

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'OUTILS DE SIMULATION POUR LE CONTROLE ULTRASONORE DE SOUDURES AUSTENITIQUES

Souad BANNOUF¹, Déborah ELBAZ¹, Bertrand CHASSIGNOLE², Nicolas LEYMARIE³,
Patrick RECOLIN⁴

¹ EXTENDE, 15 Avenue Emile Baudot, Le Bergson, 91300 MASSY, France,
contact@extende.com, www.extende.com

² EDF R&D, Moret sur Loing, 77818, France

³ CEA, LIST, F-91191, Gif-sur-Yvette cedex, France

⁴ DCNS/CESMAN, La Montagne, 44620, France

RESUME

Afin de satisfaire les exigences réglementaires, les équipements nucléaires à composants soudés doivent être contrôlés dans tout leur volume. Ces contrôles peuvent être difficiles sur les soudures austénitiques à passes multiples du fait de leur structure hétérogène qui conduit à de nombreuses perturbations du faisceau ultrasonore. De ce fait, il est de grand intérêt de développer des codes de modélisation tenant compte des configurations 3D complexes pour améliorer la prédiction de la propagation ultrasonore et ainsi optimiser les inspections des soudures. Dans ce but, le projet MOSAICS soutenu par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche française) vise à développer plusieurs codes complémentaires : code éléments finis ATHENA, modèles semi-analytiques inclus dans le logiciel CIVA, modèle hybride combinant les deux approches. Les données d'entrée matériau pour la simulation sont obtenues à partir de différentes techniques de caractérisation et des mesures expérimentales sur maquettes représentatives avec défauts calibrés ont été effectuées pour valider les modèles mis au point. Le but de cet article est de donner un aperçu des premiers résultats obtenus par simulation et par l'expérience sur les différentes soudures considérées dans le projet MOSAICS.

INTRODUCTION

Le projet ANR MOSAICS (« MOdélisation d'une Soudure Austénitique Inspectée par Contrôle ultraSonore») du programme « Modèles Numériques » a démarré en octobre 2011 et se termine en janvier 2015. Il regroupe les six partenaires suivants : EDF – DCNS – CEA – EXTENDE – Université d'Aix-Marseille – INSA de Lyon. L'objectif de MOSAICS est de développer des codes de simulation numérique permettant de prédire les phénomènes de propagation ultrasonore dans les soudures austénitiques pour fiabiliser un diagnostic de contrôle non destructif. En effet, les études menées jusqu'à présent ont été restreintes à des configurations 2D et à un procédé de soudage spécifique (soudage à l'électrode enrobée). Or, les besoins industriels font émerger de nouvelles applications avec une complexité croissante en termes de géométrie et de matériau (procédés de soudage différents). L'étude de ces applications nécessite de s'orienter vers le développement et l'utilisation d'outils de modélisation prenant en compte des configurations complexes 3D et pouvant être exécutés sur différentes plateformes matérielles (clusters, multi-cœurs) afin de mener des études paramétriques intensives. Au final, l'objectif est de contribuer à la compréhension des phénomènes, ainsi qu'à l'optimisation de techniques de contrôle dans le but de donner des éléments déterminants pour les décisions relatives à l'intégrité des structures à risques.

Dans le cadre du projet, deux codes de simulation complémentaires sont développés pour traiter la problématique du contrôle ultrasonore des métaux polycristallins à structure à la fois anisotrope et hétérogène. D'une part, le code aux éléments finis ATHENA, développé par EDF R&D, permet d'étudier la propagation dans ces matériaux ainsi que l'interaction du faisceau avec des défauts de forme complexe [1]. D'autre part, le logiciel CIVA, développé par le CEA, propose des modules de calcul de champ et de calcul d'échos basés sur des formulations semi-analytiques [2].

La validation expérimentale des nouveaux codes de simulation ATHENA3D et du modèle Continuum Variable de CIVA [3]-[5], pour ces cas complexes est un objectif fort de MOSAICS. Ce papier présente deux cas de validation où sont comparés résultats de simulation et expérimentaux.

LE MODELE CONTINUM VARIABLE DE CIVA

Le modèle semi-analytique basé sur la théorie des rayons dans CIVA peut être employé pour la simulation d'inspection de soudures. La soudure est décrite en plusieurs domaines anisotropes homogènes ayant une certaine orientation cristallographique. Les rayons se propagent de manière rectiligne dans ces derniers. A chaque interface, un calcul des coefficients de réflexion et de réfraction est effectué avant de calculer la propagation dans les domaines voisins. Les résultats sont valides tant que la dimension des domaines est supérieure à la longueur d'onde dans le milieu et que les variations d'impédance entre deux zones adjacentes restent faibles.

Si ces conditions ne sont pas satisfaites, un modèle de rayons selon une description continûment variable de la soudure doit être utilisé. De tels modèles ont été initialement développés en élastodynamique pour la géophysique [6]. L'application de ces modèles au CND US de soudures se base sur un tracé de rayon cinématique utilisant une description lissée de l'orientation des grains dans la soudure. Un modèle de la sorte est en cours d'intégration dans le logiciel CIVA dans le but d'améliorer la simulation d'inspection de soudure.

Le modèle continuum variable

Le modèle de tracé de rayon dynamique dans un milieu anisotrope et inhomogène a été décrit par Cerveny [6]. L'utilisation des équations de transport et des équations Eikoniales permet d'obtenir un système d'équations différentielles [6] :

$$\begin{aligned}\frac{dx_i}{dT} &= \frac{c_{ijkl}}{\rho} S_l P_j P_k = V_e^i \\ \frac{dS_i}{dT} &= -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial c_{ijkln}}{\partial x_i} S_k S_n P_j P_l\end{aligned}$$

T est le temps de parcours, c_{ijkl} sont les constantes élastiques à la position x_i , ρ la densité, S_i sont les composantes du vecteur lenteur, P_j les composantes du vecteur polarisation et V_e représente la vitesse d'énergie. Ces deux équations sont couplées. La première exprime la variation de la position courante du rayon par rapport au temps de parcours. Elle dépend explicitement de la lenteur. La seconde équation exprime la variation de la lenteur courante sur le temps de parcours qui dépend aussi de la position x_i .

Ce système peut être résolu pour des ondes transverses ou de compression en fixant les conditions initiales pour le mode considéré. Ce type de système différentiel peut être résolu par des méthodes numériques standards telles que la méthode d'Euler ou la méthode de Runge-Kutta et permet d'obtenir des trajectoires courbes de rayons dans des milieux aux propriétés continûment variables.

Pour résoudre ce système, il est nécessaire de connaître les valeurs des constantes élastiques et de leurs dérivées pour toutes les positions dans la soudure. Ces dernières peuvent être obtenues numériquement si la soudure est décrite comme une cartographie d'orientations cristallines.

Génération de cartographies d'orientations de grains

Les valeurs d'orientation en chacun des points de la soudure à contrôler sont des données d'entrée nécessaires au modèle continûment variable de CIVA. Ceci est réalisé à l'aide d'un *plug-in*, nommé OrientationJ, du logiciel ImageJ développé par le Laboratoire d'Imagerie Biomédicale de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne [7]. Ce *plug-in* est basé sur l'évaluation du tenseur de structure et détermine l'orientation de chaque pixel de l'image. L'image d'orientation obtenue est représentée sur l'intervalle $[-90^\circ, 90^\circ]$. Comme elle n'est pas suffisamment lissée pour être compatible avec un modèle rayons, il est nécessaire d'appliquer un filtre de lissage dont la largeur est liée à la longueur d'onde λ . Le filtre en question consiste en la convolution de l'image avec une fonction gaussienne exprimée comme :

$$g(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

où la déviation standard σ correspond à la dimension de la fenêtre d'application du filtre. Cette opération de lissage s'effectue dans CIVA à l'aide d'une variable dans laquelle la valeur de σ est paramétrable. Ces cartographies lissées de l'orientation peuvent alors être utilisées comme données d'entrée des modèles analytiques. De plus, dans le but de réduire le temps de chargement de la cartographie lissée d'orientation, une décimation spatiale de la cartographie peut être réalisée.

LE CODE ATHENA

Ce code aux éléments finis est basé sur la résolution des équations de l'élastodynamique exprimées en termes de contraintes et vitesses des déplacements. Associé à une Interface Homme Machine (IHM) spécifique, il permet de modéliser l'ensemble de la chaîne du contrôle ultrasonore (pièce, capteur, défaut). La particularité du code réside sur la discrétisation de la zone de calcul en un maillage cartésien régulier 3D (voxels) alors que le défaut est décrit par un maillage séparé à partir de la méthode des domaines fictifs. Cela permet de combiner la rapidité du calcul avec un maillage régulier à la possibilité de modéliser des défauts de morphologie complexe. Par ailleurs, l'utilisation de frontières absorbantes (PML = Perfectly Matched Layers) pour la zone de calcul permet de réduire la taille de cette zone. La dernière étape de réduction du temps de calcul repose sur la parallélisation d'ATHENA3D et son adaptation à des calculateurs hautes performances (clusters). Il est par ailleurs à noter que, contrairement à la version 2D, la version 3D actuelle n'intègre pas de modèle d'atténuation traduisant le phénomène de diffusion aux joints de grain.

Différentes actions ont été menées pour valider la version 2D du code notamment pour traiter la problématique du contrôle des soudures [8], [9]. L'un des objectifs de MOSAICS est donc de valider et d'exploiter la version 3D du code [10],[11].

VALIDATION EXPERIMENTALE SUR UNE SOUDURE AVEC CHANFREIN EN V

Description de la soudure

Le premier cas d'application concerne une soudure en acier inoxydable austénitique de nuance 316L soudée à l'électrode enrobée et en position verticale montante (application

EDF). Cette soudure, d'épaisseur 37 mm et avec un chanfrein en V (largeur basse égale à 8,8 mm et largeur haute à environ 35 mm) a été réalisée avec 8 couches et une vingtaine de passes. Des macrographies dans le plan (VT) perpendiculaire à la direction de soudage S et dans un plan parallèle à S sont représentées sur la Figure 1. La macrographie selon S révèle notamment une désorientation moyenne des grains colonnaires de 18° dans le sens de soudage (axe V' sur la figure). Du fait de cette désorientation, le plan d'incidence du contrôle ultrasonore n'est pas un plan de symétrie du matériau anisotrope. Des déviations du faisceau hors du plan d'incidence peuvent potentiellement se produire, l'hypothèse 2D n'est alors plus valide en simulation.

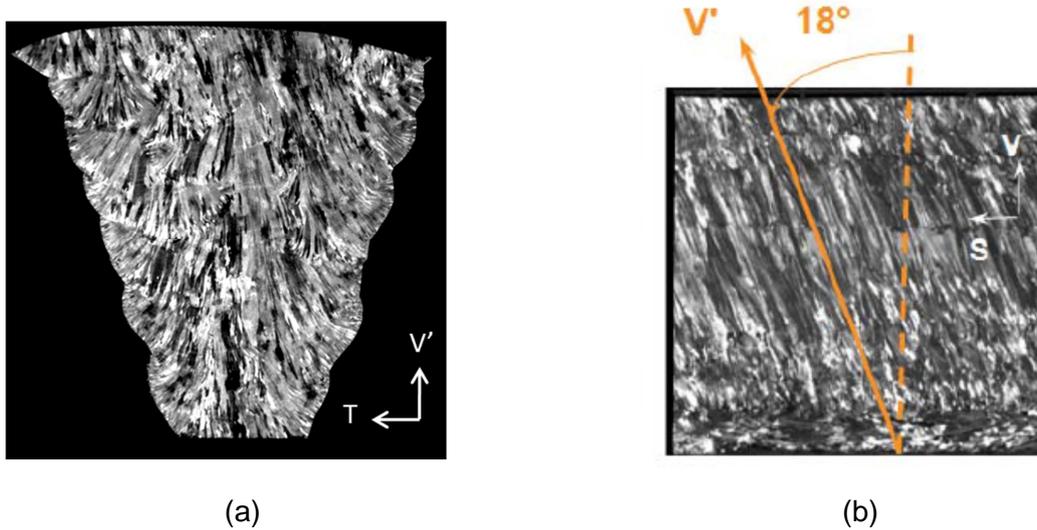


Figure 1 : Soudure en acier 316L et en position verticale montante- (a) macrographie dans le plan (V'T) – (b) macrographie dans le plan (VS)

La zone soudée en V est caractérisée par les propriétés d'élasticité suivantes, avec comme hypothèse une symétrie élastique isotrope transverse :

$$\rho = 7.85 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ et } C_{ij} = \begin{pmatrix} 247 & 110 & 148 & 0 & 0 & 0 \\ 110 & 247 & 148 & 0 & 0 & 0 \\ 148 & 148 & 218 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 105 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 105 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 80 \end{pmatrix}$$

L'atténuation dans la soudure pour une fréquence de 2,25 MHz est définie par les coefficients suivants en fonction de l'angle entre la direction de propagation et le grand axe des grains colonnaires [12] :

| Angle (°) | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Atténuation (dB/mm) | 0,037 | 0,036 | 0,048 | 0,075 | 0,115 | 0,168 | 0,235 |

Tableau 1 : valeurs d'atténuation dans la soudure

Une analyse métallographique a été réalisée afin d'obtenir une cartographie d'orientation des grains dans une grille constituée de carrés de 2 mm de côté à entrer dans ATHENA3D. L'analyse a été menée dans le plan (V'T) et a consisté en l'application sur la macrographie d'une transformée de Hough (méthode de reconnaissance de forme et en particulier de droite) et en la mesure des orientations des grains colonnaires.

La cartographie de la soudure qui a servi de donnée d'entrée dans CIVA Continuum Variable a été obtenue par le procédé de traitement d'image sur ImageJ décrit précédemment. Elle est représentée sur la Figure 2(a) où l'on a fait apparaître les directions dendritiques locales. La Figure 2(b) correspond à la même cartographie après l'opération de lissage et de décimation appliquée par CIVA.

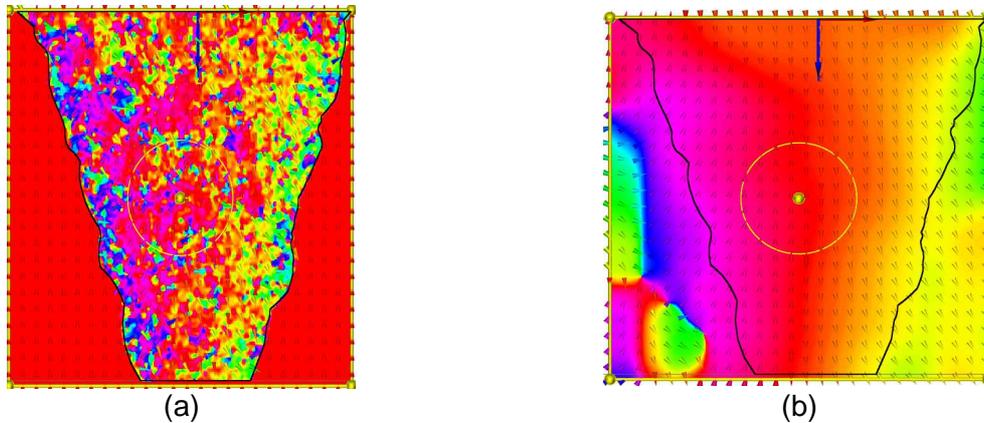


Figure 2 : Cartographie de la soudure en V

Description de la pièce

La validation des codes de simulation CIVA continûment variable et ATHENA3D sur la soudure en V a été effectuée sur des défauts étalons usinés dans une pièce plane d'épaisseur 37 mm (cf. Figure 3). Ces défauts sont au nombre de 5 :

- 2 trous génératrices (TG) de diamètre 1,5 mm situés de part et d'autre de la soudure à 25mm de profondeur
- 3 entailles débouchantes en fond de pièce et de hauteur 10 mm. Une entaille se situe au centre de la soudure, tandis que les deux autres se situent chacune à 25 mm de part et d'autre.

Le matériau des domaines entourant la soudure est isotrope homogène. La vitesse des ondes longitudinales est de 5740 m/s, les ondes transversales se propagent à une vitesse de 3080 m/s.

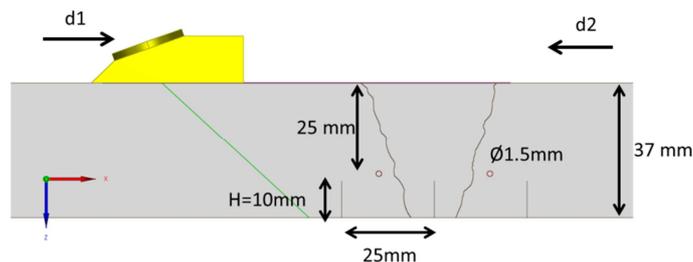


Figure 3 : Pièce avec soudure en V

Le contrôle est réalisé à l'aide d'un capteur monoélément à ondes longitudinales à 45 ° (OL45°) de pastille circulaire Ø20 mm et de fréquence 2,25 MHz.

La soudure est inspectée selon deux sens opposés, le sens d1 (de gauche à droite) et le sens d2 (de droite à gauche). La référence en amplitude, quel que soit le sens d'inspection, correspond à l'amplitude du même défaut détecté dans le matériau de base isotrope.

Résultats de validation

Concernant le modèle continûment variable dans CIVA, les paramètres de filtrage « σ » et de décimation pour la soudure étudiée ont pour valeur : $\sigma = 3$ mm et décimation = 2 mm. Ces deux valeurs ont été choisies telles que l'amplitude simulée d'un trou génératrice (TG) dans un cas de référence soit au plus près du résultat expérimental. De manière générale, la valeur de σ est choisie proche de la longueur d'onde. Une fois déterminées, ces variables d'environnement sont conservées pour le reste des calculs, notamment sur les entailles.

Seules sont analysées dans cette étude les amplitudes des échos réfléchis par les différents défauts. La Figure 4 présente les Bscans obtenus en sens d1 lors de l'inspection des TG de la pièce.

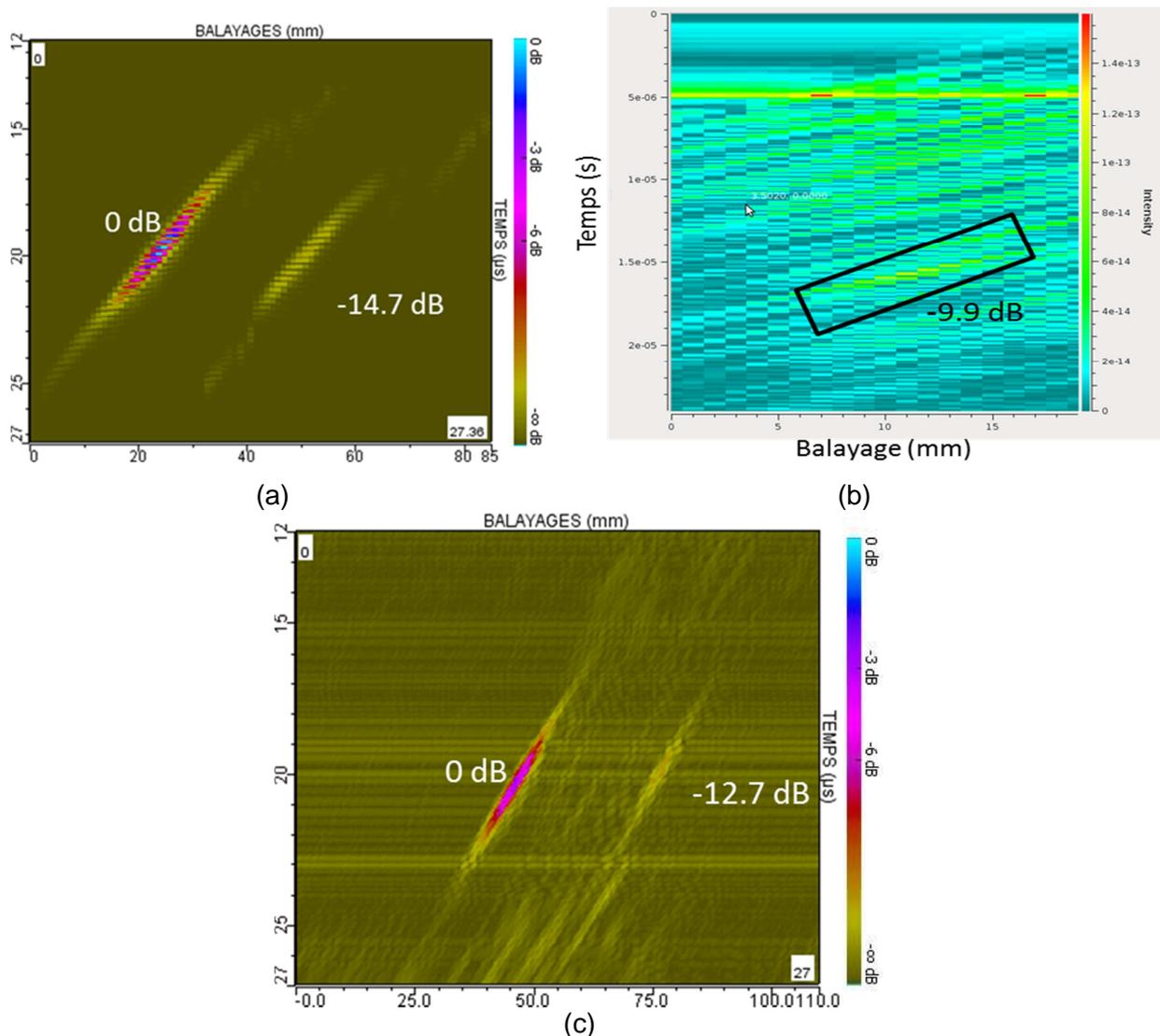


Figure 4 : Bscan reconstruit issu de l'inspection des TG dans le sens d1 (a) Bscan simulé avec CIVA continûment variable, (b) Bscan simulé avec ATHENA 3D, (c) Bscan expérimental

La Figure 5 montre les résultats de simulation, en sens d1, sur les entailles de la pièce.

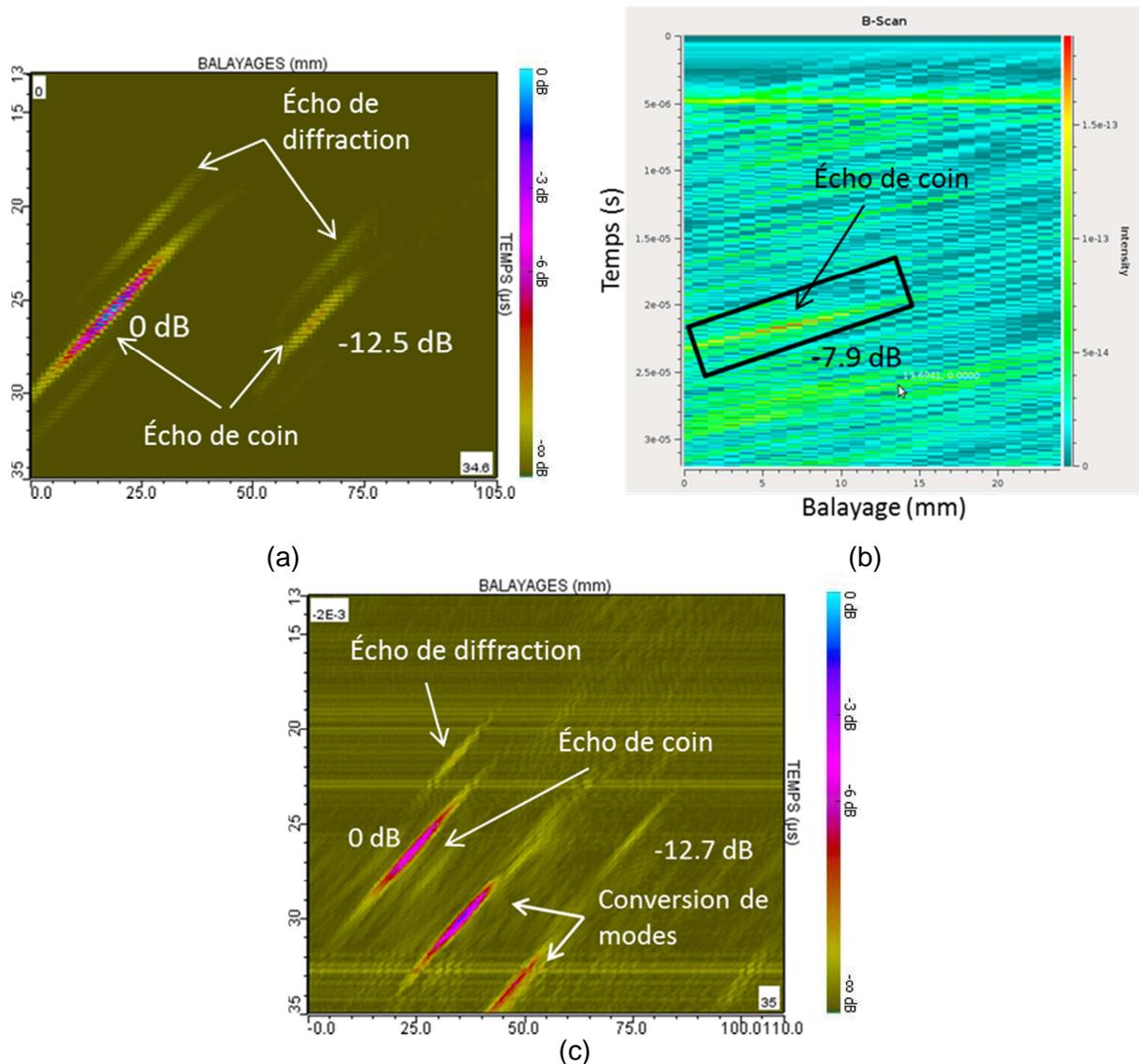


Figure 5 : Bscan reconstruit issu de l'inspection des entailles dans le sens d1. (a) Bscan simulé avec CIVA continûment variable, (b) Bscan simulé avec ATHENA 3D, (c) Bscan expérimental

Les amplitudes des TG détectés après traversée de la soudure sont reprises dans le Tableau 2 tandis que celles des entailles sont indiquées dans le Tableau 3.

| | Expérience (dB) | Civa (dB) | ATHENA 3D (dB) |
|---------|-----------------|-----------|----------------|
| Sens d1 | -12.7 ± 0.6 | -14.7 | -9.9 |
| Sens d2 | -9.3 ± 0.7 | -10.1 | -3.8 |

Tableau 2 : Amplitude du TG détecté après traversée de la soudure

| | Expérience (dB) | Civa (dB) | ATHENA 3D (dB) |
|---------|-----------------|-----------|----------------|
| Sens d1 | -12.7 ± 0.6 | -12.5 | -7.9 |
| Sens d2 | -10.6 ± 0.9 | -7.8 | -5.9 |

Tableau 3 : Amplitude de l'écho de coin des entailles après traversé de la soudure en V

Les deux codes utilisés reproduisent les effets d'atténuation dans la soudure liés aux phénomènes de division et de diffusion des ondes générés par la structure à gros grains anisotrope et hétérogène.

Les résultats CIVA sont proches des valeurs expérimentales, ce qui semble valider le modèle continûment variable couplé à la prise en compte des coefficients d'atténuation.

En ce qui concerne ATHENA, même si l'atténuation est bien mise en évidence, sa valeur est sous-estimée. La principale explication vient de l'absence de modèle d'atténuation lié à la diffusion aux joints de grain dans la version 3D. La diffusion, qui se traduit par du bruit de structure sur les Bscans, est uniquement générée aux interfaces entre domaines anisotropes homogènes constituant la grille de description de la soudure. Ce travail d'implémentation d'un modèle d'atténuation est en cours, basé sur les travaux de caractérisation menés à l'INSA de Lyon [13]. Les calculs seront donc repris pour la fin du projet.

VALIDATION EXPERIMENTALE SUR UN PIQUAGE DES SSP (SOUPAPE SURETE PRIMAIRE)

Description de la soudure

Le deuxième cas de validation correspond à la soudure d'implantation du bossage de soupape primaire sur le dôme du pressuriseur (application DCNS). Cette soudure orbitale en acier austénitique de type 26Bis (équivalent 316L) est réalisée en position corniche après une passe de fusion en TIG et avec environ 13 passes à l'électrode enrobée.

Les résultats de l'analyse macrographique pour cette soudure sont représentés sur la Figure 6. Contrairement à la soudure précédente, la soudure SSP n'est pas symétrique. Globalement, on remarque une inclinaison des grains vers la droite causée par la position de soudure en corniche. Cependant, différentes zones ayant des tendances prononcées au niveau des orientations de grain sont identifiables. Seule la racine de la soudure (encadrée en rouge sur la Figure 6) ne montre pas d'organisation dendritique particulière.

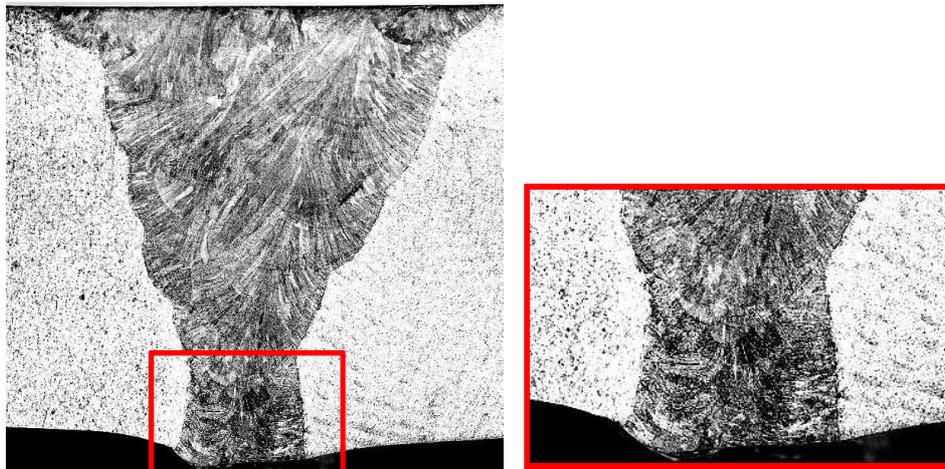


Figure 6 : Soudure d'implantation du bossage de soupape primaire

La zone soudée est caractérisée par les propriétés d'élasticité suivantes :

$$\rho = 7.85 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3} \text{ et } C_{ij} = \begin{pmatrix} 250 & 112 & 180 & 0 & 0 & 0 \\ 112 & 250 & 138 & 0 & 0 & 0 \\ 180 & 138 & 250 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 117 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 91 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 \end{pmatrix}$$

L'atténuation dans la soudure n'a pas été prise en compte.

Comme dans le cas de la soudure en V d'EDF, la cartographie de la soudure SSP a été obtenue par traitement de sa macrographie dans ImageJ. Elle est représentée sur la Figure 7(a). La Figure 7(b) correspond à la même cartographie après l'opération de lissage et de décimation effectuées dans CIVA.

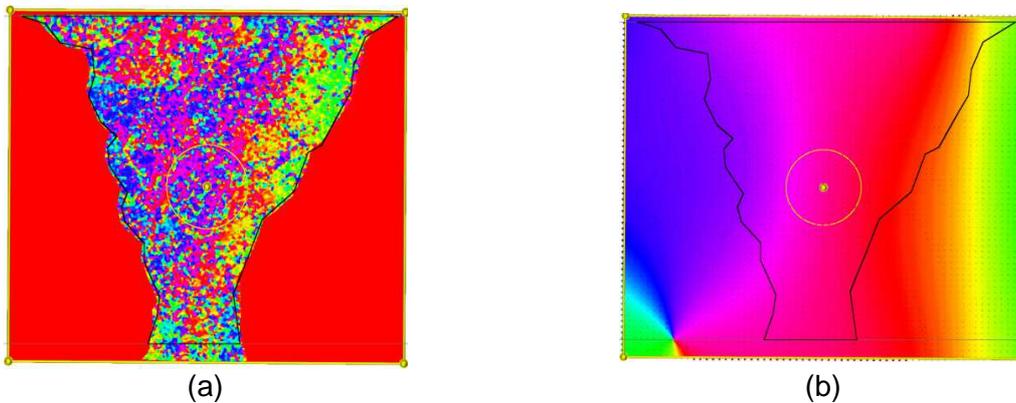


Figure 7 : Cartographie de la soudure SSP

Validation du code de simulation sur la soudure SSP

La validation du code de simulation CIVA continuum variable sur la soudure SSP a été effectuée sur des défauts étalons usinés dans une pièce cylindrique d'épaisseur 17.5mm. Le matériau des domaines entourant la soudure est isotrope homogène. La vitesse des ondes longitudinales est de 5660 m/s, les ondes transversales se propagent à une vitesse de 3120 m/s.

La pièce comporte 5 défauts représentés sur la Figure 8 :

- 3 TG de diamètre 2 mm situés :
 - Dans la soudure à 5 mm de profondeur
 - Hors soudure à 15 mm de profondeur
 - Sur le chanfrein de la soudure, à cheval entre la partie isotrope et anisotrope, à 10mm de profondeur
- 2 entailles débouchantes en fond de pièce de hauteur 5 mm situées à droite et à gauche de la racine de la soudure, près du chanfrein.

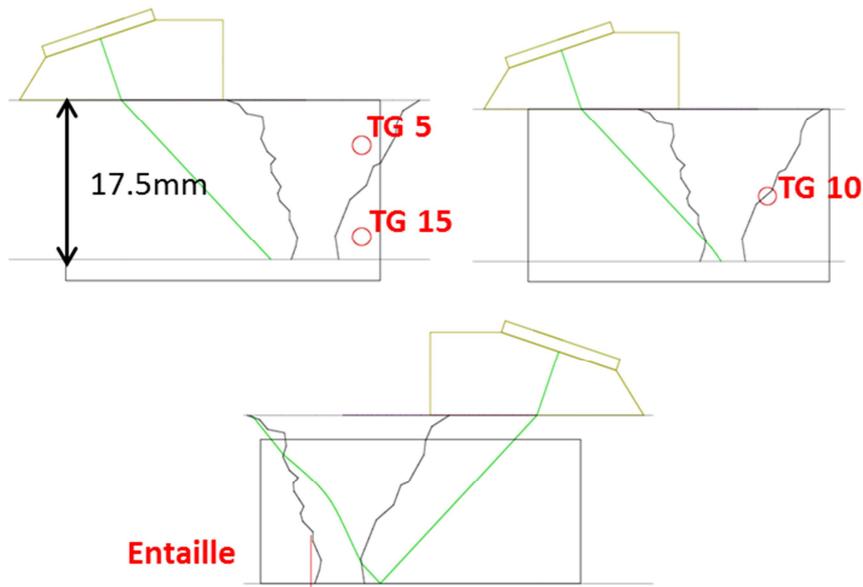


Figure 8 : Emplacement des défauts dans la maquette DCNS.

Le contrôle est réalisé avec un capteur monoélément OL45° de pastille circulaire Ø12,5 mm et de fréquence 2 MHz.

La validation du modèle continu à variable a été réalisée sur les TG situés à 10 et 15 mm de profondeur, ainsi que sur les deux entailles. Le TG situé à 5mm de profondeur n'a pas été étudié car expérimentalement son écho se superpose à l'écho de sabot qui s'étend jusqu'à 4mm sous la surface de la pièce.

L'amplitude maximale du TG situé à 15 mm de profondeur détecté hors soudure est choisie comme référence pour l'ensemble des résultats sur la soudure SSP.

Résultats de validation du code de simulation sur la soudure SSP

Les paramètres « σ » et « décimation » utilisés pour les simulations sur la soudure SSP sont : $\sigma = 2$ mm et décimation = 5 mm. Ces deux valeurs ont été choisies telles que l'amplitude simulée sur le TG de référence situé à 15 mm de profondeur soit au plus près de la mesure expérimentale. Ces valeurs de variables d'environnement sont conservées pour le reste des calculs sur la soudure SSP.

Le Tableau 4 donne l'amplitude maximale sur l'écho du TG de référence situé à 15mm de profondeur après traversée de la soudure. Les Bscans sur lesquels ont été extraites ces valeurs sont sur la Figure 9.

| | Expérience (dB) | Civa (dB) |
|-------------------------------|-----------------|-----------|
| Après traversée de la soudure | -8,2 | -10,2 |

Tableau 4 : Amplitudes du TG15 mesurées après traversée de la soudure

On mesure 2dB d'écart entre la simulation et l'expérience sur le TG de référence. Cette différence reste dans le domaine de validité des résultats de simulation.

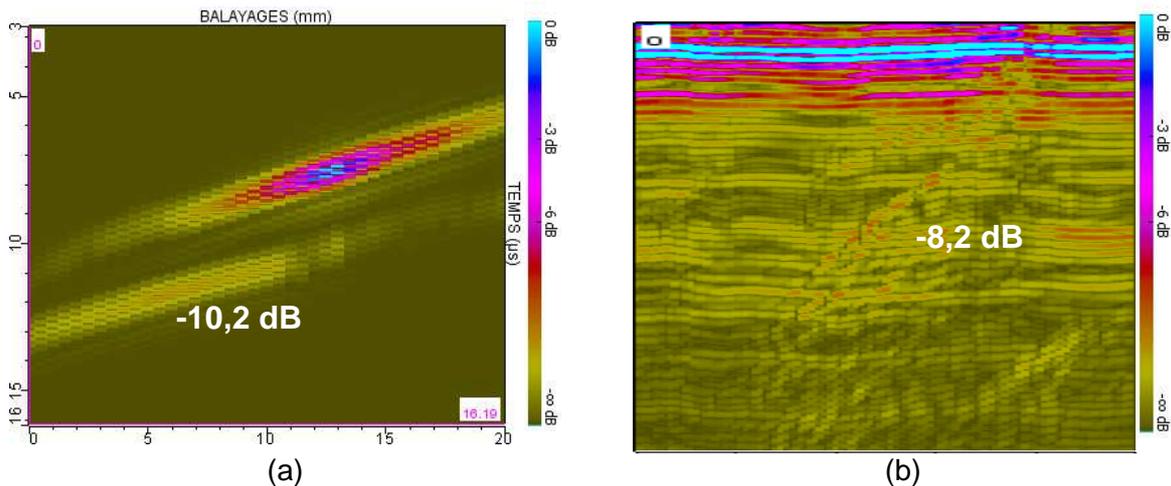


Figure 9 : Bscan issu de l'inspection du TG15 (a) Bscan simulé avec CIVA continûment variable après soudure, (b) Bscan expérimental après soudure

Le Tableau 5 reprend les résultats obtenus pour le TG à 10 mm de profondeur situé sur le chanfrein de la soudure à cheval entre la partie isotrope et anisotrope de la pièce. Les mesures effectuées sur l'entaille gauche après traversée de la soudure figurent sur le Tableau 6.

| | Expérience (dB) | Civa (dB) |
|-------------------------------|-----------------|-----------|
| Après traversée de la soudure | -2,8 | -0,6 |

Tableau 5 : Amplitude du TG10 mesurée avant et après traversée de la soudure

| | Expérience (dB) | Civa (dB) |
|---|-----------------|-----------|
| Entaille gauche après traversée de la soudure | -2,1 | -12,6 |

Tableau 6 : Amplitude de l'écho de coin de l'entaille mesurée après traversée de la soudure

Les valeurs d'amplitudes des 2 tableaux ci-dessus ont été obtenues respectivement sur les Bscans des Figure 10 et Figure 11.

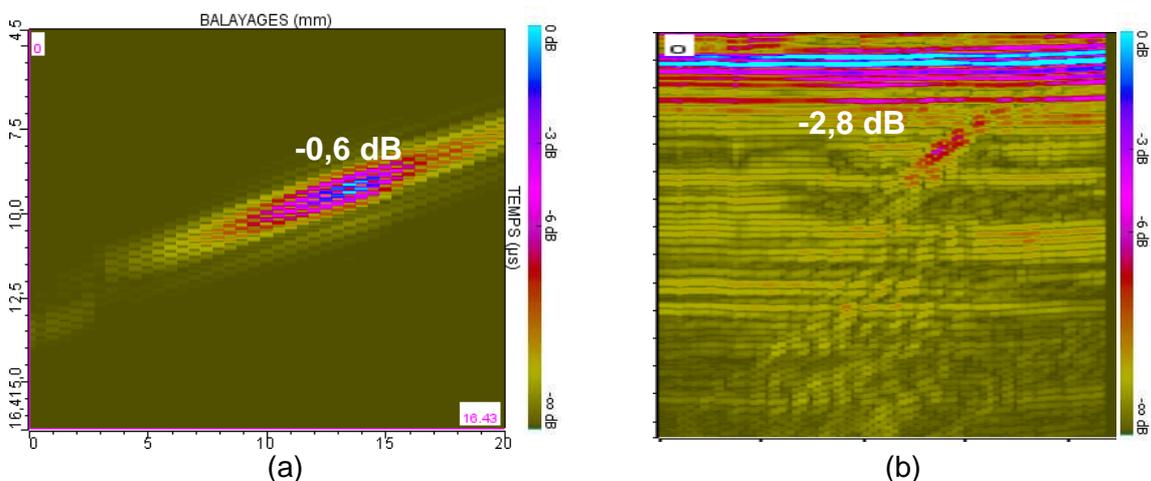


Figure 10 : Bscans reconstruits issu de l'inspection du TG10 (a) Bscan simulé avec CIVA continûment variable après soudure, (b) Bscan expérimental après soudure

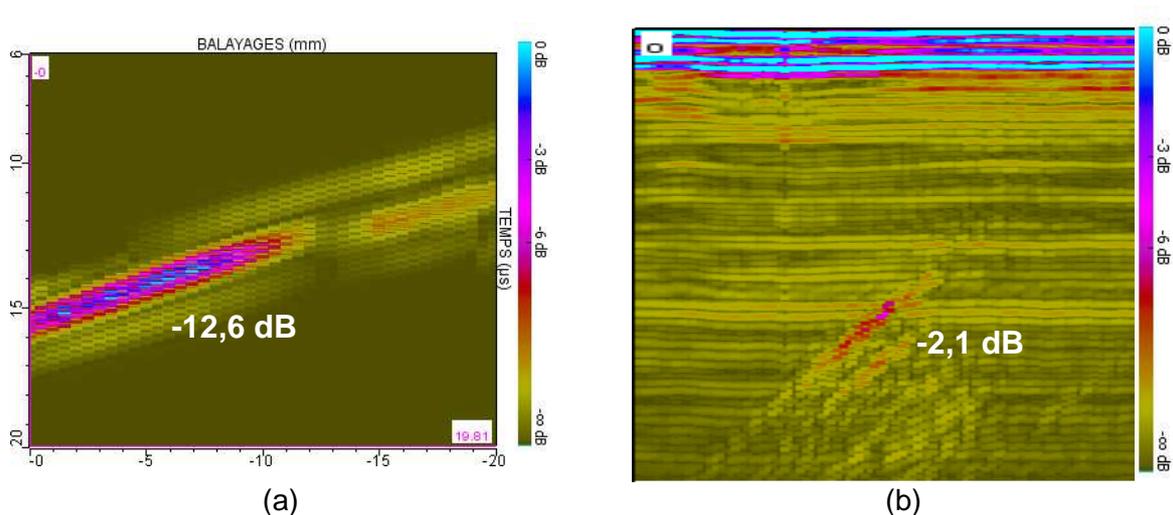


Figure 11 : Bscans reconstruits issus de l'inspection des entailles après traversée de la soudure - (a) Bscan de l'entaille gauche simulé avec CIVA continuum variable, (b) Bscan expérimental de l'entaille gauche

Les résultats sur la soudure SSP de DCNS montrent que le modèle continuum variable donne des résultats proches de l'expérimental (2dB de différence) pour les défauts de type trou génératrice. En revanche, l'écart est beaucoup plus important sur l'entaille pour laquelle on mesure une différence atteignant 10,5dB. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le faisceau, pour arriver au niveau de l'entaille, passe par la racine de la soudure. Or, il s'agit d'une partie fortement hétérogène de la soudure, avec une anisotropie mal maîtrisée. En effet, l'orientation dendritique à la racine de la soudure est nettement moins ordonnée que dans le reste de la soudure (cf. Figure 6). De ce fait, il est fort probable que les orientations fournies par Image J ne soient pas correctes faussant ainsi la simulation.

CONCLUSION

L'objectif de MOSAICS est de développer des codes de simulation numérique permettant de prédire les phénomènes de propagation ultrasonore dans les soudures austénitiques pour fiabiliser un diagnostic de contrôle non destructif. Cet article donne un aperçu des premiers résultats de validation du code ATHENA 3D et du module continuum variable de CIVA. Deux soudures ont été étudiées, une soudure EDF et un cas d'application DCNS.

Pour la soudure en V d'EDF, le code CIVA Continuum Variable fournit des résultats de simulation en bon accord avec l'expérience. Avec le code éléments finis ATHENA 3D, les amplitudes simulées sont sous-estimées. Les écarts de l'ordre de 6 dB s'expliquent par l'absence de modèle d'atténuation lié à la diffusion aux joints de grain dans la version 3D.

En ce qui concerne le cas d'application DCNS, le code CIVA Continuum Variable donne des résultats corrects lorsque le défaut est détecté sans que le faisceau ne passe au niveau des premières passes en racine de soudure. Ce n'est pas le cas de l'entaille débouchant en fond de pièce. Les orientations dendritiques en racine de soudure inscrites dans la cartographie peuvent être erronées conduisant alors à des erreurs de prédiction.

Ces résultats préliminaires doivent être consolidés par des études complémentaires impliquant d'autres types de soudures (soudure de piquage avec chanfrein en K, soudure LCP (Liaison Cuve Pressuriseur)) et d'autres modes de propagation (L60°). Par ailleurs, l'impact des données d'entrée de la simulation devra être quantifié. Par exemple, les variations des résultats seront étudiées en fonction de la taille des domaines pour la description utilisée dans ATHENA ou en fonction des paramètres de la fonction de lissage pour CIVA. D'autre part, les sources d'incertitudes existant sur les constantes d'élasticité, les coefficients d'atténuation ou encore les angles de réfraction réels conduisent à mener des

analyses en sensibilité sur l'impact des paramètres influents de la simulation dans le cadre de MOSAICS [14][15]

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MOSAICS (MOdélisation d'une Soudure Austénitique Inspectée par Contrôle ultraSonore) soutenu par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche française).

REFERENCES

- [1]. E. Becache et *al.*, An analysis of new mixed finite elements for the approximation of wave propagation problems, *SIAM J Numer Anal* 37 (2000) 1053-84.
- [2]. P. Calmon et *al.*, CIVA : an expertise platform for simulation and processing NDT data, *Ultrasonics* 44 (2006) 975-979.
- [3]. N. Leymarie et *al.*, 'Modeling of weld inspection by using a paraxial ray-tracing approach in a variable anisotropy medium', congrès BINDT, juillet 2013.
- [4]. K. Jezzine et *al.*, 'Evaluation of ray-based methods for the simulation of UT welds inspection', 39th Review of Progress in QNDE', Vol 32B, pp 1073-1080, 2013.
- [5]. A. Gardahaut, Développements d'outils de modélisation pour la propagation ultrasonore dans les soudures bimétalliques, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot – Paris 7, 2013.
- [6]. V. Cerveny, *Seismic Ray Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [7]. ImageJ : Image Processing and Analysis in Java, <http://rsbweb.nih.gov/ij/>
- [8]. B. Chassignole et *al.*, 'Modelling the attenuation in the ATHENA finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds', *Ultrasonics*, vol. 49, pp. 653-658, 2009.
- [9]. B. Chassignole et *al.*, Influence de la structure sur le contrôle ultrasonore d'une soudure de piquage sur tuyauterie primaire de centrale nucléaire, congrès COFREND, 2008, Toulouse.
- [10]. C. Rose et *al.*, 'ATHENA 3D : A finite element code for ultrasonic wave propagation, 12th Anglo-French Physical Acoustics Conference (AFPAC2013) IOP Publishing, *Journal of Physics: Conference Series* 498 (2014) 012009
- [11]. B. Chassignole et *al.*, 3D modelling of ultrasonic testing in austenitic welds , congrès BINDT, juillet 2013.
- [12]. M.-A. Ploix, Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2006.
- [13]. N. Alaoui-Ismaili, P. Guy, B. Chassignole, Experimental determination of the complex stiffness tensor and Euler angles in anisotropic media using ultrasonic waves, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2014: pp. 934–940.
- [14]. F. Rupin et *al.*, Probabilistic approaches to compute uncertainty intervals and sensitivity factors of ultrasonic simulations of a weld inspection, *Ultrasonics*, vol. 54, Issue 4, pp. 1037-1046
- [15]. P-E Lhuillier et *al.*, Analyse des incertitudes de simulation du contrôle ultrasonore d'une soudure en acier inoxydable austénitique, Congrès COFREND, Bordeaux, 2014