

## Pipeweld : un outil de simulation numérique capitalisant plus de 20 ans de recherche en soudage

J. Delmas<sup>1</sup>, S. Hendili<sup>1</sup>, S. Hilal<sup>1</sup>, P. Pereira Alvarez<sup>1</sup> et V. Robin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electricité de France R&D, Chatou, France, {josselin.delmas, sofiane.hendili, sami.hilal, pablo.pereira-alvarez}@edf.fr

<sup>2</sup>Electricité de France Direction Technique, Lyon, France, vincent.robin@edf.fr

---

**Résumé** — Dans l'industrie nucléaire, la modélisation numérique des processus de soudage est devenue un outil essentiel pour la compréhension et la prise de décision. Elle est utilisée pour évaluer l'impact du soudage sur les mécanismes de dégradation et pour accélérer le développement et la qualification des techniques de soudage et de réparation. La mécanique computationnelle du soudage, qui implique la modélisation des effets du soudage à l'état solide sur le matériau de base et le métal soudé, tels que les champs de température, l'évolution de la microstructure et la distribution des contraintes et des déformations, répond à cet objectif.

Dans ce contexte, la suite logicielle Pipeweld a consolidé plus de deux décennies de recherche sur le soudage et sa modélisation numérique. Basé sur code-aster et Salome\_Meca, des logiciels numériques développés par Électricité de France, Pipeweld permet de prédire les états de contrainte résiduelle pour l'évaluation de la durée de vie des composants et l'optimisation de la qualification des processus.

**Mots clefs** — Contraintes résiduelles de soudage, soudage multipasse, simulation numérique du soudage.

---

### 1. La modélisation du soudage

Du point de vue de la mécanique des milieux continus, la simulation numérique du soudage permet de prédire l'état mécanique résiduel d'un assemblage soudé en évaluant la répartition des contraintes résiduelles, des déformations et de l'écrouissage. Cet état résiduel est intrinsèquement lié à l'ensemble de l'historique thermique et mécanique du processus de soudage. Par conséquent, son évaluation nécessite le calcul de l'équilibre thermomécanique de la structure soudée tout au long de l'opération de soudage. L'énergie apportée par le soudage se propage à travers la structure principalement par conduction thermique. La simulation numérique permet de prédire l'évolution de la température en tout point de la structure, résultant de cette diffusion thermique. À l'échelle de la structure, le comportement thermique à chaque étape de la séquence de soudage est caractérisé par des gradients de température spatiaux, qui sont les principaux facteurs déterminants de la réponse mécanique du composant. Ces gradients thermiques induisent des gradients de déformation thermique, entraînant des incompatibilités de déformation qui génèrent des contraintes internes, en particulier dans les zones proches de la soudure, comme l'illustre la modélisation numérique [1]. Ces contraintes internes provoquent une déformation plastique du matériau, qui s'accumule sous forme d'écrouissage tout au long du processus de soudage. Le couplage et l'interaction des phénomènes physiques décrits ci-dessus sont illustrés sur la figure 1.

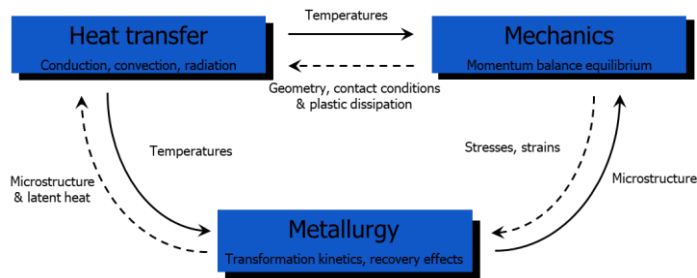


Figure 1 – Couplage et interaction pour l'évaluation des CRS : transferts de chaleur, phénomènes métallurgiques et conséquences mécaniques.

L'évaluation numérique de l'état résiduel dans les soudures nécessite de prendre en compte les phénomènes physiques décrits précédemment. Ces phénomènes sont régis par un ensemble d'équations qui sont résolues numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM). Les paramètres qui alimentent ces équations et définissent chaque configuration de soudage spécifique sont identifiés grâce à l'analyse des descriptifs de mode opératoire de soudage (DMOS). Comme pour toute méthode numérique, il est nécessaire de discrétiser à la fois le temps physique et l'espace physique. Ces discrétisations temporelles et spatiales doivent être affinées afin de capturer avec précision les gradients thermiques qui déterminent les quantités physiques d'intérêt.

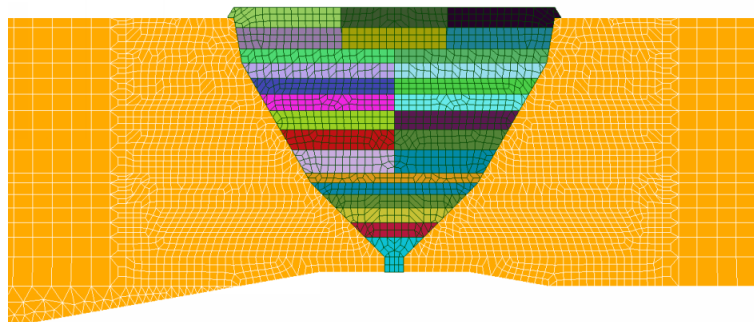


Figure 2 – Exemple de maillage 2D d'une soudure bout à bout avec chaque cordon de soudure dans une couleur différente.

L'assemblage des composants d'intérêt, tels que les tuyauteries à paroi épaisse (épaisseur >10 mm), est généralement réalisé à l'aide d'un soudage à passes multiples. La simulation de telles opérations nécessite de tenir compte d'une géométrie en évolution dynamique, qui change en fonction de la séquence de remplissage du chanfrein de l'assemblage à souder. La géométrie initiale est constituée de deux composants chanfreinés alignés bout à bout. Cette géométrie évolue à chaque séquence de soudage, à mesure que des cordons de soudure sont progressivement ajoutés pour remplir le cordon (illustré sur la figure 2). La position et les dimensions de chaque cordon de soudure sont déterminées en fonction des paramètres opératoire de la séquence de soudage et du diamètre du métal d'apport utilisé.

## 1.2 Modélisation thermique

Le modèle thermique est utilisé pour simuler l'apport de chaleur pendant le soudage en le représentant comme une source de chaleur équivalente. Il permet d'analyser le transfert de chaleur au sein de la structure par conduction. L'évolution du champ thermique prédite par la simulation numérique est régie par les propriétés thermophysiques attribuées aux matériaux constitutifs de l'assemblage, ainsi que par les conditions aux limites tenant compte des échanges de chaleur par convection et par rayonnement avec l'environnement. La mise en œuvre du modèle thermique permet d'obtenir une distribution spatio-

temporelle de la température, fournissant ainsi des informations détaillées sur l'historique thermique de la structure soudée.

L'apport de chaleur est modélisé comme un flux volumique appliqué au cordon ou à la section de cordon. Sa répartition spatiale autour du cordon de soudure déposé est définie par des paramètres géométriques (répartition triangulaire ou double ellipsoïde [2-3-4]) et à partir d'heuristiques de soudage, en tenant compte :

- un taux de dilution d'environ 50 % pour la passe initiale (passe de fond),
- un taux de dilution d'environ 30 % pour toutes les passes suivantes.

Le profil spatial du flux thermique est donc régi par ces paramètres afin de refléter un dépôt d'énergie réaliste. Pour chaque séquence de soudage, la cohérence entre la puissance d'entrée réelle, calculée comme le produit du courant, de la tension et du rendement du procédé, et la puissance mise en œuvre dans le modèle numérique est systématiquement vérifiée afin de garantir la précision physique.

La conduction thermique au sein de l'assemblage est régie par deux paramètres dépendants du matériau : la conductivité thermique et la capacité thermique volumique (le produit de la capacité thermique spécifique,  $c_p$ , et de la densité,  $\rho$ ). Ces deux paramètres dépendent de la température, et il est essentiel de tenir compte de leur variation dans les simulations thermo-métallurgiques entièrement couplées, ce qui introduit une non-linéarité dans la solution du modèle thermique.

### 1.3 Modélisation 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 zone thermomécaniquement affectée pendant le soudage. La définition du chargement thermique est donc essentielle pour établir la contrainte à l'origine des contraintes résiduelles de soudage (CRS). Ces déformations thermiques sont compensées par la structure sous forme de déformations élastiques et inélastiques locales auxquelles se superposent des forces internes globales induites par les effets d'auto-bridage causés par les parties massives qui restent froides à l'échelle de la structure (effet diablo par exemple). Dans le soudage multipasse, les CRS proviennent donc de la succession de rétrécissements et d'expansions qui sont contrecarrés, voire bloqués, par les parties plus froides et donc plus rigides de l'assemblage.

L'évolution des contraintes résiduelles de soudage dépend donc du choix des lois reliant les contraintes et les déformations, qui peuvent être décomposées en une partie élastique, une déformation 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 écrouissage). À cet égard, la loi de comportement utilisée pour traduire la plasticité intègre des phénomènes de restauration de l'écrouissage caractérisés spécifiquement pour décrire le comportement des alliages qui ne présentent pas de transformation de phase à l'état solide pendant le soudage (alliages CFC à n'importe quelle température tels que les alliages à base de nickel ou les aciers inoxydables austénitiques) [5]. Il convient de noter qu'un couplage faible (enchaînement séquentiel d'analyses thermiques, métallurgiques et mécaniques à chaque passe de soudage) est suffisant pour déterminer les CRS des 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 deuxième invariant du tenseur de 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 écroui ; elle est fonction de la température  $\theta$ . Soit  $R$  l'augmentation de la limite d'élasticité par

écrouissage du matériau, qui dépend de la température et de la déformation irréversible  $p$  (déformation plastique ou viscoplastique cumulée qui représente le paramètre d'écrouissage). La limite d'élasticité du matériau écroui est écrite :

$$\sigma_y(p, \theta) = \sigma_0(\theta) + R(p, \theta),$$

$$\text{Où } p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{eq}^p \cdot dt \quad \text{et} \quad \dot{\varepsilon}_{eq}^p = \dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p}.$$

Le modèle d'écrouissage est complété par un terme de restauration. Ainsi, la création d'une déformation plastique sans restauration de l'écrouissage est affectée par un terme de restauration qui dépend de la température, sachant que cet effet est activé thermiquement au-dessus de 600 °C et que son taux d'évolution augmente avec la température. La restauration de l'écrouissage est modélisée par l'équation suivante :

$$\dot{r}(t) = \dot{p}(t) - k(\theta(t))(r(t) - r_\infty(\theta(t)))$$

Avec :

- $r$  : déformation plastique cumulée en tenant compte de la récupération de l'écrouissage,
- $k$  : coefficient qui caractérise la dynamique de la récupération en fonction de la température et qui dépend du matériau considéré,
- $r_\infty$  : coefficient qui caractérise la quantité seuil de déformation plastique irréversible, qui dépend de la température et du matériau considéré,
- $\langle x \rangle$  : partie positive de  $x$ .

Les deux coefficients  $k$  et  $r_\infty$ , définis ci-dessus, sont des paramètres matériaux caractérisés à partir d'essais spécifiques (voir [5]).

## 2. Processus de validation

La validation du modèle repose sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les mesures expérimentales effectuées sur deux types de maquettes. Les maquettes semi-industrielles sont conçues pour reproduire la complexité des opérations de soudage sans être spécifiques à un assemblage particulier. Pour ce type de modèle, il est très utile de disposer d'un grand nombre de mesures prises à l'aide de différentes méthodes, ainsi que de différentes simulations menées par différentes équipes. C'est pourquoi il est très utile de s'appuyer sur le réseau européen de normalisation des techniques neutroniques pour l'intégrité structurelle (NeT) [6]. En revanche, les maquettes industrielles sont développées pour ressembler étroitement aux composants réels, en tenant compte de facteurs tels que l'échelle, le nombre de passes de soudure et la configuration géométrique.

### 2.1 Maquettes semi-industrielles : contribution du réseau NeT

Le réseau européen pour la normalisation des techniques neutroniques pour l'intégrité structurelle vise à faire progresser les méthodes expérimentales et computationnelles, ainsi que les normes, pour la caractérisation précise des CRS. Créé en 2002, le NeT fonctionne grâce aux contributions en nature d'un large éventail de partenaires issus de l'industrie, du monde universitaire et des instituts de recherche. Chaque configuration étudiée au sein du réseau est gérée par un groupe de travail (TG) dédié, chargé de produire des maquettes, d'effectuer des mesures et des simulations, et d'interpréter les résultats. Les travaux du NeT ont donné lieu à environ 85 publications universitaires et ont soutenu plus de 10 thèses de doctorat dans des domaines scientifiques connexes. Deux numéros spéciaux de l'International Journal of Pressure Vessels and Piping, publiés en janvier 2009 et juillet 2018, ont notamment mis en avant les conclusions des groupes de travail TG1 et TG4, respectivement.

L'une des réalisations les plus importantes du NeT est d'avoir favorisé un consensus industriel international sur le développement de modèles numériques prédictifs et robustes pour les contraintes résiduelles, grâce à l'accès à des données expérimentales de haute qualité provenant de maquettes bien contrôlées, mesurées principalement de manière non destructive à l'aide de la diffraction neutronique. Les recherches menées par NeT ont joué un rôle clé dans l'élaboration du projet de norme internationale ISO 21432:2018 sur la détermination des contraintes résiduelles par diffraction neutronique et ont contribué à la norme ISO/TS 18166:2015 sur la simulation numérique du soudage, en particulier pour les applications nucléaires.

Les études du NeT sont motivées par la nécessité impérieuse d'assurer la sécurité et la fiabilité des composants soudés critiques dans le secteur nucléaire. Les résultats sont très pertinents pour l'industrie. EDF a souligné comment le NeT lui a permis de valider les prévisions numériques de contraintes dans le contexte de la gestion de la durée de vie et de la sûreté des centrales nucléaires. EDF s'intéresse particulièrement aux groupes de travail TG4 [7], TG6 [8, 9] et TG8 [10], qui se concentrent sur les applications liées au nucléaire.

## 2.2 Maquettes industrielles

Il est souvent nécessaire de disposer d'un modèle encore plus représentatif du type d'assemblage à étudier, compte tenu de la complexité de la géométrie et du procédé de soudage utilisé (et donc du nombre plus important de cordons de soudure). À cette fin, des modèles industriels peuvent être produits, qui seront plus complexes et plus coûteux à fabriquer [11]. Pour les assemblages de tuyaux en acier austénitique, nous présentons un exemple de modèle qui a été équipé de thermocouples afin d'évaluer les conditions thermiques subies par l'assemblage. De plus, des mesures de stéréo-corrélation ont été effectuées afin d'évaluer les déformations de l'assemblage.



Figure 3 – Maquette de tuyau en acier austénitique avec instrumentation par thermocouples et mouchetis pour l'analyse de corrélation stéréoscopique.

Enfin, des mesures de contraintes résiduelles sont effectuées dans l'épaisseur (diffraction des rayons X [12] et méthode du trou profond [13]) afin de caractériser l'état résiduel. La comparaison avec les simulations permet de valider l'approche numérique.

## 3. Pipeweld : un outil de capitalisation des connaissances issues de la recherche à une solution industrielle opérationnelle

Dans le cadre des processus de soudage et de réparation des composants du circuit primaire des réacteurs à eau pressurisée (REP), la suite logicielle Pipeweld a permis de capitaliser deux décennies de

recherche sur le soudage et sa modélisation numérique. Pipeweld est basé sur code-aster [14], un logiciel open source généraliste de simulation en mécanique et en analyse des structures développé par EDF depuis plus de 30 ans, embarqué dans la plateforme Salome-Meca [15], une plateforme polyvalente pour l'analyse mécanique qui offre toute la chaîne de calcul, de la CAO au post-traitement en passant par le maillage. Pipeweld permet de prédire l'état résiduel pour l'évaluation de la durée de vie et l'optimisation et la qualification des procédés de soudage. Le développement de Pipeweld a été lancé pour soutenir les simulations numériques de soudage (SNS) qui étaient essentielles pour les études menées dans le dossier corrosion sous contraintes (CSC) qu'a rencontré EDF à partir de 2021. Le développement de cet outil a été motivé par les besoins suivants :

- consolider et standardiser la méthodologie de simulation numérique du soudage (en 2D et 3D), initialement limitée à l'assemblage de tuyaux bout à bout ;
- faciliter la production des données d'entrée nécessaires, en particulier les maillages, à l'aide d'une approche paramétrique ;
- faciliter les études multiparamétriques ;
- faciliter le post-traitement des résultats et standardiser les sorties pour les quantités d'intérêt ;
- faciliter le transfert des résultats de simulation de soudage en tant que données d'entrée pour l'analyse CSC (initiation et propagation des fissures) ou la rupture fragile ;
- faciliter la création et l'enrichissement d'un dossier de vérification et de validation (V&V) ;
- fournir un cadre pour les études sous assurance qualité, obligatoire pour l'autorité de sûreté nucléaire.

L'ambition de l'outil Pipeweld est d'être adopté par les équipes d'ingénieurs comme un outil de calcul scientifique qualifié pour mener des études conformes aux pratiques industrielles établies dans le domaine. Ces pratiques sont définies dans plusieurs normes, notamment AWS [16] et ISO [17], ainsi que dans leurs adaptations pour une application dans le secteur nucléaire français, tel que le guide de bonnes pratiques produit dans le cadre de l'institut tri-partite (CEA-EDF-FRAMATOME) [18].

Pipeweld permet de réaliser des études robustes, couvrant l'ensemble de la chaîne de simulation, de la conception géométrique du cordon de soudure au post-traitement des résultats de simulation. Chaque étape du processus est traitée dans un sous-module dédié, comme l'illustre la figure 4.

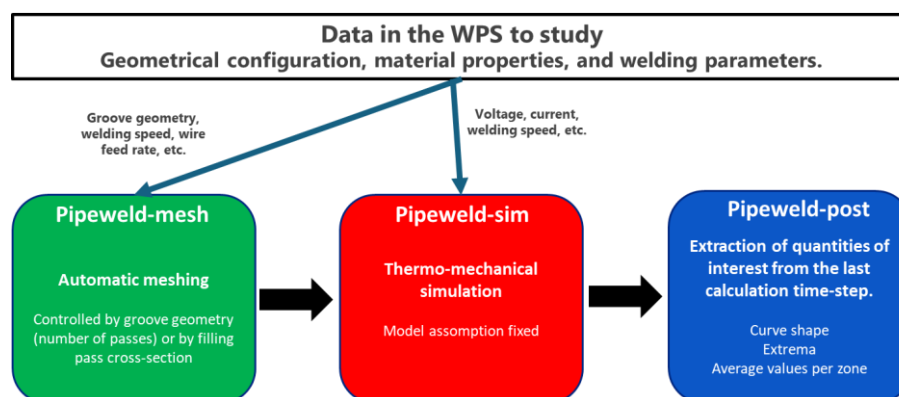


Figure 4 – Organigramme du workflow de l'outil Pipeweld.

## 4. Applications

### 4.1 Prédiction des contraintes résiduelles dans les soudures tuyauterie pour la classification des risques de corrosion sous contrainte

La prédiction 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. Pendant les opérations de soudage, des processus thermomécaniques et métallurgiques complexes se produisent et entraînent des changements microstructuraux tels que la restauration et la recristallisation dynamique. Ces changements microstructuraux induisent une modification de la dureté qui doit être prise en compte pour évaluer avec précision les contraintes résiduelles par des simulations numériques. Dans les conditions telles que soudées, les soudures bout à bout circonférentielles multipasses réalisées sur des tuyaux en acier inoxydable austénitique présentent un profil de contrainte résiduelle typique à travers la paroi du joint soudé. Un tel profil de flexion de la coque place la moitié interne de la paroi du joint soudé et ses environs en compression dans le sens axial. Cependant, des zones de traction peuvent apparaître dans la paroi interne près de l'axe de la soudure.

Une vaste campagne de simulation a été menée afin de couvrir différentes configurations de soudage et de confirmer ces tendances [19]. Ce graphique numérique est établi sur la base d'un plan d'expériences comprenant 100 simulations numériques de soudage par diamètre et par programme. Les paramètres sont les suivants :

- Diamètre, épaisseur,
- Procédés de soudage (GTAW, SMAW...),
- Forme de la rainure.

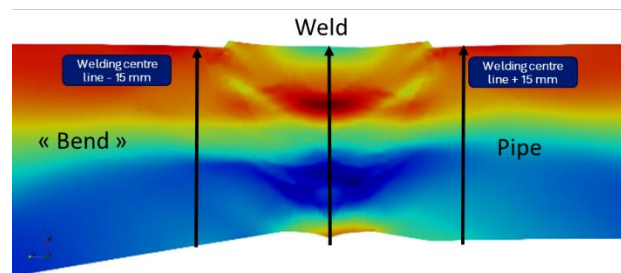


Figure 5 – État de contrainte axiale typique issu de la simulation [19].

Cette série de simulations montre la présence systématique d'une zone de compression sur la face interne, avec une certaine variabilité en fonction des conditions de soudage et de la géométrie. La classification du risque de CSC est ensuite définie par un ensemble de deux indicateurs pouvant être liés à l'initiation de la fissure (contrainte, écrouissage près de la surface) et à sa propagation (contrainte, écrouissage dans la masse).

#### 4.2 Prévision de l'état résiduel d'une buse centrale montée au fond

Les pénétrations de fond de cuve (PFC) sont des composants soudés situés dans la partie inférieure de la cuve d'un réacteur nucléaire, conçus pour permettre le passage d'instruments. Généralement fabriqués à partir d'alliages à base de nickel, ces composants sont soudés à la paroi de la cuve, qui est généralement en acier à faible teneur en carbone. En raison de leur fonction critique, les PFC doivent respecter des normes de sûreté strictes, notamment en termes d'intégrité des soudures et de sensibilité à la corrosion sous contrainte.

Pipeweld a été étendu pour permettre la modélisation 2D des configurations PFC, en tenant compte des défis spécifiques associés à ces assemblages, notamment la présence de plusieurs matériaux. La capacité de l'outil à gérer un large éventail de configurations PFC a été démontrée. La validité des résultats de la simulation a été évaluée par comparaison avec les données de référence disponibles, y compris des études numériques antérieures et des mesures expérimentales sur des maquettes. Un exemple illustratif est présenté à la figure 6. Dans ce cas, quatre matériaux ont été pris en compte :

l'Inconel 600 pour le tube BMN, l'acier 16MND5 du réacteur pour le fond de la cuve, l'Inconel 600 pour le beurrage et les cordons de soudure, et l'acier inoxydable 316L pour le revêtement de la cuve. La figure 6 compare les résultats d'une simulation 3D d'une PFC centrale (avec une inclinaison de 0°) avec les résultats 2D obtenus à l'aide de Pipeweld.

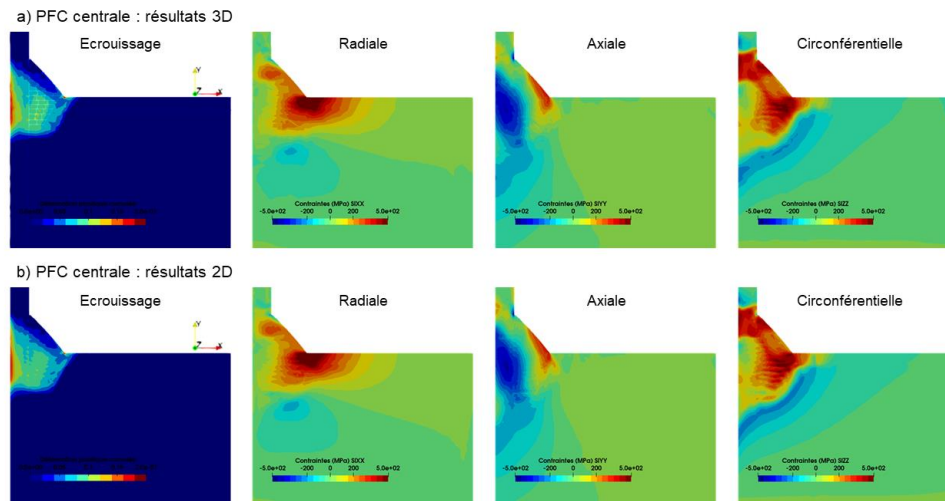


Figure 6 – Comparaison de l'état résiduel obtenu et de l'écroissage avec la modélisation 3D (en haut) et la modélisation 2D (en bas).

Une très bonne concordance est observée pour tous les composants, tant en termes de répartition des contraintes que d'écroissage. Cette étude de cas met en évidence la capacité de Pipeweld à réduire considérablement le temps nécessaire à la préparation des données de simulation et au post-traitement grâce à l'approche paramétrique, améliorant ainsi l'efficacité globale de la modélisation, tout en maintenant la cohérence méthodologique entre les différentes approches de simulation.

## 5. Conclusions et développements futurs

La suite logicielle Pipeweld représente une avancée significative dans le domaine de la simulation numérique du soudage pour les applications nucléaires. En consolidant plus de deux décennies de recherche et développement au sein d'EDF, Pipeweld offre un cadre robuste, standardisé et validé pour simuler les procédés de soudage et prédire les états de contraintes résiduelles. Son intégration avec des plateformes open source telles que code-aster et Salome\_Meca garantit la transparence méthodologique et l'adaptabilité à un large éventail de configurations industrielles.

Grâce à une validation rigoureuse par rapport à des maquettes semi-industrielles et industrielles, y compris les contributions du réseau NeT, Pipeweld a démontré une grande fidélité dans la reproduction de phénomènes thermomécaniques complexes. Ses capacités prédictives sont essentielles pour évaluer l'intégrité structurelle des composants exposés à des mécanismes de dégradation tels que la corrosion sous contrainte et pour soutenir les stratégies de gestion de la durée de vie dans les centrales nucléaires.

Les développements futurs se concentreront sur l'extension de l'applicabilité de Pipeweld à des géométries plus complexes (comme illustré dans [20] sur une soudure réparée), à des assemblages multi-matériaux (en particulier, des matériaux présentant une transformation métallurgique à l'état solide), à l'amélioration de l'automatisation de la configuration du modèle et du post-traitement. En outre, un dossier de vérification et de validation sera compilé sur la base de cas d'intérêt pour lesquels des mesures (en particulier les déformations et les contraintes résiduelles) sont disponibles ou, à défaut, des résultats

de simulation obtenus lors d'essais inter-laboratoires. Ces améliorations visent à faire de Pipeweld un outil d'ingénierie qualifié, conforme aux normes internationales et adapté à une utilisation dans des environnements critiques pour la sûreté.

## 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, pp. 457-463, 2004.
- [2] J. GOLDAK, M. BIBBY, J. MOORE, R. HOUSE, B. PATEL: 'Computer modeling of heat flow in welds', *Metall. Trans. B*, Volume 17, Issue 3, pp. 587-600, 1986.
- [3] J. GOLDAK, A. CHAKRAVARTI, M. BIBBY: 'A new finite element model for welding heat sources.' *Metall. Trans. B*, 15B 299-305, 1984.
- [4] F. ROSSILLON, D. ALBRECHT: 'Computation of the welding process: the engineering practice consolidated thanks to R&D tools', *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2016-63613, 2016.
- [5] S. HENDILI, L. LE GRATIET, M. ABBAS: 'Un nouveau modèle simplifié de la restauration d'écrouissage utilisé dans la simulation numérique du soudage', *Proceedings of the 13ème Colloque National en Calcul des Structures CSMA 2017*, 2017.
- [6] <https://www.net-network.eu/>
- [7] M C SMITH, A C SMITH, C OHMS and R C WIMPORY: 'The NeT Task Group 4 residual stress measurement and analysis round robin on a three-pass slot-welded plate specimen', *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 164, pp. 3-21, 2018.
- [8] AKRIVOS, V., ET AL.: 'A residual stress measurement and numerical analysis round robin on a three-pass slot nickel-base repair weld', *Procedia Manufacturing*, 51, pp. 779-786, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.109
- [9] P. PEREIRA ALVAREZ, J. DELMAS, S. HENDILI: 'NeT-TG6 nickel-based alloy simulation: calibration and experimental validation', *Proceedings of the ASME 2025 Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2025-155529, 2025.
- [10] V. ROBIN, S. HENDILI, J. DELMAS, J. DRAUP, Q. XIONG, M.C. SMITH, A. PAGET: 'NeT project Task Group 8: an international benchmark on residual stress assessment for welding repair', PVP2022 85083, *Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2022-85083, 2022.
- [11] T. H. PHAM ET AL.: 'Investigation of welding repairs impacts on SCC of austenitic stainless steel with experimental testing and numerical simulation', *Proceedings of the 22nd International Conference on Environmental Degradation*, August 10-14, Long Beach, USA, 2025.
- [12] I.C. NOYAN and J.B. COHEN: '*Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation*', Springer-Verlag, New York Inc., 1987.
- [13] R.H. LEGGATT, D.J. SMITH, S.D. SMITH, F. FAURE: 'Development and experimental validation of the Deep Hole method for residual stress measurement', *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 31, No. 3, p 177-186, 1996.
- [14] ELECTRICITÉ DE FRANCE: 'Finite element code-aster: Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research', Open source on [www.code-aster.org](http://www.code-aster.org), 1989-2025.
- [15] J. DELMAS, A. ASSIRE: 'Salome-Meca : une plate-forme au service de la simulation mécanique', *Proceedings of the 9ème Colloque National en Calcul des Structures CSMA 2009*, 2009. url: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-1413149>.
- [16] AWS 9.5 Guide for Verification and Validation in Computation Weld Mechanic, 2013.
- [17] CEN ISO/TS 18166:2016, Numerical welding simulation - Execution and documentation, 2015.
- [18] FRENCH NUCLEAR INSTITUTE: 'Guide méthodologique de simulation des contraintes résiduelles du soudage avec un outil de calcul scientifique employé dans la démonstration de sûreté couvrant l'îlot nucléaire', *Internal note*, DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2019-64183/A, 2019.
- [19] V. ROBIN, S. HENDILI, J. DELMAS, S. HILAL, D. IAMPETRO, M. ABBAS and S. JUTTEAU: 'Modelling of residual stresses in multi-pass pipe circumferential butt welds made of austenitic stainless steel to provide indicators for SCC risk classification', *Proceedings of the ASME 2023 Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2023-107448, 2023.
- [20] S. HILAL, S. HENDILI, J. DELMAS, P. PEREIRA ALVAREZ, V. ROBIN, E. DERNIAUX and T. BOUTIN: 'Prediction of residual stresses of repaired austenitic stainless steel welded joints', *Proceedings of the 14th International Seminar "Numerical Analysis of Weldability"*, 21 - 24 September, Graz - Castle Seggau, Austria, 2025.