



**Sujet de thèse – 2022 - 2025**

**Soudage et Réparation**

**Prédiction numérique rapide des contraintes résiduelles dans les composants métalliques après traitements thermiques locaux**

Laboratoires de Recherche : LaMCoS (CNRS UMR5259)

Encadrements (équipe laboratoire commun SnR du LaMCoS, INSA Lyon) :

- Nawfal BLAL (Directeur de thèse) [nawfal.blal@insa-lyon.fr](mailto:nawfal.blal@insa-lyon.fr) Tél : +33 (0) 4 72 43 82 84
- Anthony GRAVOUIL [anthony.gravouil@insa-lyon.fr](mailto:anthony.gravouil@insa-lyon.fr)
- Auriane PLATZER [auriane.platzer@insa-lyon.fr](mailto:auriane.platzer@insa-lyon.fr)

Entreprise: EDF (R&D/PRISME)

Encadrement :

- David IAMPIETRO [david.iampietro@edf](mailto:david.iampietro@edf)
- Josselin DELMAS [josselin.delmas@edf.fr](mailto:josselin.delmas@edf.fr)

Numéro et nom de l'école doctorale : ED162 : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

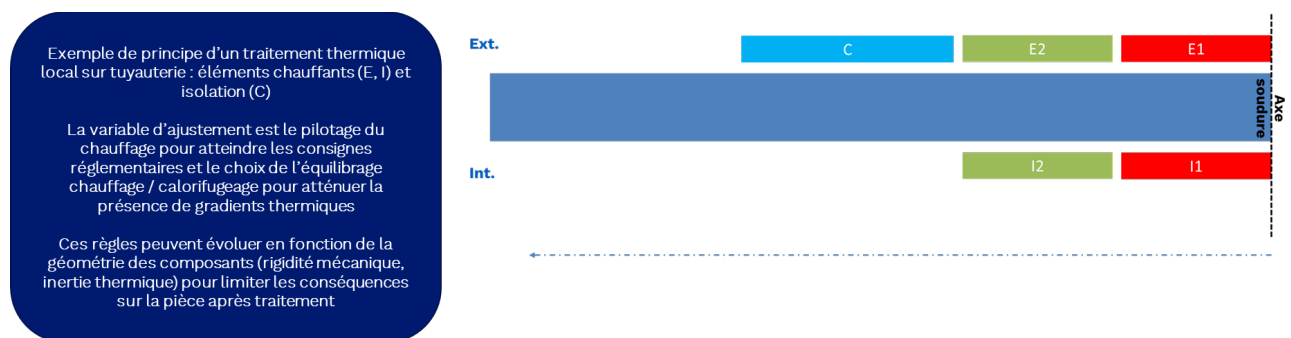
## **CONTEXTE**

Les contraintes résiduelles trouvent leur origine dans les diverses opérations de fabrication des composants industriels. C'est cependant le soudage, qui est le principal procédé d'assemblage final des équipements sous pression (tenue mécanique et étanchéité), qui induit le plus de conséquence sur l'intégrité des structures : qualité métallurgique, qualité de la tenue mécanique, activation ou facteur de dommages en service. En effet, la plupart des étapes intermédiaires avant assemblage comme les traitements thermiques après forgeage par exemple permettent en général de relaxer les contraintes résiduelles et d'homogénéiser le comportement du matériau. Les soudures, détensionnées ou non, sont donc une zone qui concentre le plus d'attention pour la conception, la fabrication et l'exploitation des Equipements Sous Pression (ESP). On parle de Contraintes Résiduelles de Soudage (CRS) pour préciser l'origine de cet état de contraintes pouvant conserver un caractère pérenne. Les CR induites par des gradients thermiques lors des traitements connexes aux opérations de soudage (Traitement Thermique de Détensionnement (TTD) locaux par exemple) sont souvent déportées dans des zones qualifiées de métal de base présentant généralement de meilleures caractéristiques matériaux mais potentiellement plus sollicitées en service. Par souci de généralisation, ces CR sont intégrées dans la notion de CRS bien que leur origine thermo-mécanique soit plutôt liée à un procédé connexe mal maîtrisé ou dont la mise en œuvre industrielle ne permet pas une optimisation vis-à-vis d'une réduction des contraintes résiduelles en dehors de la soudure. A noter que la manière de prédire les CR lors des TTD s'appuie historiquement sur les mêmes modèles que ceux utilisés pour le soudage : modèles Elasto-Visco-Plastiques (EVP) avec en option la prise en compte de l'évolution des phases métallurgiques [1], [2], [3].

La mise en œuvre des TTD locaux fait l'objet de préconisations dans certaines publications internationales NF ISO 17663, bulletins WRC 452/552, AWS10-10. Toutefois ces préconisations ne sont pas de nature à prévenir ou limiter la présence de contraintes résiduelles dans les zones de gradients thermiques en toute situation (géométrie, zones couvertes, asservissement et choix des dispositifs de chauffage local...). L'objectif du travail à mener est donc de parvenir, par le biais de la modélisation à des approches de premier niveau (i.e. non détaillées) pour réduire le risque d'apparition de contraintes résiduelles dans les zones de gradients thermiques tout en garantissant l'efficacité du TTD au niveau

de la soudure. L'approche numérique proposée devra permettre des optimisations sur la mise en œuvre des TTD sur le plan théorique (TTD locaux sans CR) et pratique (TTD locaux dans des conditions industrielles). Cette approche peut conduire à établir des règles métiers simples basées sur des considérations thermiques (inertie  $\sqrt{(rt)}$ ) et mécanique (raideur  $r/t$ ). La robustesse de cette approche sera établie en confrontant les préconisations issues de l'approche numérique à des configurations industrielles présentant les particularités des ESP ou sur la base d'analyses détaillées : forte épaisseur, tuyauterie et transition d'épaisseur, gros composant avec inertie thermique et raidisseur, piquage....

Conduit dans le cadre du laboratoire commun EDF – Framatome à l'INSA de Lyon, l'objectif du projet de recherche est d'établir une modélisation robuste du procédé à partir de paramètres essentiels identifiés dans une phase préliminaire de modélisation des phénomènes physiques impliqués. Cette modélisation devra intégrer les autres étapes majeures, bien maîtrisées du point de vue de la modélisation par les partenaires du laboratoire, pouvant affecter le matériau et l'assemblage quant à son état résiduel telle que le soudage avant traitement thermique. Le LaMCoS maîtrise bien la problématique autour de la modélisation des procédés. Le laboratoire a aussi une certaine expérience des techniques de réduction de modèles [4], [5]. Les matériaux visés, alliages 16MND5 / P355NH et métaux d'apport associés, ont également été étudié à l'INSA et par les partenaires industriels [6], [7], [8].



**Fig. 1:** Principe d'un TTD local sur tuyauterie.

## MOYENS

Le travail du doctorant sera supporté par une équipe académique pluridisciplinaire (simulation procédés, réduction de modèle en thermo-mécanique, mécanique numérique, conception mécanique et études thermiques...). Le comité de pilotage des travaux sera constitué par l'ensemble des chercheurs, académiques et industriels concernés par le sujet au sein de leur institution.

## DEROULEMENT DES TRAVAUX

### Année 1

consolidation modèle EVP code-aster pour analyse détaillée

### Année 2

choix d'une approche paramétrique basée sur la géométrie des ESP concernés + pratiques industrielles

### Année 3

méthode numérique pour une analyse paramétrique rapide + niveau de confiance vs. approche détaillée (optimisation pilotage thermique vs. CR).

## PARTENAIRES

Le travail se déroulera au sein de l'équipe de recherche du laboratoire commun SnR, Soudage et Réparation. Ce laboratoire piloté en commun par les trois partenaires contribue à l'étude et à la recherche pour la simulation numérique des procédés de fabrication et de réparation. Il est orienté autour de trois axes de recherche imbriqués :

- Amélioration et développement des techniques de simulations des procédés,
- Développement et compréhension de procédés innovants,
- Détermination et prédiction des effets induits par les procédés (matériau, durée de vie).

## ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE

Codes de calcul généralistes par éléments finis, Code\_Aster, Linux, Python.

## ENVIRONNEMENT D'ESSAIS

Laboratoire d'essais, atelier de soudage, utilisation de résultats d'essais instrumentés (thermique, déformation, contraintes) dans des conditions industrielles (procédés haute température). Examens métallurgiques avancés (microstructure, état de surface, contraintes résiduelles).

## LIEU

Basé à l'INSA de Lyon (temps 60%) au sein du laboratoire commun SnR. Prévoir des missions de longue durée pour assister à des essais et pour le développement de modèles sur les sites des industriels impliqués : Framatome Saint Marcel par exemple (BFB – de l'ordre de 5%), EDF R&D Chatou (IDF – de l'ordre de 35%).

## CANDIDATURE :

**Bac + 5 avec des compétences en Mécanique numérique**

**Merci d'envoyer votre CV et notes à [nawfal.blal@insa-lyon.fr](mailto:nawfal.blal@insa-lyon.fr)**

## REFERENCES :

- [1] J.B. Leblond, G. Mottet and J.C. Devaux, A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steels during phase transformations – I: Derivation of general relations, II: Study of classical plasticity for ideal-plastic phases, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 34, 1986, pages 395-432.
- [2] Y. Vincent, Simulation numérique des conséquences métallurgiques et mécaniques induites par une opération de soudage, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [3] Rapport EDF R&D 6125-3120-2018-02728-FR, Synthèse des améliorations de code\_aster et des méthodologies de calcul pour la simulation numérique du soudage au cours du projet SPAR-2, 2019.
- [4] Lu, Y., Blal, N., Gravouil, A. (2019) 'Datadriven HOPGD based computational vademecum for welding parameter identification', *Computational Mechanics* **64** (1), 47-62
- [5] Lu, Ye, 'Construction d'abaques numériques dédiés aux études paramétriques du procédé de soudage par des méthodes de réduction de modèles espace-temps', PhD Thesis, INSA Lyon, 2017.
- [6] Rapport EDF R&D 6125-3117-2020-03355-FR, Projet SAFER - Prédiction de l'état métallurgique et mécanique des soudures des CSP EPR : Simulation Thermo-Métallo-Mécanique du soudage avec code\_aster, 2020.
- [7] V. Robin, D. Nélias, M Zain-UI-Abdein, D. Maissonnette, 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, edited by J.M. Bergheau, 2014, ISBN 978-1-848213-58-6, pages 1-74.
- [8] 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.