

# Modélisation des contraintes résiduelles dans les soudures circonférentielles multi-passes bout à bout de tuyauterie en acier inoxydable austénitique pour la classification du risque de corrosion sous contrainte en milieu primaire

J. Delmas<sup>1</sup>, S. Hendili<sup>1</sup>, V. Robin<sup>2</sup>, S. Hilal<sup>1</sup>,  
P. Pereira Alvarez<sup>1</sup>, D. Iampietro<sup>1</sup>, M. Abbas<sup>1</sup>, S. Jutteau<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EDF R&D, France, {josselin.delmas,sofiane.hendili,sami.hilal,pablo.pereira-alvarez,david.iampietro,mickael.abbas}@edf.fr

<sup>2</sup> EDF Direction Technique, France, vincent.robin@edf.fr

<sup>3</sup> EDF Direction Industrielle, France, sebastien.jutteau@edf.fr

**Résumé** — La prévision des contraintes résiduelles dans les soudures est essentielle pour évaluer l'intégrité d'un composant soumis à des mécanismes de dégradation tels que la corrosion sous contrainte (CSC). Une vaste campagne de simulation de soudures circonférentielles multipasses bout à bout de tuyauterie en acier inoxydable austénitique a été menée afin de couvrir différentes configurations de soudage. Un abaque numérique est construit sur la base d'un plan d'expériences de 100 simulations numériques du soudage par couple diamètre-épaisseur. Cet ensemble de simulations montre la présence systématique d'une zone de compression sur la moitié de l'épaisseur à partir de la surface interne, avec une certaine variabilité en fonction des conditions de soudage et de la géométrie. La classification du risque de CSC est alors définie par un ensemble de deux indicateurs qui peuvent être liés à l'initiation de la fissure et à sa propagation. La prise en compte des chargements en service en plus des contraintes résiduelles de soudage réalistes rend l'analyse du facteur d'intensité de contrainte réalisable en tenant compte de la position et de l'orientation idéales de la fissure.

**Mots clés** — Simulation numérique du soudage, contraintes résiduelles, méta-modélisation, abaque numérique.

## 1. Introduction

Pour les tuyauteries, dans une certaine gamme de rapports d'épaisseur et de diamètre, les soudures circonférentielles multipasses bout à bout de tubes en acier inoxydable austénitique présentent un état de contrainte dans le sens axial en compression sur la moitié de l'épaisseur à partir de la surface interne. Près de la région de la passe racine, l'état de contrainte peut passer en traction à la fin de l'opération de soudage. La rigidité différente des deux côtés de la soudure (par exemple, une soudure d'un tube sur un coude) ainsi que la séquence de soudage pour les passes de finition peuvent affecter la distribution des contraintes de traction dans la région de la racine. L'extension axiale de la zone de compression est significative sur la moitié de l'épaisseur à partir de la surface interne.

Les contraintes résiduelles sont dues à l'apparition de déformations permanentes dans la zone de la soudure qui est soumise à des cycles thermiques de soudage successifs, comme l'illustre la modélisation numérique [1] [2]. L'écrouissage s'accumule et entraîne un changement du comportement mécanique local, créant pour l'acier inoxydable austénitique une zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM, présentée dans [3] [4]). Le procédé de soudage affecte les grandeurs mécaniques telles que la contrainte et l'écrouissage en fonction de différents paramètres du procédé : forme du chanfrein, nombre de cordons, distribution de l'énergie de soudage, etc. L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie fiable pour construire un abaque numérique qui fournit en temps réel les grandeurs mécaniques qui jouent un rôle sur le risque de fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) dans l'environnement du circuit primaire des réacteurs à eau pressurisée. Ces grandeurs mécaniques sont

obtenues en fonction des paramètres utilisés pour le soudage multipasse dans les soudures bout à bout de tubes en acier inoxydable austénitique dans le même esprit que celui proposé dans [5].

## 2. Modélisation du soudage

Les modèles considérés dans cette étude ont été développés et sont disponibles dans code-aster [6][7], logiciel généraliste open-source de simulation en mécanique et de calcul de structures développé par EDF depuis plus de 30 ans, embarqué dans la plate-forme Salome-Meca [7], plateforme polyvalente d'analyse mécanique.

En l'absence de contrainte externe, les conséquences mécaniques de l'opération de soudage sont liées à la présence de gradients thermiques dans la ZATM pendant le soudage. La définition du chargement thermique est donc essentielle pour établir la contrainte à l'origine des contraintes résiduelles de soudage (CRS ou WRS en anglais). Ces déformations thermiques sont accommodées par la structure sous forme de déformations locales élastiques et inélastiques auxquelles se superposent des efforts internes globaux induits par les effets d'auto-bridage provoqués par les parties massives qui restent froides à l'échelle de la structure (effet diabolique par exemple). Dans le soudage multipasse, les CRS proviennent donc de la succession de retraites et de dilatations qui sont contrecarrés voire bloqués par les parties plus froides et donc plus rigides de l'assemblage.

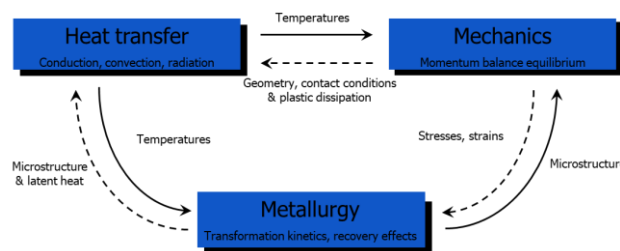


Figure 1 – Couplage et interaction pour l'évaluation des CRS : transferts de chaleur, phénomènes métallurgiques et conséquences mécaniques.

L'évolution des contraintes résiduelles de soudage dépend donc du choix des lois liant les contraintes et les déformations, qui peuvent être décomposées en une partie élastique, thermique et inélastique ( $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^{th} + \dot{\varepsilon}^{in}$ ) et de la manière de décrire la plasticité (déformation inélastique permanente à l'origine des CRS et régissant les variables modifiant le domaine d'élasticité par l'écrouissage). A cet égard, la loi de comportement utilisée pour traduire la plasticité intègre les phénomènes de restauration d'écrouissage caractérisés spécifiquement pour décrire le comportement des alliages qui ne présentent pas de transformation de phase à l'état solide lors du soudage (alliages à structure cristalline est cubique faces centrées (CFC) à toute température tels que les alliages à base de nickel ou les aciers inoxydables austénitiques) [9][10][11]. Notons qu'un couplage faible (enchaînement séquentiel des analyses thermiques, métallurgiques et mécaniques à chaque passe de soudage) suffit à la détermination des CRS pour les assemblages concernés comme le montre le schéma de la Figure 1.

La fonction seuil de Von Mises  $\sigma_{eq}$  ou contrainte équivalente au sens de Von Mises qui correspond au second invariant du tenseur des contraintes  $\sigma_{ij}$  dont  $\underline{s}$  est la partie déviatorique, est généralement utilisée pour caractériser l'état de contrainte dans les matériaux métalliques :

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_{eq} = J_2(s_{ij})$$

On considère un écrouissage isotrope du matériau.  $\sigma_0$  est la limite d'élasticité initiale du matériau

non trempé (limite d'élasticité initiale) ; elle est fonction de la température  $\theta$ . Soit  $R$  l'augmentation de la limite d'élasticité par l'érouissage du matériau, qui dépend de la température et de la déformation irréversible  $p$  (déformation plastique ou viscoplastique cumulée qui représente le paramètre d'érouissage). La limite d'élasticité du matériau éroui s'écrit :

$$\sigma_y(p, \theta) = \sigma_0(\theta) + R(p, \theta) \text{ où } p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{eq}^p \cdot dt \text{ et } \dot{\varepsilon}_{eq}^p = \dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p}$$

Le modèle physique d'érouissage est complété par un terme de restauration. Ainsi, la création d'une déformation plastique sans restauration d'érouissage est affectée d'un terme de restauration qui dépend de la température, sachant que cet effet est thermiquement activé au-dessus de 600°C et que sa vitesse d'évolution augmente avec la température. Le modèle de restauration ainsi que les essais spécifiques permettant de caractériser les paramètres sont décrits dans [9] et [10].

### 3. Cadre de la campagne de simulation

#### 3.1. Principales tendances concernant l'état résiduel des soudures

La procédure R6 est un code international très proche de la norme britannique 7910 (et de son annexe Q pour l'évaluation des contraintes résiduelles) [12] [13]. L'application des règles du niveau 2 de la procédure R6 pour l'évaluation des contraintes résiduelles conduit à un certain conservatisme dans la définition du profil analytique des contraintes résiduelles axiales à travers les soudures circonférentielles bout à bout de tubes en acier inoxydable austénitique étudiées dans cet article, dont le rapport  $r/t$  ( $r$  étant le rayon de la tuyauterie et  $t$  son épaisseur) est proche de 4. La simulation numérique du soudage suivant les recommandations de la norme ISO [14] est l'option la plus industrielle pour obtenir de nombreuses prévisions réalistes des contraintes résiduelles d'une manière paramétrique, comme cela est proposé dans [5] pour des assemblages soudés similaires.

Pour la problématique de CSC, la contrainte résiduelle n'est pas la seule quantité mécanique à évaluer, l'érouissage est également important car les lois d'amorçage et de propagation utilisées pour la modélisation de la CSC (initiation, orientation et cinétique) dépendent à la fois de la contrainte et de l'érouissage [15]. L'érouissage ou la déformation plastique équivalente qui détermine la sensibilité du matériau à la fissuration par CSC sont implicitement calculés pendant la simulation numérique du soudage [16] et sont directement corrélés avec les mesures de dureté. Les règles de corrélation sont basées sur la même relation que celle établie dans [17] entre l'érouissage et la dureté sont illustrées dans la Figure 2.

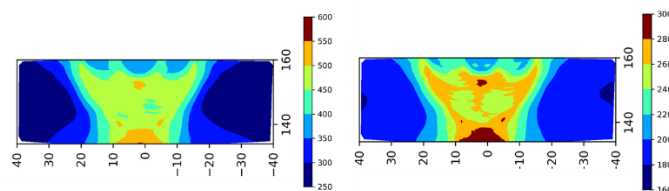


Figure 2 – Limite d'élasticité (en MPa) mise à jour dans la région simulée de la soudure et la ZATM (à gauche) et conversion en une carte de dureté HV0.5 (à droite).

Dans la littérature scientifique et technique, on trouve de nombreux travaux de simulation pour la détermination des CRS dans les soudures de métaux dissimilaires [18] dont les résultats sont consolidés par des benchmarks entre codes de calcul pour les besoins de l'industrie nucléaire [19]. Ainsi, la présence de contraintes de compression dans le sens axial dans la partie interne des tubes est

représentative des distributions de contraintes pour ce type d'assemblages réalisés par soudage à l'arc multipasse. Les rapports  $r/t$  pour les assemblages référencés ici sont compris entre 3,5 et 4,5.

### 3.2. Plan d'expérience numérique (DoE)

Dans cet article, les simulations sont décrites à l'aide de 4 paramètres indépendants : la combinaison rayon-épaisseur  $r - t$ , la puissance de soudage  $Q$ , la section moyenne du cordon  $s_b$  et la section du chanfrein  $S_g$  qui est équivalente à l'angle du chanfrein. Des modèles bidimensionnels axisymétriques sont considérés avec un coude d'un côté de la soudure, modélisé en augmentant la rigidité (c'est-à-dire l'épaisseur) et un tube de l'autre côté. A partir de ces paramètres, un maillage est automatiquement généré à l'aide de la plateforme open-source de simulation numérique Salome\_Meca [7] [21]. Un exemple de maillage est présenté dans la Figure 3. Cette figure montre les températures maximales atteintes lors de la simulation de soudage pour un assemblage de tuyaux de 10 pouces avec 17 cordons.

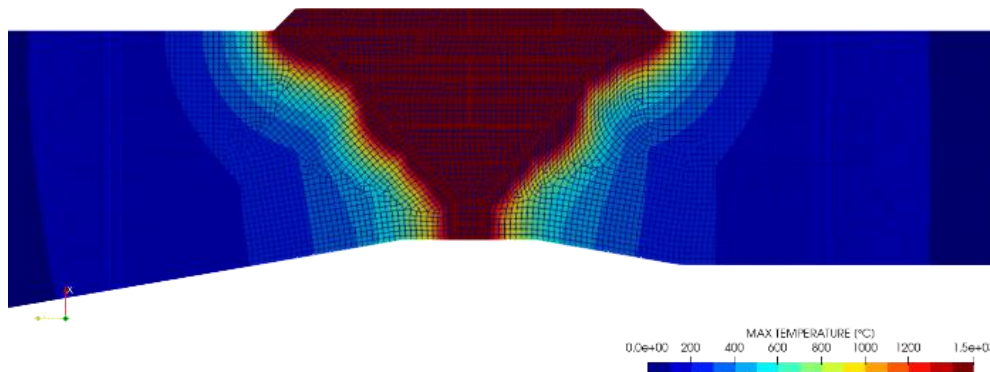


Figure 3 – Zoom sur le maillage 2D d'une soudure avec les iso-contours de température maximaux.

Les plages de variation des paramètres sont présentées dans le Tableau 1 pour les configurations de tuyauterie de taille normalisée 6, 8, 10, 12 et 14 pouces en Schedule 140. Les autres paramètres, tels que la vitesse de soudage, sont choisis en fonction des spécifications du procédé de soudage, conformément à la physique du soudage en ce qui concerne la zone fondue et aux règles d'experts sur le contrôle du cycle thermique de soudage (modélisation du mélange, mesures et abaques numériques spécifiques).

Dans cette étude, un échantillonnage Monte Carlo est utilisé pour explorer l'espace des paramètres. Pour cette étape, la bibliothèque open-source pour le traitement des incertitudes Openturns [23] a été utilisée. La simulation thermomécanique associée à chaque jeu de paramètres est réalisée sur 8 CPU, avec un temps de calcul compris entre 3 et 24 heures (temps de calcul total : 4 jours).

Le post-traitement des résultats de la simulation est effectué pour extraire des quantités spécifiques d'intérêt. Tout d'abord, les profils le long de l'épaisseur du tube des composantes de la contrainte résiduelle (contrainte axiale  $\sigma_{yy}$ , contrainte circonferentielle  $\sigma_{zz}$ , contrainte hydrostatique  $\sigma_h = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ ) et de l'écrouissage  $p$  près de la soudure sont extraits comme indiqué. En outre, les indicateurs statistiques (moyenne, médiane, écart-type, quantiles) de  $\sigma_h$  et  $p$  sont calculés à proximité de la paroi interne, près de l'axe de la soudure. Ces indicateurs sont utilisés pour la définition des critères de contrainte et d'écrouissage et comme données d'entraînement pour la configuration du modèle de substitution.

Tableau 1 – Paramètres, distribution associée et plage de variations.

Paramètres	Distribution
Couples rayon-épaisseur $r-t$ (mm)	$r - t = \{(75; 18), \dots, (160; 32)\}$
Puissance de soudage $Q$ (W)	$\mathcal{U}(1500,3500)$
Section du cordon $s_b$ (mm <sup>2</sup> )	$\mathcal{U}(16,40)$
Angle de la rainure $S_g$ (°)	$\mathcal{U}(35,47)$

Dans l'état brut de soudage, les résultats du DoE confirment un profil de contrainte résiduelle typique à travers la paroi du joint soudé. Il s'agit d'un profil de flexion coque qui place la moitié interne de la paroi du joint soudé et son voisinage en compression dans la direction axiale. Toutefois, des zones de traction peuvent apparaître dans la paroi interne proche de l'axe de la soudure. Cette vision établie sur les configurations particulières dans la première partie de l'article est ensuite complétée par un abaque numérique exhaustif permettant de couvrir toutes les soudures pour chaque couple rayon et épaisseur dans la plage de paramètre. Cet ensemble de simulations a montré la présence systématique de cette zone de compression, avec une certaine variabilité en fonction des conditions de soudage et de la géométrie (Figure 4).

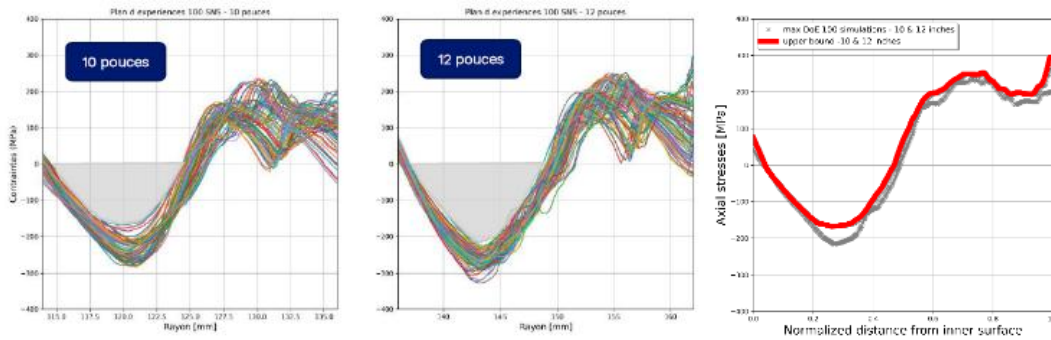


Figure 4 – Diamètres de 10 et 12 pouces : à gauche et au centre, profils de contraintes résiduelles axiales de soudage provenant des 100 simulations respectives ; à droite profil maximal des soudures.

#### 4. Métamodèle

Dans cette section, deux modèles de substitution sont construits afin de fournir un outil capable de classer un risque de fissuration par CSC sur des joints soudés en fonction de la géométrie des joints et des paramètres du procédé de soudage. Les résultats des métamodèles sont deux indicateurs qui peuvent être liés à l'initiation et à la propagation des fissures. L'expression du métamodèle est la suivante :

$$\sigma_h = \sum_{k=0}^K a_k \Psi_k(\underline{x}) + \varepsilon_\sigma \quad p = \sum_{j=0}^J a_j \Psi_j(\underline{x}) + \varepsilon_p$$

Avec  $\sigma_h$  la contrainte hydrostatique et  $p$  les déformations plastiques cumulées. En outre, les données d'entrée du métamodèle sont les suivantes :

$$\underline{x} = [t, S_g, \overline{s_b}, \overline{P_r}],$$

Avec  $\overline{s_b}$  la section transversale moyenne du cordon sur le joint soudé,  $\overline{P_r}$  le rapport de puissance (ou

Power Ratio) moyen, moyenné sur tous les cordons du joint soudé, et calculé à l'aide de la puissance de la torche  $Q$ , de la vitesse de soudage  $V_s$  et de la section transversale du cordon  $s_b$  :

$$\overline{P_r} = \frac{1}{N_{beads}} \sum_{k=1}^{N_{beads}} \frac{Q_k}{(V_s)_k (s_b)_k}.$$

Le chaos polynomial (PCE) [25][26] a été utilisé pour ajuster les métamodèles ci-dessus. Si les composantes du vecteur d'entrée  $\underline{x}$  sont supposées indépendantes et uniformément distribuées, les fonctions  $\Psi_k(\underline{x})$  et  $\Psi_j(\underline{x})$  correspondent à des polynômes de Legendre multivariés. Les coefficients des métamodèles  $a_k$  et  $a_j$  sont ajustés à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaires. Les autres hyperparamètres des métamodèles, tels que le degré maximal des polynômes multivariés ou la stratégie de troncature des coefficients, ont été déterminés grâce à une approche de validation croisée divisant l'ensemble de données initial de 500 résultats de simulation en un ensemble d'entraînement, un ensemble croisé et un ensemble de test contenant respectivement 66%, 17% et 17% des observations. De plus, la capacité des métamodèles ci-dessus à prédire les sorties  $\sigma_h$  et  $p$ , sans surajustement (ou overfitting), a été estimée à l'aide du coefficient de prédictivité Leave One Out  $Q_{LoO}^2$  [27].

On peut observer que les deux métamodèles sont très précis avec un RMSE de 0,003 % pour les prédictions de déformations plastiques cumulées et de 11 MPa pour la contrainte hydrostatique. Une fois validés, les métamodèles peuvent être massivement appelés en prenant des valeurs d'entrée à partir d'une grille très fine dans l'espace  $\underline{x}$ . Dans le présent travail, la section transversale moyenne des cordons  $\overline{s_b}$  est discrétisée de  $16 \text{ mm}^2$  à  $40 \text{ mm}^2$  en utilisant un pas de  $1 \text{ mm}^2$ . Le rapport de puissance moyen  $\overline{P_r}$  passe de  $30 \text{ J. mm}^{-3}$  à  $47 \text{ J. mm}^{-3}$  avec un pas de  $1 \text{ J. mm}^{-3}$ . Les limites de la surface des chanfreins dépendent de la taille du tuyau. Dans ce travail, nous ne présentons que les prédictions du métamodèle pour le diamètre de tuyaux de 10 pouces. Les bornes de la variable  $S_g$  sont [377,544] en  $\text{mm}^2$  avec un pas de  $5 \text{ mm}^2$ .

La discrétisation ci-dessus permet d'obtenir une grille contenant environ 20000 vecteurs d'entrée différents. L'appel des métamodèles ci-dessus sur tous les vecteurs d'entrée de la grille est presque instantané. On peut donc facilement construire des abaques numériques montrant l'évolution de  $p$  et  $\sigma_h$  en fonction des variations des entrées. Les valeurs de  $p$  et  $\sigma_h$  ne sont pas ponctuelles, il s'agit de valeurs moyennes estimées sur un volume élémentaire représentatif positionné dans la ZATM près de la paroi intérieure sur une profondeur et une largeur d'environ  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . Dans ces graphiques, l'échelle des couleurs correspond à une normalisation [0, 1] des déformations plastiques cumulées et de la contrainte hydrostatique :

$$\sigma_h^n = \frac{(\sigma_h - \sigma_h^{min})}{(\sigma_h^{max} - \sigma_h^{min})} \quad \text{et} \quad p^n = \frac{(p - p^{min})}{(p^{max} - p^{min})}.$$

Avec  $\sigma_h^{min} = -300 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_h^{max} = +300 \text{ MPa}$ ,  $p^{min} = 0 \%$ ,  $p^{max} = 34 \%$ . Une vue plus détaillée de l'évolution de la contrainte hydrostatique en fonction de  $\overline{s_b}$  et  $S_g$  est présentée dans la Figure 5. Dans cette carte, le diamètre du tube est fixé à 10 pouces et le rapport de puissance moyen fixé à  $\overline{P_r} = 38 \text{ J mm}^{-3}$ .

On peut observer que la contrainte hydrostatique est principalement influencée par la section des cordons, c'est-à-dire le nombre de cordons dans le joint soudé lorsque la surface du chanfrein est fixe (voir Figure 5). Une compression plus importante est obtenue dans la région d'intérêt lorsque le nombre de cordons augmente (c'est-à-dire lorsque la surface des cordons diminue, toutes choses égales par ailleurs). Par conséquent, la contrainte finale semble être directement influencée par le volume de métal soudé qui subit de multiples cycles de charge thermomécanique à haute température.

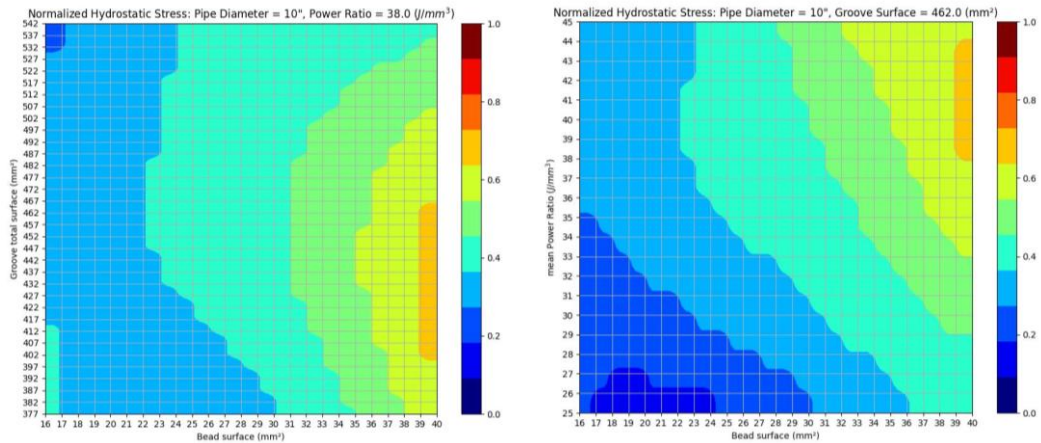


Figure 5 – Abaque numérique : (gauche) carte de la contrainte hydrostatique en fonction de  $\overline{s_b}$  et  $S_g$  avec  $2r = 10''$  et  $\overline{P_r} = 38 J mm^{-3}$  ; (droite) carte de la contrainte hydrostatique en fonction de  $\overline{s_b}$  et  $\overline{P_r}$  avec  $2r = 10''$  et  $S_g = 462 mm^2$ .

## 5. Résultats et discussion

Comme le montre l'une des configurations sur la Figure 6, les soudures étudiées à l'aide de la simulation numérique du soudage (SNS) présentent un état de contrainte axiale en compression sur la moitié de l'épaisseur à partir de la surface intérieure. L'intensité et l'extension des zones de traction et de compression dépendent des conditions de soudage.

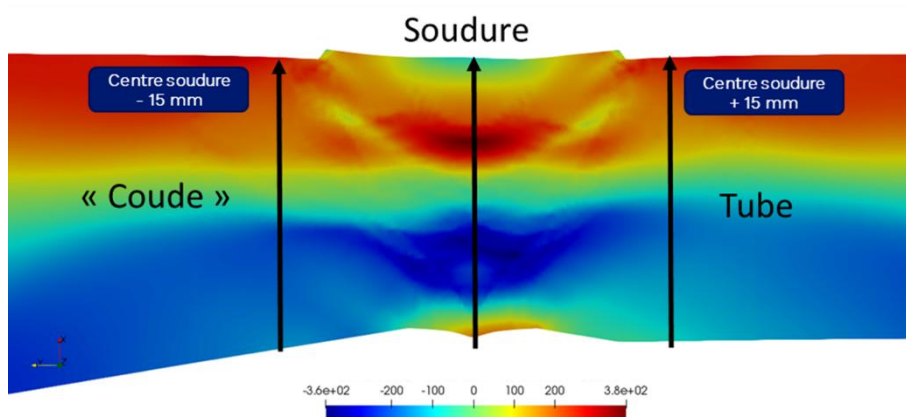


Figure 6 – Etat de contrainte axiale typique d'après les simulations réalisées.

En racine et à son voisinage, l'état de contrainte peut passer en traction à la fin de l'opération de soudage. La rigidité différente des deux côtés de la soudure (par exemple, une soudure sur un coude de tuyau) peut affecter la distribution des contraintes de traction dans cette zone. L'extension axiale de la zone de compression est significative sur la moitié de l'épaisseur à partir de la surface intérieure (étendue au-delà de la ZATM), comme le montre la Figure 7 représentée par le cadre orange. Les corrélations de dureté mesurées et simulées sont qualitativement établies pour évaluer la déformation plastique générée dans la soudure et dans la ZATM (intensité et distribution).

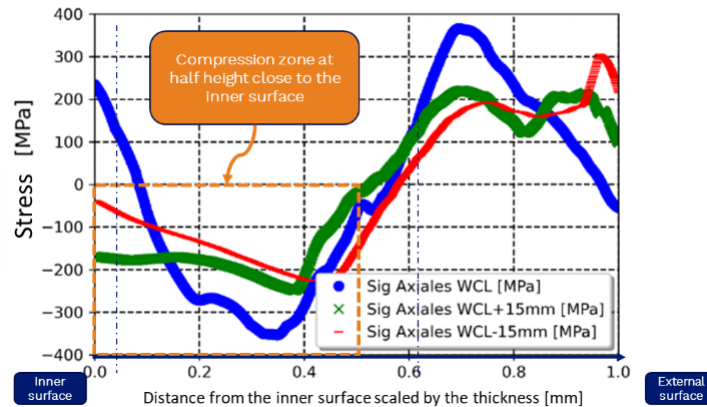


Figure 7 – Etat de contrainte axiale typique d'après la simulation.

Une pression (nominale ou d'essai) additionnée d'un chargement de température de fonctionnement maximale a peu d'impact sur la redistribution des contraintes résiduelles. Une charge plus élevée, jusqu'à 150 MPa en membrane, ne remet pas en cause la présence d'une zone de compression mais peut réduire l'extension de la zone. Cet effet est illustré dans la Figure 8 en convertissant les profils de contrainte dans une section d'intérêt (dans la ZATM près de la ligne de fusion) en un profil de facteur d'intensité des contraintes (SIF) pour différentes tailles de défauts à travers l'épaisseur ( $K_I$  en mode I selon les fonctions d'influence données dans [28] pour un défaut radial partant de la surface intérieure du tube). On voit clairement que l'ajout de chargements de service permet de raisonner sur des valeurs de  $K$  non nulles étant donné que lorsque seules les CRS sont prises en compte les valeurs de  $K$  peuvent être nulles dans une partie importante de la zone d'intérêt.

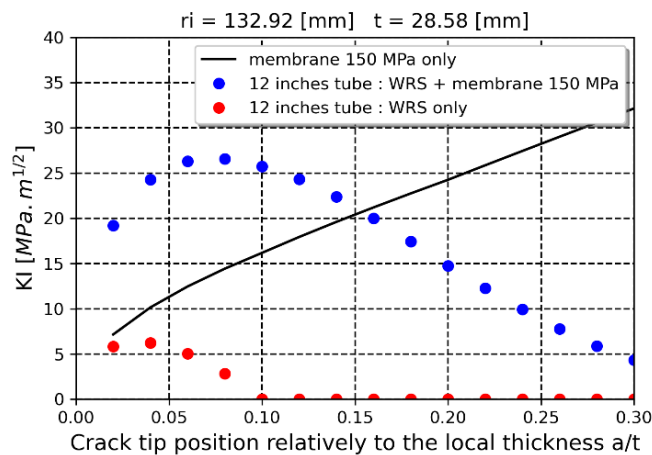


Figure 8 – Evolution du SIF (courbe noire : charge de membrane uniquement, points bleus : CRS élastiques avec charge de membrane, points rouges : CRS uniquement) en fonction de la profondeur de la fissure  $a$  depuis la paroi interne adimensionnée par l'épaisseur  $t$ .

En résumé, la SNS robuste permet d'obtenir des quantités calculées d'intérêt (en tout point du joint soudé) qui permettent d'évaluer le risque de CSC sur la base des éléments suivants :

- Contraintes résiduelles de soudage,
- Déformations locales et dureté (par post-traitement des déformations plastiques cumulées calculées),
- État résiduel et redistribution en service.

La classification du risque de fissuration par corrosion sous contrainte est alors définie par un ensemble de deux indicateurs qui peuvent être liés à la contrainte, à l'écrouissage près de la surface et à la contrainte, à l'écrouissage dans le volume. La prise en compte des chargements en service en plus de la contrainte résiduelle de soudage rend l'analyse du facteur d'intensité de contrainte plus pertinente, car elle donne des valeurs de SIF strictement positives qui peuvent être post-traitées pour une analyse de sensibilité au procédé de soudage, à la charge en service et à la température.

## 6. Conclusion

Des simulations robustes de SNS couplées à des méthodes basées sur la modélisation de substitution fournissent un outil qui permet d'évaluer de manière paramétrique les quantités mécaniques qui influencent la CSC pour un grand nombre de configurations de soudage en temps quasi-réel. L'intérêt pour l'industrie de déployer de telles méthodes réside dans le fait qu'il est coûteux et fastidieux d'effectuer des simulations pour chacune des soudures à évaluer. Ce travail montre qu'il est possible, avec un nombre réduit de simulations, d'évaluer comment la fissuration par corrosion sous contrainte est influencée par certaines quantités d'intérêt. L'évaluation des scénarios de fissuration en service peut être réalisée par des simulations de CSC [15] où les états résiduels calculés avec le SNS sont utilisés comme données d'entrée. Cette méthode peut être étendue à tout type de configuration de soudure [29].

## Références

- [1] P. Duranton, J. Devaux, V. Robin, P. Gilles, J.-M., Bergheau, 3D modelling of multipass welding of a 316L stainless steel pipe, *J. Mat. Proc. Tech.* 153-154, 457-463, 2004.
- [2] L. Depradeux, F. Rossillon, A Time Saving Method to Compute Multi-Pass Weld Residual Stresses, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication), July 2013, DOI : 10.1115/PVP2013-97239.
- [3] P. Le Delliou, D. Moinereau, M. Bourgeois, S. Szávai, Projet européen ATLAS+ : Status of the WP1 Relative to the Experimental Program on Pipes and Specimens, DOI:10.1115/PVP2019-93505, ASME 2019 Pressure Vessels & Piping Conference, juillet 2019.
- [4] A. Blouin, S. Marie, F. Tankoua, et T. Bolinder, Projet européen ATLAS+ : Prévion des grandes déchirures ductiles dans les conduites austénitiques à l'aide d'une approche locale, PVP2022-84848 Paper No : PVP2022-84848, V04AT06A038 ; 10 pages, <https://doi.org/10.1115/PVP2022-84848> Publié en ligne : 4 novembre 2022.
- [5] L. Portelette, J.-C. Roux, V. Robin et E. Feulvarch, A Gaussian surrogate model for residual stresses induced by orbital multi-pass TIG welding, *Computers & Structures*, Volume 183, pages 27-37, 15 avril 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.01.009>.
- [6] Electricité de France, Finite element code-aster : Analyse des Structures et Thermomécanique pour les Etudes et la Recherche, Open source sur [www.code-aster.org](http://www.code-aster.org), 1989-2023.
- [7] Electricité de France, Note d'utilisation pour les calculs thermo-métallo-mécaniques sur les aciers, manuel code-aster, U2.03.04, 2023.
- [8] J. Delmas And A. Assire, Salome-Meca : une plate-forme au service de la simulation mécanique, 10e colloque national en calcul des structures, Giens, France, May 2011, url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-0059274>.
- [9] Rapport EPRI - Materials Reliability Program : Finite-Element Model Validation for Dissimilar Metal Butt-Welds (MRP-316), Volume 2, 2015.
- [10] S. Hendili, L. Le Gratiet, M. Abbas, Un nouveau modèle simplifié de la restauration d'écrouissage utilisé

dans la simulation numérique du soudage, CSMA 2017, 13ème Colloque National en Calcul des Structures, Mai 2017.

- [11] L. Depradeux, R. Coquard, Influence of viscoplasticity, hardening, and annealing effects during the welding of a three-pass slot weld (NET-TG4 round robin), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 164, pp. 39-54, 2008.
- [12] BS7910:2013 Guide des méthodes d'évaluation de l'acceptabilité des défauts dans les structures métalliques. Londres : British Standards Institution ; 2013.
- [13] Procédure R6 révision 4, évaluation de l'intégrité des structures contenant des défauts. British Energy Generation Ltd ; 2013.
- [14] ISO/TS 18166:2016, Simulation numérique de soudage - Exécution et documentation, 2015.
- [15] T. Couvant, C. Varé, J.M. Frund, S. Leclercq, Y. Thébault, N. Etchegaray, J. Delmas, Susceptibility to SCC of cold work austenitic stainless steels in non-polluted primary PWR environment, FONTEVRAUD 10, September 19 to 22, 2022, Avignon, France.
- [16] R. Lacroix, A. Brosse, S. Gallée, J-M. Bergheau, E. Jourden, V. Robin, Reduction of Strain Hardening Models After Manufacturing Simulation for Further Material Investigation and Surface Integrity Assessment, Paper No : PVP2016-63533 ; 6 pages, <https://doi.org/10.1115/PVP2016-63533>, Published Online : 1er décembre 2016.
- [17] O. Muránsky et al, The influence of constitutive material models on accumulated plastic strain in finite element weld analyses, *International Journal of Solids and Structures* - Vol. 69, p.518-530 - 2015.
- [18] V. Robin, D. Nélias, M Zain-Ul-Abdein, D. Maisonnette, E. Feulvarch, J.C. Roux, J.M. Bergheau, H. Hamdi, F. Valiorgue, T. Mabrouki, J. Bruchon, D. Pino Munoz, G. Kermouche, J. Xie, H. Walter-Le-Berre, Y. Ichikawa, K Ogawa, S. Drapier, *Thermomechanical Industrial Processes - Modeling and Numerical Simulation*, iSTE Wiley Publishing, édité par J.M. Bergheau, 2014, ISBN 978-1-848213-58-6, pages 1-74.
- [19] V. Robin, S. Hendili, J. Delmas, O. Doyen, H. Pommier, A. Brosse, F. Gommez, Benchmark in Computational Welding Mechanics to Model Residual Stresses in Weldments, ECRS10, 2018.
- [20] S. Hilal, Thermo-mechanical modelling of the Wire Arc Additive Manufacturing process (WAAM) ; thèse de doctorat, Mécanique des matériaux, Université Paris sciences et lettres, 2022.
- [21] J. Delmas, S. Belouah, D. Borel, S. Hendili, V. Robin, Open-source numerical simulation software and skill-modules for welding simulation, The 12th International Seminar Numerical Analysis of Weldability, 23-26 septembre 2018, Gratz, Autriche.
- [22] D. McKay, R. J. Beckman et W. J. Conover. A comparison of three methods for selection values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2):239-245, 1979.
- [23] OpenTURNS, une initiative Open source pour le traitement des incertitudes, des risques et des statistiques, <https://openturns.github.io/www/index.html>.
- [24] B. Iooss et P. Lemaître. Une revue sur les méthodes d'analyse de sensibilité globale. *Gestion de l'incertitude dans la simulation-optimisation des systèmes complexes* ; Springer ; (2015) : 101-122.
- [25] N. Wiener, The homogeneous chaos. *American Journal of Mathematics*, (1938). 60(4), 897-936.
- [26] M. Berveiller, B. Sudret et M. Lemaire. Éléments finis stochastiques : une approche non intrusive par régression. *European Journal of Computational Mechanics/Revue Européenne de Mécanique Numérique* 15.1-3 (2006) : 81-92.
- [27] C. Demay, B. Iooss, L. Le Gratiet et A. Marrel. Sélection de modèles basée sur des critères de validation pour la régression de processus gaussiens : An application with highlights on the predictive variance. *Quality and Reliability Engineering International* 38.3 (2022) : 1482-1500.
- [28] RSE-M 2020, Règles de contrôle en service des composants mécaniques des îlots nucléaires REP, AFCEN, France.
- [29] T. Couvant, B.C. N'Guyen, D. Albrecht, E. Visse, L. Arasse-Amazou, 'Simulating the susceptibility to IGSCC of Bottom Mounted Instrumentation nozzles', Fontevraud 10 International Conference, Avignon (France), 2022.