

INVERSION DE DONNÉES ULTRASONORES POUR LA CARACTÉRISATION DE SOUDURES HÉTÉROGÈNES *ULTRASONIC DATA INVERSION FOR CHARACTERIZATION OF HETEROGENEOUS WELDS*

C. GUEUDRE¹, L. Le MARREC², J. MOYSAN¹, B. CHASSIGNOLE³

¹ LCND, Laboratoire de Caractérisation Non Destructive
Université de la Méditerranée, IUT Aix-en-Provence
cecile.gueudre@univmed.fr, joseph.moysan@univmed.fr
Tél : 04 42 93 90 34 Fax : 04 42 93 90 84

² IRMAR, Institut de Recherche Mathématique de Rennes
UMR 6625 du CNRS, Campus de Beaulieu, Rennes
loic.lemarrec@univ-rennes1.fr

³ EDF R&D, Les Renardières, Département MMC
Avenue des Renardières, Moret sur Loing
bertrand.chassignole@edf.fr

Résumé

De nombreuses soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique sont présentes sur les circuits primaires des centrales nucléaires. Le caractère anisotrope hétérogène de ces soudures entraîne de fortes perturbations de la propagation ultrasonore. La simulation est un outil très utile pour la compréhension des phénomènes physiques et pour aider à l'interprétation des inspections. Dans cet objectif, un code aux éléments finis, ATHENA, a été développé par EDF et l'INRIA. Une modélisation suffisamment réaliste du matériau est proposé par le modèle MINA, mis au point par le LCND, qui détermine l'orientation des grains de la soudure. Une optimisation par inversion du modèle MINA est proposée dans cette étude. Les résultats obtenus valident la stratégie et ouvrent des perspectives en vue d'une utilisation sur des données réelles.

Abstract

Numerous multipass welds in austenitic stainless steel are made on the primary circuits of nuclear power stations. The heterogeneous anisotropic nature of these welds causes disturbance to ultrasonic propagation. Simulation is a useful tool when attempting to understand physical phenomena. With this objective, a finite element code called ATHENA was developed by EDF and INRIA. Sufficiently realistic modelling of the material is proposed by the MINA model, developed by the LCND, which determines the orientation of the weld grains. Optimisation by inversion of the MINA model is proposed in this study. The results validate the strategy and open perspectives regarding use on real data.

INTRODUCTION

Les circuits primaires des centrales nucléaires possèdent de nombreuses soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique. Le contrôle non destructif par ultrasons de telles soudures est complexe du fait du caractère anisotrope (élongation des grains parallèlement aux lignes de dissipation de la chaleur et selon une direction cristallographique privilégiée) et hétérogène (évolution de l'orientation des grains dans le volume soudé) de ces structures

(figure 1). Cela conduit à des phénomènes de déviation et de division du faisceau ultrasonore.

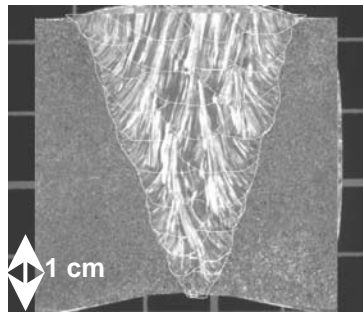


Figure 1: Macrographie d'une coupe transversale d'une soudure multi-passes en acier inoxydable austénitique réalisée par procédé manuel à l'électrode enrobée.

Pour améliorer la compréhension des phénomènes de propagation, l'utilisation d'un code de simulation de la propagation ultrasonore est préconisée : le code aux éléments finis ATHENA, développé par EDF et l'INRIA, a été choisi. La simulation nécessite de disposer, comme donnée d'entrée, d'une description suffisamment réaliste de la soudure. Une modélisation du matériau a été proposée par le modèle MINA (Modeling anisotropy from Notebook of Arc welding) développé au LCND [1]. Ce couplage de deux modèles pour simuler le contrôle ultrasonore dans des soudures multi-passes a été validé par des confrontations avec des mesures expérimentales [2].

Le modèle MINA est un modèle robuste qui est pour l'instant appliqué au procédé de soudage à l'électrode enrobée en position à plat. Il permet une bonne prédiction de l'orientation des grains à partir des informations notées dans le cahier de soudage, de paramètres spécifiques au procédé de soudage et de règles issues de la croissance cristalline.

Afin d'obtenir une modélisation la plus fidèle possible à la réalité et afin de démontrer la capacité du modèle à être inversé, on envisage une optimisation des paramètres de MINA. Cette optimisation porte notamment sur les paramètres de solidification des passes qui, actuellement, correspondent à des valeurs moyennes obtenues suite à des analyses macrographiques de soudures.

Le but de l'inversion est donc d'affiner la description de la soudure étudiée, par comparaison de données expérimentales issues du contrôle ultrasonore d'une soudure et de données simulées correspondantes. Elle permettra ainsi d'appliquer le modèle MINA dans des configurations où les paramètres du modèle sont mal connus (absence de cahier de soudage, changement de procédure ou d'opérateur, ...).

MODELE DIRECT

Le modèle MINA

Le modèle MINA crée macroscopiquement l'orientation moyenne des grains d'une soudure dans des domaines carrés dont le côté a été fixé à 2 mm pour cette étude.

La structure globale de la soudure est obtenue en décrivant itérativement (couche par couche et passe par passe) la croissance des grains d'austénite. Ce modèle utilise trois sources d'informations distinctes [1] : le cahier de soudage (géométrie du chanfrein, nombre de couches déposées, nombre de passes par couche, ...), des paramètres issus de l'étude

des mécanismes de solidification [3] et des paramètres phénoménologiques qui influencent la direction de croissance des grains.

Ces derniers correspondent à des paramètres d'inclinaison (θ_B , θ_C) et de refusion (R_L , R_V) de passes.

Lorsque le soudeur dépose une passe, il incline naturellement l'électrode lorsque cette passe se situe contre le bord d'un chanfrein ou contre une passe latérale précédemment solidifiée. Il en résulte une inclinaison de l'axe de symétrie de la passe. Deux paramètres ont été définis (figure 2) :

- θ_B est l'angle d'inclinaison de l'axe de symétrie d'une passe par rapport à la verticale, lorsque la passe repose contre un bord de chanfrein,
- θ_C est l'angle d'inclinaison de l'axe de symétrie d'une passe par rapport à la verticale, lorsque la passe s'appuie sur une autre passe.

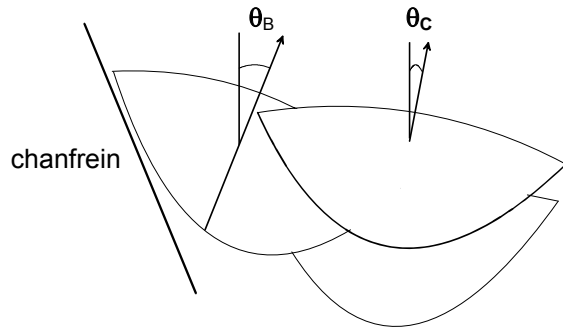


Figure 2 : Passes inclinées. Définition des paramètres θ_B et θ_C .

Lorsqu'une nouvelle passe en fusion est déposée, elle crée une refusion partielle des passes précédentes contre lesquelles elle a été déposée. D'où une modification des orientations des grains dans cette zone selon le gradient de température de la nouvelle passe. Deux paramètres ont été définis (figure 3):

- le taux de refusion latérale, R_L , est le rapport entre la largeur refondue avec la passe suivante et la largeur totale de la passe déposée juste à côté :

$$R_L = \frac{\ell}{L_k} \quad (1)$$

- le taux de refusion verticale, R_V , est le rapport entre la hauteur refondue avec la passe déposée juste au dessous et la hauteur totale de la passe :

$$R_V = \frac{m}{h_k} \quad (2)$$

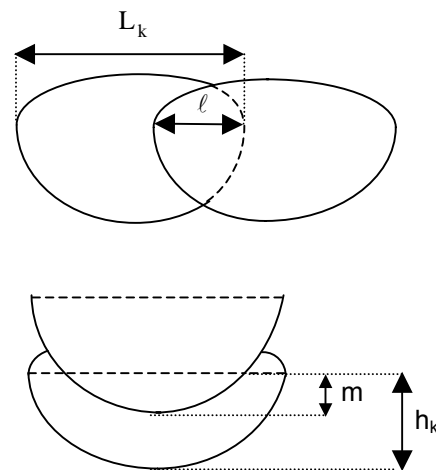


Figure 3 : Refusions latérale R_L et verticale R_V d'une passe en soudage multi-passes.

Les paramètres R_L et R_V permettent de définir la position des passes dans la soudure simulée mais également de connaître la taille (hauteur et largeur) de chacune des passes.

Le modèle ATHENA et les configurations de contrôle

Le code de calcul par éléments finis appelé ATHENA a été utilisé. Ce code a été développé par EDF et l'INRIA et est basé sur les travaux de Tsogka [4, 5]. Ce modèle résout les équations de l'élastodynamique, en régime transitoire, dans un milieu hétérogène et anisotrope. Il simule la propagation des ondes ultrasonores, et permet de modéliser les phénomènes de division et de déviation du faisceau ultrasonore (figure 4).

L'émetteur est en position fixe sur la paroi externe de la soudure et un récepteur balaie la surface opposée pour mesurer le champ ultrasonore transmis. Pour notre étude, le transducteur émet des ondes longitudinales à incidence normale dans un acier isotrope, à une fréquence de 2.25 MHz. Le diamètre de la pastille est de 0.5 pouce. Dans la version actuelle du code, le coefficient d'atténuation lié à la diffusion des ondes ultrasonores par les grains du matériau polycristallin n'est pas pris en compte.

Le résultat est présenté sous la forme d'une courbe échodynamique qui, pour une position d'émetteur donnée, représente l'amplitude ultrasonore maximale reçue en fond de soudure par le récepteur se déplaçant le long de l'axe de balayage x. La taille de l'élément fini dans ATHENA est de 0.25 mm.

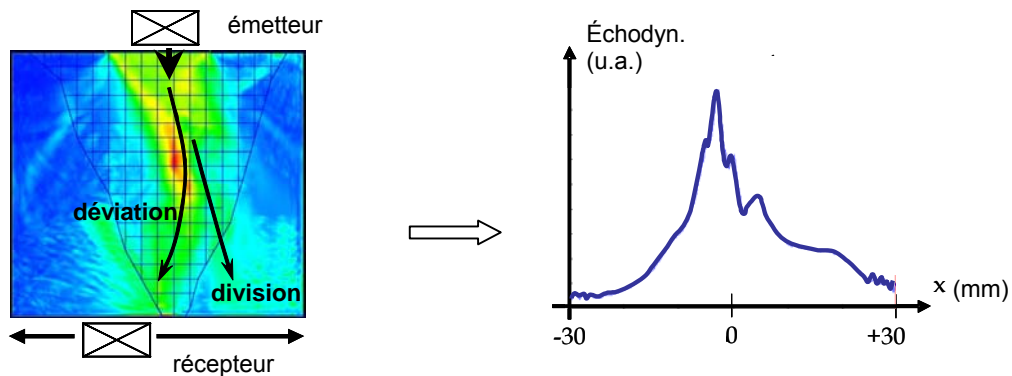


Figure 4 : Propagation des ondes ultrasonores modélisée par ATHENA et courbe échodynamique associée.

DEMARCHE D'INVERSION

MINA a été validé en comparant les orientations évaluées par le modèle avec celles mesurées sur la macrographie. Une erreur moyenne de 10° à 15° suivant le type de soudure [1] a été obtenue. Le modèle MINA fournit donc une description de l'orientation cristalline de la soudure très encourageante mais encore perfectible. Ceci s'explique pour une part par les incertitudes sur les valeurs des différents paramètres d'entrée du modèle.

Par exemple, les paramètres R_L , R_V , θ_B , θ_C du modèle MINA correspondent actuellement à des valeurs moyennes obtenues expérimentalement à partir de macrographies issues de trois maquettes réalisées par le même soudeur mais pour lesquelles l'ordre d'enchaînement des passes diffère.

Inverser le modèle direct (MINA et ATHENA) doit permettre de trouver, pour une soudure donnée, les valeurs des paramètres du modèle R_L , R_V , θ_B , θ_C dans des configurations où ces derniers sont mal connus (changement de soudeur, de procédure, absence du cahier de soudage, ...).

Pour cela, on compare des données issues de mesures expérimentales Y^{exp} avec celles issues d'un modèle mathématique y^{sim} . Les paramètres d'intérêt choisis sont les paramètres de refusion (R_L , R_V) et d'inclinaison de passes (θ_B , θ_C). La comparaison s'effectue sur une certaine quantité de données provenant des mesures et du modèle. Elle correspond à l'ensemble de l'échodynamique de fond de soudure. Elle peut être représentée comme un vecteur E_i représentant l'amplitude ultrasonore maximale reçue en fond de soudure par le récepteur se déplaçant le long de l'axe x (figure 4). Pour notre étude, cinq positions i

d'émetteur sont envisagées de manière à ce que le faisceau ultrasonore traverse en grande partie la soudure. Ces positions confèrent de la sensibilité au modèle.

Le critère de dissemblance utilisé est l'estimateur au sens des moindres carrés :

$$J(R_L, R_V, \theta_B, \theta_C) = \sum_{i=1}^5 (E_i^{\text{sim}} - E_i^{\text{exp}})^2 \quad (3)$$

Une étape nécessaire consiste à s'affranchir des inconvénients liés aux mesures en "fabriquant" des résultats expérimentaux par simulation à l'aide du modèle direct. Cette étape est communément appelée crime inverse. Le principe consiste à partir de paramètres initiaux plus ou moins éloignés de la solution. Si les paramètres optimaux sont retrouvés après minimisation, alors le crime inverse est réalisé. Réussir le crime inverse est souvent la première étape à franchir pour démontrer qu'un modèle est suffisamment établi pour être inversable. En effet nous sommes assurés de l'existence d'une solution puisqu'elle est connue.

La figure 5a montre l'allure de la fonction de coût pour le paramètre de refusion R_L . On observe de nombreux minima locaux, ce qui ralentit fortement la recherche du minimum global. La figure 5a a été obtenue dans le cas d'un maillage $2 \times 2 \text{ mm}^2$ pour le modèle MINA et un maillage plus fin $0.25 \times 0.25 \text{ mm}^2$ a été testé (figure 5b) au niveau de la description cristallographique pour que les orientations de grains évoluent de manière plus régulière. Dans un processus d'inversion, les conséquences sont fortes. En effet, toute modification des paramètres R_L et R_V induit des modifications dans la position et la taille des passes, et génère par conséquent des sauts au niveau de la fonction coût. Ces discontinuités sont moins marquées si on utilise un maillage plus fin.

D'autre part, lorsque l'on trace la cartographie des écarts entre les orientations évaluées par MINA avec celles mesurées sur la macrographie [1], on constate que les écarts les plus importants sont localisés au niveau des chanfreins de la soudure. Une version corrigée de MINA a donc été proposée par la prise en compte dans ces zones d'une orientation de grains variant linéairement entre la valeur du chanfrein (orientation nulle) et l'orientation des passes voisines.

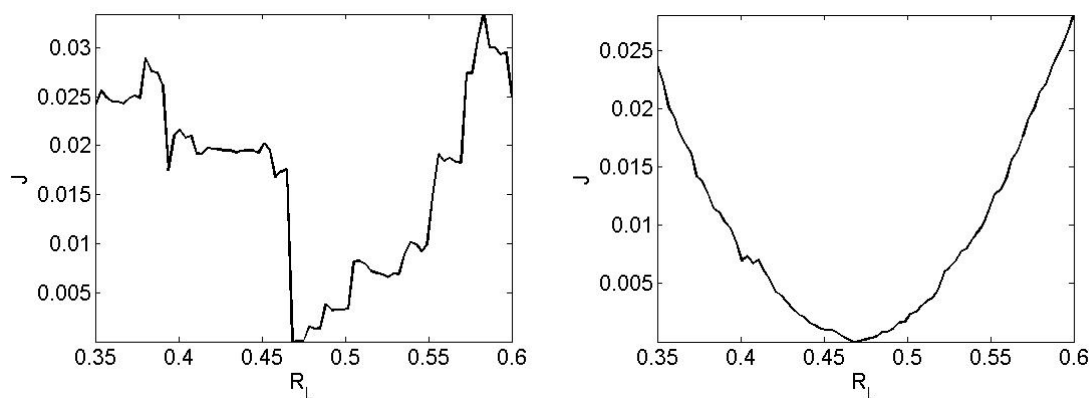


Figure 5 : Fonctions de coût selon le paramètre R_L
a) modèle direct initial b) modèle direct corrigé.

L'optimisation du modèle direct MINA a conduit à une réduction importante du nombre de minima locaux et les fonctions de coût sont plus régulières. L'unicité de la solution est assurée, tout du moins dans le plan du tracé de la fonction $J = f(R_L)$ (les autres paramètres étant fixés à leurs valeurs exactes).

RESULTATS D'INVERSION

Une méthode globale de minimisation de type algorithme génétique [6] a été choisie. Une étude approfondie a été menée pour fixer les paramètres de contrôle (taille de la population, précision du codage, taux de croisement, critère d'arrêt...), et ce pour garantir une convergence rapide vers un minimum global.

L'algorithme a permis de trouver la solution de l'inversion en 16 générations pour un nombre maximal de générations fixé à 300. La durée de résolution est de 4 heures sur un Pentium IV @2.4 GHz. Ces résultats sont par conséquent très satisfaisants.

CONCLUSION

Nous avons montré que l'inversion des deux modèles MINA et ATHENA dont le couplage permet de décrire la propagation des ultrasons dans les soudures multi-passes est désormais accessible. C'est une avancée importante pour l'inspection ultrasonore de ce type de soudures car l'interprétation des résultats est réputée très difficile devant la complexité du matériau. La démonstration de la possibilité de réussir une inversion est fondamentale pour rendre ce modèle complètement opérationnel dans une démarche de modélisation pour l'aide à l'interprétation des résultats des examens ultrasonores.

Les perspectives de l'étude sont principalement liées à une inversion avec prise en compte de données expérimentales. Notamment, le coefficient d'atténuation n'est pas pris en compte dans le code ATHENA utilisé. Ce problème est complexe dans les milieux anisotropes puisqu'on observe une variation de l'atténuation en fonction de l'orientation des grains. Des mesures expérimentales sont désormais disponibles pour obtenir des valeurs réalistes du coefficient d'atténuation [7], parallèlement une nouvelle version du code ATHENA avec prise en compte de l'atténuation est à l'étude [8]. L'inversion sur des données réelles permettra aussi de tester la robustesse de l'inversion vis-à-vis du bruit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Moysan J, Apfel A, Corneloup G, Chassignole B, Modelling the grain orientation of austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, 2003, p. 77-85.
- [2] Apfel A, Moysan J, Corneloup G, Fouquet T, Chassignole B, Coupling an ultrasonic propagation code with a model of the heterogeneity of multipass welds to simulate ultrasonic testing, Ultrasonics, Vol. 43, 2005, p. 447-456.
- [3] Gandin Ch A, Rappaz M, A coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification processes, Acta Metall Mater, Vol. 42, 1994, p. 2233-2246.
- [4] Becache E, Joly P, Tsogka C, An analysis of new mixed finite elements for the approximation of wave propagation problems, Siam J Numer Anal, Vol. 37, 2000, p. 1053-1084.
- [5] Becache E, Joly P, Tsogka C, Application of the fictitious domain method to 2D linear elastodynamic problems, J Comput Acoust., Vol. 9, 2001, p. 1175-1202.
- [6] Holland J H, Adaptation in Natural and Artificial Systems, Michigan Press, 1975.
- [7] Ploix M A, Guy P, El Guerjouma R, Moysan J, Corneloup G, Chassignole B, Attenuation assessment for NDT of austenitic stainless steel welds, 9th ECNDT, Berlin, 2006.
- [8] Schumm A, Structural Noise in Modelisation, 9th ECNDT, Berlin, 2006.