



HAL
open science

Caractérisation d'échantillons représentatifs de soudures austénitiques en 316L par spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS)

Florian Le Bourdais, Nicolas Leymarie, Pierre-Emile Lhuillier

► **To cite this version:**

Florian Le Bourdais, Nicolas Leymarie, Pierre-Emile Lhuillier. Caractérisation d'échantillons représentatifs de soudures austénitiques en 316L par spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS). 10es Journées COFREND, COFREND, Jun 2023, Marseille, France. 28519 (7 p.), 10.58286/28519. cea-04222668

HAL Id: cea-04222668

<https://cea.hal.science/cea-04222668v1>

Submitted on 29 Sep 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractérisation d'échantillons représentatifs de soudures austénitiques en 316L par Spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS)

Florian LE BOURDAIS ¹, Nicolas LEYMARIE ¹
Pierre-Emile LHUILLIER ²

¹CEA List, Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France;

²EDF R&D, EDF-Lab Les Renardières, F-77818 Moret-sur-Loing CEDEX, France

*correspondance à adresser à florian.lebourdais@cea.fr

Résumé

Dans la perspective d'améliorer les procédés d'imagerie ultrasonore sur des assemblages soudés, les caractéristiques mécaniques effectives du matériau et leur variabilité au sein de la soudure sont une donnée nécessaire. De nombreuses techniques reposant sur l'utilisation d'ondes élastiques ultrasonores ont déjà été mises en œuvre afin d'obtenir avec précision les constantes élastiques et ainsi d'évaluer l'anisotropie apparente de ces milieux complexes. Dans le cadre de cette étude, la Spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS) a été mise en œuvre pour caractériser des échantillons prélevés dans un « mur » fabriqué par soudage dans l'hypothèse d'un comportement élastique orthotrope, homogène à l'échelle de l'échantillon. Les fréquences de résonance mesurées ont permis de résoudre le problème inverse à l'aide de méthodes d'optimisation utilisant le gradient et d'obtenir les constantes élastiques pour chacun des échantillons. Les résultats sont comparés à ceux préalablement obtenus par l'utilisation d'une technique de mesure de vitesse de phase en ondes ultrasonores pulsées dans le cadre du projet ANR MUSCAD.

1. Introduction

Le contrôle des soudures du parc nucléaire français reste un sujet plus que jamais d'actualité en 2023, notamment au regard du vieillissement des matériaux et de l'apparition de défauts comme dans le cas de la corrosion sous-contrainte dans les soudures du circuit d'injection de secours [1]. Les procédés de contrôle à l'aide d'ultrasons sont couramment étudiés depuis les années 2000 afin de rendre possible un contrôle de l'intégralité du volume de la soudure. Leur mise en œuvre effective demande une bonne connaissance des propriétés élastiques des soudures, étant donné que les vitesses de propagation ultrasonores dépendent de ces paramètres et leur connaissance est nécessaire pour produire des images de contrôle interprétables.

De nombreuses techniques ont déjà été mises en œuvre pour caractériser les propriétés élastiques, au rang desquelles on peut citer la mesure d'ondes ultrasonores transmises à travers des échantillons en incidence normale

[2] ou l'utilisation d'un dispositif pour transmission en incidence oblique [3].

Dans le cadre de cette étude, c'est la Spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS) [4]–[6] qui a été mise en œuvre pour caractériser des échantillons représentatifs de soudures austénitiques. Cette technique permet théoriquement, par rapport aux deux autres citées plus haut, d'obtenir par une seule mesure relativement facile à mettre les fréquences qui caractérisent l'anisotropie d'un matériau. Elle a déjà été mise en œuvre dans de nombreux cas, monocristaux d'alliages de Nickel [7], matériau SiC d'alliage de gaine combustible nucléaire [8] ou pièces élaborées en fabrication additive [9], [10]. Elle repose sur une procédure en deux étapes. D'abord, l'acquisition de spectres expérimentaux de résonance et l'extraction de pics de ceux-ci. Ensuite, l'utilisation d'une procédure d'ajustement pour trouver les constantes élastiques qui donnent des fréquences de résonance aussi voisines que possible des résonances trouvées expérimentalement.

Le plan de ce travail est le suivant : après avoir décrit les éléments nécessaires à la modélisation des soudures austénitiques dans le cadre d'une caractérisation RUS, nous conduisons une étude sur données simulées afin de vérifier que dans le cas de données parfaites, la méthode permet de trouver les constantes élastiques attendues. Après avoir vérifié ceci, nous décrivons comment nous avons mesuré les fréquences de résonance des six échantillons de l'étude. Enfin, nous analysons les résultats obtenus et comparons ceux-ci aux caractérisations obtenues dans le cadre du projet ANR MUSCAD, qui a utilisé la méthode décrite dans [3] pour caractériser les échantillons de l'étude.

2. Modélisation des soudures austénitiques et inversion à l'aide de la méthode RUS

2.1. Présentation des échantillons de l'étude

Les échantillons utilisés dans cette étude sont des plaques de dimension approximatives 6 cm par 6 cm par 1,2 cm découpées dans un « moule de soudure », c'est-à-dire un mur soudé parallélépipédique. Celui-ci a été obtenu par soudure à l'arc selon les normes d'EDF liée à l'emploi du matériau 316L, un acier inoxydable à structure austénitique. L'intérêt de la fabrication d'un tel « moule » est que l'on

peut ainsi s’affranchir des problématiques d’inhomogénéité lié à des géométries de soudure conventionnelle, où le dépôt se fait dans un espace confiné par la géométrie des objets qu’il s’agit d’assembler, comme par exemple une soudure en « V ». Six plaques ont été découpées dans le bloc soudé, aux angles de 0°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90°. Le moule est représenté schématiquement sur la Figure 1.

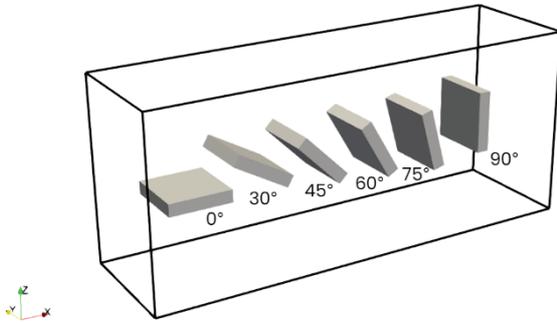


Figure 1 : moule de soudage et géométrie des plaques extraites du bloc à différents angles.

2.2. Modélisation élastique des soudures austénitiques

A priori, les microstructures attendues pour les échantillons du paragraphe précédent sont typiques des soudures austénitiques. Ainsi, on peut s’attendre à des grains d’austénite allongés dans la direction du gradient thermique au moment de la solidification et à une microstructure de type fibre autour de cette direction privilégiée. Ceci est illustré schématiquement par la Figure 2.

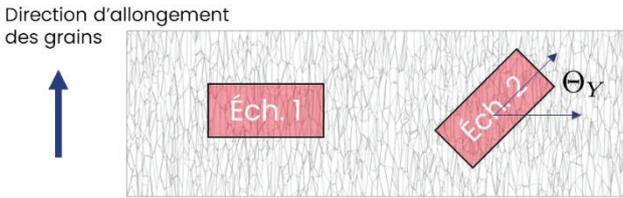


Figure 2 : représentation schématique de la microstructure avec deux échantillons virtuels découpés dans celle-ci.

À partir de cette description, on peut poser la question de la forme que doit prendre la matrice d’élasticité en notation de Voigt, ou C_{ij} , pour les deux échantillons virtuels décrits dans la Figure 2. La matrice d’élasticité résume la manière dont s’allonge la matière lorsqu’une contrainte lui est appliquée, à la manière du module de Young, mais pour des directions d’anisotropie arbitraires. Ainsi, dans le cas le plus général, 21 coefficients sont nécessaires pour décrire l’élasticité du milieu (cas triclinique). Dans le cas le plus simple d’un milieu isotrope, ceci se réduit à deux nombre. Dans le cas des soudures austénitiques, les travaux de B. Chassignole [11] ont montré qu’un échantillon dont les axes sont alignés avec la géométrie des grains présentent un comportement effectif de type orthotrope (caractérisé par 9 coefficients) ou, dans certains cas, isotrope transverse avec comme direction principale la direction d’allongement des grains (caractérisé par 5 coefficients). Des travaux de H. Ledbetter proposent également une symétrie isotrope transverse [12]. Dans le cadre de cette étude, nous

considérons le cas plus général parmi les deux précités. Ainsi, la modélisation d’une soudure austénitique dans un repère aligné avec la direction d’allongement des grains nécessite l’utilisation du modèle effectif orthotrope à 9 coefficients :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{31} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$

Dans cette représentation, on considère implicitement que c’est l’axe 3 (ou z dans la Figure 1) selon lequel les grains sont allongés, et que les axes 1 et 2 (x et y) sont également alignés avec les axes du moule de soudage.

De ce fait, pour décrire un échantillon découpé avec l’angle représenté sur la Figure 1, il faut en plus introduire un angle d’Euler autour de l’axe 2 (ou y) pour décrire la microstructure par les matrices de Bond ou de changement de repère du tenseur d’élasticité [13]. Ceci se traduit par un seul degré de liberté en plus, mais plusieurs coefficients qui apparaissent dans les blocs « hors diagonale » de la matrice des C_{ij} :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{31} & 0 & c_{15} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & c_{25} & 0 \\ c_{31} & c_{23} & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{46} & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$

Dans la suite, le modèle élastique sera donc constitué de 9 coefficients et de l’angle d’Euler selon la direction y .

2.3. Modèle et méthode numérique mis en œuvre avec la méthode RUS

La méthode RUS repose sur la modélisation du solide dont on mesure la résonance comme un milieu continu élastique en petite déformation avec des conditions aux limites de vibration libre, c’est-à-dire de contrainte nulle sur toutes les faces de l’objet.

Ces hypothèses se traduisent par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \rho \omega^2 u_i + C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} = 0 \\ C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Dans l’équation (1) on retrouve le tenseur d’élasticité C_{ijkl} , qui est équivalent à la représentation de Voigt utilisée jusqu’ici et par la suite. La première équation exprime l’égalité vectorielle des forces élastiques et de l’accélération de l’élément de milieu continu, tandis que la deuxième exprime l’absence de forces extérieures à la frontière de l’objet élastique en vibration.

On peut résoudre numériquement ces équations par l'utilisation de la méthode de Rayleigh-Ritz sur la base des polynômes xyz [4] ce qui permet d'aboutir au problème de valeurs propres discret suivant :

$$\omega^2 M a = K a \tag{2}$$

Dans l'équation (2), M et K représentent respectivement la matrice de masse et de raideur du système représenté sur la base des polynômes $x^r y^q z^p$. Après utilisation d'un algorithme de recherche de valeurs propres, on obtient les pulsations propres du système à l'aide desquelles on peut résoudre le problème inverse présenté dans la section suivante. Un exemple de résultat est donné dans la Figure 3.

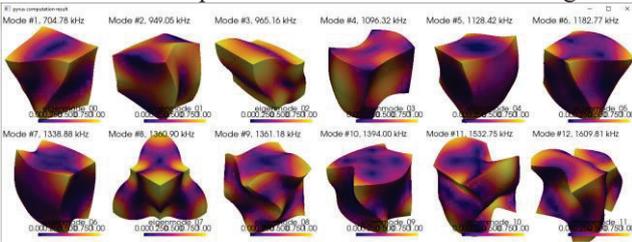


Figure 3 : Fréquences et modes propres obtenus dans le cas d'un cube en acier isotrope (E=200 GPa, $\nu=0,3$) de 2 mm de côté.

2.4. Méthodes d'inversion dans le cas de la méthode RUS

Le problème inverse RUS consiste à trouver les constantes élastiques C_{ij} qui approchent le mieux les pics extraits des spectres mesurés expérimentalement à l'aide de la fonction objectif suivante :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i(C_{ij}) - f_i^{exp})^2}{(f_i^{exp})^2} \tag{3}$$

La fonction objectif est minimisée à l'aide d'un algorithme de descente avec utilisation du gradient. On utilise dans la suite l'algorithme de Levenberg-Marquardt ainsi que l'algorithme BFGS.

3. Étude d'inversion RUS par simulation

3.1. Inversion sur un cas sans angle d'Euler

Avec les ingrédients définis dans la partie précédente, on se propose dans un premier temps d'étudier un problème d'inversion sur données synthétiques. On se donne les C_{ij} du Tableau 1, pour lesquels on génère des fréquences de résonance cible, en considérant un échantillon parfaitement parallélépipédique de dimensions et de masse volumique connues.

c11	c22	c33	c44	c55	c66	c23	c31	c12
235	240	220	100	80	90	115	110	120

Tableau 1: C_{ij} (en GPa) choisis pour l'étude d'inversion par simulation.

On donne ensuite à l'optimiseur un point de départ distant de 10 GPa sur tous les C_{ij} et on lance la minimisation. On fait ceci en variant le nombre de fréquences considérées pour formuler la fonction objectif (3). Les résultats obtenus sont présentés dans le

fréquences	c11	c22	c33	c44	c55	c66	c23	c31	c12	erreur RMS (%)
30	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000
40	200,7	216,6	126,4	96,4	83,7	90,0	66,1	54,0	90,6	0,080033
50	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000002
60	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000
70	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000001
80	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000

30	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000
40	200,7	216,6	126,4	96,4	83,7	90,0	66,1	54,0	90,6	0,080033
50	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000002
60	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000
70	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000001
80	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	0,000000

Tableau 2 Résultats de l'inversion simulée. Les C_{ij} sont en GPa.

Comme on peut le voir dans tableau, la plupart des situations mènent à la solution attendue. Dans le cas 40 fréquences, l'inversion s'arrête avant d'atteindre le minimum de la fonction objectif. Cette situation peut se produire avec des données réelles mais n'est pas fréquente dans notre expérience.

3.2. Inversion sur un cas avec angle d'Euler

Une étude similaire à celle du paragraphe précédent a été menée en rajoutant un degré de liberté supplémentaire lié à la découpe selon l'angle autour de l'axe y discutée au paragraphe 2.2. Les C_{ij} cible sont les mêmes qu'au paragraphe précédent, mais avec un angle de 30° en y . On étudie là encore l'utilisation d'un nombre de fréquences variables dans la résolution du problème inverse. Les résultats sont les suivants :

Fréquences	c11	c22	c33	c44	c55	c66	c23	c31	c12	Angle d'Euler Y1	erreur RMS (%)
30	235,0	240,0	219,8	100,0	80,0	90,0	114,9	109,9	120,0	30,0	0,000055
40	235,0	240,0	220,0	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	150,0	0,000009
50	235,0	240,1	220,3	100,0	80,0	90,0	115,2	110,1	120,0	30,0	0,000119
60	252,0	236,2	218,1	97,6	60,6	92,1	106,5	88,6	118,3	12,8	0,045976
70	235,0	240,0	220,1	100,0	80,0	90,0	115,0	110,0	120,0	30,0	0,000049
80	220,0	240,0	235,0	90,0	80,0	100,0	120,0	110,0	115,0	120,0	0,000002

Tableau 3 : Résultats de l'étude d'inversion avec angle d'Euler. Les C_{ij} sont en GPa, l'angle d'Euler Y1 en degré.

De la même manière que pour l'étude du paragraphe précédent, on constate que la procédure d'optimisation aboutit dans presque tous les cas à la solution attendue en ce qui concerne les C_{ij} . Cela étant dit, on constate également la présence de solution d'erreur quasi nulles qui ne sont pas celles attendues, mais qui semblent symétriques de la solution cible.

3.3. Mise en évidence de la non-unicité des solutions

Une analyse plus approfondie des solutions trouvées dans le cas précédent permet de mettre en évidence que la solution recherchée n'est pas unique au sens de la fonction objectif (3). L'introduction d'un seul angle de rotation autour de l'axe y rajoute des termes en dehors de la diagonale par bloc de la matrice des C_{ij} . Lorsque l'on part des C_{ij} du Tableau 1 et que l'on applique la transformation correspondante au changement de repère de 30° autour de l'axe y , on obtient les C_{ij} dans le repère de l'échantillon suivants :

```
array([[250. , 117.5 , 95. , 0. , 4.33, 0. ],
       [117.5 , 240. , 112.5 , 0. , -4.33, 0. ],
       [ 95. , 112.5 , 240. , 0. , -12.99, 0. ],
       [ 0. , 0. , 0. , 97.5 , 0. , 4.33],
       [ 4.33, -4.33, -12.99, 0. , 65. , 0. ],
       [ 0. , 0. , 0. , 4.33, 0. , 92.5 ]])
```

Si l'on applique une rotation de -30° , la matrice des C_{ij} est presque identique : seuls les termes en gras changent de signe.

```
array([[250. , 117.5 , 95. , 0. , -4.33, 0. ],
       [117.5 , 240. , 112.5 , 0. , 4.33, 0. ],
       [ 95. , 112.5 , 240. , 0. , 12.99, 0. ],
       [ 0. , 0. , 0. , 97.5 , 0. , -4.33],
       [-4.33, 4.33, 12.99, 0. , 65. , 0. ],
       [ 0. , 0. , 0. , -4.33, 0. , 92.5 ]])
```

Ces deux C_{ij} très proches mènent à des fréquences de résonance identiques à la précision machine. Cela étant dit, les modes propres obtenus ne sont pas rigoureusement identiques, avec des symétries dans le champ de déplacement obtenu. Cette symétrie explique le résultat obtenu pour le cas 30 et 40 fréquences.

Cela étant dit, on observe encore un autre type de symétrie dans les résultats obtenus. Le résultat obtenu pour 80 fréquences ressemble à la solution attendue avec permutation des axes 1 et 3 et une rotation de l'angle complémentaire par rapport à 90° de celui attendu. Il s'avère que l'on peut également appliquer une rotation d'angle négatif au complémentaire ce qui amène à 4 solutions équivalentes dont les fréquences sont les mêmes. La figure suivante illustre le propos :

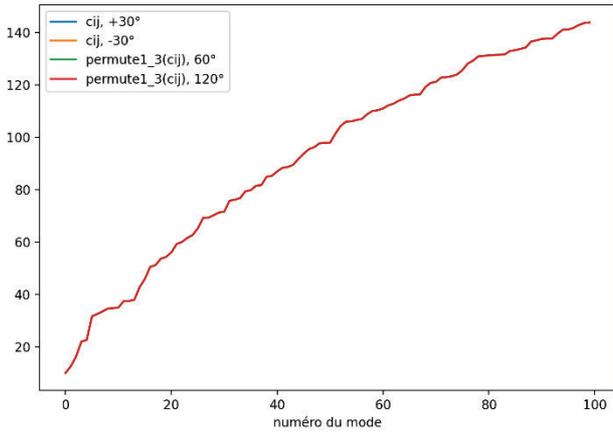


Figure 4 : comparaison des fréquences de résonance calculées pour quatre paramétrisations C_{ij} obtenues à partir d'un seul jeu de constantes élastiques.

3.4. Conclusions de l'étude d'inversion simulée

En conclusion de cette étude d'inversion simulée, on peut dire que la méthode RUS devrait permettre d'obtenir des C_{ij} fiables à l'aide des routines d'inversion gradient dans le cas des soudures austénitiques. En effet, dans un cas idéal, l'optimiseur retrouve, sauf accident, les valeurs de C_{ij} cible ainsi que l'angle d'Euler attendu. Cela étant dit, il est apparu que des symétries au sens des fréquences de résonance étaient cachées dans la description orthotrope avec un seul angle d'Euler selon y . Étant donné que cette symétrie est inhérente au modèle, il se pourrait qu'elle puisse fausser l'inversion sur les données expérimentales. Si nécessaire,

on peut toujours transformer les valeurs obtenues de l'un vers l'autre cas de symétries.

4. Acquisition de données expérimentales et inversion par la méthode RUS

4.1. Acquisition des données

Les données de résonance ont été acquises à l'aide d'un dispositif développé au CEA List. Deux traducteurs de cisaillement sont utilisés (l'un pour l'émission, l'autre pour la réception) avec un analyseur de réseau vectoriel Bode100 pour balayer une gamme de fréquences comprises entre 9 et 109 kHz. L'échantillon est suspendu sur les deux traducteurs et un troisième pic conique afin de laisser la vibration la plus libre possible. Le montage expérimental est représenté sur la Figure 5.

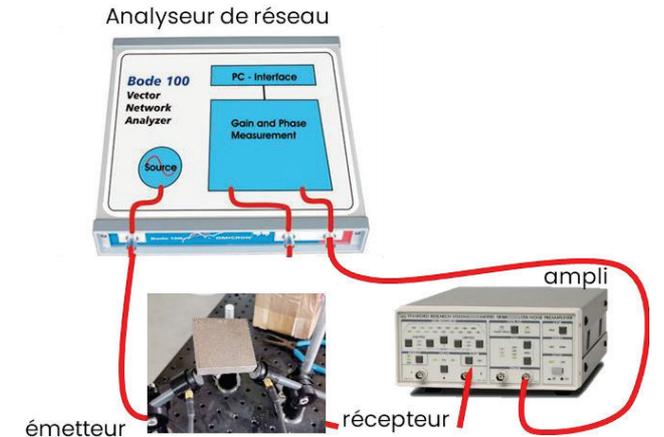


Figure 5 : montage expérimental utilisé pour l'acquisition des spectres.

Deux ou trois spectres sont acquis par échantillon, ce qui correspond à 10 ou 15 minutes par spectre, selon le nombre de points enregistrés (20000 ou 30000). Les spectres obtenus sont montrés dans leur intégralité sur la Figure 6.

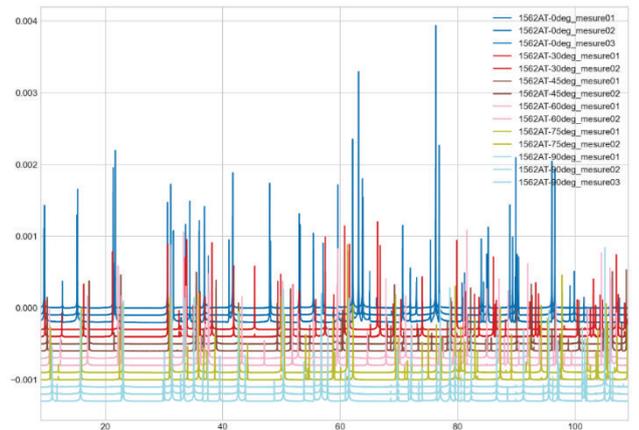


Figure 6 : Vue d'ensemble des spectres obtenus.

Expérimentalement, on constate d'emblée une corrélation de la fréquence fondamentale avec l'angle de découpe connu a priori, comme le montre la Figure 7.

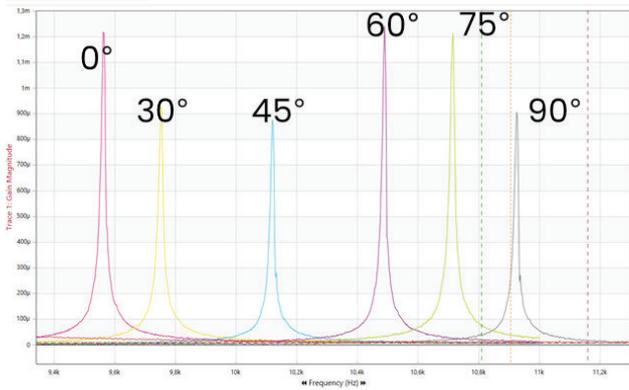


Figure 7 : Corrélation expérimentale entre fréquence de résonance fondamentale et angle de découpe de l'échantillon.

À partir des spectres continus, les pics de résonance sont extraits manuellement à l'aide d'un outil de fit. Ensuite, les pics des spectres d'une même plaque sont unifiés dans un fichier qui permet de les apparier. C'est la liste des fréquences obtenue qui constitue la donnée d'entrée du problème inverse formulé dans le prochain paragraphe.

4.2. Méthodologie d'inversion

On résout le problème inverse qui consiste à trouver les Cij qui correspondent le mieux aux fréquences expérimentales. Seules les 50 premières fréquences relevées expérimentalement sont utilisées, ce qui correspond à une règle empirique de la communauté RUS [14, Paragr. II.C.4]. Deux modalités ont été étudiées. La première consiste à laisser 9 degrés de liberté correspondants aux constantes élastiques qui décrivent l'orthotropie et à laisser fixé l'angle de rotation à sa valeur *a priori*. La deuxième modalité consiste en plus à laisser l'optimiseur modifier la valeur de l'angle de découpe afin de se rapprocher au mieux des données expérimentales.

4.3. Résultats d'inversion

Les résultats d'inversion obtenus avec des angles fixés à leur valeur nominale sont montrés dans le graphe de la Figure 8.

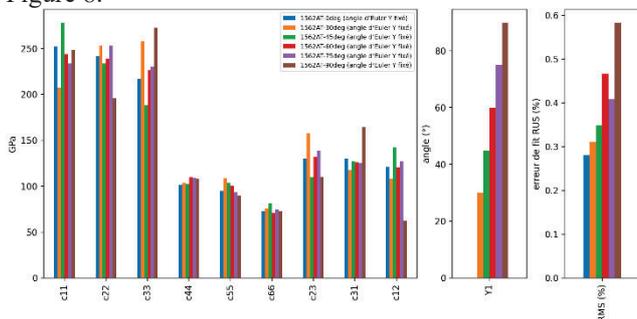


Figure 8 : Cij obtenus par inversion avec angle d'Euler en y fixé à sa valeur nominale.

L'erreur RMS, déjà utilisée dans l'étude simulée, est couramment utilisée pour quantifier la qualité du fit. Une erreur RMS doit être inférieure à 0,8% et est généralement

considérée comme acceptable dans la gamme 0,2-0,5% [14].

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(f_i(C_{ij}) - f_i^{exp})^2}{(f_i^{exp})^2}} \tag{4}$$

Ainsi, seul le fit de la plaque à 90° ne rentre pas dans le critère d'acceptabilité au sens strict. On constate également que la valeur de c12 obtenue pour cette plaque est particulièrement faible par rapport aux autres.

Les résultats obtenus pour le deuxième mode d'inversion sont présentés sur la Figure 9 :

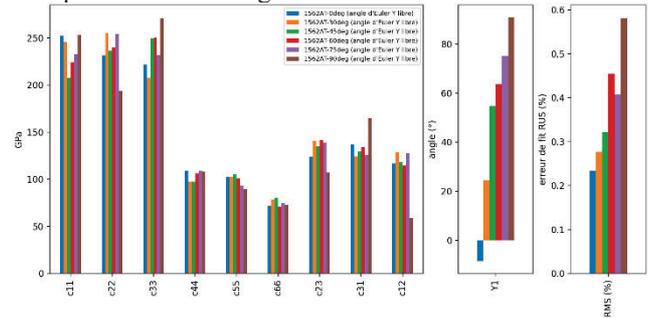


Figure 9 : Cij obtenus par inversion avec angle d'Euler en y laissé libre.

En rajoutant le degré de liberté supplémentaire lié à la rotation du repère, on obtient des Cij dans la même gamme de variation que dans le cas où l'angle est fixé. Les angles de fit optimaux sont très proches des valeurs attendues. Les erreurs RMS sont légèrement plus faibles que dans le cas précédent.

5. Analyse des résultats

5.1. Cij obtenus par inversion

Comme décrit dans le paragraphe précédent, les résultats obtenus sont proches dans les deux modalités d'inversion étudiées. Si on résume les données d'inversion dans le cas où l'angle d'Euler est libre par une moyenne et un écart-type, on obtient le tableau suivant pour les Cij :

c11	c22	c33	c44	c55	c66	c23	c31	c12
236±18	235±22	239±23	105±6	99±6	75±4	131±13	136±15	111±26

Tableau 4 : Résultats d'inversion RUS obtenus à partir de la deuxième modalité.

On peut remarquer que ces valeurs semblent compatibles avec une symétrie quasi hexagonale puisque c11 ≈ c22, c44 ≈ c55 et c23 ≈ c31.

5.2. Comparaison avec les résultats du projet ANR MUSCAD

Les Cij moyens obtenus sont comparés à ceux issus de la méthode de caractérisation par interférométrie appliquée aux même échantillons dans le cadre du projet ANR MUSCAD dans la Figure 10. Une permutation des axes 2 et 3 a été mise en œuvre sur ces données étant donné que la convention de repère de définition était différente avec celle du présent travail.

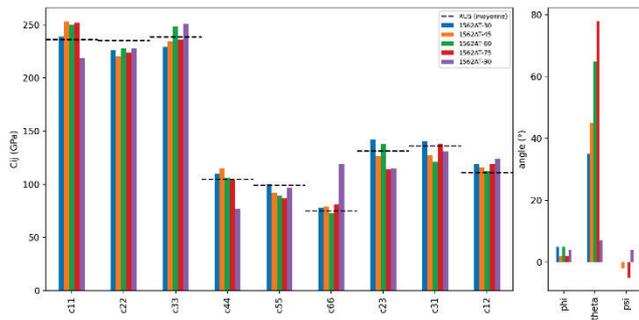


Figure 10 : Comparaison des Cij moyens obtenus par RUS avec ceux du projet MUSCAD.

On constate un accord relativement intéressant entre ces jeux de données. Cela étant dit, il reste à investiguer si l'inversion à 90° obtenue dans MUSCAD ne souffre pas du problème de non-unicité évoqué au paragraphe 3.3.

6. Conclusions et perspectives

Dans ce papier, nous avons mis en œuvre une démarche de caractérisation des constantes élastiques d'échantillons de soudure austénitique en 316L par la méthode de résonance ultrasonore RUS. Une étude par simulation a montré qu'en théorie cette méthode devrait permettre d'obtenir des résultats pertinents pour l'application visée, mais elle a également montré que le problème était sujet à des symétries qui pouvaient perturber le résultat final. Des fréquences de résonance ont été mesurées sur les échantillons disponibles et déjà caractérisées dans le cadre du projet ANR MUSCAD. Puis, deux manières différentes de faire l'inversion sur ces données de résonance ont été mises en œuvre. Les ajustements obtenus sont bons en termes d'erreur de fit. Les Cij obtenus sont en bon accord avec ceux du projet MUSCAD, excepté pour la plaque 90°. En perspective, il serait intéressant de mieux comprendre le problème de symétrie que nous avons rencontré dans la description élastique des soudures austénitiques. Une manière de rendre l'inversion plus robuste, déjà utilisé dans la communauté RUS [15], consisterait à utiliser des informations issues des modes de vibrations expérimentaux, potentiellement à l'aide d'une mesure par vibrométrie laser. Enfin, un dernier axe de réflexion concerne l'utilisation d'une géométrie mieux adaptée à l'inversion RUS. Les plaques utilisées dans cette étude étant à l'origine spécifiées pour l'utilisation du dispositif d'interférométrie [3], on peut se poser la question d'une découpe optimale pour une détection des fréquences de résonance au sens où celles-ci se distinguent « au mieux » les unes des autres par un espacement le plus large possible.

Remerciements

FLB adresse ses plus vifs remerciements à Jérôme Laurent pour ses conseils et la mise au point du dispositif de mesure par résonance.

Bibliographie

- [1] Autorité de sûreté nucléaire, « Corrosion sous contrainte ». <https://www.asn.fr/l-asn-contrôle/corrosion-sous-contrainte> (consulté le 1 juin 2023).
- [2] M.-A. Ploix, P. Guy, B. Chassignole, J. Moysan, G. Corneloup, et R. E. Guerjouma, « Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainless steel welds: Realistic input data for NDT numerical modeling », *Ultrasonics*, vol. 54, n° 7, p. 1729-1736, sept. 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2014.04.005.
- [3] P. A. Bodian, « Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope : application à l'évaluation des propriétés d'élasticité et d'atténuation d'aciers moules par centrifugation et de soudures en Inconel », These de doctorat, Lyon, INSA, 2011. Consulté le: 1 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2011ISAL0024>
- [4] W. M. Visscher, A. Migliori, T. M. Bell, et R. A. Reinert, « On the normal modes of free vibration of inhomogeneous and anisotropic elastic objects », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, n° 4, p. 2154-2162, oct. 1991, doi: 10.1121/1.401643.
- [5] A. Migliori *et al.*, « Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids », *Physica B: Condensed Matter*, vol. 183, n° 1-2, p. 1-24, janv. 1993, doi: 10.1016/0921-4526(93)90048-B.
- [6] A. Migliori et J. L. Sarrao, *Resonant Ultrasound Spectroscopy*, John Wiley and Sons. 1997.
- [7] B. R. Goodlet *et al.*, « Elastic Properties of Novel Co and CoNi-Based Superalloys Determined through Bayesian Inference and Resonant Ultrasound Spectroscopy », *Metall Mater Trans A*, vol. 49, n° 6, p. 2324-2339, juin 2018, doi: 10.1007/s11661-018-4575-6.
- [8] C. M. Donahue, M. C. Remillieux, G. Singh, T. J. Ulrich, R. J. Migliori, et T. A. Saleh, « Measuring the elastic tensor of a monolithic SiC hollow cylinder with resonant ultrasound spectroscopy », *NDT & E International*, vol. 101, p. 29-33, janv. 2019, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.09.012.
- [9] J. A. Evans *et al.*, « Determining elastic anisotropy of textured polycrystals using resonant ultrasound spectroscopy », *J Mater Sci*, vol. 56, n° 16, p. 10053-10073, juin 2021, doi: 10.1007/s10853-021-05827-z.
- [10] F. Le Bourdais *et al.*, « On the potential of Resonant Ultrasound Spectroscopy applied to the non-destructive characterization of the density of (LPBF) additively manufactured materials », *Additive Manufacturing*, vol. 58, p. 103037, oct. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103037.
- [11] B. Chassignole, « Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons », These de doctorat, Lyon, INSA, 2000.

- Consulté le: 30 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2000ISAL0107>
- [12] H. M. Ledbetter, « Monocrystal elastic constants in the ultrasonic study of welds », *Ultrasonics*, vol. 23, n° 1, p. 9-13, janv. 1985, doi: 10.1016/0041-624X(85)90005-8.
- [13] W. L. Bond, « The Mathematics of the Physical Properties of Crystals », *Bell System Technical Journal*, vol. 22, n° 1, p. 1-72, 1943, doi: 10.1002/j.1538-7305.1943.tb01304.x.
- [14] J. Torres, A. Flores-Betancourt, et R. P. Hermann, « *RUScal*: Software for the analysis of resonant ultrasound spectroscopy measurements », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 151, n° 5, p. 3547-3563, mai 2022, doi: 10.1121/10.0011397.
- [15] P. Sedlák, H. Seiner, J. Zidek, M. Janovská, et M. Landa, « Determination of All 21 Independent Elastic Coefficients of Generally Anisotropic Solids by Resonant Ultrasound Spectroscopy: Benchmark Examples », *Exp Mech*, vol. 54, n° 6, p. 1073-1085, juill. 2014, doi: 10.1007/s11340-014-9862-6.