Influence des contraintes résiduelles sur la propagation de fissures de fatigue dans des composants en acier 316L à l'échelle de la structure

Robin De Bosscher[1,a], Clémentine Jacquemoud[1], Cédric Gourdin[1] et Catherine Gardin[2]
[1] Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France
[2] INSTITUT P'/Physique et Mécanique des Matériaux/Endommagement et durabilité, ISAE-ENSMA Poitiers

Points d'intérêt.

- Développement d'un modèle numérique d'introduction de contraintes résiduelles dans un tube à l'échelle de la structure
- Réalisation d'une étude paramétrique pour assurer le pilotage du champ de contraintes et la stabilité du modèle
- Développement du banc expérimental d'introduction de contraintes et introduction de deux champs de contraintes différents dans deux tubes
- Développement d'un banc expérimental de flexion alternée sur structure tubulaire

1 Introduction et contexte de l'étude

Afin d'assurer la tenue en exploitation des composants de l'industrie nucléaire même en présence de défaut, il est nécessaire de se référer à des codes et référentiels de conception permettant leur dimensionnement. Pour les composants soudés, la présence de contraintes résiduelles issues du procédé de soudage [1] doit être prise en compte dans les analyses. Or même si l'influence des contraintes résiduelles est plutôt comprise dans le cas de la rupture fragile, et qu'elles sont généralement dissipées par l'importante plasticité dans le cas de la rupture ductile, la frontière à partir de laquelle les contraintes résiduelles deviennent négligeables n'est pas déterminée clairement [2] et beaucoup de questions se posent encore pour la propagation en fatigue.
Afin de valider les critères de dimensionnement de propagation de fissures par fatigue, tout en réduisant les incertitudes liées au passage des éprouvettes standards aux pièces à l'échelle de la structure, il est nécessaire de réaliser une campagne expérimentale sur des éprouvettes proches des structures réelles en présence de champs de contraintes résiduelles. Dans le cadre de l'application au domaine du nucléaire, ce travail qui fait l'objet d'une thèse se concentre sur l'acier inoxydable 316L.

En l'absence de composants soudés disponibles pour les études, le principe consistant à générer (mécaniquement ou thermiquement) des champs de contraintes résiduelles dans une pièce, pour ensuite étudier leur influence en fatigue, est une méthodologie prouvée pour l'analyse de l'amorçage en surface, mais reste encore limitée pour l'analyse en profondeur avec des champs de contraintes plus intenses comme ceux issus des processus de soudage. Par ailleurs, des campagnes expérimentales [3] ont déjà révélé les limites des conclusions tirées d'essais sur des éprouvettes de laboratoire standards notamment en présence de phénomènes dépendant de la géométrie comme la redistribution des contraintes avec la plasticité ou l'avancée de fissure, qui influencent fortement la durée de vie de la pièce [4].

En effet, les champs de contrainte résultant du processus de soudage sont peu contrôlables et souvent très dépendants de la géométrie de la pièce [5-6]. Dans un contexte de validation de critères de dimensionnement, il est intéressant de pouvoir contrôler la forme du champ de contraintes résiduelles, notamment pour développer des situations sévères pour le composant et étudier l'influence du changement brutal du signe des contraintes résiduelles sur la propagation en fatigue.

Dans cette optique, cette étude se focalise sur des éprouvettes tubulaires de grandes dimensions afin d'être représentatives des états de contrainte sur les composants réels. Les travaux ont été réalisés en deux phases, qui ont pour chacune d'elles abouti à la réalisation d'un dispositif expérimental spécifique, dimensionné par simulation numérique. Tout d'abord, la conception d'un banc d'essai dédié doit permettre de générer des champs de contraintes résiduelles dans ces tubes. Enfin, des essais de propagation de fissure en fatigue

[a] Auteur assurant la présentation : robin.debosscher@cea.fr

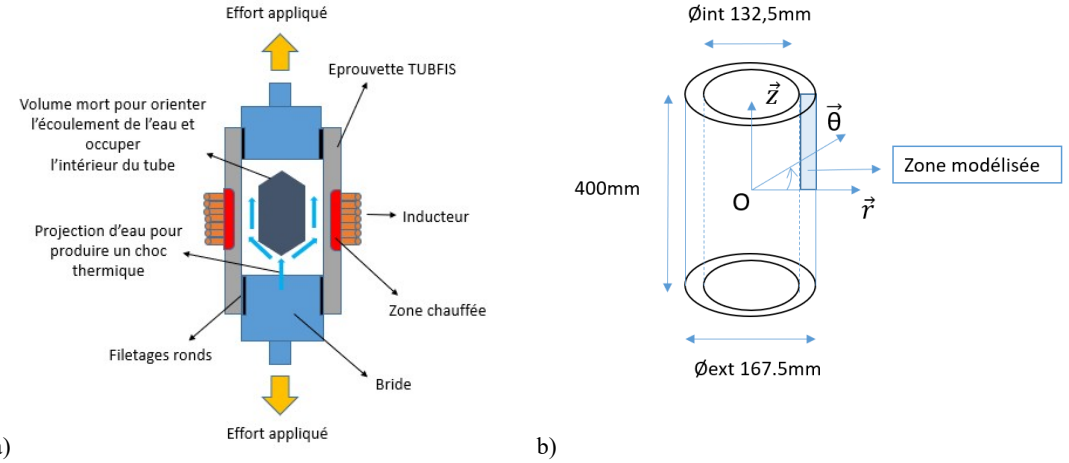
ont pour but d'étudier l'influence et les redistributions des contraintes résiduelles sur ces mêmes tubes directement à l'échelle de la structure.

2 Methodologie

Le matériau utilisé dans ce travail est issu d'un tube en acier inoxydable 316L fabriqué par TUBACEX selon la norme ASTM-ASME TP312 pour la fabrication de tube sans soudage. La géométrie des éprouvettes tubulaires étudiées dans ce travail est présentée sur la figure 1b.

La méthodologie développée pour générer des contraintes résiduelles dans le tube consiste à introduire une déformation plastique non-homogène par un choc thermique (fig. 1a). De cette déformation résulte un champ de contraintes résiduelles qui auto-équilibre la pièce [7]. Afin de dimensionner le banc d'essai et de s'assurer de la maîtrise du niveau du champ de contraintes résiduelles avec la méthodologie adoptée, un modèle numérique aux éléments finis a été développé sur CAST3M. L'objectif final de cette étude est de réaliser un essai de fatigue en flexion sur ce tube avec une fissure circonférentielle en présence de contraintes résiduelles afin d'avoir une validation expérimentale complète. Nous nous intéressons donc principalement aux contraintes axiales dans le tube car elles correspondent aux contraintes d'ouverture de la fissure qui sera située en surface extérieure.

Le banc expérimental d'introduction de contraintes résiduelles par choc thermique (fig. 2) consiste en 2 brides qui appliquent un effort de traction dans l'axe du tube, pendant que la surface extérieure est chauffée jusqu'à la température de 550 °C via un système de chauffage par induction (Fives Celes de 12 kW). Cette température permet un choc thermique suffisamment conséquent pour introduire des contraintes résiduelles mais reste sous la limite de 550 °C, ce qui permet de supposer le fluage comme négligeable. L'application d'un effort de traction permet d'augmenter la production de déformation plastique issue du choc thermique et d'ajouter un degré de liberté au système pour piloter le champ de contrainte résultant. Une fois la température de 550 °C atteinte en surface intérieure du tube, de l'eau à 5 °C est injectée à l'intérieur du tube pour produire le choc thermique. La surface intérieure du tube, en se contractant sous l'effet du refroidissement, se déforme plastiquement et s'allonge. L'incompatibilité géométrique produite par cette déformation localisée est à l'origine d'un champ de contraintes résiduelles [7] dont l'intensité et la distribution peuvent être contrôlées par le pilotage de la déformation plastique.



a) b)

Figure 1. a) Schéma du banc d'essai et b) dimensions du tube

Le modèle numérique considère une tranche axisymétrique 2D d'une moitié de tube. Afin d'éviter une modélisation complexe du champ magnétique produit par les inducteurs, la modélisation thermique est calibrée sur une maquette thermique identique à l'éprouvette tubulaire contenant 42 thermocouples en surface et dans l'épaisseur du tube. La pénétration de l'induction dans la pièce est déterminée par l'épaisseur de peau de valeur 2 mm pour notre configuration et matériau. Le refroidissement brutal est modélisé en imposant un refroidissement en surface interne du tube dont l'intensité est contrôlée par un coefficient de convection calibré numériquement via les données issues d'essais de chocs thermiques réalisés au préalable sur une maquette thermique. Les propriétés thermiques et mécaniques du matériau utilisées dans le modèle sont des fonctions de la température issues de la littérature ou déterminées à partir d'essais de traction réalisés dans notre laboratoire. Le matériau est modélisé en élasto-plasticité isotrope et le calcul réalisé en hypothèse de petits déplacements ; les effets dynamiques sont négligés.

Des résultats numériques d'études paramétriques ont permis d'identifier la hauteur de la zone chauffée comme un paramètre clé pour obtenir différents champs de contraintes. Cela revient à piloter la taille de la zone plastifiée, et donc indirectement l'énergie élastique enmagasinée dans l'éprouvette. Afin d'étudier deux champs de contraintes différents et de valider la méthodologie, deux essais de choc thermique ont été réalisés avec deux géométries d'inducteur différentes qui produisent deux champs thermiques distincts. Pendant l'essai (fig. 2a), des thermocouples en surface extérieure du tube permettent de suivre le champ de température et de reproduire celui-ci conforté par une calibration sur la maquette thermique.

Une collaboration réalisée avec l'Université de Bristol a permis de réaliser un deuxième modèle numérique sur Abaqus dont les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec le logiciel de calcul Cast3M, afin de s'assurer de la qualité des simulations. Les résultats sont identiques et très stables pour les deux modèles.

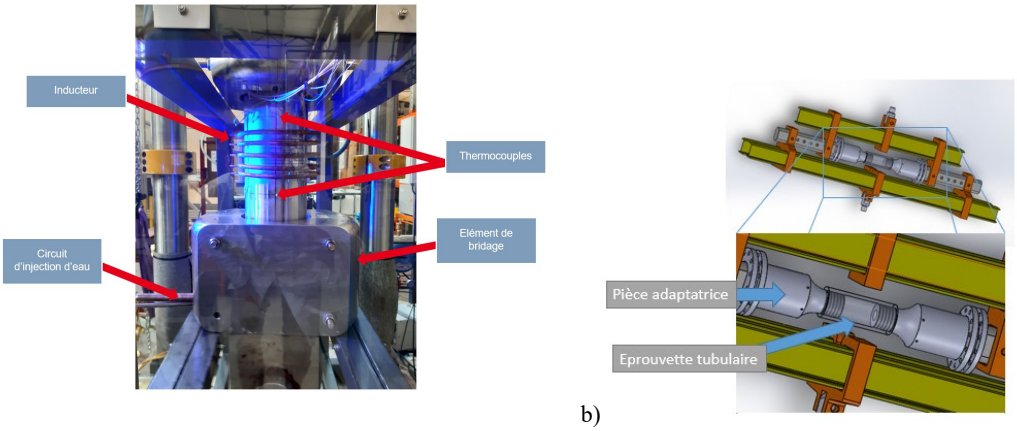


Figure 2. a) Présentation du banc d'essai d'introduction de contraintes résiduelles installé sur une machine INSTRON 250T, la lumière bleue correspond à une tentative de suivi de déformation en surface extérieure par corrélation d'image, cette configuration correspond à l'essai avec l'inducteur de grande taille. b) Assemblage SolidWorks du montage de flexion 8 points

Un nouveau banc de flexion expérimental (fig. 2b) a été développé au sein de notre laboratoire, et breveté par le CEA. Ce banc permet la réalisation d'essais de fatigue alternés, i.e. à rapports de charges négatifs, sur différentes géométries d'éprouvettes, par le changement d'une pièce adaptative. Il sera utilisé dans le cadre de ce travail pour réaliser trois essais de propagation de fissure par fatigue sur les deux tubes en présence des contraintes résiduelles introduites et sur un essai témoin avec un tube sans contraintes.

Au cours des essais de propagation de fissure en fatigue, la cinétique de fissuration est suivie à l'aide de plusieurs éléments d'instrumentation. Premièrement, des mesures de différence de potentiel sont réalisées depuis la surface externe du tube aux deux extrémités de la fissure (mesures de surface) et au milieu de celle-ci (mesures en fond de fissure). Celles-ci sont calibrées a posteriori via plusieurs marquages mécaniques, réalisés à différentes étapes de la propagation, qui permettent aussi de vérifier l'évolution de la courbure du front de fissure. De plus, une mesure d'ouverture de fissure par un clip permet de mesurer la complaisance de l'éprouvette au cours de l'essai. Finalement, des jauges à fils positionnées en surface externe du tube des deux côtés de la fissure permettent d'estimer précisément la cinétique de fissuration en surface. Le premier essai, sur le champ de contrainte du petit inducteur, est réalisé à rapport de charge 0.1 pour être comparé à un essai réalisé en l'absence de contraintes résiduelles sur éprouvette tubulaire en 316L de géométrie proche mais pas d'origine identique. Le deuxième essai est réalisé à rapport de charge -1.

3 Résultats et discussions

Les résultats présentés sur la figure 3 permettent de mettre en évidence la capacité du modèle numérique et du banc expérimental à générer deux champs de contraintes résiduelles distincts dans la structure étudiée. Ces champs de contraintes sont en compression en surface intérieure du tube, notamment les composantes axiales et circonférentielles, ce qui est cohérent avec le principe utilisé qui s'apparente à une trempe en surface interne. Dans le cas des contraintes axiales, le reste du ligament est soit en traction avec une intensité stable, (fig. 3a), ce qui correspond à une saturation de l'énergie élastique stockée dans la zone plastifiée mettant en traction l'intégralité du ligament restant, soit partiellement en traction avec un maximum à mi-épaisseur, (fig. 3b), correspondant à un état intermédiaire où l'énergie stockée ne met que partiellement le ligament en traction. Pour les contraintes circonférentielles, celles-ci semblent principalement contrôlées

par des aspects géométriques, et sont peu influencées par la géométrie de la zone chauffée, i.e. de l'inducteur. Les contraintes radiales sont faibles et identiques dans les deux procédés.

Ces champs de contrainte permettent d'étudier la propagation d'une fissure dans deux configurations différentes. Celle obtenue avec le petit inducteur (fig. 3b) est représentative du cas d'une soudure à faiseau d'électrons dans un tube en 316L [8]. Elle contient deux transitions brutales de signe et d'amplitude de la contrainte, ce qui permet d'étudier leurs effets sur la cinétique de fissuration. La deuxième configuration générée par le grand inducteur (fig. 3a) comporte une large zone, à l'extérieur du tube, avec un champ de contrainte en traction, nuisant à la résilience du matériau, permettant l'étude de l'accélération de la propagation avant la zone en compression.

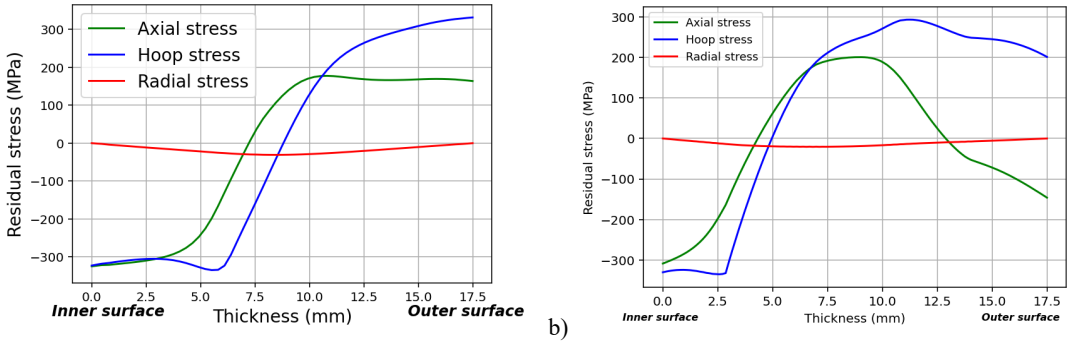


Figure 3. Champs de contraintes résiduelles à travers l'épaisseur calculés à mi-hauteur du tube avec a) le grand inducteur et b) le petit inducteur

4 Perspectives

Les deux tubes dans lesquels ont été introduites les contraintes résiduelles ont été entaillés avec une fissure semi-elliptique circonférentielle en surface externe. Les essais de propagation sont en cours sur le banc de flexion 8 points breveté par le CEA. La cinétique de fissuration en présence de contraintes résiduelles devrait donc pouvoir en partie être discutée ultérieurement.

Un raffinement du modèle numérique pour prendre en compte la texture du matériau par un modèle de plasticité cristalline est envisagé pour valider la comparaison entre les simulations numériques et des mesures de diffraction de neutrons réalisées avec la plateforme SALSA de l'Institut Laue-Langevin. Cela permettra de statuer sur les capacités précises de la méthodologie développée. Il faut noter que de nouvelles mesures de diffraction de neutrons sont prévues à la plateforme expérimentale SALSA, après les essais de fatigue, pour deux longueurs de propagation différentes sur les tubes afin d'étudier la redistribution des contraintes avec l'avancée de fissure et de les comparer à un modèle numérique 3D de propagation à travers les champs de contraintes introduits. L'étude de l'influence de la plasticité cyclique en pointe de fissure, modélisée par un modèle de Chaboche-Lemaître, en interaction avec le champ de contraintes résiduelles est aussi prévue.

Références

[1] J. A. Francis, H. K. D. H. B., Withers, P. J., Welding residual stresses in ferritic power plant steels. *Mater. Sci. Technol.* 2007, 23, 1009–1020.
[2] Chapuliot, S., Dahl, A., Marie, S., Ancelet, O., Consideration of welding residual stresses within the fracture mechanics assessment of nuclear components. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2024, 210, 105266.
[3] Deschênes, P.-A., Lanteigne, J., Verreman, Y., Paquet, D., Lévesque, J.-B., Brochu, M., A new experimental method to study the influence of welding residual stresses on fatigue crack propagation. *Int. J. Fatigue* 2017, 100, 444–452.
[4] Edwards, L., Residual Stresses VII, ECRS7. Trans Tech Publications Ltd 2006, pp. 363–372.
[5] Mathew, J., Moat, R. J., Paddea, S., Francis, J. A., Fitzpatrick, M. E., Bouchard, P. J., Through-Thickness Residual Stress Profiles in Austenitic Stainless Steel Welds: A Combined Experimental and Prediction Study. *Metall. Mater. Trans. A* 2017, 48, 6178–6191.
[6] Bouchard, P. J., Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2007, 84, 195–222.
[7] Withers, P. J., Bhadeshia, H. K. D. H., Residual stress. Part 2 – Nature and origins. *Mater. Sci. Technol.* 2001, 17, 366–375.

[8] Wang, J., Larrosa, N. O., Jacquemoud, C., Truman, C. E., Forward and inverse surrogate modelling of welding residual stress in electron beam welded 316L steel using multilayer perceptron networks. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2026, 222, 105826.