



HAL
open science

Développement de la méthode des rayons paraxiaux pour la simulation de l'inspection ultrasonore des soudures

Audrey Gardahaut, Karim Jezzine, Didier Cassereau, Nicolas Leymarie

► **To cite this version:**

Audrey Gardahaut, Karim Jezzine, Didier Cassereau, Nicolas Leymarie. Développement de la méthode des rayons paraxiaux pour la simulation de l'inspection ultrasonore des soudures. Les Journées COFREND 2014, May 2014, Bordeaux, France. hal-04510653

HAL Id: hal-04510653

<https://hal.science/hal-04510653>

Submitted on 19 Mar 2024

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.

DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE DES RAYONS PARAXIAUX POUR LA SIMULATION DE L'INSPECTION ULTRASONORE DES SOUDURES

A. GARDAHAUT⁽¹⁾, K. JEZZINE⁽¹⁾, D. CASSEREAU⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ et N. LEYMARIE⁽¹⁾

⁽¹⁾ CEA, LIST, Digiteo Labs, Bât. 565, PC 120, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

⁽²⁾ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7371, UMR S_1146, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, F-75006, Paris, France

⁽³⁾ CNRS, UMR 7371, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, F-75006, Paris, France

⁽⁴⁾ INSERM, UMR S_7611, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, F-75006, Paris, France

⁽⁵⁾ ESPCI ParisTech, F-75005, Paris, France

Tél. +33 (0)1 69 08 40 26 – Fax. +33 (0)1 69 08 75 97

e-mail : audrey.gardahaut@cea.fr

RÉSUMÉ

L'interprétation d'inspections ultrasonores de soudures austénitiques ou bimétalliques peut s'avérer délicate du fait de l'anisotropie et de l'inhomogénéité caractéristiques de ces milieux. Des déviations et/ou divisions du faisceau ultrasonore peuvent se produire lors de sa propagation. Le modèle développé dans la plateforme CIVA permet de traiter le cas de milieux anisotropes homogènes par morceaux. Les travaux de thèse présentés dans ce papier visent à étendre le modèle à l'étude de milieux inhomogènes. Il est alors possible de simuler la propagation des ultrasons dans des soudures décrites à l'aide d'une représentation continûment variable de l'orientation cristalline des grains. Le formalisme consiste à résoudre les équations eikonale et de transport. Les trajectoires des rayons dans les milieux considérés sont d'abord obtenues via la résolution d'un système linéaire d'équations différentielles du premier ordre. Ensuite, le modèle de tracé dynamique de rayons, ou tracé de rayon paraxial, consiste à résoudre un second système différentiel le long d'un rayon de référence. Il permet de déterminer le facteur de divergence et l'amplitude le long de ce rayon ainsi qu'à son voisinage. Des résultats de simulation sont présentés et comparés à des résultats obtenus avec une méthode éléments finis ainsi qu'à des résultats expérimentaux.

Mots-clés : méthode de tracé dynamique de rayons, rayons paraxiaux, inspection de soudures, milieux anisotropes et inhomogènes.

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les contrôles ultrasonores menés sur site sur des soudures austénitiques ou bimétalliques peuvent s'avérer difficiles à interpréter. En effet, le caractère anisotrope et inhomogène [1] de ces structures complexes peut être la cause de divisions et/ou déviations [3][4] du faisceau ultrasonore au cours de sa propagation dans de tels milieux. Dans le but de comprendre ces phénomènes physiques, de nombreux outils de simulation ont été développés. La propagation ultrasonore peut en effet être modélisée à l'aide de modèles tels que les différences finies [4], les éléments finis [5][6] ou encore les modèles de tracé de rayons [7]. Un modèle semi-analytique, basé sur le modèle de tracé dynamique de rayons

est déjà implanté au sein de la plateforme logicielle CIVA [8][9]. Il permet la simulation de la propagation ultrasonore dans une soudure décrite comme un ensemble de milieux homogènes anisotropes. Cependant, pour des domaines de faibles dimensions devant la longueur d'onde, les résultats ne sont valides que pour un faible contraste d'impédance entre deux domaines voisins. Ce papier présente l'approche ainsi que les développements menés au cours de ces travaux de thèse [10] dans le but d'appliquer le modèle de tracé dynamique de rayons à des milieux anisotropes inhomogènes. Les soudures austénitiques ou bimétalliques peuvent alors être décrites par une cartographie de l'orientation cristalline, obtenue grâce à la mise en place et à l'application d'un traitement d'image sur leur macrographie. Des validations numériques du modèle en 2D ont été menées. Les résultats obtenus pour une soudure analytique ont été comparés avec des résultats obtenus avec un modèle éléments finis. Enfin, des validations expérimentales du modèle de tracé dynamique de rayons en 3D ont été réalisées dans le cadre d'une soudure réaliste décrite par l'intermédiaire d'une cartographie lissée de l'orientation cristalline.

MISE EN PLACE D'UN PROCÉDÉ DE TRAITEMENT D'IMAGE À PARTIR DE LA MACROGRAPHIE DE LA SOUDURE

Dans le cadre de cette étude, le procédé de traitement d'image mis en place a été appliqué à une soudure bimétallique (voir *Figure 1*) réalisée entre un acier ferritique et un acier inoxydable. L'objectif est d'extraire les orientations des grains composants la zone soudée et de la représenter comme une cartographie lissée, à l'échelle de la longueur d'onde, de l'orientation cristalline. La description ainsi obtenue sera utilisée comme donnée d'entrée du modèle de propagation. Le procédé, réalisé avec les logiciels Matlab et ImageJ, est composé de quatre étapes. Dans un premier temps, les contours externes de la zone soudée doivent être définis. Comme le montre la *Figure 1*, cette région d'intérêt, définie manuellement, est composée du beurrage et de la soudure.

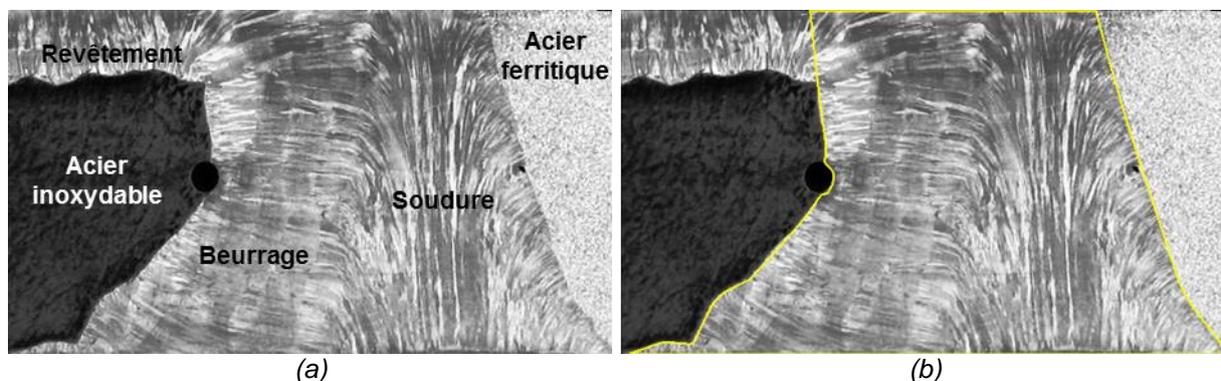


Figure 1. Représentation de (a) la macrographie originale de la soudure étudiée et (b) de la détection de ses contours externes.

La seconde étape du procédé consiste à déterminer l'orientation locale θ des grains constitutifs de la zone soudée. Cette évaluation est réalisée à l'aide du *plug-in* OrientationJ développé par le Laboratoire d'Imagerie Biomédicale de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne [11]. Cet algorithme est basé sur l'évaluation du tenseur de structure de chaque pixel de l'image. Il permet de calculer l'orientation locale pour chacun des pixels en faisant glisser une fenêtre gaussienne sur toute la hauteur et la largeur de la macrographie. Le programme fournit alors une représentation en couleur de l'orientation locale θ des grains comme représenté sur la *Figure 2*.

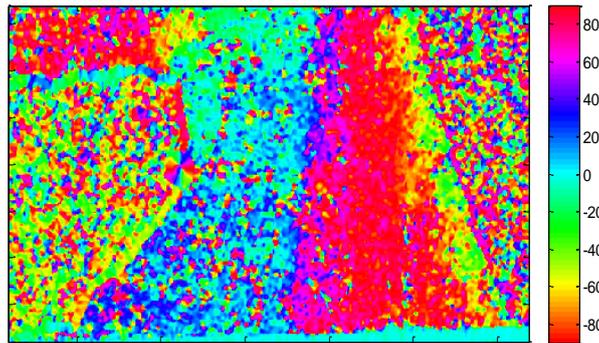


Figure 2. Représentation de l'orientation locale θ de la soudure considérée.

Le modèle de tracé dynamique de rayons est basé sur une approximation haute fréquence, ce qui implique que la description de la soudure, fournie en donnée d'entrée du modèle, ne doit pas être constituée de zones dans lesquelles la variation des propriétés physiques est grande devant la longueur d'onde. Il est donc nécessaire de réaliser un lissage de la représentation de l'orientation des grains en utilisant un filtre passe-bas gaussien dans la région d'intérêt. Ce filtre consiste en la convolution de l'image avec une fonction gaussienne exprimée comme suit:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

où σ est la déviation standard correspondant à la dimension de la fenêtre d'application du filtre. D'après les travaux menés par THIERRY *et al.* [12] dans le domaine de la géophysique, la dimension du filtre doit être choisie égale à la longueur d'onde λ . Afin de lisser les directions des grains et non les valeurs de l'orientation cristalline, le filtre gaussien est appliqué sur les images du cosinus et du sinus de deux fois la valeur de l'orientation cristalline, comme observé sur la Figure 3.

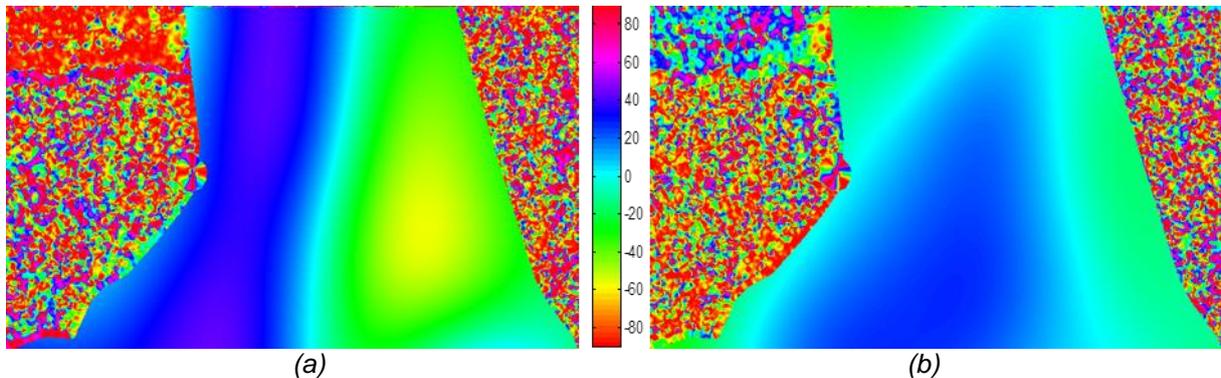


Figure 3. Représentation des images d'orientation lissées: (a) $\cosinus(2\theta)$ et (b) $\sinus(2\theta)$.

La dernière étape de ce traitement d'image consiste en l'obtention de la représentation lissée de l'orientation cristalline θ à partir des images du cosinus et du sinus. L'image ainsi obtenue est représentée sur la Figure 4.

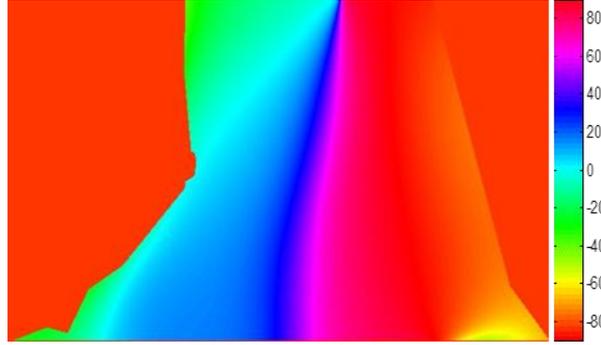


Figure 4. Représentation de la cartographie lissée de l'orientation cristalline de la soudure étudiée.

MODÈLE DE TRACÉ DYNAMIQUE DE RAYONS POUR LA PROPAGATION DANS DES MILIEUX ANISOTROPES ET INHOMOGÈNES

Le modèle de tracé dynamique de rayons développé dans le cadre de cette étude est adapté à l'étude de la propagation des ondes ultrasonores au sein de milieux anisotropes et inhomogènes. Ce modèle semi-analytique permet de déterminer, d'une part, la trajectoire et le temps de vol des rayons, et d'autre part d'évaluer l'amplitude associée à un tube de rayon au cours de la propagation. Il se base sur la résolution de deux équations principales issues de la résolution des équations de l'élastodynamique et de l'approximation haute fréquence.

L'équation eikonale

La première, nommée équation eikonale (2), permet d'évaluer la trajectoire et le temps de vol des rayons dans un milieu doucement inhomogène :

$$(\nabla T)^2 = \frac{1}{c(x)^2} \quad (2)$$

où $T(x)$ est le temps de vol et $c(x)$ la vitesse de phase de l'onde à la position x . Équation partielle différentielle non-linéaire de premier ordre en $T(x)$, elle décrit la propagation du front d'onde de l'onde considérée. Sa résolution par la méthode des caractéristiques [13] permet l'écriture d'un système d'équations différentielles partielles non-linéaires du premier ordre, également appelé système du rayon axial (3):

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dT} = a_{ijkl} p_i g_j^{(m)} g_k^{(m)} = \mathcal{U}_i^E, \\ \frac{dp_i}{dT} = -\frac{1}{2} \frac{\partial a_{ijkl}}{\partial x_i} p_k p_n g_j^{(m)} g_l^{(m)}. \end{cases} \quad (3)$$

Ce système d'équations couplées, évaluant la variation de la position x_i et de la lenteur p_i en fonction du temps T , est exprimé en fonction des constantes élastiques normalisées par la densité a_{ijkl} et du vecteur vitesse d'énergie \mathcal{U}_i^E . Les vecteurs polarisations $g_j^{(m)}$ du mode m sont les vecteurs propres du tenseur de Christoffel Γ_{ik} .

L'équation de transport

La seconde équation à résoudre est l'équation de transport (4). Elle illustre la conservation de l'énergie dans un tube de rayons défini au voisinage du rayon axial Ω , et permet l'évaluation de l'amplitude de l'onde ultrasonore au cours de sa propagation dans un milieu anisotrope inhomogène. Elle s'écrit sous la forme :

$$A(x)\nabla^2 T(x) + 2 \nabla A(x) \cdot \nabla T(x) = 0, \quad (4)$$

et représente une équation partielle différentielle du premier ordre en $A(x)$, scalaire représentant l'amplitude de l'onde. La résolution de cette équation mène à l'écriture d'un second système d'équations non-linéaires différentielles du premier ordre (5):

$$\begin{cases} \frac{d}{dT} \left(\frac{\partial x_i}{\partial \gamma} \right) = \frac{dQ_i}{dT} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G_m}{\partial p_i \partial \gamma} = A_{ij} Q_j + B_{ij} P_j, \\ \frac{d}{dT} \left(\frac{\partial p_i}{\partial \gamma} \right) = \frac{dP_i}{dT} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 G_m}{\partial x_i \partial \gamma} = -C_{ij} Q_j - D_{ij} P_j, \end{cases} \quad (5)$$

où γ est un paramètre arbitraire lié aux conditions initiales, et défini comme l'angle entre un axe de référence et le vecteur lenteur initial du rayon Ω . Les quantités Q_i et P_i (6), appelées quantités paraxiales représentent les dérivées partielles de premier ordre de la position et de la lenteur, par rapport au paramètre γ :

$$\begin{aligned} Q_i^{(x)} &= \left(\frac{\partial x_i}{\partial \gamma} \right)_{T=cste}, \\ P_i^{(x)} &= \left(\frac{\partial p_i}{\partial \gamma} \right)_{T=cste}. \end{aligned} \quad (6)$$

Nommé système du rayon paraxial, ce second système (5) est exprimé en fonction des paramètres G_m représentant les valeurs propres normalisées du tenseur de Christoffel Γ_{ik} . Ils ont pour expression $G_m = a_{ijkl} p_j p_l g_i^{(m)} g_k^{(m)}$. Trois valeurs propres G_m associées à trois vecteurs propres $g_i^{(m)}$ sont évalués à chaque résolution de ces deux systèmes. Ils représentent les trois types d'ondes planes pouvant se propager dans des milieux anisotropes inhomogènes.

Évolution d'un tube de rayons

Les deux systèmes précédemment exprimés sont résolus de façon simultanée en utilisant la méthode d'Euler. Le système du rayon paraxial (5) est exprimé dans un repère de coordonnées cartésiennes x_i avec $i, j = 1, 2, 3$. Il est alors composé de six équations différentielles linéaires. Un second repère, nommé repère orthonormé du front d'onde de coordonnées y_i , où les indices M et N valent 1 ou 2, peut également être utilisé [14]. Il est défini par son origine R , point du rayon Ω , comme l'illustre la *Figure 5*. Les axes y_1 et y_2 , perpendiculaires entre eux, sont situés dans un plan tangent au front d'onde en R , et l'axe y_3 est orienté selon le vecteur lenteur \vec{p} au point R . Le système du rayon paraxial n'est plus alors exprimé qu'en fonction de quatre équations différentielles.

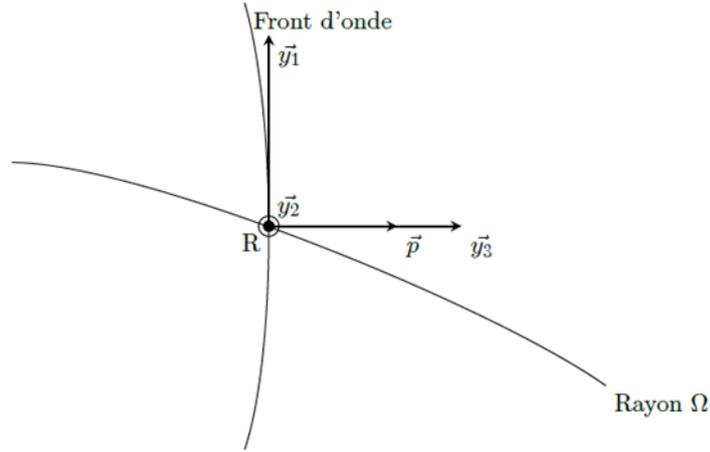


Figure 5. Représentation du repère orthonormé du front d'onde.

Les quantités paraxiales s'écrivent ainsi Q_M et P_M , avec $M = 1, 2$, et représentent les composantes du vecteur $\vec{\Psi}$ décrivant le rayon paraxial. Q_1 et Q_2 sont les déviations spatiales du rayon paraxial par rapport au rayon axial, et P_1 et P_2 les déviations de la lenteur du rayon paraxial devant le rayon axial, comme l'illustre la Figure 6.

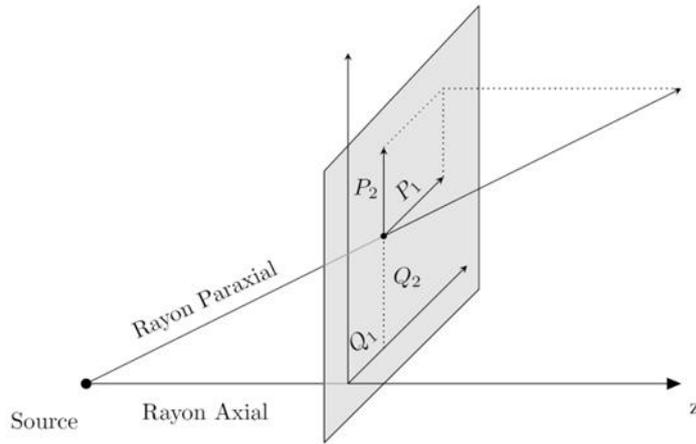


Figure 6. Définition des quantités paraxiales décrivant un rayon paraxial.

Le système du rayon paraxial peut alors s'écrire sous forme matricielle dans le repère orthonormé du front d'onde (7) entre deux positions de calcul :

$$\begin{pmatrix} Q_M^{(r+1)} \\ P_M^{(r+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_N^{(r)} \\ P_N^{(r)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + A_{MN}\Delta T & B_{MN}\Delta T \\ -C_{MN}\Delta T & 1 - D_{MN}\Delta T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_M^{(r+1)} \\ P_M^{(r+1)} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Les quantités paraxiales à l'itération $(r + 1)$ sont ainsi exprimées en fonction de celles évaluées à l'itération (r) et d'une matrice de propagation Π de dimensions 4×4 . Par la mise en cascade des itérations successives, les quantités paraxiales associées à la dernière position de calcul peuvent finalement être exprimées en fonction de celles de la première position et d'une matrice de propagation Π_{tot} décrivant l'intégralité de la propagation de l'onde dans le milieu considéré (8):

$$\begin{pmatrix} Q_M^{(n)} \\ P_M^{(n)} \end{pmatrix} = L_{(n)} \cdot L_{(n-1)} \dots L_{(1)} \cdot L_{(0)} \cdot \begin{pmatrix} Q_N^{(0)} \\ P_N^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi_{11tot} & \Pi_{12tot} \\ \Pi_{21tot} & \Pi_{22tot} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_N^{(0)} \\ P_N^{(0)} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Cette évolution du tube de rayons est illustrée sur la *Figure 7*. Ainsi, à chaque pas de calcul, les matrices A_{MN} , B_{MN} , C_{MN} et D_{MN} sont réévaluées et la matrice de propagation est alors mise à jour. La position et le vecteur lenteur, sont quant à eux déterminés par la résolution du système du rayon axial à chaque pas de temps.

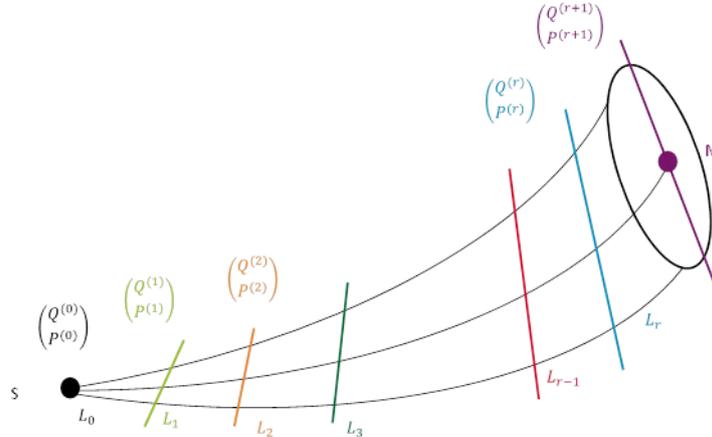


Figure 7. Représentation de l'évolution d'un tube de rayon et des quantités paraxiales associées à chaque pas de temps de la propagation.

Enfin, l'amplitude associée à ce rayon se propageant entre un point source et un point d'observation est évaluée en 3D à l'aide du coefficient de divergence \mathcal{L} (9):

$$\mathcal{L} = |\det \Pi_{12_{tot}}|^{1/2}. \quad (9)$$

VALIDATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE DE TRACÉ DYNAMIQUE DE RAYONS SUR UNE SOUDURE DÉCRITE ANALYTIQUEMENT

Afin, dans un premier temps, de valider le modèle en deux dimensions, celui-ci a été appliqué à l'étude d'une soudure en V pour laquelle la variation de l'orientation cristalline est exprimée à l'aide d'une loi analytique. Proposée par OGILVY [7], cette loi (10) s'écrit :

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{T(D + z \tan \alpha)}{x^\eta}\right), \text{ pour } x > 0, \\ -\frac{\pi}{2}, \text{ pour } x = 0, \\ -\arctan\left(\frac{T(D + z \tan \alpha)}{(-x)^\eta}\right), \text{ pour } x < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Les paramètres D et α sont des paramètres géométriques représentant respectivement la demie-largeur basse de la soudure et l'angle d'inclinaison des chanfreins par rapport à la verticale. Les paramètres T et η sont liés à la structure cristallographique et représentent une constante proportionnelle à $\tan \theta_i$ au niveau du chanfrein et la vitesse de variation de l'orientation cristalline entre le centre de la soudure et ses extrémités. Ces paramètres sont représentés sur la *Figure 8*.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la validation de la résolution du système du rayon axial. La trajectoire des rayons a ainsi été comparée à des résultats issus de la littérature [15] pour une soudure définie avec les paramètres suivants : $D = 2 \text{ mm}$, $\alpha = 21.80^\circ$, $T = 1$ et $\eta = 1$. La *Figure 8* représente la superposition des trajectoires évaluées par Connolly et celles obtenues avec le modèle de tracé dynamique de rayons.

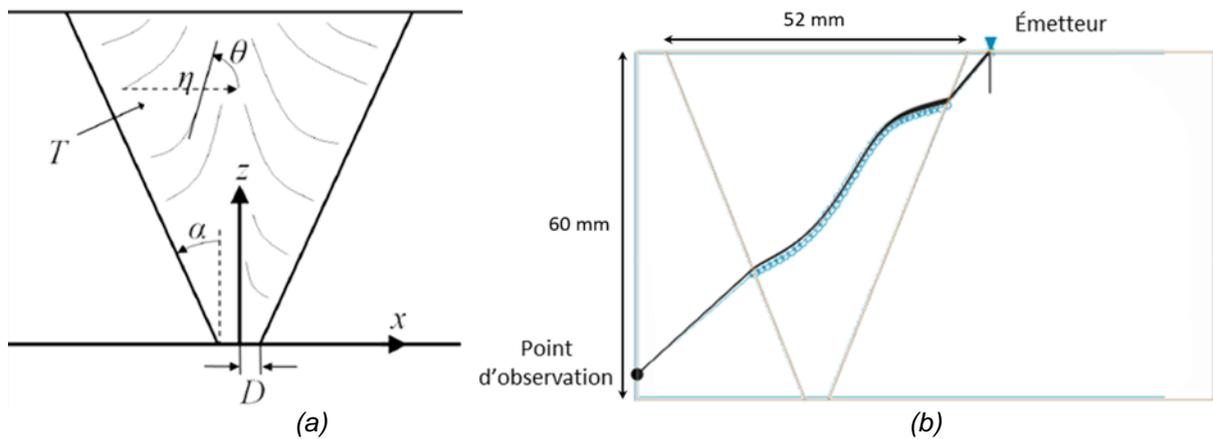


Figure 8. (a) Description des paramètres de la loi analytique d'Ogilvy. (b) Comparaison des trajectoires des rayons évaluées par Connolly (oo) et le modèle de tracé dynamique de rayons (--).

L'observation de cette superposition met en évidence un parfait accord des trajectoires entre les résultats issus de la littérature et ceux obtenus par avec le modèle de tracé dynamique de rayons adapté à l'étude des milieux anisotropes inhomogènes. Ainsi, le système du rayon axial issu de l'équation eikonale est validé en 2D.

Nous souhaitons à présent valider le second système différentiel, dit du rayon paraxial. Pour ce faire, il a été choisi de comparer le modèle de tracé de rayons à un modèle hybride [16] basé sur un calcul de champ à l'aide d'une méthode éléments finis au sein de la soudure. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 9.

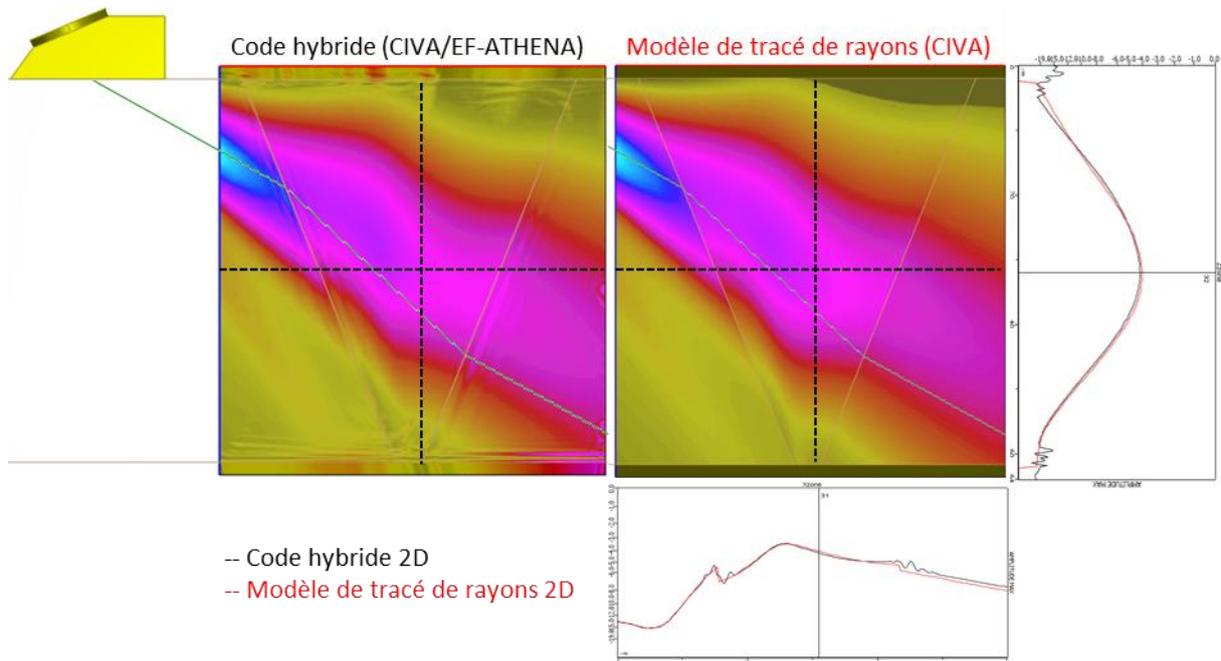


Figure 9. Représentation du module de la vitesse particulière évalué dans une soudure paramétrique et comparaison des résultats obtenus avec un modèle hybride 2D et le modèle rayons en 2D.

La comparaison du maximum du module de la vitesse particulière évalué avec un modèle éléments finis et le modèle de tracé dynamique de rayons, dans une soudure paramétrique en V, met en évidence un excellent accord entre les deux modèles. Ceci permet de valider la résolution du système du rayon paraxial.

VALIDATION NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE RAYONS SUR UNE SOUDURE DÉCRITE PAR UNE CARTOGRAPHIE LISSÉE DE L'ORIENTATION CRISTALLINE

À présent que le modèle développé a été validé en 2D sur une soudure pour laquelle l'orientation est décrite à l'aide d'une loi analytique, nous souhaitons l'appliquer sur un cas plus réaliste.

Validation numérique du modèle

La soudure considérée est une soudure bimétallique sur laquelle le procédé de traitement d'image précédemment présenté a été appliqué. La donnée d'entrée du modèle est ainsi une description lissée de l'orientation cristalline, comme l'illustre la *Figure 10*.

$$\rho = 7,9 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 247 & 110 & 148 & 0 & 0 & 0 \\ 110 & 245 & 145 & 0 & 0 & 0 \\ 148 & 145 & 218 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 112 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 110 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 75 \end{pmatrix} \text{ (GPa)}$$

(a)

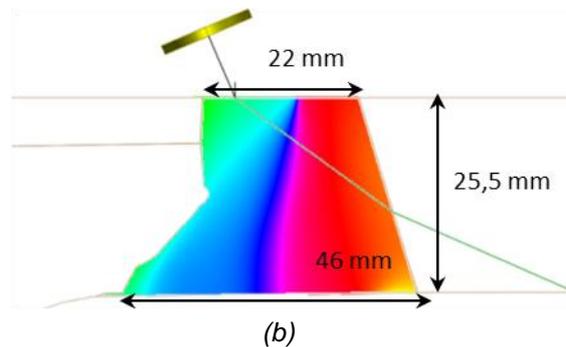


Figure 10. Application à un cas réaliste: (a) propriétés physiques de la soudure, (b) configuration de simulation et description lissée de l'orientation cristalline.

La simulation est réalisée avec un capteur en immersion de 12,7 mm de diamètre émettant des ondes L60° à 2 MHz. Les résultats de simulation obtenus avec le modèle hybride présenté dans la section précédente et le modèle de tracé dynamique de rayons sont présentés sur la *Figure 11*.

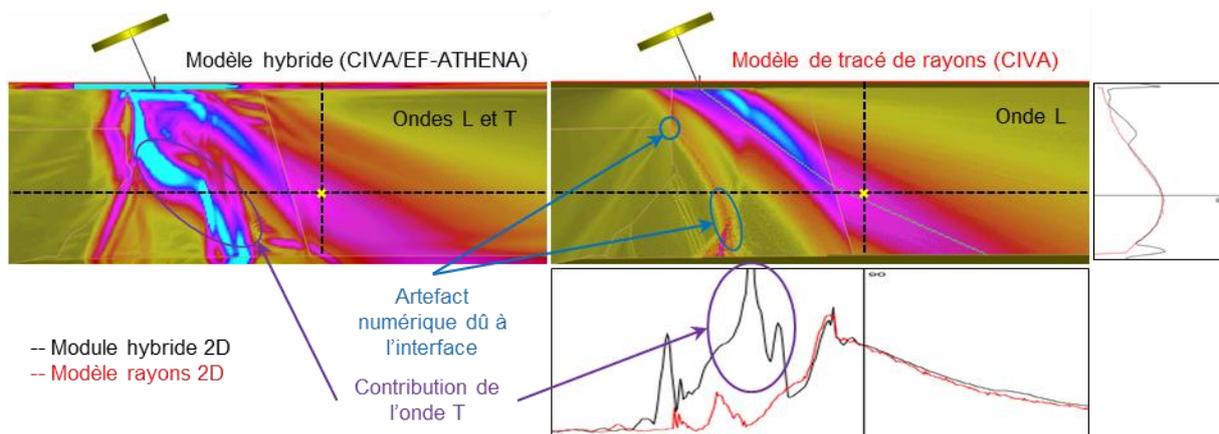


Figure 11. Représentation du module de la vitesse particulaire dans une soudure décrite par une cartographie d'orientation. Comparaison des résultats obtenus par éléments finis 2D et modèle de tracé de rayons 2D.

Les résultats obtenus avec les deux modèles et présentés sur la figure précédente mettent en évidence un excellent accord pour l'évaluation de l'onde longitudinale. En effet, des différences sont observables puisque la simulation avec le modèle de tracé de rayons n'a été réalisée que pour l'onde longitudinale alors que le modèle éléments finis prend automatiquement en compte tous les phénomènes physiques tels que l'onde transverse ou encore les réflexions et les conversions de mode. Ce champ de l'onde transverse est

identifiable aisément puisqu'il possède la plus forte amplitude. En outre, un faisceau de faible intensité est observable sur le résultat obtenu avec le modèle rayons. Ce faisceau est un artefact numérique provoqué par une discontinuité de la normale à l'interface entre la soudure, le revêtement et l'acier ferritique, comme l'illustre la *Figure 12*.

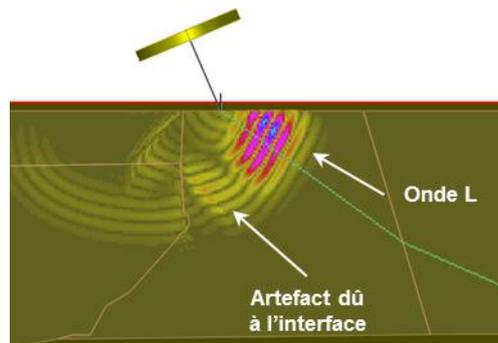


Figure 12. Représentation du front d'onde ultrasonore évalué avec le modèle de tracé dynamique de rayons au temps $t = 18\mu s$.

Validation expérimentale

L'acquisition est réalisée avec un capteur contact fixe de 12,7 mm de diamètre émettant des ondes longitudinales à 60° et 2 MHz. La réception est assurée par un hydrophone, dont l'aiguille fait 0,2 mm, positionné après traversée de la pièce. Ce dernier est mobile selon l'axe du cordon de soudure (incrément) et selon la hauteur de la pièce (balayage) afin de reproduire le champ ultrasonore transmis en fond de pièce. Le montage expérimental est présenté sur la *Figure 13*.

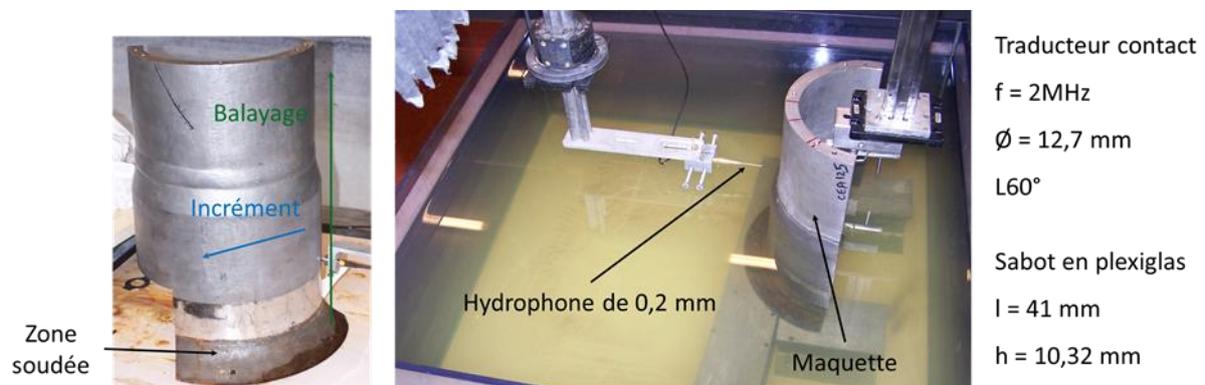


Figure 13. Configuration expérimentale.

Cette configuration a été reproduite en simulation afin de valider le modèle de tracé dynamique de rayons en 3D. La donnée d'entrée est toujours la cartographie lissée d'orientation présentée sur la *Figure 10*. Les résultats ainsi que les comparaisons entre expériences et simulations sont exposés sur la *Figure 14*.

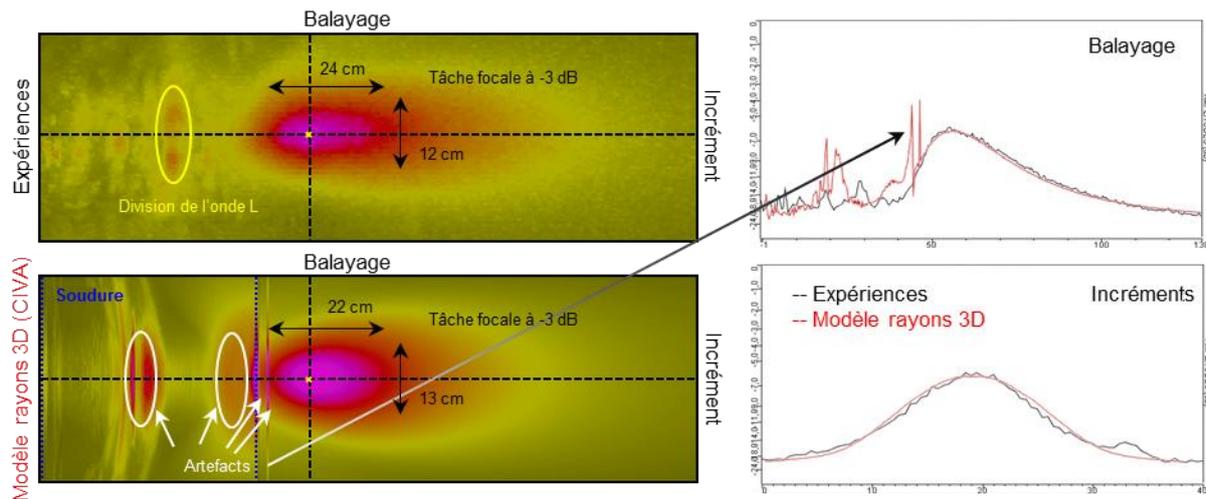


Figure 14. Comparaison des résultats expérimentaux et simulés en 3D du champ transmis en fond de pièce après traversée d'une soudure bimétallique décrite par une cartographie d'orientation.

Les résultats simulés en 3D présentent un très bon accord avec les résultats expérimentaux. De plus, les dimensions de la tâche focale en onde L à -3 dB sont bien évaluées avec le modèle de tracé dynamique de rayons. Cependant, des problèmes numériques sont observés. La simulation fait apparaître plusieurs artefacts d'amplitudes importantes par rapport à la tâche principale de l'onde longitudinale. L'observation des trajectoires des rayons en ces points a mis en évidence la présence de caustiques provoquées par un comportement chaotique des rayons [17] au cours de la propagation. Ceci peut s'expliquer d'une part par un manque de continuité de la normale à l'interface entre la soudure et l'acier inoxydable, ou d'autre part, par des variations spatiales trop importantes de l'inhomogénéité du matériau. Le modèle est en effet basé sur une approximation haute fréquence nécessitant d'avoir des variations de l'inhomogénéité qui soient petites devant la longueur d'onde. Un non-respect de cette approximation, dans une zone de la soudure, peut expliquer ce comportement. Un travail de lissage de la zone soudée, par minimisation de la norme de Sobolev [18] ou par l'utilisation de la méthode de Maslov [19] traitant le cas des caustiques, pourrait être mené afin de surmonter ce problème.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce papier a présenté des travaux de thèse menés dans le but de simuler la propagation ultrasonore dans des milieux anisotropes et inhomogènes, tels que les soudures austénitiques ou bimétalliques, tout en prenant en compte leurs propriétés physiques internes. Un modèle de tracé dynamique de rayons, usuellement appliqué dans le domaine de la géophysique, a été développé et adapté à l'étude de milieux anisotropes inhomogènes. Dans un premier temps, le modèle a été appliqué et validé sur une soudure en V pour laquelle l'orientation cristalline est décrite à l'aide d'une loi analytique. Les trajectoires des rayons ont été comparées avec succès à des résultats issus de la littérature alors que le champ simulé a été validé par comparaison avec d'autres résultats numériques obtenus avec un modèle hybride semi-analytique/éléments finis. Les deux modèles de propagation ont par la suite été appliqués à l'étude d'une soudure bimétallique décrite par une cartographie lissée de l'orientation cristalline. Cette description a été obtenue suite à l'application d'un traitement d'image sur la macrographie de la soudure. Les différentes étapes de ce procédé, présentées dans ce papier, permettent l'obtention d'une description lissée de l'orientation compatible avec le modèle de tracé dynamique de rayons. Des simulations du champ ultrasonore ont été réalisées avec chacun de ces deux modèles et ont montré un très bon accord. Le modèle de tracé dynamique de rayons a par la suite été

appliqué en 3D sur la description lissée de l'orientation et les résultats de simulations ont été confrontés à des champs ultrasonores expérimentaux. La bonne évaluation du champ transmis en fond de pièce et le bon dimensionnement de la tâche focale de l'onde longitudinale ont permis la validation du modèle en 3D. Cependant, des développements futurs sont envisagés afin de surmonter les problèmes numériques mis en évidence par les validations, tels que le comportement chaotique des rayons en certains points. De plus, des travaux sont actuellement en cours dans le but de valider la propagation de l'onde transverse dans un milieu anisotrope inhomogène décrit par une loi analytique ou une cartographie de l'orientation cristalline. Des développements sont également en cours afin d'adapter le pas de temps aux caractéristiques du milieu traversé et d'autres sont prévus pour optimiser les temps de calcul, en résolvant, par exemple, les deux systèmes différentiels avec un schéma numérique de type Runge-Kutta 4, c'est-à-dire d'ordre plus élevé que la méthode d'Euler actuellement utilisée. Il est également envisagé d'appliquer le modèle de tracé dynamique de rayons à l'étude d'autres maquettes de soudures austénitiques et bimétalliques ou encore à des composites courbes décrit par une orientation cristalline continûment variable. Enfin, le modèle de tracé dynamique de rayons, couplé à un algorithme de réponse défaut, sera appliqué à la détection de défauts localisés au sein ou au voisinage du milieu décrit de façon continûment variable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] KUPPERMAN, D.S. et REIMANN, K.J., Ultrasonic wave propagation and anisotropy in austenitic stainless steel weld metal, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-27 no.1, 1980, pp. 7-15.
- [2] CHASSIGNOLE, B., DUPOND, O., DOUDET, L., DUWIG, V. et ETCHEGARAY, N., « Ultrasonic examination of austenitic weld: illustration of the disturbances of the ultrasonic beam », In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 28, 2009, pp. 1886-1893.
- [3] F. AHMED, Étude de la diffusion des ondes ultrasonores dans les soudures austéno-ferritiques : application à la caractérisation des échos de lignes observés lors du contrôle des soudures bimétalliques, Thèse de doctorat, Université Paris 7, 1998.
- [4] FELLINGER, P., MARKLEIN, R., LANGENBERG, K.J. et KLAHOLZ, S., Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT – elastodynamic finite integration technique, Wave Motion, Vol. 21, 1995, pp. 47-66.
- [5] APFEL, A., MOYSAN, J., CORNELOUP, G., FOUQUET, T. et CHASSIGNOLE, B., Coupling an ultrasonic propagation code with a model of the heterogeneity of multipass welds to simulate ultrasonic testing, Ultrasonics, Vol. 43, 2005, pp. 447-456.
- [6] CHASSIGNOLE, B., DUWIG, V., PLOIX, M.-A., GUY, P. et EL GUERJOUMA, R., Modelling the attenuation in the ATHENA finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds, Ultrasonics, Vol. 49, 2009, pp. 653-658.
- [7] OGILVY, J. A., Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic stainless steel, NDT International, Vol. 18(2), 1985, pp. 67-77.
- [8] "CIVA software platform for simulating NDT techniques (UT, EC, RT)". <http://www-civa.cea.fr> .
- [9] GENGEMBRE, N. et LHÉMERY, A., Pencil method in elastodynamics: application to ultrasonic field computation, Ultrasonics, Vol. 38, 2000, pp. 495-499.
- [10] GARDAHAUT, A., Développements d'outils de modélisation pour la propagation ultrasonore dans les soudures bimétalliques, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot – Paris 7, 2013.
- [11] "Plug-in OrientationJ". <http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/>.
- [12] THIERRY, P., OPERTO, S. et LAMBARÉ, G., Fast 2-D ray+Born migration/inversion in complex media, Geophysics, Vol. 64(1), 1999, pp. 162-181.
- [13] MORSE, P. et FESHBACH, H., Methods of theoretical physics, 1953.

- [14] ČERVENÝ, V., Seismic Ray Theory, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [15] CONNOLLY, G.D., Modelling of the propagation of ultrasound through austenitic steel welds, Thèse de doctorat, Imperial College, 2009.
- [16] MAHAUT, S., LEYMARIE, N., POIDEVIN, C., FOUQUET, T. et DUPOND, O., Study of complex ultrasonic NDT cases using hybrid method and experimental validations, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 53(12), 2011, pp. 664-667.
- [17] KEERS, H., DAHLEN, F.A. et NOLET, G., Chaotic ray behaviour in regional seismology, Geophysical Journal International, Vol. 131, 1997, pp. 361-380.
- [18] ŽÁČEK, K., Smoothing the Marmousi model, Pure and Applied Geophysics, Vol. 159, 2002, pp.1507-1526.
- [19] KLIMEŠ, L., The relation between Gaussian beams and Maslov asymptotic theory, Studia Geophysica et Geodaetica, Vol. 28, 1984, pp. 237-247.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaiteraient remercier l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sureté du Nucléaire) d'avoir fourni la maquette de la soudure bimétallique sur laquelle ces travaux de thèse ont été réalisés.