuation ultrasonore à partir de mesures expérimentales. Dans ce but, un système expérimental permettant de mesurer, sur une même éprouvette, les constantes d'élasticité et l'atténuation en incidence oblique a été mis au point. Le point fort de ce dispositif est qu'il permet de travailler au delà de l'angle critique longitudinal et donc de mesurer les propriétés d'atténuation des ondes transversales. Les constantes d'élasticité sont déduites des vitesses ultrasonores à partir d'un processus d'optimisation basé sur les équations de Christoffel. Nous montrerons les potentialités d'algorithmes d'optimisation globaux tels que les algorithmes génétiques, moins susceptibles de converger vers des minima locaux de la fonction que l'on cherche à minimiser, que les algorithmes dits locaux. Des mesures de l'atténuation d'ondes longitudinales et transversales par décomposition du faisceau en spectre d'ondes planes sont présentées.

1. Introduction

Dans le domaine de l'industrie nucléaire, le contrôle par ultrasons des matériaux hétérogènes et anisotropes est un enjeu majeur. En effet, ces matériaux se retrouvent dans un grand nombre de composants du circuit primaire des centrales à réacteur à eau pressurisée (soudures en acier inoxydable austénitique et en alliages à base nickel, tuyauteries en acier austéno-ferritique moulé par centrifugation). Or dans ce type de matériau, le contrôle ultrasonore présente des difficultés liées à la microstructure qui dégrade fortement la propagation ultrasonore. On observe en particulier des déviations et des divisions du faisceau, ainsi qu'une forte atténuation. Ces phénomènes limitent les performances des méthodes ultrasonores et compliquent l'interprétation des résultats. Leur utilisation s'avère toutefois nécessaire pour compléter les informations fournies par la radiographie qui est efficace pour la détection des défauts mais pas pour leur localisation en profondeur et leur dimensionnement.

Un système expérimental permettant de mesurer sur une même éprouvette, d'une part les constantes d'élasticité et d'autre part l'atténuation en incidence oblique a été mis au point. L'originalité de ce dispositif est qu'il permet de travailler au delà de l'angle critique longitudinal et donc de mesurer les propriétés d'atténuation des ondes transversales. La première partie de ce papier est consacrée à la détermination des constantes d'élasticité. Pour remonter des vitesses ultrasonores mesurées aux constantes d'élasticité,

nous montrerons les potentialités d'algorithmes d'optimisation globaux tels que les algorithmes génétiques, moins susceptibles de converger vers des minima locaux de la fonction que l'on cherche à minimiser, que les algorithmes dits locaux (type Levenberg Marquardt) [1]. Dans une deuxième partie, des mesures d'atténuation des ondes longitudinales et ondes des transversales par décomposition du faisceau en spectre d'ondes planes sont présentées.

2. Détermination des propriétés d'élasticité C_{ij} par optimisation

2.1. Résolution du problème inverse

Afin de bien simuler les contrôles ultrasonores dans les structures, il est indispensable d'accéder aux propriétés d'élasticité du matériau. Elles sont déterminées par une méthode ultrasonore de mesures de vitesses associée à des algorithmes d'optimisation [1, 2].

Il est possible de calculer, en résolvant le système de Christoffel à partir d'un tenseur de constantes d'initialisation et dans l'hypothèse d'un matériau de symétrie orthotrope, des vitesses de propagation théoriques qui sont comparées aux vitesses expérimentales [1, 2]. Un algorithme approprié 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, compte tenu d'un seuil préalablement fixé.

En principe, il est possible de remonter à toutes les constantes d'élasticité à partir d'un nombre suffisant de vitesses mesurées avec une bonne précision en utilisant des algorithmes d'optimisation robustes et bien adaptés au problème.

2.2. Validation de l'algorithme d'optimisation à partir des données simulées

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les performance d'un algorithme, dit local, basé sur une méthode dérivée des gradients conjugués (type Levenberg-Marquardt), et utilisé dans de précédentes études [1] avec celles d'un algorithme génétique, qualifié de global, car moins sensible à la présence de minima locaux et apte à rechercher le minimum absolu d'une fonction.

Les algorithmes génétiques sont basés sur une modélisation de l'évolution Darwinienne. C'est-à-dire des variations d'un patrimoine héréditaire (les gènes) et la sélection des individus les mieux adaptés. Le principe de base est de simuler l'évolution d'une population à un problème et la solution est l'individu.

Le codage utilisé est en vecteurs réels [3], ce type de codage permet de conserver les variables du problème dans le codage des individus sans passer par le codage binaire intermédiaire. La structure du problème est conservée dans ce codage contrairement au codage binaire [4] qui permet de créer des opérateurs de mutation et de croisement simples mais qui ne conserve pas la structure du problème. Les principaux paramètres ajustables pour un algorithme génétique sont :

- la taille de la population selon le coût en temps de calcul.
- le mode de sélection (le système tire I individus aléatoirement et conserve celui de meilleur fitness ou fonction d'évaluation de l'individu)
- le taux de mutation qui permet de maintenir une diversité suffisante pour explorer l'espace de recherche et le taux de croisement (crossover) qui permet de re-combiner l'information des parents
- le critère d'arrêt : l'algorithme s'arrête si le nombre maximum de génération est atteint ou si les deux meilleurs individus (solutions) ne changent pas après cinquante générations consécutives.

Après avoir trouvé une solution proche de l'optimum global avec l'algorithme génétique, une option d'hybridation peut être introduite pour trouver le meilleur individu en utilisant un algorithme de type local.

Pour réaliser la comparaison entre l'algorithme de Levenberg-Marquardt et l'algorithme génétique, nous avons choisi, de simuler des résultats expérimentaux à partir de constantes d'élasticité obtenues sur un échantillon en acier inoxydable austénitique, de masse volumique $\rho=7,895 \text{ g.cm}^{-3}$ [2]. Ces constantes sont notées dans ce qui suit C_{objectif} et représentent donc les valeurs que l'algorithme d'optimisation doit trouver. C_{objectif} contient les 9 constantes d'élasticité du matériau orthotrope considéré, ainsi que les 3 angles d'Euler permettant de rendre compte d'une éventuelle désorientation du repère principal du matériau par rapport au repère de l'éprouvette. A partir de C_{objectif} , nous simulons des vitesses de propagation dans de nombreuses directions

(plans et angles d'incidences) qui sont alors considérées comme un jeu de vitesses « expérimentales mesurées ».

A partir de ce jeu de vitesses, nous cherchons à retrouver les constantes C_{objectif} en résolvant le problème inverse par optimisation en utilisant comme valeurs d'initialisation des valeurs notées C_{init} .

Afin de se rapprocher de conditions expérimentales réalistes et également de vérifier la sensibilité des algorithmes au bruit, nous avons utilisé trois jeux de vitesses « expérimentales ». Le premier correspond aux valeurs exactes déduites des constantes C_{objectif} , les deux autres sont obtenus en bruitant les valeurs calculées, avec des niveaux de bruit de 0,5% et 1% respectivement. Ces niveaux de bruit sont choisis car ils sont proches des incertitudes expérimentales estimées sur la mesure des vitesses.

	C_{init}	C_{objectif}	bruit					
			0%		0.5%		1.0%	
			LM	AG	LM	AG	LM	AG
C_{11}	280	255	255	255	254,9	255	254,5	254,6
C_{22}	280	250	250	250	249,4	250	249,6	249,6
C_{33}	280	230	230	230	229,8	229,4	228,4	229,2
C_{23}	150	127	127	127	126,6	127,3	127,9	127,3
C_{13}	150	137	137	137	136,9	136,8	136,9	137,2
C_{12}	150	112	112	112	111,6	111,9	112,6	113,2
C_{44}	120	113	113	113	113,4	113,2	113	113
C_{55}	120	102	102	102	102	102	102,3	101,8
C_{66}	120	60	60	60	59,9	60	59,6	59,6
ϕ	0	7	7	7	6,1	7	7,1	7
θ	0	23	23	23	23	23	22,9	23
ψ	0	0	0	0	1,2	0	0,9	0

Tableau 1: Valeurs des constantes d'élasticité (GPa) déterminées par optimisation à partir des vitesses ultrasonores simulées (initialisation proche)

Nous présentons dans le Tableau 1, les résultats obtenus, avec les deux algorithmes (Levenberg-Marquardt LM ou Algorithme génétique AG) dans le cas de constantes d'initialisation C_{init} proches des valeurs à trouver, pour les trois jeux de vitesse « expérimentales »

Les résultats du Tableau 1, montrent que les deux algorithmes fonctionnent parfaitement pour des vitesses non bruitées et une initialisation relativement proche des valeurs à trouver. Pour ce qui concerne les résultats obtenus en présence de bruit, là aussi, les deux algorithmes ont des performances acceptables.

En termes de temps de calcul, LM est beaucoup plus rapide que AG, même si le temps de calcul pour LM augmente avec le niveau de bruit appliqué.

Dans un deuxième temps, les algorithmes sont testés en prenant des valeurs de C_{init} très éloignées des valeurs de C_{objectif} . Les résultats des optimisations sont indiqués dans le Tableau 2.

	C_{init}	C_{objectif}	bruit					
			0%		0.5%		1.0%	
			LM	AG	LM	AG	LM	AG
C_{11}	80	255	245,6	255	245,2	255	246	254,6
C_{22}	80	250	241,9	249,9	241,7	249,6	241,2	249,6
C_{33}	80	230	224,6	230	223,7	229,6	223	229,2
C_{23}	50	127	131,4	127	129,9	126,8	131,5	127,3
C_{13}	50	137	133,3	137	134,1	137	134,8	137,2

	C _{init}	C _{objectif}	bruit					
			0%		0.5%		1.0%	
			LM	AG	LM	AG	LM	AG
C ₁₂	50	112	122,3	112	122,3	111,9	122,2	113,2
C ₄₄	20	113	107,5	113	107,5	113,3	107,8	113
C ₅₅	20	102	106,8	102,1	106,9	101,9	106,2	101,8
C ₆₆	20	60	71	60	71,3	60	70,7	59,6
φ	0	7	9	7	9	7	10,4	7
θ	0	23	22	23	22	23	22,1	23
ψ	0	0	-44	0	-44	0	-43	0

Tableau 2: Valeurs des constantes d'élasticité (GPa) déterminées par optimisation à partir des vitesses ultrasonores simulées (initialisation lointaine)

Les résultats du Tableau 2, montrent que l'algorithme génétique donne des résultats très satisfaisants dans tous les cas, avec des écarts entre les valeurs estimées et les valeurs exactes inférieurs à 1%. En revanche, LM présente des écarts importants allant de 2,5% jusqu'à 18% sur C₆₆. L'écart observé pour les angles d'Euler est particulièrement important.

Quelles que soient les conditions d'initialisation ou de bruit, le temps de calcul de AG est assez constant, tandis que celui de LM croît de manière très importante avec le niveau de bruit et ce d'autant plus que l'initialisation est éloignée de la solution recherchée.

Ces résultats montrent donc une bonne robustesse de l'algorithme génétique (AG) qui converge quelle que soit l'initialisation ou le bruitage des vitesses. Ceci n'est pas le cas pour l'algorithme local Levenberg Marquardt (LM).

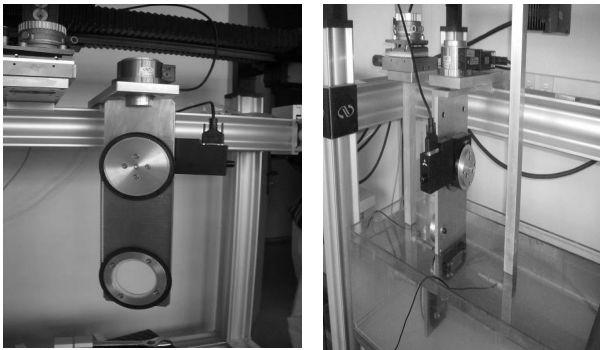
Il est possible de réduire le temps de calcul, par une limitation de l'espace de recherche en introduisant par exemple des bornes supérieures et inférieures pour les constantes à déterminer.

Dans le chapitre suivant, nous allons appliquer cette méthode d'optimisation à de véritables données expérimentales

2.3. Dispositif expérimental de mesure des vitesses en transmission et en incidence variable

Le dispositif expérimental utilisé est un banc de mesure spécialement développé durant cette thèse.

Il est composé de deux plateaux tournants solidaires d'une plaque métallique rectangulaire (Figure 1a).



(a) sans échantillon

(b) avec échantillon

Figure 1: Dispositif expérimental

Cette plaque est fixée sur un moteur dont l'axe de rotation est vertical et colinéaire à la grande médiane de la plaque. Cette rotation permet de sélectionner l'angle d'incidence du faisceau dans un plan d'incidence horizontal. Dans la partie

basse de la plaque, un évidement circulaire permet de positionner les échantillons (Figure 1). La partie haute de plaque supporte un second moteur qui par un système de transmission par courroie, assure une rotation de l'échantillon autour d'un axe horizontal. Cette rotation permet de sélectionner un plan d'incidence particulier lors de l'étude de matériaux anisotropes.

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 et verticale.

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.

Si le matériau étudié est peu dispersif, les échos obtenus après transmission à travers l'échantillon sont très peu déformés. On peut alors estimer la différence de temps de vol entre un signal mesuré en incidence oblique et un signal choisi comme référence (signal en incidence normale), en recherchant le maximum de la fonction d'intercorrélation entre les signaux correspondants.

Cette méthode mesure le degré de similitude de forme et de position en régime impulsif de deux signaux. La fonction d'inter-corrélation de deux signaux est donnée par [1, 5] :

$$C_{s_1, s_2}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(u) s_2(u-t) du \quad (1)$$

Le maximum de la fonction d'inter-corrélation est obtenu pour un temps, $t = \tau$ correspondant au décalage temporel entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$ supposés de formes comparables.

La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans le matériau est alors donnée par la relation :

$$V = \frac{e \cdot V_0 \cdot V_{eau}}{\sqrt{(\tau \cdot V_0 \cdot V_{eau} + e \cdot V_{eau} - e \cdot V_0 \cdot (1 - \cos(i)))^2 + (\sin(i) \cdot e \cdot V_0)^2}} \quad (2)$$

où, V_{eau} est la vitesse de propagation des ultrasons dans l'eau, V_0 la vitesse de propagation des ultrasons dans l'échantillon en incidence normale, e , l'épaisseur de l'échantillon, i , l'angle incidence et τ la différence de temps de vol entre les impulsions mesurées en incidence normale et en incidence oblique.

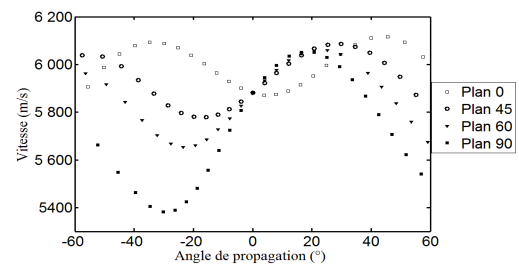


Figure 2 : vitesses de propagations dans trois plans différents pour un échantillon prélevé dans une soudure en Inconel 182®.

La Figure 2 montre un exemple de résultats obtenus pour les vitesses longitudinales mesurées dans quatre plans d'incidence différents, en fonction de l'angle réfracté.

2.4. Constantes d'élasticité évaluées à partir de mesures de vitesses ultrasonores

Des mesures de vitesses sont réalisées sur un échantillon en Inconel 182, de symétrie orthotrope et de masse volumique $\rho=8,26 \text{ g.cm}^{-3}$. L'épaisseur de l'échantillon est de 8.9 mm. Le diamètre du capteur ultrasonore est de 1,27 cm et sa fréquence centrale 2,25MHz.

Les vitesses sont calculées d'après l'expression (2) et l'écart τ d'après l'expression (1). De ces vitesses ultrasonores nous déterminons les constantes d'élasticité et les angles d'Euler de l'échantillon en effectuant une optimisation par algorithme génétique.

Les options utilisées dans l'optimisation par AG sont :

- une population de taille : 10
- une mutation : gaussienne
- un croisement : intermédiaire
- une sélection: roulette

le Tableau 3 est une synthèse des valeurs de constantes d'élasticité évaluées pour cet échantillon d'inconel 182 :

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{23}	C_{13}	C_{12}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	φ	θ	ψ
236	255,8	255,8	130,5	135,4	137,9	81,4	111,4	111,9	5,3	28,8	0

Tableau 3: Constantes d'élasticité (GPa) et angles d'Euler (°) déterminés par optimisation avec l'AG.

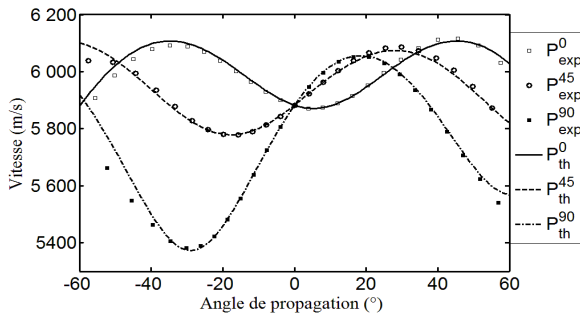


Figure 3 : Comparaison des vitesses longitudinales théoriques et expérimentales dans trois plans d'incidence (P0-P45-P90).

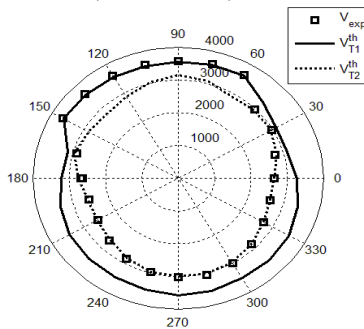


Figure 4: Comparaison des vitesses transversales théoriques et expérimentales pour un angle d'incidence fixe de 23° en fonction du plan d'incidence.

Sur la Figure 3, on observe un excellent accord entre les valeurs expérimentales mesurées dans trois plans d'incidence différents avec les valeurs théoriques calculées à l'aide des constantes du Tableau 3. Une anisotropie du matériau est bien mise en évidence (variation des vitesses de l'ordre de 600 m/s en fonction de la direction de propagation).

Pour ce qui concerne les ondes transversales, les données expérimentales ont été acquises en fixant un angle d'incidence et en faisant tourner le plan d'incidence. Les résultats obtenus pour un angle d'incidence de 23° sont

comparés aux valeurs théoriques sur la Figure 4. On constate là aussi un très bon accord. On observe que pour des plans d'incidences compris entre 60° et 150°, les échos mesurés correspondent à une onde transversale rapide (V_{T1}), tandis que pour les plans compris entre 150° et 360°, on est plutôt en présence d'ondes transversales lentes (V_{T2}).

La détermination des constantes d'élasticité et des angles d'Euler est une étape primordiale car comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, elles sont utilisées pour la détermination de l'atténuation par décomposition en spectre angulaire d'onde plane.

3. Mesure d'atténuation des ondes en incidence oblique par décomposition du faisceau en spectre angulaire d'ondes planes

3.1. Procédure de calcul de l'atténuation

La procédure pour déterminer les coefficients d'atténuation par diffusion dans le matériau se décompose de la manière suivante [6,5].

- Une première image C-scan du faisceau incident, servant de cartographie de référence, est obtenue sans présence d'échantillon et à une distance correspondant à la position de la face avant de l'échantillon.
- En chaque point de cette cartographie est enregistré un signal temporel.
- On applique une FFT à chacun de ces signaux. On extrait alors la valeur complexe du spectre à la fréquence de travail choisie pour chaque signal. En représentant la valeur du module du spectre en fonction de la position d'acquisition, on obtient une nouvelle image, dite spectrale, du faisceau considéré comme monochromatique.
- On applique une transformée de Fourier 2D de l'image monochromatique pour obtenir la décomposition en spectre angulaire d'ondes planes monochromatiques de notre faisceau. Ceci revient à représenter le faisceau par une somme d'ondes planes de même fréquence, mais de directions de propagation différentes.
- On applique alors le coefficient de transmission en incidence variable pour la lame anisotrope étudiée à chacune des ondes planes afin d'obtenir la décomposition en spectre angulaire du faisceau transmis.
- On applique une FFT inverse pour finalement obtenir l'image spectrale théorique du faisceau transmis.
- On compare alors cette image à celle obtenue expérimentalement à partir d'une image C-scan du faisceau transmis, dans un plan situé au delà de l'échantillon.

Le modèle utilisé pour évaluer le coefficient de transmission de la lame ne prend pas en compte l'atténuation liée au phénomène de diffusion par les grains du matériau polycristallin. Par conséquent, en faisant le rapport entre les images spectrales expérimentale et théorique on peut remonter à l'atténuation pour chacune des composantes angulaires du faisceau à la fréquence choisie. Par sommation sur l'ensemble de l'image spectrale, on peut

également évaluer l'atténuation globale subie par le faisceau à cette fréquence.

3.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental permet d'effectuer une coupe du faisceau dans un plan vertical. Pour cela; le traducteur récepteur, R, est monté sur un dispositif de translations XYZ motorisé et piloté par un microordinateur.

Les translations X, Y et Z sont solidaires du bâti. Par construction, le plan XY, dit plan de balayage, et qui est le plan dans lequel se déplace le transducteur récepteur, est considéré comme référence de verticalité. Le transducteur émetteur E est fixe et l'axe du faisceau est horizontal.

Entre les deux transducteurs se trouve le porte échantillon décrit au paragraphe 2.3. Ce dispositif permet donc d'appliquer la méthode de mesure de l'atténuation décrite au paragraphe précédent, pour un faisceau en incidence quelconque, et dans un plan d'incidence choisi si le matériau est anisotrope. Ce dispositif original constitue une amélioration par rapport aux précédents bancs de mesure en incidence normale [5, 6], car un seul échantillon est nécessaire pour déterminer l'atténuation selon une direction de propagation quelconque et il permet de remonter aux coefficients d'atténuation pour les ondes transversales.

Les conditions de continuité et des contraintes à la première interface ne sont exprimées qu'en présence de l'onde incidente, l'onde réfléchie et trois ondes transmises dans le milieu anisotrope [5, 7]. Par conséquent, le calcul du coefficient de transmission ne prend en compte que la traversée directe de l'échantillon et non les ondes ayant subi des aller-retours multiples dans celui-ci. Du point de vue expérimental, il convient donc d'isoler le premier écho transmis correspondant à cette situation.

3.3. Cas d'un échantillon quasi-isotrope

L'échantillon étudié a été prélevé dans une barre forgée en Inconel 600 quasi-isotrope de masse volumique $8,49 \text{ g.cm}^{-3}$, L'épaisseur de l'échantillon est de $9,10 \text{ mm}$. Les constantes d'élasticité et les angles d'Euler de l'échantillon, présentés dans le Tableau 4 ci-dessous, ont été déterminés par la méthode mesure de vitesses associée à un algorithme génétique d'optimisation décrit au paragraphe 2.. Ces valeurs sont caractéristiques d'un matériau quasi-isotrope.

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{23}	C_{13}	C_{12}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	φ	θ	ψ
292,8	284,6	284,2	118	141,3	141,1	83,1	83,6	83,6	-4,3	-0,1	5,2

Tableau 4: Valeurs des constantes d'élasticité (GPa) et des angles d'Euler (°) déterminées par optimisation avec l'AG à partir des vitesses ultrasonores pour l'échantillon en Inconel 600.

Ces données permettent de calculer le coefficient de transmission pour les ondes planes monochromatiques en incidence quelconque.

La surface balayée est de $79 \times 81 \text{ mm}^2$, par pas de 1 mm . Elle est choisie de manière à pouvoir récupérer sur le plan scanné toute l'énergie du faisceau transmis. Les capteurs utilisés ont un diamètre de $1,27 \text{ cm}$ et une fréquence centrale de $2,25 \text{ MHz}$ et 5 MHz .

En pratique, le coefficient de transmission de la lame est calculé dans des plages angulaires bien plus larges que celles explorées expérimentalement.

Pour prendre en compte le plan et l'angle d'incidence, le coefficient de transmission est multiplié par la transformée

spatiale du faisceau incident en faisant coïncider le centre de la transformée au point du coefficient de transmission correspondant à l'angle et au plan d'incidence choisis. Par exemple sur la Figure 5a, on visualise la position de la décomposition en spectre angulaire du faisceau pour le cas de l'incidence normale. Sur la Figure 5b, on fait de même pour une incidence 20° dans le plan d'incidence 0° . Pour cet angle nous nous trouvons au delà de l'angle critique longitudinal à une telle incidence seule l'onde transversale se propage. Donc l'atténuation calculée dans cette zone correspond à l'atténuation de l'onde transversale.

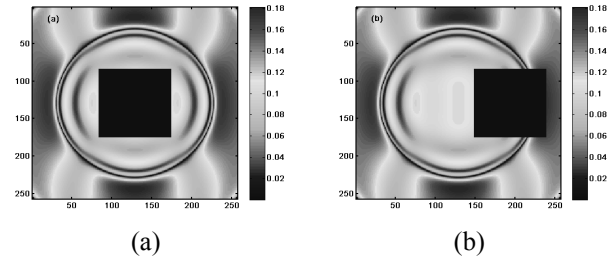


Figure 5: Position de la décomposition du faisceau sur le module du coefficient de Transmission

L'atténuation globale des ondes longitudinales, déterminée en incidence normale par décomposition en spectre d'onde plane est très faible et inférieur aux incertitudes à la fréquence de $2,25 \text{ MHz}$ pour deux pas de balayage différents (1 mm et 2 mm). Pour une fréquence de 5 MHz l'atténuation en incidence normale est de $0,04 \text{ dB.mm}^{-1}$ pour un pas de balayage de 1 mm et de $0,05 \text{ dB.mm}^{-1}$ pour un pas de 2 mm . Des valeurs similaires ont été obtenues avec un autre montage basé sur l'analyse de la décroissance en amplitude des échos de fond d'une éprouvette de 8 mm d'épaisseur prélevé dans le même matériau [9].

L'atténuation globale pour les ondes transversales, trouvée pour une incidence de 20° est de $0,06 \text{ dB.mm}^{-1}$. cette est obtenue à une fréquence de $2,25 \text{ MHz}$. Comme attendu, cette valeur est un peu plus élevée que l'atténuation des ondes longitudinales.

Ces valeurs sont calculées après avoir mis un seuil à -20 dB pour s'affranchir du bruit. C'est à dire que nous avons affecté une valeur nulle à toutes les composantes de la décomposition en spectre angulaire dont l'amplitude était inférieure de 20 dB par rapport à son propre maximum.

Une analyse approfondie de l'influence de la procédure de seuillage sur les résultats sera menée ultérieurement, même si les premiers résultats semblent montrer que cette influence est minime (résultats identiques avec et sans seuillage).

3.4. Cas d'un échantillon anisotrope

L'échantillon choisi est une soudure en acier inoxydable dont les grains colonnaires sont quasi-perpendiculaires aux grandes faces de l'éprouvette de dimension $60 \times 60 \times 12 \text{ mm}^3$. En incidence normale l'axe du faisceau est colinéaire à l'axe d'élongation des grains (axe de texture). Les capteurs utilisés ont une fréquence centrale de $2,25 \text{ MHz}$ et un diamètre de $1,27 \text{ cm}$ ($0,5''$).

Les cartographies expérimentales ont des dimensions de 39×41 points avec un pas de 1 mm entre chaque point.

Après calcul, nous obtenons une atténuation globale des ondes quasi-longitudinales de $0,25 \text{ dB.mm}^{-1}$ en incidence normale. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que

dans des soudures de même nature, étudiées par Marie Aude Ploix [5].

En appliquant la procédure décrite plus haut dans le cas d'une incidence de 20° , sur notre échantillon nous obtenons une atténuation globale de $1,06 \text{ dB.mm}^{-1}$ pour les ondes transversales. A nouveau, ces valeurs d'atténuation sont supérieures aux valeurs d'atténuation des ondes longitudinales.

Ces résultats demandent à être validés, par exemple par des mesures au contact ou par des mesures sur plusieurs échantillons avec des épaisseurs différentes.

4. Conclusion

Dans cet article nous avons présenté un système expérimental, dédié à la caractérisation de matériaux atténuants isotropes et anisotropes. Ce dispositif permet de mesurer les vitesses ultrasonores dans toutes les directions de propagation et pour les différents types d'onde ceci pour deux configurations différentes (angle d'incidence variable dans un plan d'incidence fixe ou angle d'incidence fixe dans un plan d'incidence variable). Il permet également de réaliser des cartographies du faisceau transmis en incidence quelconque, à partir desquelles l'atténuation ultrasonore peut être évaluée.

Les vitesses mesurées sont utilisées pour déterminer par processus d'optimisation les constantes d'élasticité du matériau, ainsi que les angles d'orientation de son repère principal par rapport à celui de l'éprouvette utilisée (angles d'Euler).

Nous avons montré que l'utilisation d'un algorithme génétique (AG) pour réaliser cette optimisation était préférable à l'utilisation d'algorithmes dits locaux comme celui de Levenberg-Marquardt (LM). En effet, l'AG est beaucoup moins sensible au bruit de mesure mais surtout au jeu de constantes d'initialisation.

Un bon accord entre les valeurs expérimentales des vitesses et leurs valeurs recalculées à l'aide du jeu de constantes déduit du processus d'optimisation a été trouvé pour un échantillon prélevé dans une soudure anisotrope. Ce bon accord est observé dans une large gamme d'angles d'incidence quel que soit le plan d'incidence choisi et le type d'onde, (ondes longitudinales ou ondes transversales).

Ces constantes d'élasticité sont ensuite utilisées pour calculer le coefficient de transmission de l'échantillon. Celui-ci est utilisé pour la détermination de l'atténuation en incidence quelconque par décomposition du faisceau incident en spectre angulaire d'ondes planes monochromatiques. L'algorithme développé permet le calcul de ce coefficient de transmission pour n'importe quelle classe d'anisotropie, du cas isotrope au cas triclinique.

Une originalité de ce montage est la possibilité de travailler en incidence oblique au delà de l'angle critique longitudinal et donc de mesurer directement l'atténuation des ondes transversales.

Les résultats obtenus ont, sans surprise, montré que l'atténuation des ondes transversale est plus importante que celle des ondes longitudinales, aussi bien pour un échantillon isotrope que pour un anisotrope.

Les valeurs d'atténuation obtenues pour l'échantillon anisotrope (soudure) en incidence normale sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Marie-Aude Ploix [5] pour des soudures du même type.

Dans la suite de ce travail, il est prévu de réaliser des mesures complémentaires permettant de valider les résultats

obtenus. On peut par exemple envisager de mesurer l'atténuation des ondes transversales par des mesures réalisées en contact sur des éprouvettes d'épaisseur différentes.

Enfin, un autre type de validation consisterait à réaliser des simulations de contrôles ultrasonores grâce au logiciel ATHENA 2D développé par EDF R&D en injectant les valeurs mesurées au cours de notre travail [8]. L'accord entre simulation et expérience serait un bon indicateur de la pertinence des résultats obtenus.

5. Références

- [1] Dubuget M., "Evaluation Non Destructive des Matériaux par Ultrasons : Caractérisation de l'Etat initial et Suivi Sous Charge des Propriétés d'Élasticité Linéaire et Non Linéaire d'alliages d'Aluminium, Thèse de Doctorat. Lyon : INSA Lyon, 1996, 196 p.
- [2] Chassignole B., "Étude de l'influence de la structure Métallurgique des soudures en Acier Inoxydable Austénitique sur le contrôle Non Destructif par Ultrasons, *Thèse de Doctorat*. Lyon : INSA Lyon, 2000, 217 p.
- [3] Goldberg D.E., Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets and blocking. *Complex Systems*, 1991, p. 139-167.
- [4] Vishnuvardhan J., Krishnamurthy C. V., Balasubramaniam K., Genetic algorithm reconstruction of orthotropic composite plate elastic constants from a single non-symmetric plane ultrasonic velocity data, *Elsevier composites: Part B* 38,2007, p. 216-227.
- [5] Ploix M.A., "Étude de l'Atténuation des ondes Ultrasonores. Application au Contrôle Non Destructif des Soudures en Acier Inoxydable Austénitique, *Thèse de Doctorat*. Lyon : INSA Lyon, 2006, 144 p.
- [6] Seldis T. & Pecorari C., Scattering-Induced Attenuation of an Ultrasonic Beam in Austenitic Steel, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, Vol. 108, No. 2, p. 580-587
- [7] Hosten B., Reflection and Transmission of Acoustic Plane Wave on an Immersed Orthotropic and Viscoelastic Solid Layer, *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, Vol. 89, No. 6, p. 2745-2752.
- [8] Chassignole B., Duwig V., Ploix M-A, Guy P., El Guerjouma R., Modeling the attenuation in the Athena finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds, *Ultrasonics*, 2009, Vol 49, p. 653-658.
- [9] Feuilly N., " Etude de l'influence de la microstructure sur la diffusion ultrasonore en vue de l'amélioration du contrôle non-destructif des matériaux polycristallins", Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille 2, 2009, 183 p.