

ÉVALUATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES ASSEMBLAGES SOUDÉS ET AMÉLIORATION DE LEUR DURÉE DE VIE PAR TECHNIQUES DE PARACHEVEMENT

APPRAISAL OF RESIDUAL STRESSES WITHIN WELDED ASSEMBLY AND INCREASE OF THEIR FATIGUE LIFE USING FATIGUE TREATMENT METHODS

S. CHATAIGNER, L. DIENG, Y. FALAISE, M. GRASSET

LUNAM Université, IFSTTAR Nantes, Département Matériaux et Structures, Route de Bouaye
CS4, 44344 Bouguenais
sylvain.chataigner@ifsttar.fr, lamine.dieng@ifsttar.fr

1. INTRODUCTION

La soudure est la méthode d'assemblage la plus utilisée dans le domaine des structures métalliques. Dans le cas des ouvrages d'art, elle a remplacé les techniques de rivetage et de boulonnage depuis plus de trente ans. Les principales

pathologies de ces ouvrages sont bien connues: la corrosion et la fatigue [2]. Dans le cas de la corrosion, des actions spécifiques de maintenance existent et sont couramment pratiquées par les maîtres d'ouvrage comme les opérations de remise en peinture par exemple. Dans le cas de la fatigue, le sujet semble plus délicat car il est encore

difficile d'évaluer l'état de fatigue structurelle d'un ouvrage et car les opérations de maintenance pour cette thématique sont encore peu maîtrisées. Il est donc important de travailler sur cette pathologie et sur les méthodes de maintenance utilisées pour réduire les cinétiques d'endommagement des structures existantes.

Pour pouvoir appréhender la problématique de la fatigue, il convient de comprendre les enjeux de ce type de dégradation qui est liée à deux phénomènes le plus souvent concomitants : la concentration locale de contrainte due aux singularités géométriques (et qu'on retrouve donc dans tous les assemblages), et l'existence de contraintes résiduelles dues par exemple aux procédés de soudage dans le cas d'assemblages soudés. Il existe plusieurs méthodes d'amélioration en fatigue d'un assemblage ou d'une structure métallique appelées méthodes de parachèvement. Les principales et les plus connues sont le meulage, le grenaillage, le martelage, ou encore les traitements thermiques tels que la refusion TIG [3-4]. Chaque méthode a une action différente sur le matériau, le champ des contraintes résiduelles, et la géométrie qu'il est encore difficile de quantifier. Il semble en outre que leur efficacité dépende également de leurs conditions d'application.

Le travail présenté s'intéresse à deux méthodes de parachèvement couramment utilisées en usine (dans le domaine aéronautique principalement) pour augmenter la durée de vie des assemblages métalliques: le meulage et le grenaillage. L'application visée concerne les ouvrages d'art métalliques ainsi que les structures off-shore et les investigations expérimentales conduites s'attachent donc à l'utilisation de matériaux et de géométries rencontrées pour ces applications. La première partie présente les investigations expérimentales réalisées sur des assemblages soudés avant et après parachèvement. Elle comprend des mesures géométriques, des déterminations des contraintes résiduelles et des essais de fatigue. La seconde partie introduit une approche de modélisation aux éléments finis des opérations de soudage permettant d'évaluer les contraintes résiduelles induites par le procédé de soudure. Enfin, la dernière partie s'attache à comparer les résultats expérimentaux et numériques dans le cas des assemblages non parachévés.

2. INVESTIGATIONS EXPÉRIMENTALES

Il a été décidé de travailler sur un détail géométrique relativement représentatif rencontré sur les ouvrages métal-

liques. Le matériau acier est un S355 J2, les épaisseurs des plaques utilisées sont de 15 mm, et la géométrie testée est un assemblage soudé en T. Le procédé de soudage utilisé est le procédé MAG (Metal Active Gas) souvent utilisé pour la réalisation de structures métalliques. Les paramètres de soudure ont été enregistrés pendant les opérations et sont donnés dans [5]. Une seule et même plaque a été utilisée lors des opérations de fabrication pour obtenir des échantillons similaires après découpe de celle-ci. La soudure est réalisée en une seule passe un côté après l'autre du raidisseur à une vitesse de 7.5 mm/s. La géométrie finale des échantillons est similaire à celle utilisée dans [6] (cf. *Fig. 1*). La largeur des échantillons est de 100 mm au milieu de l'éprouvette, leur longueur de 900 mm, et la hauteur du raidisseur est de 100 mm.

Neuf échantillons similaires ont été réalisés: trois n'ont pas été parachévés, trois ont été meulés, et trois ont été grenaillés. Le meulage a consisté à retirer 0.5 à 0.8 mm de matière au niveau du pied de cordon de soudure pour obtenir un arrondissement de ce détail géométrique. Le grenaillage a consisté en la projection de billes métalliques. Cette méthode doit permettre de créer des contraintes résiduelles de compression en surface. Les opérations de grenaillage ont été réalisées par l'entreprise Metal Improvement Company (MIC).

2.1. Mesures géométriques

Des mesures géométriques ont été réalisées sur les différentes éprouvettes en utilisant des moules en silicone. Ceci a permis de relever l'empreinte des profils de soudage et de les comparer entre elles en utilisant un microscope optique 3D. Suite à ces mesures, il a été possible d'estimer un coefficient de concentration de contrainte K_t par la formule empirique donnée dans [7]. Les coefficients ainsi déterminés sont de 2.49 dans le cas des assemblages bruts, de 2.35 dans le cas des assemblages grenaillés et de 2.00 dans le cas des assemblages meulés. Bien que ces mesures n'aient été réalisées que sur un des trois échantillons pour chaque cas, elles sont cohérentes avec les attentes théoriques : on constate ainsi que le meulage est la méthode la plus efficace pour cet aspect et qu'elle permet de réduire K_t de plus de 20% dans le cas étudié.

2.2. Mesures des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles ont été mesurées par l'entreprise Meliad par diffraction aux rayons X. Il a été possible de déterminer des profils de contraintes résiduelles dans l'épaisseur (1 mm) près du pied de cordon de soudure (à

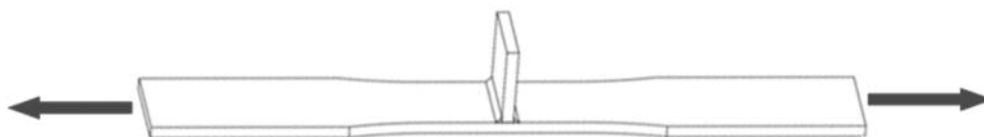


Figure 1 : Géométrie des échantillons et photo de trois éprouvettes

6 mm) en utilisant des abrasions chimiques successives. Les mesures ont été réalisées de part et d'autre de l'assemblage mais peu de différences ont été constatées. Les résultats obtenus sur un des côtés sont donnés en Fig. 2. Deux mesures différentes ont été réalisées : des contraintes longitudinales (direction de sollicitation de l'échantillon) et des contraintes transversales. Une mesure sur une plaque métallique de référence a également été effectuée afin de déterminer l'état initial de contrainte avant soudure. Il est important de constater que celui-ci n'est pas négligeable en peau de l'éprouvette. Les opérations de sablage et de laminage semblent ainsi avoir créé des contraintes de compression résiduelles.

Comme attendu, les opérations de soudure créent des contraintes de traction résiduelles au niveau du pied de cordon. Les opérations de meulage ne tendent pas à les diminuer mais seulement à retirer la partie supérieure pour laquelle elles sont les plus conséquentes. Il est intéressant de noter que ces opérations tendent à créer des contraintes de traction dans le sens transverse à cause de la direction de meulage. Les opérations de grenaillage quand à elles, permettent effectivement de créer des contraintes de compression résiduelles importantes et ce jusqu'à une profondeur de 1 mm.

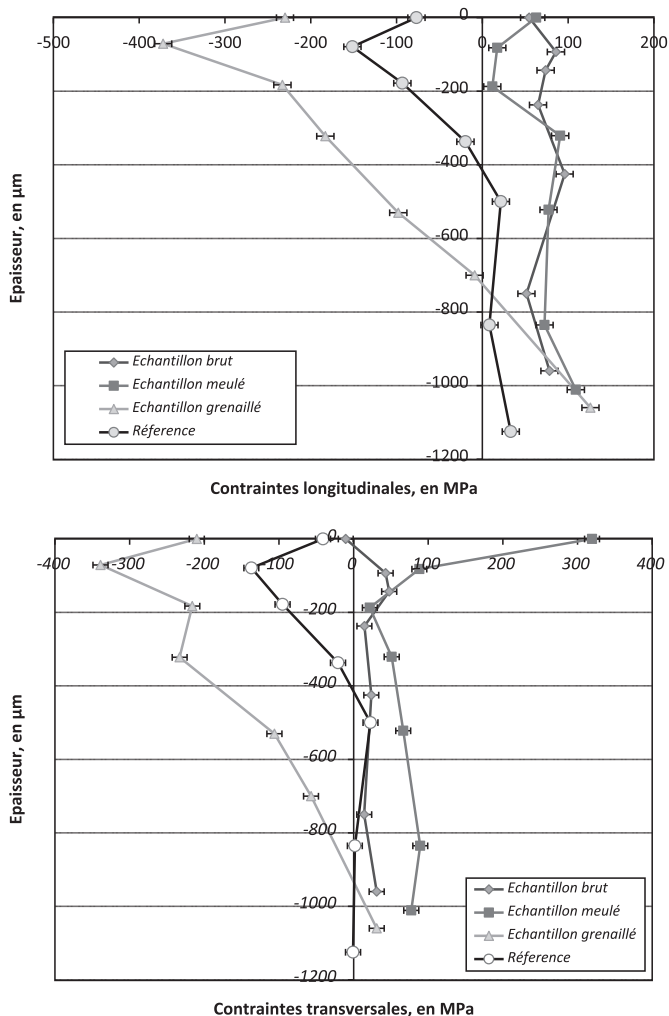


Figure 2 : Contraintes résiduelles mesurées dans le sens longitudinal sur la figure du dessus, et dans le sens transversal sur la figure du dessous pour les échantillons étudiés et la référence (avant soudure).

2.3. Évaluation des effets du parachèvement vis-à-vis de la fatigue

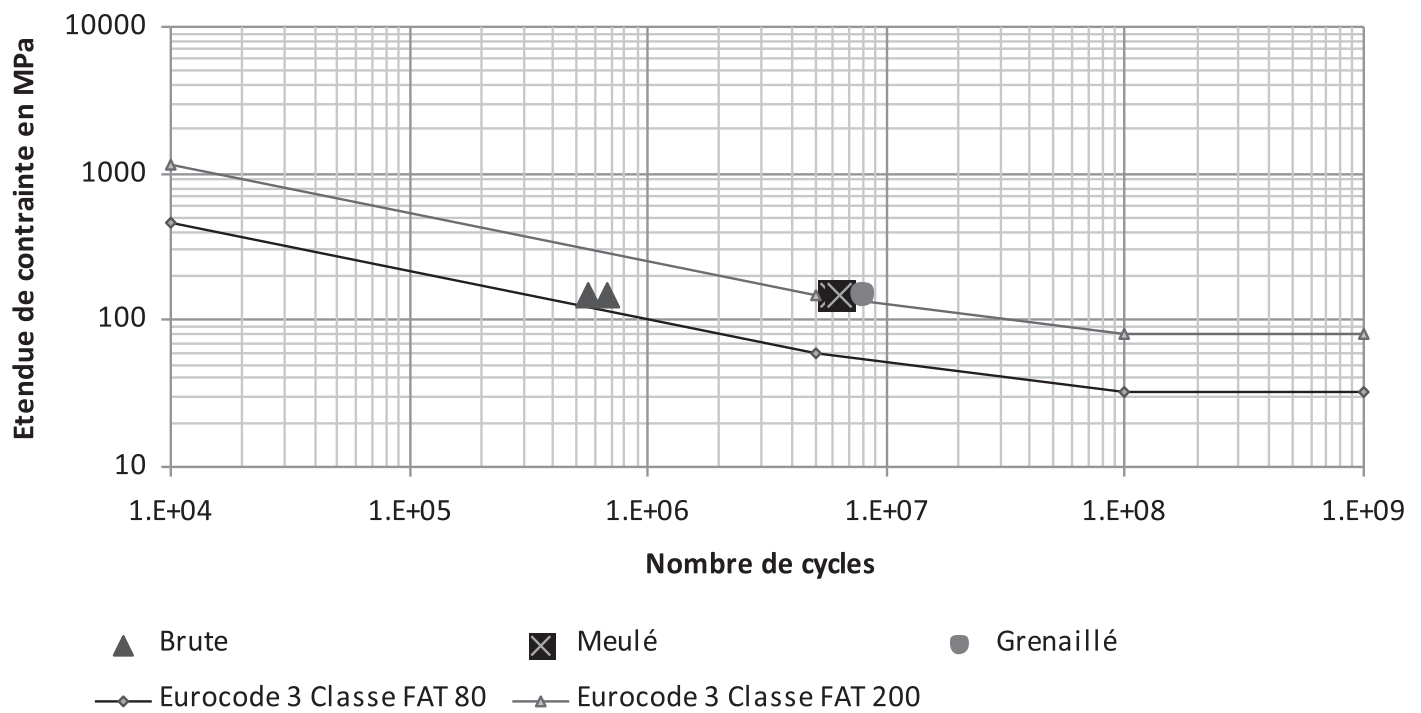
Deux essais de fatigue ont été réalisés pour chaque type d'échantillons pour estimer l'amélioration induite par les procédés de parachèvement. Ceux-ci ont été réalisés à amplitude de contrainte constante de 150 MPa avec un rapport de contrainte R de 0.1 afin de pouvoir comparer les résultats aux classes de fatigue de l'Eurocode [8]. La valeur du ratio R peut en effet affecter les résultats des essais [9]. La fréquence de sollicitation est de 10 Hz. Les premiers résultats sont donnés en Fig. 3. En ce qui concerne les échantillons non traités, des résultats répétables ont été obtenus. Ceux-ci sont proches des recommandations des eurocodes qui classifie le détail d'assemblage étudié en catégorie FAT 80. Deux échantillons meulés et un échantillon grenaillés ont pour le moment été testés mais n'ont pas rompu (les valeurs représentées en Fig. 3 sont donc des valeurs minimales). Pour les deux cas, on constate une amélioration du comportement en fatigue supérieur à un facteur multiplicatif de 10 pour la durée de vie (classement du détail au-delà de la classe FAT200).

Les deux méthodes de parachèvement ont donc montré leur efficacité pour l'augmentation de la durée de vie d'assemblages soudés non endommagés. Les mesures de contraintes résiduelles ont montré que les opérations de soudure créaient des contraintes de traction locales qui diminuent les performances en fatigue de l'assemblage. Si le meulage permet effectivement de retirer la partie supérieure de la tôle où les contraintes résiduelles de traction sont les plus importantes, il permet également de diminuer le coefficient de concentration de contraintes. Le grenaillage quand à lui agit surtout sur les contraintes résiduelles, et permet même d'obtenir des contraintes de compression dans la zone critique en pied de cordon.

3. INVESTIGATIONS NUMÉRIQUES

Afin de pouvoir appréhender les phénomènes intervenant pendant les opérations de soudure, une modélisation de ce procédé d'assemblage a été réalisée. L'outil utilisé est basé sur des éléments finis et développée sur le logiciel industriel Marc & Mentat de MSC [1]. Ce code propose en effet des outils adaptés tels que WELD FLUX, WELD PATH et WELD FILL. La méthode "birth and death" a été utilisée pour pouvoir générer des éléments simulant le métal d'apport ajouté pendant la modélisation de la soudure et la méthode de la double ellipse a été prise en compte pour la modélisation de la forme du flux de chaleur.

Il a été décidé d'adopter des hypothèses similaires aux hypothèses utilisées dans [10] en ce qui concerne la température maximale atteinte pendant les opérations de soudure (1200 °C) et la forme du bain de fusion. Les propriétés du métal de base et celles du matériau d'apport ont été considérées identiques et prises égales à celles du matériau C22 qui existe dans la base de données propre du logiciel Marc & Mentat. Celui-ci est proche du matériau S355 J2 de notre étude [11]. Ces propriétés prennent en



compte la dépendance en fonction de la température, du module d'Young, du coefficient d'expansion thermique, de la chaleur spécifique, de la conductivité thermique et du comportement en traction. La finesse du maillage utilisé est donnée en Fig. 4. Les résultats sont étudiés plus particulièrement au niveau des points A et B, au niveau respectivement de la première passe et de la seconde passe pendant l'opération de soudure. Ces points sont situés à 6 mm du pied de cordon de soudure afin de pouvoir comparer les résultats numériques aux mesures expérimentales en ce qui concerne les contraintes résiduelles.

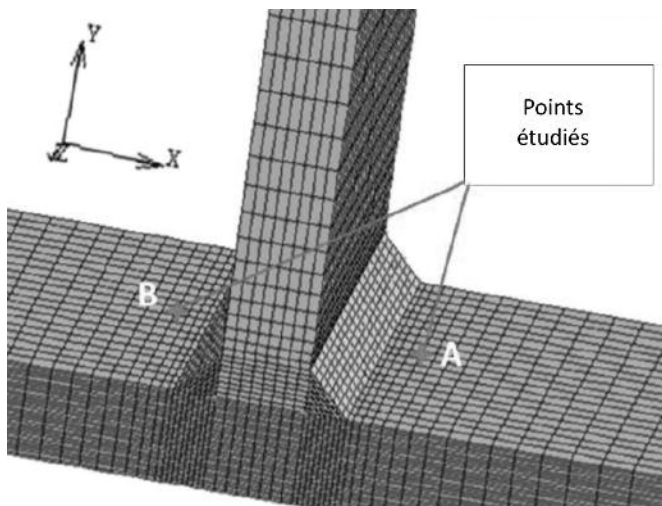


Figure 4 : Maillage utilisé et zones étudiées.

3.1. Évaluation du champ de température

Comme les points A et B ne sont pas situés dans le cordon de soudure (mais à 6 mm du pied de cordon de soudure),

les températures mesurées sont bien plus faibles que la température maximale du procédé de soudure. L'évolution de la température en fonction du temps pour les deux points est donnée en Fig. 5. On peut vérifier que la soudure est effectivement effectuée en une passe un côté après l'autre et que les deux points sont affectés par la soudure. Afin de vérifier que les ordres de grandeurs des températures déterminées sont cohérents, il est possible d'étudier le champ de température à l'état ultime (en température) dans une coupe de l'assemblage. Ceci a été réalisé en Fig. 6. Les zones I et II correspondent à la zone pour laquelle la température est comprise entre 600 et 900 °C (début du domaine de transformation austénitique) pour laquelle la microstructure subit des phénomènes de diffusion. La zone III correspond à la zone pour laquelle la température est comprise entre 900 et 1100 °C. La zone IV correspond à la zone pour laquelle les températures sont supérieures à 1100°C. La Zone Affectée Thermiquement (ZAT) peut se définir comme étant l'ensemble des zones I, II et III. Elle se situe entre le matériau de base non modifié et le matériau d'apport. En comparant les champs de température obtenus par modélisation à une coupe d'un échantillon soudé au microscope, on constate que les deux zonages sont proches et que les tailles des ZAT sont similaires.

3.2. Distribution des contraintes résiduelles

Les distributions de contraintes résiduelles déterminées par le modèle sont données en Fig. 7 au niveau des points A et B pour les directions longitudinales et transverses. Il a été vérifié que les autres contraintes n'étaient pas significatives (un facteur de dix existe). Il est important de noter que dans le modèle présenté, les contraintes résiduelles initiales (comme celles induites par le sablage ou le laminage par exemple) n'ont pas été prises en compte. Les résultats

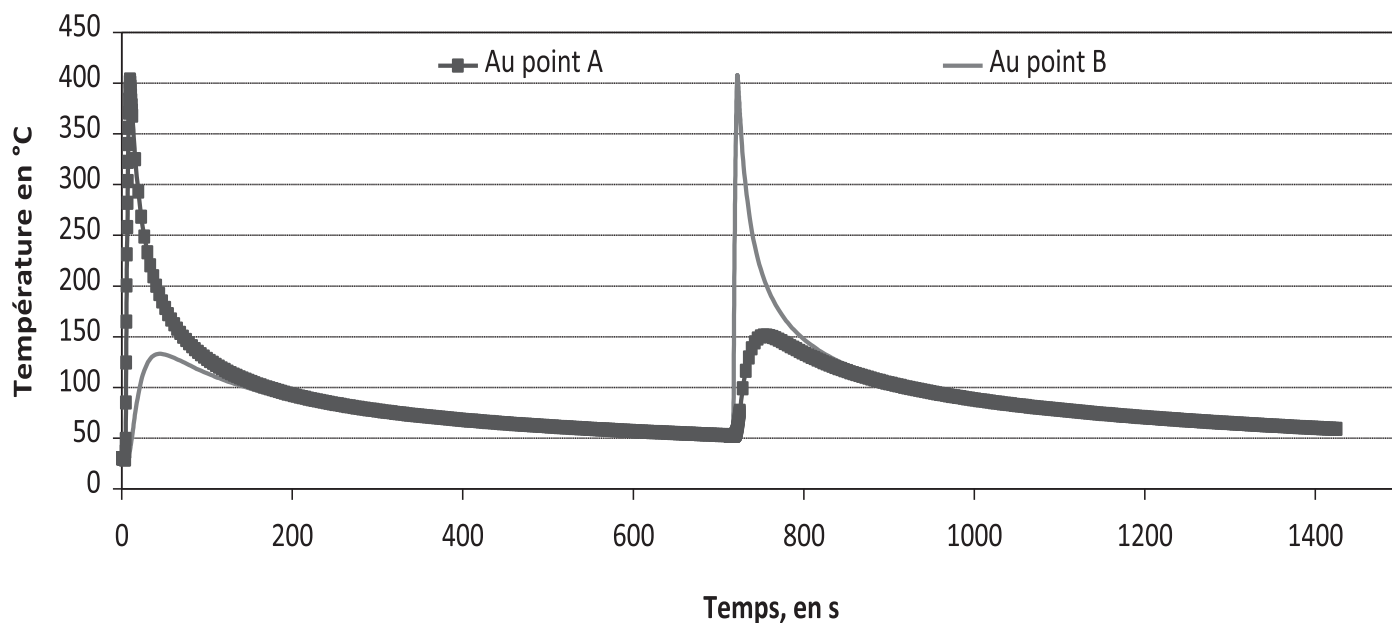


Figure 5 : Évolution de la température en fonction du temps au niveau des points A et B.

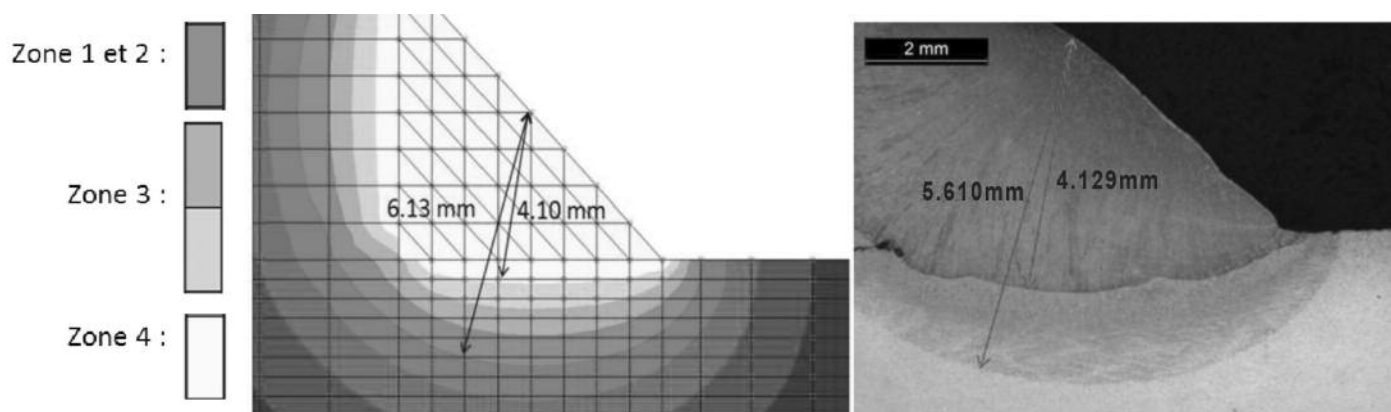


Figure 6 : Comparaison de la distribution à l'état de température maximale avec une coupe de l'assemblage.

obtenus sont similaires à des résultats obtenus dans des études similaires indiquant que le modèle semble satisfaisant [12]. On constate que des contraintes résiduelles de traction sont créées en surface de la plaque métallique sur une épaisseur d'environ 5 mm pour notre cas. Bien qu'aucune différence n'ait pu être déterminée d'après les mesures expérimentales, on constate que les contraintes résiduelles au point A (premier passage) semblent être légèrement plus faibles qu'au point B. Ceci pourrait être expliqué par la relaxation causée par le second passage au niveau du point A.

4. COMPARAISON DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX AVEC LES RÉSULTATS NUMÉRIQUES DANS LE CAS DES ÉCHANTILLONS NON PARACHEVÉS

Les contraintes résiduelles obtenues par la modélisation ont été comparées aux contraintes résiduelles mesurées sur

l'échantillon soudé brut. La comparaison est donnée en Fig. 8 pour les contraintes longitudinales et transversales. La comparaison est seulement effectuée pour la partie supérieure de la plaque (sur une épaisseur de 1 mm). On note qu'il existe une différence relativement importante entre les valeurs mesurées et les valeurs déterminées par modélisation. Ceci peut être expliqué par la non prise en compte dans le modèle des contraintes résiduelles initiales existant avant l'opération de soudure. Les opérations de laminage créent en effet des contraintes résiduelles de compression initiales qui permettent de diminuer le niveau final de contrainte après soudure. Ces contraintes résiduelles initiales ont été déterminées en Fig. 2 et ont une valeur maximale supérieure à 100 MPa en compression. On retrouve cet écart entre les résultats du modèle et les mesures expérimentales.

5. CONCLUSION

Ce travail fait partie d'une étude plus large dédiée aux méthodes de renforcement des assemblages soudés vis-à-vis de la fatigue. Il a pour objectif d'étudier deux méthodes

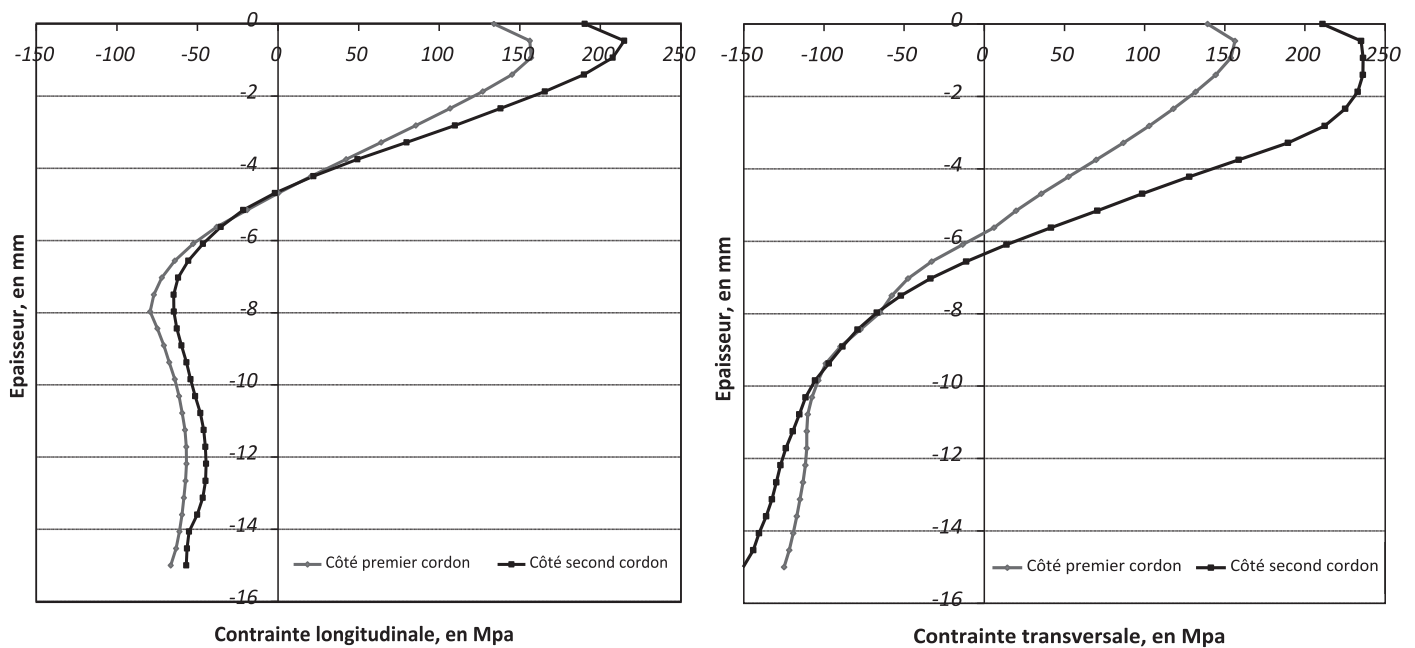


Figure 7 : Distribution dans l'épaisseur de la plaque des contraintes résiduelles longitudinales et transversales aux points A et B obtenues par modélisation.

de parachèvement et de quantifier leur efficacité tant sur le plan géométrique, que sur le niveau des contraintes rési-

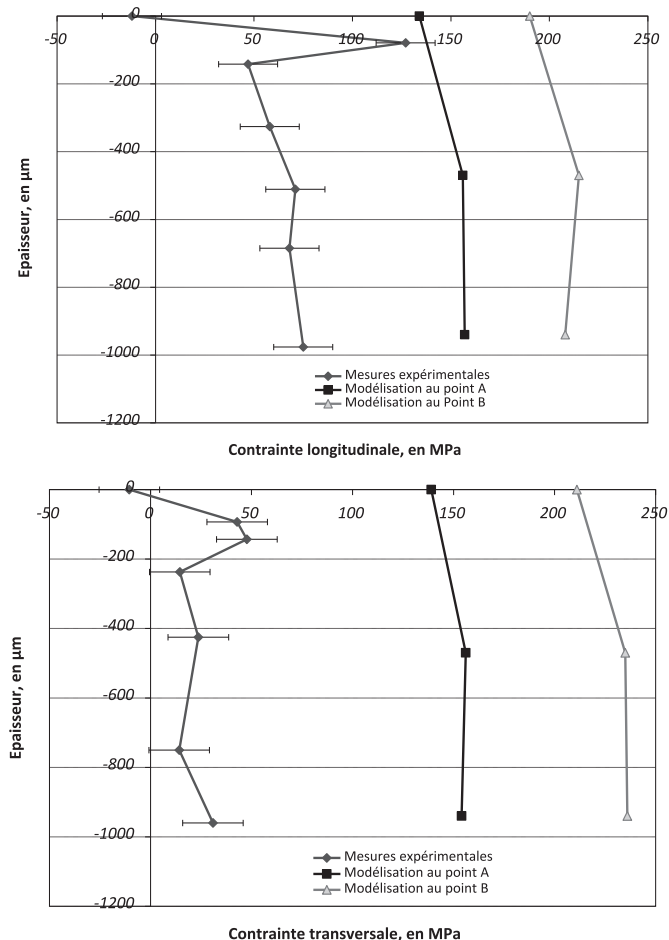


Figure 8 : Comparaison des contraintes résiduelles numériques et expérimentales pour les contraintes longitudinales au-dessus, et transversales au-dessous.

duelles en associant investigations expérimentales et modélisation.

En ce qui concerne les investigations expérimentales présentées, elles ont consisté à tester en fatigue des assemblages soudés avant et après opérations de parachèvements pour deux méthodes : le meulage du pied de cordon de soudure, et le grenailage du cordon de soudure. La première méthode s'est montrée efficace et permet plus particulièrement de retirer la couche présentant des niveaux de contraintes résiduelles de traction importants et de diminuer de manière importante de coefficient de concentration de contrainte. La seconde méthode a peu agi sur le coefficient de concentration de contraintes, mais a permis d'inverser les contraintes résiduelles en créant des contraintes de compression permettant de retarder l'apparition des fissures de fatigues. Bien que les essais de fatigue soient encore en cours, nous avons pu constater une augmentation de la durée de vie des assemblages testés après parachèvement supérieure à un facteur de dix.

En ce qui concerne les investigations numériques réalisées, un modèle aux éléments finis des opérations de soudure a pu être mis au point. Ses résultats ont été validés en nous intéressant à la Zone Affectée Thermiquement et en les comparant à d'autres résultats de la littérature. Les valeurs de contraintes résiduelles ainsi déterminées sont supérieures aux contraintes mesurées mais on constate que la prise en compte des contraintes résiduelles initiales des plaques métalliques permettrait sans doute de limiter les différences mesurées. Après avoir ajouté la prise en compte de ces contraintes résiduelles initiales dans le modèle, notre travail portera sur la modélisation des opérations de parachèvement comme celles de grenailage par exemple. Bien que des travaux existent sur ce sujet, on constate en effet qu'aucune n'a pu encore être pleinement validée [13-14]. Ceci permettrait de pouvoir ensuite mener des études

numériques pour analyser l'influence des différents phasages et paramètres de parachèvement.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent adresser des remerciements particuliers aux entreprises Meliad (<http://www.meliad-sas.com/>) et MIC (<http://www.metalimprovement.co.uk/>) pour leur contribution à cette étude.

7. RÉFÉRENCES

- [1] <http://www.mscsoftware.com/fr/product/marc>
- [2] Lieurade H.P., 1988. *Fatigue analysis in offshore structures*, Report IRSID RE 88 308.
- [3] Sparfel Y., 1992. "L'amélioration de la durée de vie en fatigue des assemblages soudés parachevés", *Soudage et techniques connexes*, Sept-Oct 1992.
- [4] Walbridge S., Nussbaumer A., 2008. "A probabilistic assessment of the effect of post-weld treatment on the fatigue performance of tubular truss bridges", *Engineering structures*, Vol. 30, pp. 247-257.
- [5] Guiot K., 2011. *Amélioration de la tenue en fatigue des assemblages métalliques soudés*. Master report, LUNAM Nantes.
- [6] Le Quilliec G., 2011. *Application du martelage à haute fréquence à l'optimisation de la maintenance des ouvrages et des structures soudées*. Phd Thesis, LUNAM Nantes.
- [7] Niu X., Glinka G., 1987. "The weld profile effect on stress intensity factors in weldments", *International Journal of Fracture*, Vol. 35, pp. 3-20.
- [8] Eurocode 3, 1998. *Design of steel structures, part1-1: General and rules for building*, European committee for standardisation, Brussels.
- [9] Kihl D.P., Sarkani S., 1997. "Mean stress effects in fatigue of welded steel joints", *Probabilistic engineering mechanics*, Vol. 14, pp. 97-104.
- [10] Kassab R.K., 2007. *Modélisation par la méthode des éléments finis des distortions dues au soudage d'un joint en T*, Phd Thesis, Montréal.
- [11] ATS OTUA, 1982. *La résistance à la fatigue des assemblages soudés à l'arc en acier de construction métallique*. Association technique de la sidérurgie Française, Office technique pour l'utilisation de l'acier, Propriétés d'emploi des aciers.
- [12] Teng T.L., Fung C.P., Chang P.H., Yang W.C., 2001. "Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 523-538.
- [13] Sidhom N., Laamouri A., Fathallah R., Braham C., Lieurade H.P., 2005. "Fatigue strength improvement of 5083 H11 Al-alloy T-welded joints by shot peening: experimental characterization and predictive approach", *International journal of fatigue*, Vol. 27, pp.729-745.