

## Proposition de thèse 2023 - 2026

Cécile Gueudré	CNRS-LMA AMU
Marie-Aude Ploix	CNRS-LMA Protisvalor
Laurent Forest	CEA Saclay

Modélisation 3D de la structure cristalline de soudures épaisses.  
Application au contrôle non destructif par ultrasons.

### **Résumé**

La démonstration de sûreté des dispositifs industriels complexes (réacteurs nucléaires, ITER, chimie...) repose en partie sur les contrôles des structures, et notamment sur l'examen non destructif périodique des parties soudées, essentiellement en acier inoxydable austénitique. La détection, la localisation et la caractérisation des défauts potentiels par des méthodes ultrasonores constituent des problématiques complexes. En effet, la nature hétérogène et anisotrope de ces soudures épaisses multipasses induit de fortes perturbations dans la propagation du faisceau acoustique (déviation, division, atténuation, bruit) qui faussent les diagnostics. La prédiction exacte de la propagation des ondes ultrasonores dépend donc de la connaissance fine de la structure cristalline, propre à chaque soudure.

Le modèle de description de soudure actuel correspond à une distribution spatiale de la croissance cristalline dans le plan perpendiculaire au sens de soudage (2D), ce qui est suffisant quand on envisage des soudures réalisées à plat. Le travail de thèse a pour objectif de produire une modélisation 3D réaliste de la structure cristalline, dans le cas de soudures réalisées en position (montante, plafond, etc..) et pour lesquelles les effets de la gravité induisent des inclinaisons de la texture. Associé à un modèle de propagation ultrasonore 3D, et étayé par un volet expérimental, le contrôle non destructif des soudures s'en trouvera amélioré.

### **Abstract**

Safety demonstration of complex industrial facilities (Nuclear Power Plants, ITER fusion machine, chemical factories...) are partially based on controls of their structures, and particularly on periodical nondestructive examination of welded joints, mainly made of austenitic stainless steel material. Detection, localization and characterization of potential defects with ultrasonic methods are difficult to be mastered. Indeed, heterogeneous and anisotropic behavior of these thick multipass welds produces strong perturbations for acoustic beam propagation (deviation, division, attenuation, noise) which alter the diagnosis. Thus, accurate prediction of ultrasonic wave propagation depends on precise knowledge of crystalline structure, unique to each weld.

Present weld description model corresponds to a spatial distribution of crystalline growth in the perpendicular plan to welding direction (2D), which is sufficient when considering flat welds. The proposed thesis work aims at producing a 3D realistic modelling of crystalline structure in the case of welds made in the position (rising, ceiling, etc.) and for which the

effects of gravity induce inclinations of the texture. Associated to 3D ultrasonic propagation model, and qualified on experimental results, the nondestructive examination of welds will be improved.

## Sujet

Les démonstrations de sûreté des dispositifs industriels complexes (réacteurs nucléaires, ITER, chimie...) reposent en partie sur les contrôles des structures, et notamment sur l'examen non destructif périodique des parties soudées, essentiellement en acier inoxydable austénitique. La détection, la localisation et la caractérisation des défauts potentiels par des méthodes ultrasonores constituent des problématiques complexes. En effet, la nature hétérogène et anisotrope de ces soudures épaisses multipasses, réalisées par les procédés de soudage électrode enrobée, TIG, MIG ou encore WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), induit de fortes perturbations dans la propagation du faisceau acoustique (déviation, division, atténuation, bruit) qui faussent les diagnostics. La prédiction exacte de la propagation des ondes ultrasonores dépend donc de la connaissance fine de la structure cristalline, propre à chaque soudure. Des travaux du LMA sur le sujet ont permis des avancées dans la prévision 2D d'une structure soudée multipasses réalisée par électrode enrobée (modèle MINA), mais aussi plus récemment dans le cas du procédé de soudage TIG. Ces modèles exploitent ainsi les informations contenues dans le cahier de soudage (ordre d'enchaînement des passes, énergie de soudage, géométrie du chanfrein...) afin de modéliser, sur la base de phénomènes physiques (gradient thermique, compétition cristalline, forme des passes, ...), la distribution spatiale de la croissance cristalline dans le plan perpendiculaire au sens de soudage (2D). L'orientation locale est alors prévue, à une échelle inférieure à celle de la passe de soudage. La prévision de la propagation ultrasonore est ensuite obtenue via ces orientations et un jeu de constantes d'élasticité ( $C_{ij}$ ) propre au métal soudé.

Des travaux précédents ont montré que dans le cas du soudage à plat, on observait une inclinaison de quelques degrés de la texture dans le sens du soudage. Pour le soudage en position (corniche, plafond, montante), les effets de gravité induisent des inclinaisons 3D de la texture, plus importantes, pouvant varier de  $5^\circ$  à  $25^\circ$ . La modélisation 2D peut alors ne plus suffire pour simuler correctement la propagation ultrasonore.

L'étude d'une solution 3D de l'ensemble Modèle de microstructure – Modèle de propagation constitue ainsi l'objectif du travail de thèse. Pour l'aspect propagation, on s'appuiera sur les modèles déjà éprouvés type ATHENA, CIVA ou Comsol.

Il s'agira tout d'abord de prendre en compte les aspects métallurgiques spécifiques au soudage en position, issus de l'analyse de soudures étalons. Cela pourra conduire à l'introduction de nouveaux paramètres physiques et donc à des modifications du modèle de microstructure. La nouvelle modélisation complète (microstructure + propagation ultrasonore) devra ensuite être validée par des mesures expérimentales. La démarche expérimentale intégrera la volonté de se rapprocher de conditions industrielles de contrôle (notamment avec des capteurs multi-éléments montés en tandem).

Selon l'adéquation de la modélisation complète à reproduire l'expérimentation, on pourra investiguer deux pistes d'amélioration. D'une part, réduire l'effet de l'incertitude inhérente à la mesure expérimentale des constantes d'élasticité qui sont des paramètres d'entrée

critiques pour tout code de simulation de propagation ultrasonore. On a montré que leur influence dépend de la configuration de contrôle envisagée (notamment les configurations en ondes transversales sont très sensibles aux erreurs de Cij). D'autre part, prendre en compte l'effet de la présence de contraintes résiduelles dans les soudures, notamment en soudage TIG, qui peut influencer la propagation ultrasonore de manière non négligeable.

Les avancées obtenues dans la description réaliste et non destructive des soudures pourront alors être utilisées comme données d'entrée pour toutes les procédures d'imagerie ultrasonore de défaut, dans le but d'améliorer la détection, la localisation et la caractérisation d'éventuels défauts dans les soudures épaisses.

## Références bibliographiques

Apfel, A. (2005). "Modélisation de l'orientation cristalline des soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique : application au contrôle non destructif ultrasonore." Thèse de doctorat.

Bodian, P. A. (2011). "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." Thèse de doctorat.

Chassignole, B. (2000). "Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons." Thèse de doctorat.

Corneloup, G., Gueudré, C., Ploix, M.-A., Bakhti, S., and Chassignole, B. (2014). "Prévision de la description de l'anisotropie de soudures austénitiques multipasses pour leur contrôle ultrasonore." Congrès COFREND, Bordeaux, France.

Gueudré, C., Le Marrec, L., Moysan, J., and Chassignole, B. (2009). "Direct model optimisation for data inversion. Application to ultrasonic characterisation of heterogeneous welds." *NDT & E International*, 42(1), 47–55.

Gueudré, C., Mailhé, J., Ploix, M.A., Corneloup, G., and Chassignole, B. (2019). "Influence of the uncertainty of elastic constants on the modelling of ultrasound propagation through multi-pass austenitic welds. Impact on Non-Destructive Testing." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 171, 125–136.

Moysan, J., Apfel, A., Corneloup, G., and Chassignole, B. (2003). "Modelling the grain orientation of austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80(2), 77–85.

Moysan J., Gueudré, C., Ploix, M.-A., Corneloup, G., Guy, P., El Guerjouma, R., Chassignole, B., (2009). "Advances in Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Welds. Towards a 3D Description of the Material including Attenuation and Optimisation by Inversion.", in *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media*, Editeurs Editeurs A. Leger, M. Deschamps, dans *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media*, Series: Springer Proceedings in Physics, Vol. 128, 15-24.

Ploix, M.-A. (2006). "Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores. application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique." Thèse de doctorat.

**Ecole Doctorale :**

N°353 – Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nano-Électronique (AMU)

**Mots clés :**

Contrôle non destructif, modélisation de la microstructure, modélisation ultrasonore, soudage en position

**Partenaires :**

CEA Saclay DES/LTA (expertise sur le soudage et réalisation de soudures)

CEA Saclay DRT/LIST (simulation ultrasonore avec la plateforme logicielle CIVA)

EDF R&D (simulation ultrasonore avec les codes Athena2D et A3D-CND)

LMGC (UMR 5508, procédés de soudage à l'arc, solidification, réalisation de soudures)

IUSTI (UMR 7343, transferts de chaleur dans les procédés de soudage)

**Principaux jalons**

- **Première année**
  - Bibliographie approfondie
  - Prise en main progressive des outils numériques et expérimentaux
  - Conception et réalisation des maquettes de soudage en position
- **Deuxième année**
  - Simulations et essais en eau, comparaisons théorie – expérience pour le contrôle des défauts
  - Simulation et essais en configuration industrielle de contrôle (tandem multi-éléments)
- **Troisième année**
  - Finalisation des expériences et simulations en support
  - Rédaction de publications et du mémoire

**Conditions :**

Contrat doctoral avec le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique CNRS UMR7031.

Financement ANR.

Inscription Ecole doctorale : 400€/an.

Salaire : 1715 € net/mois.

Thèse localisée au LMA Aix-en-Provence, déplacements à prévoir chez les partenaires de la thèse.

**Contacts :**

[cecile.gueudre@univ-amu.fr](mailto:cecile.gueudre@univ-amu.fr) (Maître de Conférences HdR, LMA Aix-en-Provence)

[marie-aude.ploix@univ-amu.fr](mailto:marie-aude.ploix@univ-amu.fr) (Ingénieur Chercheur, LMA Aix-en-Provence, Protisvalor)

**Profil des candidats :**

Formation généraliste, Connaissance en propagation des ondes élastiques, en analyse numérique, développements informatiques (Comsol, Matlab, ...) et expérimentaux (contrôle ultrasonore).