

Caractérisation et analyse séquentielle des contraintes résiduelles d'un joint soudé multipasse en acier HLES

C. RAMARD^a, P. PILVIN^a, D. CARRON^a, F. BRIDIER^b

- a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL – UMR CNRS 6027) – Université Bretagne Sud, rue de Saint-Maudé, 56321 Lorient Cedex (constant.ramard@univ-ubs.fr, philippe.pilvin@univ-ubs.fr, denis.carron@univ-ubs.fr)
- b. Naval Group Research / CESMAN / ERD (NAVAL GROUP) – Technocampus Océan, 5 rue de l'Halbrane 44340 Bouguenais (florent.bridier@naval-group.com)

Résumé :

Les procédés de soudage sont le moyen d'assemblage le plus utilisé dans la construction navale. Pour des pièces de forte épaisseur, la réalisation des joints consiste à déposer les cordons de soudure de manière successive (soudage multipasse) engendrant ainsi progressivement des contraintes résiduelles et des microstructures spécifiques. Ces contraintes résiduelles ayant une influence sur la résistance de la structure, la prévision de la durée de vie de celle-ci nécessite la prise en compte de telles contraintes. Cette étude présente les mesures réalisées sur un joint d'angle en acier haute limite d'élasticité de forte épaisseur. Deux méthodes de mesure ont été utilisées permettant l'analyse du profil de contrainte résiduelle au fur et à mesure des passes de soudage.

Abstract :

Arc welding is commonly used to join metallic parts in shipbuilding. For thick plate assemblies multipass welding is employed, each weld bead being deposited one after another. Residual stresses are then induced by multipass welding. Since residual stresses can be detrimental to the performance of the welded product, their estimation is essential to demonstrate the structural integrity. This study focus on measurements performed on a high strength steel T-joint. Two methods were used to characterize the evolution of residual stresses after each welding pass.

Mots clefs : Soudage multipasse, contraintes résiduelles, méthode du contour, méthode DHD.

1 Introduction

La conception et le dimensionnement de certaines structures nécessitent l'utilisation de critères de fatigue. Dans le cas de structures mécano-soudées, la réalisation des soudures va générer des contraintes internes (aussi appelées contraintes résiduelles). Différentes études ont montré qu'il existait une interaction entre le chargement de service et l'état initial de contrainte. Ces contraintes

résiduelles couplées à des contraintes de service peuvent menacer l'intégrité de la structure. Il est donc nécessaire pour le constructeur de connaître le niveau des contraintes résiduelles générées lors du soudage de la structure. Dans le cas d'assemblage de pièces ayant des épaisseurs importantes, la réalisation du joint soudé peut être effectuée en plusieurs étapes successives (soudage multipasse). Cette étude s'intéresse donc à l'état de contrainte post-soudage mais aussi à l'état de contrainte entre chaque passe et à son évolution au cours du soudage.

2 Présentation du cas de soudage - Maquette soudée

La géométrie retenue correspond à un joint d'angle en T, réalisé par le soudage d'un raidisseur positionné perpendiculairement sur une plaque (figure 1). Les deux tôles sont en acier HLES (haute limite d'élasticité soudable) utilisé en construction navale. Cette configuration a été retenue car il s'agit d'un cas de soudage fréquemment utilisé en construction navale. Cette configuration possède par ailleurs un nombre réduit de passes ce qui simplifie la réalisation des maquettes et leur analyse post-soudage.

Pour cette configuration, le mode opératoire de soudage est le suivant. Tout d'abord un agrafage TIG manuel avec apport de matière est réalisé de part et d'autre du raidisseur afin d'assurer le positionnement et le maintien en contact des deux tôles. La structure est ensuite préchauffée et quatre passes de soudage MAG viennent compléter le joint soudé. La position de ces passes est donnée sur la figure 1. Les passes sont déposées simultanément de part et d'autre du raidisseur et à la même vitesse.

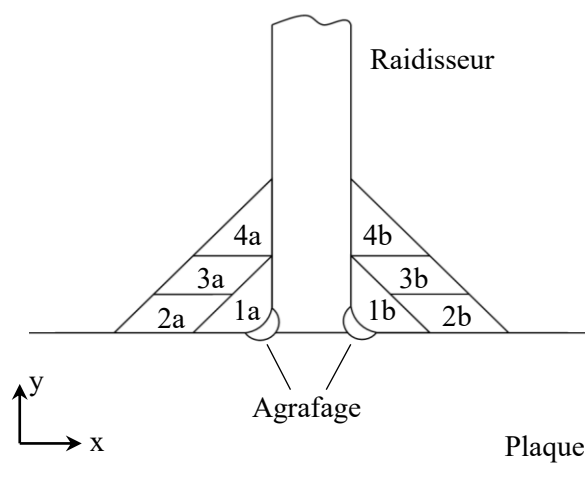


Figure 1 : Positions des cordons de soudure

La spécificité de la maquette réalisée pour l'étude réside dans le fait que pour chaque passe un décalage de la position initiale des torches (selon l'axe z) est appliqué. De cette manière, on obtient plusieurs zones représentatives des différentes étapes du soudage sur la même maquette (figure 2) pour évaluer les contraintes résiduelles à l'issue de chaque passe.

- Agrafage : ■
- Agrafage + 1 passe MAG : ■
- Agrafage + 2 passes MAG : ■
- Agrafage + 3 passes MAG : ■
- Agrafage + 4 passes MAG : ■

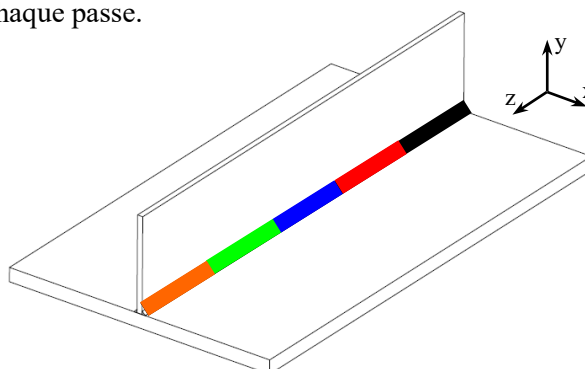


Figure 2 : Position et répartition des passes sur la maquette

Le choix de la méthode dépend de la nature des contraintes examinées, des matériaux, de la géométrie de la pièce, du coût et du caractère destructif ou non de la méthode. Les méthodes d'évaluation des contraintes les plus couramment utilisées sont la diffraction des rayons X et des neutrons, la méthode du trou également très utilisée est d'ailleurs normalisée. Dans notre cas, compte tenu des épaisseurs des tôles et la nature du matériau de la structure étudiée, les méthodes de diffraction ont été écartées au profit de la méthode du contour plus accessible et de la méthode du trou profond.

3 Évaluation des contraintes par la méthode du contour

La méthode du contour proposée par Prime [1] repose sur la mesure d'une composante de déplacement résultant de la redistribution des contraintes résiduelles suite à un enlèvement de matière (trou, rainure, découpe...) effectué sur une pièce. Dans le cas de la méthode du contour, on applique ce principe à une découpe plane selon une direction choisie. Cette méthode est destructive et permet d'obtenir une cartographie 2D de l'état de contrainte. La redistribution des contraintes internes dans la pièce génère un déplacement dans la direction perpendiculaire à la découpe. La mesure de ce champ de déplacement permet selon la théorie de l'élasticité linéaire de remonter au champ de contrainte résiduelle présent dans la pièce avant la découpe (figure 3) [2]. Le champ de contrainte est obtenu via un calcul par éléments finis après traitement des mesures des faces de découpe.

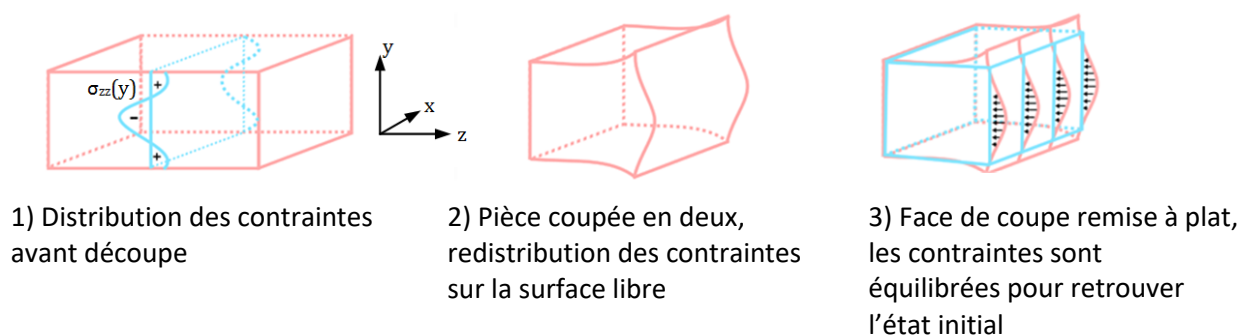


Figure 3 : Principe de la méthode du contour [2]

Le choix du procédé de découpe revêt une grande importance puisque l'état de surface doit avoir une rugosité de l'ordre du micromètre [3]. De plus, dans notre cas, le procédé de découpe retenu ne doit idéalement pas perturber l'état de contrainte généré par l'opération de soudage. L'usinage par électroérosion ou EDM (Electrical Discharging Machining) classiquement utilisé pour la méthode du contour permet d'atteindre la précision demandée. Dans notre cas, les dimensions de la maquette ne permettaient pas de la positionner dans la machine EDM de la Faculté des Sciences de l'Université de Bretagne Sud.

Avant d'effectuer les usinages par électroérosion il a été nécessaire de procéder à la découpe des extrémités de la plaque et du raidisseur. Ensuite, la maquette a été à nouveau découpée en plusieurs tronçons, les découpes étant réalisées en prenant en compte le décalage des passes, permettant ainsi d'obtenir cinq tronçons représentatifs des étapes du soudage. Il est supposé que les découpes successives des tronçons n'ont pas modifié l'état de contrainte dans le reste de la structure (la zone d'intérêt étant située suffisamment éloignée). Le procédé retenu pour ces découpes préalables est le découpage au jet d'eau. Ce procédé permet de découper de fortes épaisseurs tout en limitant l'échauffement de la matière avec une entaille de l'ordre du millimètre de largeur.

Sur chacun des tronçons obtenus, un perçage débouchant a été réalisé. Ce perçage permet le passage du fil de la machine EDM pour débiter la découpe. La matière restant entre le perçage et l'extrémité de la plaque favorise le maintien en position (auto-bridage) de la pièce lors de la découpe. La présence d'un raidisseur au milieu de la plaque génère une variation brutale et importante de l'épaisseur de découpe. Pour éviter cela, deux plaques d'acier dont un bord a été usiné de manière à épouser l'enveloppe extérieure du cordon ont été collées de part et d'autre du raidisseur (figure 4).

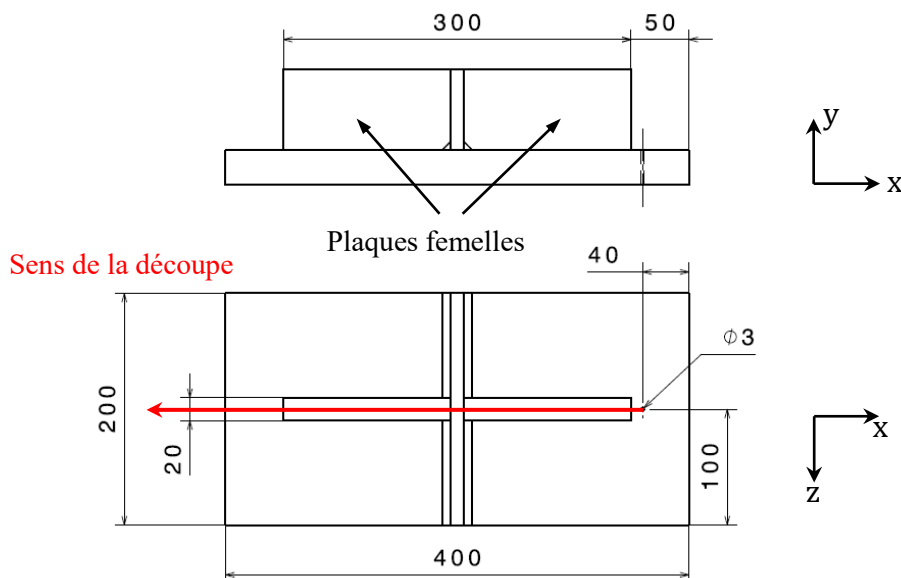


Figure 4 : Ajout des plaques femelles pour la découpe par électroérosion - dimensions en (mm)

La mesure du déplacement normal aux surfaces (aussi appelées profils ou contours) obtenus après la découpe constitue une phase importante du processus d'évaluation des contraintes. L'appareil de mesure utilisé est un profilomètre optique Altisurf® muni d'un capteur confocal chromatique. La pièce est placée sur une table XY motorisée permettant d'effectuer un balayage de la surface à mesurer. La zone de mesure maximale est de 100 mm x 50 mm. Du fait du mode opératoire de soudage utilisé, la distribution des contraintes longitudinales dans la section transverse est symétrique. Ainsi, la zone de mesure est située sur une moitié du joint d'angle ce qui permet d'évaluer l'état de contrainte sur une plus grande partie de la pièce. Les profils des deux faces générées par la découpe du tronçon sont mesurés l'un après l'autre.

Les fichiers contenant les champs de déplacement mesurés sont ensuite traités par un code Matlab®. La première étape consiste donc, après lecture des deux fichiers de données, à repositionner les deux surfaces dans un même repère. La deuxième étape consiste à filtrer les valeurs de déplacement en z indésirables des mesures. En effet, les profils contiennent un bruit (variation importante entre la valeur en z en un point et celle des points voisins) qui varie en fonction du nombre de points mesurés. Le filtrage consiste donc à éliminer les valeurs aberrantes (via un critère de distance) dans un premier temps et de s'affranchir des effets de bord de la découpe dans un second temps (figure 5).

Les données restantes sont interpolées sur les nœuds du maillage via un algorithme de recherche des plus proches voisins (*nearest neighbour algorithm*) puis sont ensuite lissées. Le lissage des données permet d'atténuer le bruit de mesure qui conduirait à l'obtention de niveaux de contrainte non représentatifs du champ de contrainte réel. Le champ de déplacement ainsi obtenu est tracé en figure 6. Dans le programme Matlab®, le lissage est effectué à l'aide de splines cubiques (*csaps function*). La dernière étape du programme consiste à écrire un fichier contenant la valeur du déplacement selon l'axe z pour chaque nœud du maillage éléments finis représentant la section transverse du joint soudé.

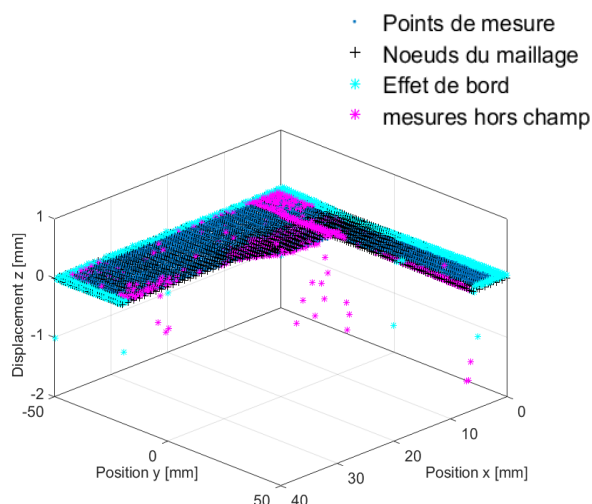


Figure 5 : Filtrage des points de mesures

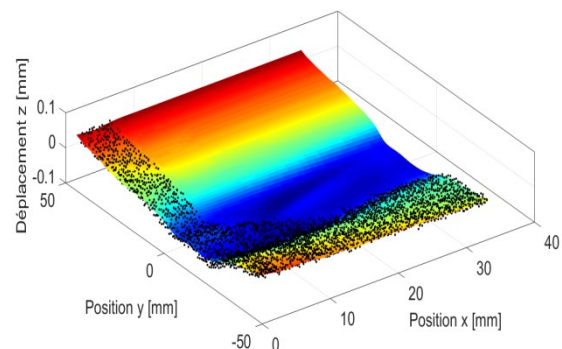


Figure 6 : Champ de déplacement lissé et points de mesure après post-traitement

La composante normale du déplacement de la nouvelle surface libre est alors imposée aux nœuds d'un maillage par éléments finis de la pièce étudiée et un calcul en élasticité linéaire permet une estimation de la composante normale de la contrainte sur la surface de découpe. Dans notre cas la direction normale à la surface de découpe est selon l'axe z ce qui correspond à la composante longitudinale des contraintes du joint soudé (figure 7 et figure 8). Le logiciel de calcul EF utilisé est Abaqus®. Le modèle respecte les dimensions de la plaque et du raidisseur avec une représentation simplifiée du cordon (simplification du traitement des données). Le maillage est composé d'éléments cubiques à 8 nœuds et pentaédriques à 6 nœuds. Ce maillage utilise une discrétisation variable selon z pour réduire le nombre de nœuds du modèle (figure 8). Le champ de déplacement obtenu est appliqué comme condition aux limites, des conditions de blocage sont appliquées sur un nœud du maillage pour bloquer les mouvements de corps rigide. Les calculs ont été effectués avec les coefficients d'élasticité de l'acier à 20 °C. Les résultats obtenus seront présentés en figure 11.

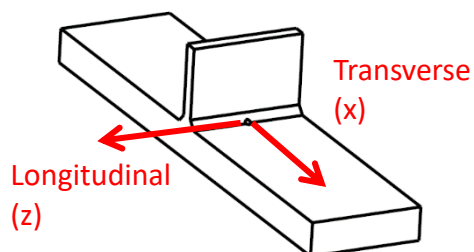


Figure 7 : Orientation des axes longitudinal et transverse du joint soudé

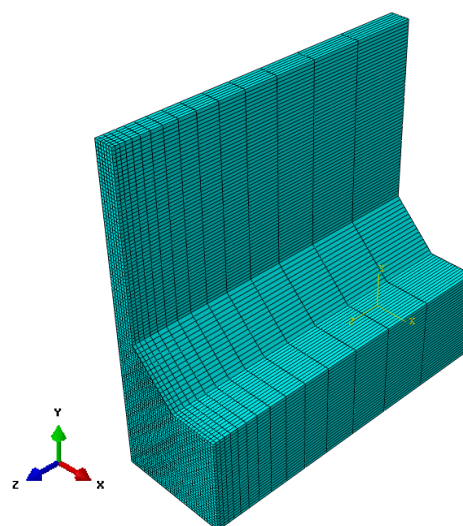


Figure 8: Maillage du joint soudé pour le calcul numérique des contraintes résiduelles

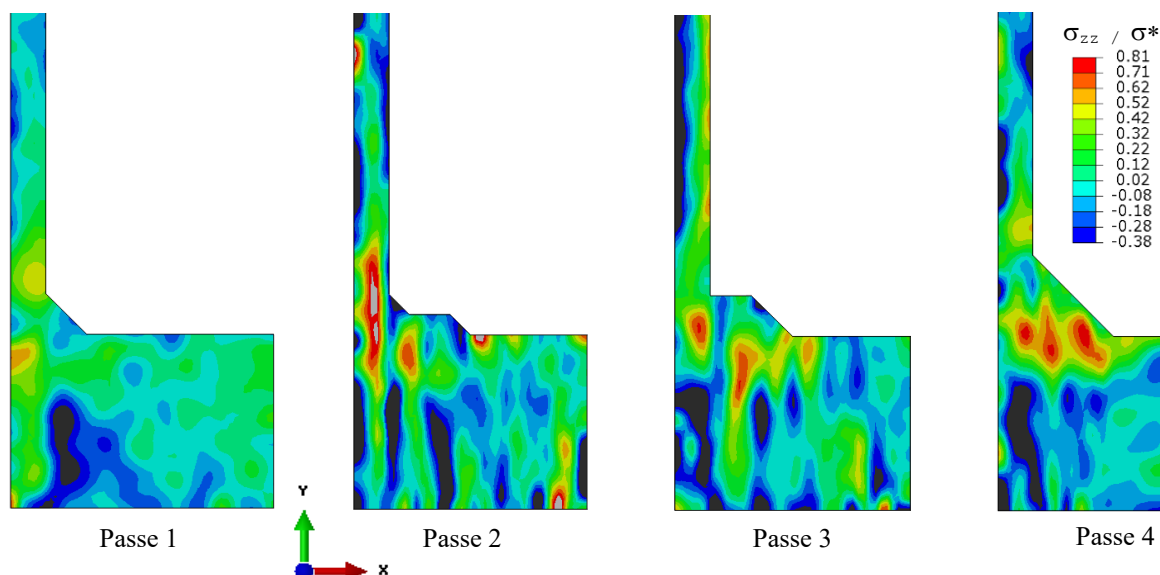


Figure 11 : Cartographies des contraintes résiduelles longitudinales pour chacune des étapes du soudage multipasse d'un joint d'angle en T

Des problèmes apparus lors de la découpe du tronçon représentatif de l'agrafage n'ont pas permis d'obtenir des résultats exploitables et ne seront pas présentés dans cet article. Pour obtenir ces résultats, plusieurs jeux de paramètres (critère de distance et paramètre de lissage) ont été testés en faisant varier raisonnablement leurs valeurs avant de choisir le jeu de paramètres donnant le résultat le plus adéquat [4]. Les résultats issus des calculs EF ont été remis en forme avec une échelle identique pour faciliter la comparaison. D'une manière générale, les résultats sont assez bruités et il est possible de déceler la présence de lignes verticales en particulier pour les passes 2 et 3. Ces lignes sont dues aux arrêts fréquents de l'avance du fil lors de la découpe EDM, ces arrêts étant facilement observables sur les faces de coupe. En effet, obtenir une vitesse d'avance régulière et sans arrêt du fil s'est avéré particulièrement difficile d'autant que l'épaisseur de découpe atteignait la capacité maximale de la machine. La qualité de la découpe joue directement sur la précision du résultat final mais aussi sur la facilité à post-traiter les données issues de la mesure. Pour l'ensemble des tronçons, les contraintes de tension maximales se situent à l'emplacement de la ZAT du fait d'importants gradients thermiques et des transformations métallurgiques présents dans cette zone. Des contraintes de compression ont été obtenues dans certaines zones et s'avèrent nettement supérieures aux valeurs atteintes habituellement dans ce type de structure. Ces zones sont délimitées par des couleurs noires sur les cartographies des contraintes.

4 Évaluation des contraintes par la méthode DHD

La méthode du trou profond ou DHD (deep hole drilling) est une méthode semi-destructive qui, comme la méthode du contour, est basée sur la mesure des déplacements résultant de la redistribution des contraintes suite à un enlèvement de matière. Cette méthode consiste à percer un trou de référence à travers la pièce puis à en mesurer le diamètre avant et après la redistribution des contraintes en réalisant un carottage concentrique au trou de référence. La différence entre les deux mesures avant et après redistribution des contraintes permet de remonter aux valeurs des contraintes résiduelles en appliquant la théorie de l'élasticité linéaire [5]. Cette technique permet d'évaluer les contraintes résiduelles dans deux directions orthogonales pour des profondeurs de plusieurs centaines de millimètres. La méthode DHD a été développée par l'Université de Bristol et est maintenant commercialisée par l'entreprise VEQTER.

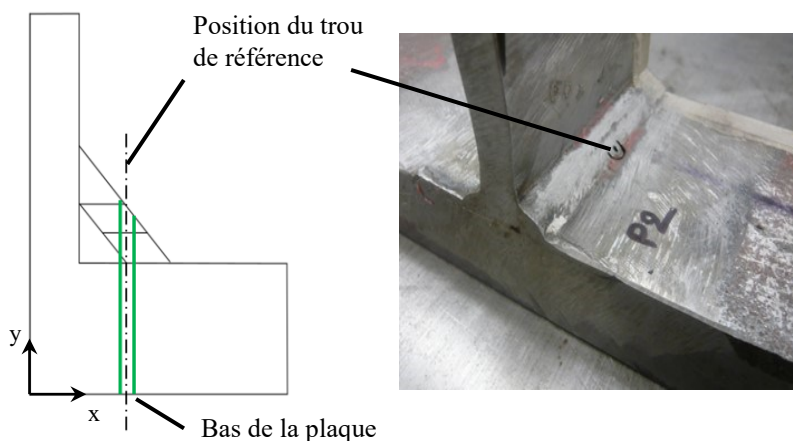


Figure 12 : Position du trou de référence pour l'évaluation des contraintes résiduelles par la méthode DHD

Les mesures par la méthode DHD ont été réalisées par VEQTER sur un demi-tronçon (issu de la découpe EDM), pour chaque configuration du soudage. Il a été décidé de réaliser la mesure au même endroit pour chaque demi-tronçon de manière à pouvoir suivre et comparer l'évolution des contraintes résiduelles au fur et à mesure du dépôt des cordons. Les mesures ont été réalisées avec un axe du trou de référence situé en pied du 1er cordon. Ce choix est justifié par le fait que cet emplacement se situe au cœur de la ZF et de la ZAT globale permettant ainsi de visualiser l'effet de l'ensemble des cordons (figure 12). Dans notre cas, le diamètre de référence est de 1,5 mm et le diamètre intérieur du carottage est d'environ 5 mm. Les mesures du diamètre du trou de référence ont été effectuées par pas de 0,2 mm sur la profondeur. Les résultats obtenus seront ensuite comparés à ceux issus de la méthode du contour.

5 Comparaison des résultats des deux méthodes

Afin de comparer les résultats issus des deux méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles, des valeurs de contraintes ont été extraites des calculs EF de la méthode du contour.

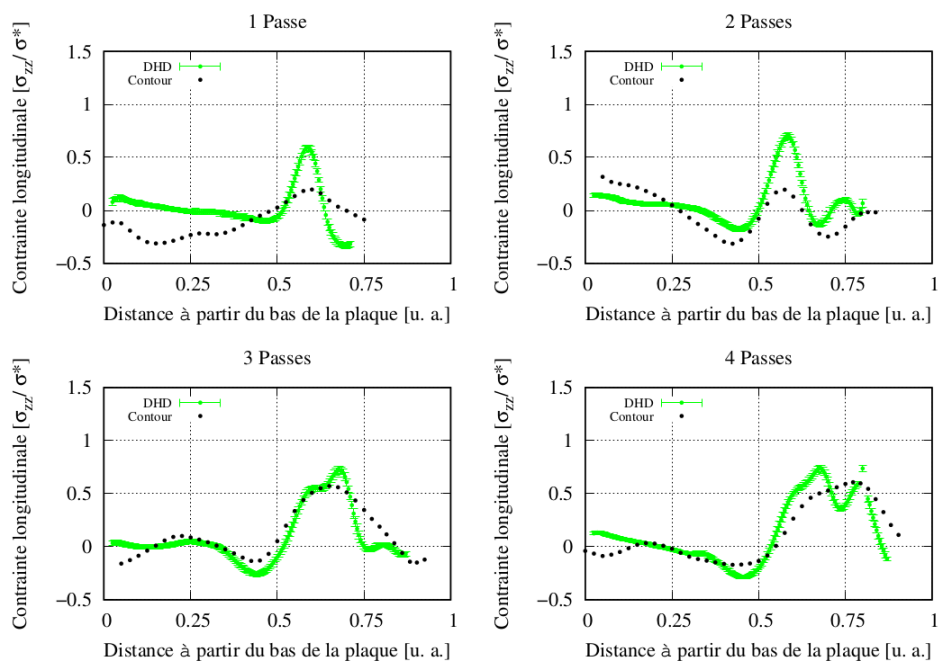


Figure 13 : Comparaison des résultats obtenus par les méthodes du contour et DHD

Pour chaque étape du soudage, les valeurs des contraintes aux points d'intégration des éléments situés à l'emplacement du trou de référence ainsi que leurs positions selon l'axe y ont été relevées. Ces valeurs ont ensuite été moyennées puis tracées en fonction de leur position à partir du bas de la plaque jusqu'à la surface du cordon. Ces résultats sont présentés figure 13.

Pour la configuration « 1 passe » les écarts obtenus aussi bien spatialement qu'en amplitude sont importants. Ces écarts sont principalement dus à un léger décalage du fil survenu au cours de la découpe (ce défaut a été corrigé pour les découpes suivantes). La variation significative des paramètres de post-traitement n'a pas permis d'améliorer les résultats. On remarque toutefois que la courbe obtenue par la méthode du contour, comme celle issue des mesures DHD, présente une contrainte maximale en compression dans les premiers millimètres du bas de la plaque puis augmente jusqu'à passer en traction et atteindre un maximum sous le cordon puis diminuer à nouveau jusqu'au haut de la plaque. Les résultats obtenus par la méthode du contour pour le tronçon représentatif de la passe 2 sont globalement cohérents avec ceux obtenus par la méthode DHD. Les résultats obtenus par la méthode du contour surestiment cependant le niveau de contrainte atteint en compression et sous-estiment le niveau de contrainte atteint en traction. La position du premier pic de contrainte est correcte mais le second pic n'apparaît pas sur les résultats de la méthode du contour. En effet cela vient du lissage du champ de déplacement mesuré qui est inhérent à la méthode mais ne permet pas de capter les variations brusques des niveaux de contraintes.

La présence de ces pics de traction est principalement due à l'aspect multipasse du soudage du fait de la dépose successive des cordons de soudure ce qui provoque donc cette distribution particulière de la contrainte. Le même constat est observé de manière très nette pour les configurations « 3 passes » et « 4 passes ».

Les évolutions ainsi que les niveaux de contraintes atteints par les deux méthodes sont proches mais la présence des pics induits par l'aspect multipasse du soudage n'est pas mise en évidence par la méthode du contour. Les difficultés de découpe et de mesure rencontrées lors de l'application de la méthode du contour ont été corrigées au fur et à mesure des manipulations ayant un effet direct sur les résultats finaux. Hormis pour la configuration « 1 passe » les résultats obtenus par la méthode du contour sont cohérents avec ceux obtenus par la méthode DHD constituant ainsi des données expérimentales sur l'évolution des contraintes résiduelles lors du soudage multipasse.

Références

- [1] M.B. Prime, Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut, *Journal of Engineering Materials and Technology* 123, (2001) 162–168.
- [2] P. Pagliaro, M.B. Prime, J.S. Robinson, B. Clausen, H. Swenson, M. Steinzig, B. Zuccarello, Measuring Inaccessible Residual Stresses Using Multiple Methods and Superposition. *Exp Mech* 51, (2011) 1123–1134.
- [3] H. Nasri, Mesure de contraintes résiduelles dues au soudage et au soudage-martelage par micro-profil de surface, *École de technologie supérieure*, 2007.
- [4] B. Levieil et al.; User Influence on Two Complementary Residual Stress Determination Methods: Contour Method and Incremental X-Ray Diffraction, *Experimental Mechanics*, Volume 56, No. 9, 2016.
- [5] G.S. Schajer, C.O. Ruud, Overview of Residual Stresses and Their Measurement. In *Practical Residual Stress Measurement Methods*, (Wiley-Blackwell), 2013, pp. 1–27.