

**INFLUENCE DE LA STRUCTURE SUR LE CONTROLE  
ULTRASONORE D'UNE SOUDURE DE PIQUAGE SUR TUYAUTERIE  
PRIMAIRE DE CENTRALE NUCLEAIRE**  
*INFLUENCE OF THE STRUCTURE ON THE ULTRASONIC  
INSPECTION OF A WELD OF A SET-ON BRANCH PIPE OF A  
NUCLEAR POWER STATION*

CHASSIGNOLE Bertrand<sup>1</sup>, DUPOND Olivier<sup>1</sup>, DOUDET Loïc<sup>1</sup>, ABITTAN Elie,  
ETCHEGARAY Nicolas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EDF R&D-Site des Renardières- Moret sur Loing (77)

<sup>2</sup>EDF CEIDRE- Saint-Denis (93)

Tél. 01 60 73 68 25 – Fax. 01 60 73 68 89

E-mail : [prenom.nom@edf.fr](mailto:prenom.nom@edf.fr)

## RESUME

EDF R&D mène depuis plusieurs années des études sur la compréhension des phénomènes de propagation des ondes ultrasonores dans les soudures en acier inoxydable austénitique. L'application étudiée dans ce papier concerne le contrôle d'une soudure d'implantation d'un piquage sur tuyauterie primaire d'une centrale nucléaire à réacteur à eau pressurisée. Au sein du projet d'ensemble consistant en la maîtrise et l'amélioration des procédés de contrôle au travers des soudures austénitiques et l'aide à la qualification de ceux-ci, trois axes d'étude sont présentés :

1. des résultats d'acquisitions expérimentales sur blocs avec défauts plans artificiels ;
2. des simulations de la propagation et des interactions faisceau/défaut, intégrant les derniers développements implémentés dans le code aux éléments finis ATHENA 2D. Ces simulations permettent notamment d'expliquer l'origine des différentes perturbations observées ;
3. une analyse spécifique de l'influence des variations de la structure de la soudure sur les phénomènes de transmission et d'interaction faisceau/défaut.

## ABSTRACT

*EDF R&D takes several years of studies on the understanding of the phenomena of ultrasonic wave propagation in austenitic stainless steel welds. The application discussed in this paper concerns the inspection of a weld of a set-on branch pipe of a nuclear power plant with pressurized water reactor. Within the overall project consisting of the improvement of the inspection process of austenitic welds and the assistance to the qualification of these, three major directions of the study are presented :*

1. *Results of experimental tests on mock-ups with artificial plane defects ;*
2. *Simulations of the propagation and the beam/defect interaction, incorporating the latest developments implemented in the finite element code ATHENA 2D. These simulations are used to explain the origin of the various disturbances ;*
3. *An analysis of the influence of changes in the structure of the weld on the phenomena of transmission and beam/defect interaction.*

## INTRODUCTION

EDF mène depuis plusieurs années des actions dans le but d'évaluer la contrôlabilité ultrasonore des soudures en acier inoxydable austénitique présentes sur les circuits primaire et auxiliaire des centrales nucléaires à réacteur à eau pressurisée [1] [2] [3]. Ces soudures présentent notamment une anisotropie marquée des propriétés d'élasticité qui, couplée à l'hétérogénéité de l'orientation des grains, peut entraîner des phénomènes de déviation et de division du faisceau. D'autre part, la taille des grains n'étant pas négligeable devant les longueurs d'onde utilisées, une atténuation et un bruit de structure importants sont parfois observés.

Les travaux s'appuient en partie sur des calculs de simulation pour d'une part améliorer la compréhension des phénomènes et d'autre part réaliser des études paramétriques en appui à la qualification d'un procédé de contrôle. Or il a été montré qu'une caractérisation fine de la structure de ces soudures est nécessaire pour obtenir des résultats de simulation en accord avec les valeurs expérimentales. De ce fait, une méthodologie a été proposée pour traiter cette problématique [4]. Il a notamment été démontré que cette méthodologie pouvait être appliquée au cas du contrôle d'une soudure de piquage pénétré sur tuyauterie primaire [3]. Cette validation était en particulier basée sur une analyse en simulation sur des défauts volumiques calibrés avec comparaison à des acquisitions expérimentales.

La présente étude est consacrée à l'analyse des performances du contrôle ultrasonore pour la détection et la caractérisation de défauts plans en paroi interne de la soudure du piquage. Dans une première partie, nous présentons les caractéristiques de la soudure et des défauts étudiés. Les résultats d'acquisitions expérimentales sont ensuite présentés, puis comparés à des simulations aux éléments finis. On s'attache plus particulièrement à étudier l'influence des variations de la structure de la soudure sur les performances du contrôle.

## **MAQUETTE ET DEFAUTS ETUDIÉS**

Le composant type étudié est une soudure de forte épaisseur à chanfrein en K. La maquette, d'épaisseur 69 mm, a été obtenue par soudage manuel à l'électrode enrobée, avec une reprise envers. La soudure a été réalisée en position 1G (soudage à plat), à la fois pour le remplissage de la partie supérieure et pour la reprise envers. Le métal d'apport est de nuance Z3 CND 19-12 (ou acier 316L).

Plusieurs défauts artificiels de type entaille, initiés en paroi interne de la tuyauterie, ont été implantés au centre de la reprise envers de la soudure. Les entailles sont verticales, de longueur égale à 30 mm et de hauteur variant entre 5 et 30 mm. Une entaille de référence, de hauteur égale à 10 mm, a été implantée dans le métal de base de la maquette en acier austénitique forgé (matériau isotrope). Les caractéristiques de la maquette et la localisation des défauts sont schématisées sur la *Figure 1*.

Une macrographie de la soudure, effectuée sur une section de la maquette, est également présentée en *Figure 1*. Elle révèle les grains colonnaires d'austénite, caractéristiques de la structure de solidification de ce type de soudure [5].

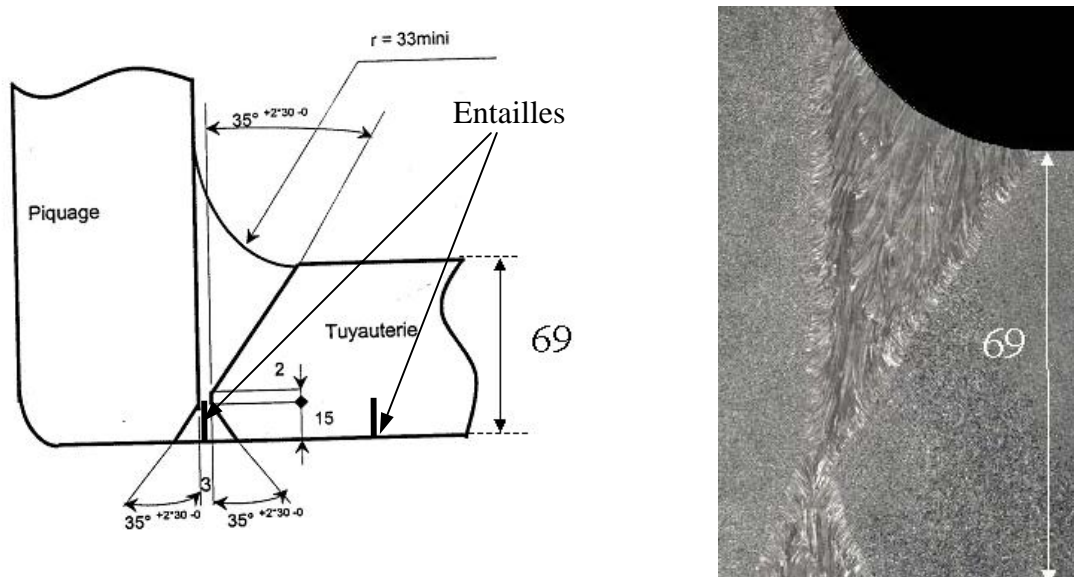


Figure 1 : Caractéristiques de la maquette représentative d'une soudure de piquage sur tuyauterie primaire, localisation des entailles et macrographie de la soudure.

## ANALYSE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a été réalisée avec un transducteur large-bande, générant des ondes longitudinales à une fréquence centrale de 2 MHz. Par ailleurs ce transducteur est à émetteur et récepteur séparés, avec un angle de réfraction dans l'acier austénitique proche de 60°. Des études antérieures ont montré que ce type de transducteur permettait d'obtenir de bonnes performances en détection de défauts plans localisés dans ou aux abords d'une soudure austénitique [2]. La zone de travail de ce transducteur est située à une profondeur d'environ 45 mm, et une acquisition sur une cale avec des trous génératrices de diamètre 2 mm indique un écart d'amplitude de seulement 1 dB entre les défauts à des profondeurs de 45 et 60 mm. Ce transducteur est donc parfaitement adapté aux configurations de cette étude. Sur la Figure 2 sont comparées les représentations de type B pour l'entaille de référence dans le métal de base et pour une entaille de 15 mm dans la soudure (le transducteur est positionné côté tuyauterie).

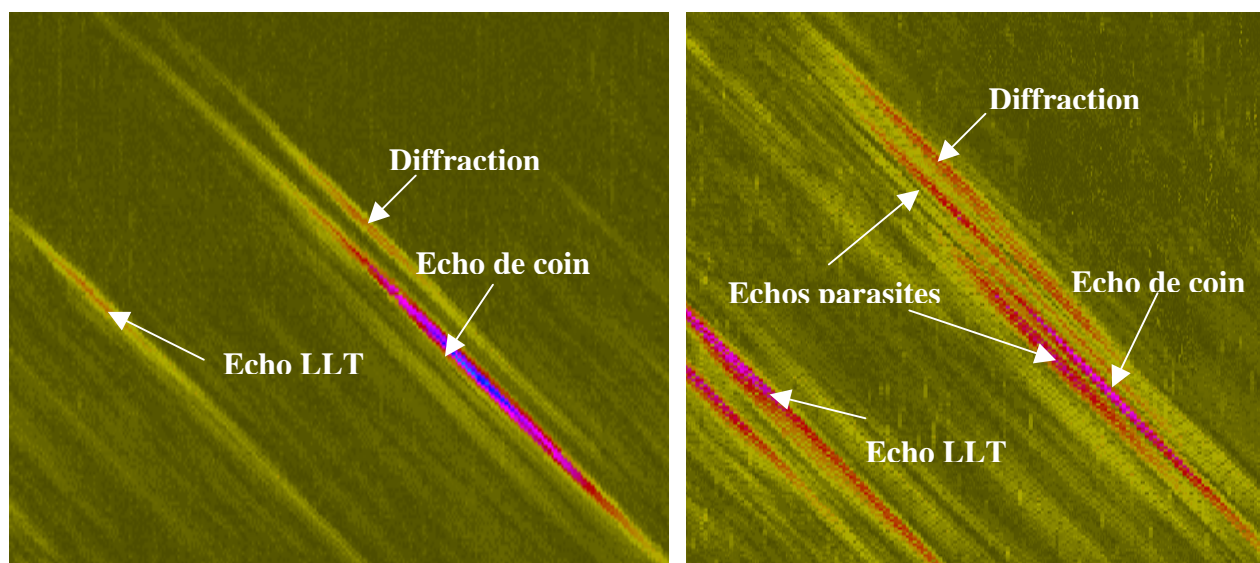
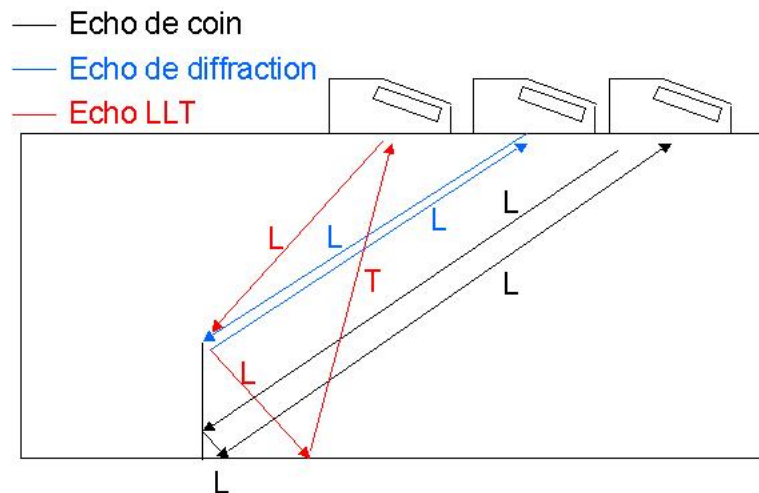


Figure 2 : Exemples de représentation de type B pour les acquisitions expérimentales – à gauche : défaut dans le métal de base – à droite : défaut dans la soudure.

Pour l'entaille dans le métal de base, nous relevons les présences d'un écho de coin, d'un écho de diffraction et d'un écho de conversion de mode LLT qui sont caractéristiques de la réponse ultrasonore d'un défaut plan débouchant (*Figure 3*). Le rapport signal à bruit pour l'écho de coin est élevé (environ 20 dB) et l'entaille est dimensionnée avec une erreur de 0,5 mm.



*Figure 3 : Trajets associés aux écho de coin, de diffraction et de conversion de mode LLT.*

Pour l'entaille dans la soudure, la visualisation de type B fait apparaître des échos supplémentaires, que l'on qualifiera de parasites, ceci pour différents temps de vol. Ces échos sont gênants à la fois pour le diagnostic sur la nature du défaut et pour le dimensionnement de ce dernier.

En terme de détection, le rapport signal à bruit de l'écho de coin reste correct (+5 à +10 dB selon l'entaille) mais chute sensiblement par rapport au défaut dans le métal de base. Cet écart est à la fois dû à une plus forte amplitude du bruit de structure et à une baisse de l'amplitude de l'écho de coin qui peut atteindre 10 dB. Une étude en transmission réalisée sur cette maquette a montré que le champ ultrasonore était perturbé lorsque les ondes pénétraient dans la soudure, avec notamment des divisions de faisceau importantes [6].

Par ailleurs, des évolutions des imageries de type B et des variations d'amplitude des échos sont observées, que ce soit pour deux lignes de balayage proches relatives à une entaille particulière ou pour deux entailles localisées à des cotes différentes selon l'axe de soudage. Pour ce dernier cas, un écart maximal de 4 dB sur l'écho de coin a notamment été relevé. En première analyse, cet écart est attribué à des variations de la structure selon la direction de soudage.

On observe une variation de l'amplitude de l'écho de conversion de mode LLT en fonction de la hauteur du défaut (écart d'environ 20 dB entre une entaille de 30 mm et une entaille de 15 mm). Cette amplitude devient significative à partir d'une hauteur d'entaille de 15 mm (amplitude égale à celle de l'écho de coin). Cet écho peut dès lors être utilisé en appui aux autres méthodes d'analyse pour la caractérisation du défaut plan.

En terme de dimensionnement, selon l'entaille et la méthode de dimensionnement considérées, les erreurs sur les estimations de hauteur peuvent atteindre 3 mm si on suppose que le matériau est isotrope. En effet, la direction de propagation des ondes par rapport à l'orientation des grains dans les domaines anisotropes entraîne des déviations qui ont un impact sur le dimensionnement (erreurs sur le repositionnement des indications ultrasonores).

## ANALYSE EN SIMULATION

### Présentation du code et comparaison expérience/simulation

Pour l'étude en simulation, nous avons utilisé le code ATHENA 2D développé par EDF R&D. Ce code résout les équations de l'élastodynamique exprimées avec les contraintes et les vitesses de déplacement par une méthode en éléments finis [7].

ATHENA 2D permet de décrire la propagation des ultrasons dans des milieux complexes anisotropes et hétérogènes et de prendre en compte des interactions du faisceau avec des défauts de géométrie complexe. Une version récente du code permet également de prendre en compte l'atténuation des ondes ultrasonores due au phénomène de diffusion par la structure granulaire du matériau polycristallin [7].

Le traducteur à émetteur et récepteur séparés n'étant pas modélisable dans un code 2D, un traducteur monoélément fictif a été défini. Ce dernier est constitué d'une pastille focalisante permettant d'obtenir des caractéristiques de faisceau ultrasonore proches de celles du traducteur expérimental.

En simulation, la soudure hétérogène est décrite par un ensemble de domaines anisotropes homogènes caractérisés par une orientation de grains et un tenseur d'élasticité (Figure 4) [3] [5] [8]. Pour la maquette de l'étude, les orientations sont déterminées par analyse d'images d'après la macrographie de la Figure 1.

La Figure 4 donne, sous la forme d'une représentation de type B, le résultat de la simulation du contrôle de l'entaille de 15 mm implantée au centre de la soudure.

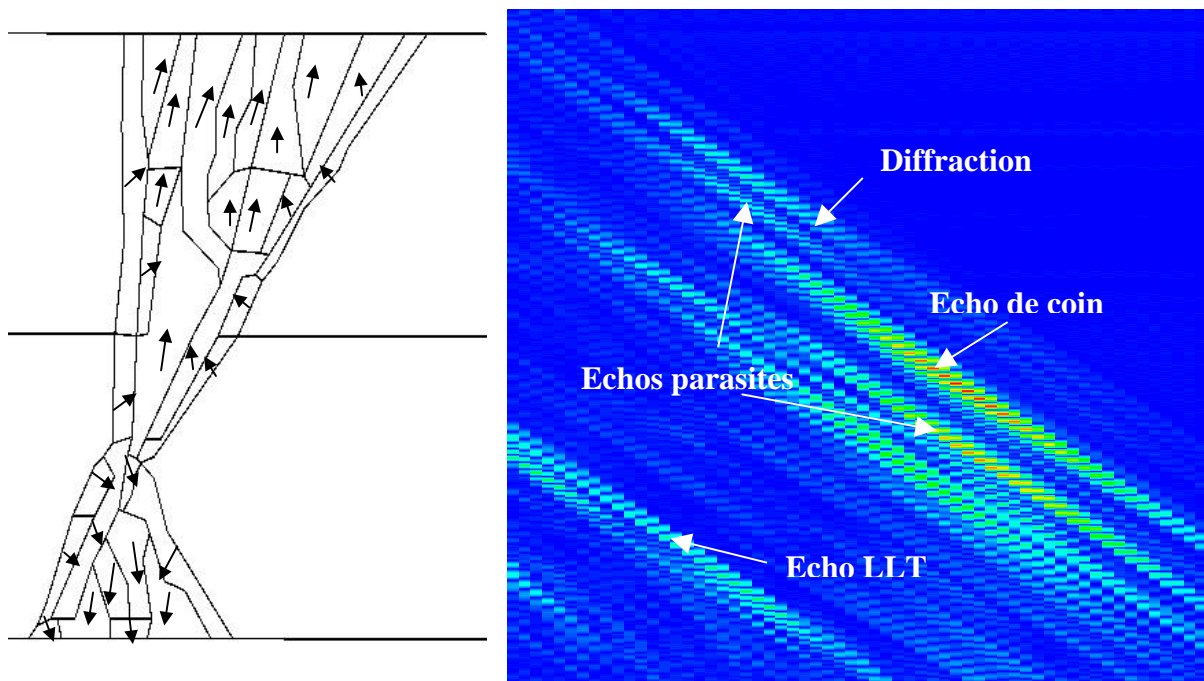


Figure 4 : Simulation du contrôle de la maquette soudée avec une entaille de 15 mm de hauteur – a) description de la soudure en domaines homogènes – b) Imagerie de type B.

Comme sur le résultat expérimental (Figure 2), deux échos parasites proches des échos de coin et de diffraction apparaissent en simulation. Une analyse basée sur la progression des fronts d'ondes (visualisation du champ ultrasonore à différents instants de propagation) semble montrer que ces échos parasites sont dus à des conversions de mode liées à la structure de la soudure, les ondes réfractées venant par la suite interagir avec le défaut.

Par ailleurs les amplitudes des échos de coin et de diffraction ainsi que celles de l'écho de diffraction sont très proches des valeurs expérimentales (écart inférieur à 2 dB). L'écart sur l'écho LLT est plus important (10 dB environ) mais ceci s'explique par le fait que cet écho est

très sensible aux caractéristiques du transducteur qui, on le rappelle, sont différentes entre la simulation et l'expérience. Par ailleurs cet écho fait intervenir un trajet en ondes transversales conséquent dans le métal de base. Or la valeur du coefficient d'atténuation pour ces ondes n'est pas encore déterminée avec précision. La simulation confirme par ailleurs que l'amplitude de l'écho LLT varie en fonction de la hauteur de l'entaille (Figure 5). Pour le transducteur modélisé, cette amplitude se stabilise à partir d'une hauteur de 30 mm.

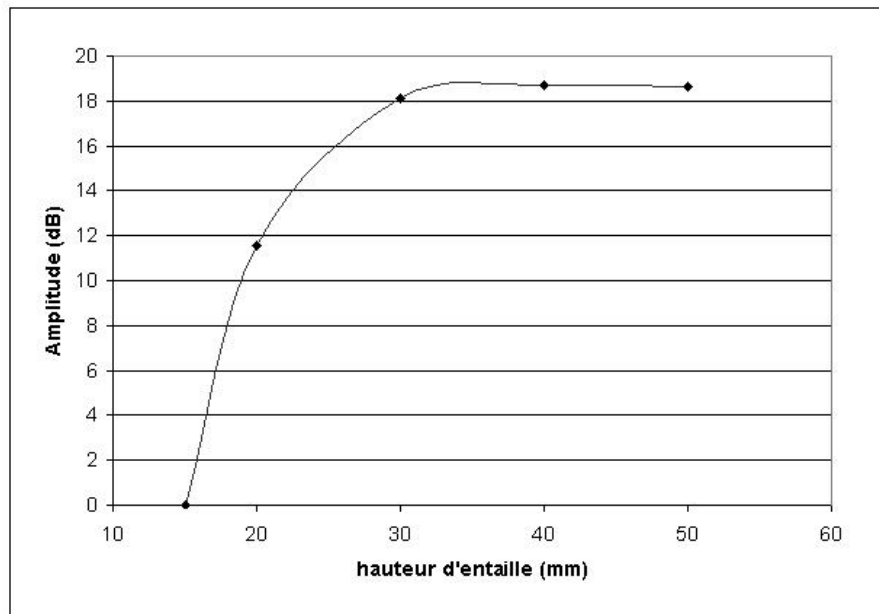


Figure 5 : Variations de l'amplitude de l'écho LLT en fonction de la hauteur de l'entaille – Simulations ATHENA 2D.

L'ensemble de ces résultats amène à conclure que la méthodologie développée pour la simulation du contrôle des soudures austénitiques est adaptée pour l'étude des performances en détection et en dimensionnement d'un défaut plan dans une soudure de piquage.

### Etude paramétrique en simulation

Par ailleurs la simulation présente l'intérêt de permettre la réalisation d'études paramétriques, à condition d'avoir déterminé au préalable les domaines de variation des paramètres influents. Dans le cas présent, l'influence de variations de structure sur les performances du contrôle ultrasonore a en particulier été analysée. Pour cela, deux options sont envisageables. La première consiste à modéliser les géométries et les structures issues de coupons témoins de fabrication ou d'autres maquettes représentatives de soudure d'implantation de piquage (Figure 6). La seconde option est basée sur l'utilisation du modèle MINA. Ce modèle, issu d'une collaboration avec le Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND) de l'Université de la Méditerranée, a été développé dans le but d'estimer l'orientation des grains dans une soudure réalisée à l'électrode enrobée, ceci à partir d'informations tirées du cahier de soudage (dimensions de la soudure, diamètre des électrodes, enchaînement des passes, etc...) et de paramètres propres au procédé de soudage multipasses (taux de refusion et inclinaison des passes) [9] [10]. Au final, en faisant varier les différents paramètres d'entrée de MINA, une dizaine de descriptions de soudure a été étudiée. Un exemple de cartographie de l'orientation des grains est proposé sur la Figure 7 (les domaines homogènes sont des carrés de côté 2 mm). La partie supérieure de la soudure et la reprise envers sont étudiées séparément, la version de MINA utilisée n'intégrant pas la possibilité de modéliser la globalité d'une soudure avec reprise. Cette option sera disponible dans une prochaine version.

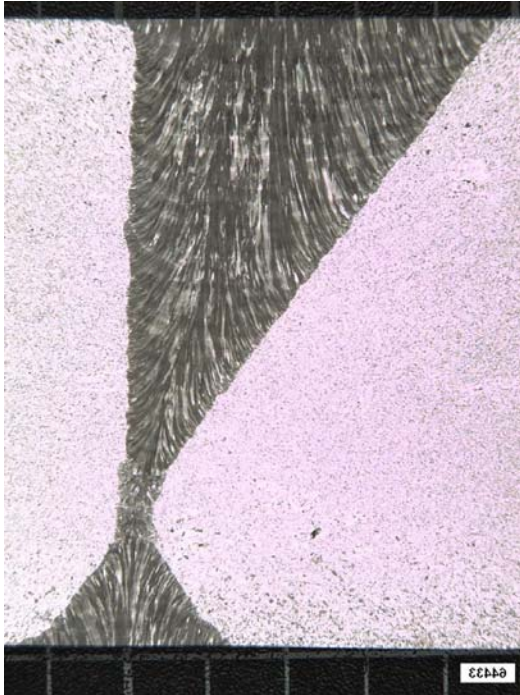


Figure 6 : Autres exemples de géométries et de structures de soudure de piquage (épaisseurs égales à 69 mm).

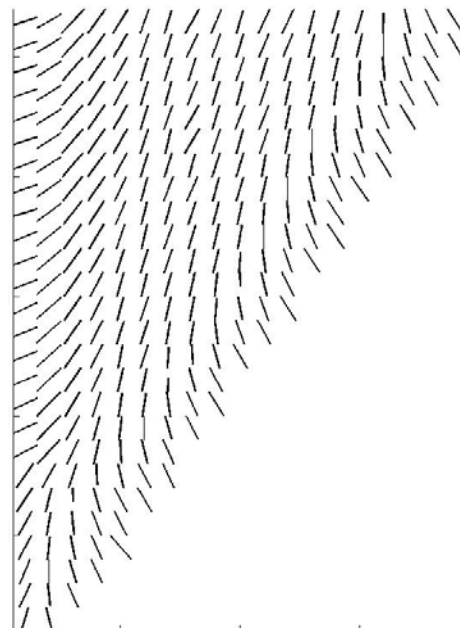
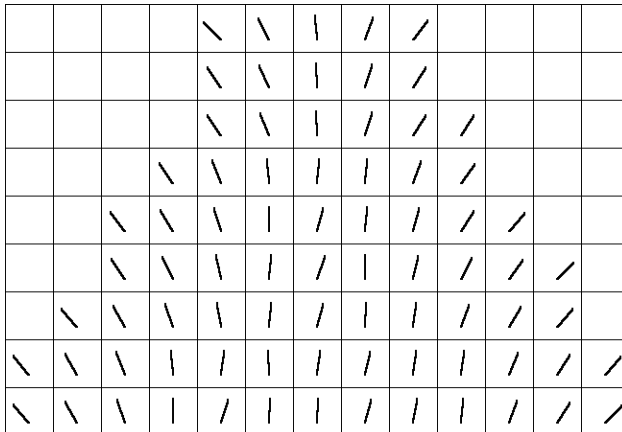


Figure 7 : Exemple de cartographie des orientations des grains obtenue à partir du modèle MINA – à gauche : partie inférieure de la soudure (reprise envers) – à droite : partie supérieure.

Une étude paramétrique en simulation a alors été menée sur l'ensemble de ces descriptions de soudure. Elle a été limitée au cas de l'entaille de hauteur égale à 15 mm. Cette étude, couplée aux résultats de l'étude expérimentale, permet alors de tirer les conclusions suivantes pour un défaut plan propagé au centre de la soudure :

- L'amplitude minimale de l'écho de coin est obtenue pour la description de soudure correspondant à la maquette expérimentale. On peut donc en conclure que le risque d'obtenir un rapport signal à bruit inférieur à la valeur de +5 dB trouvée expérimentalement est faible. Par ailleurs, conformément à l'expérience, on trouve en simulation des variations de l'amplitude de coin d'environ 4 dB en fonction de la structure ;
- les conditions d'apparition des échos parasites sont fonction des caractéristiques de la structure (orientation des grains, des chanfreins, degré d'hétérogénéité) ;
- en considérant que l'écho de coin a bien été identifié, on relève dans la majorité des cas des erreurs de dimensionnement comprises entre 1 et 3 mm, aussi bien en surdimensionnement qu'en sous-dimensionnement. Pour un cas particulier la simulation prévoit une erreur de dimensionnement de 5 mm .

## CONCLUSION

Cette étude présente les résultats relatifs à l'examen de défauts plans de type entaille implantés dans une soudure en acier inoxydable austénitique représentative d'un piquage pénétré sur tuyauterie primaire des réacteurs à eau pressurisée. L'objectif était d'étudier l'influence de la structure spécifique à cette soudure sur la propagation des ondes ultrasonores.

L'analyse expérimentale met en évidence des perturbations du contrôle liées à la structure anisotrope et hétérogène de la soudure. Bien que les rapports signal à bruit chutent pour les défauts dans la soudure, ces derniers sont détectés avec le traducteur à émetteur et récepteur séparés utilisé. Par ailleurs, des échos parasites sont générés. Ces échos sont pénalisants pour la caractérisation du défaut plan. Une perspective de ce travail est de chercher à discriminer les échos d'intérêt des échos parasites.

On a également vu que les effets liés à l'anisotropie du matériau détériorent les performances en dimensionnement. Une correction de ces effets dans la méthode de dimensionnement doit donc être étudiée. Cela nécessite toutefois de connaître avec précision la structure de la soudure mais l'accès à cette information n'est pas aisé. Des travaux sur ces sujets sont en cours.

Malgré les hypothèses simplificatrices (description en domaines homogènes, modélisation 2D du traducteur), la simulation avec le code aux éléments finis ATHENA 2D permet de reproduire l'ensemble des perturbations expérimentales. La prise en compte de l'atténuation par diffusion permet notamment d'obtenir des résultats de simulation plus pertinents en ce qui concerne les amplitudes des différents échos. Les axes d'amélioration identifiés sont la modélisation du bruit de structure et la finalisation de la version 3D du code. Des travaux concernant le premier point ont déjà été menés [5].

Une limite de ce travail vient de la difficulté à évaluer les évolutions de la structure le long de la direction de soudage qui, comme cela a été observé, peuvent entraîner des variations significatives des phénomènes de propagation ultrasonore. La simulation offre toutefois la possibilité de réaliser des études paramétriques en faisant notamment varier les paramètres caractérisant la structure (utilisation du modèle MINA par exemple).



## REFERENCES

- [1] Chassignole B., Villard D., Schumm A., Fouquet T., Ultrasonic modelling of austenitic stainless steel welds : improvement in the comprehension of anisotropic and heterogeneous structure effects, 4<sup>th</sup> ICNDE, Londres, 2004.
- [2] Dupond O., Villard D., Mayos M., Towards an improvement of ultrasonic examination of austenitic stainless steel welds, 3<sup>rd</sup> ICNDE, Seville, 2001, pp. 536-541.
- [3] Chassignole B., Dupond O., Doudet L., Utilisation de la modélisation pour l'examen par ultrasons d'une soudure en acier inoxydable austénitique d'un piquage pénétré, congrès COFREND, Beaune, 2005.
- [4] Dupond O., Chassignole B., Doudet L., Birac C., Methodology for modelling ultrasonic inspection on an austenitic stainless steel weld, 6<sup>th</sup> ICNDE, Budapest, 2007.
- [5] Chassignole B., Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons, Thèse, INSA Lyon, 2000.
- [6] B. Chassignole, O. Paris, E. Abittan, Ultrasonic examination of a CVCS weld, 6<sup>th</sup> ICNDE, Budapest, 2007.
- [7] Schumm A., Diaz J., Duwig V., Fouquet T., Chassignole B., Structural noise in modelisation, 6<sup>th</sup> ECNDT, Berlin, 2006.
- [8] Chassignole B, Villard D, Dubuget M, Baboux JC, El Guerjouma R, Characterization of austenitic stainless steel welds for ultrasonic NDT, Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation, Montreal, vol. 19B, 1999, pp. 1325-1332.
- [9] Apfel A., Moysan J., Corneloup G., Chassignole B., Simulations of the influence of the grain orientations on ultrasounds, 16<sup>th</sup> WCNDT, Montreal, 2004.
- [10] 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 Pressure Vessels and Piping, vol. 80, 2003, pp. 77-85.