

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES
DANS LES JOINTS SOUDÉS DE TURBINES HYDRAULIQUES

ÉRIC MOISAN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AOÛT 2005



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-16819-6

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16819-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire est intitulé :

ÉTUDE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES
DANS LES JOINTS SOUDÉS DE TURBINES HYDRAULIQUES

présenté par : MOISAN Éric

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. VERREMAN Yves, PhD., président

Mme BERNARD Marie, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. BUI-QUOC Thang, D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. SABOURIN Michel, M.Sc.A., membre

Remerciements

Je remercie ma directrice de recherche, Mme Marie Bernard ainsi que mon codirecteur M. Thang Bui-Quoc, pour m'avoir accordé leur support et conseils avisés tout au long de la rédaction de ce mémoire. Ils m'ont encouragé, aidé financièrement et ont couvert les frais de certains matériels de mesure, ce qui m'a permis de démarrer le présent projet de maîtrise.

Je tiens à remercier spécialement mon superviseur en entreprise, M. Michel Sabourin, qui m'a incité à réaliser cette maîtrise recherche. Il a su me proposer un projet d'étude selon mes intérêts et me donner de judicieux conseils.

Je souligne le support financier de la compagnie Alstom Canada et du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) sans lequel le projet n'aurait pu être réalisé.

Ce projet n'aurait pas pu être mené à terme sans l'aide de nombreux membres du personnel d'Alstom dont M. Louis Mathieu, pour son excellent support technique et son aide lors de la planification du soudage des échantillons et M. Julien de la Bruère-T., qui a tracé initialement les grandes lignes du projet de recherche. Je remercie également de l'École Polytechnique de Montréal tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin au projet dont M. Nour Aimene, pour son support technique et le prêt de matériel de mesure, et Mlle Mélissa Côté, pour ses services d'une qualité exceptionnelle lors de la mesure des profils par CMM.

Le tout n'aurait jamais été possible sans l'aide de mes parents à qui je dois énormément. Ils m'ont encouragé et supporté, tant moralement que financièrement, depuis ma tendre enfance. C'est grâce à eux que je peux maintenant, et surtout enfin, voler de mes propres ailes.

Résumé

Un programme de travaux expérimentaux a été réalisé afin d'établir le portrait global des contraintes résiduelles présentes dans les joints soudés de roues de turbines hydrauliques. Une meilleure connaissance de la distribution de ces contraintes permettra au turbinier d'optimiser le design de ces joints et, par conséquent, d'augmenter leur performance en service.

Deux principaux objectifs sont visés dans ce projet. Le premier consiste à obtenir une vue d'ensemble des contraintes résiduelles, en surface, dans les régions soudées des roues de turbines hydrauliques. Le deuxième objectif consiste à évaluer les contraintes résiduelles, à l'intérieur du joint soudé, dans un plan d'intérêt pour lequel les contraintes résiduelles sont susceptibles de contribuer à la propagation des fissures au cours des opérations. Afin de réaliser ces objectifs, des mesures ont été effectuées sur des roues de turbines hydrauliques (soudage à pénétration partielle) et sur des échantillons (soudage à pénétration partielle et totale), ces derniers étant fabriqués en respectant toutes les spécifications applicables aux roues quant aux matériaux, aux paramètres reliés au procédé de soudage et aux inspections. L'influence de plusieurs variables sur le portrait des contraintes résiduelles a été étudiée, notamment l'épaisseur des plaques formant le joint soudé, le procédé de soudage (pénétration partielle et pénétration totale) et le traitement thermique après le soudage.

Concernant les mesures de contraintes résiduelles, quelques méthodes ont été employées afin de déterminer la technique la plus appropriée pour le projet. D'abord, la méthode magnétique du bruit de Barkhausen a été appliquée afin de localiser les zones où les contraintes résiduelles sont les plus élevées dans les roues de turbines hydrauliques; les résultats obtenus par cette méthode ne se sont toutefois pas avérés concluants. Par la suite, d'autres mesures à l'aide de la méthode du trou et des jauges d'extensométrie ont permis de connaître seulement les contraintes résiduelles présentes en surface près ainsi que dans les zones soudées. Finalement, la méthode du contour a

été choisie car elle permet d'évaluer les contraintes résiduelles perpendiculaires à un plan sélectionné de l'échantillon, et ce, au travers d'un joint soudé.

La méthode du contour consiste à découper le joint soudé par électro-érosion (EDM) suivant un plan particulier afin de faire relâcher les contraintes résiduelles et ensuite, à mesurer les déplacements du profil déformé de la section de coupe par CMM (Coordinate Measuring Machine). Le champ de contraintes résiduelles est ensuite établi à l'aide de la méthode des éléments finis avec, comme données d'entrée, les déplacements mesurés du profil déformé. Ainsi, afin de générer les données d'entrée pour le logiciel d'éléments finis, un programme de traitement des résultats de mesures du profil de la section de coupe est développé en tenant compte du profil de la coupe par EDM.

D'après les résultats obtenus par la méthode du contour, le profil et l'intensité des contraintes résiduelles induites dans les joints soudés à pénétration partielle ayant subi un traitement thermique de relaxation des contraintes ne semblent pas dépendre de l'épaisseur des échantillons. Pour les dimensions des méplats examinés, les profils sont semblables. Les contraintes résiduelles dans la zone du méplat sont en compression puis deviennent en tension dans les zones adjacentes. La zone en tension est relativement restreinte, de l'ordre de 10 mm de largeur; elle correspond aux premières passes de soudure à microstructure austénitique (par rapport à la microstructure martensitique pour le reste du joint). En se rapprochant de la surface libre, les contraintes résiduelles tendent vers une valeur nulle. L'intensité des contraintes mesurées dans ces échantillons se situe, en général, en bas de 200 MPa en tension pour les joints traités thermiquement, à l'exception de certaines petites zones où les contraintes sont légèrement plus élevées.

L'effet du traitement de relaxation des contraintes résiduelles a été également examiné en effectuant des mesures en surface près des joints soudés d'une roue de turbine hydraulique ayant subi ce traitement. Les résultats ont démontré un très faible niveau de contraintes résiduelles (inférieur à 80 MPa en tension). Ce procédé s'avère très

efficace pour un joint d'un échantillon soudé à pénétration totale car il fait baisser l'intensité des contraintes résiduelles maximales d'environ 60 %.

La méthode du contour est particulièrement indiquée pour la mesure de contraintes résiduelles dans des pièces épaisses; de plus, son coût est très raisonnable pour la plage de mesures obtenues. Les résultats obtenus dans ce projet serviront à raffiner la technique de calcul de la vie en fatigue reliée à la propagation des fissures dans les joints soudés de turbines hydrauliques, permettant ainsi d'optimiser le design de ces joints. Ces résultats devront toutefois être utilisés avec certaines précautions à cause des imprécisions inhérentes à cette méthode expérimentale.

Abstract

An experimental program was carried out in order to establish the global distribution of residual stresses in hydraulic turbine runner welded joints. A better understanding of the distribution of these stresses will make possible to the manufacturer to optimize the design of these joints and, consequently, to increase their performance in service.

Two principal objectives are aim in this project. The first consists in obtaining an overall representation of residual stresses, on the surface, in the welded joints area of hydraulic turbine runners. The second objective consists in evaluating residual stresses inside the welded joint, in a plan of interest for which the residual stresses are likely to contribute to the crack propagation during operation. In order to achieve these objectives, measurements were carried out on hydraulic turbine runners (with partial penetration welded joints) and on T-joint samples (with partial and total penetration welded joints). The samples were fabricated by respecting all the specifications applicable to hydraulic turbine runners; the same material, welding process and inspections were carried out. The influence of several variables on the global distribution of residual stresses was studied; in particular the thickness of the plates forming the joint, the welding process (for partial and total penetration welded joints) and the post welded heat treatment.

Some methods have been used in order to determine the most suitable technique to measure residual stresses for this project. Initially, the Barkhausen noise magnetic method was used to locate highly stressed areas on a hydraulic turbine runner. The results obtained by this method did not prove to be concluding. Thereafter, other measurements using the hole drilling method and strain gages made it possible to know the residual stresses on surfaces, near and on the welded joint. Finally, the contour method was selected to evaluate the residual stresses perpendicular to a selected plan through the T-joint samples.

The contour method consists in cutting the welded joint in two parts by electro discharge machining (EDM) according to a particular plan in order to release residual stresses and then, to measure the displacement of the deformed profile of the cut section with a coordinate measuring machine (CMM). The residual stress field is then established using the finite element method with the measured displacements of the deformed profile. In order to generate the input data for the finite element analysis software, a program was developed to do the processing of the measured displacements on the cut section and of the EDM wire cut pattern.

According to the results obtained by the contour method, the profile and intensity of residual stresses in the welded T-joints with partial penetration and post weld heat treatment do not seem to depend on the thickness of the samples. For different flat unwelded sections width, the profiles are similar. The residual stresses are in compression in the flat unwelded section then become in tension in the adjacent zones. The zone in tension is relatively small, about 10 mm width. It corresponds to the first welding layers with austenitic microstructure (compared to martensitic microstructure for the rest of the joint). While approaching the free face, the residual stresses tend toward zero. The intensity of the stresses measured in the samples is, in general, below 200 MPa in tension for joints after post weld heat treatment, except for certain small zones where the constraints are slightly higher.

The effect of post weld heat treatment on residual stresses was also examined by taking measurements on the surface close to the welded joint of a hydraulic turbine runner having undergone this treatment. The results showed a very low residual stress level (less than 80 MPa in tension). This process is also very effective for a T-joint sample with total penetration welding because it causes a drop in the intensity of the maximal residual stresses of about 60 %.

The contour method is a powerful method for residual stress measurements in thick parts. Moreover, its cost is reasonable for the number of measurements obtained

by this method. The results obtained in this project will be used to refine the fatigue life calculations for crack propagation in hydraulic turbine runners, thus making it possible to optimize the design of these joints. However, these results will have to be used with some care because of the inherent inaccuracies of this experimental method.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract.....	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xxii
LISTE DES ANNEXES	xxv
Introduction	1
Mise en situation.....	1
Objectif	1
Méthodologie.....	2
Plan du mémoire.....	3
Chapitre 1 Revue bibliographique.....	5
1.1 Contexte de la recherche.....	5
1.2 Distribution des contraintes résiduelles dans les joints soudés	10
1.2.1 Origine des contraintes résiduelles dans les joints soudés	10
1.2.2 Contraintes résiduelles dans les joints soudés bout-à-bout	12
1.2.3 Contraintes résiduelles dans les joints en T	18
1.3 Effet du traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles	24
1.4 Méthodes de mesure des contraintes résiduelles	26
1.4.1 Méthode du bruit de Barkhausen.....	27
1.4.2 Méthode du trou.....	28
1.4.3 Méthode du trépan	31
1.4.4 Méthode du contour	32
1.4.5 Autres méthodes	35
1.4.6 Profondeur de mesure des différentes méthodes	41

1.5	Conclusion	43
Chapitre 2	Procédure expérimentale et choix de la méthode de mesure	45
2.1	Choix de la méthode de mesure	45
2.2	Validation du choix de la méthode du contour	46
2.3	Mesures préliminaires des contraintes résiduelles dans les roues de turbines hydrauliques	50
2.3.1	Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du Bruit de Barkhausen	50
2.3.2	Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du trou en fonction de la position transversale à une soudure	56
2.4	Fabrication des échantillons soudés	59
2.5	Déformations mesurées par des jauges d'extensométrie après le soudage ...	66
2.6	Coupe par électro-érosion	68
2.6.1	Montage	68
2.6.2	Paramètres de la coupe par électro-érosion	72
2.6.3	Mesure des déformations pendant la coupe par électro-érosion	73
2.6.4	Profil de la coupe par électro-érosion pour une pièce témoin	74
2.6.5	Problème causé par le laitier	76
2.7	Mesures dans le plan de coupe	77
2.7.1	Détermination du profil de la surface par une machine à mesurer tridimensionnelle	77
2.7.2	Application de la méthode du trou	81
2.8	Conclusion	82
Chapitre 3	Analyse des contraintes résiduelles	83
3.1	Déformations mesurées par des jauges d'extensométrie pendant la coupe par électro-érosion	84
3.2	Contraintes résiduelles évaluées par des jauges d'extensométrie sur le bord du plan de coupe EDM	85
3.3	Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du contour	87

3.3.1	Outil d'analyse utilisé	87
3.3.2	Filtrage et lissage des données CMM.....	87
3.3.3	Calcul du plan de coupe avant déformation	91
3.3.4	Profil de la coupe EDM	93
3.3.5	Choix des éléments finis et du type de maillage	95
3.3.6	Interpolation des déplacements aux nœuds du modèle d'éléments finis	97
3.3.7	Résultats sur les contraintes résiduelles.....	97
3.4	Discussion.....	122
3.4.1	Profil des contraintes résiduelles dans les joints soudés à pénétration partielle	123
3.4.2	Contraintes résiduelles près de la surface des congés de soudure ...	124
3.4.3	Influence de la position du plan de coupe	124
3.4.4	Comparaison entre les contraintes évaluées à l'aide de la méthode du contour et celles évaluées à l'aide de jauges d'extensométrie.....	124
3.4.5	Comparaison des résultats obtenus par la méthode du contour et par la méthode du trou	125
3.4.6	Variation des contraintes résiduelles normales (σ_z) et transversales (σ_y)	127
3.4.7	Imprécision de la méthode du contour	128
3.5	Conclusion	129
	Conclusions et recommandations	131
	RÉFÉRENCES	134
	RÉFÉRENCES ADDITIONNELLES.....	139
	ANNEXES.....	143

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Comparaison des méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles	54
Tableau 2.2	Contraintes résiduelles maximales évaluées par la méthode du trou.....	54
Tableau 2.3	Position des points de mesure et résultats obtenus pour une roue Francis.....	58
Tableau 2.4	Paramètres géométriques des échantillons	61
Tableau 2.5	Position des jauges d'extensométrie et contraintes résiduelles formées par le soudage	67
Tableau 2.6	Paramètres pour la coupe par électro-érosion.....	73
Tableau 2.7:	Largeur de coupe pour chaque série d'échantillon.....	75
Tableau 3.1	Position des jauges d'extensométrie, déformations mesurées et contraintes relâchées pendant la coupe par électro-érosion dans l'échantillon 2B.....	84
Tableau 3.2	Contraintes résiduelles en surface évaluées par la méthode du trou dans le plan de coupe par EDM.....	86
Tableau 3.3	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Base 2A.....	99
Tableau 3.4	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Montant 2A.....	100
Tableau 3.5	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Base 2B.....	101
Tableau 3.6	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Montant 2B.....	102
Tableau 3.7	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 2C.....	108
Tableau 3.8	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 2D.....	109
Tableau 3.9	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 3A	112
Tableau 3.10	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 3B	113
Tableau 3.11	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 5A	116
Tableau 3.12	Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 5B	117
Tableau 3.13	Coefficient d'expansion thermique pour les deux alliages composant les joints soudés.....	123

Tableau 3.14 Contraintes résiduelles évaluées en surface par la méthode du trou comparées aux contraintes résiduelles évaluées par la méthode du contour.	127
Tableau A. 1 Position des points mesurés et résultats obtenus : aube # 12, intrados, près du plafond.....	144
Tableau A. 2 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 12, extrados, près du plafond	145
Tableau A. 3 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 12, intrados, près de la ceinture	146
Tableau A. 4 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 7	147
Tableau A. 5 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 15	147
Tableau A. 6 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 2	148
Tableau A. 7 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 18	149
Tableau A. 8 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, à l'intrados, près du plafond	150
Tableau A. 9 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, à l'intrados, près du plafond	151
Tableau A. 10 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, près de la ceinture.....	152
Tableau A. 11 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, après sablage	152
Tableau A. 12 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 2	153
Tableau A. 13 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 7	154
Tableau A. 14 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 15	154
Tableau A. 15 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 18	155

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Roue de turbine de type Francis.....	6
Figure 1.2	Roue de turbine de type Hélice	7
Figure 1.3	Schéma d'un joint en T de turbine hydraulique, à pénétration partielle	7
Figure 1.4	Géométrie des échantillons adoptée pour l'étude des contraintes résiduelles dans les joints soudés de turbine hydraulique.....	8
Figure 1.5	Soudage à passes multiples à pénétration partielle - Joint en T	9
Figure 1.6	Directions des contraintes résiduelles dans un joint soudé en T	12
Figure 1.7	Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale dans un joint soudé bout-à-bout a) en fonction de la position transversale ; b) en fonction de la position longitudinale (Dong et Zhang, 1999) ; c) Directions des mesures	13
Figure 1.8	a) Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale à un joint soudé pour différents types de préparations de soudure (Veiga et al, 2002) ; b) Directions des mesures	14
Figure 1.9	Soudage à passes multiples – Joint bout-à-bout.....	14
Figure 1.10	Plaques épaisses soudées bout-à-bout, en double V.	15
Figure 1.11	Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale (en MPa) dans une tranche perpendiculaire à l'axe longitudinal d'un joint soudé (DeWald et Hill, 2001)	15
Figure 1.12	Variation de la contrainte résiduelle transversale le long de l'axe longitudinal du cordon de soudure, dans une plaque d'Al-Li soudée bout-à bout (Dong et Zhang, 1999)	16
Figure 1.13	a) Variation de la contrainte résiduelle transversale le long de l'axe normal, dans un joint soudé à passes multiples dans un alliage d'aluminium (Smith et al, 1988) ; b) Direction de la mesure	17

Figure 1.14 a) Variation des contraintes résiduelles dans la base d'un joint en T, en fonction de la profondeur dans la base (Wimpory et al, 2003) ; b) Directions des mesures	19
Figure 1.15 Directions des mesures effectuées par Teng et al (2001).....	20
Figure 1.16 Contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale pour plusieurs épaisseurs de plaques (Teng et al, 2001)	20
Figure 1.17 Variation de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale dans un joint soudé en T, pour deux niveaux de pénétration. (Teng et al, 2001).....	21
Figure 1.18 Variation de la contrainte résiduelle transversale en fonction de la position transversale dans un joint soudé en T, pour deux niveaux de pénétration (Teng et al, 2001).....	22
Figure 1.19 a) Variation de la contrainte résiduelle transversale en fonction de la position normale, au raccordement d'un joint soudé en T de 50 mm d'épaisseur (O'Dowd et al, 2004) ; b) Directions utilisées pour la mesure des contraintes résiduelles.....	24
Figure 1.20 Effet de la température du traitement thermique sur la relaxation des contraintes résiduelles principales maximales dans un joint soudé (Olabi et Hashmi, 1993).....	26
Figure 1.21 Effet d'un champ magnétique sur les domaines magnétiques (Dorlot et al, 1986)	27
Figure 1.22 Méthode du trou (adaptée de Lu, 1996)	29
Figure 1.23 RS-200 (Vishay Measurement Group, 1993).....	29
Figure 1.24 Méthode du trépan (adaptée de Lu, 1996)	31
Figure 1.25 Pièce initiale avec contraintes résiduelles (Prime et al, 2002)	33
Figure 1.26 Profil du plan de coupe (partie droite) après le relâchement des contraintes résiduelles (Prime et al, 2002).....	33

Figure 1.27 Distribution des contraintes résiduelles calculées par éléments finis, en imposant à la surface de coupe de reprendre sa forme initiale (Prime et al, 2002)	33
Figure 1.28 Contrainte normale au plan de coupe et cisaillement relâchés lors de la coupe	34
Figure 1.29 Méthode par découpe (Hill et Nelson, 1998)	39
Figure 1.30 Méthode de la compliance (Prime, 2004)	40
Figure 1.31 Profondeur à laquelle les contraintes résiduelles peuvent être mesurées, selon la technique utilisée (Prime, 1999).	42
Figure 2.1 Maillage utilisé pour la validation du choix de la méthode du contour	47
Figure 2.2 Profil de contraintes résiduelles imposé au modèle par éléments finis afin de valider le choix de la méthode du contour	48
Figure 2.3 Simulation des déplacements selon l'axe z produits par un relâchement des contraintes résiduelles lors d'une coupe par électro-érosion dans un joint soudé à pénétration totale	49
Figure 2.4 Schéma du montage du capteur du Stresscan sur un échantillon afin de tracer les courbes d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen.....	52
Figure 2.5 Courbe d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen avant traitement thermique de l'échantillon (Lanteigne, 2003)	53
Figure 2.6 Courbe d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen après traitement thermique de l'échantillon (Lanteigne, 2003)	53
Figure 2.7 Points de mesure par la méthode du trou sur la roue de type Francis.....	56
Figure 2.8 RS-200 fixé sur un support permettant de décaler l'axe de perçage.....	57
Figure 2.9 Variation de la contrainte résiduelle transversale σ_y en fonction de sa position transversale (position suivant y) à un joint soudé	59
Figure 2.10 Géométrie des échantillons assemblés à l'aide des soudures.....	60
Figure 2.11 Assemblage des plaques pour le soudage	62
Figure 2.12 Position des rosettes rectangulaires installées avant le soudage	63

Figure 2.13	Protection des jauges pendant le soudage	64
Figure 2.14	Appendices de départ et d'arrêt	65
Figure 2.15	Passes de soudure sur les échantillons	65
Figure 2.16	Appendices coupées à l'ArcAir	65
Figure 2.17	Échantillon meulé et sablé	66
Figure 2.18	Coupes à la scie et par électro-érosion effectuées sur les échantillons	69
Figure 2.19	Montage pour coupe EDM	70
Figure 2.20	Positionnement pour la coupe par électro-érosion dans l'EDM	71
Figure 2.21	Fronts de coupe EDM	71
Figure 2.22	Trou permettant le bridage des deux pièces pendant la découpe	72
Figure 2.23	Trait de coupe par électro-érosion	72
Figure 2.24	Rosette et jauges collées à l'extrémité de l'échantillon 2B pour la mesure des déformations pendant la coupe par EDM	74
Figure 2.25	Échantillon témoin pour le profil de coupe par électro-érosion	75
Figure 2.26	Problème de coupe de l'échantillon 2C causé par le laitier	76
Figure 2.27	Mesure de la base par CMM	79
Figure 2.28	Mesure du montant par CMM	79
Figure 2.29	Profil typique d'une passe de mesures par CMM	80
Figure 2.30	Mesures de contraintes résiduelles effectuées à l'aide de la méthode du trou dans le plan de coupe par EDM	81
Figure 3.1	Géométrie et système d'axes de l'échantillon analysé par la méthode du contour	83
Figure 3.2	Contrainte résiduelle normale σ_z relaxée lors de la coupe par électro- érosion de l'échantillon 2B en fonction de la position en y ($a/t = 0$, $e =$ $1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	85
Figure 3.3	Zone de validité des positions mesurées par CMM sur une surface de coupe EDM	88
Figure 3.4	Surface ajustée pour le montant 3A (dans le repère du montant - Figure 2.28)	90

Figure 3.5 Surface ajustée selon le plan de coupe pour le montant 3A après soustraction du profil de la coupe EDM	92
Figure 3.6 Mince lamelle résultant de la coupe EDM sur les échantillons à pénétration partielle	93
Figure 3.7 Profil de la coupe par EDM pour les échantillons 5X (127 mm d'épaisseur)	94
Figure 3.8 Erreur sur le profil de contraintes résiduelles causée par le profil de la coupe EDM dans un échantillon 5X (127 mm d'épaisseur)	95
Figure 3.9 Maillage du montant 2B	96
Figure 3.10 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour la base 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	99
Figure 3.11 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	100
Figure 3.12 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour la base 2B ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	101
Figure 3.13 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2B ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	102
Figure 3.14 Comparaison des mesures effectuées pour la base et le montant 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	104
Figure 3.15 Comparaison des mesures effectuées pour la base et le montant 2B sans traitement thermique ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	105
Figure 3.16 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2C ($a/t = 0,3$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)	108
Figure 3.17 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2D ($a/t = 0,6$, $e = 3,9$ mm et $C = 83,9$ mm)	109
Figure 3.18 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 51mm d'épaisseur ($C = 83,9$ mm)	110
Figure 3.19 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 3A ($a/t = 0,3$, $e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm)	112

Figure 3.20 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 3B ($a/t = 0,6$, $e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm).....	113
Figure 3.21 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 76 mm d'épaisseur ($e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm).....	114
Figure 3.22 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 5A ($a/t = 0,3$, $e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm).....	116
Figure 3.23 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 5B ($a/t = 0,6$, $e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm).....	117
Figure 3.24 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 127 mm d'épaisseur ($e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm).....	118
Figure 3.25 Valeurs extrêmes de la moyenne des contraintes résiduelles normales (σ_z) sur la longueur des échantillons	120
Figure 3.26 Effet du traitement thermique sur un échantillon de 51 mm d'épaisseur, soudé à pleine pénétration ($e = 1,6$ mm $C = 83,9$ mm).....	122
Figure A. 1 Points mesurés à l'intrados, près du plafond	143
Figure A. 2 Points mesurés à la ceinture	143
Figure A. 3 Points mesurés à l'extrados, près du plafond	145
Figure A. 4 Zone agrandie de l'extrados.....	145
Figure A. 5 Mesures près de la ceinture (intrados et extrados)	146
Figure B. 1 Géométrie d'une rosette utilisée pour la méthode du trou (adaptée de ASTM, 1999).....	156
Figure B. 2 Déformation relâchée en fonction de la profondeur du trou	158
Figure C. 1 Rosette rectangulaire	160

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a	Largeur du méplat dans un joint soudé
$\bar{a}, \bar{b}$	Nombres adimensionnels indépendants du matériau pour la méthode du trou
d	Profondeur de la coupe pour la méthode de la compliance
d_p	Distance entre les plans cristallographiques
e	Distance entre le plan de coupe par EDM et la surface supérieure de la base de l'échantillon
p, q, t	Combinaisons de déformations pour la méthode du trou
t	Épaisseur des plaques constituant les échantillons
w	Largeur de la base tronquée
$\bar{A}$	Constante de calibration pour la méthode du trou
A_i	Coefficient à déterminer pour la méthode de la compliance
ASTM	American Society for Testing and Materials
$\bar{B}$	Constante de calibration pour la méthode du trou
C	Largeur de la coupe par EDM
$C_i(d_j)$	Réponse en déformation à la surface de la pièce pour la méthode de la compliance
CMM	Coordinate Measuring Machine
D	Diamètre moyen d'une rosette
D_{cmm}	Distance sur laquelle s'étend la mesure par CMM
D_0	Diamètre du trou (méthode du trou)
E	Module d'élasticité
F	Force appliquée à une éprouvette en traction
EDM	Electro-discharge machining (Coupe par électro-érosion)
L	Longueur des échantillons
M	Moment de flexion
M_i	Moment de flexion selon l'axe i
MN	Déplacement minimal

MX	Déplacement maximal
MP	Paramètre magnétique pour la méthode du bruit de Barkhausen
P	Force de traction appliquée à un joint de turbine hydraulique
$P_i(y)$	Séries polynomiales, polynôme de Legendre ou autre fonction linéairement indépendantes pour la méthode de la compliance
P, Q	Paramètres utilisés pour la méthode du trou
R	Rayon du congé de soudure des échantillons
S_Y	Contrainte d'écoulement du matériau
T	Paramètre utilisé pour la méthode du trou
W	Largeur des plaques des les échantillons
Z	Profondeur du trou (méthode du trou)
β	Angle d'orientation de la contrainte résiduelle maximale pour la méthode du trou
γ_{xy}	Cisaillement dans le plan x - y
ε	Déformation
$\varepsilon_{1,2}$	Déformations principales
ε_r	Déformation relâchée en surface
ε_i	Déformation mesurées par la jauge i
$\varepsilon(p_j)$	Déformation en fonction de la profondeur de coupe pour la méthode de la compliance
θ	Angle des préparations de soudures
$\sigma_{1,2}$	Contraintes principales
$\sigma_{\perp}$	Contrainte résiduelle perpendiculaire à la direction longitudinale d'une soudure
$\sigma_{//}$	Contrainte résiduelle parallèle à la direction longitudinale d'une soudure
σ_{45}	Contrainte résiduelle à 45° avec la direction longitudinale d'une soudure
σ_i	Contrainte mesurée selon l'axe i
$\sigma_x(y)$	Profil de contraintes résiduelles dans la direction x en fonction de la position y
σ_{max}	Contrainte résiduelle maximale
σ_{min}	Contrainte résiduelle minimale

$\sigma_{max_contour}$	Contrainte résiduelle maximale évaluée à l'aide de la méthode du contour
$\sigma_{min_contour}$	Contrainte résiduelle minimale évaluée à l'aide de la méthode du contour
σ_{z_max}	Contrainte résiduelle maximale mesurée par la méthode du contour selon la direction normale z
σ_{z_min}	Contrainte résiduelle minimale mesurée par la méthode du contour selon la direction normale z
σ_{z_trou}	Contrainte résiduelle évaluée à l'aide de la méthode du trou selon la direction z
τ	Cisaillement en surface
τ_{ij}	Cisaillement dans le plan $i-j$
ν	Coefficient de poisson
φ	Angle de la direction de l'état de contraintes principal

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Mesures effectuées à l'aide du bruit de Barkhausen	143
Annexe B	Méthode de calcul pour la méthode du trou	156
Annexe C	Méthode de calculs des contraintes principales selon les déformations lues par une rosette rectangulaire	159
Annexe D	Programme Matlab	161
D.1	cmm2matlab.m	163
D.2	plot_passes.m.....	164
D.3	stock_passes.m	164
D.4	coupe_passe.m.....	167
D.5	supprime_passe.m.....	168
D.6	remplir_trou.m.....	169
D.7	truncate_data.m.....	171
D.8	get_coordonnees.m	171
D.9	retournement.m	173
D.10	ajust_data.m.....	173
D.11	translation.m	176
D.12	rotation_pt.m.....	177
D.13	longueur_unitaire.m.....	177
D.14	get_nodes.m.....	178
D.15	get_contraintes.m.....	180
D.16	plot_contraintes.m	183
D.17	plot_profil_moyen.m	185

Introduction

Mise en situation

La performance mécanique des joints soudés des turbines hydrauliques est un facteur déterminant pour le plan opérationnel des centrales hydroélectriques. Une des causes principales de la défaillance des roues de turbines hydrauliques est la rupture des joints soudés soumis à des chargements cycliques. Cependant, la vie en fatigue de ces joints est difficile à prévoir, considérant le nombre important de paramètres qui l'influencent, entre autres, le chargement, les caractéristiques géométriques du joint, la technique et la procédure de soudage, la modification des propriétés mécaniques dans la zone affectée thermiquement.

En particulier, l'effet du chargement doit être évalué en considérant les forces appliquées ainsi qu'en prenant en compte la présence du champ de contraintes résiduelles induit lors du soudage. Puisque la distribution et l'intensité des contraintes résiduelles ne sont pas connues avec un degré de confiance acceptable, un champ de contraintes résiduelles basé sur des normes conservatrices est présentement considéré dans les méthodes de calculs de la résistance des joints soudés des turbines hydrauliques, menant généralement à un surdimensionnement du joint au détriment des considérations d'ordre économique. Une meilleure connaissance du champ des contraintes résiduelles est nécessaire afin d'améliorer la méthode de conception de ce type de joint et de réduire les coûts de fabrication. Pour répondre à ce besoin, le présent projet a été entrepris dans le cadre d'un programme de recherche visant à optimiser le design des joints soudés, à pénétration totale et partielle, et à augmenter la performance en service de ces joints.

Objectif

L'objectif du projet est de développer une méthode fiable pour évaluer la distribution des contraintes résiduelles induites lors de la fabrication de joints soudés.

Une configuration typique de joint soudé en T, ayant des caractéristiques semblables à celui des roues de turbines hydrauliques, est considérée. L'effet de deux paramètres géométriques influençant la distribution des contraintes résiduelles, soient l'épaisseur des plaques et la profondeur de la pénétration de soudure, sera examiné. La soudure du joint sera réalisée par la même procédure que celle utilisée dans la fabrication des turbines hydrauliques; de plus, le joint soudé sera soumis au même traitement thermique que les composantes industrielles.

Méthodologie

Les contraintes résiduelles, en surface, dans les régions soudées de turbines hydrauliques ont été tout d'abord évaluées à l'aide de la méthode du trou et du bruit de Barkhausen afin de tracer un portrait global de ces contraintes.

La méthode du contour a été retenue pour évaluer la distribution ainsi que l'intensité des contraintes résiduelles au travers de joints soudés en T, fabriqués avec les mêmes spécifications que celles des turbines hydrauliques. Cette méthode comporte un aspect expérimental et un aspect d'analyse numérique.

La partie expérimentale de la méthode consiste à découper le joint soudé par électro-érosion (EDM) afin de relâcher les contraintes résiduelles et ensuite, à mesurer les déplacements du profil déformé de la section de coupe par CMM (Coordinate Measuring Machine). La distribution des contraintes résiduelles perpendiculaires au plan de coupe peut ainsi être évaluée en comparant le profil déformé de la section de coupe au profil de la section originalement droite.

Le volet d'analyse numérique consiste à calculer le champ de contraintes résiduelles à l'aide de la méthode des éléments finis, en imposant les déplacements mesurés à la section du plan de coupe. Afin de générer les données d'entrée au logiciel d'éléments finis, un programme de traitement des mesures de profil de joints soudés

après découpage sera développé, en tenant compte de la trajectoire du fil de coupe, des paramètres de coupe par EDM et en se rapportant à un plan de référence.

Des mesures additionnelles des contraintes résiduelles par la méthode du trou et à l'aide de jauges d'extensométrie pendant la coupe EDM seront également effectuées pour fin de comparaison.

L'ensemble des résultats sera discuté en se référant aux contraintes résiduelles mesurées par la méthode du trou et à celles calculées par éléments finis.

Plan du mémoire

Le mémoire comprend trois chapitres. Le premier chapitre présente d'abord le contexte sur les besoins industriels et sur l'objectif de projet afin de situer la revue bibliographique. Cette dernière partie couvre trois aspects principaux, à savoir, l'origine des contraintes résiduelles dans les joints soudés, la distribution de ces contraintes et les différentes méthodes permettant de les évaluer.

Le deuxième chapitre décrit la procédure expérimentale. Les méthodes utilisées pour la mesure préliminaire des contraintes résiduelles sont d'abord présentées et discutées afin d'adopter la technique la plus appropriée pour les travaux planifiés. Ensuite, la pertinence et la faisabilité de la méthode du contour (méthode adoptée) pour évaluer les contraintes résiduelles sont expliquées. Par la suite, les techniques concernant la préparation des échantillons (joints soudés en T), la coupe des échantillons par électro-érosion, la mesure des déformations avant et pendant la coupe, la mesure des déplacements de la surface de coupe à l'aide d'une CMM sont décrites.

Le troisième chapitre consiste en l'analyse des contraintes résiduelles au travers du joint soudé, principalement à l'aide de la méthode du contour. Les méthodes de calculs et les outils utilisés sont décrits, les résultats obtenus sont analysés puis le degré

de l'imprécision de la méthode du contour est estimé. Une discussion compare les résultats obtenus par les différentes méthodes de mesure utilisées.

Finalement, la conclusion met l'emphasis sur les résultats obtenus lors de cette étude et des recommandations pour les travaux futurs sont formulées.

Chapitre 1

Revue bibliographique

Afin de bien situer la recherche bibliographique, le contexte sur les besoins industriels est d'abord introduit. Ensuite, l'origine des contraintes résiduelles est expliquée et des résultats sur leur distribution tridimensionnelle dans deux types de joints soudés sont présentés. L'effet du traitement thermique sur la relaxation des contraintes est également examiné. Finalement, une revue des principales méthodes de mesure des contraintes résiduelles met l'accent sur les principes de base et sur les avantages et inconvénients de chacune.

1.1 Contexte de la recherche

Le présent projet de recherche fait partie d'un programme visant à approfondir les connaissances sur le comportement en service des joints soudés des roues de turbines hydroélectriques et en particulier, sur l'influence des contraintes résiduelles induites par le soudage. Ces joints de grandes dimensions doivent supporter les efforts associés aux cycles de départ et d'arrêt, aux modifications de charges en fonctionnement, à la turbulence de l'écoulement, à la survitesse ainsi qu'aux interactions rotor-stator. Les contraintes résiduelles, induites principalement par le soudage, s'ajoutent à ces efforts. Pour prédire avec confiance la vie en fatigue des turbines, il faut connaître la valeur de ces contraintes.

Afin d'établir le lien entre les conditions d'opération en service des roues de turbines hydrauliques et les travaux réalisés dans le présent projet, la configuration des roues de turbines, leur procédé de fabrication et leur mode de chargement sont brièvement introduits dans cette section. La géométrie d'échantillon retenue pour étudier les contraintes résiduelles induites dans ces roues est présentée.

Les roues de turbines hydrauliques sont réalisées en soudant les aubes aux deux éléments d'assemblage appelés ceinture et plafond pour des roues de type Francis (Figure 1.1), et au moyeu pour des roues de type Hélice (Figure 1.2). Ces roues sont constituées de joints soudés en T qui jointent les aubes aux éléments d'assemblages appelés ceinture et plafond pour des roues de type Francis et le moyeu pour des roues de type Hélice (Voir Figure 1.1 et Figure 1.2). Dans les deux cas, ce sont des joints soudés en T, à pénétration partielle ou totale. Le type de joint soudé à pénétration partielle est illustré de façon schématique à la Figure 1.3. Les chanfreins des deux côtés de l'aube à souder (représentée à la figure par le montant) ne sont pas pratiqués sur toute son épaisseur, ce qui crée un méplat de largeur a où le métal d'apport ne peut se déposer.

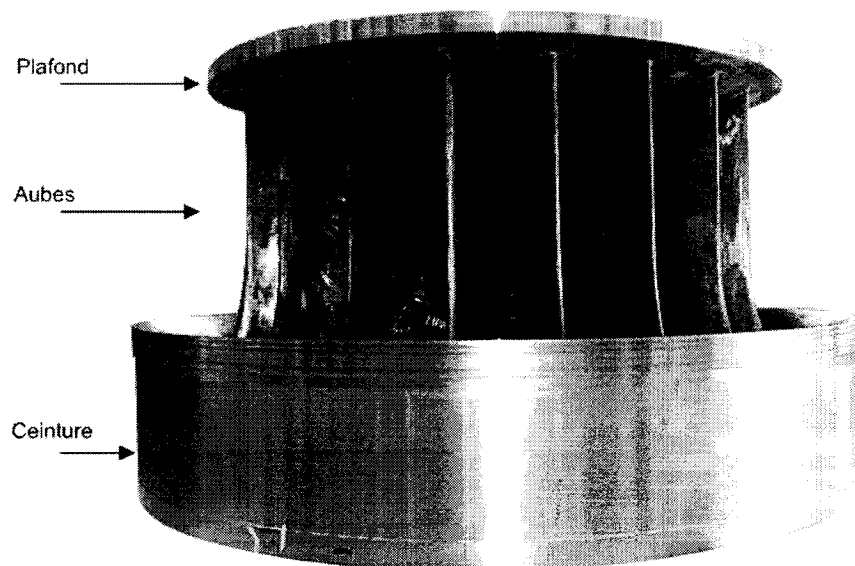


Figure 1.1 Roue de turbine de type Francis

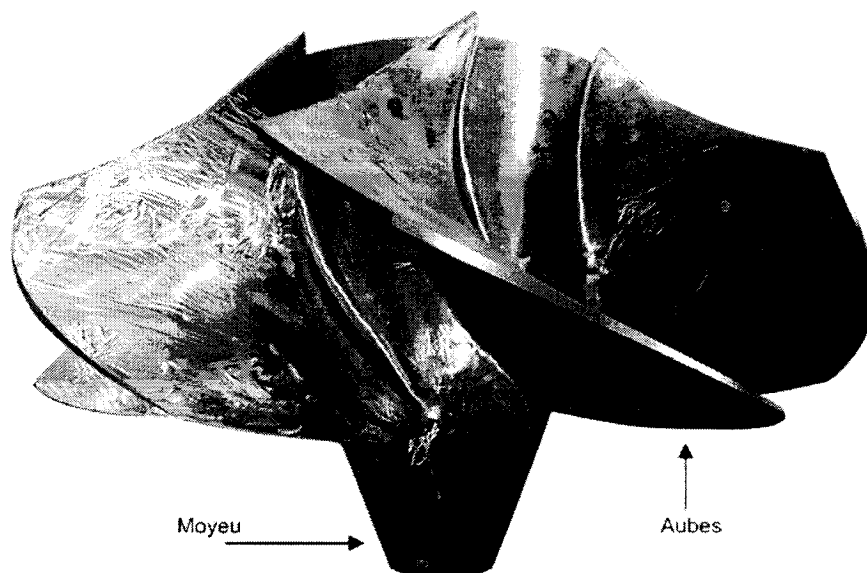


Figure 1.2 Roue de turbine de type Hélice

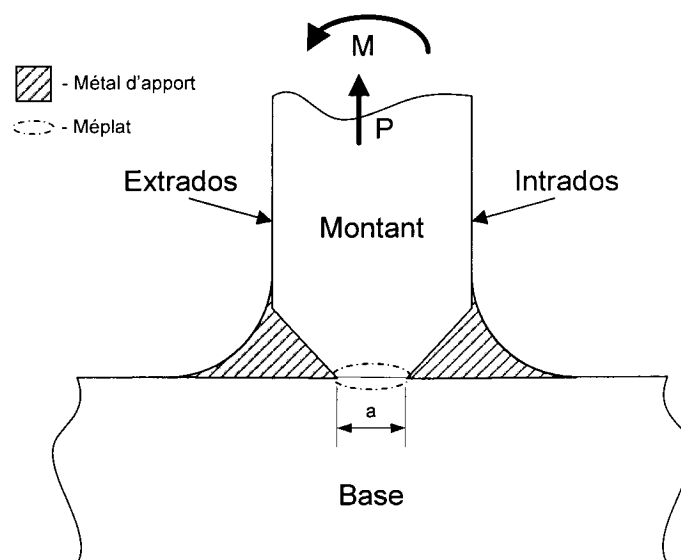


Figure 1.3 Schéma d'un joint en T de turbine hydraulique, à pénétration partielle

Dans une turbine hydraulique, le joint soudé est soumis à un moment de flexion M et à une force P causées par le différentiel de pression entre le côté intrados et extrados des aubes en fonctionnement. La zone non soudée se comporte comme une

fissure longue dont la vitesse de propagation dépend, entre autres, de la fluctuation du moment M et de la force P dans le temps et de la valeur des contraintes résiduelles dans la région avoisinant le méplat. La contrainte résiduelle d'intérêt est celle qui agit dans une direction perpendiculaire au méplat, soumettant la zone non soudée au mode d'ouverture de fissuration. Bien que le joint à pénétration partielle soit plus économique à réaliser que le joint à pénétration totale, sa fiabilité exige donc l'application de méthodes de calculs spécifiques afin de prédire la propagation de la fissure formée par le méplat non soudé.

Afin de représenter le plus fidèlement possible la configuration typique d'une aube de turbine hydraulique soudée aux éléments d'assemblage (plafond ou ceinture), la géométrie des échantillons adoptée pour cette étude sur les contraintes résiduelles induites par le soudage est montrée à la Figure 1.4.

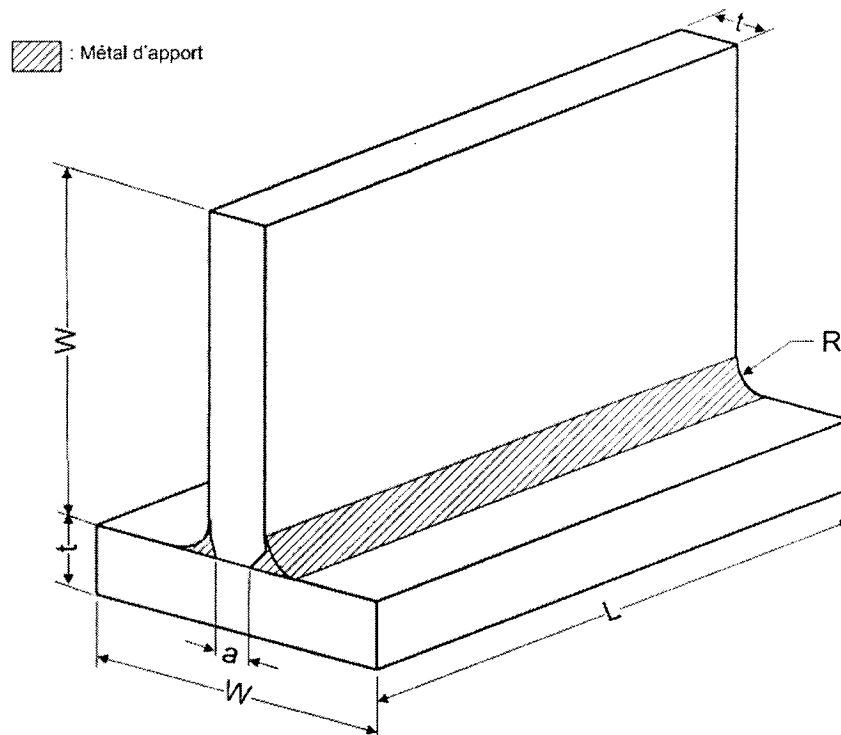


Figure 1.4 Géométrie des échantillons adoptée pour l'étude des contraintes résiduelles dans les joints soudés de turbine hydraulique

La plaque horizontale représente l'élément d'assemblage alors que la plaque verticale, qui représente l'aube, comporte deux chanfreins. L'épaisseur des plaques, t , et la dimension des chanfreins qui est fonction de a et t , varient d'un échantillon à l'autre; la valeur du rayon du congé de soudure, R , est choisi en fonction de l'épaisseur des plaques utilisées. Les dimensions W (largeur des plaques) et a (largeur du méplat), variant pour chaque échantillon, caractérisent chaque joint. La longueur de l'échantillon L est un paramètre constant. L'épaisseur de plaques, le rayon du congé de soudure et la largeur du méplat sont choisis afin de représenter le plus fidèlement possible les dimensions des roues de turbine hydrauliques couramment fabriquées. Le matériau utilisé est un acier inoxydable martensitique dont les spécifications ne sont pas dévoilées afin de conserver la confidentialité quant aux matériaux utilisés par le turbinier.

Les joints soudés des roues de turbines sont réalisés par passes multiples (voir Figure 1.5) car les aubes à souder sont très épaisses, l'épaisseur variant normalement entre 25 et 350 mm. L'alternance des passes est très importante; elle permet de minimiser le déséquilibre des déformations induites dans le joint au cours du soudage. Les échantillons seront fabriqués en respectant des séquences similaires.

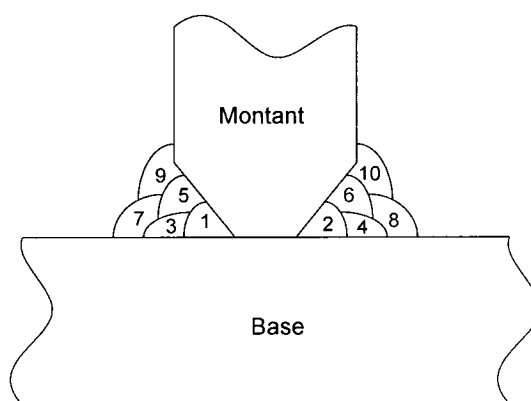


Figure 1.5 Soudage à passes multiples à pénétration partielle - Joint en T

Dans cette étude, l'effet de l'épaisseur des plaques et de la dimension du méplat sur le champ de contraintes résiduelles sera examiné; l'influence d'un traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles sera aussi évaluée. Les échantillons seront fabriqués selon les spécifications appliquées aux turbines hydrauliques, en utilisant le même matériau que ces turbines. Les contraintes résiduelles seront évaluées le plus près possible du plan du méplat, dans un plan d'intérêt localisé à une distance e par rapport à la surface supérieure de la plaque horizontale (voir Figure 2.18).

1.2 Distribution des contraintes résiduelles dans les joints soudés

Les travaux de recherche rapportés dans la littérature concernant l'étude des contraintes résiduelles dans des joints soudés en T sont, pour la plupart, reliés au domaine des réservoirs sous pression. Dans ces cas, la configuration analysée est celle représentant les supports qui sont soudés au réservoir et l'intérêt porte sur les contraintes résiduelles induites dans le réservoir (la base) plutôt que celles induite dans le support (le montant). Pour les fins de ce projet, il sera donc nécessaire d'établir une corrélation entre les contraintes résiduelles mesurées dans la base (voir Figure 1.3) et celles qui seront mesurées à la base du montant, dans la direction normale à la base.

Dans cette section, la distribution des contraintes résiduelles dans les joints soudés est rapportée d'une façon générale, en considérant les joints bout-à-bout et les joints en T. Cependant, avant d'examiner cet aspect, il convient de décrire brièvement l'origine de ce phénomène.

1.2.1 Origine des contraintes résiduelles dans les joints soudés

L'opération de soudage engendre des contraintes résiduelles qui résultent du champ de température non uniforme qui caractérise le procédé. Lors du soudage, un fort gradient de température existe entre la région du métal d'apport fondu et celle du métal de base non fondu. De très grandes déformations plastiques sont alors créées et

forment, avec les déformations thermiques, un système à l'équilibre. Au cours du refroidissement, le métal de base non fondu atteint la température ambiante plus rapidement que celui dans la région du métal fondu et conséquemment, il se contracte davantage que le métal dans la région qui demeure plus chaude. Lorsque le métal de la zone fondue est, à son tour, sur le point de refroidir, il ne peut se contracter librement car il est retenu par le matériau environnant déjà refroidi. Les zones qui se solidifient en dernier se trouvent finalement tendues, les zones s'étant solidifiées en premier, au contraire, sont comprimées. Ce sont les déformations plastiques créées par le champ de température non uniforme, demeurées présentes dans le matériau lors du refroidissement, qui engendrent la création des contraintes résiduelles afin de conserver le système à l'équilibre.

Les contraintes résiduelles dans les joints soudés sont des contraintes normales définies selon les directions longitudinale, transversale et normale; ces directions sont illustrées pour un joint soudé en T à la Figure 1.6. Dans tous les types de joint soudé, les contraintes résiduelles sont en équilibre interne, c'est-à-dire que l'intégrale des contraintes dans le volume des zones en tension est égale à celle des contraintes dans le volume des zones comprimées. Leur valeur peut être aussi élevée que celle de la limite élastique du matériau.

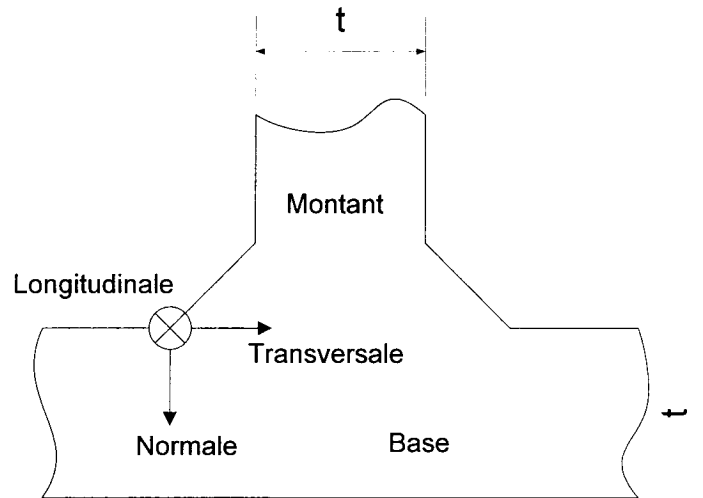


Figure 1.6 Directions des contraintes résiduelles dans un joint soudé en T

Dans les sections qui suivent, les résultats des travaux portant sur la mesure des contraintes résiduelles longitudinales et transversales dans les joints soudés bout-à-bout et dans les joints en T sont rapportés.

1.2.2 Contraintes résiduelles dans les joints soudés bout-à-bout

a) Contraintes résiduelles longitudinales

La variation de la contrainte résiduelle longitudinale (notée ici σ_y) dans un joint soudé bout-à-bout est illustrée schématiquement à la Figure 1.7 (Dong et Zhang, 1999). Le long de l'axe transversal x , la contrainte longitudinale atteint une valeur maximale en tension au centre du cordon de soudure et elle est en compression dans les zones éloignées, de chaque côté du cordon (figure a). Le long de l'axe longitudinal y (figure b), la contrainte résiduelle longitudinale maximale est constante sur toute la longueur du joint sauf aux extrémités, où elle diminue rapidement pour atteindre une valeur nulle.

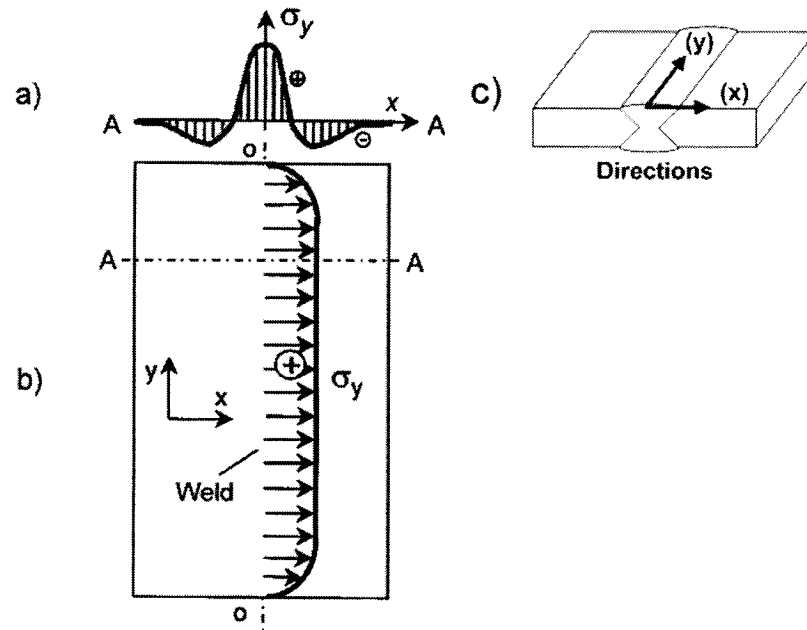


Figure 1.7 Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale dans un joint soudé bout-à-bout
 a) en fonction de la position transversale ; b) en fonction de la position longitudinale
 (Dong et Zhang, 1999) ; c) Directions des mesures

Pour différentes configurations de chanfrein, dans un joint soudé de deux plaques de 11mm d'épaisseur en acier P295GH ($S_Y = 475$ MPa), Veiga et al (2002) ont effectué des mesures de contraintes résiduelles longitudinales le long d'un axe transversal au cordon de soudure à l'aide de la méthode de diffraction des rayons X. Leurs résultats sont reproduits à la Figure 1.8 qui montre la variation de la contrainte résiduelle longitudinale (ici, notée σ_x) en fonction de la distance transversale y par rapport au centre du cordon de soudure. Ces résultats affichent un profil semblable à celui montré à la Figure 1.7 (Dong et Zhang, 1999). La configuration du chanfrein influence le niveau des contraintes résiduelles, particulièrement celles en tension, au centre du cordon de soudure. À cet endroit, la contrainte en tension est élevée ; elle atteint environ 440 MPa (92 % de la limite d'écoulement) pour le chanfrein en X (double V). Pour les trois configurations de chanfrein (deux plaques espacées, en V et en double V), la zone où la contrainte résiduelle est en tension s'étend jusqu'à plus de 20 mm de l'axe du cordon de soudure.

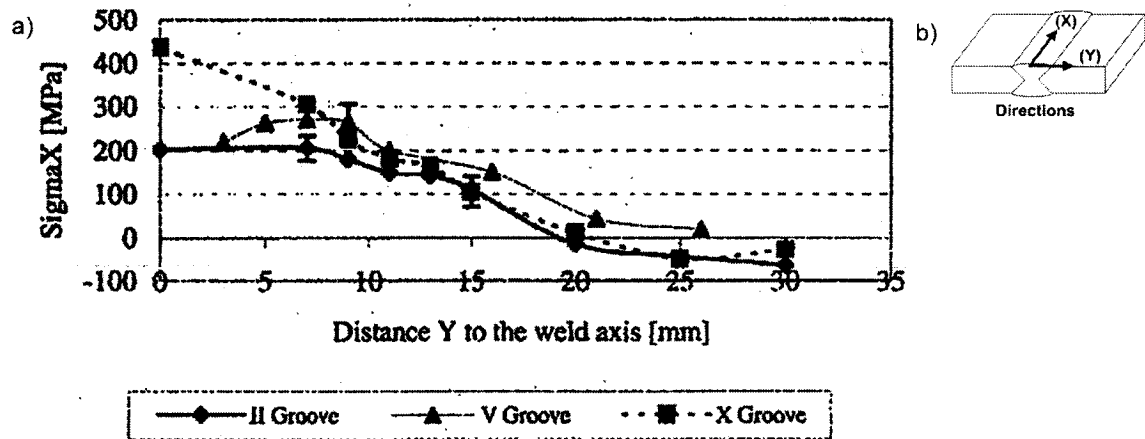


Figure 1.8 a) Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale à un joint soudé pour différents types de préparations de soudure (Veiga et al, 2002) ; b) Directions des mesures

En appliquant la méthode du contour (voir section 1.4.4), DeWald et Hill (2001) ont effectué des mesures de contraintes résiduelles longitudinales dans des plaques d'acier, de 38 mm d'épaisseur, soudées bout-à-bout par un joint en double V, à passes multiples (voir Figure 1.9).

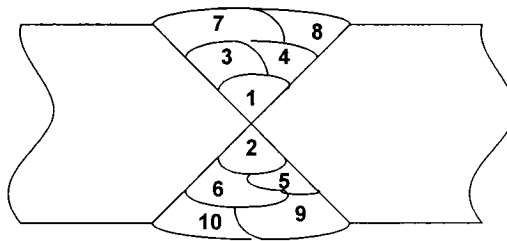


Figure 1.9 Soudage à passes multiples – Joint bout-à-bout

La plaque est illustrée schématiquement à la Figure 1.10 et la distribution de la contrainte résiduelle longitudinale dans une tranche perpendiculaire à l'axe longitudinal du joint (plan d'analyse) est montrée à la Figure 1.11 à l'aide des zones chromatiques d'isocontraintes. Les lignes de contour très rapprochées dans la région du cordon de soudure montrent que le gradient des contraintes résiduelles est élevé alors

que la distribution est plus uniforme dans le reste de la plaque. Dans le métal d'apport et dans la zone affectée thermiquement (au centre de la figure), la contrainte longitudinale dépasse 530 MPa alors qu'elle diminue jusqu'à -300 MPa sur le bord de la plaque.

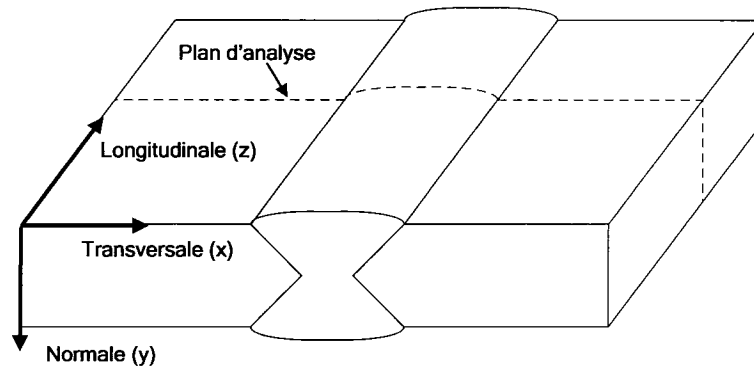


Figure 1.10 Plaques épaisses soudées bout-à-bout, en double V.

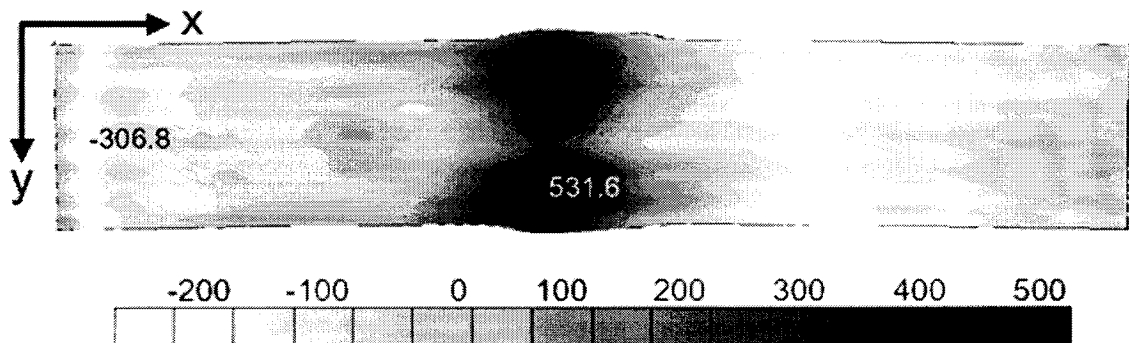


Figure 1.11 Distribution de la contrainte résiduelle longitudinale (en MPa) dans une tranche perpendiculaire à l'axe longitudinal d'un joint soudé (DeWald et Hill, 2001)

b) Contraintes résiduelles transversales

Les résultats des mesures par diffraction des rayons X de la contrainte résiduelle transversale (direction x montrée à la figure 1.10) dans un joint bout-à-bout de deux plaques de 5,1 mm d'épaisseur en Al-Li soudées à l'aide de deux passes de

soudure, de part et d'autre du joint (Dong et Zhang, 1999), sont illustrés à la Figure 1.12. Les mesures ont été effectuées le long de l'axe longitudinal du joint, en quatre endroits différents répartis sur une distance de 305 mm (demi-longueur de la plaque); les points de mesure sont à une distance de 7,6 mm par rapport au bord soudé de la plaque. À environ 19 mm (0,75 pouces) de l'extrémité où le joint se termine, (stop), la contrainte transversale mesurée est en compression (environ -80 MPa ou -12 ksi); elle devient en tension ou presque nulle aux points situés plus près du centre de la plaque. Les valeurs des contraintes obtenues à l'aide d'une prédiction par la méthode des éléments finis, également présentées sur cette figure, indiquent la même tendance que les valeurs expérimentales.

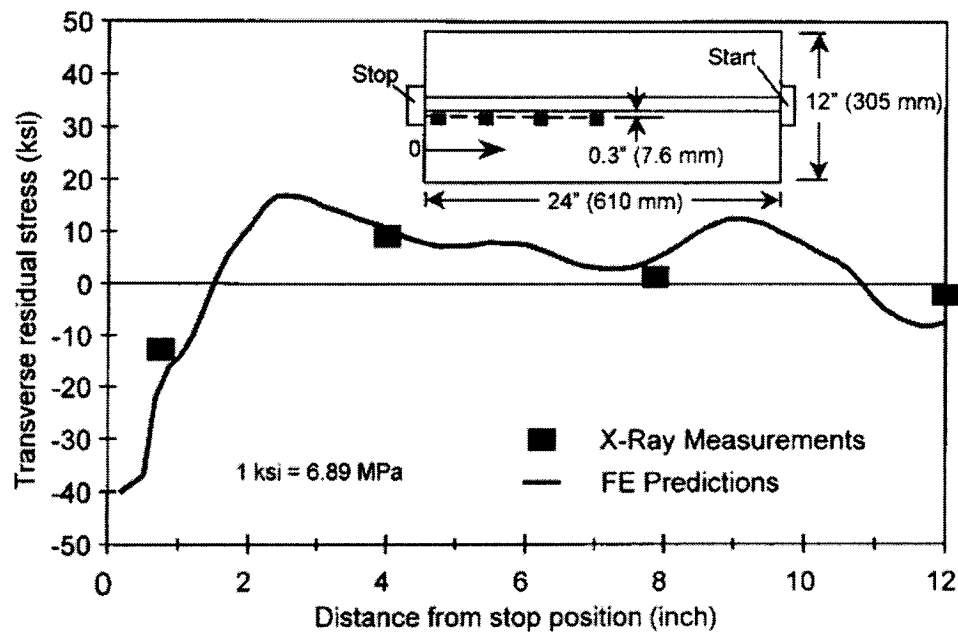


Figure 1.12 Variation de la contrainte résiduelle transversale le long de l'axe longitudinal du cordon de soudure, dans une plaque d'Al-Li soudée bout-à bout (Dong et Zhang, 1999)

Des mesures de la contrainte résiduelle transversale ont été effectuées par Smith et al (1988) sur un joint en double V à passes multiples, dans une plaque d'alliage d'aluminium, de 45 mm d'épaisseur, à l'aide de la méthode de diffraction aux neutrons

et de la méthode par enlèvement de couches successives. Ces auteurs ont pu évaluer la variation de la contrainte résiduelle transversale à travers l'épaisseur du joint soudé (Figure 1.13). Comme prévu, la distribution de la contrainte résiduelle transversale est presque symétrique par rapport au plan passant à mi-épaisseur de la plaque ($x = 22,5$ mm). À la surface du joint, des deux côtés de la plaque, et jusqu'à une profondeur d'environ 10 mm, cette contrainte est en tension. Au cœur de la plaque, elle est en compression et atteint une intensité maximale à mi-épaisseur.

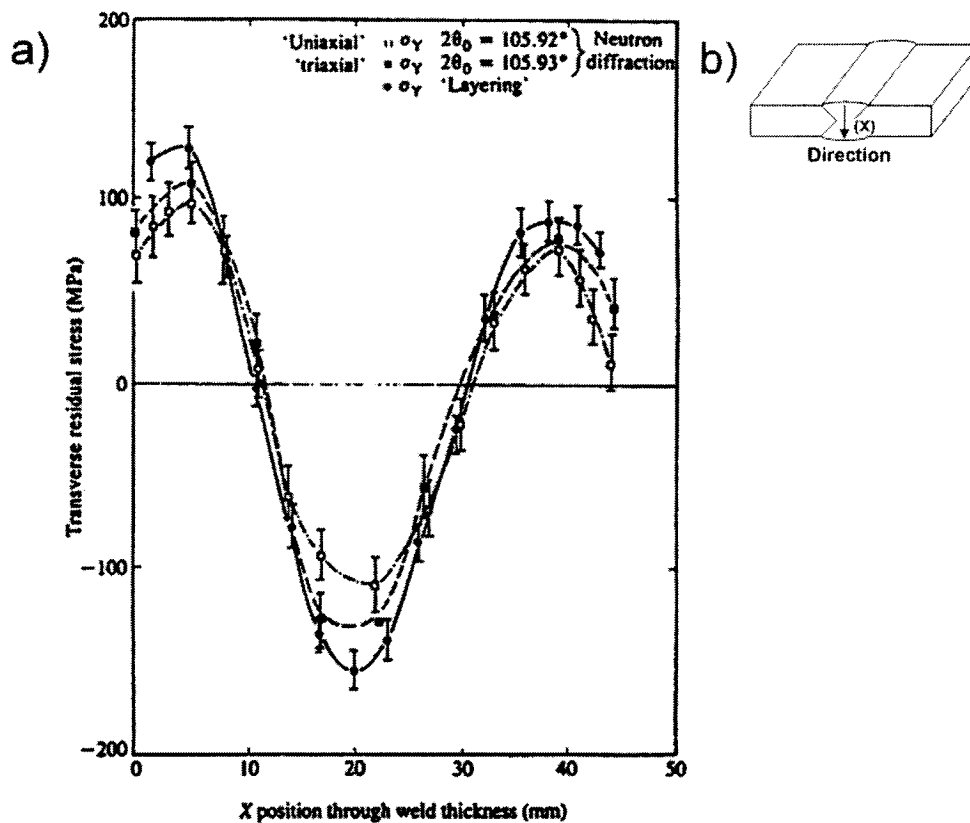


Figure 1.13 a) Variation de la contrainte résiduelle transversale le long de l'axe normal, dans un joint soudé à passes multiples dans un alliage d'aluminium (Smith et al, 1988) ; b) Direction de la mesure

Le profil de la contrainte résiduelle transversale résulte de la procédure de soudure pour un joint double V, à passes multiples. Puisque les dernières passes de soudure sont effectuées en surface, c'est dans cette région que le métal d'apport se

refroidit en dernier. Comme il a été mentionné précédemment (section 1.2.1), les zones qui se solidifient en dernier se retrouvent en tension, les zones s'étant solidifiées en premier (au cœur du joint soudé), au contraire, sont comprimées. C'est également ce qui explique que la contrainte atteigne sa valeur maximale en tension sous la surface, et non en surface. En effet, le métal en fusion se refroidit premièrement à l'extérieur, ainsi qu'à l'intérieur où il est en contact avec la pièce soudée. La zone intermédiaire du métal d'apport en fusion se refroidit en dernier, d'où la présence de contraintes résiduelles plus élevées en tension dans cette région.

1.2.3 Contraintes résiduelles dans les joints en T

La présente section traite des contraintes résiduelles dans les joints soudés en T. Les contraintes sont identifiées selon la nomenclature et le système d'axes présentés à la Figure 1.6.

Wimpory et al (2003) ont mesuré les contraintes résiduelles dans un joint soudé à passes multiples de plaques d'acier *BS EN 10025 Grade S355* (limite d'écoulement, $S_Y = 348$ MPa) de 25 mm d'épaisseur à l'aide de la méthode de diffraction de neutrons. Les mesures ont été effectuées dans la base, à partir du plan d'intersection de cette plaque avec le cordon de soudure, le long de la direction normale y . Leurs résultats sont montrés à la Figure 1.14 qui illustre la variation des trois contraintes résiduelles, longitudinale (z), transversale (x) et normale (y), en fonction de la profondeur de la base (figure a). L'origine du système d'axes est présentée à la figure b.

Les trois contraintes résiduelles σ_z , σ_y et σ_x sont en tension près de la face supérieure de la base ($y = 0$). Elles diminuent rapidement lorsque la distance normale y augmente ; les contraintes longitudinales et transversales, σ_z et σ_x , deviennent en compression mais la contrainte normale σ_y demeure en tension. Cependant, loin du cordon de soudure ($y > 17$ mm), toutes les contraintes résiduelles tendent vers zéro.

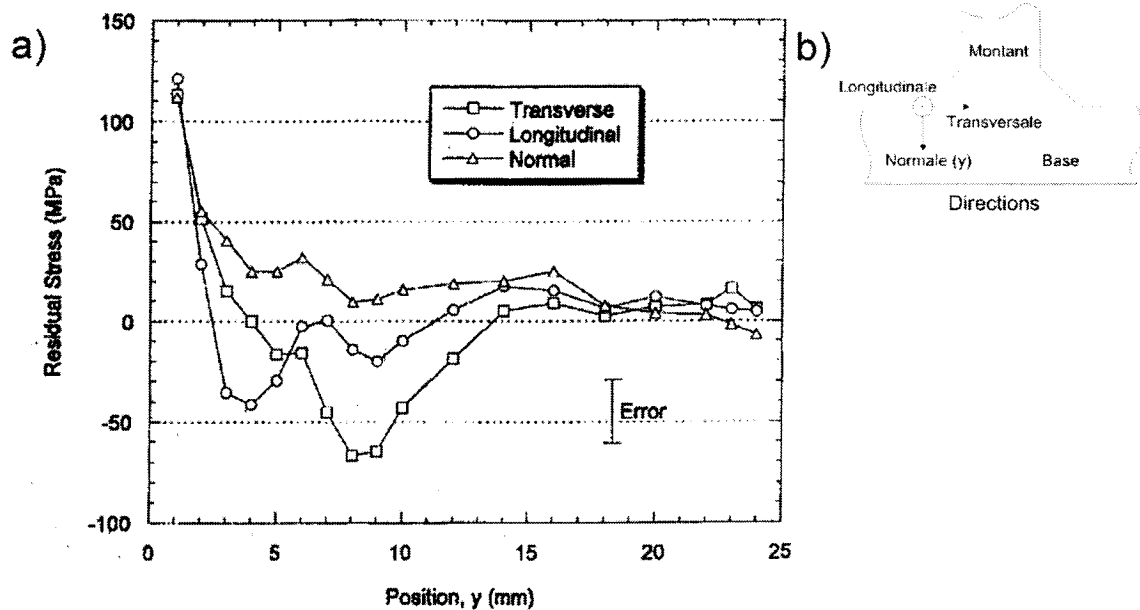


Figure 1.14 a) Variation des contraintes résiduelles dans la base d'un joint en T, en fonction de la profondeur dans la base (Wimpory et al, 2003) ; b) Directions des mesures

À l'aide de modèles thermique et élasto-plastique résolus par la méthode des éléments finis, Teng et al (2001) ont étudié l'effet de l'épaisseur des plaques et du degré de pénétration de la soudure (totale et sans pénétration) sur la distribution des contraintes résiduelles dans un joint soudé en T d'un acier 1020. Le joint est constitué d'un montant de 12 mm d'épaisseur (sans chanfreins de soudure) assemblé à une base (« flange ») à l'aide d'un seul cordon de soudure réalisé de chaque côté du montant ; trois valeurs de l'épaisseur de la base ont été considérées, soit 10, 16 et 22 mm. Le profil des contraintes résiduelles longitudinales (σ_z) et transversales (σ_x) évaluées à mi-longueur du joint est présenté aux Figures 1.16 à 1.18, en fonction de la position transversale (X). Le système d'axes utilisé par les auteurs identifié à la Figure 1.15.

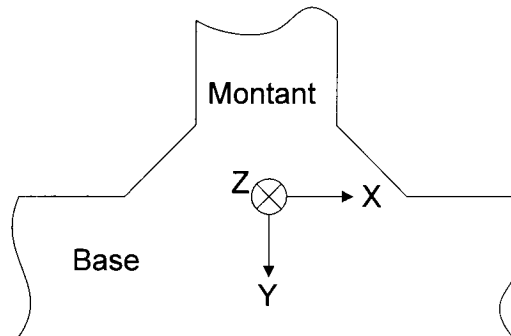


Figure 1.15 Directions des mesures effectuées par Teng et al (2001)

La Figure 1.16 illustre, pour les trois épaisseurs de la base d'un joint sans pénétration, la variation de la contrainte résiduelle longitudinale σ_z en fonction de la distance transversale X . Au centre du montant, la valeur de la contrainte résiduelle en tension est identique pour les trois épaisseurs de plaque ; elle diminue légèrement entre le centre et la surface libre du montant, augmente dans la zone du cordon de soudure (X

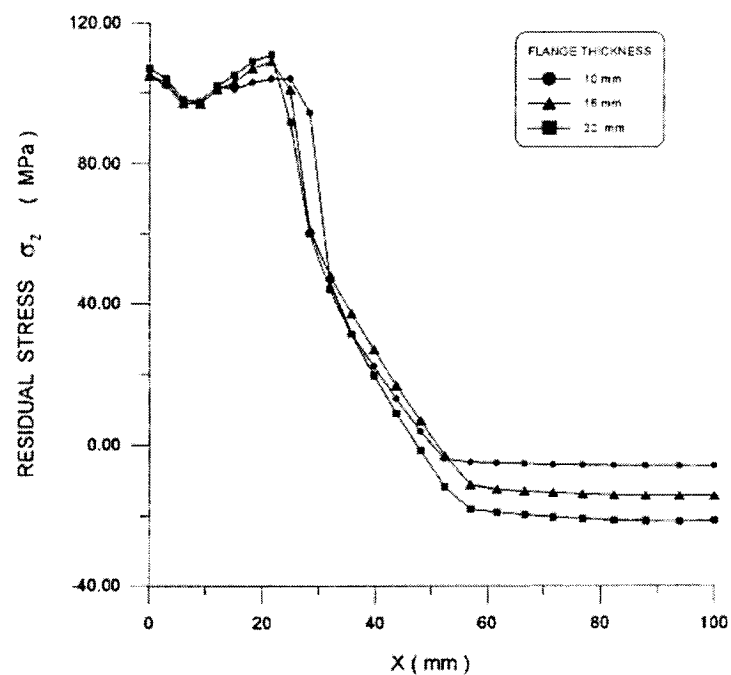


Figure 1.16 Contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale pour plusieurs épaisseurs de plaques (Teng et al, 2001)

> 6 mm) et puis, diminue à nouveau pour passer en compression dans la région loin du cordon de soudure. Une tendance peut être notée : plus l'épaisseur de la base est grande, plus les valeurs extrêmes (en tension et en compression) sont élevées ; l'effet est légèrement plus prononcé en compression. Ce phénomène peut être attribué à la différence des gradients thermiques survenus au cours du refroidissement du joint ; le puit thermique étant plus grand pour des bases plus épaisses.

La Figure 1.17 met en évidence l'effet de la pénétration de la soudure sur la distribution de la contrainte résiduelle longitudinale σ_z le long de l'axe transversal, X . Pour les deux cas étudiés, pénétration totale (6 mm) et sans pénétration (0 mm), le profil de la contrainte résiduelle est similaire ; la zone en tension s'étend relativement loin du centre du montant (environ 50 mm) et le niveau de la contrainte en

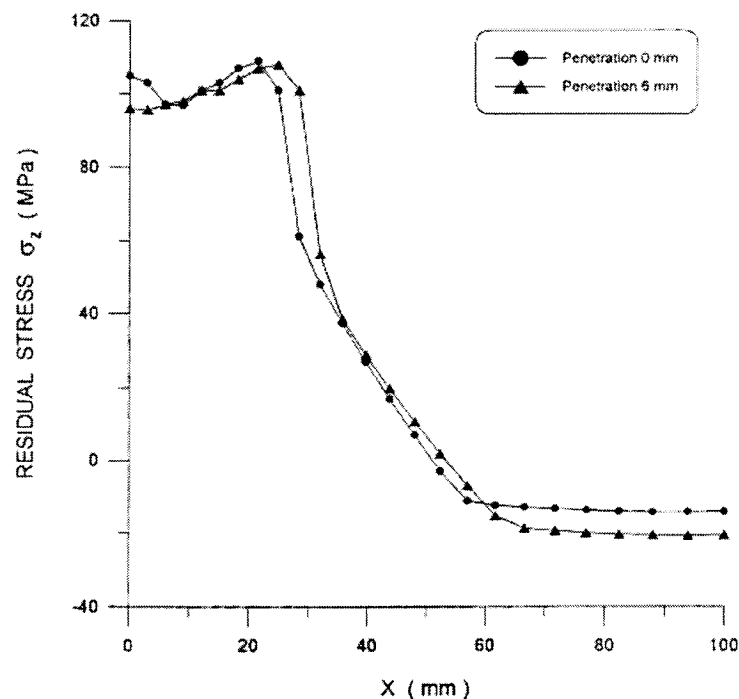


Figure 1.17 Variation de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction de la position transversale dans un joint soudé en T, pour deux niveaux de pénétration. (Teng et al, 2001)

compression est presque identique (environ -20 MPa). Cependant, la valeur de la contrainte en tension, au centre du montant, est légèrement plus faible pour le joint à pénétration totale. Les auteurs associent cette différence à la plus grande profondeur de pénétration, correspondant à une vitesse d'avance du soudage plus faible ou à une augmentation de l'énergie induite dans le matériau ; la zone affectée thermiquement est plus étendue ce qui réduit le gradient thermique.

La Figure 1.18 montre l'influence de la pénétration de la soudure sur la distribution de la contrainte résiduelle transversale σ_x le long de l'axe transversal, X . De manière générale, la contrainte résiduelle maximale en tension est légèrement plus élevée dans le joint soudé sans pénétration que dans celui avec pénétration totale. En particulier, au centre du joint, la contrainte résiduelle dans le joint à pénétration totale

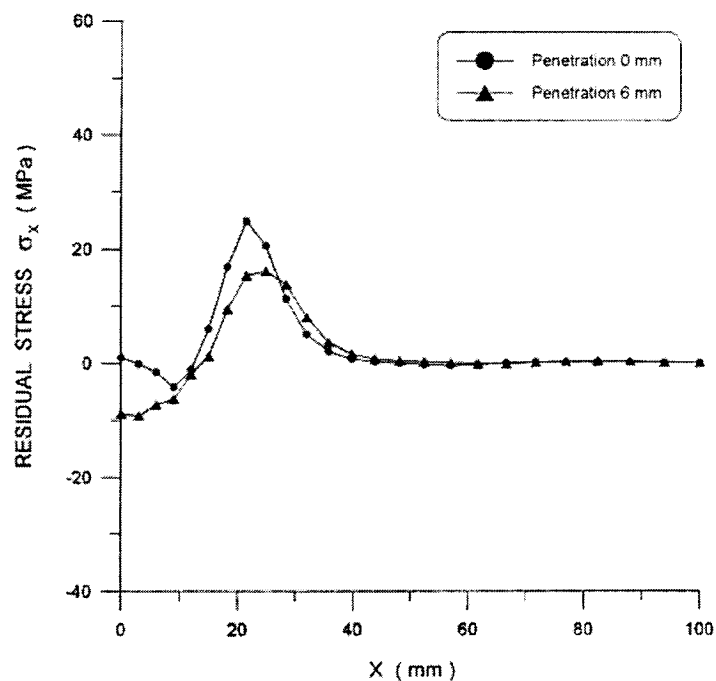


Figure 1.18 Variation de la contrainte résiduelle transversale en fonction de la position transversale dans un joint soudé en T, pour deux niveaux de pénétration (Teng et al, 2001)

est en compression (environ -10 MPa) tandis qu'elle est nulle dans le joint soudé sans pénétration. Cette différence est attribuable au plus faible gradient thermique du joint soudé à pénétration totale au cours du refroidissement, tel que mentionné au paragraphe précédent.

Dans la région comprise entre le centre du joint et la fin du congé de soudure ($X \approx 25$ mm) le profil de la distribution de la contrainte transversale illustré à la Figure 1.18, pour le joint soudé avec une pénétration de soudure de 6 mm (pénétration totale), correspond globalement à celui de la contrainte transversale (en fonction de la position normale) dans un joint bout à bout, tel que présenté à la Figure 1.13. Pour ces deux cas de mesures, la contrainte est en compression au centre du joint puis en tension près du bord de la soudure. De plus, le profil de la contrainte est de forme sinusoïdale.

O'Dowd et al (2004) ont mesuré les contraintes résiduelles dans des joints soudés en T de 50 mm d'épaisseur d'un acier à grande résistance (SE 702, $S_Y = 700$ MPa) et d'un acier à moyenne résistance (BS EN 10025 Grade S355, $S_Y = 348$ MPa). Ces joints étaient soudés à pénétration totale par passes multiples. La Figure 1.19 montre la variation de la contrainte transversale normalisée (σ/S_Y) mesurée à partir du plan d'intersection de la base avec le cordon de soudure (point situé sur la face supérieure de la base), le long de la direction normale y , à travers l'épaisseur (W) de la base (voir figure b). La contrainte résiduelle transversale près des surfaces supérieure et inférieure de la base ($y/W = 0$ et $y/W = 1$) est plus élevée pour l'acier à moyenne résistance. Ce phénomène pourrait être attribué au fait que ce matériau plastifie davantage, dû à sa faible limite élastique.

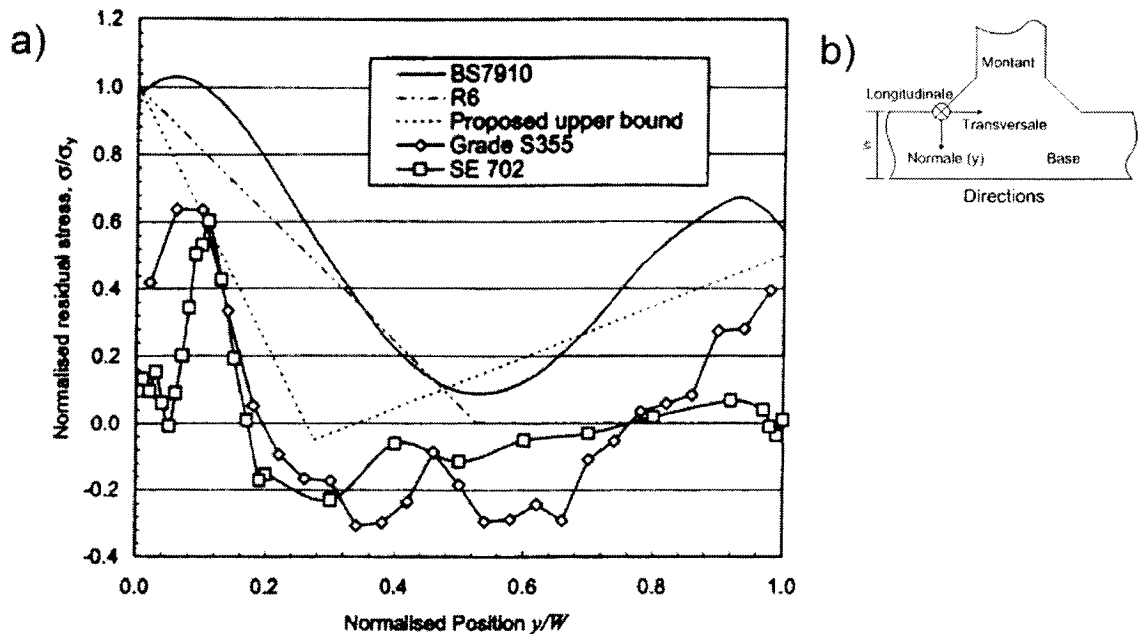


Figure 1.19 a) Variation de la contrainte résiduelle transversale en fonction de la position normale, au raccordement d'un joint soudé en T de 50 mm d'épaisseur (O'Dowd et al, 2004) ; b) Directions utilisées pour la mesure des contraintes résiduelles

La distribution de la contrainte transversale obtenue par O'Dowd et al est comparée à celle prescrite par la norme BS 7910 :1999 ; cette norme est la référence présentement utilisée dans l'industrie hydraulique pour évaluer les contraintes résiduelles présentes dans les joints soudés. Selon les résultats de la Figure 1.19 les valeurs prescrites par la norme sont très conservatrices pour les cas étudiés. D'autres informations sur le profil de contraintes résiduelles proposé par la norme BS 7910 :1999 peuvent être retrouvées dans les ouvrages de Leggatt et Stacey (2002) et de Leggatt et Sanderson (2002).

1.3 Effet du traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles

Un traitement thermique de relaxation de contraintes permet de réduire le niveau des contraintes résiduelles présentes dans un joint soudé mais il peut aussi

diminuer la résistance du matériau (Winholtz et Krawitz, 1995). Dans le cas des aciers inoxydables martensitiques, la résistance mécanique du matériau diminue lorsque la durée et la température du traitement thermique augmentent. Le traitement thermique doit être soigneusement choisi en faisant un compromis entre la relaxation des contraintes résiduelles et les qualités prisées du matériau. Olabi et Hashmi (1993) ont étudié l'effet de la température du traitement thermique sur la relaxation des contraintes résiduelles dans la région avoisinant un joint soudé en acier inoxydable martensitique. Leurs résultats sont illustrés à la Figure 1.20 pour différentes valeurs de température du traitement thermique et, pour fin de comparaison, pour le cas où le traitement thermique n'a pas été appliqué. La variation de la contrainte résiduelle maximale mesurée en fonction de la distance par rapport à l'axe longitudinal de la soudure montre que le traitement thermique uniformise la distribution des contraintes résiduelles. Très près de la ligne de soudure, le traitement thermique a pour effet de diminuer la contrainte résiduelle; à 750 °C; la contrainte résiduelle est complètement relaxée. Aux points de mesure éloignés de l'axe de soudure, le traitement thermique a pour effet d'augmenter légèrement la contrainte résiduelle. Pour le joint traité thermiquement à 550 °C, il est toutefois étrange d'observer une contrainte résiduelle en tension d'environ 50 MPa en s'éloignant du joint soudé. Ce comportement n'a toutefois pas été commenté par les auteurs. Olabi et Hashmi (1993 et 1995) ont observé une diminution de la dureté ainsi qu'une augmentation de la ténacité après le traitement thermique.

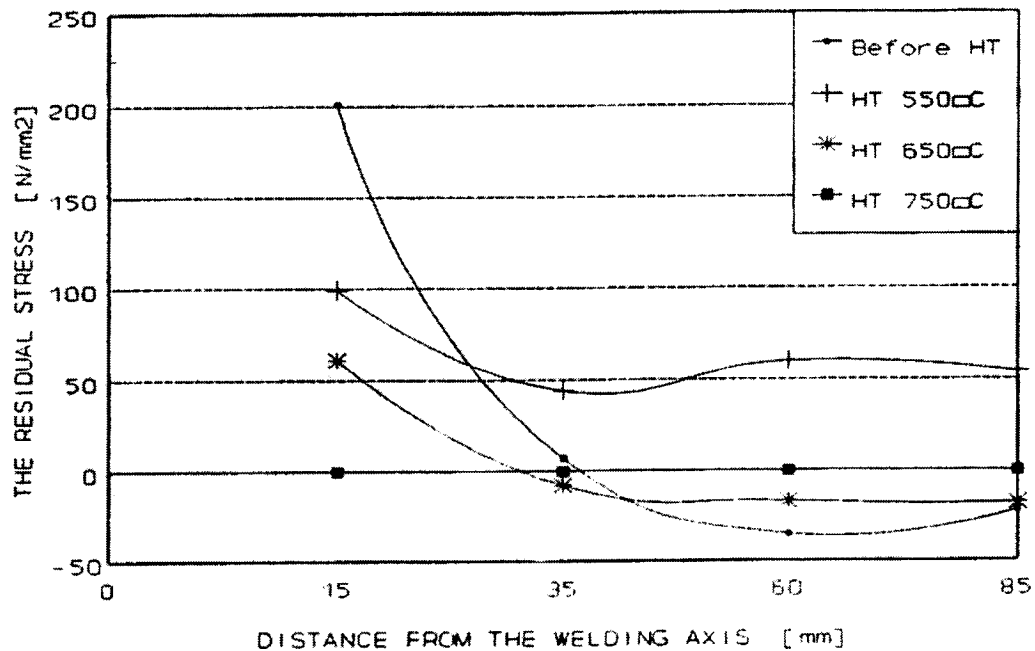


Figure 1.20 Effet de la température du traitement thermique sur la relaxation des contraintes résiduelles principales maximales dans un joint soudé (Olabi et Hashmi, 1993)

1.4 Méthodes de mesure des contraintes résiduelles

Plusieurs méthodes de mesure de contraintes résiduelles ont été développées dans le passé. Il n'y a pas de méthode parfaite, chacune comportant des avantages et des inconvénients. Lorsqu'il faut faire le choix d'une méthode, plusieurs facteurs doivent être pris en considération. Ce sont, principalement, le caractère destructif de certaines méthodes, le type de matériau, l'homogénéité du matériau, la profondeur où les contraintes résiduelles doivent être mesurées, le nombre de mesures à effectuer et l'accessibilité des points de mesure, les orientations des contraintes résiduelles à mesurer, le temps de mesure, la disponibilité des équipements et bien entendu, le coût des mesures.

Dans les sections suivantes, les principales méthodes de mesure de contraintes résiduelles sont présentées, incluant les méthodes non destructives, semi-destructives et

destructives. Cette partie de la revue bibliographique a permis de choisir une méthode optimale pour réaliser l'objectif du présent projet.

1.4.1 Méthode du bruit de Barkhausen

La méthode de mesure par le bruit de Barkhausen consiste à mesurer le signal électromagnétique émis par un matériau ferromagnétique lorsque ce dernier est soumis à l'application locale d'un champ magnétique alternatif connu.

Les matériaux ferromagnétiques sont composés de multiples domaines magnétiques, appelés aussi domaines de Weiss, ayant une orientation aléatoire (voir Figure 1.21 a). Lorsqu'un champ magnétique est appliqué au matériau, les domaines dont l'orientation est la même que celle du champ magnétique imposé croissent, tandis que les autres tendent à diminuer (Figure 1.21 b et c). Les modifications des domaines

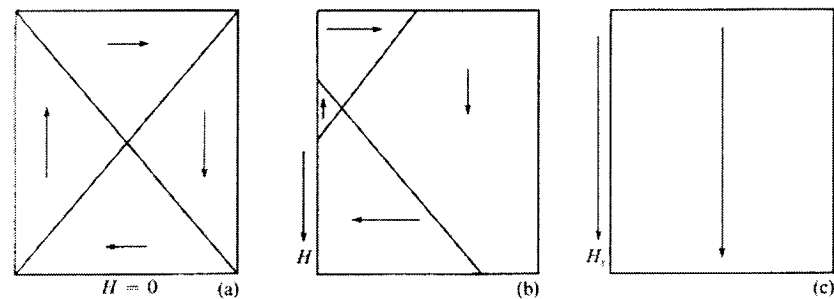


Figure 1.21 Effet d'un champ magnétique sur les domaines magnétiques (Dorlot et al, 1986)

magnétiques sont alors saccadées. Ces incréments sont connus sous le nom de sauts de Barkhausen. Les modifications d'orientation des domaines émettent un signal électromagnétique; signal qui est mesuré à l'aide de la présente méthode.

Le bruit de Barkhausen est influencé par divers paramètres dont les contraintes imposées ou résiduelles, la microstructure du matériau, le fini de surface, la température, la composition chimique ainsi que par l'historique thermique du matériau.

Afin d'appliquer cette méthode pour mesurer les contraintes résiduelles, il faut que les autres paramètres influençant le bruit de Barkhausen soient maintenus constants. De plus, selon Lu (1996), la précision peut diminuer si le matériau est sensible au phénomène de rémanence magnétique. Cette méthode est simple, peu coûteuse et très rapide. Cependant, elle est peu précise et nécessite un étalonnage pour chaque type de matériau.

1.4.2 Méthode du trou

Aussi connue sous le nom anglais « Hole drilling », la méthode du trou consiste à relaxer localement les contraintes résiduelles au point de mesure et à enregistrer les déformations résultantes. Comme le montre la Figure 1.22, une rosette rectangulaire ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) est collée au point de mesure et un petit trou est percé au centre de la rosette. Les contraintes résiduelles présentes dans la région du trou sont alors relâchées et les déformations locales suivant les directions des jauges de la rosette sont enregistrées. À l'aide d'une procédure de calcul développée et validée par Vishay Measurements Group (1993) et normalisée par l'ASTM (1999), l'état de contraintes avant perçage est évalué en fonction de la variation des déformations de la rosette au cours du perçage, en prenant en compte la profondeur du trou.

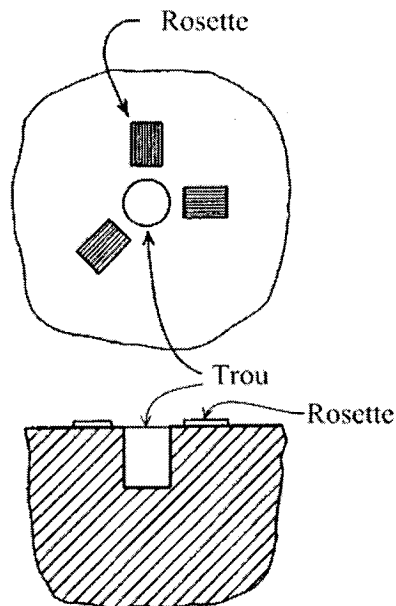


Figure 1.22 Méthode du trou (adaptée de Lu, 1996)

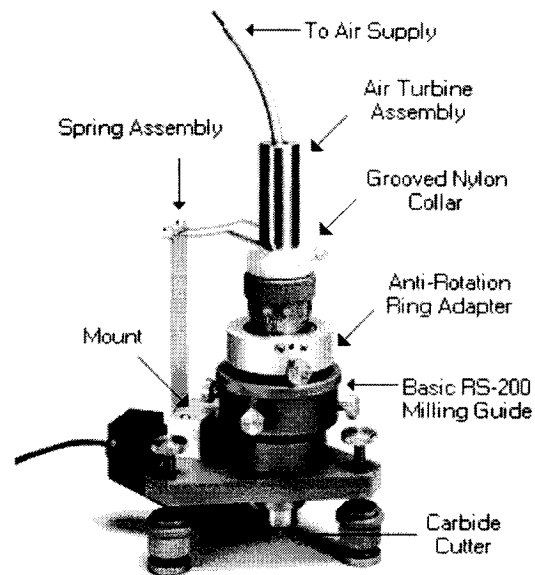


Figure 1.23 RS-200 (Vishay Measurement Group, 1993)

La méthode de perçage est également spécifiée par la norme ASTM. Une attention particulière doit être apportée lors de cette opération afin d'éviter l'addition de contraintes résiduelles localisées (Schajer, 1988a).

La méthode du trou est généralement mise en œuvre à l'aide d'un appareil RS-200 (Figure 1.23). Les trois pattes de l'appareil sont collées à la pièce à instrumenter et l'axe de perçage est centré sur une rosette préalablement collée au point d'intérêt. À l'aide d'une turbine à air et d'une mèche au carbure, le trou est percé en mesurant les déformations lues par la rosette à différentes profondeurs déterminées par la norme de l'ASTM. Selon Lu (1996), cette méthode est considérée comme semi-destructive puisque le défaut causé par la présence du trou peut souvent être toléré ou réparé.

La méthode du trou a toutefois des limitations. La procédure de calculs ayant été établie à l'aide de la méthode des éléments finis en considérant des champs de

contraintes uniformes en profondeur, les mesures doivent donc être effectuées dans les mêmes conditions. Si la courbe de relaxation des contraintes en fonction de la profondeur du trou s'écarte du profil caractéristique spécifié par la norme à certains points de mesure, les mesures à ces points doivent être rejetées. Cependant, dans la note technique de Vishay Measurements Group (1993), les auteurs ont souligné la grande sévérité de la norme concernant le rejet systématique des mesures dans le cas où le champ de contraintes n'est pas uniforme en profondeur.

En pratique, la méthode est applicable pour une profondeur de mesure limitée à environ 0,35 fois le rayon moyen de la rosette utilisée (Schajer, 1988b). Selon Lin et Chou (1995), les valeurs des contraintes résiduelles ne doivent pas dépasser 70 % de la limite d'écoulement si une bonne précision est désirée. Nobre et al (2000) ont observé une erreur significative sur la valeur mesurée lorsque la contrainte résiduelle atteint une valeur égale à 60 % de la limite d'écoulement. Une erreur d'au moins 15 % et 20 % sont perceptibles pour des contraintes mesurées égales respectivement à 70% et 90 % de la limite d'écoulement.

Selon les critères d'acceptabilité de la norme, la méthode ne pourrait être utilisée pour mesurer les contraintes résiduelles près d'un joint soudé puisque, dans ce cas, le champ de contraintes est habituellement non-uniforme. La méthode est pourtant largement utilisée dans les études de contraintes résiduelles sur les joints soudés car elle offre une bonne corrélation avec les mesures effectuées à l'aide d'autres méthodes telles que la diffraction de rayons X et la diffraction de neutrons. La méthode a donc été considérée acceptable pour estimer le niveau de contraintes résiduelles en un point près d'une soudure. Elle a toutefois tendance à sous-estimer la valeur des contraintes résiduelles réelles.

Cette méthode est relativement peu coûteuse car l'appareil de mesure est disponible sur le marché à des prix abordables et le temps de mesure en un point est

d'environ quatre heures, comprenant l'installation de la rosette. De plus, la méthode est assez facile à appliquer sur des pièces en service puisque l'équipement est portable.

1.4.3 Méthode du trépan

La méthode du trépan, qui ressemble à la méthode du trou, consiste à enlever un anneau de matière autour d'une rosette (Figure 1.24). Les contraintes résiduelles en surface sont alors relâchées et les déformations associées à ces contraintes sont enregistrées à l'aide de jauges d'extensométrie.

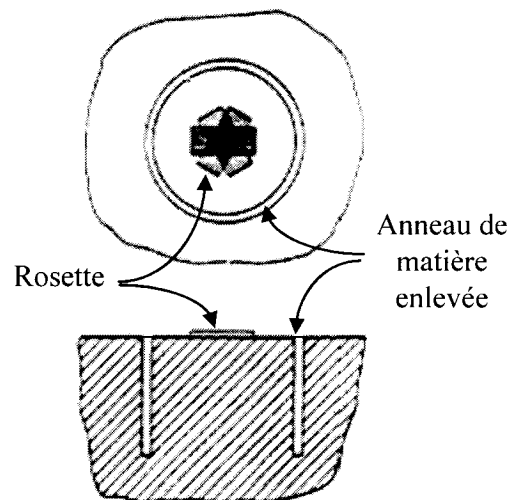


Figure 1.24 Méthode du trépan (adaptée de Lu, 1996)

Cette méthode est plus sensible que la méthode du trou car la rosette est localisée beaucoup plus près de la zone où les contraintes résiduelles sont relâchées, à la surface du matériau. Elle présente toutefois certains désavantages. Le défaut causé à la pièce est plus important que dans le cas de la méthode du trou et les fils soudés aux jauges d'extensométrie doivent être débranchés afin de pouvoir enlever l'anneau de matière. Comparativement à la méthode du trou, cette méthode est peu populaire et l'équipement pour la pratiquer est très restreint sur le marché.

1.4.4 Méthode du contour

La méthode du contour a été développée très récemment (PRIME, 2001). Il s'agit d'une méthode qui permet de mesurer un champ de contraintes résiduelles perpendiculaire à un plan quelconque. Une pièce est coupée en deux suivant un plan d'intérêt (Figure 1.25); les contraintes résiduelles perpendiculaires à ce plan sont ainsi libérées. Le profil de chacune des deux surfaces créées par la coupe est mesuré afin de connaître les déplacements provoqués par le relâchement des contraintes résiduelles. Ces déplacements sont considérés comme étant l'effet d'un relâchement élastique des contraintes résiduelles présentes dans la pièce (Figure 1.26).

Une variante du principe de superposition de Bueckner (BUECKNER, 1958), appliquée conjointement à la méthode des éléments finis, permet de calculer les contraintes résiduelles présentes initialement dans la pièce. Le calcul par éléments finis est effectué en considérant le profil déformé de la surface de coupe comme géométrie initiale et en imposant des déplacements ayant les mêmes valeurs absolues que celles mesurées, mais de signe opposé. Ainsi, la surface déformée reprend sa forme initiale et les contraintes résultantes sont égales aux contraintes résiduelles présentes avant la découpe (Figure 1.27). Un profil bidimensionnel des contraintes résiduelles peut être obtenu en faisant varier l'orientation du plan de coupe (Prime et al, 2004).

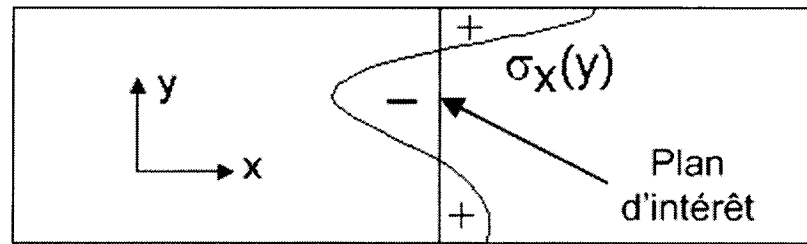


Figure 1.25 Pièce initiale avec contraintes résiduelles (Prime et al, 2002)

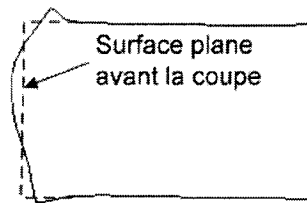


Figure 1.26 Profil du plan de coupe (partie droite) après le relâchement des contraintes résiduelles (Prime et al, 2002)

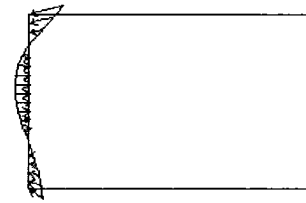


Figure 1.27 Distribution des contraintes résiduelles calculées par éléments finis, en imposant à la surface de coupe de reprendre sa forme initiale (Prime et al, 2002)

Trois composantes de l'état de contrainte sont libérées lors de la coupe : la contrainte normale au plan de coupe (σ_x à la Figure 1.25) ainsi que deux cisaillements dans le plan de coupe. L'effet du cisaillement sur le profil des surfaces créées par la coupe ne peut toutefois pas être mesuré. Afin d'évaluer uniquement la contrainte normale au plan de coupe, il faut calculer le profil moyen déformé entre les deux surfaces créées par la coupe (Prime, 2001). La Figure 1.28 présente deux contraintes relâchées dans une pièce bidimensionnelle, σ_x et T_y (cisaillement selon y). Les contraintes normales σ_x sont symétriques tandis que les cisaillements sont antisymétriques. La moyenne du profil des deux surfaces permet donc d'annuler l'effet du cisaillement et d'obtenir le profil de déformations relié uniquement au relâchement de la contrainte normale σ_x .

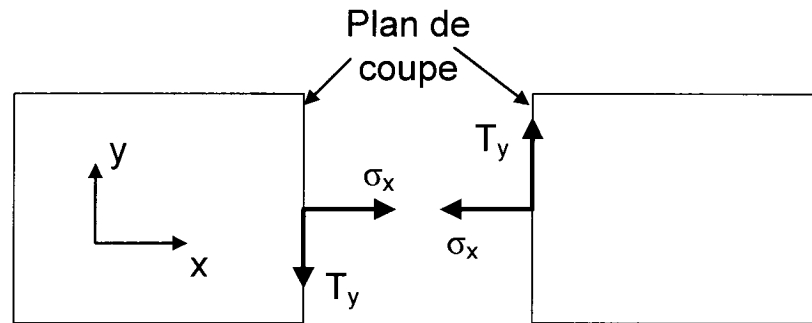


Figure 1.28 Contrainte normale au plan de coupe et cisaillement relâchés lors de la coupe

La méthode idéale de découpe doit permettre une coupe parfaitement droite qui induira le moins possible de déformations plastiques. L'usinage par électro-érosion à l'aide d'un fil est probablement le meilleur choix pour respecter ces exigences. Ce procédé d'usinage consiste à enlever la matière d'une pièce à l'aide de décharges électriques. Cette technique utilise un diélectrique tel que de l'eau déionisée qui permet de conserver la surface machinée à une température peu élevée tout en ne transmettant pas l'électricité. Deux types de machines sont présentement utilisés dans l'industrie, dépendant de la géométrie de la pièce à découper. Pour le premier type, la coupe est effectuée sous arrosage du diélectrique et pour le deuxième type, elle est effectuée sous immersion (MACHINE PRODUCTION, 2000). Une pièce conductrice d'électricité peut donc être coupée à l'aide d'un fil qui avance lentement et ce, peu importe la dureté de la pièce. Cette méthode est sans contact, contrairement à l'usinage conventionnel où l'outil peut créer des déformations plastiques dues aux grands efforts de contact. Afin de prévenir une déviation de la coupe par rapport au plan de coupe original, la pièce doit être bridée pendant la découpe (Prime et al, 2001).

La profondeur à laquelle les contraintes résiduelles peuvent être évaluées à l'aide de la méthode du contour est limitée par la capacité des machines effectuant les coupes par électroérosion. Les machines Mitsubishi les plus récentes permettent de découper des tranches de 400 mm d'épaisseur (Charmilles, 2004 et Pech, 1997). Cette

méthode permet donc d'obtenir des mesures de contraintes résiduelles à des profondeurs qu'il était impossible d'atteindre avec d'autres méthodes.

Une machine de mesure tridimensionnelle CMM (Coordinate Measuring Machine) est habituellement utilisée pour mesurer le profil des deux surfaces issues de la coupe par EDM. Des mesures peuvent également être effectuées à l'aide d'un profilomètre laser (Prime et al, 2004). L'avantage principal du profilomètre laser par rapport à une CMM standard est la résolution accrue du premier appareil, tant pour la précision que pour la quantité de points mesurés sur une surface. De plus, des pièces de plus petite taille peuvent aussi être mesurées mais la taille des pièces est toutefois limitée, selon le type de profilomètre laser utilisé.

Lors de la prise des mesures de déplacement des surfaces de coupe à l'aide de la CMM, la position exacte du plan de coupe n'est pas connue. Pour interpréter ces données, un plan de référence arbitraire est défini et une surface est modélisée à partir du champ de déplacements mesurés. Puisque la coupe par électro-érosion produit une surface courbe (concave ou convexe) et rugueuse, le champ de déplacements mesurés est corrigé, en retranchant le profil de coupe par électro-érosion, afin d'obtenir le profil du plan de coupe qui résulte du relâchement des contraintes résiduelles seulement. De plus amples informations sur ces étapes sont données au chapitre 3.3.

1.4.5 Autres méthodes

Plusieurs autres méthodes sont disponibles pour mesurer les contraintes résiduelles. La section suivante présente un survol des plus importantes méthodes qui ont été envisagées mais qui n'ont pas été retenues pour ce projet. Ce sont les méthodes par ultrasons, par diffraction des rayons X et de neutrons, de déflexion, de découpe et de la compliance.

a) Ultrasons

La vitesse de propagation des ultrasons dans un matériau est modifiée lorsque ce dernier est soumis à une contrainte. Le changement de vitesse des ondes est influencé par l'intensité et la direction des contraintes moyennes dans la région où ces ondes se propagent. Il est possible d'estimer les contraintes résiduelles présentes dans le matériau à l'aide d'un calibrage adéquat. Cependant, la méthode ne donne pas de résultats précis car la différence de vitesse, entre l'état contraint et l'état non contraint, est faible ; de plus, elle dépend de la texture du matériau (orientation des grains). La détermination de l'état de contraintes multiaxiales représente aussi une difficulté. Puisque la mesure s'effectue sur un grand volume, la résolution spatiale est très pauvre. Malgré tous ses inconvénients, cette méthode non destructive est rapide d'application et pratique à utiliser. L'équipement est portable et son coût d'opération est abordable.

b) Méthodes par diffraction

Le principe de base des méthodes par diffraction est la détermination des déformations élastiques du réseau cristallin. Les déformations d'une pièce sont calculées à partir de la distance entre les plans cristallographiques du matériau, d_p , pour l'état contraint et l'état non contraint de la pièce. Une calibration est nécessaire afin d'établir la relation entre la distance d_p et la contrainte que subit le réseau cristallin ; elle est habituellement effectué à l'aide d'un essai de flexion en quatre points sur un échantillon du matériau d'intérêt. Connaissant les valeurs du module d'élasticité E et du coefficient de Poisson ν , l'état de contraintes peut être calculé à l'aide de la théorie de l'élasticité.

Les méthodes de diffraction utilisées sont celles de diffraction des rayons X et de diffraction des neutrons. Ces deux méthodes non destructives permettent d'obtenir une mesure de la contrainte résiduelle en temps réel.

La méthode par diffraction de rayons X (XRD) est habituellement utilisée pour déterminer l'état de contraintes résiduelles (Kandil, 2001) dans une couche très mince à la surface du matériau. Cependant, lorsqu'elle est combinée à une technique d'enlèvement du matériau par faibles couches successives (par exemple : usinage par électro-érosion), il est possible d'obtenir un profil de contraintes résiduelles en fonction de l'épaisseur. La méthode est alors classée dans la catégorie des méthodes destructives. Cette méthode est toutefois limitée par la géométrie de la pièce mesurée.

Des diffractomètres portables sont maintenant disponibles pour la mesure des contraintes résiduelles sur le site. L'équipement est relativement encombrant et ne permet pas des mesures dans des endroits étroits ou très près de parois. Le coût d'utilisation est relativement élevé.

La mesure des contraintes résiduelles par diffraction de neutrons est basée sur le même principe que la méthode par diffraction des rayons X. Les deux méthodes ont une résolution équivalente. Un avantage important de la méthode par diffraction de neutrons repose sur son montage focalisé qui permet d'effectuer des mesures de contraintes résiduelles à différentes profondeurs. La profondeur à laquelle la mesure peut être prise atteint 25 mm dans l'acier et 100 mm dans l'aluminium. Les principaux inconvénients de cette méthode sont liés à la rareté des installations, à la limitation de la taille et de la géométrie des échantillons et à son coût très élevé. Aucun matériel portatif n'est disponible pour effectuer des mesures sur le site.

c) Méthode de déflexion

Cette méthode très simple d'application est aussi appelée « méthode de la flèche » (curvature method). Lorsqu'une mince couche de matière est enlevée à la surface d'une pièce plane soumise à des contraintes résiduelles, la pièce se courbe sous l'effet de la modification du champ de contraintes résiduelles. En enlevant de la matière à plusieurs reprises et en mesurant la déflexion de la pièce à chaque fois, il est possible d'établir le profil des contraintes résiduelles en fonction de la profondeur

(Kandil, et al 2001). Seules les contraintes transversales et longitudinales peuvent être déterminées. De plus, le profil de contraintes résiduelles et les propriétés du matériau sont considérés constants pour l'ensemble de la pièce (Lu, 1996). Cette méthode est principalement utilisée pour mesurer les contraintes résiduelles induites par des traitements de surface et par l'application de revêtements (Wither et Bhadeshia, 2001).

d) Méthode par découpe

La méthode de découpe est aussi connue sous le nom de « Sectioning method ». Elle a été initialement proposée par Ueda et al (1975) et raffinée par Hill et Nelson (1995). Le principe de la méthode consiste à évaluer les contraintes résiduelles (aussi appelées déformations inhérentes) dans une pièce en la découpant successivement en plusieurs morceaux et en mesurant, à l'aide de jauges, les déformations qui résultent de la découpe. La Figure 1.29 montre une pièce soudée dans laquelle une tranche verticale a été prélevée (voir au centre de la figure) ; cette tranche est, à son tour, découpée en plusieurs éléments (voir au bas de la figure). Préalablement à sa découpe, la tranche verticale a été instrumentée d'un nombre de rosettes égal au nombre final d'éléments. Pour chacune des jauges, deux mesures de déformations sont effectuées : la première, suite à la découpe de la tranche principale et la deuxième, après la découpe de cette tranche en plusieurs éléments. En utilisant la valeur de ces déformations, le profil des contraintes résiduelles est obtenu après avoir effectué des calculs longs et délicats.

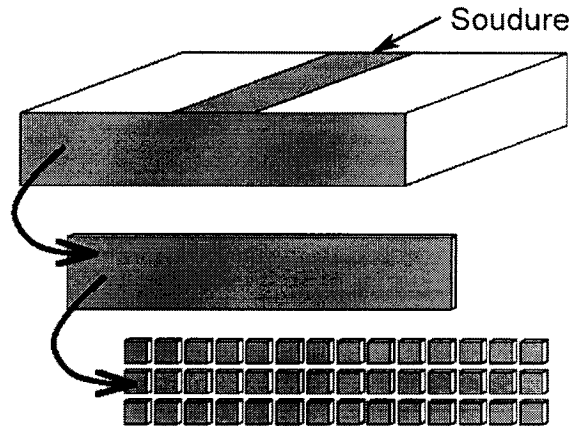


Figure 1.29 Méthode par découpe (Hill et Nelson, 1998)

Un des inconvénients majeurs de la méthode est qu'elle ne permet pas de déterminer des contraintes résiduelles qui varient rapidement dans un espace restreint (Cao et al, 2002). Ceci est relié à la fonction de déformation qui doit être évaluée de manière approximative par interpolation linéaire entre les valeurs mesurées pour chaque élément découpé.

Des travaux expérimentaux réalisés par Hill et Nelson (1996) ont montré que la méthode donne de bons résultats concernant les contraintes résiduelles en surface mais qu'elle n'est pas adéquate pour la mesure des contraintes en profondeur. De plus, cette méthode est onéreuse à appliquer, considérant le temps d'instrumentation et de découpage qu'elle nécessite.

e) Méthode de la compliance

La méthode de la compliance, aussi connue sous le nom de « crack compliance method », est une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles de mesure des contraintes résiduelles. Le principe de cette méthode consiste à relâcher les contraintes résiduelles en pratiquant une rainure dans la composante, soit par électroérosion ou par une autre méthode de coupe (voir Figure 1.30) et en mesurant, à l'aide de jauges, les déformations résultantes en surface, ε .

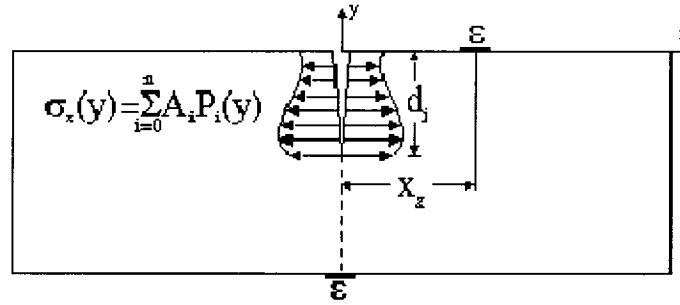


Figure 1.30 Méthode de la compliance (Prime, 2004)

En faisant progresser la coupe en profondeur, la variation de la contrainte résiduelle normalisée, $\sigma_x(y)$, perpendiculaire au plan de coupe, peut être obtenue. Cheng et al (1994) a exprimé cette variation sous la forme:

$$\sigma_x(y) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(y) \quad (1.1)$$

où $P_i(y)$ peut être une série, un polynôme de Legendre, une série de Fourier ou une autre fonction dont les coefficients sont normalisés et connus. Les valeurs inconnues de l'équation (1.1) sont les coefficients A_i qui pondèrent chacun des coefficients normalisés de la série $P_i(y)$. Les valeurs de ces coefficients seront obtenues en exprimant la variation de la déformation mesurée en surface $\varepsilon(d_j)$, en fonction de la profondeur de la rainure d_j , sous forme d'une série :

$$\varepsilon(d_j) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(d_j) \quad (1.2)$$

où $C_i(d_j)$ est une fonction de compliance normalisée et connue qui permet d'établir la distribution de déformations normalisée associée à la distribution de contraintes définie par chacun des termes de la série $P_i(y)$. Les coefficients de pondération A_i de l'équation (1.2) sont les mêmes que ceux de l'équation (1.1). Ils sont calculés en faisant un lissage, par la méthode des moindres carrés, des déformations mesurées en surface au

fur et à mesure que la rainure est pratiquée dans la pièce. Ainsi, la distribution $\sigma_x(y)$ devient connue.

Plusieurs études (Hill et Lin, 2002; Prime, 1997; Prime, 1999; Prime et Hill, 2001) ont validé l'utilisation de cette méthode pour la mesure des contraintes résiduelles. Elle est applicable aussi bien à la mesure des contraintes résiduelles très près d'une surface (de l'ordre de 0.05mm) qu'à celle des contraintes résiduelles en profondeur (de l'ordre de 100 mm).

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle ne peut être appliquée que lorsque le champ de contraintes résiduelles est uniforme dans le sens de la longueur du plan de coupe (axe z) (Cheng et al, 1994). Le degré de précision très élevé de cette méthode est similaire à celui de la méthode de diffraction de neutrons tandis que son coût d'application est comparable à celui de la méthode du trou (Nowell, 1999).

1.4.6 Profondeur de mesure des différentes méthodes

Prime (1999) a effectué une étude comparative entre les différentes méthodes de mesure des contraintes résiduelles présentées précédemment. Une des caractéristiques importantes examinées est la profondeur à laquelle les contraintes résiduelles peuvent être mesurées ; la Figure 1.31 spécifie la gamme des profondeurs propre à chacune des méthodes.

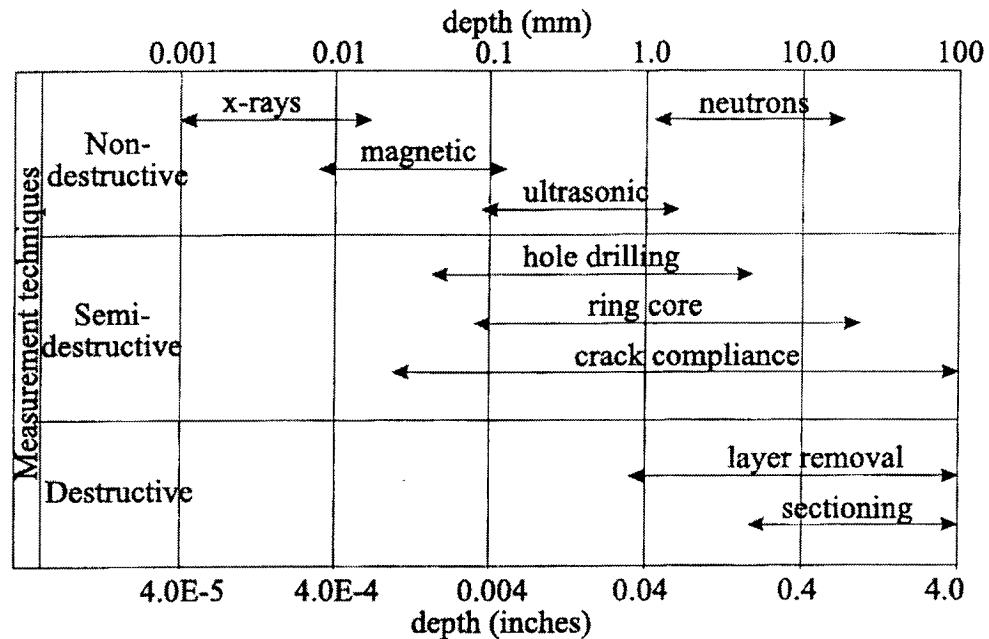


Figure 1.31 Profondeur à laquelle les contraintes résiduelles peuvent être mesurées, selon la technique utilisée (Prime, 1999).

La profondeur des mesures effectuées à l'aide des méthodes magnétiques et de diffractions des rayons X est limitée à une mince couche près de la surface du matériau. Les méthodes magnétiques ne peuvent pas être utilisées pour mesurer un gradient élevé de contraintes résiduelles souvent causé par le procédé de finition de la surface d'une pièce, par exemple, par sablage et polissage.

La méthode du trou et la méthode par ultrasons sont appropriées pour mesurer les contraintes en surface, à travers le premier millimètre de profondeur, tandis que la méthode du trépan et de la diffraction de neutrons permettent d'effectuer des mesures jusqu'à 25 mm de profondeur. D'autres méthodes, telles que la compliance, la méthode de déflexion et la méthode par découpe sont utilisées pour prendre des mesures pouvant aller jusqu'à 100 mm de profondeur.

La méthode du trou et la méthode de la compliance (*crack compliance*) ne sont pas adéquates pour évaluer les contraintes résiduelles à des profondeurs plus grandes

que celles mentionnées précédemment car les jauges d'extensométrie ne peuvent mesurer avec précision le relâchement des contraintes résiduelles à des points trop éloignés des jauges.

Comparativement aux autres méthodes destructives, la méthode du contour, non incluse dans la Figure 1.31, est beaucoup plus puissante puisqu'elle permet de mesurer les contraintes perpendiculaires à n'importe quel plan traversant une pièce, tant que l'épaisseur de la section se situe à l'intérieur de la limite permise pour réaliser la coupe par électro-érosion (< 400 mm). Elle n'exige pas, comme certaines méthodes, telles que la méthode du trou et la méthode de la compliance, un étalonnage expérimental pour des échantillons à géométrie complexe ainsi que pour divers types de matériaux (Schajer, 1981) ou l'application de méthodes inverses (Prime, 2001) pour connaître les profils de contraintes résiduelles.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la pertinence du projet de recherche a été établie en relation avec la performance mécanique des joints soudés des roues de turbines hydrauliques. L'origine des contraintes résiduelles induites par le soudage a été expliquée. Les résultats des travaux portant sur la mesure et l'évaluation de ces contraintes dans les joints soudés bout-à-bout et les joints en T ont été présentés succinctement. Les profils de contraintes pour ces joints sont similaires ; la contrainte longitudinale est en tension au centre du joint et en compression de part et d'autre du joint suivant la direction transversale tandis que la contrainte transversale est en compression au centre du joint et en tension près des surfaces libres. Dans la soudure, aux extrémités des échantillons, on observe une contrainte longitudinale presque nulle et une contrainte transversale en compression.

Les principales méthodes de mesures de contraintes résiduelles ont été décrites, en mettant l'accent sur le principe de fonctionnement, les avantages et les

inconvenients reliés à l'application de chacune. La sélection d'une méthode doit être basée sur les critères prédéfinis: état de contraintes résiduelles dans la pièce, applicabilité de la technique pour atteindre l'objectif, précision requise des mesures, coût d'opération et temps de réalisation. Ces critères doivent être soigneusement pris en considération en prenant en compte l'aspect destructif ou non destructif de la méthode.

Au chapitre suivant, les mesures préliminaires des contraintes résiduelles en surface effectuées à l'aide de quelques méthodes potentielles seront présentées afin de choisir la méthode la plus appropriée pour le cas présent. De plus, la procédure de fabrication et d'instrumentation des échantillons sera expliquée en détails.

Chapitre 2

Procédure expérimentale et choix de la méthode de mesure

Le deuxième chapitre porte, en premier lieu, sur le choix de la méthode de mesure à utiliser pour évaluer les contraintes résiduelles dans un joint soudé en T de grandes dimensions ainsi que sur l'examen de la validité de cette méthode appliquée au cas de faibles contraintes résiduelles. Les résultats des mesures préliminaires sur une roue de turbine hydraulique permettant de quantifier les contraintes résiduelles en surface sont présentés. Ensuite, la procédure de préparation des échantillons, leur coupe par électro-érosion, la mesure des déplacements par CMM et les diverses étapes nécessaires à l'évaluation des contraintes résiduelles dans ces joints soudés en T sont présentées.

2.1 Choix de la méthode de mesure

Dans le cadre du présent projet, la mesure des contraintes résiduelles devra être effectuée dans une pièce très épaisse. Les contraintes d'intérêt sont les contraintes résiduelles en surface dans la région du joint soudé et également, la contrainte perpendiculaire au méplat formé, à cause de la pénétration partielle de la soudure, à l'intersection du montant et de la base de l'échantillon en T. À l'aide de la Figure 1.31 et des méthodes examinées à la section 1.4, il est possible de retenir cinq méthodes potentielles permettant d'effectuer des mesures dans des pièces épaisses. Il s'agit de la diffraction de neutrons, la méthode de la compliance, la méthode de déflexion, la méthode de découpe et la méthode du contour.

La méthode de déflexion et la méthode de la compliance ne peuvent être utilisées dans l'analyse des joints soudés car les contraintes résiduelles dans le plan d'intérêt ne sont pas uniformes. De plus, ces méthodes ne sont pas précises pour des mesures très profondes.

La méthode de découpe est aussi à rejeter puisqu'elle n'est pas encore au point. De plus, son application est coûteuse et les calculs sont fastidieux.

La diffraction de neutrons serait une alternative intéressante mais elle est limitée à une profondeur de mesure de 25 mm. Elle pourrait toutefois servir de comparaison pour des mesures près de la surface. La non-homogénéité de la microstructure du matériau dans la zone soudée pourrait toutefois causer des incertitudes sur les mesures. Les principaux obstacles sont reliés à la rareté des installations et aux coûts très élevés de telles mesures.

La méthode du contour demeure la méthode la plus appropriée pour la mesure des contraintes résiduelles dans le type d'échantillon étudié, soit un joint soudé en T. Elle permet d'obtenir directement le profil de contraintes résiduelles désiré. Une incertitude demeure toutefois sur sa pertinence car plusieurs des échantillons auront subi le même traitement thermique de relaxation des contraintes que les roues de turbines hydrauliques. Par conséquent, les contraintes résiduelles à mesurer peuvent être faibles et les déformations occasionnées par le relâchement de ces contraintes lors de la découpe de l'échantillon sont peu élevées. Avant d'entreprendre les travaux, il a été jugé nécessaire de s'assurer que les contraintes résiduelles à mesurer sont suffisamment importantes pour être évaluées par la méthode du contour.

Des mesures, à l'aide de la méthode du bruit de Barkhausen et de la méthode du trou, sont d'abord effectuées afin de tracer un portrait global des contraintes en surface, près des joints soudés.

2.2 Validation du choix de la méthode du contour

Avant de choisir définitivement la méthode du contour, il a fallu procéder à une validation quant à la possibilité de mesurer de faibles contraintes résiduelles.

Un profil de contraintes résiduelles hypothétique a été imposé dans un modèle d'éléments finis afin d'évaluer les déformations induites par un relâchement de ces contraintes dans un joint soudé à pénétration totale. Pour simplifier le modèle, le montant vertical des échantillons est représenté par une plaque de section rectangulaire de 50,8 mm d'épaisseur $\times$ 120 mm de hauteur $\times$ 300 mm de longueur (Figure 2.1). Le relâchement des contraintes résiduelles causé par une coupe par électro-érosion dans la soudure, à la face inférieure du montant, sera simulé.

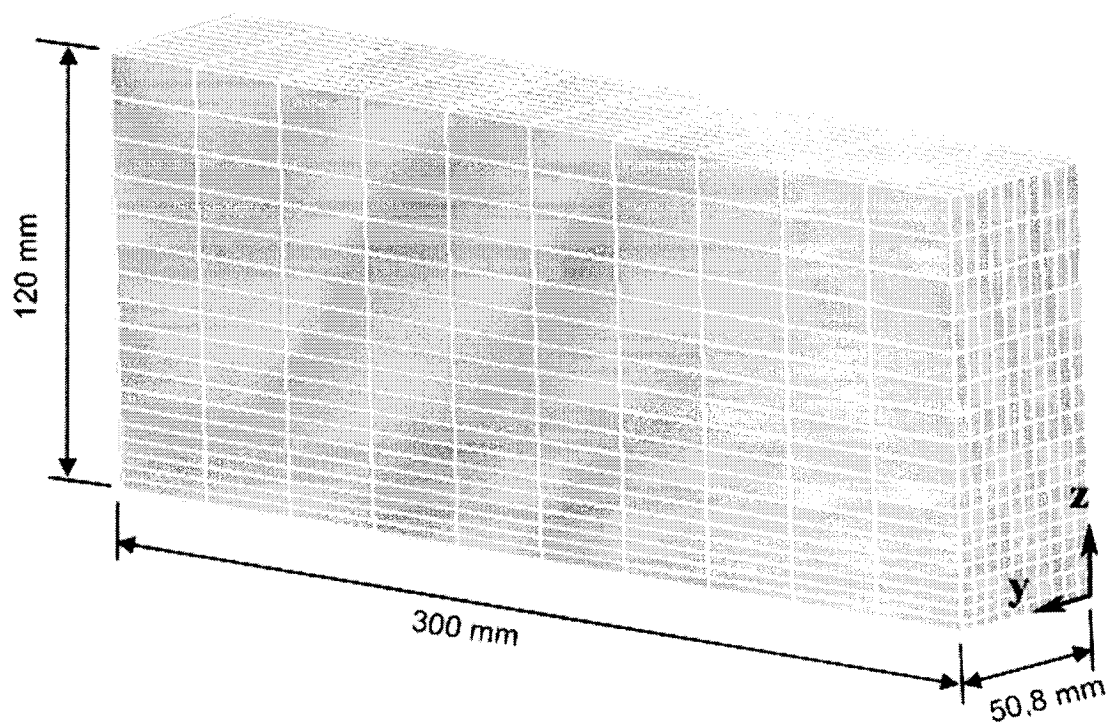


Figure 2.1 Maillage utilisé pour la validation du choix de la méthode du contour

Un champ de contraintes résiduelles a été appliqué à l'aide du logiciel Ansys 8.0 à un maillage d'éléments hexaédriques quadratiques à 20 noeuds de type *Solid 95*. Ce type d'élément permet l'application de contraintes résiduelles à l'aide d'une fonction d'Ansys appelée *initial stress*. Les éléments à la base ($z = 0$) du présent maillage (Figure 2.1) ont une dimension de 30 mm en x, 5,08 mm en y et 3,05 mm en z. Le modèle est contraint en déplacement à la face supérieure.

Le champ de contraintes résiduelles appliqué devait être symétrique par rapport à la mi-épaisseur de l'échantillon (plan $y = 25,4$ mm) et la sommation des contraintes résiduelles σ_z devait être nulle pour toute tranche dans le plan x - y afin que le modèle soit en équilibre. Un profil sinusoïdal déphasé a été utilisé (voir Figure 2.2) pour représenter approximativement la variation de la contrainte résiduelle σ_z (selon la position y) dans un joint soudé (Figure 1.13) ; la contrainte résiduelle en surface a été fixée à 80 MPa. Ce choix a été basé sur la plus grande contrainte résiduelle en tension mesurée par la méthode du trou lors des mesures préliminaires sur une roue de turbine hydraulique traitée thermiquement (section 2.3.1). Ces mesures avaient toutefois été effectuées à l'extérieur du joint soudé et les contraintes résiduelles y étaient probablement moindres que celles dans le joint ; le champ appliqué demeure donc conservateur. L'amplitude du champ de contraintes imposé diminue linéairement selon l'axe z . D'autres profils de diminution ont été examinés (par exemple, fonction

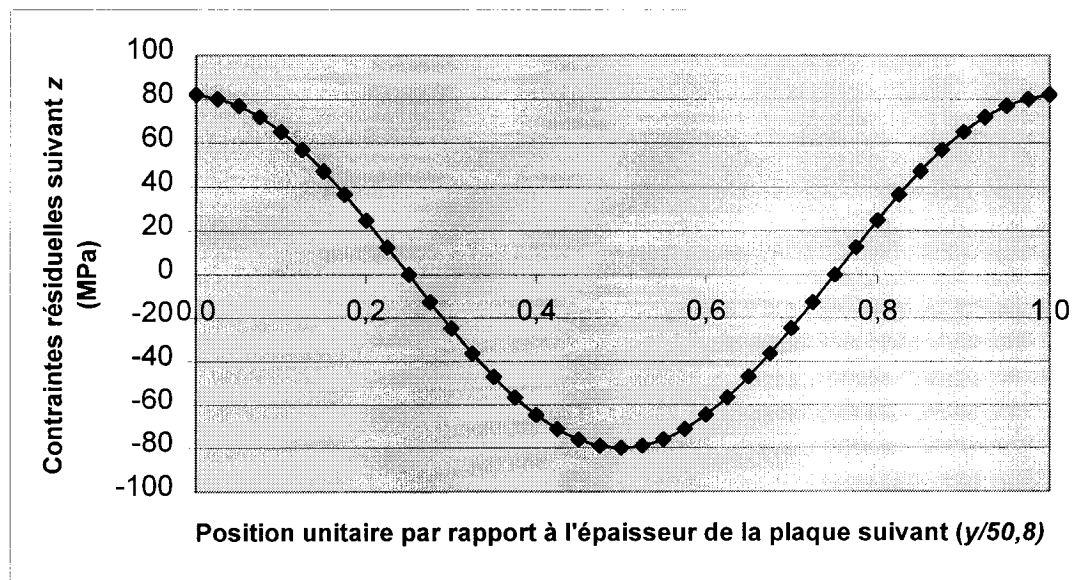


Figure 2.2 Profil de contraintes résiduelles imposé au modèle par éléments finis afin de valider le choix de la méthode du contour

quadratique, fonction en $x^{1/2}$) et un écart maximal d'environ 15 % a été observé par rapport au profil de diminution linéaire. Cette variation a été jugée acceptable pour ces analyses préliminaires.

Les déplacements selon l'axe z , issus du calcul par la méthode des éléments finis, sont présentés à la Figure 2.3 ; sur la figure, MX signifie déplacement maximal et MN , déplacement minimal. Les déformations de la pièce ont été amplifiées afin de faciliter la visualisation des résultats. De plus, les changements de tons de gris sur cette figure correspondent à des lignes d'isodéformations. Une étude de convergence a été effectuée afin de s'assurer que le maillage convenait au type d'analyse. Les différences entre les déformations calculées à l'aide du présent maillage et celles obtenues à partir d'un maillage ayant trois fois plus d'éléments se sont avérées négligeables (moins de 1 % sur la déformation maximale).

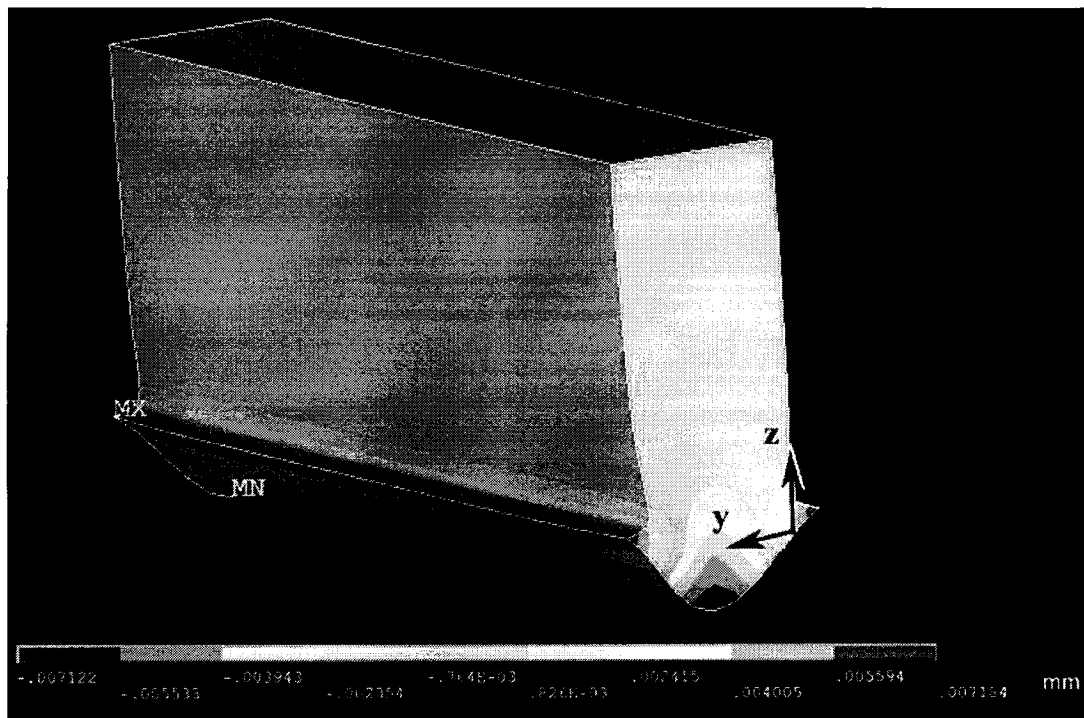


Figure 2.3 Simulation des déplacements selon l'axe z produits par un relâchement des contraintes résiduelles lors d'une coupe par électro-érosion dans un joint soudé à pénétration totale

L'écart des déplacements calculés selon l'axe z , $MX - MN$, est de $14,3 \mu\text{m}$. Un tel écart de déplacement peut être mesuré à l'aide des CMM les plus précises de l'industrie. Le laboratoire de recherche en fabrication virtuelle de l'École Polytechnique de Montréal possède l'équipement nécessaire pour effectuer des mesures avec une précision de moins de $1 \mu\text{m}$. Le projet sera donc réalisable avec une erreur.

2.3 Mesures préliminaires des contraintes résiduelles dans les roues de turbines hydrauliques

Il a été initialement planifié d'effectuer plusieurs mesures de contraintes résiduelles en surface dans les régions soudées des turbines hydrauliques afin d'obtenir un portrait global de ces contraintes et de pouvoir ensuite analyser leur effet dans les régions critiques. À cet effet, la méthode du bruit de Barkhausen et la méthode du trou ont été appliquées sur une roue de turbine hydraulique de type Francis soudée à pénétration partielle qui avait subi un traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles. La dureté Brinell a aussi été mesurée afin d'obtenir de plus amples informations sur la surface inspectée.

2.3.1 Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du Bruit de Barkhausen

Bien que peu précise, la méthode du bruit de Barkhausen a tout d'abord été utilisée afin de déterminer les endroits où les contraintes résiduelles semblaient les plus élevées car il s'agit d'une méthode très rapide. L'appareil qui a servi à faire les mesures est le *Stresscan 500C* fabriqué par *The Stresstech Group*.

Environ 150 mesures ont été effectuées selon cinq directions (se référer à la Figure 2.7) : sur le plafond, selon la direction transversale y (σ_y), la direction longitudinale x (σ_x) et à 45° (σ_{45}) dans le plan x - y ; sur l'intrados, selon la direction

longitudinale x (σ_x), la direction normale z (σ_z) et à 45° (σ_{45}) dans le plan x - z . Ces mesures sont présentées à l'Annexe A. La petite taille du capteur de l'appareil (voir Figure 2.4) a permis la mesure de contraintes résiduelles dans des endroits avec accès restreint ; de telles mesures n'auraient pas été possibles à l'aide d'autres méthodes.

Quatre points mesurés par cette méthode ont ensuite été évalués à l'aide de la méthode du trou, méthode plus précise mais beaucoup plus lente, afin de valider les résultats obtenus. Cette méthode a été effectuée à l'aide d'un appareil RS-200 conformément à la norme ASTM E837-99. Le détail des calculs requis pour l'évaluation des contraintes résiduelles est disponible à l'Annexe B.

a) Courbes d'étalonnage

Afin d'interpréter le signal électromagnétique émis par le capteur, un échantillon du même matériau que la roue mais n'ayant pas subi le dernier traitement thermique spécifié pour les aubes de turbine en fonderie, a été soumis à un test de traction et de compression par Lanteigne (2003). Le capteur était monté sur l'échantillon pendant les essais et enregistrait le paramètre magnétique MP en fonction de la contrainte appliquée (voir Figure 2.4). Le capteur utilisé impose un champ magnétique à l'aide de deux pôles situés à environ 25 mm l'un de l'autre et le bruit de Barkhausen est mesuré au centre de ces pôles. Des mesures ont été effectuées pour deux faces de l'échantillon, les faces A et B. Une grande dispersion des courbes est observable à la Figure 2.5 entre les différentes montées. De plus, selon ces courbes d'étalonnage et les mesures effectuées, pratiquement toutes les mesures réalisées sur la roue (disponibles à l'Annexe A) seraient dans un très grand état de compression. Par contre, le traitement thermique de l'échantillon a permis d'obtenir des courbes d'étalonnage (Figure 2.6) qui montrent très peu de dispersion, ainsi que des courbes décalées vers la gauche dans le graphique, correspondant mieux avec les mesures effectuées. Selon Lanteigne (2003), une telle modification a probablement été causée par une stabilisation de la martensite dans l'échantillon. Ceci montre la sensibilité de la méthode de mesure à la

microstructure du matériau relativement aux contraintes internes. De plus, la pente de la courbe est très prononcée en compression, ce qui rend l'interprétation des mesures difficile et cause une très grande imprécision sur l'évaluation des contraintes résiduelles en état de compression. Dans cet état, une faible variation du paramètre magnétique correspond à une très grande variation de la contrainte.

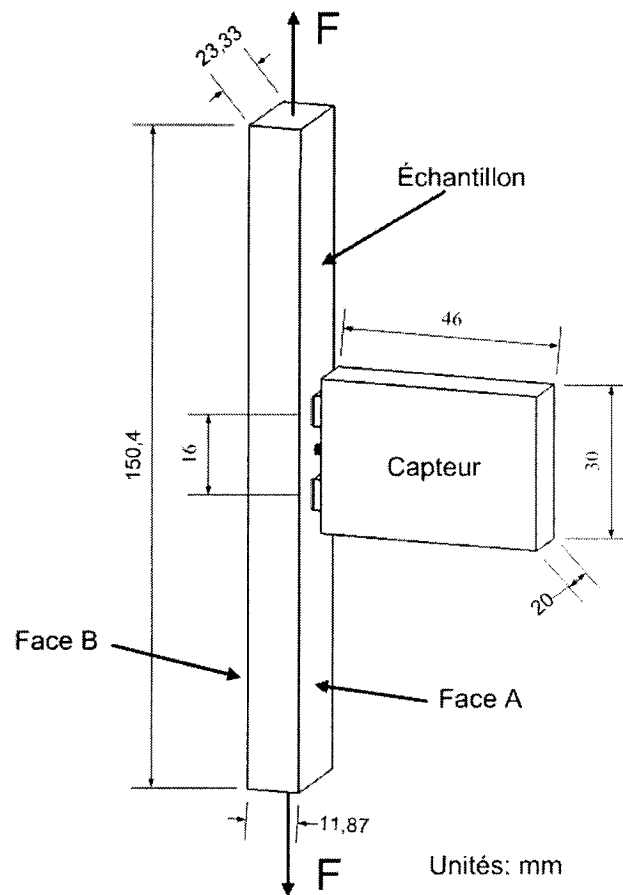


Figure 2.4 Schéma du montage du capteur du Stresscan sur un échantillon afin de tracer les courbes d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen

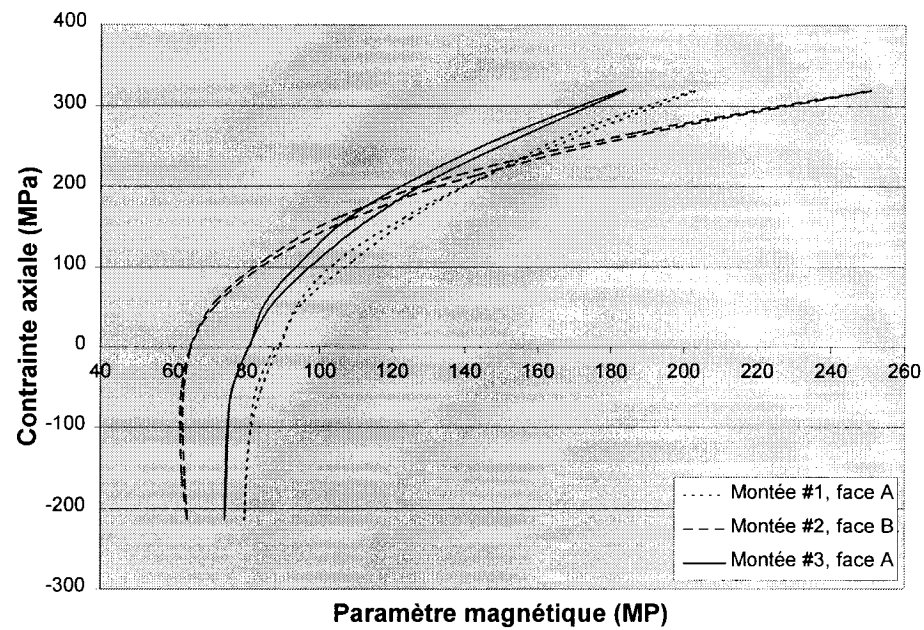


Figure 2.5 Courbe d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen avant traitement thermique de l'échantillon (Lanteigne, 2003)

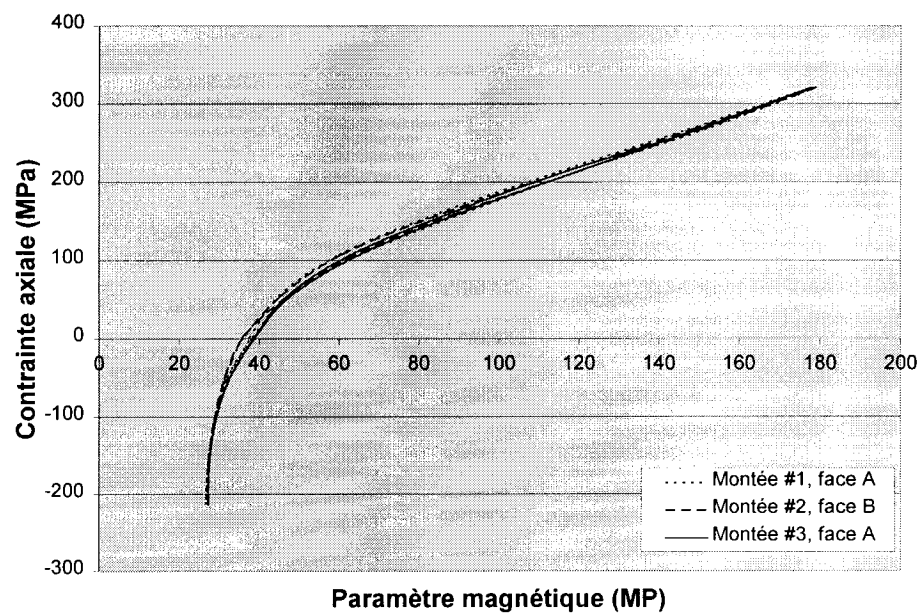


Figure 2.6 Courbe d'étalonnage pour la méthode du bruit de Barkhausen après traitement thermique de l'échantillon (Lanteigne, 2003)

b) Résultats

Le Tableau 2.1 présente quatre points mesurés à l'aide de la méthode du bruit de Barkhausen et de la méthode du trou. Le Tableau 2.2 présente les contraintes principales maximales (σ_{min} et σ_{max}) ainsi que l'angle β de l'orientation de la contrainte maximale dans plan x - z , appliqué dans le sens anti-horaire selon l'axe longitudinale x , évaluées à l'aide de la méthode du trou. La dureté a été mesurée à l'aide d'un duromètre de type *Equo Tip* fabriquée par *Proceq*.

Tableau 2.1 Comparaison des méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles

Points	Stresscan				RS-200		
	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	σ_{45} (MPa)	Moyenne (MPa)	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{xz} (MPa)
<i>a</i>	72	72	72	72,4	44	32	0
<i>b</i>	-45	-23	-14	-27,3	-20	-1	4
<i>c</i>	-34	-45	--	-39,1	-52	-61	44
<i>d</i>	-23	48	--	12,4	11	80	1

Tableau 2.2 Contraintes résiduelles maximales évaluées par la méthode du trou

Points	RS-200			Echo Tip
	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	β (degrés)	Dureté (Brinell)
<i>a</i>	44	32	0	254
<i>b</i>	-1	-21	-80	273
<i>c</i>	-12	-101	-42	315
<i>d</i>	80	11	89	272

À l'aide du Tableau 2.1, il est possible de comparer les valeurs obtenues par le bruit de Barkhausen à celles obtenues par le RS-200, méthode généralement reconnue pour l'évaluation des contraintes résiduelles en surface. On peut constater que le degré de concordance entre les mesures réalisées par les deux méthodes est médiocre. La valeur moyenne obtenue par le Stresscan nous donne toutefois une idée générale du signe et de l'intensité des contraintes présentes en un endroit donné. Dans le cas des points *b*, *c* et *d*, la contrainte maximale mesurée par le RS-200 est dans le même sens que celle mesurée par le Stresscan, illustrant ainsi une corrélation entre la position du capteur du Stresscan et les contraintes principales. Les corrélations sont toutefois difficiles à établir car plusieurs mesures ont été effectuées dans des zones en compression, plage de mesures non précises avec la courbe d'étalonnage du bruit de Barkhausen. En ce qui a trait au point de mesure no *c*, il a été effectué dans une zone soudée contrairement aux autres mesures qui ont été effectuées dans le matériau de base. Ceci explique la dureté plus élevée du point *c*. Il se peut donc que la courbe d'étalonnage, pour ce point, ne soit pas valide pour les valeurs évaluées à l'aide du Stresscan puisque l'historique local du matériau ainsi que le métal d'apport ne sont pas les mêmes que pour le métal de base.

Selon les résultats obtenus, la méthode du bruit de Barkhausen semble avoir tendance à sous-estimer les contraintes résiduelles, qu'elles soient en tension ou en compression. De plus, la dépendance de cette méthode à plusieurs paramètres, tel que la microstructure du matériau, rend l'interprétation des données difficile et incertaine. Un tel type de mesure n'est pas indiqué pour une pièce dans laquelle on retrouve des gradients de dureté, une microstructure non homogène et des historiques thermiques non uniformes. Puisque les valeurs de contraintes résiduelles évaluées par le Stresscan ne sont pas considérées réalistes, cette méthode a été écartée pour des mesures subséquentes.

2.3.2 Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du trou en fonction de la position transversale à une soudure

Quatre mesures supplémentaires ont été effectuées à l'aide de la méthode du trou près d'un congé de soudure d'une roue Francis, soudée à pénétration partielle. Trois de ces mesures ont été effectuées dans le matériau de base, au plafond de la turbine (correspondant à la base d'un joint soudé en T), afin de quantifier la diminution des contraintes résiduelles transversales en fonction de la position transversale (y) à une soudure. Une autre mesure a été effectuée dans l'aube afin de déterminer la contrainte normale (σ_z) à titre indicatif. Les points de mesures sont montrés à la Figure 2.7 où ils sont numérotés de 1 à 4 ; leurs coordonnées x , y et z sont rapportées au Tableau 2.3.

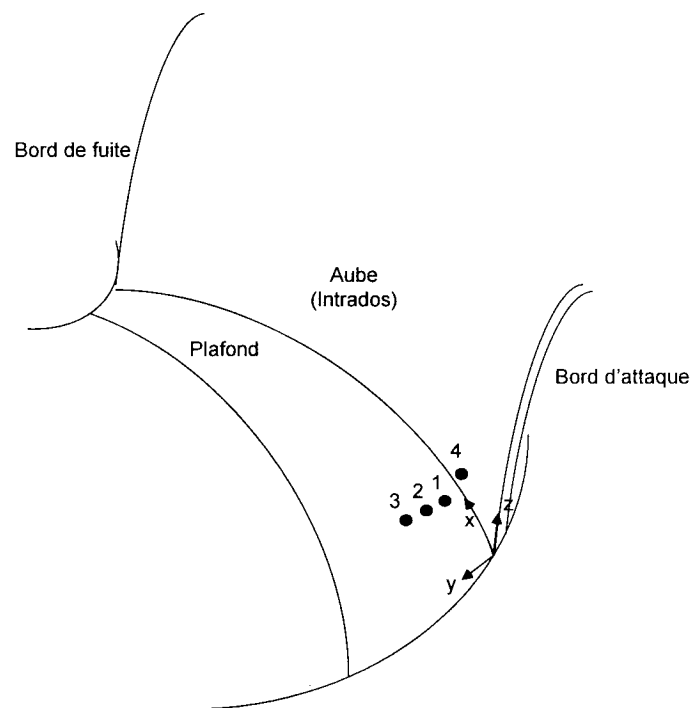


Figure 2.7 Points de mesure par la méthode du trou sur la roue de type Francis

Afin d'effectuer des mesures, la turbine de l'appareil RS-200, qui sert à percer les trous, est positionnée au centre de la rosette et trois pattes permettent de fixer

l'appareil à la pièce à instrumenter. La disposition de ces pattes ne permet toutefois pas de percer des trous près d'un congé de soudure. Un support conçu spécialement pour contourner ce problème a été fabriqué (voir support noir de la Figure 2.8). Il est fixé à la base du RS-200 et ses trois pattes permettent de décaler l'axe de perçage de l'appareil vers le congé de soudure. Il est rigide, très stable et n'occasionne pas de vibrations supplémentaires de l'appareil RS-200.

Un faible bruit électrique, capté par les appareils lors des mesures, peut avoir influencé la précision des données. La diminution de précision n'a pas été jugée critique puisque l'objectif était d'obtenir une vue d'ensemble de la variation des contraintes résiduelles.



Support
spécial

Figure 2.8 RS-200 fixé sur un support permettant de décaler l'axe de perçage

Les contraintes résiduelles évaluées aux points de mesure sont présentées au Tableau 2.3. Le cisaillement τ représente τ_{xy} pour les trois premiers points de mesure et τ_{xz} pour le dernier point. L'angle du positionnement de la contrainte principale maximale β est appliqué dans le sens horaire à partir de l'axe y pour les trois premiers points et à partir de l'axe x pour le dernier point (voir la Figure 2.7)

Les contraintes mesurées sont faibles. La composante transversale de la contrainte, σ_y , diminue très rapidement lorsque le point de mesure s'éloigne de la soudure (Figure 2.9).

Les résultats obtenus à l'aide des mesures effectuées sur la roue Francis (Tableau 2.3 et Figure 2.9) ont indiqué que les contraintes transversales dans la base d'un tel joint sont en tension près de la soudure, diminuent en s'éloignant du joint soudé pour devenir en compression, puis tendre vers zéro. À partir de données du Tableau 2.3, il est aussi possible d'observer le changement de l'orientation des contraintes principales, lequel est causé en partie par la variation de la contrainte en cisaillement. Le cisaillement passe de -13 MPa pour le point le plus près du joint soudé à 34 MPa pour l'autre point extrême, entraînant une rotation des axes principaux passant de -43° à 30° .

Les contraintes longitudinales sont positives près du joint ($\sigma_x = 50$ MPa pour le point 1) et deviennent négatives pour une position plus éloignée du joint ($\sigma_x = -48$ MPa pour le point 3). Ces résultats montrent que la contrainte longitudinale est dans un état de tension près du joint soudé et qu'elle devient subitement en compression pour une position légèrement éloignée du joint. Cette zone en compression permet d'équilibrer les contraintes en tension au centre du joint.

Tableau 2.3 Position des points de mesure et résultats obtenus pour une roue Francis

Points	x (mm)	y (mm)	z (mm)	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	β (degrés)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ (MPa)
1	176	44	0	63	38	-43	50	52		-13
2	176	60,5	0	-17	-42	18	-40	-19		7
3	176	80,5	0	11	-68	30	-48	-8		34
4	176	0	40	-19	-45	89	-45		-19	1

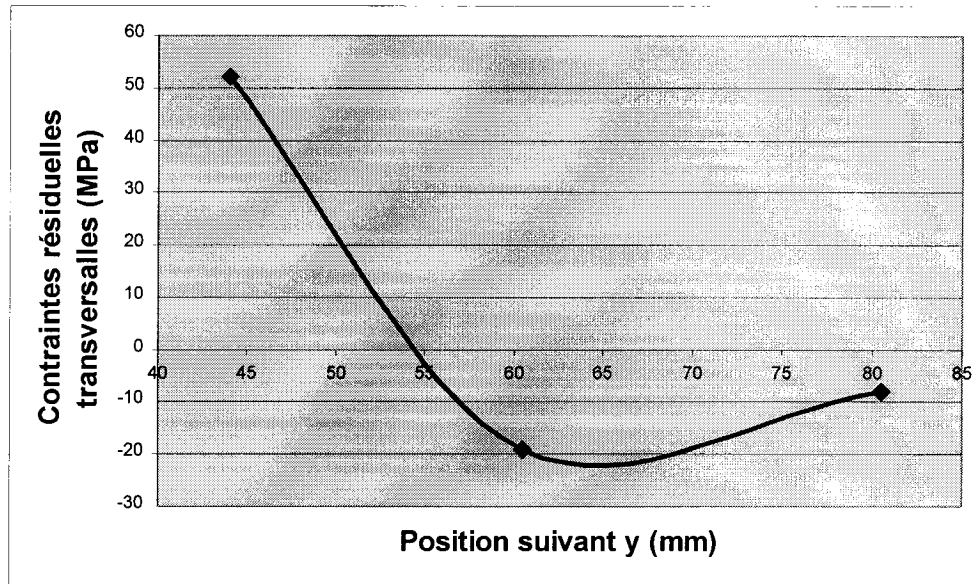


Figure 2.9 Variation de la contrainte résiduelle transversale σ_y en fonction de sa position transversale (position suivant y) à un joint soudé

2.4 Fabrication des échantillons soudés

La géométrie des échantillons, qui permettront les mesures de contraintes résiduelles à l'aide de la méthode du contour, ainsi que les principales étapes de leur fabrication sont présentées dans cette section.

Les joints sur lesquels on effectue les mesures sont de grande taille car ils doivent être représentatifs des joints soudés dans les roues de turbines hydrauliques. Pour ce faire, toutes les spécifications concernant les roues quant aux matériaux, aux paramètres liés aux procédures de soudage et aux inspections ont été appliquées à la fabrication des échantillons. Au total, huit échantillons ont été fabriqués. Ils sont constitués de plaques épaisses en acier inoxydable martensitique et de congés de soudure à passes multiples meulés, ayant les extrémités tangentes aux plaques, comme le montre la Figure 2.10; sur la figure, le métal d'apport est représenté par les zones hachurées.

Les paramètres géométriques t , W , a et R varient d'un échantillon à l'autre ; leurs valeurs sont présentées au Tableau 2.4. Cependant, l'angle θ du cordon de soudure et la longueur selon l'axe x sont respectivement de 45° et de 508 mm pour tous les échantillons. Sur les huit échantillons, deux ont été soudés avec pénétration totale ($a/t = 0$) et six, avec pénétration partielle. Un seul échantillon n'a pas subi de traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles.

La fabrication des échantillons a été réalisée selon un échéancier bien défini, conformément aux méthodes de fabrication des turbines hydrauliques.

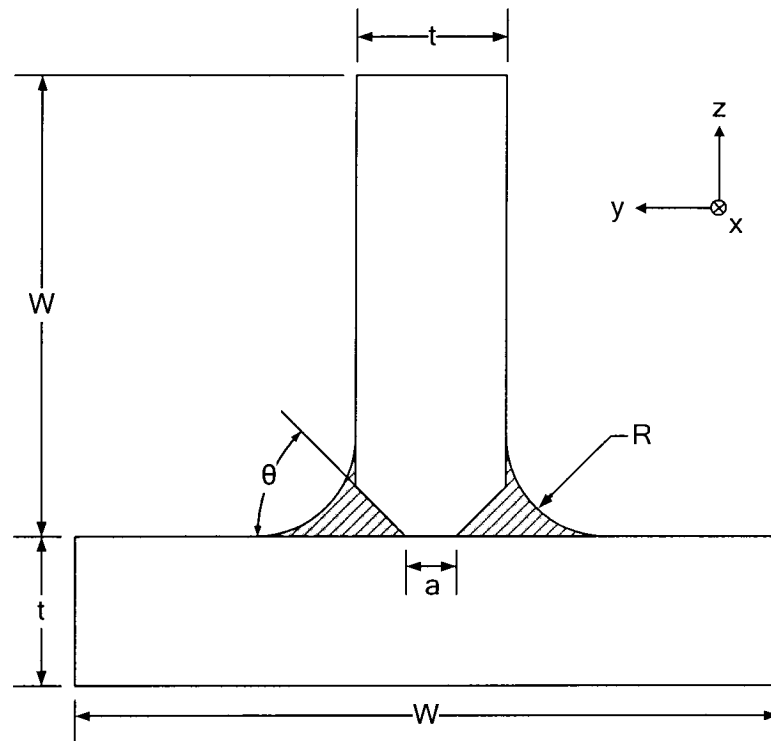


Figure 2.10 Géométrie des échantillons assemblés à l'aide des soudures

Tableau 2.4 Paramètres géométriques des échantillons

Échantillon	Épaisseur t (mm)	a/t	Rayon R (mm)	Largeur W (mm)	Traitement thermique
2A	50,8	0	25,4	254,0	X
2B	50,8	0	25,4	254,0	NIL
2C	50,8	0,3	25,4	254,0	X
2D	50,8	0,6	25,4	254,0	X
3A	76,2	0,3	38,1	304,8	X
3B	76,2	0,6	38,1	304,8	X
5A	127,0	0,3	50,8	381,0	X
5B	127,0	0,6	50,8	381,0	X

Tout d'abord, les plaques brutes en acier inoxydable martensitique ont été commandées dans une fonderie avec les mêmes spécifications que les pièces coulées pour les aubes de turbines. Elles sont d'ailleurs coulées à même les poches de coulées d'aubes afin de s'assurer d'obtenir la même composition chimique.

À partir des bruts de coulées, les plaques sont usinées sur les six faces de la base et sur les huit faces du montant, aux dimensions spécifiées au Tableau 2.4. Elles sont ensuite soudées chez le turbinier. Voici les différentes étapes du soudage:

a) Assemblage

Pour être en conformité avec les roues de turbines hydrauliques, les plaques doivent être préchauffées avant d'effectuer le soudage multi-passes. Elles sont donc assemblées sur un lit d'éléments chauffants. Afin de réguler la température du montage tout au long du soudage, la température est enregistrée à l'aide d'un thermocouple (voir Figure 2.11). De plus, une sonde permet de mesurer la température en plusieurs points.

Ces informations servent à contrôler le procédé de soudage afin que la température d'entre-passes ne dépasse pas un seuil prédéterminé.

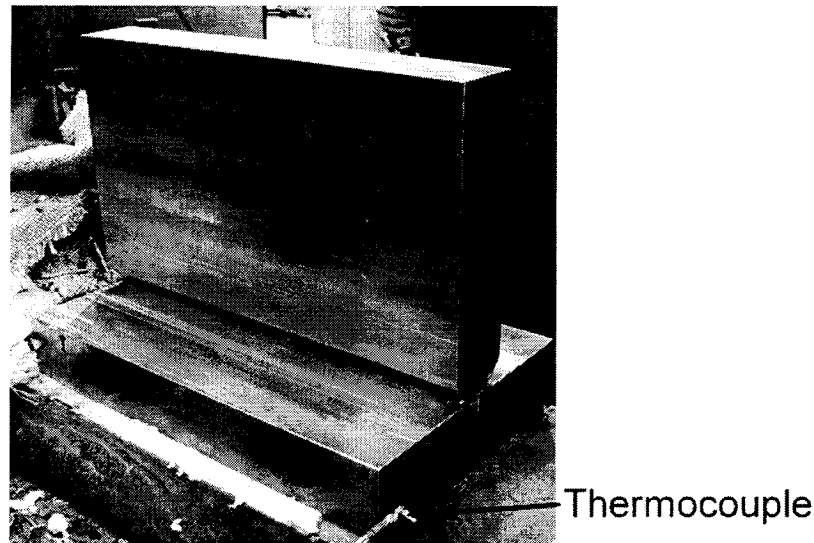


Figure 2.11 Assemblage des plaques pour le soudage

b) Installation des jauges d'extensométrie

Des rosettes rectangulaires^o (une ou deux, selon l'échantillon) ont été installées sur les plaques avant le soudage dans le but d'évaluer le niveau des contraintes résiduelles transversales induites dans le métal de base près des joints soudés. Tel que montré à la Figure 2.12, ces rosettes ont été positionnées sur le montant et sur la base, le plus près possible du congé de soudure, tout en ne nuisant pas aux opérations de soudage. Les coordonnées des rosettes, i , j et k , sont données au Tableau 2.5 ; la distance entre le centre de la rosette et la fin du congé de soudure est d'environ 28 mm.

Un des paramètres les plus importants à considérer dans le choix des rosettes était la résistance à la chaleur. Pour répondre au besoin, des rosettes rectangulaire ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) de type CEA-06-125UR-120 ont été utilisées. Ces rosettes peuvent supporter une température de 205°C et la colle époxy-phénolique (M-Bond 610) peut résister à une température de 370°C pour une utilisation à court terme. De l'étain dont

le point de fusion est d'environ 185°C a servi à souder les fils joignant la rosette au bornier de raccordement. Le montage a été recouvert d'une couche de silicone de type RTV-3145 puis protégé par un petit boîtier de tôle (Figure 2.13). Les ponts de Wheatstone étaient d'abord équilibrés avant soudage et puis, les fils étaient dessoudés des borniers de raccordement afin de faciliter le soudage des échantillons¹. La température autour de la jauge pendant le soudage a été maintenue inférieure à 180°C.

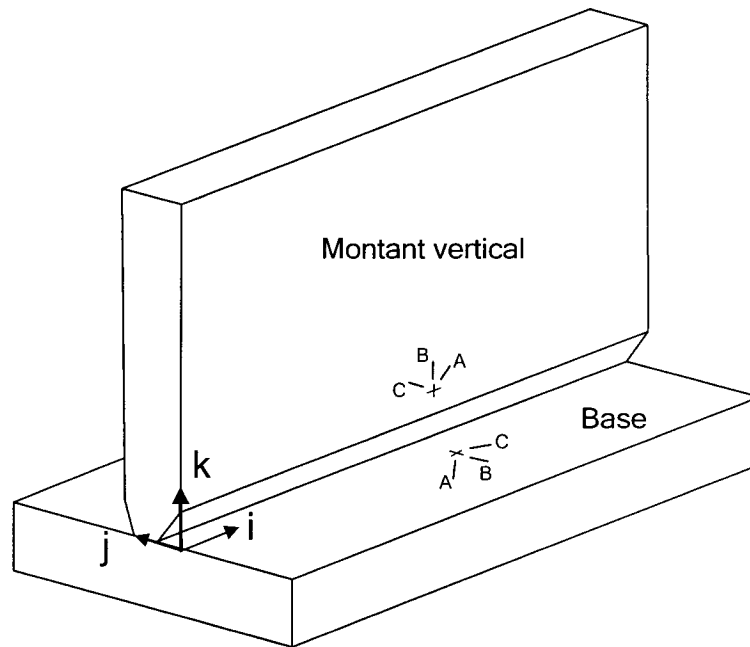


Figure 2.12 Position des rosettes rectangulaires installées avant le soudage

¹ Des essais ont validé que cette procédure n'influençait pas significativement les mesures de déformations.



Figure 2.13 Protection des jauges pendant le soudage

c) Soudage

Afin d'obtenir un congé de soudure constant sur toute la longueur de l'échantillon, des appendices de départ et d'arrêt ont été ajoutés aux échantillons (Figure 2.14). Les joints soudés étant de très grande taille, le soudage des échantillons est effectué en plusieurs passes de soudure (Figure 2.15). Le métal d'apport est un acier inoxydable martensitique pour l'ensemble des joints, à l'exception des deux premières couches des joints à pénétration partielle où un acier inoxydable austénitique est utilisé.

Les passes de soudure sont réalisées successivement rangée par rangée. Elles sont alternées de part et d'autre du joint afin de conserver la perpendicularité des deux plaques assemblées. À de multiples occasions, des inspections visuelles, au liquide pénétrant, aux particules magnétiques ainsi qu'aux ultrasons ont été effectuées afin de détecter les défauts causés par un manque de fusion. Lorsqu'un défaut était détecté, le congé soudé était meulé jusqu'à ce que ce défaut disparaisse puis il était réparé par soudage.

Après le soudage, des torches de gougeage ArcAir ont été utilisées afin de couper les appendices de départ et d'arrêt (Figure 2.16). Ce procédé utilise un arc électrique produisant un bain de fusion qui est immédiatement expulsé par un jet d'air.

Il a l'avantage de couper une pièce en acier inoxydable sans l'exposer à une température très élevée afin d'éviter la création de contraintes résiduelles.



Figure 2.14 Appendices de départ et d'arrêt

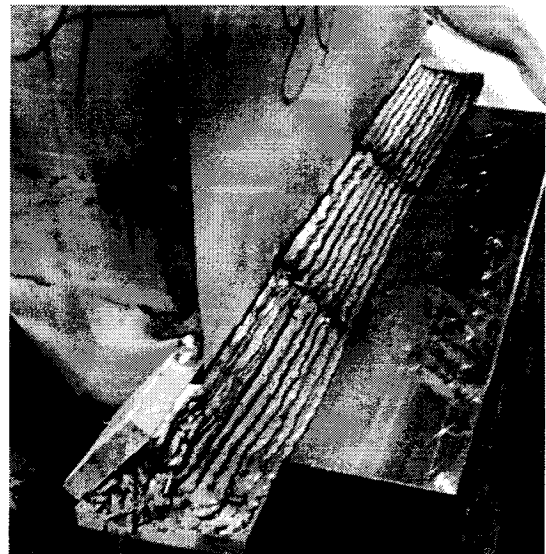


Figure 2.15 Passes de soudure sur les échantillons

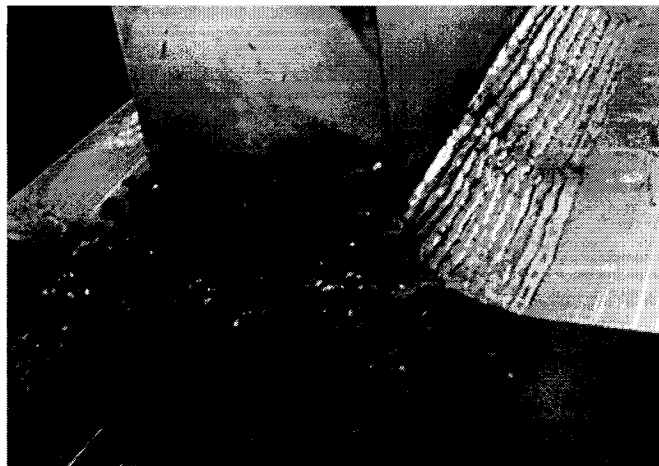


Figure 2.16 Appendices coupés à l'ArcAir

d) Meulage et traitement thermique

Une fois le soudage terminé et le joint refroidi, les congés sont meulés puis sablés conformément aux spécifications applicables aux joints soudés de turbines hydrauliques (Figure 2.17).

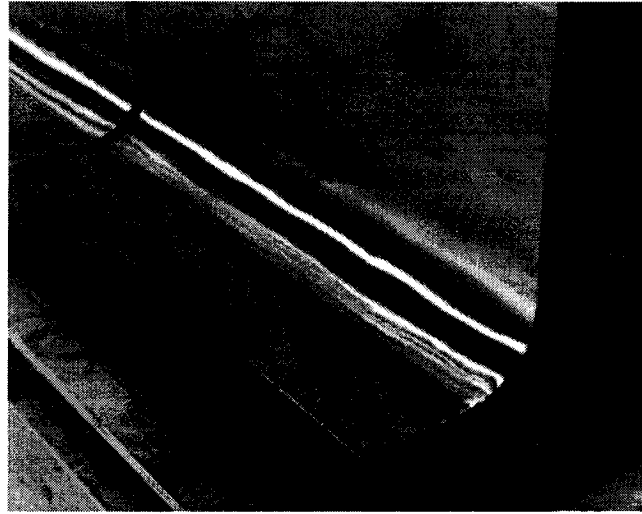


Figure 2.17 Échantillon meulé et sablé

Par la suite, les pièces sont coupées à la scie en deux portions de 254 mm de longueur afin de faciliter la mesure des contraintes résiduelles. Tous les échantillons, à l'exception d'un seul (voir Tableau 2.4), subissent alors un traitement thermique de relaxation des contraintes selon les spécifications de fabrication des roues de turbines hydrauliques. Les mesures effectuées sur l'échantillon non traité thermiquement et sur un échantillon similaire traité thermiquement permettront d'évaluer l'effet du traitement thermique sur les contraintes résiduelles.

2.5 Déformations mesurées par des jauges d'extensométrie après le soudage

L'objectif de ces mesures était de connaître l'ordre de grandeur des contraintes résiduelles longitudinales (σ_l), transversales (σ_j) et normales (σ_k) au congé de soudure,

près de ce dernier, dans le métal de base (voir Figure 2.12). Des rosettes ont été utilisées afin de mesurer les déformations induites par le soudage. La position de chacune des rosettes ainsi que les contraintes résiduelles induites par le soudage, calculées à l'aide des déformations mesurées, supposées élastiques, sont rapportées au Tableau 2.5. Le cisaillement τ , présenté dans ce tableau, doit être interprété pour les points de mesure de la base et du montant comme τ_{ij} et τ_{ik} respectivement. Le détail des calculs nécessaires à l'évaluation de ces contraintes est présenté à l'Annexe C.

Tableau 2.5 Position des jauges d'extensométrie et contraintes résiduelles formées par le soudage

Échantillons	Endroit	i (mm)	j (mm)	k (mm)	σ_i (MPa)	σ_j (MPa)	σ_k (MPa)	τ (MPa)
2B	Base	254	-54		83	6		18
	Montant	254		54	77		-31	-24
2C	Montant	254		53	-4		-34	-25
2D	Base	254	-54		109	46		-10
	Montant	254		54	44		-12	-9
3A	Base	254	-62		36	29		1
	Montant	254		67	12		7	19

Les contraintes résiduelles qui ont ainsi été mesurées sont probablement sensibles à l'ordre des passes de soudure ainsi qu'aux arrêts et départs. Ceci expliquerait pourquoi aucune relation entre les contraintes évaluées et l'épaisseur des échantillons et/ou la profondeur de la pénétration de soudure n'a été observée.

Les contraintes transversales (σ_j) et normales (σ_k) au congé de soudure sont faibles (< 46 MPa) tandis que les contraintes longitudinales (σ_i) sont plus élevées (< 109 MPa). D'après les résultats rapportés dans la littérature, les contraintes résiduelles dans un joint soudé sont plus élevées dans la direction longitudinale i que dans la direction transversale j . Par exemple, les profils de contraintes résiduelles dans

la base d'un joint en T présentés par Teng et al (2001) dévoilent pour une position située légèrement à l'extérieur du joint soudé ($X = 30$ mm), des contraintes résiduelles longitudinales d'environ 80 MPa en tension (voir Figure 1.17) tandis que pour cette même position, les contraintes transversales sont d'environ 10 MPa en tension (Figure 1.18).

2.6 Coupe par électro-érosion

Le montage des échantillons pour la coupe par électro-érosion, les diverses étapes reliées à cette coupe ainsi que les problèmes occasionnés par la présence de laitier dans le plan de coupe sont présentés dans cette section.

2.6.1 Montage

Afin de faciliter la coupe par électro-érosion (EDM), la base des échantillons a été tronquée à l'aide d'une scie dans le sens du cordon de soudure, tel qu'illustré à la Figure 2.18. Les bases tronquées des échantillons de la série 2X, 3X et 5X ont une largeur w de 152,4 mm, de 203,2 mm et de 254 mm, respectivement. Ces coupes permettent de rapprocher les têtes guidant les fils de l'EDM afin de minimiser l'oscillation du fil de coupe. Le découpage final par EDM sera fait par une coupe horizontale au niveau du plan d'intérêt situé initialement à une distance e de 3,87 mm (voir section 2.6.5 pour plus d'informations) par rapport à la surface supérieure de la base. La largeur du plan de coupe par EDM est désignée par C .

Il est à noter que l'évaluation des contraintes résiduelles près d'un joint soudé de turbine hydraulique par la méthode du trou (présentée à la section 2.3.1) et la mesures des déformations occasionnées par le soudage (présentée à la section 2.5) ont indiqué que les contraintes résiduelles transversales situées aux plans de coupe sont relativement faibles. La redistribution des contraintes résiduelles au plan d'intérêt, qui

est causée par les coupes à la scie, ne devrait donc pas être significative. Cet effet a donc été jugé négligeable.

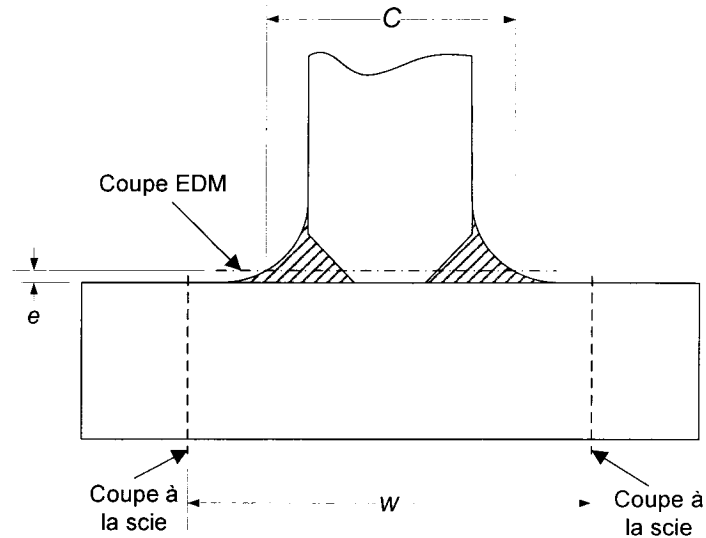


Figure 2.18 Coupes à la scie et par électro-érosion effectuées sur les échantillons

La base et le montant vertical de chaque échantillon ont été soutenus lors de la coupe par EDM. Pour ces fins, des trous filetés ont été réalisés aux extrémités de chaque échantillon afin de fixer des tôles de soutien. Deux côtés de ces tôles sont fraisés afin de faciliter le positionnement du montage avant la coupe. Le montage de ces plaques avec un échantillon est présenté à la Figure 2.19.

Le bridage de l'échantillon pendant la coupe EDM est très important car le relâchement et la redistribution des contraintes résiduelles peuvent refermer le trait de coupe et faire coincer le fil. La Figure 2.20 illustre le positionnement de l'échantillon dans l'EDM pendant la coupe par électro-érosion, ainsi que la nomenclature utilisée pour identifier les extrémités de la coupe (A : départ ; B : fin). Le processus inverse peut se produire, provoquer l'ouverture du trait de coupe et causer des déformations plastiques aux fronts de coupe (voir Figure 2.21). Afin d'éviter ces inconvénients, un trou de passage (Figure 2.22) est tout d'abord percé au travers de la base et puis, un

trou fileté ayant le même axe est pratiqué dans le montant vertical, à l'extrémité *A*. Après une coupe de 50 mm de longueur par électro-érosion, des cales d'épaisseur sont placées dans le trait de coupe afin d'éviter toute fermeture susceptible de coincer le fil et une vis est installée dans le trou fileté pour empêcher l'ouverture du trait de coupe. La coupe peut ensuite être complétée jusqu'à l'extrémité *B*. L'échantillon découpé est montré à la Figure 2.23.

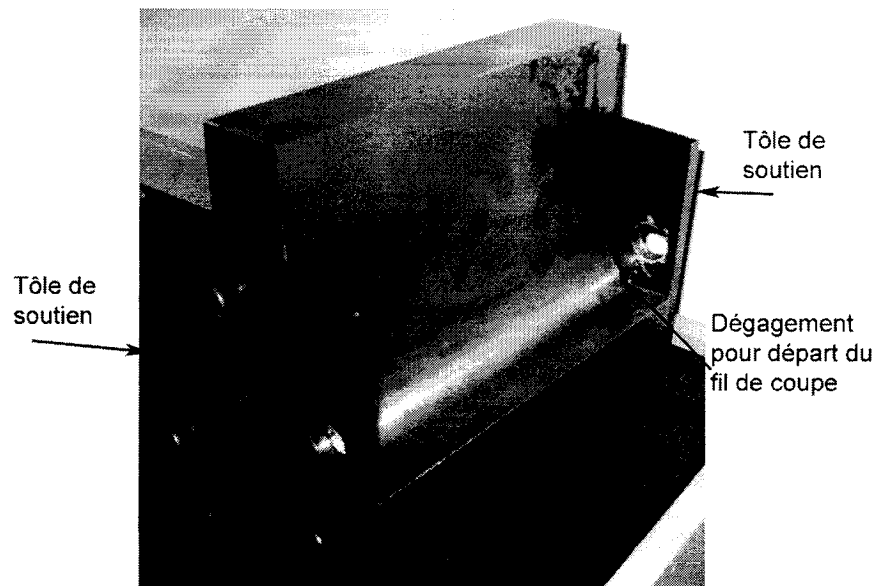


Figure 2.19 Montage pour coupe EDM

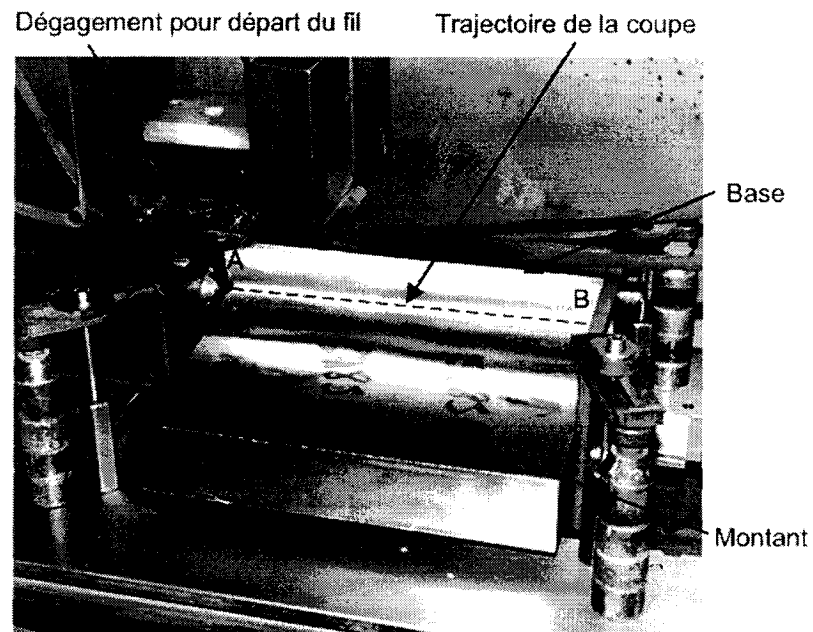


Figure 2.20 Positionnement pour la coupe par électro-érosion dans l'EDM

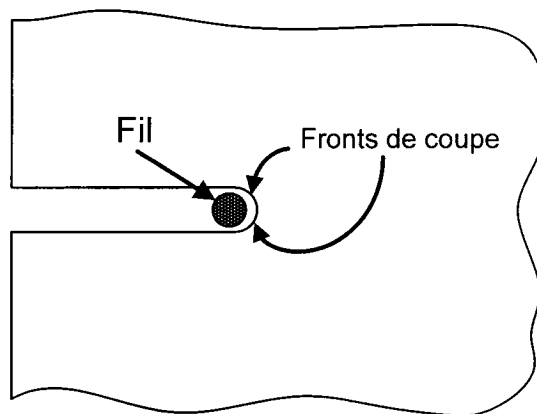


Figure 2.21 Fronts de coupe EDM

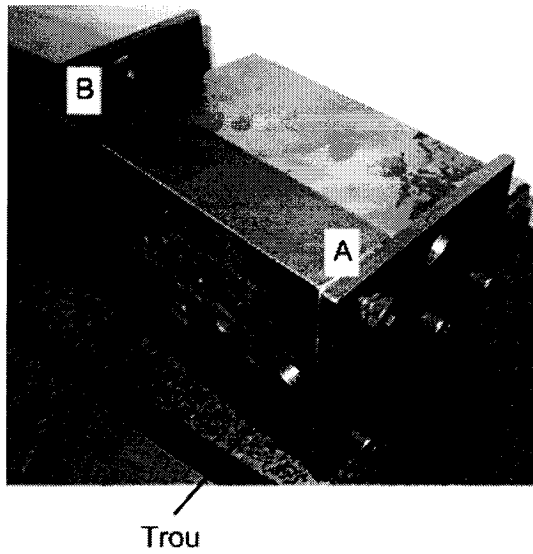


Figure 2.22 Trou permettant le bridage des deux pièces pendant la découpe



Figure 2.23 Trait de coupe par électro-érosion

2.6.2 Paramètres de la coupe par électro-érosion

Le Tableau 2.6 regroupe les paramètres sélectionnés pour la coupe par électro-érosion. Il s'agit des paramètres de départ car la machine modifie automatiquement ces paramètres selon les besoins de coupe. Par exemple, la vitesse de déroulement du fil sera modifiée en présence d'impuretés non conductrices.

Tableau 2.6 Paramètres pour la coupe par électro-érosion

Échantillon	Série 2X	Série 3X	Série 5X
Type de fil	<i>Hard brass</i>	<i>Hard brass</i>	<i>Hard brass</i>
Diamètre du fil (μm)	254	305	305
Largeur du trait de coupe (μm)	356	432	432
Vitesse de déroulement du fil (mm/s)	3050	2540	2540
Tension du fil (N)	10,2	12,0	12,0
On time / Off time (ms)	8 / 10	12 / 8	12 / 12
Ampérage (A)	12	14	18
Voltage (V)	24	24	24

2.6.3 Mesure des déformations pendant la coupe par électro-érosion

Avant d'effectuer la première coupe par électro-érosion, des jauges uniaxiales CEA-06-062UW-120 et une rosette rectangulaire de type CEA-06-125UR-120 ont été collées sur le montant, à l'extrémité de l'échantillon (Figure 2.24) afin de mesurer les déformations relâchées pendant la coupe. Ces mesures permettront de corroborer les résultats obtenus par la méthode du contour et les contraintes résiduelles relâchées à l'extrémité de l'échantillon.

Après la calibration à l'aide des ponts de Wheatstone, les fils ont alors été dessoudés des borniers de raccordement et ensuite, la pièce a été coupée. Une fois la pièce séchée, les fils ont été ressoudés afin d'évaluer les déformations relâchées. Une couche de silicone de type RTV 3145 a servi à protéger les jauges.

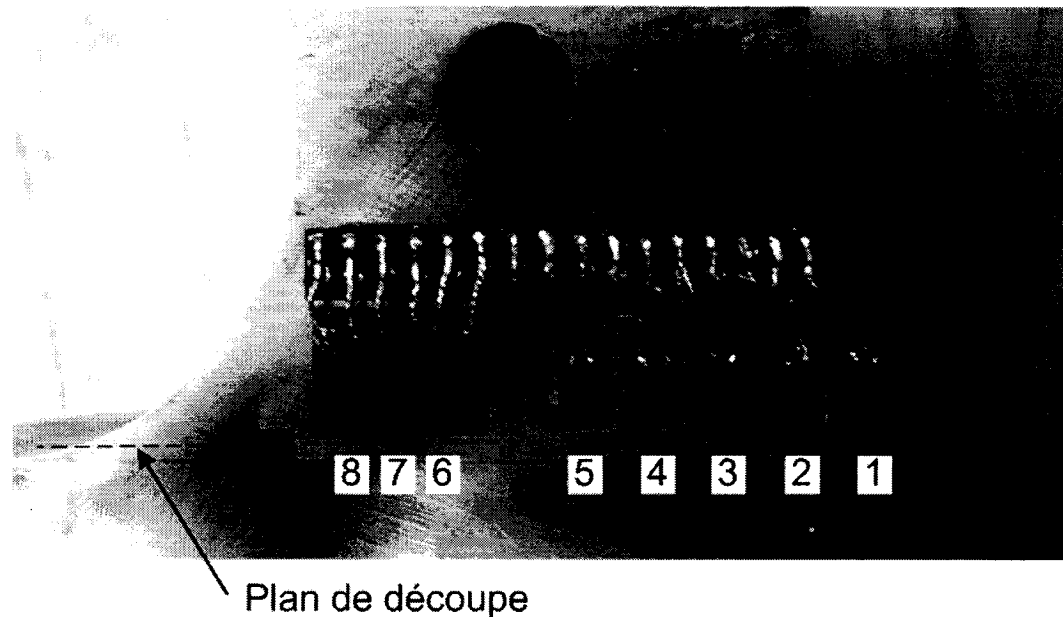


Figure 2.24 Rosette et jauges collées à l'extrémité de l'échantillon 2B pour la mesure des déformations pendant la coupe par EDM

2.6.4 Profil de la coupe par électro-érosion pour une pièce témoin

Le profil du plan de coupe par électro-érosion n'est jamais parfaitement droit mais il est soit concave, soit convexe. Bien que le gauchissement de ce profil ne soit pas très prononcé, il est important de le considérer afin de diminuer les incertitudes sur les mesures et obtenir le profil de déformations uniquement causé par la relaxation des contraintes résiduelles lors de la coupe par EDM. Des pièces témoins ont donc été coupées par électro-érosion afin de connaître le profil de la coupe et d'en tenir compte lors du traitement des données concernant les mesures de surface effectuées par CMM.

Une pièce témoin d'une longueur C , correspondant à la largeur de la coupe par électro-érosion dans les échantillons (voir Figure 2.18), était nécessaire pour chaque série d'échantillons (voir Tableau 2.7). Ces pièces sont fabriquées avec le même matériau que les plaques des joints soudés ; le niveau des contraintes résiduelles présentes y est négligeable. Le profil du plan de coupe est mesuré par CMM au fond et

sur les côtés d'une encoche carrée de 6,35 mm pratiquée dans chacune des pièces témoins (voir Figure 2.25). Tous les profils seront examinés et celui contenant le moins de rugosité de surface sera retenu comme profil typique à considérer lors du traitement des données.

Tableau 2.7: Largeur de coupe pour chaque série d'échantillon

Série	Largeur de coupe C (mm)
2X	83,9
3X	110,3
5X	179,4

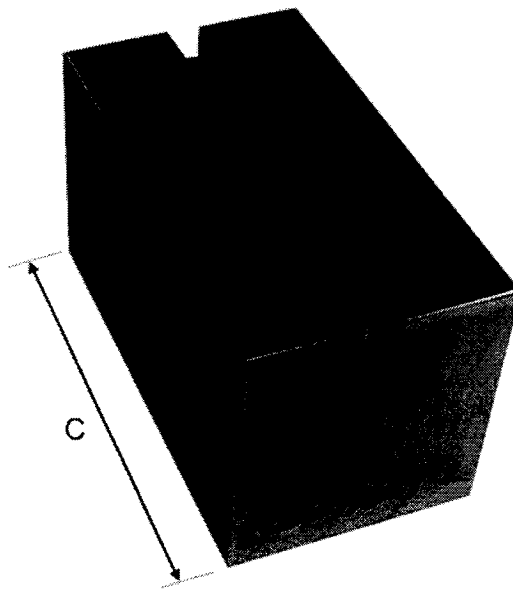


Figure 2.25 Échantillon témoin pour le profil de coupe par électro-érosion

2.6.5 Problème causé par le laitier

Un problème est survenu lors de la coupe des échantillons à pénétration partielle de la série 2X. En fait, du laitier est demeuré emprisonné à l'intérieur du joint, de chaque côté du méplat, derrière la première passe de soudure. Pour pouvoir couper ce laitier non conducteur par la friction du fil seulement (voir les traces brillantes, Figure 2.26), l'avance du fil a été très lente. Il en a résulté une surface au fini non uniforme pour l'échantillon 2C. Les surfaces de la coupe ont toutefois été mesurées en entier et seulement les données obtenues dans les zones où la coupe est normalement réalisée seront analysées. Deux zones d'évitement (modification du niveau du plan de coupe) ont été nécessaires étant donné la présence d'une trop grande quantité de laitier.

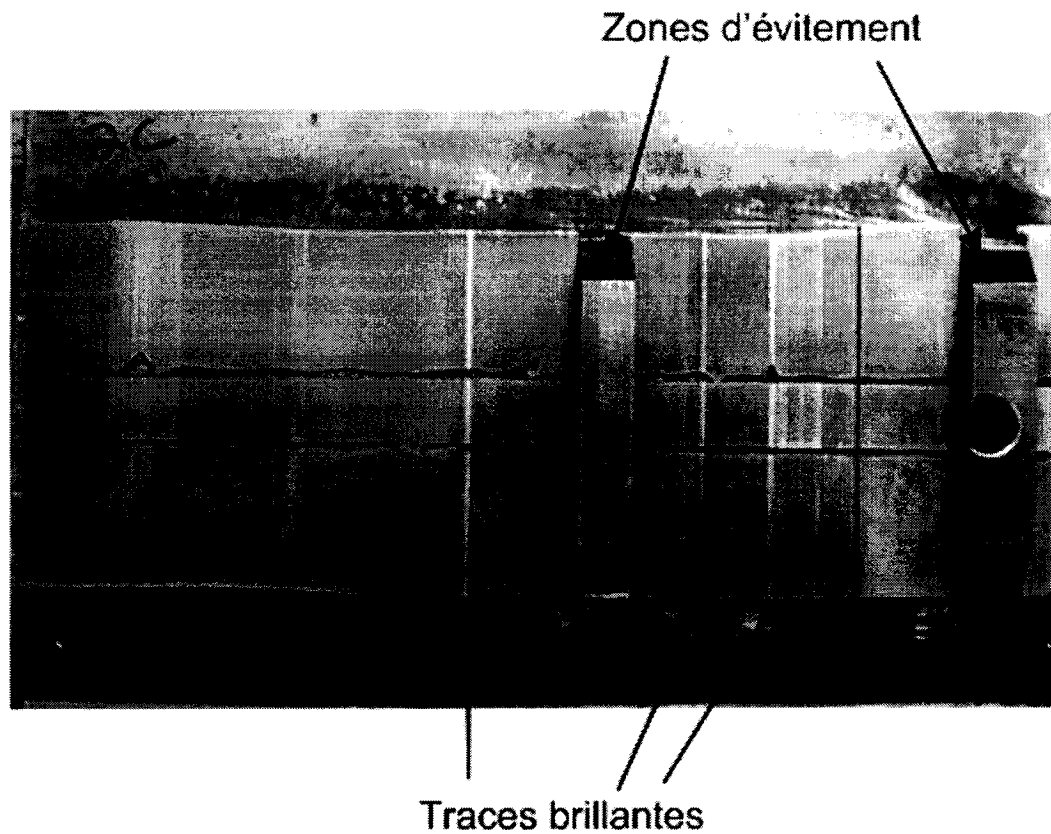


Figure 2.26 Problème de coupe de l'échantillon 2C causé par le laitier

Afin de minimiser ce problème, le plan de coupe avait été déplacé de $e = 1,6$ mm pour les échantillons 2A, 2B et 2C à $e = 3,87$ mm pour l'échantillon 2D. Ce déplacement n'étant toujours pas suffisant pour éviter le laitier, le plan de coupe des échantillons des séries 3X et 5X a donc été déplacé à $e = 6,35$ mm.

2.7 Mesures dans le plan de coupe

Premièrement, cette section présente la méthode utilisée ainsi que le choix des paramètres de mesures afin d'obtenir le profil des surfaces coupées. Par la suite, l'application de la méthode du trou dans le plan de coupe, en bout d'échantillon, est exposée.

2.7.1 Détermination du profil de la surface par une machine à mesurer tridimensionnelle

a) Méthode

Le profil des surfaces coupées (base et montant) a été déterminé à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle de type CMM (Coordinate Measuring Machine) *Mitutoyo Legex 910* munie d'une tête *Mitutoyo MPP 300*, (voir la Figure 2.27 et la Figure 2.28). La précision de cette machine est de $0,48 + D_{cmm}/1000$ μm où D_{cmm} est la longueur en mm sur laquelle les mesures sont prises, ce qui donne, pour la longueur des échantillons à mesurer, une précision d'environ $\pm 0,74$ μm . Il est à souligner que la CMM est installée dans une salle blanche où l'atmosphère est contrôlée. La température y est de $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Afin de s'assurer que les échantillons ne subissent pas de distorsion à cause de l'effet du changement de la température, ils sont placés dans la salle blanche au moins 18 heures avant d'effectuer les mesures.

À l'aide d'une sonde, la CMM mesure les coordonnées des points de la surface par rapport à un système d'axes de référence. Un système opto-électrique formé de

plusieurs couches de verre est utilisé pour localiser l'emplacement de la sonde lors du contact. Ce type de CMM permet des lectures en continu ; la sonde glisse sur la pièce selon une vitesse définie et l'acquisition des données s'effectue à la fréquence désirée.

La surface est mesurée à l'aide de passes successives. Les passes sont enregistrées dans un système de coordonnées cartésien présenté à la Figure 2.27, pour la surface de la base, et à la Figure 2.28, pour la surface du montant. Chaque passe est effectuée dans la direction y sur toute la largeur de la coupe. Des incréments dans la direction x sont effectués entre chaque passe, jusqu'à l'extrémité de l'échantillon.

Le système d'axe de la Figure 2.27 servira de repère pour l'analyse des contraintes résiduelles pour le plan de coupe. L'axe x correspond à la direction longitudinal, l'axe y à la direction transversale et l'axe z , à la direction normale dans le joint soudé en T.

À l'extrémité de l'échantillon, les mesures sont très rapprochées afin d'obtenir un profil précis qui permettra d'établir une comparaison entre les contraintes déterminées par la méthode du contour et celles mesurées par la méthode du trou (section 2.7.2). De la position $x = 1$ mm jusqu'à $x = 8,6$ mm, une passe est effectuée à tous les 0,4 mm. Le reste des mesures sont effectuées de $x = 20$ mm jusqu'à l'autre extrémité de l'échantillon. Ces mesures sont effectuées par bandes de 6 mesures, espacées de 0,2 mm (une bande couvrant une distance de 1 mm), à tous les 10 mm. Ces passes successives ont été choisies afin d'établir une moyenne locale pour le profil obtenu et ainsi filtrer la rugosité. Une passe intermédiaire entre chaque bande est effectuée afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de grand gradient de déplacements entre ces dernières. Aucune acquisition n'a été effectuée entre les positions $x = 8,6$ mm et $x = 20$ mm dû à une erreur lors de la détermination des passes à mesurer au début du projet. Cette erreur n'aura toutefois pas un grand impact sur le profil global des contraintes résiduelles car il s'agit d'une très petite zone et que les profils mesurés en $x = 8,6$ mm et $x = 20$ mm sont très rapprochés pour la majorité des échantillons.

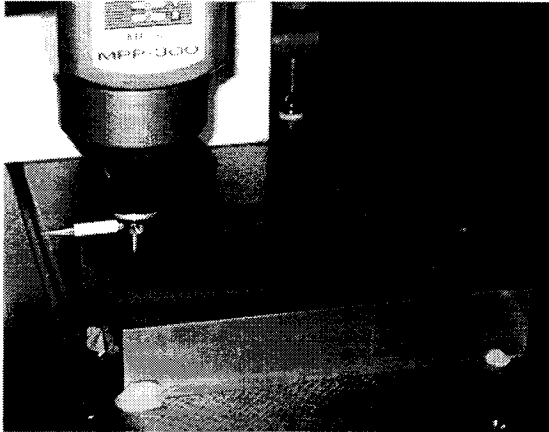


Figure 2.27 Mesure de la base par CMM

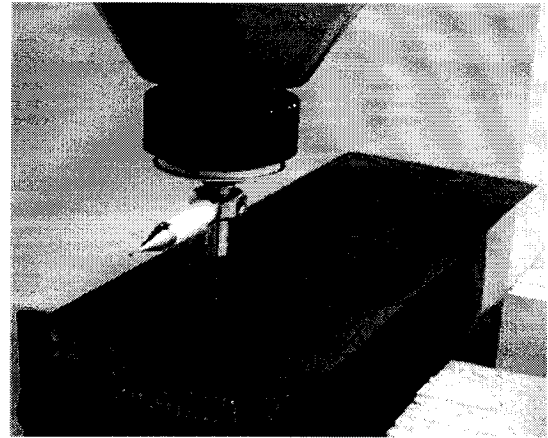


Figure 2.28 Mesure du montant par CMM

Le profil obtenu à partir d'une passe typique de mesures par CMM est présenté à la Figure 2.29. Le profil brut de la coupe par électro-érosion, en dents de scie, montre que la surface est très rugueuse ; cette rugosité est locale et elle pourra être filtrée lors du traitement des données. La forme globale du profil mesuré correspond à la superposition des déformations occasionnées par le relâchement des contraintes résiduelles et du profil du trait de coupe par électro-érosion.

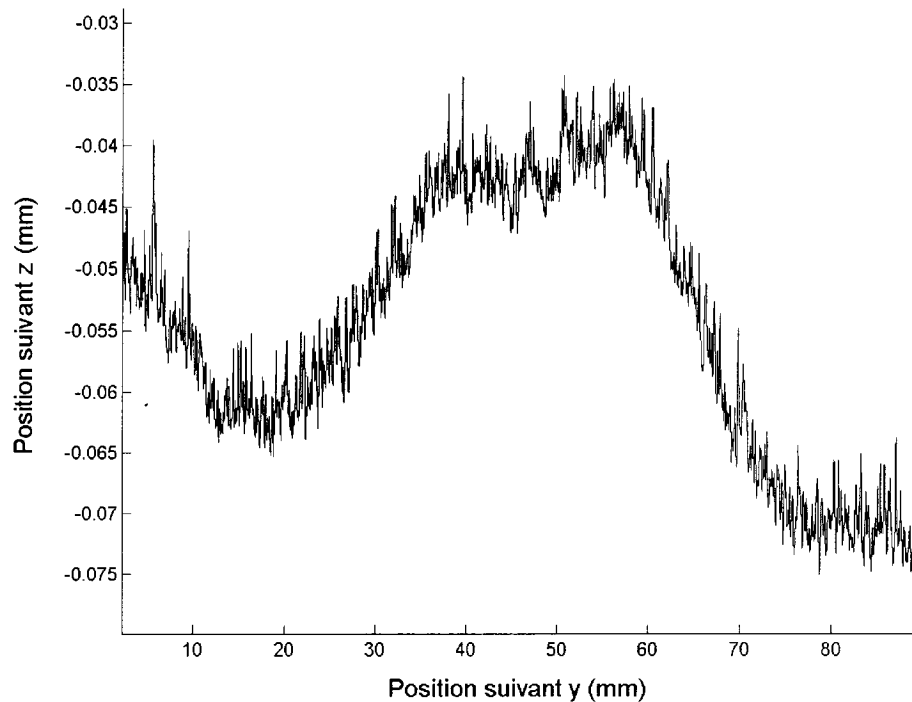


Figure 2.29 Profil typique d'une passe de mesures par CMM

b) Effet de la vitesse de la sonde

Pour fins de comparaison, des mesures ont été effectuées en faisant varier la vitesse de la sonde (entre 0,1 à 4 mm/s) et le nombre d'acquisitions par unité de longueur parcourue (entre 10 à 50 par mm de longueur). La même trajectoire de mesures a été effectuée sept fois ; pendant une trajectoire, la vitesse et le nombre d'acquisitions par unité de longueur demeuraient constants.

Le choix final des paramètres de vitesse et du nombre d'acquisitions par unité de longueur a été fait en se référant aux résultats de la passe la plus lente (0,1 mm/s), avec le plus grand nombre d'acquisitions. À la vitesse de 4 mm/s, la sonde rebondissait et les coordonnées mesurées étaient très étalées de part et d'autre des valeurs de référence. Une vitesse de 2 mm/s a alors été jugée adéquate. Puisque le nombre d'acquisitions par unité de longueur parcourue ne modifiait pas la vitesse de mesure et

d'acquisition des données, un nombre d'acquisition de 50 par mm de longueur a été adopté.

2.7.2 Application de la méthode du trou

Des mesures par la méthode du trou ont été effectuées dans le plan de coupe par électro-érosion avant la découpe afin de pouvoir comparer les contraintes résiduelles mesurées en surface dans le plan y - z et celles mesurées à l'aide de la méthode du contour. La Figure 2.30 illustre la position des trous effectués sur la section droite de l'échantillon, au niveau du plan de coupe, en bout de l'échantillon ($x = 0$). Les contraintes ainsi évaluées sont présentées à la section 3.2.

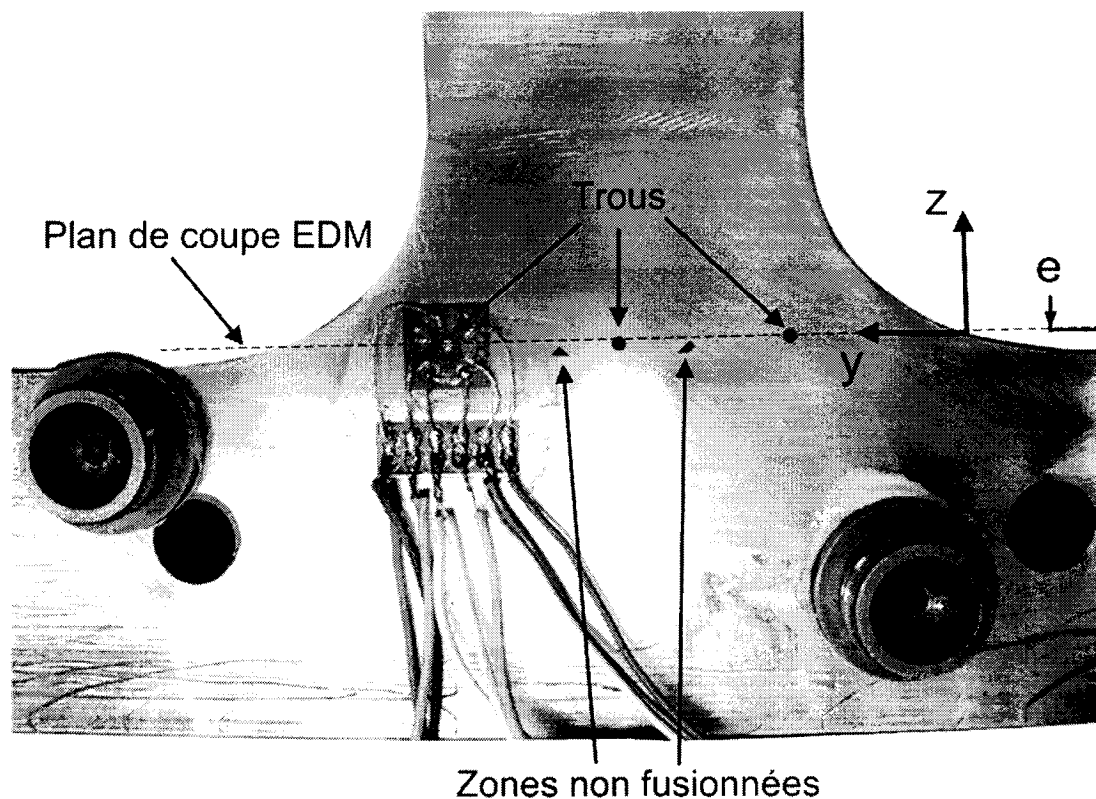


Figure 2.30 Mesures de contraintes résiduelles effectuées à l'aide de la méthode du trou dans le plan de coupe par EDM

2.8 Conclusion

La procédure expérimentale concernant les mesures préliminaires des contraintes résiduelles dans le joint soudé à pénétration partielle d'une roue de turbine par la méthode du bruit de Barkhausen et la méthode du trou a été présentée. La méthode de Barkhausen s'est avérée peu efficace alors que les résultats obtenus par la méthode du trou ont indiqué que le niveau des contraintes résiduelles maximales en surface, près des joints soudés, était de l'ordre de 80 MPa en tension et de 100 MPa en compression. Les résultats concernant les contraintes résiduelles évaluées par ces méthodes ont été rapportés et discutés. Il a été jugé préférable de ne plus utiliser la méthode du bruit de Barkhausen à cause de sa faible fiabilité à obtenir des résultats interprétables pour ces joints soudés.

Les diverses étapes de fabrication de l'échantillon (joint soudé en T) ont été expliquées, incluant l'installation de jauges d'extensométrie pour évaluer les contraintes induites par le soudage dans le matériau de base, près de la zone soudée. Les contraintes transversales (σ_j) et normales (σ_k) au congé de soudure ainsi mesurées sont très faibles (< 46 MPa) tandis que les contraintes longitudinales (σ_l) sont plus élevées (< 109 MPa).

En particulier, toutes les précautions prises pour s'assurer que la coupe par électro-érosion soit réalisée dans des conditions qui permettent de mesurer les déplacements associés au relâchement des contraintes résiduelles seulement ont été présentées.

Au prochain chapitre, la méthode du contour sera appliquée au calcul des contraintes résiduelles sur le plan d'intérêt du joint soudé, en utilisant le logiciel d'éléments finis ANSYS et en se servant des résultats des mesures du profil de la section de coupe par EDM comme données d'entrée à ce logiciel.

Chapitre 3 Analyse des contraintes résiduelles

Dans ce chapitre, des explications sur les diverses étapes du traitement des données sont présentées et les résultats avec discussions sur la pertinence de différentes techniques d'évaluation de contraintes résiduelles pour un joint soudé en T sont mis en évidence. En premier lieu, les contraintes résiduelles relaxées, mesurées par des jauges d'extensométrie lors de la coupe par électro-érosion, sont présentées puis, les contraintes résiduelles mesurées dans le plan de coupe par la méthode du trou sont analysées. Les calculs et les difficultés reliées à la méthode numérique utilisée, soit la méthode du contour, sont ensuite exposés et les résultats obtenus sont présentés. Enfin, une discussion sur les résultats obtenus à l'aide des différentes méthodes est suivie par une conclusion.

La Figure 3.1 présente les divers paramètres des échantillons mesurés par la méthode du contour. Le système d'axes illustré servira à présenter les résultats contenus dans le présent chapitre.

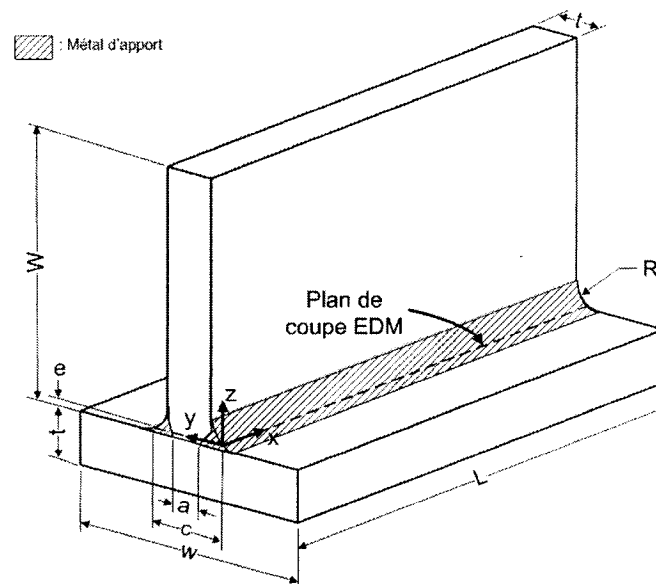


Figure 3.1 Géométrie et système d'axes de l'échantillon analysé par la méthode du contour

3.1 Déformations mesurées par des jauges d'extensométrie pendant la coupe par électro-érosion

Tel que mentionné à la section 2.6.3, les déformations causées par la relaxation des contraintes résiduelles lors de la coupe par électro-érosion ont été mesurées à l'aide de jauges d'extensométrie dans l'échantillon 2B ($a = 0$; $C = 83,9$ mm), soudé avec pénétration totale et non traité thermiquement. Le Tableau 3.1 regroupe la position de chacune des jauges, les déformations mesurées ainsi que les contraintes résiduelles relaxées qui ont été calculées. Il est à noter que le sens positif du cisaillement correspond au sens négatif de l'axe y pour la face z positive de la Figure 2.24. La déformation mesurée par chaque jauge est identifiée par ε ; σ_y et σ_z représentent les contraintes résiduelles qui ont été relâchées, à la position de la jauge. Les contraintes réelles ayant été relâchées au plan de coupe par EDM sont donc probablement différentes de ces dernières.

Tableau 3.1 Position des jauges d'extensométrie, déformations mesurées et contraintes relâchées pendant la coupe par électro-érosion dans l'échantillon 2B

Jauge	Position en y (mm)	Position en z (mm)	ε ($\mu\text{m/m}$)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{yz} (MPa)
1	13,8	5,3	-854		171	
2	19,5	5,3	-880		176	
3	25,7	5,3	1574		-315	
4	31,9	5,3	1077		-215	
5	38,1	5,3	1090		-218	
6	55,1	4,7	643	-183	-182	-79
7			1151			
8			634			

La contrainte relaxée suivant l'axe z , calculée à l'aide des jauges uniaxiales, a été illustrée en fonction de la position y à la Figure 3.2. La contrainte dans la direction

normale z , mesurée par la rosette et qui a été identifiée sur le graphique, ne permet pas de conclure qu'il y a une symétrie quant à la répartition de la contrainte par rapport au centre de l'échantillon (plan $y \approx 44$ mm) car un seul point a été mesuré dans la moitié gauche de l'échantillon. Les contraintes résiduelles relâchées qui ont été mesurées sont assez élevées (plus de 200 MPa en tension).

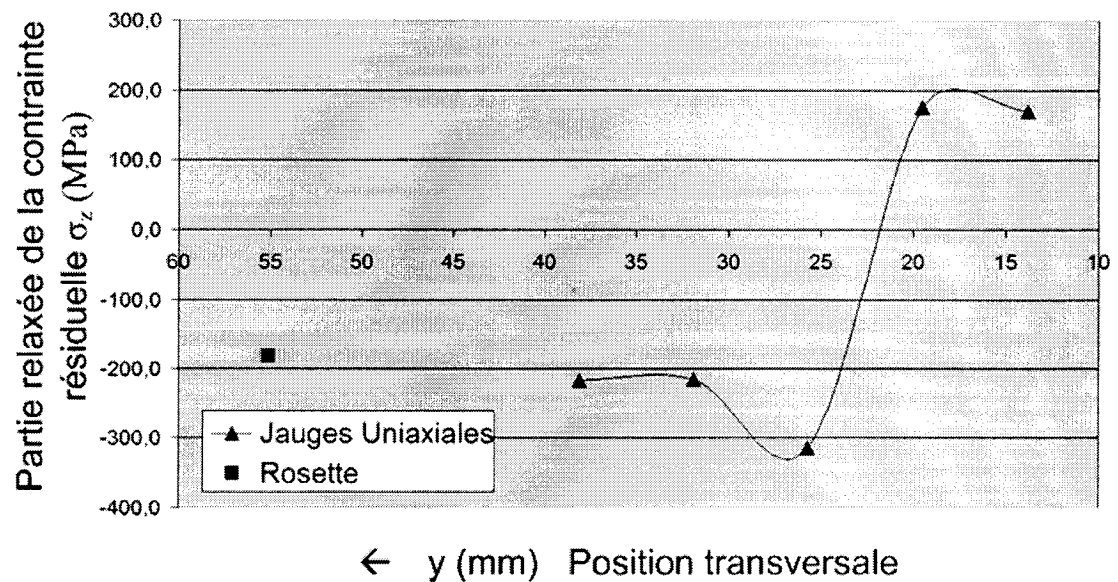


Figure 3.2 Contrainte résiduelle normale σ_z relaxée lors de la coupe par électro-érosion de l'échantillon 2B en fonction de la position en y ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

3.2 Contraintes résiduelles évaluées par des jauges d'extensométrie sur le bord du plan de coupe EDM

À l'aide de la méthode du trou, des mesures ont été effectuées dans le plan de coupe par électro-érosion afin de vérifier la pertinence de la méthode du contour concernant les contraintes résiduelles mesurées en surface.

Le Tableau 3.2 montre la largeur C du plan de coupe, les coordonnées y et z des points de mesure et les valeurs des contraintes résiduelles qui ont été évaluées en fonction de la position dans le plan $x = 0$ du repère de la Figure 3.1. Le profil de

contraintes résiduelles, en fonction de la profondeur, n'est toutefois pas constant pour la majorité des points de mesure et ne satisfait pas aux conditions imposées par la norme ASTM. Tel que discuté à la section 1.4.2, les contraintes résiduelles mesurées dans des zones non-uniformes à l'aide de la méthode du trou peuvent être considérées comme valeurs repères plutôt que comme valeurs précises.

Tableau 3.2 Contraintes résiduelles en surface évaluées par la méthode du trou dans le plan de coupe par EDM

Échantillon	C (mm)	y (mm)	e (mm)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{yz} (MPa)
2A	83,9	63	1,6	-88	62	-54
		42		-134	90	17
		28		-40	145	-113
		14		2	166	-49
2C	83,9	63	1,6	41	-187	-20
		42		121	-151	-7
		21		95	-219	35
2D	83,9	63	1,6	282	5	-284
		38		55	-45	27
		17		240	245	-248
3A	110,3	90	3,0	62	58	-103
		55		86	-27	17
3B	110,3	90	3,0	63	-30	13
		55		42	2	-7
5A	179,4	140	3,0	-61	-59	20
		90		-75	-142	-17

Lors de l'analyse de ces résultats, les contraintes résiduelles transversales (σ_y), normales (σ_z) ainsi que le cisaillement (τ_{yz}) ont été tracées en fonction de chacun des trois paramètres suivants : la largeur de l'échantillon t , la position y/C et le rapport a/t . Aucune tendance claire n'a pu être observée concernant l'influence de ces paramètres

sur les contraintes résiduelles mesurées à l'aide de la méthode du trou. Ces données seront toutefois comparées aux contraintes résiduelles évaluées à l'aide de la méthode du contour.

3.3 Contraintes résiduelles évaluées par la méthode du contour

Cette méthode a permis d'évaluer la contrainte résiduelle dans les joints soudés et ce, dans la direction z perpendiculaire au plan d'intérêt (plan $x-y$). Cette section décrit premièrement les diverses étapes nécessaires à son application puis présente les résultats obtenus.

3.3.1 Outil d'analyse utilisé

L'analyse des données brutes obtenues par les mesures de la CMM a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB 6.5. La facilité à manipuler des matrices ainsi que la librairie très abondante et efficace du logiciel pour le traitement de *splines*² ont constitué des atouts majeurs lors de l'analyse des données.

3.3.2 Filtrage et lissage des données CMM

Les données brutes sous forme de fichiers *ASCII* sont tout d'abord lues par MATLAB. Une matrice, contenant toutes les passes de mesures effectuées pour balayer la surface d'un échantillon, est alors sauvegardée en format MATLAB (*.mat).

² Spline selon l'OQLF (2002) : « Un tracé est constitué d'un ensemble des points nodaux reliés entre eux par des segments droits ou courbes. Les splines donnent des courbes très lisses avec un nombre relativement peu élevé de points de contrôle. ».

Ce format permet une lecture et une écriture des données beaucoup plus rapide que par un fichier *ASCII* conventionnel.

Le rayon du congé de la soudure, après le meulage, n'est pas parfaitement uniforme. La surface obtenue par la coupe par électro-érosion ne s'avère donc pas tout à fait rectangulaire. Dans le but d'évaluer les contraintes résiduelles dans la plus grande zone possible, les pièces ont été positionnées sur la CMM afin de maximiser le côté y d'un rectangle dans lequel les mesures sont effectuées (voir Figure 3.3). Malgré la plage de mesures imposée à la CMM, il arrive que la dimension en y de la zone de validité ait été surestimée pour certaines passes ; dans ce cas, les mesures de positions en z subissent une chute brusque pour des points en dehors de la surface de coupe. Il est alors possible d'identifier ces zones et de tronquer les passes afin d'obtenir un champ de points mesurés à l'intérieur de la surface coupée par EDM.

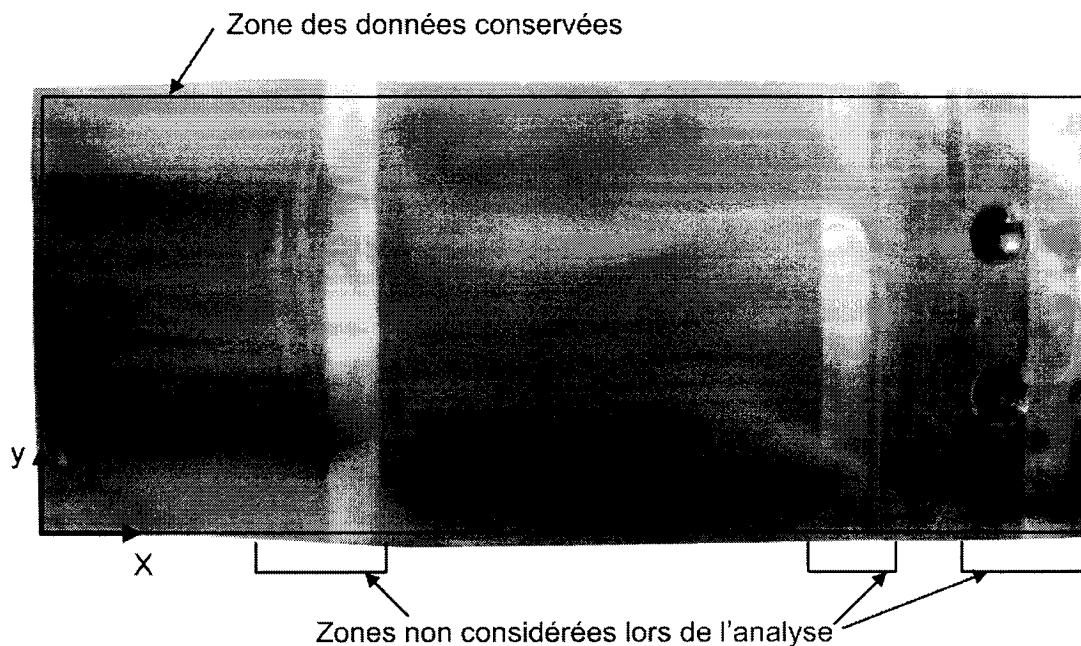


Figure 3.3 Zone de validité des positions mesurées par CMM sur une surface de coupe EDM

Les données sont ensuite analysées passe par passe afin de vérifier qu'il n'y a pas de mesures erronées dues à un manque de matière, aux impuretés ou à une

mauvaise coupe EDM causée par la présence de laitier. Pour les sections où les mesures sont erronées localement sur une passe, des interpolations linéaires suivant y remplacent les données mesurées. Les points de départ et d'arrivée des interpolations sont basés sur des moyennes locales aux extrémités de chaque zone erronée. Ces interpolations sont aussi utilisées pour remplir les trous de vis. Lorsqu'une passe contient des anomalies, elle est examinée relativement à la surface coupée. Il est alors facile de faire le lien entre des données anormales et des défauts. Quand la coupe EDM n'est pas bonne sur toute sa largeur (dans la direction y), par exemple lors de la présence de laitier, les passes s'y référant sont simplement retirées. Lorsque la suppression de plusieurs passes successives a été nécessaire, une interpolation dans la direction x entre les passes restantes, soit linéaire ou quadratique, est employée afin combler le vide. Les contraintes résiduelles calculées pour ces zones ne seront toutefois pas prises en considération lors de l'analyse des résultats.

Le profil d'une coupe par électro-érosion étant très cahoteux (Figure 2.29), il est donc essentiel de lisser les données brutes de la CMM. Chacune des passes est représentée par une *B-Spline*³. L'outil *spap2* de Matlab permet l'ajustement de telles *splines* en utilisant la méthode des moindres carrés. Elle fait l'approximation d'une série de données $z(y)$ par une fonction $f(y)$ (représentant une *B-Spline*) sur l'ensemble des n points mesurés tout en minimisant la somme suivante :

$$\sum_{j=1}^n |z(y(j)) - f(y(j))|^2 \quad (3.1)$$

³ Une *B-spline* est un ensemble de plusieurs *splines* d'ordre défini qui sont assemblées par des nœuds où la continuité et la pente sont conservées.

Il est possible de vérifier si les critères d'ajustement (ordre des *splines* et nombre de nœuds) des courbes sont adéquats en superposant les données brutes aux courbes *B-splines*. Le nombre de nœuds et l'ordre des *splines* est important. Un nombre trop grand pour ces deux paramètres aura pour conséquence de prendre en compte la rugosité de surface et de faire augmenter les contraintes maximales. Par contre, si ce nombre est trop petit, son effet est de trop lisser les données et ainsi diminuer les valeurs extrêmes des déformations, et par le fait même, les valeurs extrêmes des contraintes résiduelles évaluées. Par la suite, l'outil *spap2* est réutilisé pour ajuster des *B-splines*, dans la direction *x*. Les données peuvent alors être représentées sous forme d'une surface ondulée tel que présentée à la Figure 3.4. L'influence du nombre de nœuds et de l'ordre des *splines* a été vérifiée pour le montant 3A. Une variation d'environ 5,6% de la contrainte maximale a été observée.

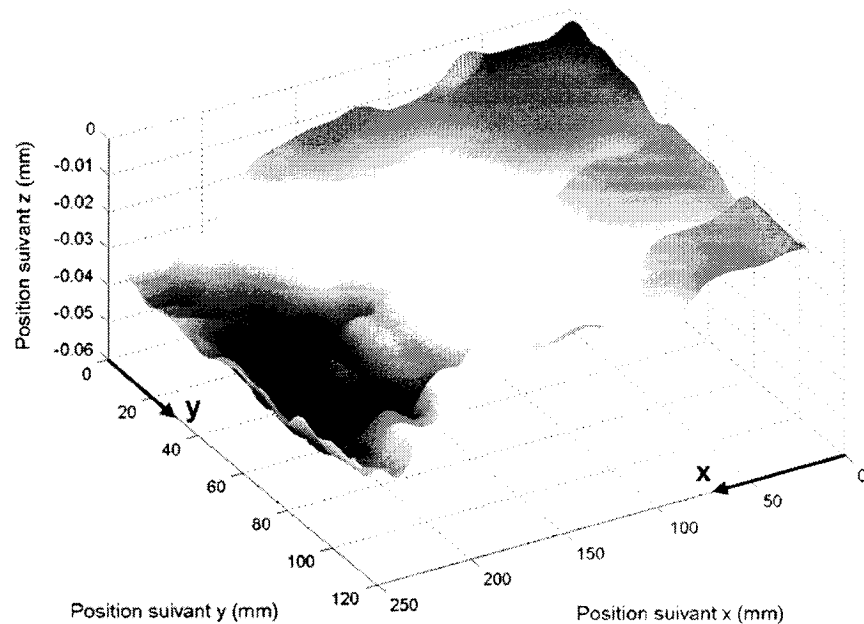


Figure 3.4 Surface ajustée pour le montant 3A (dans le repère du montant - Figure 2.28)

3.3.3 Calcul du plan de coupe avant déformation

La surface obtenue doit ensuite être ajustée au plan de coupe. La pièce initiale, avant la découpe, est en équilibre. La somme des forces (suivant z) induites dans le plan de coupe ainsi que la somme des moments (M_x et M_y) que ces forces, perpendiculaires au plan, créent par rapport à un point arbitraire (l'origine du système de coordonnées par exemple), sont nuls. La coupe provoque alors une relaxation ainsi qu'une redistribution des contraintes résiduelles dans les deux pièces résultantes de la coupe.

La position originale (avant la découpe) du plan de coupe peut être approximée en considérant le profil de déplacements mesurés comme s'il s'agissait d'un profil de contraintes. Le plan de coupe est alors obtenu à partir des trois équations d'équilibre suivantes :

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z(i, j) - z_{plan_coupe}(i, j)) &= 0 \\
 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z(i, j) - z_{plan_coupe}(i, j)) x(i) &= 0 \\
 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z(i, j) - z_{plan_coupe}(i, j)) y(j) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

où $x(i)$ et $y(j)$ sont les distances entre un point de référence arbitraire et la position d'un point (i, j) où le déplacement est mesuré selon les positions suivant les axes x et y , respectivement. Le calcul est effectué avec m points dans la direction x et n points dans la direction y . $z(i, j)$ et $z_{plan_coupe}(i, j)$ correspondent respectivement à la position selon l'axe z de chacun des points mesurés et des points correspondant au plan de coupe. La surface est alors ajustée en fonction du plan trouvé (voir Figure 3.5).

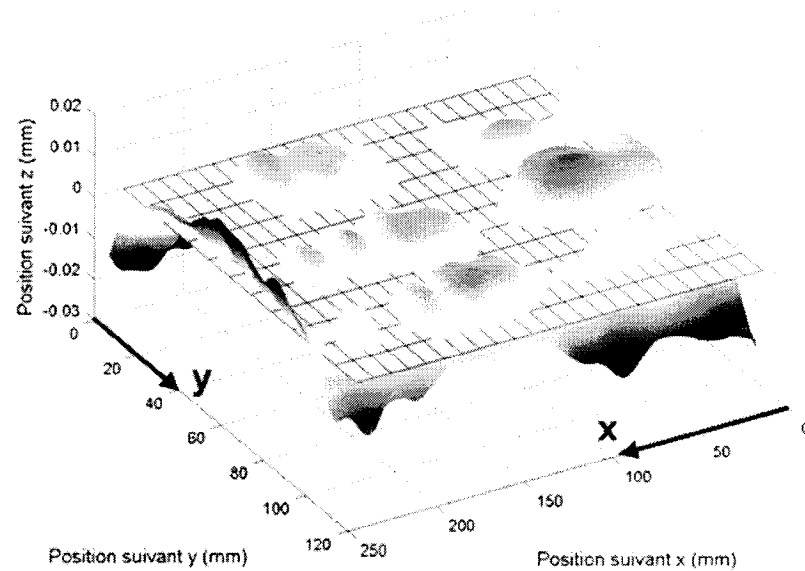


Figure 3.5 Surface ajustée selon le plan de coupe pour le montant 3A après soustraction du profil de la coupe EDM

Lorsque les déplacements mesurés au plan de coupe d'un montant sont analysés, les coordonnées des points où les mesures CMM ont été effectuées sont transformées dans le repère utilisé pour les bases (Figure 2.27 et Figure 3.1). Par la suite, les données sont converties dans un repère unitaire puis ajustées à la dimension de la pièce maillée pour tous les échantillons analysés. Cette mise à l'échelle est nécessaire puisque la largeur du rectangle qui comprend les données analysées (voir Figure 3.3) varie légèrement pour divers échantillons d'une même épaisseur.

Une incertitude survient concernant le cisaillement relâché par la coupe ; le profil moyen entre les deux faces obtenues par la coupe par électro-érosion ne peut être calculé afin d'annuler l'effet du cisaillement puisque les deux pièces obtenues n'ont pas la même géométrie. La composante normale de la contrainte résiduelle relâchée pourra toutefois être estimée en effectuant la moyenne des contraintes évaluées pour chacune des faces mesurées.

L'analyse des contraintes résiduelles à partir de la base des échantillons a seulement été possible pour les deux échantillons soudés à pénétration totale. Une mince lamelle, située entre le méplat non soudé et le plan de coupe, résulte de la coupe par électro-érosion sur la base des échantillons soudés à pénétration partielle. Elle est représentée en gris à la Figure 3.6. Cette lamelle devient bombée et ses déplacements ne peuvent être directement reliés à la contrainte résiduelle perpendiculaire au plan de coupe qui a été libérée.

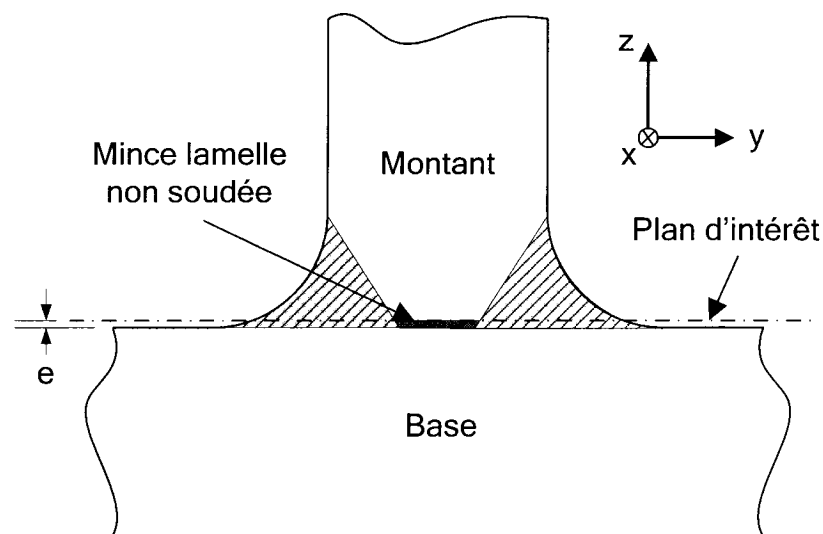


Figure 3.6 Mince lamelle résultant de la coupe EDM sur les échantillons à pénétration partielle

3.3.4 Profil de la coupe EDM

Le profil de la coupe par EDM a été mesuré dans des blocs témoins. Il est présenté à la Figure 3.7, pour les échantillons de la série 5X. Ces profils de coupe par EDM, mesurés pour différentes épaisseurs de coupe C , ont été retranchés aux surfaces mesurées des échantillons. La plus grande erreur causée par le profil de la coupe par électro-érosion est essentiellement composée de deux bandes situées aux extrémités du plan de coupe, dans la direction y . La largeur de chaque bande est d'environ 15% de la largeur totale de la coupe. Cette erreur n'a toutefois pas un incident fâcheux pour l'analyse des

montants, puisqu'à ces endroits, la pièce est constituée de minces lamelles. Ce profil, imposé dans un modèle d'éléments finis, a permis d'obtenir l'erreur sur le calcul des contraintes résiduelles (voir Figure 3.8) s'il n'avait pas été retranché des surfaces mesurées sur les montants. Cependant, l'erreur calculée à l'aide du modèle de la base serait beaucoup plus grande puisque les extrémités de la coupe, pour cette pièce, sont relativement rigides. Ainsi, le profil de coupe aurait engendré une très grande erreur près des extrémités.

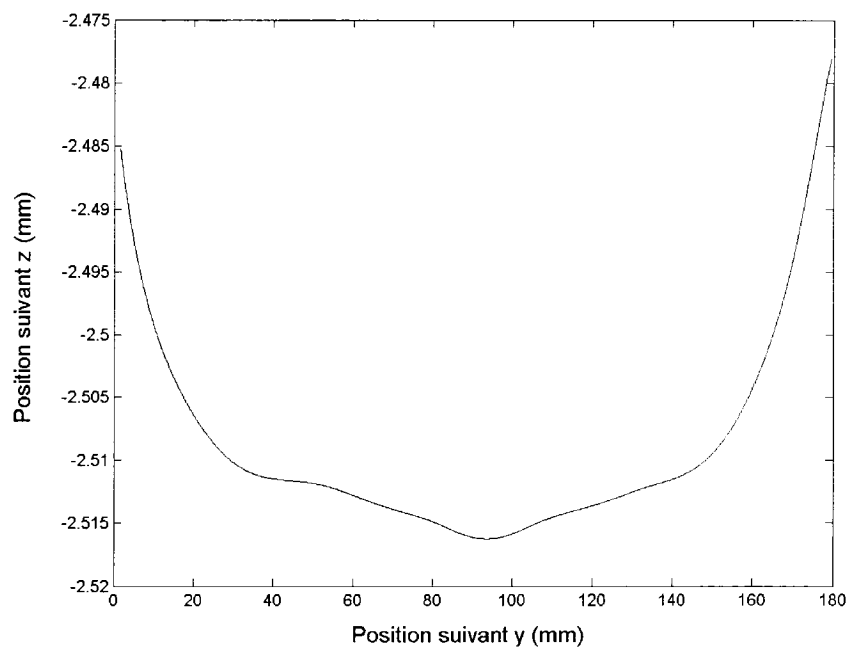


Figure 3.7 Profil de la coupe par EDM pour les échantillons 5X (127 mm d'épaisseur)

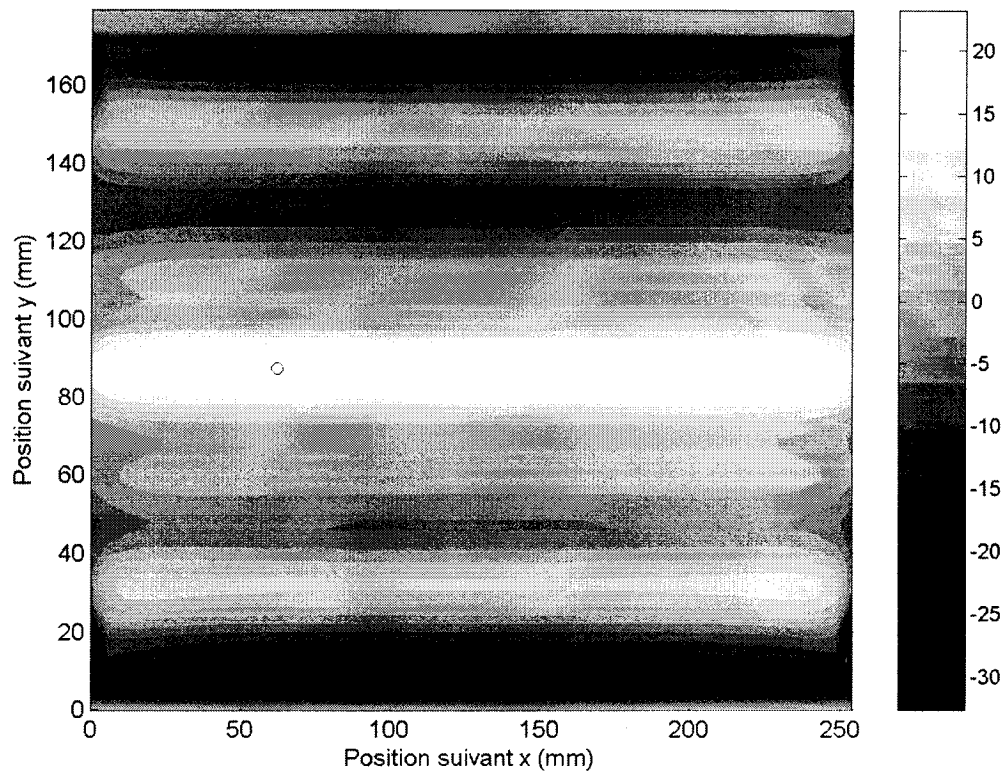


Figure 3.8 Erreur sur le profil de contraintes résiduelles causée par le profil de la coupe EDM dans un échantillon 5X (127 mm d'épaisseur)

3.3.5 Choix des éléments finis et du type de maillage

Le logiciel ANSYS 8.0 a été utilisé afin d'effectuer l'analyse par la méthode des éléments finis. Les maillages du montant et de la base ont été effectués à l'aide d'éléments en forme de briques quadratiques à 20 nœuds *Solid 95*. Ce type d'élément accepte de très grandes déformations et tolère des formes irrégulières tout en minimisant la perte de précision. Le maillage est tout d'abord effectué sur une des extrémités de la pièce à analyser puis est extrudé sur l'ensemble de la pièce. Il est raffiné à la surface coupée où les déplacements sont imposés.

Le maillage est tout d'abord contraint en deux points (voir Figure 3.9). Les déplacements du nœud 1 sont bloqués en x tandis que ceux du nœud 2 sont bloqués en x et y , contraignant ainsi les déplacements du modèle dans le plan x - y ainsi qu'autour de l'axe z . Le maillage est ensuite contraint à sa face supérieure par un champ de déplacements préalablement obtenu à l'aide du logiciel Matlab. Ces déplacements, selon l'axe z , permettent de contraindre complètement le modèle. En fonction des déplacements imposés à la face supérieure, le maillage se repositionne dans l'espace lors des calculs permettant ainsi de satisfaire les conditions d'équilibre de force et de moments pour la surface d'intérêt.

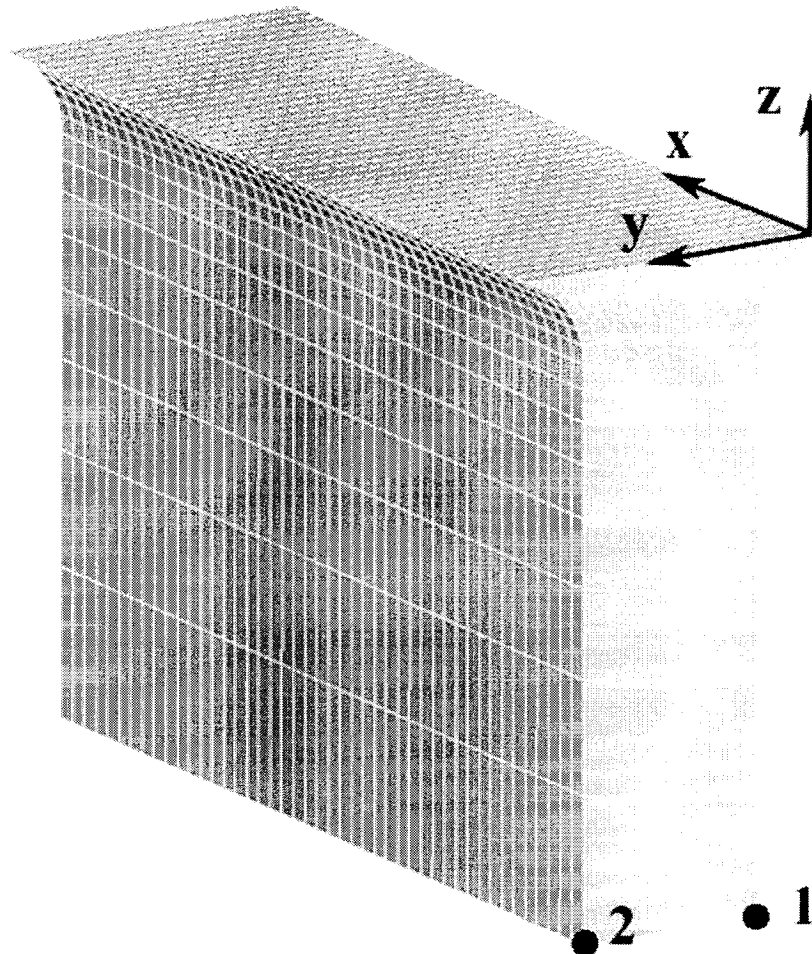


Figure 3.9 Maillage du montant 2B

Un calcul a aussi été effectué à l'aide d'un maillage raffiné afin de valider le maillage actuel. Un écart relativement faible (3,5%) a été noté entre les contraintes maximales obtenues des deux maillages pour une augmentation du nombre d'éléments à la surface d'intérêt de 60 %, validant ainsi l'utilisation du maillage initial.

Puisque les échantillons sont fabriqués d'un acier inoxydable, les propriétés $E = 200$ GPa et $\nu = 0,3$ sont considérées dans le modèle d'éléments finis.

3.3.6 Interpolation des déplacements aux nœuds du modèle d'éléments finis

Afin d'imposer les déplacements reliés à la relaxation des contraintes résiduelles lors de la coupe par électro-érosion, les nœuds du maillage sont exportés en format *ASCII* puis importés dans MATLAB. Pour chaque nœud correspondant à la surface coupée, la déformation à imposer au modèle d'éléments finis est interpolée linéairement selon les deux directions x et y sur la surface ajustée par MATLAB. Un fichier *ASCII* contenant la liste de commande pour attribuer ces déplacements aux nœuds du maillage est ensuite créé par MATLAB. Ce fichier permet l'application automatique des déplacements dans le modèle d'éléments finis d'ANSYS.

3.3.7 Résultats sur les contraintes résiduelles

Cette section présente les profils bidimensionnels de contraintes résiduelles σ_z évaluées à l'aide de la méthode du contour. Il faut souligner que les bandes à 0 MPa sur les graphiques correspondent à des zones où la coupe EDM n'est pas nette (voir Figure 3.3) et n'ont pas été considérées pour l'analyse des résultats. Les résultats sont affichés selon le système de coordonnées positionné par rapport à la base de l'échantillon (voir Figure 3.1). De plus, les endroits soumis à des contraintes extrêmes (σ_{z_min} , σ_{z_max}) sont indiqués sur les figures à l'aide de cercles et leurs valeurs sont relevées sous forme d'un tableau pour chaque figure.

a) Échantillons de 51 mm d'épaisseur soudés à pénétration totale

Les Figures 3.10 à 3.13 présentent les profils évalués pour deux échantillons de 51 mm d'épaisseur (*2A* : traité thermiquement ; *2B* : sans traitement thermique) soudés à pénétration totale. Pour ces échantillons, la méthode du contour a pu être appliquée au montant ainsi qu'à la base. Les Tableaux 3.3 et 3.4 rapportent les valeurs maximale et minimale de la contrainte σ_z pour la base et le montant *2A* respectivement, alors qu'aux tableaux 3.5 et 3.6, ces valeurs sont données pour la base et le montant *2B*, respectivement.

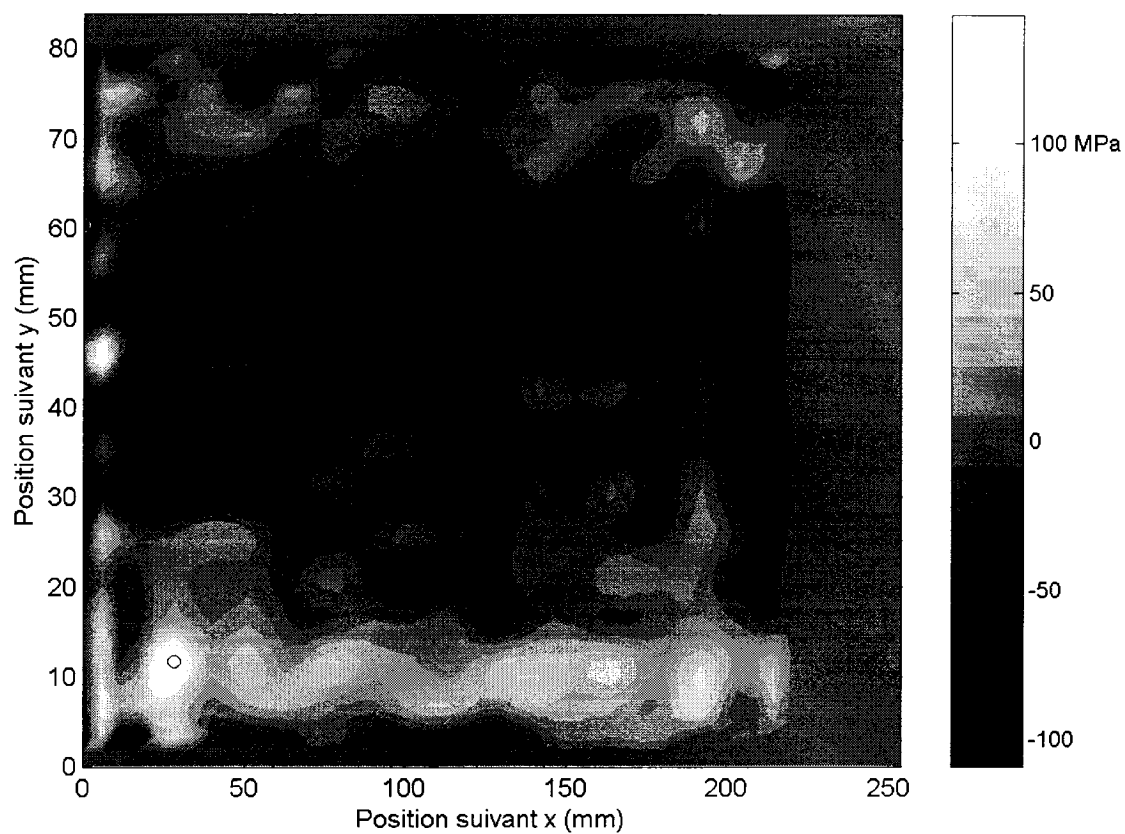


Figure 3.10 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour la base 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.3 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Base 2A

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-109	0	60
σ_{z_max}	143	28	11

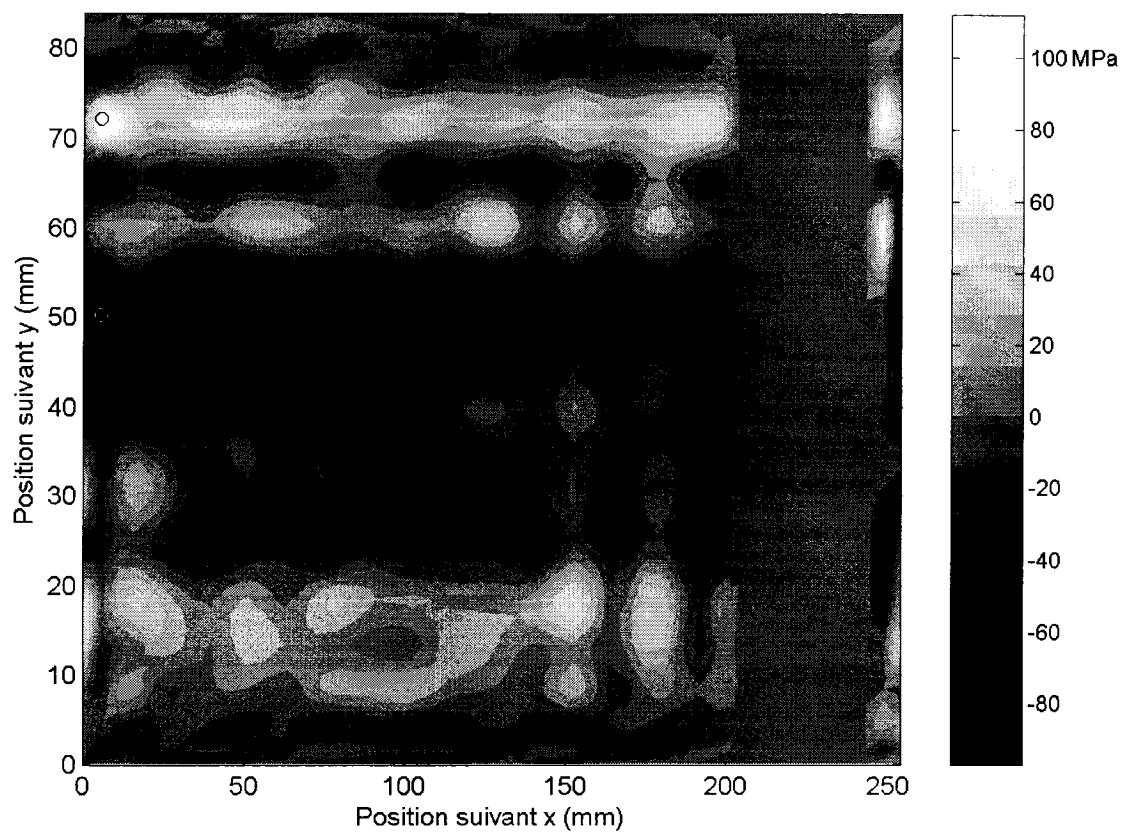


Figure 3.11 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.4 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Montant 2A

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-97	6	50
σ_{z_max}	112	5	72

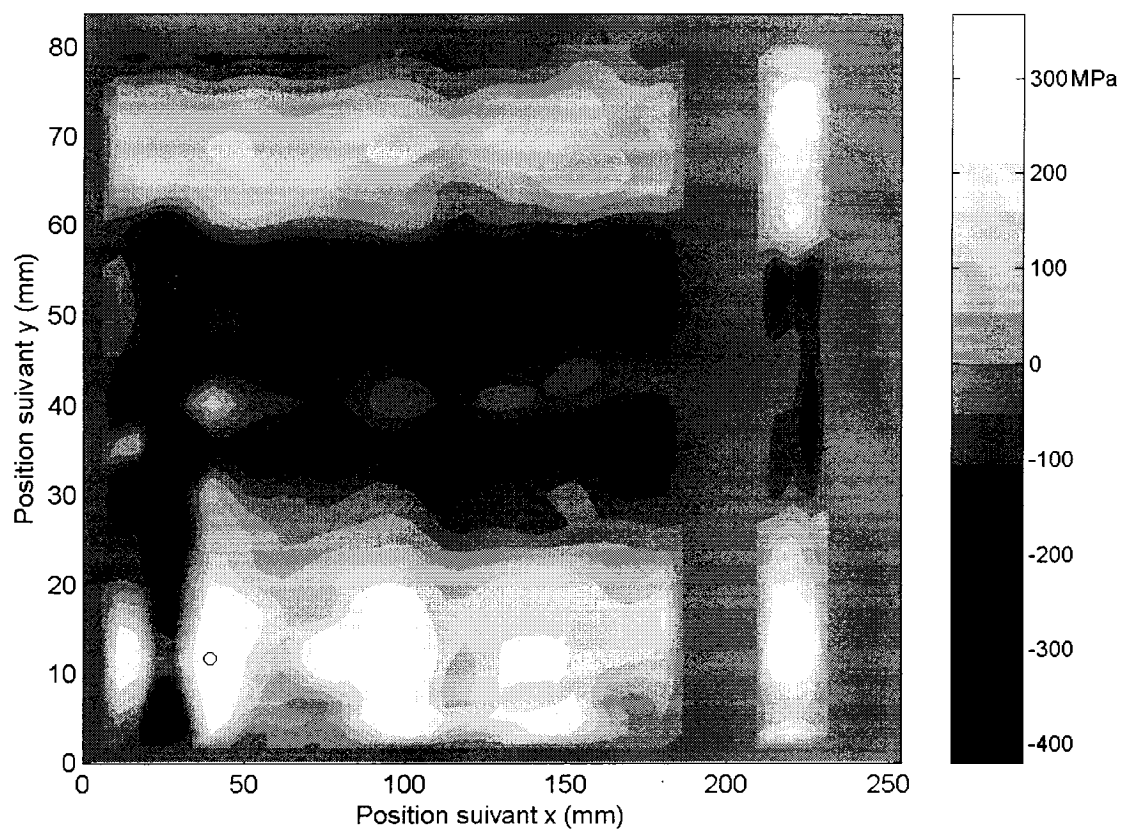


Figure 3.12 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour la base 2B ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.5 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Base 2B

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-420	28	54
σ_{z_max}	368	40	12

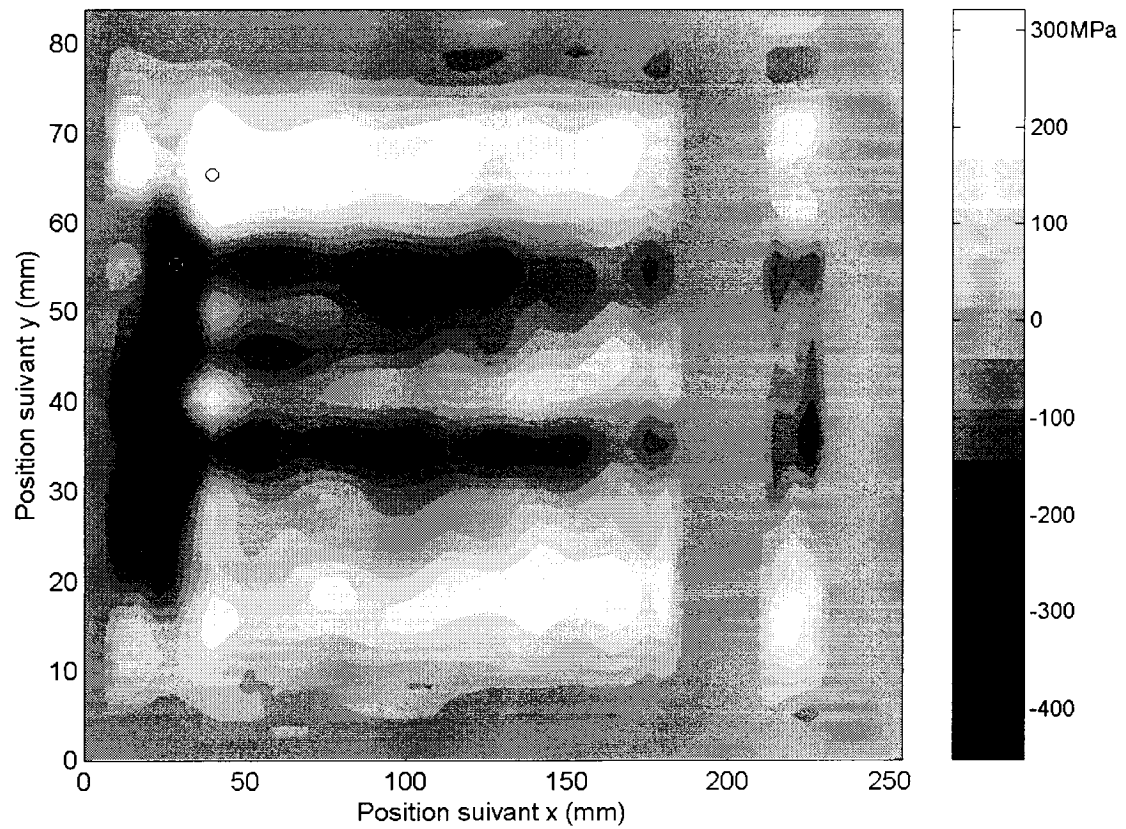


Figure 3.13 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2B ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.6 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale - Montant 2B

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-452	28	55
σ_{z_max}	321	40	65

Les profils bidimensionnels mesurés pour les échantillons à pénétration totale (2A et 2B) sont semblables. Les zones de tension et de compression sont situées aux mêmes endroits; cependant, pour un point donné, l'intensité des contraintes résiduelles

évaluée pour la base est, en général, légèrement différente de celle évaluée pour le montant. Par exemple, pour l'échantillon 2A, les contraintes extrêmes se situent, d'une part, à -109 MPa et à 143 MPa pour la base et, d'autre part, à -97 MPa et à 112 MPa pour le montant. De façon similaire, ces contraintes évaluées pour l'échantillon 2B sont de -420 MPa et 368 MPa pour la base et, aussi, de -452 MPa et 321 MPa pour le montant. L'écart entre les contraintes en un point (de la base et du montant), pouvant atteindre une valeur de l'ordre de 21 %, peut être expliqué, en partie, par le fait que ces mesures ne sont pas effectuées exactement au même endroit mais dans deux plans séparés d'environ 0,4 mm ; cette distance correspondant à la largeur du trait de coupe par électro-érosion.

Les Figures 3.14 et 3.15 représentent le profil des contraintes résiduelles σ_z en valeur moyenne sur la longueur des échantillons (axe x), dans la plage de validité des résultats, en fonction de la position relative y/C (C étant la largeur de coupe par électro-érosion). Ces graphiques facilitent la vision d'ensemble des contraintes résiduelles dans les échantillons à travers la largeur du plan de coupe. De plus, le profil moyen entre la base et le montant ont été tracés. Ce profil annule l'effet du cisaillement relâché lors de la coupe par électro-érosion.

Le profil de l'échantillon, tracé en gris dans la partie supérieure du graphique, permet de voir le lien entre la géométrie et les contraintes résiduelles mesurées.

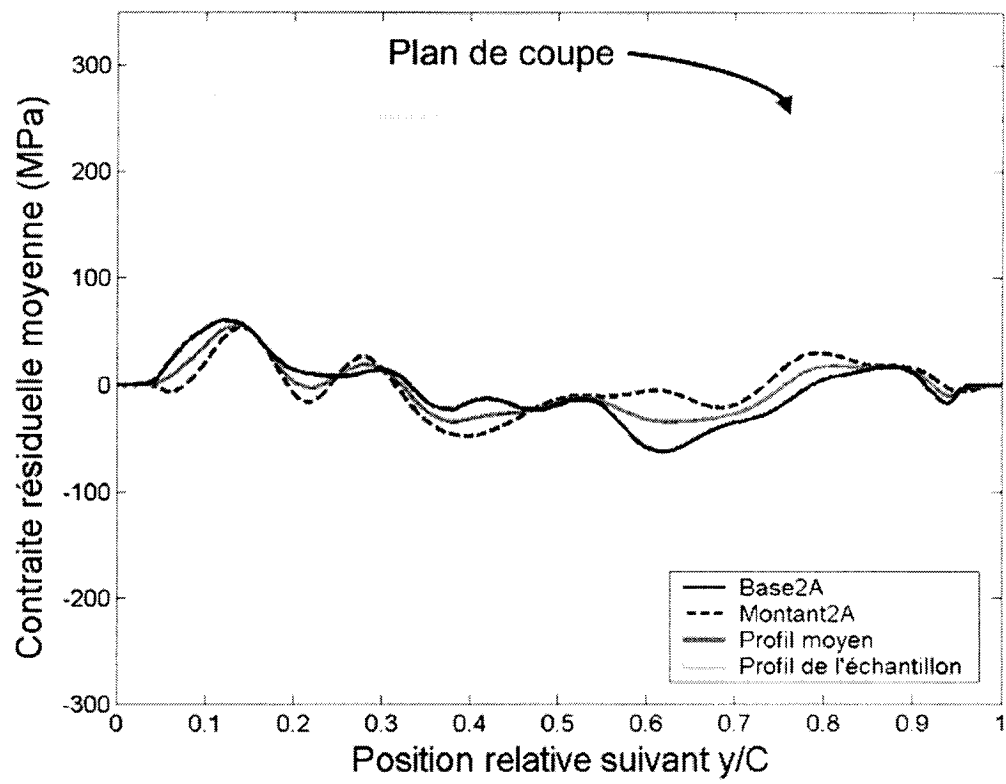


Figure 3.14 Comparaison des mesures effectuées pour la base et le montant 2A ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

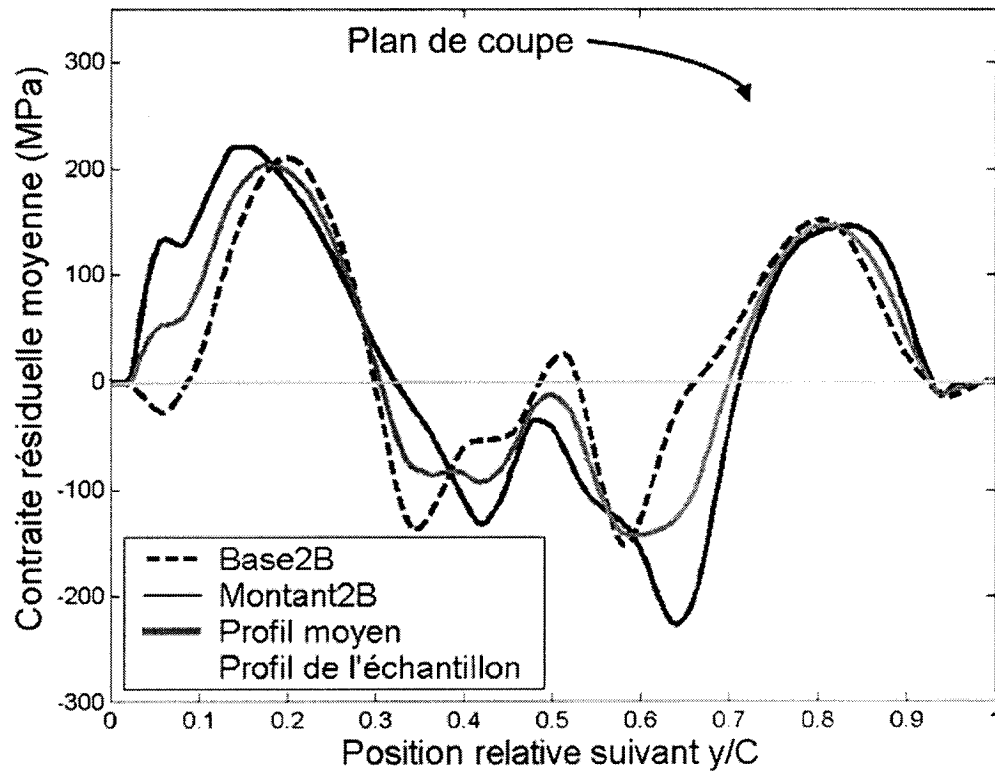


Figure 3.15 Comparaison des mesures effectuées pour la base et le montant 2B sans traitement thermique ($a/t = 0$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

On observe que le portrait global de la distribution des contraintes résiduelles mesurée sur le montant et la base d'un échantillon est sensiblement le même malgré certaines différences. Tel que discuté précédemment, les mesures ne sont pas effectuées au même endroit mais de part et d'autre du trait de coupe par EDM. Ceci peut expliquer une légère différence entre les deux profils de contraintes résiduelles évaluées. De plus, la largeur C de la zone de validité au plan de coupe (suivant y) peut être légèrement différente entre le montant et la base ayant pour effet de présenter des courbes de contraintes légèrement décalées, selon la position y/C . La principale différence entre les deux profils de contraintes résiduelles est certainement causée par l'effet du cisaillement. La courbe moyenne, tracée en gris sur les deux graphiques

précédents, représente la contrainte normale sans l'effet du cisaillement. Pour les échantillons 2A et 2B, il est possible d'observer que les profils obtenus en ne considérant pas le cisaillement sont conservateurs. En effet l'intensité maximale des contraintes, tant en tension qu'en compression, est plus grande lorsque le cisaillement n'est pas considéré. Pour l'échantillon 2A, les plus grandes contraintes en compression pour la base, le montant et le profil moyen sont respectivement de -64 MPa, -46 MPa et -35 MPa tandis que les contraintes maximales en tension sont sensiblement les mêmes. Pour l'échantillon 2B, les plus grandes contraintes en compression pour la base, le montant et le profil moyen sont respectivement de -229 MPa, -148 MPa et -145 MPa tandis que les plus grandes en tension sont de 219 MPa, 208 MPa et 201 MPa.

Les profils de contraintes résiduelles mesurées pour les échantillons 2A et 2B (échantillons de 51 mm d'épaisseur) sont semblables aux résultats rapportés dans la littérature. Le profil obtenu pour les échantillons soudés à pénétration totale se rapproche du profil des contraintes résiduelles transversales selon la position normale dans un joint soudé à passes multiples de la Figure 1.13. Les contraintes résiduelles sont essentiellement en compression au centre du joint, en tension près de la paroi puis leur l'intensité diminue en se rapprochant de la surface libre de la soudure. Tel que présenté à la Figure 1.12 pour un joint bout-à-bout, les contraintes résiduelles évaluées pour l'échantillon 2B (Figure 3.12 et Figure 3.13) sont dans un état de compression important près de l'extrémité de l'échantillon ($x = 0$ mm) puis les contraintes sont uniformes, selon la position longitudinale x pour le reste du joint soudé. Ces liens démontrent que le profil de contraintes résiduelles des joints bout-à-bout est semblable pour les joints en T. Bien sûr, l'intensité des contraintes résiduelles ne serait pas nécessairement la même mais le raisonnement sur la détermination de la position des zones en tension et en compression demeure le même pour ces deux types de joints.

Il faut souligner que dans les Figures 3.14 et 3.15, les valeurs moyennes des contraintes résiduelles ont été présentées ; elles peuvent être appréciablement différentes des valeurs locales. Par exemple, pour la base 2A (Figure 3.14) la contrainte

maximale (moyenne) est de 53 MPa par rapport à la contrainte locale maximale de 143 MPa (Tableau 3.3). La présence d'un tel maximum est probablement causée par l'effet du cisaillement qui n'a pas été considéré pour le calcul des maximums locaux. Cette contrainte serait donc surestimée.

b) Échantillons de 51 mm d'épaisseur soudés à pénétration partielle

Les Figures 3.16 et 3.17 présentent les profils évalués pour les pièces de 51 mm d'épaisseur (série 2X) soudées à pénétration partielle. Ces échantillons possèdent un rapport de pénétration partielle a/t de 0,3 et 0,6. Tel qu'expliqué précédemment, pour des échantillons à pénétration partielle, seulement les contraintes induites dans les montants ont pu être évaluées à l'aide de la méthode du contour. Tous ces échantillons ont subi un traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles identique à celui effectué sur les roues de turbines hydrauliques. Les Tableaux 3.7 et 3.8 rapportent les valeurs maximales et minimales de la contrainte σ_z pour les montants 2C et 2D respectivement.

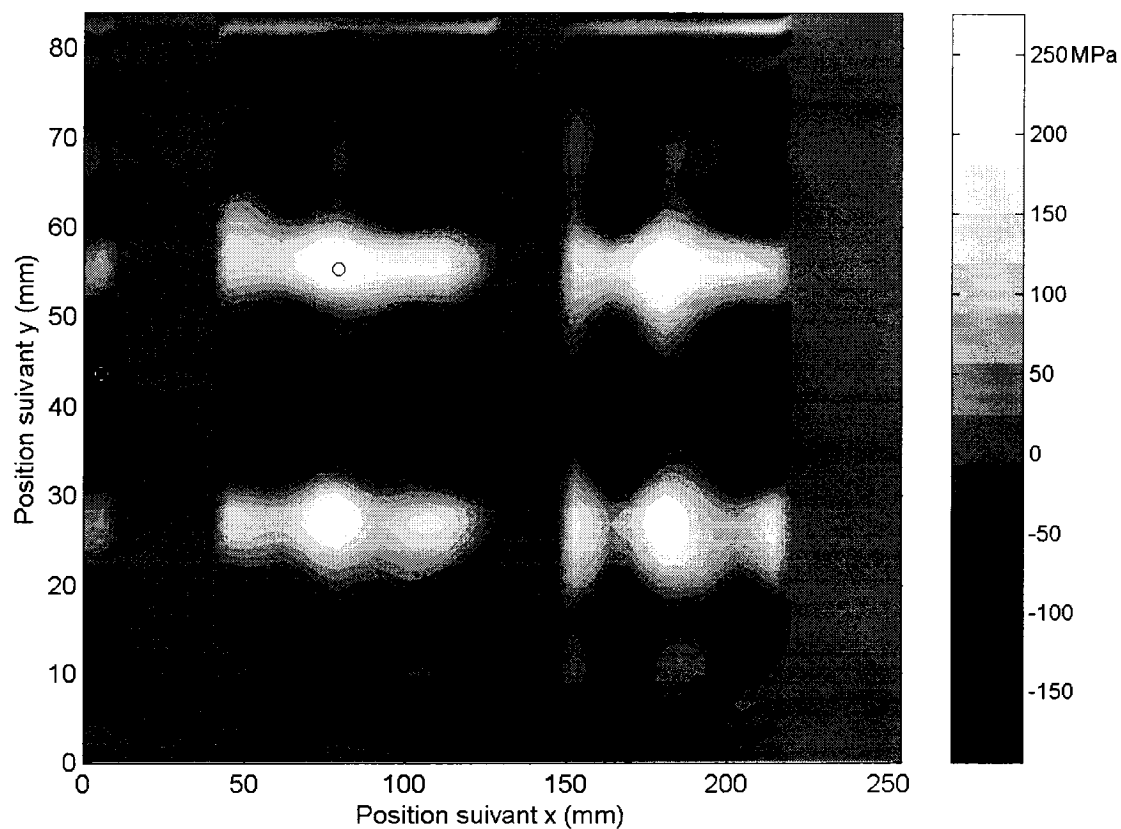


Figure 3.16 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2C ($a/t = 0,3$, $e = 1,6$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.7 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 2C

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-195	6	44
σ_{z_max}	275	79	55

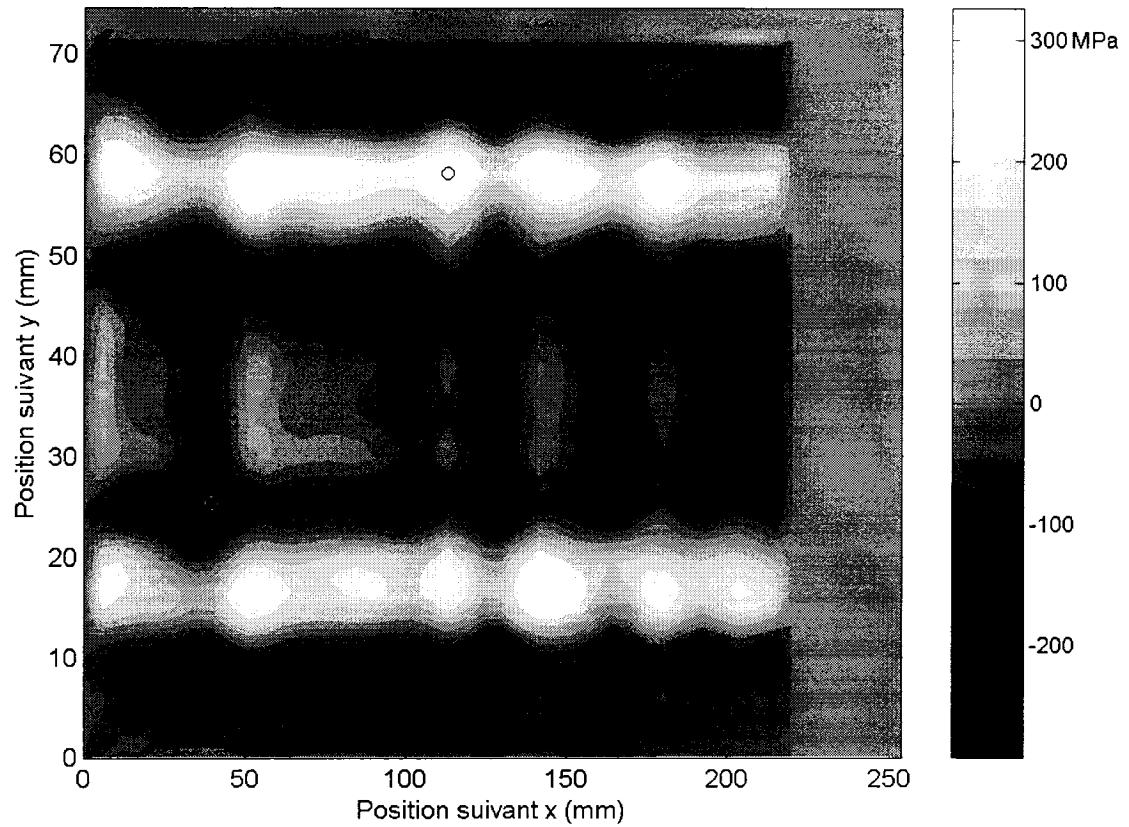


Figure 3.17 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 2D ($a/t = 0,6$, $e = 3,9$ mm et $C = 83,9$ mm)

Tableau 3.8 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 2D

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-294	40	25
σ_{z_max}	327	113	58

À la Figure 3.18, le profil de l'échantillon a été tracé en gris dans la partie supérieure et quatre petites barres verticales indiquent les limites du méplat des joints à pénétration partielle et ce, afin d'établir le lien entre la géométrie du joint soudé et le

profil de contraintes résiduelles. Ainsi, les deux barres verticales situées près du centre de l'échantillon correspondent aux arêtes d'un méplat d'une largeur $a/t = 0,3$ et les deux autres, à celui d'une largeur $a/t = 0,6$. La Figure 3.18 montre la distribution des contraintes résiduelles moyennes sur la longueur (dimension longitudinale x hors tout) des échantillons pour les deux valeurs du rapport de pénétration a/t des échantillons de 51 mm d'épaisseur ayant subi un traitement thermique de relaxation des contraintes. Dans cette figure, les données d'un échantillon soudé à pleine pénétration (montant 2A) sont également incluses pour fin de comparaison.

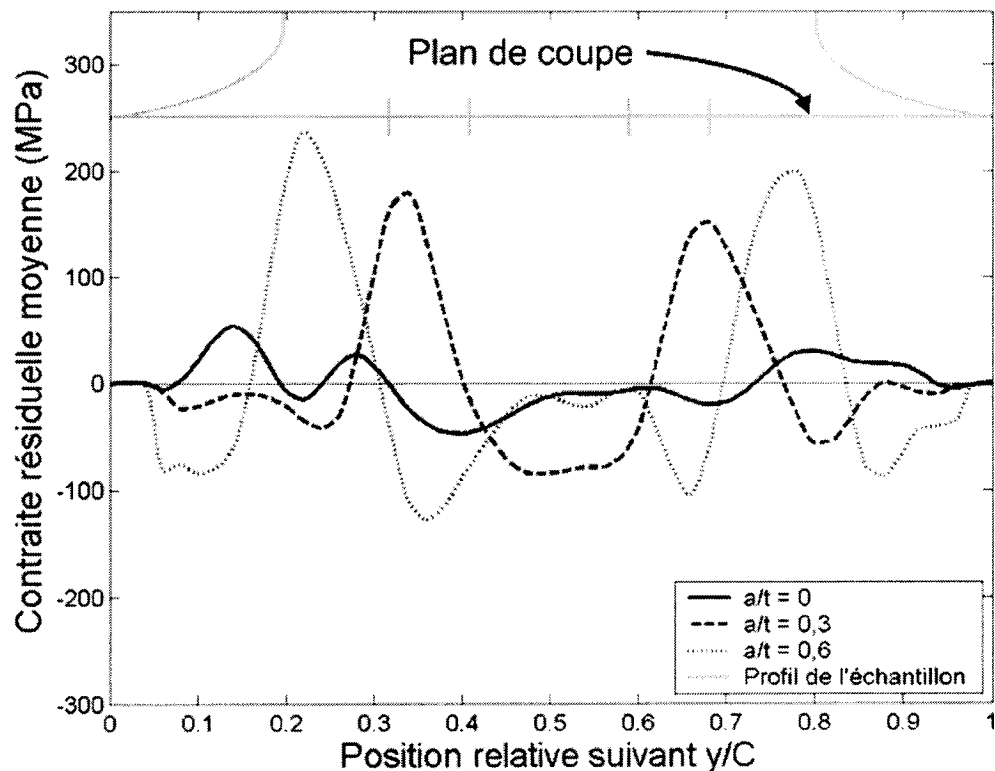


Figure 3.18 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 51 mm d'épaisseur ($C = 83,9$ mm)

En général, les contraintes résiduelles sont beaucoup plus élevées pour les pièces soudées à pénétration partielle. En effet, pour ces pièces, la valeur moyenne des

contraintes résiduelles maximales en tension sur la longueur de l'échantillon (Figure 3.18) est de 182 MPa pour un rapport $a/t = 0,3$ (échantillon 2C) et de 235 MPa pour un rapport $a/t = 0,6$ (échantillon 2D). Les zones en tension sont bien définies et sont légèrement décalées à l'extérieur du méplat pour les échantillons 2C et 2D. Ce phénomène est fort probablement causé par la modification de la position du plan de coupe, la distance e étant plus grande pour cet échantillon. Des zones, où les échantillons à pénétration partielle atteignent un état de compression maximal, sont situées de chaque côté de chacune des zones en tension. La zone du méplat est entièrement en compression.

Les contraintes maximales locales en tension présentées à la Figure 3.16 ainsi qu'à la Figure 3.17 sont toutefois beaucoup plus grandes. Elles atteignent 275 MPa pour l'échantillon 2C et 327 MPa pour l'échantillon 2D. Il est donc important de porter une attention particulière aux contraintes locales de la zone en tension, située de chaque côté du méplat dans les soudures à pénétration partielle car elles peuvent être relativement élevées. Ces zones locales dépassant 200 MPa n'excèdent toutefois pas 20 mm de largeur selon l'axe x .

c) Échantillons de 76 mm d'épaisseur soudés à pénétration partielle

Le portrait des résultats obtenus pour les échantillons de 76 mm d'épaisseur (série 3X), traités thermiquement est illustré à la Figure 3.19 et 3.20. Les Tableaux 3.9 et 3.10 rapportent les valeurs maximales et minimales de la contrainte σ_z pour les montants 3A et 3B respectivement.

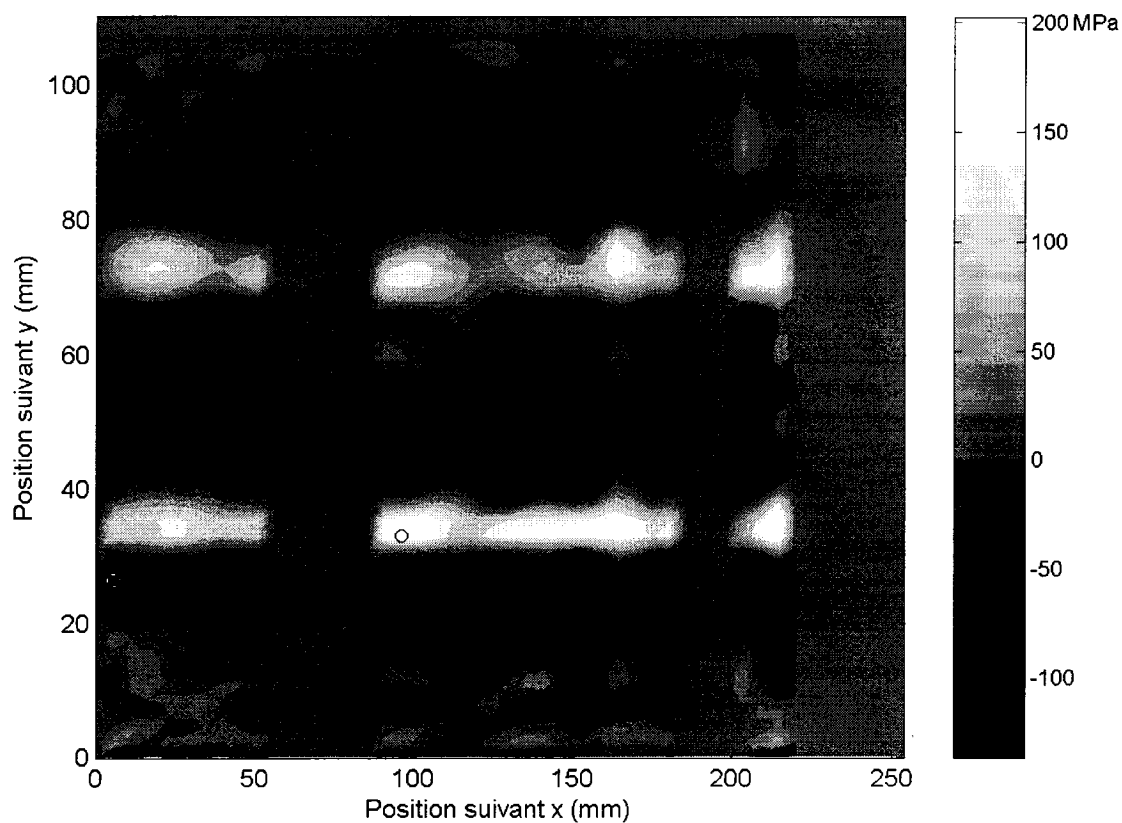


Figure 3.19 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 3A ($a/t = 0,3$, $e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm)

Tableau 3.9 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 3A

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-136	6	27
σ_{z_max}	203	96	33

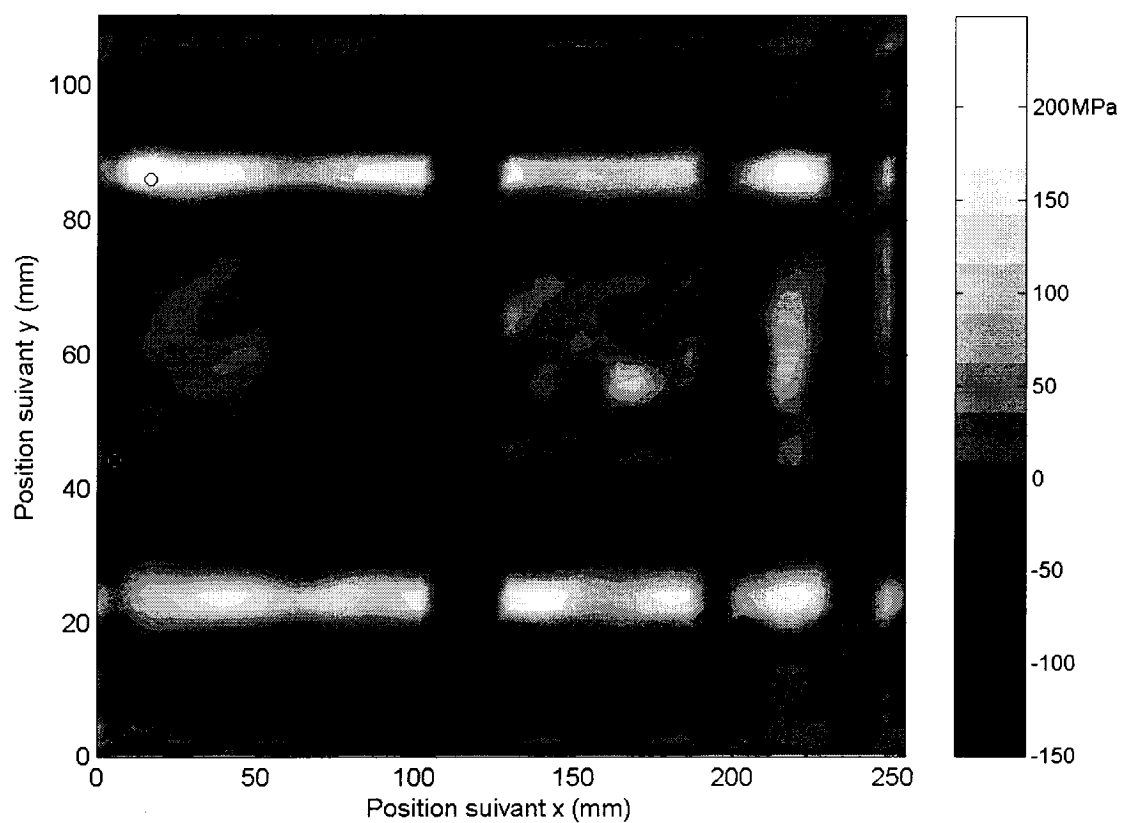


Figure 3.20 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 3B ($a/t = 0,6$, $e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm)

Tableau 3.10 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 3B

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
$\sigma_{z \min}$	-150	6	44
$\sigma_{z \max}$	249	17	86

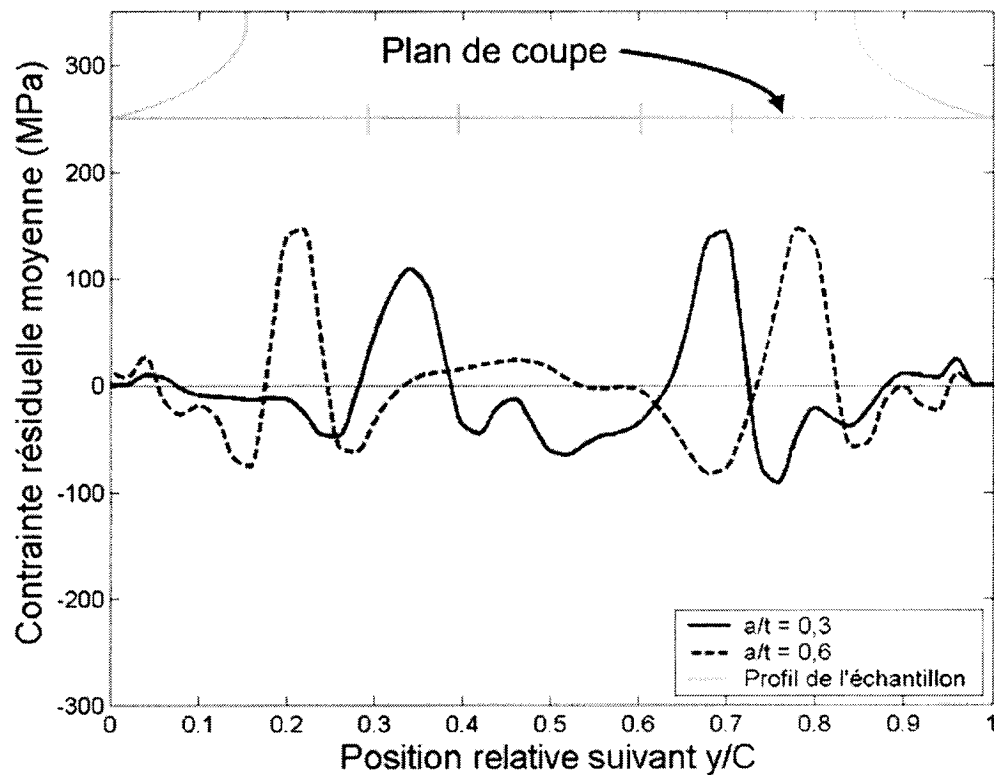


Figure 3.21 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 76 mm d'épaisseur ($e = 6,4$ mm et $C = 110,3$ mm)

La Figure 3.21 illustre les profils de la valeur moyenne des contraintes résiduelles sur la longueur de l'échantillon pour les échantillons de 76 mm d'épaisseur, soudés à pénétration partielle ; ils sont très similaires à ceux observés dans les échantillons de 51 mm d'épaisseur. Les contraintes maximales sont toutefois légèrement moindres, soit d'environ 160 MPa (Figure 3.21). Cette différence est aussi notée pour les contraintes maximales locales en tension qui atteignent 203 MPa (Tableau 3.9) pour l'échantillon 3A et 249 MPa pour l'échantillon 3B (Tableau 3.10) pour une très petite zone tout près de l'extrémité. Ces maximums locaux sont d'environ 75 MPa inférieurs à ceux mesurés sur les montants 2C et 2D (échantillons de 51 mm d'épaisseur).

Les zones en tension ne commencent pas exactement à la fin du méplat mais légèrement à l'extérieur tel que remarqué pour l'échantillon 2D. Ce phénomène est plus marqué pour les échantillons de la série 3X car la distance e du plan de coupe était encore plus grande. Plus la distance e est grande, moins la zone soudée est large (voir Figure 2.18).

Un phénomène inattendu s'est produit pour l'échantillon 3B ($a/t = 0,6$). Des contraintes résiduelles légèrement en tension sont mesurées dans la zone du méplat. Une telle contrainte ne peut toutefois pas exister au niveau du méplat, dans la direction perpendiculaire à ce dernier, car rien ne lie à cet endroit, le montant à la base. Le plan de coupe avait toutefois été éloigné de 6,35 mm du méplat afin de contourner le problème du laitier. Il est donc possible qu'il y ait une légère contrainte normale au plan de coupe. De plus, il peut s'agir d'une erreur causée par la présence du cisaillement qui n'a pu être mesuré par la méthode du contour. Il est à noter que, si un tel phénomène fausse les données au centre de cette pièce, il est probable que toutes les autres contraintes résiduelles évaluées à l'aide de la méthode du contour aient aussi été influencées par une telle réorganisation.

d) Échantillons de 127 mm d'épaisseur soudés à pénétration partielle

Les Figures 3.22 et 3.23 présentent les résultats obtenus pour les échantillons de 127 mm d'épaisseur (série 5X), traités thermiquement. Les Tableaux 3.11 et 3.12 rapportent les valeurs maximales et minimales de la contrainte σ_z pour les montants 5A et 5B respectivement.

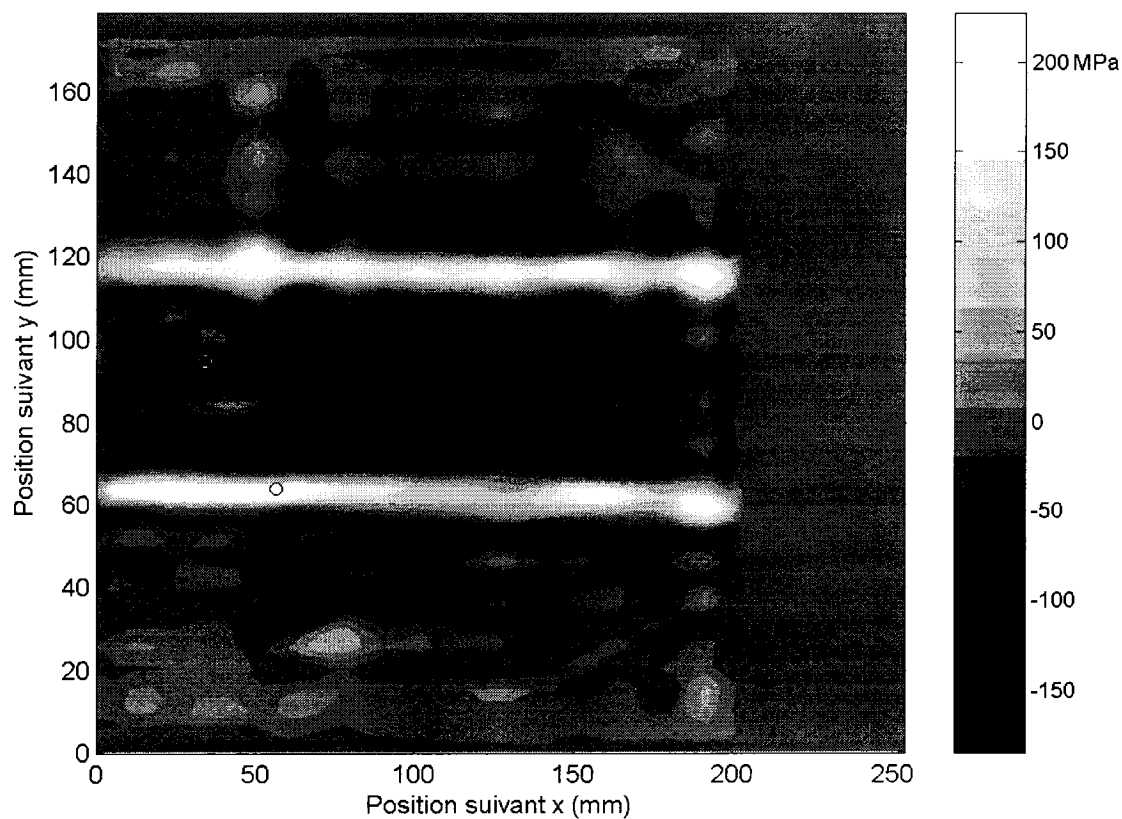


Figure 3.22 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 5A ($a/t = 0,3$, $e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm)

Tableau 3.11 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 5A

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-185	34	95
σ_{z_max}	228	56	64

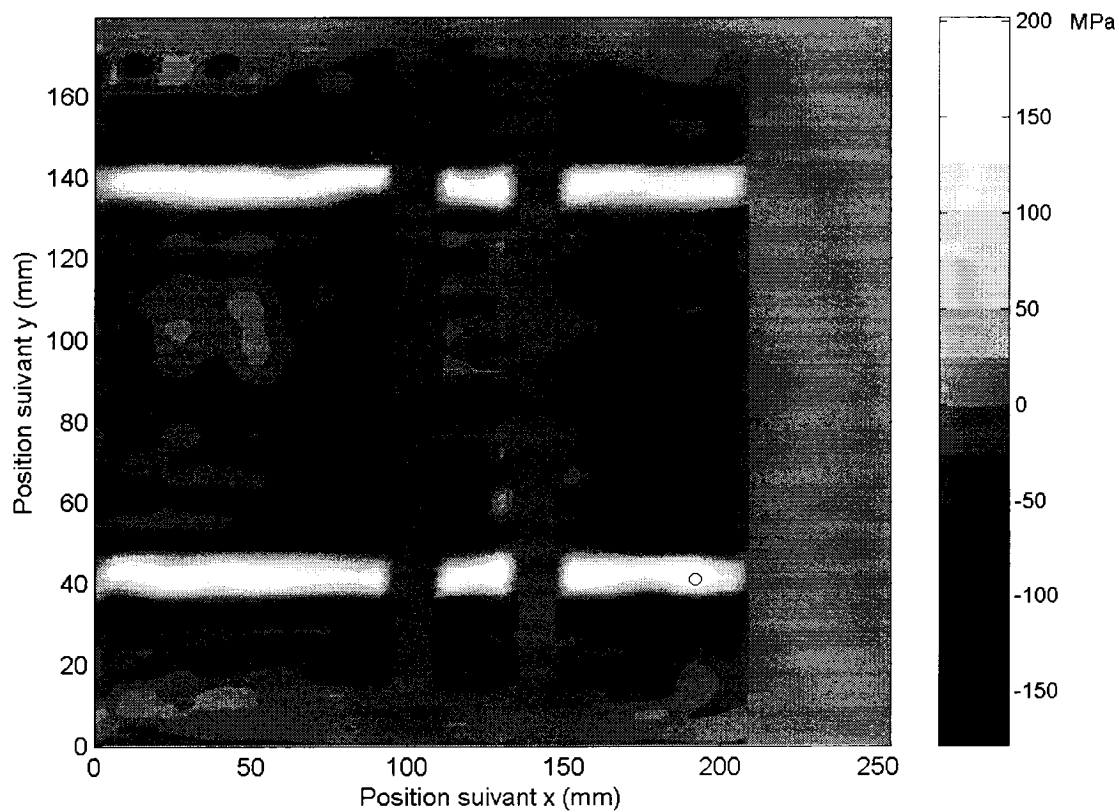


Figure 3.23 Profil bidimensionnel des contraintes résiduelles pour le montant 5B ($a/t = 0,6$, $e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm)

Tableau 3.12 Contrainte résiduelle σ_z maximale et minimale – Montant 5B

	Contrainte (MPa)	Position suivant x (mm)	Position suivant y (mm)
σ_{z_min}	-178	90	146
σ_{z_max}	202	192	41

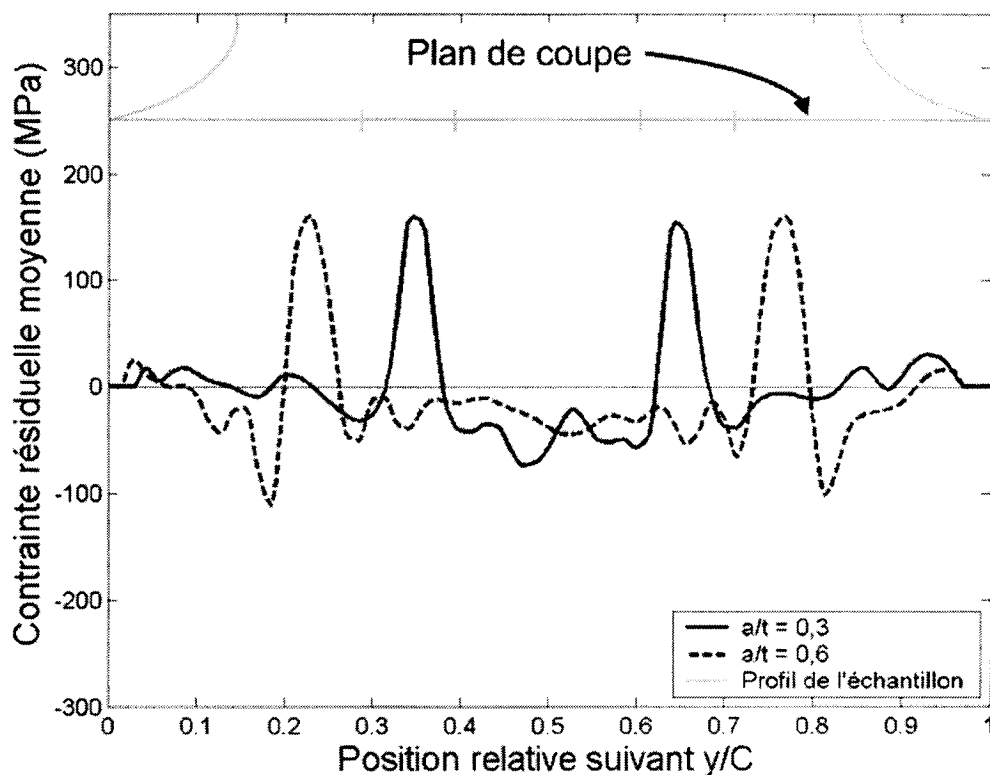


Figure 3.24 Effet du rapport de pénétration partielle a/t pour des échantillons de 127 mm d'épaisseur ($e = 6,4$ mm et $C = 179,4$ mm)

La Figure 3.24 illustre les profils de la moyenne des contraintes résiduelles sur la longueur de l'échantillon pour les échantillons de 127 mm d'épaisseur soudés à pénétration partielle ; ils sont très similaires à ceux observés dans les échantillons de 76 mm d'épaisseur à l'exception du cas de contraintes en tension au centre de l'échantillon 3B (76 mm d'épaisseur ; $a/t = 0,6$). La contrainte maximale est d'environ 15 MPa supérieure à celle évaluée pour les échantillons de 76 mm. Les contraintes maximales locales en tension, pour les échantillons de 127 mm d'épaisseur, atteignent 228 MPa pour l'échantillon 5A (Tableau 3.11) et 202 MPa pour l'échantillon 5B (Tableau 3.12). Les contraintes résiduelles évaluées dans la zone du méplat sont en compression, tel qu'observé pour les échantillons 2C, 2D et 3A.

La largeur des zones principalement en tension de chaque côté du méplat est similaire pour tous les échantillons des séries 2X, 3X et 5X soudés à pénétration partielle. La largeur de ces zones selon l'axe y varie entre 8 et 12 mm.

e) Influence de l'épaisseur de l'échantillon et de la largeur du méplat sur les contraintes résiduelles extrêmes

La Figure 3.25 présente les valeurs extrêmes en tension et en compression des contraintes résiduelles (σ_z) moyennes (en se basant sur la longueur des échantillons), mesurées par la méthode du contour, en fonction de la largeur adimensionnelle du méplat de l'échantillon (a/t).

(i) L'analyse des contraintes maximales montre que la contrainte de la série d'échantillons 2X augmente avec l'augmentation de la largeur du méplat. En effet, elle est égale à 53 MPa pour une soudure à pénétration totale ($a/t = 0$) et à 235 MPa pour une soudure à faible pénétration ($a/t = 0,6$). Pour les séries 3X et 5X, les contraintes maximales restent sensiblement les mêmes (environ 160 MPa) pour les deux largeurs du méplat considérées et elles sont proches de la valeur correspondant à $a/t = 0,3$ pour la série 2X. Pour cette dernière valeur du méplat, l'écart entre la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible est de 27 MPa, soit de l'ordre de 14 %.

(ii) Concernant les contraintes minimales, la contrainte pour l'échantillon 2X augmente également en intensité avec l'augmentation de la largeur du méplat, soit de -47 MPa pour $a/t = 0$, à -126 MPa pour $a/t = 0,6$. Pour les deux autres séries 3X et 5X, la tendance de variation de ces contraintes n'est pas bien définie; cependant, on peut noter qu'elles sont sensiblement les mêmes pour les deux dernières valeurs de a/t et elles sont proches de la contrainte correspondant à $a/t = 0,3$ pour la série 2X, soit d'environ -84 MPa.

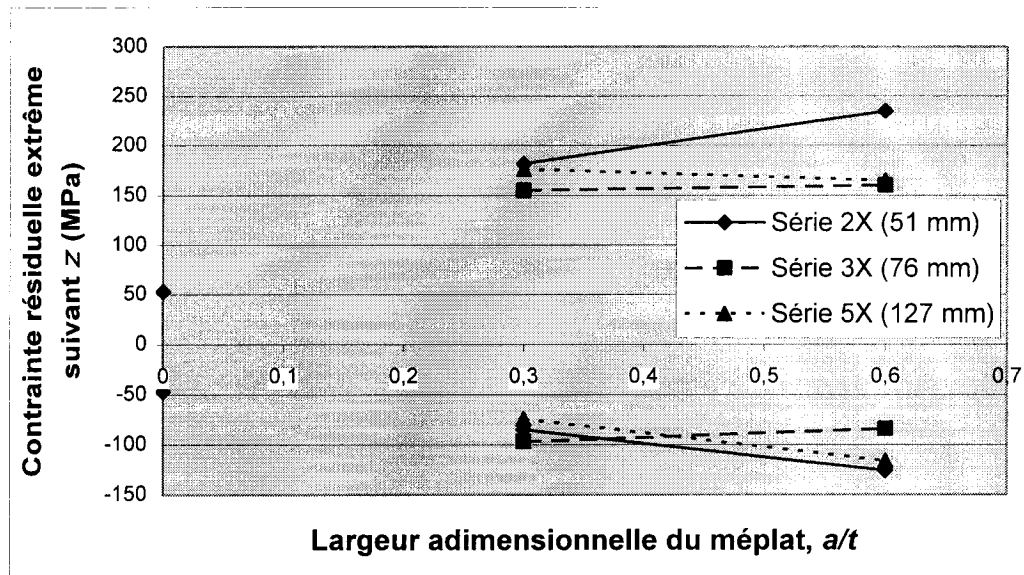


Figure 3.25 Valeurs extrêmes de la moyenne des contraintes résiduelles normales (σ_z) sur la longueur des échantillons

(iii) En général, la valeur des contraintes résiduelles extrêmes (σ_z), soit en tension soit en compression, est légèrement différente pour les séries d'échantillons ayant un rapport $a/t = 0,3$. Cette différence est plus marquée pour le rapport $a/t = 0,6$. Les résultats obtenus n'indiquent pas de relations entre le rapport a/t , l'épaisseur de l'échantillon et les contraintes résiduelles extrêmes mesurées pour les échantillons soudés à pénétration partielle. Les valeurs extrêmes de la pièce soudée à pénétration totale sont toutefois beaucoup plus faibles que celle des échantillons soudés à pénétration partielle. Une hypothèse sur ce résultat est formulée à la section 3.4.1.

Étant donné une certaine incertitude dans les évaluations des contraintes résiduelles, d'une part, et le faible nombre de mesures dans différentes configurations de joints soudés, d'autre part, une analyse rigoureuse des résultats expérimentaux ne peut être effectuée pour tirer une conclusion juste sur l'influence de l'épaisseur de l'échantillon et de la largeur du méplat sur les contraintes résiduelles. D'autres facteurs n'ayant pas été considérés jusqu'ici peuvent influencer la création des contraintes résiduelles ; ces facteurs sont principalement le nombre de passes de soudure dans le

joint, l'ordre dans lequel les passes de soudure ont été effectuées et la vitesse d'avance de la soudure qui n'est pas constante car les joints ont été soudés à la main, par différents soudeurs.

Il est important de souligner que, pour les échantillons de 51 mm d'épaisseur (série 2X), les contraintes résiduelles ont été mesurées sur un plan de coupe situé à un niveau légèrement différent de celui des autres séries (soudure à pénétration partielle). Cette situation sera discutée à la section 3.4.1.

f) Effet du traitement thermique sur la relaxation des contraintes résiduelles

La Figure 3.26 illustre la distribution des contraintes résiduelles moyennes, sur la longueur de l'échantillon, pour deux échantillons de 51 mm d'épaisseur (série 2X) soudés à pénétration totale, l'un étant traité thermiquement et l'autre ne l'étant pas. Ces résultats obtenus pour les montants 2A et 2B montre bien l'effet bénéfique du traitement thermique sur ces joints soudés. La valeur maximale de la moyenne des contraintes résiduelles sur la longueur de l'échantillon a diminué d'environ 150 MPa sous l'effet du traitement thermique, autant en tension qu'en compression. Les traitements thermiques sont donc une méthode très efficace permettant de diminuer les contraintes résiduelles présentes dans ce type de joint. De plus, les contraintes résiduelles maximales mesurées localement sont passées de 368 MPa à 143 MPa, soit une réduction de 60 %.

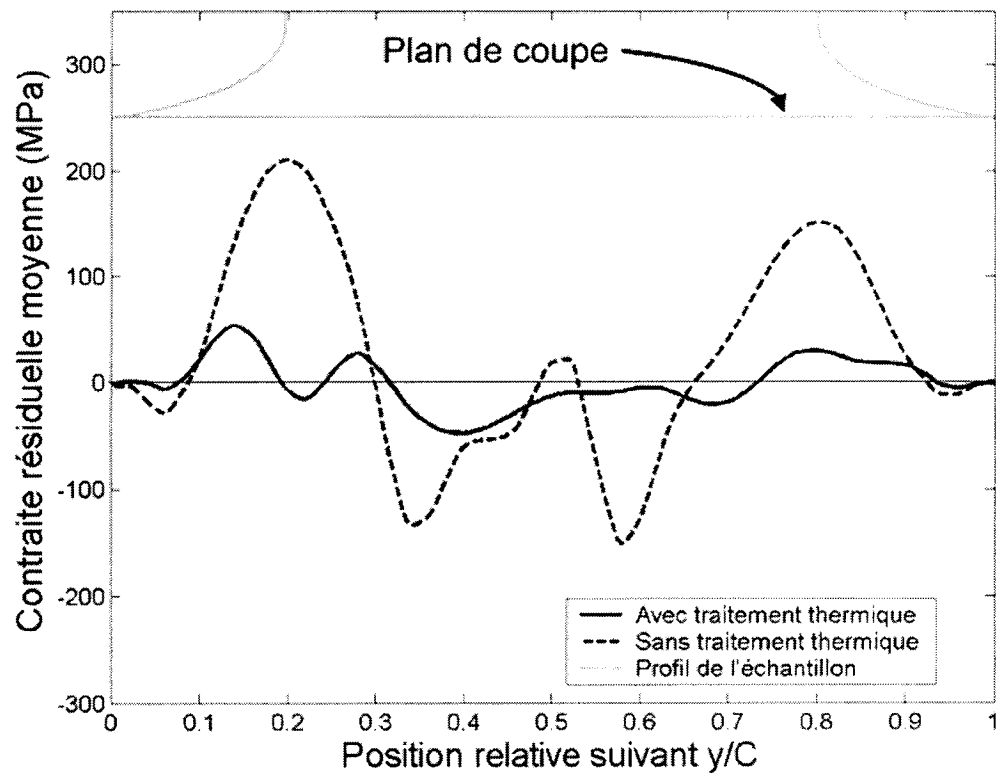


Figure 3.26 Effet du traitement thermique sur un échantillon de 51 mm d'épaisseur, soudé à pleine pénétration ($e = 1,6$ mm $C = 83,9$ mm)

3.4 Discussion

Dans cette section, les caractéristiques importantes sur les champs de contraintes résiduelles évaluées à l'aide de la méthode du contour sont discutées ; une comparaison est établie entre ces résultats et ceux obtenus par la méthode du trou, dans le plan de coupe EDM, et par les jauges d'extensométrie.

3.4.1 Profil des contraintes résiduelles dans les joints soudés à pénétration partielle

Pour tous les échantillons soudés à pénétration partielle, la position des zones soumises à des contraintes en tension relativement élevées est située légèrement à l'extérieur du méplat et ce, peu importe les paramètres de la géométrie de l'échantillon. Ces zones en tension, ayant entre 8 et 12 mm de largeur (selon l'axe y), correspondent aux premières passes de soudure en acier inoxydable austénitique tandis que le reste du joint soudé est composé d'un acier inoxydable martensitique. Cette zone de grandes contraintes en tension est fort probablement causée par la différence du coefficient d'expansion thermique entre les deux alliages soumis à un changement de température. Ce coefficient est beaucoup plus élevé pour l'alliage austénitique (voir Tableau 3.13). Lors du traitement thermique, l'échantillon est maintenu à une température uniforme, les contraintes résiduelles se relâchent alors pour l'ensemble de l'échantillon. Lorsque la température diminue, l'alliage austénitique cherche à se contracter plus que l'alliage martensitique, créant ainsi des contraintes résiduelles en tension dans la zone soudée austénitique et des contraintes résiduelles en compression de part et d'autre de cette zone. Cette hypothèse explique très bien la présence de grandes contraintes résiduelles dans les joints soudés à pénétration partielle, malgré le fait que les joints soudés à pénétration totale soient peu contraints.

Tableau 3.13 Coefficient d'expansion thermique pour les deux alliages composant les joints soudés

	Alliage martensitique (($\mu\text{m}/\text{m}$)/°C)	Alliage austénitique (($\mu\text{m}/\text{m}$)/°C)	Différence (%)
Température ambiante	9,9	16	61
Température du traitement thermique	11,5	19,5	70

3.4.2 Contraintes résiduelles près de la surface des congés de soudure

Pour des positions près de la surface ($y/C \approx 0$ et $y/C \approx 1$), le plan d'intérêt devient presque tangent aux congés de soudures. Les contraintes résiduelles perpendiculaires au plan de coupe (σ_z) sont donc presque normales à la surface libre du congé. À la surface libre d'une pièce, la contrainte perpendiculaire à la paroi étant nulle, tout comme les mesures effectuées dans les joints soudés à l'aide de la méthode du contour, les résultats obtenus sont donc cohérents. Cette observation est un repère, prouvant la validité de la méthode du contour.

3.4.3 Influence de la position du plan de coupe

Les contraintes résiduelles évaluées σ_z après le traitement thermique pour les séries 3X et 5X (76 mm et 127 mm d'épaisseur) sont plus faibles que celles de la série 2X (51 mm d'épaisseur). Cette différence peut être partiellement attribuable à la modification de la distance e entre le plan de coupe et la base de l'échantillon. À cause du problème de laitier lors de la coupe des échantillons de la série 2X, cette distance a été augmentée afin de contourner le problème.

Pour qu'une comparaison puisse être établie entre les contraintes résiduelles mesurées dans les différents échantillons, le niveau du plan de coupe doit être maintenu inchangé pour tous les échantillons.

3.4.4 Comparaison entre les contraintes évaluées à l'aide de la méthode du contour et celles évaluées à l'aide de jauges d'extensométrie

Tel que présenté précédemment, des jauges d'extensométrie ont permis d'évaluer la relaxation des contraintes résiduelles à l'extrémité de l'échantillon 2B (à $x = 0$ mm) lors de la coupe par électro-érosion. Ces résultats sont présentés à la Figure 3.2. Le profil de contraintes résiduelles ainsi obtenu corrobore bien avec celui des

contraintes résiduelles évaluées à l'aide de la méthode du contour. Ces mesures ont montré un état de contraintes résiduelles en compression au centre de la pièce. En se rapprochant de la coordonnée $y = 0$, la contrainte augmente substantiellement en intensité avant de changer rapidement à un état de tension. Ce profil est similaire aux courbes obtenues aux Figures 3.12, 3.13 et 3.15.

L'intensité des contraintes résiduelles mesurées par la méthode des jauges est aussi en bon accord avec les résultats obtenus par la méthode du contour. En fait, les contraintes maximales de 200 MPa en tension et de 325 MPa en compression, évaluées à l'aide de la première méthode, ne sont que légèrement inférieures à celles évaluées à l'aide de la deuxième méthode. L'intensité des contraintes résiduelles près de la surface $x = 0$ mm, mesurées par la méthode du contour est plus élevée d'environ 50 MPa que celle évaluée à l'aide des jauges. Cette différence peut être parfaitement expliquée par la distance à laquelle les déformations causées par le relâchement des contraintes résiduelles pendant la découpe ont été enregistrées par les jauges d'extensométrie.

3.4.5 Comparaison des résultats obtenus par la méthode du contour et par la méthode du trou

La comparaison entre les contraintes résiduelles obtenues à l'aide de la méthode du trou et celles mesurées par la méthode du contour, pour les faces correspondantes au plan $x = 0$, s'avère difficile car les profils de contraintes résiduelles varient énormément près de l'extrémité des échantillons. De plus, d'autres facteurs rendent la tâche ardue : d'une part, la méthode du contour ne permet pas de mesurer les contraintes résiduelles au bord de la pièce, et d'autre part, les contraintes résiduelles évaluées par la méthode du trou ont été relaxées par le perçage du trou. Par ailleurs, les mesures par la méthode du trou n'ont pas toutes été effectuées dans le plan de coupe par électro-érosion. Le problème de coupe causé par le laitier n'ayant pas été décelé avant les mesures, ces dernières ont été effectuées à 2,27 mm au-dessous du plan de

coupe pour l'échantillon 2D et à 3,35 mm au-dessous du plan de coupe pour les échantillons des séries 3X et 5X.

De plus, les contraintes évaluées à l'aide de la méthode du trou, dans le plan de coupe par électro-érosion, ne sont pas très précises. L'erreur provient du gradient du champ de contraintes résiduelles en profondeur. Les valeurs obtenues par cette méthode donnent toutefois un ordre de grandeur des contraintes présentes à la surface du joint. Il est donc plausible de constater une différence substantielle entre les contraintes obtenues de ces deux méthodes de mesure.

Le Tableau 3.14 présente les contraintes résiduelles suivant la direction z évaluées par la méthode du trou (σ_{z_trou}) ainsi que la plage de contraintes résiduelles évaluées par la méthode du contour ($\sigma_{min_contour}$ à $\sigma_{max_contour}$) dans la zone percée. Les points de mesure pour lesquels la contrainte résiduelle évaluée à l'aide de la méthode du trou est à l'intérieur de la plage de contraintes évaluées par la méthode du contour sont surlignés en gris pâle. Seulement le tiers des mesures effectuées par la méthode du trou sont incluses dans cette plage, ce qui montre un faible lien entre les résultats obtenus par ces deux méthodes.

Tableau 3.14 Contraintes résiduelles évaluées en surface par la méthode du trou comparées aux contraintes résiduelles évaluées par la méthode du contour.

Échantillon	y (mm)	e (mm)	σ_{z_trou} (MPa)	$\sigma_{min_contour}$ (MPa)	$\sigma_{max_contour}$ (MPa)
2A	63	1,6	62	-110	40
	42		90	-75	130
	28		145	-50	100
	14		166	25	80
2C	63	1,6	-187	-115	20
	42		-151	-170	-20
	21		-219	-60	50
2D	63	1,6	5	0	100
	38		-45	0	100
	17		245	0	200
3A	90	3,0	58	-25	25
	55		-27	-50	0
3B	90	3,0	-30	0	75
	55		2	-50	0
5A	140	3,0	-59	-50	0
	90		-142	-100	-20

3.4.6 Variation des contraintes résiduelles normales (σ_z) et transversales (σ_y)

Pour les joints soudés en T, les profils de contraintes résiduelles normale (σ_z) mesurées par la méthode du contour, le long de la position transversale y dans le plan de coupe sont similaires à la variation de la contrainte résiduelle transversale en fonction de la position transversale mesurée par Teng et al (2001) à la Figure 1.18. Ces contraintes sont pratiquement nulles ou en compression au centre de l'échantillon puis augmentent rapidement pour devenir en état de tension et tendre vers zéro. Il semble

donc que la tendance de variation des contraintes résiduelles dans une soudure soit sensiblement la même dans les directions normale z et transversale y .

3.4.7 Imprécision de la méthode du contour

La présence de certains petits défauts de soudure et surtout de laitier a altéré la surface de la coupe par électro-érosion pour plusieurs échantillons, forçant alors la suppression de plusieurs passes de mesure. Dû à ces modifications, plusieurs passes n'ont pu être considérées lors des calculs et ont dû être remplacées par des interpolations, diminuant ainsi la précision pour certaines mesures. Ces manipulations ont dû être effectuées manuellement, rendant le traitement des données beaucoup plus long.

Le degré de précision global de la méthode du contour est très difficile à établir. Il est fonction de plusieurs facteurs : coupe par électro-érosion, impuretés, défauts, filtrage et lissage des données et, finalement, analyse par éléments finis. Par exemple, les données non conservées en dehors de la zone de validité des mesures doivent fausser légèrement les résultats dans cette zone. L'erreur qui y est associée doit toutefois être très faible puisque les contraintes résiduelles calculées pour une position y/C égale à 0 ou 1 sont presque nulles, reflétant ainsi la condition réelle de l'échantillon.

L'erreur causée par le cisaillement n'a pu être considérée pour les échantillons soudés à pénétration partielle. Il a toutefois été observé, pour les échantillons 2A et 2B, qu'il est conservateur de ne pas considérer le cisaillement. L'intensité maximale des contraintes résiduelles évaluées pour les échantillons à pénétration partielles, tant en tension qu'en compression, sont donc probablement légèrement surévaluées.

Il ne serait pas possible de quantifier d'une manière absolue l'erreur liée à cette méthode, d'autant plus que des zones de faible tension au centre de l'échantillon

3B, soudé à pénétration partielle, ont été observées et cet état n'a pu être rigoureusement expliqué. À titre d'indication, l'erreur de mesure de la CMM est d'environ $0,74 \mu\text{m}$, ce qui donne, sur les déformations maximales mesurées pour les divers échantillons, une erreur variant entre 7,5 et 10 % pour un état de contraintes en tension de 200 MPa. Ceci correspond à une erreur de 15 à 20 MPa sur les contraintes résiduelles évaluées. Les erreurs causées par le lissage des données évaluées à $\pm 5,6 \%$ (section 3.3.2) et à $\pm 3,5 \%$ par le maillage pour la méthode des éléments finis (section 3.3.5) doivent être prises en considération. L'erreur sur les contraintes résiduelles mesurées serait donc de l'ordre de 9,1 % de la contrainte évaluée, en plus d'une valeur de 15 à 20 MPa reliée à la précision de la mesure, ce qui donne une erreur maximale d'environ $\pm 38 \text{ MPa}$ pour une pièce soumise à une contrainte de 200 MPa en tension. Cette erreur ne considère toutefois pas l'effet du cisaillement qui ne peut être annulé pour les pièces soudées à pénétration partielle. Prime et al (2004) avaient caractérisé l'erreur attribuée à l'utilisation de la méthode du contour sur une pièce d'acier ferritique à $\pm 32 \text{ MPa}$ pour une surface de coupe mesurée à l'aide d'une CMM.

3.5 Conclusion

Les détails de calculs servant à évaluer les contraintes résiduelles à l'aide de la méthode du contour ont été présentés. Les résultats concernant les contraintes résiduelles évaluées par cette méthode ont été rapportés et discutés en relation avec les données obtenues par quelques autres techniques.

Le degré de validité des résultats obtenus par la méthode du contour semble acceptable. Les résultats obtenus par la méthode des jauges d'extensométrie pendant la coupe par EDM sont semblables aux résultats mesurés par la méthode du contour. Les résultats obtenus par la méthode du trou sont toutefois difficiles à comparer à ceux obtenus par la méthode du contour.

L'évaluation des contraintes résiduelles à l'aide de la méthode du contour a démontré que les contraintes maximales, après un traitement thermique, étaient plus élevées pour les joints soudés à pénétration partielle que pour les joints soudés à pénétration totale (environ 225 %). L'intensité maximale des contraintes résiduelles moyenne sur la longueur de l'échantillon est d'environ 200 MPa pour les joints soudés à pénétration partielle comparativement à 50 MPa pour les joints soudés à pénétration totale. Il a aussi été démontré qu'un traitement thermique fait baisser en moyenne les contraintes résiduelles d'environ 150 MPa pour un échantillon de 51 mm d'épaisseur, soudé à pénétration totale.

Quoique la méthode du contour permette d'établir le portrait global des contraintes résiduelles induites dans un plan particulier, les résultats ne sont très précis. La méthode n'a pas permis de considérer l'effet du cisaillement pour les joints soudés à pénétration partielle. Il a toutefois été observé que les résultats ainsi obtenus devraient être conservateurs. L'incertitude maximale sur les résultats obtenus à l'aide des mesures effectuées par cette méthode est de l'ordre de ± 38 MPa, soit environ 8 MPa moins précise que les méthodes de diffraction. Cette méthode permet toutefois de mesurer des contraintes en profondeur, ce qui est impossible avec les méthodes de mesures conventionnelles.

Pour tous les échantillons soudés à pénétration partielle, les zones de fortes contraintes en tension sont situées légèrement à l'extérieur du méplat non soudé et ce, indépendamment des paramètres associés à la technique de réalisation du joint de l'échantillon. Ces zones correspondent aux deux premières couches de métal d'apport constituées d'un alliage austénitique. Le coefficient de dilatation thermique étant plus élevé pour cet alliage que pour le reste du joint soudé, des contraintes résiduelles en tension ont pu être introduites au cours du traitement thermique de relaxation.

Conclusions et recommandations

Conclusions

Dans ce projet, les travaux ont porté principalement sur la détermination des contraintes résiduelles en surface d'une roue de turbine hydraulique de type Francis soudée à pénétration partielle ainsi que sur la distribution de ces contraintes dans un échantillon ayant la configuration d'un joint soudé en T, soit à pénétration partielle, soit à pénétration totale, avec et sans traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles.

Pour la roue de turbine, la méthode du bruit de Barkhausen et la méthode du trou ont été utilisées pour évaluer les contraintes résiduelles en surface près des joints soudés. Le degré de fiabilité de la méthode du bruit de Barkhausen est médiocre par rapport à l'autre méthode pour une telle application. Les résultats obtenus par la méthode du trou ont indiqué que les contraintes résiduelles en tension près des joints soudés sont relativement faibles (moins de 80 MPa).

Pour les échantillons en T, la méthode du contour a été adoptée pour déterminer le champ des contraintes résiduelles en surface et en profondeur afin d'évaluer l'effet de l'épaisseur des plaques, de la dimension du méplat et du traitement thermique sur ces contraintes. Cette méthode a permis d'établir le profil ainsi que l'intensité des contraintes résiduelles perpendiculaires à un plan d'intérêt traversant le joint soudé. Les valeurs provenant du profil sont en bon accord avec les contraintes locales relaxées, mesurées à l'aide de jauges de déformation en bout d'échantillon pendant la coupe par électro-érosion. La concordance de ces résultats avec des mesures effectuées en bout d'échantillon à l'aide de la méthode du trou n'a toutefois pas été très bonne à cause de plusieurs facteurs tels que la faible précision de la méthode du contour près de la surface libre et la complexité d'un champ de contraintes non uniforme en surface.

Le profil et l'amplitude des contraintes résiduelles présentes dans les joints soudés à pénétration partielle ne varient que légèrement avec l'épaisseur des échantillons. Pour un joint soudé à pénétration totale (méplat d'une largeur nulle), les contraintes maximales évaluées sont très faibles (moins de 143 MPa en tension pour un échantillon de 51 mm d'épaisseur). Elles sont toutefois plus élevées pour des soudures à pénétration partielle, indépendamment de la dimension du méplat. La valeur maximale de ces contraintes est de l'ordre de 230 MPa en tension pour les échantillons de 51 mm d'épaisseur; cependant, dans certaines zones restreintes, ces contraintes sont plus élevées (327 MPa en tension).

Pour les dimensions du méplat considérées, les profils des contraintes résiduelles sont semblables. Ces contraintes sont en compression dans la zone du méplat puis deviennent en tension dans les zones adjacentes. La zone en tension est relativement restreinte, de l'ordre de 10 mm de largeur; elle correspond aux premières passes de soudure à microstructure austénitique (par rapport à la microstructure martensitique du matériau de base). En se rapprochant de la surface libre, les contraintes résiduelles tendent vers une valeur nulle. L'intensité des contraintes mesurées dans ces échantillons se situe, en général, sous 200 MPa en tension, à l'exception de certaines petites zones où les contraintes sont plus élevées.

Le traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles, effectué sur un échantillon de 51 mm d'épaisseur soudé à pénétration totale, s'est avéré efficace. Les contraintes évaluées dans un joint soudé traité thermiquement se situent dans les limites de -109 à 143 MPa en comparaison avec celles de -452 à 368 MPa pour un joint n'ayant pas subi ce traitement; ceci correspond à une relaxation des contraintes résiduelles en tension de l'ordre de 60%.

Les résultats rapportés dans ce projet permettront d'optimiser le design des joints soudés des turbines hydrauliques, au niveau de la vie en fatigue reliée à la propagation des fissures émanant du méplat du joint. Ces résultats devront toutefois

être utilisés avec précaution à cause de diverses imprécisions inhérentes de la méthode du contour.

Recommandations

Il serait très important d'évaluer les contraintes résiduelles présentes dans les joints en T dans d'autres plans de mesure. L'examen des différentes positions du plan d'intérêt permettrait de déterminer le plan critique dans lequel les contraintes résiduelles sont les plus élevées.

Puisque le traitement thermique effectué sur un joint soudé composé de matériau martensitique et austénitique ne peut faire relaxer complètement les contraintes résiduelles, il serait intéressant de mesurer ces contraintes sur un échantillon soudé à pénétration partielle sans traitement thermique. Les résultats ainsi obtenus seraient comparés à ceux rapportés dans ce projet, évaluant ainsi le degré d'efficacité du traitement thermique sur ce type de joint. Plusieurs paramètres reliés à ce traitement pourraient être considérés afin de faire un choix justifié sur une combinaison particulière de ces paramètres.

L'évaluation des contraintes résiduelles tangentes aux congés de soudure devrait également être envisagée car les résultats permettraient de raffiner les calculs de vie de fatigue en propagation reliée aux défauts à la surface du joint.

RÉFÉRENCES

- ASTM (1999). « Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method », E 837-99, 10 p.
- BS 7910:1999. (1999). « Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures (Incorporatin Amendement 1) », *British Stantard institution*.
- BUECKNER, H.F. (1958). « The Propagation of Cracks and the Energy of Elastic Deformation », *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 80, 1225-1230.
- CAO, Y.P., HU, N., LU, J., FUKUNAGA, H., YAO, Z.H. (2002). « An inverse approach for constructing the residual stress field induced by welding », *Journal of Strain Analysis*, 37, 4, 345-359.
- CHARMILLES (2004). « Charmilles Wire Products », *Agie Charmilles Group*, http://www.charmilles.com/en/prod_wire.shtml, (Page consultée le 20 novembre 2004).
- CHENG, W., FINNIE, I., GREMAUD, M., PRIME, M.B. (1994). « Measurement of Near Surface Residual Stresses Using Electric Discharge Wire Machining », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 116, 1, 1-7.
- DEWALD, A.T., HILL, M.R. (2001). « Residual stress in a thick steel weld determined using the contour method », *Report on LANL contract 32390-001-01*.
- DONG, P., ZHANG, J. (1999). « Residual stress in strength-mismatched welds and implications on fracture behavior », *Engineering Fracture Mechanics*, 64, 485–505.
- DORLOT, J-M., BAÏLON, J-P., MASOUNAVE, J. (1986). « Des Matériaux », Deuxième édition revue et augmentée, *Montréal : Éditions de l'École Polytechnique de Montréal*, 467 p.

- GERE, J.M., TIMOSHENKO, S. P. (1990). « Mechanics of Materials », 3rd edition, *Chapman & Hall*.
- HILL, M.R., LIN, W.-Y., (2002). « Residual Stress Measurement in a Ceramic-Metallic Graded Material », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 124, 185-191.
- HILL, M.R., NELSON, D.V. (1995). « The inherent strain method for residual stress determination and its application to a long welded joint », *ASME, PVP*, 318, 343-352.
- HILL, M.R., NELSON, D.V. (1996). « Determining residual stress through the thickness of a welded plate », *ASME, PVP*, 327, 343-352.
- HILL, M.R., NELSON, D.V. (1998). « The localized eigenstrain method for determination of triaxial residual stress in welds », *ASME, PVP*, 373, 397-403.
- KANDIL, F.A., LORD, J.D., GRY, A.T., GRANT, P.V. (2001). « A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection », *NPL Materials Centre, Teddington, Middlesex, UK*, 42 p.
- LANTEIGNE, J., BAILLARGEON, C., PAQUET, D. (2003). « Mesures des contraintes résiduelles sur la roue de Chute à la Savane, Unité 2 », *Institut de recherche d'Hydro Québec, IREQ-2003-162C*, 42 p.
- LEGGATT, R.H., SANDERSON, R.M. (2002). « Stress intensity factors due to standard residual stress profiles », *The Welding Institute*, 734/2002.
- LEGGATT, R.H., STACEY, A. (2002). « Calculation of stress intensity factors corresponding to standard residual stress profiles for common weld joint geometries », *ASME Pressure Vessel and Piping Conference Symposium on Weld Residual Stresses and Fracture 23-27 July 2000*.
- LIN, Y.C., CHOU, C.P. (1995). « Error induced by local yield around hole in hole drilling method for measuring residual stress of material », *Materials Science and Technology*, 11, 600-604.

LU, Jian. (1996). « Handbook of Measurement of Residual Stresses », *Society for Experimental Mechanics, Inc.*, The Fairmont Press, Inc, Lilburn, Ga, 228 p.

MACHINE PRODUCTION. (2000). « Avant-première Industrie 2000 – Electro-erosion : Quand l'original devient standard », *Machines Production*, 720, A, 63-69.

NOBRE, J.P., KORNMEIER, M., DIAS, A.M. SCHOLTES, B. (2000). « Use of the Hole-drilling Method for Measuring Residual Stresses in Highly Stressed Shot-peened Surfaces », *Experimental Mechanics*, 40, 3, 289-297.

NOWELL, D. (1999). « Strain changes caused by finite width slots, with particular reference to residual stress measurement », *Journal of Strain Analysis*, 34,4, 285-294.

O'DOWD, N.P., NIKBIN, K.M., LEE, H.Y., WIMPORY, R.C., BIGLARI, F.R. (2004). « Stress Intensity Factors Due to Residual Stresses in T-Plate Welds », *Tractions of the ASME; Journal of Pressure Vessel Technology*, 126, 432-437.

OLABI, A.G., HASHMI, M.S.J. (1993). « Effect of Post-Weld Heat-Treatment Soaking Temperature on the Mechanical Properties and Residual Stresses of a Martensite Stainless-Steel Welded Component », *Journal of Materials Processing Technology*, 38, 387-398.

OLABI, A.G., HASHMI, M.S.J. (1995). « The effect of post-weld heat-treatment on mechanical-properties and residual-stresses mapping in welded structural steel », *Journal of Materials Processing Technology*, 55, 117-122.

OQLF (Office Québécois de la Langue Française) (2002), « Le grand dictionnaire terminologique », <http://www.granddictionnaire.com/>, (Page consultée le 23 novembre 2004).

PECH, Michel. (1997). « Electro Erosion à re-découvrir », *Machines Production*, 674, 77.

PRIME, M.B. (1997). « Residual Stress in a Bi-Material Laser Clad Measured Using Compliance », *The Fifth Int. Conf. on Residual Stresses*, T. Ericsson et al., 127-132.

PRIME, M.B. (1999). « Residual Stress Measurement by Successive Extension of a Slot : The Crack Compliance Method », *Applied Mechanics Reviews*, 52(2), 75-96.

PRIME, M.B. (2001). « Cross-Sectional Mapping of Residual Stress by Measuring the Surface Contour After a Cut », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123(2), 162-168.

PRIME, M.B. (2004). « The Slitting (Crack Compliance) Method for Measuring Residual Stress », *Los Alamos National Laboratory*, <http://www.lanl.gov/residual/>, (Page consultée le 20 novembre 2004).

PRIME, M.B., HILL, M.R. (2002). « Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate », *Scripta Materiala*, 46(1), 77-82.

PRIME, M.B., HILL, M.R., DEWALD, A.T., SEBRING, R.J., DAVE, V.R., COLA, M.J. (2002). « Residual Stress Mapping in Welds Using the Contour Method », *Trends in Welding Research, Proc. Of the 6th Int. Conf., 15-19 April 2002, Pine Mountain, GA*, eds. : S.A.David et al., ASM International, 2003, 891-896.

PRIME, M.B., HUGUES, D.J., WEBSTER, P.J. (2001). « Weld application of a New Method for Cross-Sectional Residual Stress Mapping », *Proc. 2001 SEM Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, June 4-6, Portland, Oregon*, 608-611.

PRIME, M.B., SEBRING, R.J., EDWARDS, J.M., HUGHES, D.J., WEBSTER, P.J. (2004). « Laser Surface-Contouring and Spline Data-Smoothing for Residual Stress Measurement », *Experimental Mechanics*, 44(2), 176-184.

SCHAJER, G.S. (1981). « Application of Finite Element Calculation to Residual Stress Measurements », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 103, 157-163.

SCHAJER, G.S. (1988a). « Measurement of Non-uniform Residual Stress Using the Hole-Drilling Method. Part I – Stress Calculation Procedures », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110, 344-349.

SCHAJER, G.S. (1988b). « Measurement of Non-uniform Residual Stress Using the Hole-Drilling Method. Part II – Practical Application of the Integral Method », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110, 344-349.

SMITH, D.J., LEGGATT, R.H., WEBSTER, G.A., MacGILLIVRAY, H.J., WEBSTER, P.J., MILLS, G. (1988). « Neutron diffraction measurements of residual stress and plastic deformation in an aluminium alloy weld », *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 23, 4, 201-211.

TENG, Tso-Liang, FUNG Chin-Ping, CHANG, Peng-Hsiang, YANG, Wei-Chun (2001). « Analysis of residual stress and distortions in T-joint fillet welds », *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78, 523-538.

UEDA, Y., FUKUDA, K., NAKACHO, K., ENDO, S. (1975). « A New Measuring Method of Residual Stresses With The Aid of Finite Element Method And Reliability of Estimated Values », *Trans. Japan Welding Research Institute*, 4, 2, 123-131.

VEIGA, C., LOUREIRO, A., PINA, J., CASTANHOLA BATISTA, A. (2002). « Residual Stress Distribution in Butt Welded Joints – Effect of the Weld Groove Shape », *Materials Science Forum*, 404-407, 387-392.

VISHAY MEASUREMENTS GROUP (1993). « Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method », TN-503-5, 18 p.

WIMPORY, R.C., MAY, P.S., O'DOWD, N.P., WEBSTER, G.A., SMITH, D.J., KINGSTON, E. (2003). « Measurement of residual stresses in T-plate weldments », *Journal of Strain Analysis*, 38(4), 349-364.

WINHOLTZ, R.A., KRAWITZ, A.D. (1995). « The Relaxation of Residual Stresses with Postweld Heat Treatment in a High-Performance Weld Measured with Neutron Diffraction », *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A, 1287-1295.

WITHER, P.J., BHADESHIA, H.K.D.H. (2001), « Residual stress – Part 1 – Measurement techniques », *Materials Science and Technology*, 17 (4). 355-365.

RÉFÉRENCES ADDITIONNELLES

BEGHINI, M., BERTINI, L. VITALE, E. (1994). « Fatigue Crack Growth in Residual Stress Fields : Experimental Results and Modeling », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 17(12), 1433-1444.

BLOM, A.F. (1995). « Spectrum fatigue behaviour of welded joints », *International Journal of Fatigue*, 17(7), 485-491.

BRUNO. G., NITSCHKE-PAGEL, T. (2002). « The residual stress relaxation after fatigue in fine-grained steels », *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 74(supp 1), S1388-S1390.

CHENG, W., FINNIE, I., GREMAUD, M., PRIME, M.B. (1994). « Measurement of Near Surface Residual Stresses Using Electric Discharge Wire Machining », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 116, 1, 1-7.

ENZINGER, N., CERJAK, H. (2002). « Calculation of the Influence of the Weld Pattern of the Final Residual Stress State and Deformation », *Materials Science Forum*, 404-407, 147-152.

GRANT, P.V. (2003). « 2D Residual Stress Mapping Using the Contour Method : A Technique Review », *The UK's National Measurement Laboratory*, http://www.npl.co.uk/npl/cmmmt/residualstresses/pdf_files/contour_technique.pdf (Page consultée le 11 juin 2004).

GRANT, P.V., LORD, J.D., WHITEHEAD, P.S. (2002). « The measurement of residual Stresses by the Incremental Hole drilling Technique », *National Physical Laboratory*, Guide No. 53.

ITOH, Y.Z., SURUGA, S., KASHIWAYA, H., (1989). « Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field », *Engineering Fracture Mechanics*, 33(3), 397-407.

- LU, Yan-Li, (1995). « Crack aspect development curves and fatigue life prediction for surface cracks at weld toes in the presence of residual stress ». *International Journal of Fatigue*, 17(8), 551.
- MATSUOKA, K., TAKAHASHI, I., YOSHII, t., FUJII, E. (1993). « Influence of Residual Stress on Fatigue Strength of Non-Load-Carrying Fillet Welded Joints », *Transaction of the Japon Welding Society*, 24(1), 5-12.
- MAY, P.S., WIMPORY, R.C., WEBSTER, G.A., O'DOWD, N.P. (2000). « Determination of the residual stress distribution in a welded T-plate joint », *Studsvik Neutron Research Laboratory*, Annual Report 2000, Experiment Number: 425.
- MIYAZAKI, Katsumasa et al. (2002). « Analysis of Stress Intensity Factor due to Surface Crack Propagation in Residual Stress Fields Caused by Welding (Comparison of Influence Function Method and Inherent Strain Analysis) », *JSME International Journal*, 45(2), 199-207.
- MURUGAN, S., RAI, S.K., KUMAR, P.V., JAYAKUMAR, T. RAV, B., BOSE, M.S.C. (2001), « Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads », *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78, 307-317.
- PHYSIQUE & INDUSTRIE (2003). « Residual Stress Theory », *Physique & industrie*, http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.htm.
(Page consultée le 5 juillet 2004).
- PLAUNT-AUBRY, Richard (2000). « Mesures de contraintes résiduelles par interferometrie de speckle », Mémoire de maîtrise en instrumentation et mesure, Conservatoire National des Arts et Métiers – Centre régional associé de Nantes. 77 p.
- PRIME, M.B. (1999). « Measuring residual stress and the resulting stress intensity factor in compact tension specimens », *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 22, 3, 195-204.

- PRIME, M.B., MARTINEAU, R.L. (2002). « Mapping Residual Stresses After Foreign Object Damage Using the Contour Method », *Materials Science Forum*, 404-407, 521-526.
- PRIME, M.B., NEWBORN, M.A.M BALOG, J.A. (2003). « Quenching and Cold-Work Residual Stresses in Aluminum Hand Forgings : Contour Method Measurement and FEM Prediction », *Materials Science Forums*, 426-432, 435-440.
- SARKANI, Shahram, MICHAELOV, George, KIHIL, David P. (2001). « Stochastic fatigue damage accumulation in a T-welded joint accounting for the residual stress fields », *International Journal of Fatigue*, 23(supp 1), 71-78.
- SCHINDLER, H.J. (1996). « Determination of Residual-Stress Distribution from Measured Stress Intensity Factor », *International Journal of Fracture*, 74, R23-R30.
- SMITH, D.J., BOUCHARD, P.J., GEORGE, D. (2000). « Measurement and prediction of residual stresses in thick-section steel welds », *Journal of Strain Analysis*, 23, 4, 287-305.
- SMITH, D.J., GARWOOD, S.J. (1992). « Influence of Postweld Heat Treatment on the Variation of Residual Stresses in 50 mm Thick Welded Ferritic Steel Plates », *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 51, 241-256.
- TENG, Tso-Liang, FUNG Chin-Ping, CHANG, Peng-Hsiang (2003). « Effect of residual stresses on the fatigue of butt joints using thermal elasto-plastic and multiaxial fatigue theory », *Engineering Failure Analysis*, 10(2), 131-151.
- TIITTO, K. (1987). « Use of Barkhausen Effect in Testing for Residual Stresses and Material Defects », *Residual Stress in Design, Process and Materials Selection, ASM International*, 27-36.
- TIITTO, K., WOJTAS, A.S., VINK, W.J.P., DENOUDEN, G. (1991). « Evaluation of the Stress distribution in Welded Steel by Measureemnet of the Barkhausen Noise Level », *Practical Application of Residual Stress Technology, ASM International*, 55-59.

UEDA, Y., YUAN, M.G., MOCHIZUKI, M., UMEZAWA, S., ENOMOTO, K. (1993). « Experimental verification of a method for prediction of welding residual stresses in T joints using inherent strains. 4th Report: Method for prediction using source of residual stress. », *Welding International*, 7(11), 863-868.

WEBSTER, G.A., EZEILO, A.N. (2001). « Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes », *International Journal of Fatigue*, 23(Supp 1). S375-S383.

WECK, R. (1948). « Residual Stresses Due to Welding », *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys*, The Institute of Metals, 119–129.

WITHER, P.J., BHADESHIA, H.K.D.H. (2001), « Residual stress – Part 2 – Nature and origins », *Materials Science and Technology*, 17 (4). 366-374.

YONG-BOK, Lee, CHIN-SUNG, Chung, YOUNG-KEUN, Park, HO-KYUNG, Kim. (1998). « Effects of redistributing residual stress on the fatigue behavior of ss330 weldment », *International Journal of Fatigue*, 20(8). 565-573.

YUAN, M.G., UEDA, Y. (1996). « Prediction of Residual Stresses in Welded T- and I_- Joints Using Inherent Strains », *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118, 229-234.

ZABOLOTSKII, V.S., SMIRNOVA, G.M. (1998). « A Device for Examining Stress Relaxation During Heat Treatment », *Industrial Laboratory (USSR)*, 54(2), 204-205.

ANNEXES

Annexe A Mesures effectuées à l'aide du bruit de Barkhausen

Cette annexe présente les points qui ont été mesurés par la méthode du bruit de Barkhausen sur une roue de turbine hydraulique de type Francis, soudée à pénétration partielle. Les points mesurés sont présentés de la Figure A.1 à la Figure A.5. Pour chaque point de mesure, la position ainsi que le paramètre magnétique MP mesuré est présenté du Tableau A.1 au Tableau A.7. Les mesures ont été effectuées selon l'axe longitudinal (directions u et w), perpendiculaire (direction v) et à 45° (médiane entre l'axe longitudinal et l'axe perpendiculaire) avec le congé de soudure. Les contraintes résiduelles évaluées à l'aide de la courbe d'étalonnage, après traitement thermique de l'échantillon de référence, de la Figure 2.6 sont présentées du Tableau A.8 au Tableau A.15. Tel que discuté à la section 2.3.1, cette méthode n'a toutefois pas été jugée adéquate pour la mesure de contraintes résiduelles dans les joints soudés de turbines hydrauliques.

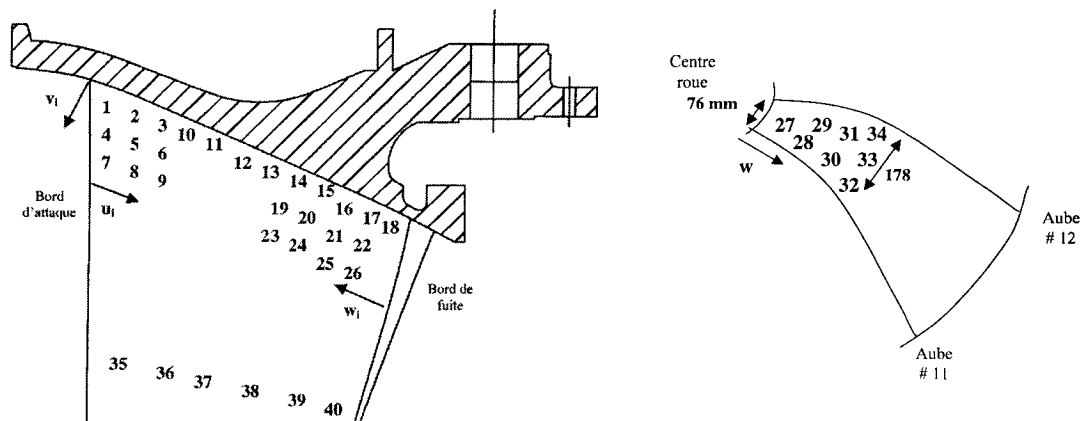


Figure A. 1 Points mesurés à l'intrados, près du plafond

Figure A. 2 Points mesurés à la ceinture

**Tableau A. 1 Position des points mesurés et résultats obtenus : aube # 12, intrados, près du
plafond**

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45° (MP)	u _i (mm)	v _i (mm)	w _i (mm)
1	59	50,8	59,4	25	51	
2	39	48,7	38,8	64	51	
3	43,8	43,6	42,1	102	51	
4	38,7	45,1	47,5	25	102	
5	50,2	53,2	45,1	64	102	
6	39,8	45,7	40,4	102	102	
7	35,9	43,2	34,1	25	152	
8	58,4	52,2	65,2	64	152	
9	37,9	43,8	40,0	102	152	
10	43,9	39,0	37,3	254	51	
11	42,4	32,8	37,3	406	51	
12	47,0	36,8	39,8	559	51	
13	45,6	37,8	41,2	711	51	
14	60,9	101	67,5		51	254
15	124	124	147		51	203
16	120	152	101		51	152
17	90,5	151	179		51	102
18	38,0	30,5	29,6		51	51
19	82,3	83	62,3		127	203
20	105	125	168		127	152
21	74,2	104	108		127	102
22	128	180	172		127	51
23	47,1	50,7	46,0		254	203
24	50,2	64,1	53,9		254	152
25	46,3	88,2	111		254	102
26	116	106	96		254	51
27	49,8	42,3	41,3			25
28	46,8	40,0	51,4			102
29	54,8	45,2	55,7			102
30	60,3	46,9	51,4			178
31	47,0	44,9	55,5			178
32	49,5	45,3	51,9			254
33	50,0	47,4	55,1			254
34	56,2	56,5	50,1			254
35	36,5	52,0	46,9	254	1397	
36	30,5	34,0	33,7	406	1397	
37	36,2	37,6	35,9	610	1397	
38	37,9	39,1	38,0	813	1397	
39	36,0	43	40,8	965	1397	
40	40,3	42,3	42,0	1118	1397	

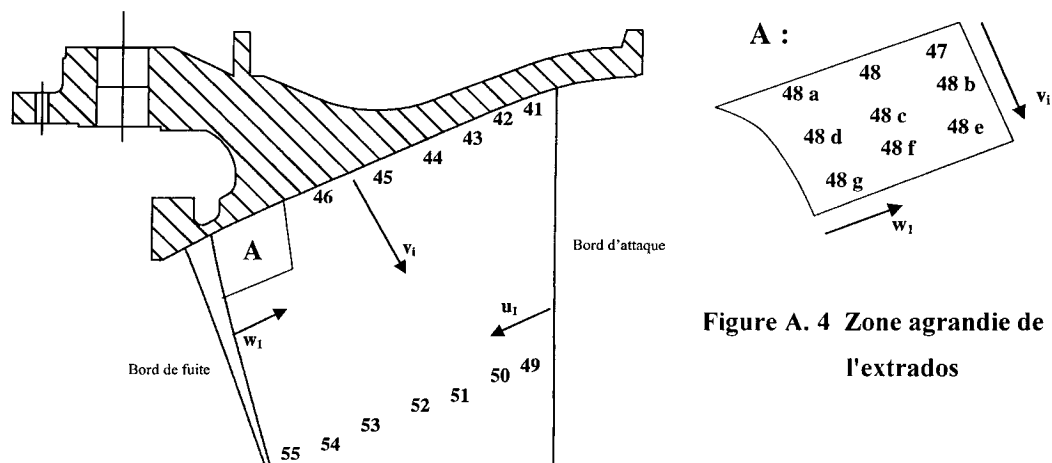


Figure A. 3 Points mesurés à l'extrados, près du plafond

Tableau A. 2 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 12, extrados, près du plafond

Points	$\perp$ soudure (MP)	// soudure (MP)	45° (MP)	u_i (mm)	v_i (mm)	w_i (mm)
41	45,1	42,3	42,2		51	1118
42	40,3	37,2	38,2		51	965
43	35,6	40,2	37		51	813
44	35,0	39,7	37		51	660
45	41,0	36,1	35		51	508
46	28,2	27,4	30		51	356
47	27	28,9	34,7		51	203
48	34,3	33	47		51	127
48 a	57	55	45		51	51
48 b	40	36	38		127	203
48 c	38	47	44		127	127
48 d	38	41	32		127	51
48 e	54	62	90		203	203
48 f	37	46,5	37		203	127
48 g	42	60	59		203	51
49	40	48	52	152	1397	
50	48	47,5	51	305	1397	
52	43	41,5	43,5	610	1397	
53	35	37,5	37	762	1397	
54	36,5	40,5	36	889	1397	
55	40,5	41	46	1016	1397	

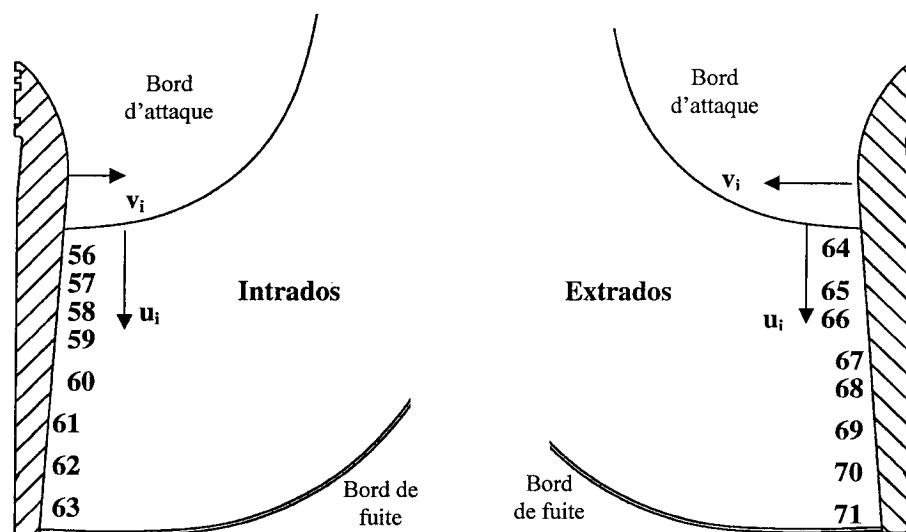


Figure A. 5 Mesures près de la ceinture (intrados et extrados)

Tableau A. 3 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 12, intrados, près de la ceinture

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45° (MP)	u_i (mm)	v_i (mm)
56	44	49	45	25	51
57	45	34	39	127	51
58	42,5	36,5	41	279	51
59	39	32	41,5	432	51
60	44,5	36,5	40,5	584	51
61	42	38	41,5	737	51
62	40,5	37,5	40	889	51
63	36	40	40	1041	51
64	40	43	42	51	51
65	39	37	41,5	203	51
66	43,5	36,8	39	356	51
67	41,5	35,5	37	508	51
68	38	36,5	36,2	660	51
69	40,5	40,3	41	813	51
70	42	37	36	965	51
71	40	49	35,7	1067	51

Tableau A. 4 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 7

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45°
14	47	37	44
15	44	39	43
16	48	42	42
17	54	41	46
18	38	43	38
19	40	38	41
20	41	41	41
21	39	44	42
22	40	46	41
23	40	44	43
24	40	41	43
25	38	43	40
26	35	40	36

Tableau A. 5 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 15

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45°
14	57	42	51
15	63	50	59
16	31	48	60
17	55	52	55
18	49	52	53
19	52	43	53
20	54	46	51
21	51	49	50
22	61	53	56
23	41	43	38
24	51	53	51
25	47	45	51
26	48	47	45

Tableau A. 6 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 2

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45°
1	48	48	46
2	61	47	55
3	52	42	49
4	49	45	51
5	50	43	45
6	40	40	43
7	54	59	62
8	52	47	52
9	43	42	45
14	50	47	53
15	52	52	59
16	43	48	49
17	29	49	40,5
18	29	35	30
19	47	38	47
20	47	49	51
21	45	50	46
22	43	33	33
23	45	42	46
24	45	42	43
25	45	50	47
26	43	47	50

Tableau A. 7 Position des points mesurés et résultats obtenus: aube # 18

Points	⊥ soudure (MP)	// soudure (MP)	45°
1**	51	65	73
2	57	51	61
3	51	52	50
4**	55	64	57
5	46.5	49	50
6	45	42	42
7**	70	67	64
8	45	48	45
9	42	46	46
14	45	50	49
15	42	42	50
16	47	53	50
17*	56	60	48
18*	32	33	28
19	41	40	44
20	44	43	46.5
21	41	43	46
22*	40		
23	38	42	42
24	39	43	42
25	39	44	42.5
26	45	44.5	42

- *: Ces points ont été mesurés dans une soudure et ne sont probablement pas valides.
- **: Ces points étaient sur l'arrête du bord d'attaque et ne sont probablement pas valides.
- L'aube # 5 a aussi été scannée, les résultats obtenus se situaient entre 35 et 53 MP.

Tableau A. 8 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, à l'intrados, près du plafond

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
1	96,62	67,8	97,86	83,02
2	12,99	59,31	11,9	37,71
3	37,47	36,51	29,17	36,99
4	11,36	43,55	54,23	28,17
5	65,42	76,92	43,55	71,29
6	17,3	46,29	20,47	32,39
7	-15,03	34,58	-32,37	15,97
8	94,72	73,19	114,55	84,41
9	-12,27	37,47	18,36	22,81
10	37,94	12,99	-10,08	25,89
11	30,66	-46,98	-10,08	-10,78
12	52,07	-10,48	17,3	28,17
13	45,84	-11,68	24,61	27,16
14	102,43	183,65	120,51	149,77
15	221,17	221,17	263,76	221,17
16	214,34	273,46	183,65	242,77
17	166,69	271,52	320,69	215,6
18	-12,97	-75,61	-91,77	-30,72
19	152,3	153,59	106,52	152,95
20	189,98	222,91	303,41	206,02
21	136,13	188,4	194,74	164,33
22	228,19	322,03	310,17	277,34
23	52,5	67,41	47,64	60,14
24	65,42	111,58	79,46	90,67
25	48,98	162,8	199,53	119,88
26	207,67	191,56	175,69	199,53
27	63,82	30,16	25,13	47,87
28	51,19	18,36	70,14	35,55
29	82,67	44,01	85,79	64,62
30	100,62	51,63	70,14	78,38
31	52,07	42,63	85,1	47,42
32	62,6	44,47	72,05	53,8
33	64,62	53,8	83,72	59,31
34	87,49	88,5	65,02	88
35	-11,52	72,43	51,63	39,6
36	-75,61	-33,47	-36,82	-53,24
37	-13,06	-10,78	-15,03	-10,26
38	-12,27	13,54	-12,97	-18,02
39	-14,33	33,61	22,55	15,7
40	19,95	30,16	28,67	25,13

Tableau A. 9 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, à l'intrados, près du plafond

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
41	43,55	30,16	29,67	36,99
42	19,95	-10,02	-14,66	11,63
43	-17,37	19,42	-10,11	-12,27
44	-22,86	16,77	-10,11	-10,15
45	23,59	-13,67	-22,86	-18,68
46	-132,95	-171,49	-83,92	-150,46
47	-196,68	-109,12	-25,91	-143,51
48	-30,17	-44,71	52,07	-37,38
48a	90,17	83,37	43,09	86,82
48b	18,36	-14,33	-12,97	-12,97
48c	-12,97	52,07	38,42	31,16
48d	-12,97	23,59	-56,13	15,7
48e	79,82	105,66	165,85	93,44
48f	-10,11	49,87	-10,11	27,41
48g	28,67	99,71	96,62	68,58
49	18,36	56,37	72,43	38,42
50	56,37	54,23	68,58	55,3
52	33,61	26,14	36,03	29,92
53	-22,86	-10,46	-10,11	-12,77
54	-11,52	20,99	-14,33	-18,02
55	20,99	23,59	47,64	22,29

Tableau A. 10 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, près de la ceinture

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
56	38,42	60,55	43,09	49,87
57	43,09	-33,47	12,99	15,7
58	31,16	-11,52	23,59	15,7
59	12,99	-56,13	26,14	-18,21
60	40,77	-11,52	20,99	20,99
61	28,67	-12,97	26,14	18,36
62	20,99	-10,46	18,36	12,99
63	-14,33	18,36	18,36	-12,97
64	18,36	33,61	28,67	26,14
65	12,99	-10,11	26,14	-12,97
66	36,03	-10,48	12,99	19,16
67	26,14	-18,21	-10,11	-18,02
68	-12,97	-11,52	-13,06	-10,04
69	20,99	19,95	23,59	20,47
70	28,67	-10,11	-14,33	15,7
71	18,36	60,55	-16,55	40,77

Tableau A. 11 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 12, après sablage

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
14	38,42	43,09	52,07	40,77
15	115,35	164,16	56,37	142,51
16	211,82	193,15	183,65	202,36
17	227,31	217,73	272,49	222,48
18	-83,92	-83,92	-83,92	-83,92

Tableau A. 12 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 2

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
1	56,37	56,37	47,64	56,37
2	102,72	52,07	83,37	79,82
3	72,43	28,67	60,55	52,07
4	60,55	43,09	68,58	52,07
5	64,62	33,61	43,09	49,87
6	18,36	18,36	33,61	18,36
7	79,82	96,62	105,66	88,5
8	72,43	52,07	72,43	62,6
9	33,61	28,67	43,09	31,16
14	64,62	52,07	76,18	58,48
15	72,43	72,43	96,62	72,43
16	33,61	56,37	60,55	45,38
17	-106,3	60,55	20,99	12,99
18	-106,3	-22,86	-83,92	-56,13
19	52,07	-12,97	52,07	31,16
20	52,07	60,55	68,58	56,37
21	43,09	64,62	47,64	54,23
22	33,61	-44,71	-44,71	-12,97
23	43,09	28,67	47,64	36,03
24	43,09	28,67	33,61	36,03
25	43,09	64,62	52,07	54,23
26	33,61	52,07	64,62	43,09

Tableau A. 13 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 7

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
14	52,07	-10,11	38,42	28,67
15	38,42	12,99	33,61	26,14
16	56,37	28,67	28,67	43,09
17	79,82	23,59	47,64	54,23
18	-12,97	33,61	-12,97	20,99
19	18,36	-12,97	23,59	12,99
20	23,59	23,59	23,59	23,59
21	12,99	38,42	28,67	26,14
22	18,36	47,64	23,59	33,61
23	18,36	38,42	33,61	28,67
24	18,36	23,59	33,61	20,99
25	-12,97	33,61	18,36	20,99
26	-22,86	18,36	-14,33	-10,46

Tableau A. 14 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 15

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
14	90,17	28,67	68,58	62,6
15	108,52	64,62	96,62	88,5
16	102,72	56,37	99,71	81,61
17	83,37	72,43	83,37	78,01
18	60,55	72,43	76,18	66,62
19	72,43	33,61	76,18	54,23
20	79,82	47,64	68,58	64,62
21	68,58	60,55	64,62	64,62
22	102,72	76,18	86,82	90,17
23	23,59	33,61	-12,97	28,67
24	68,58	76,18	68,58	72,43
25	52,07	43,09	68,58	47,64
26	56,37	52,07	43,09	54,23

Tableau A. 15 Contraintes résiduelles évaluées pour l'aube # 18

Points	⊥ soudure (MPa)	// soudure (MPa)	45° (MPa)	Moyenne (MPa)
1**	68,58	114,02	133,5	93,44
2	90,17	68,58	102,72	79,82
3	68,58	72,43	64,62	70,52
4**	83,37	111,3	90,17	98,17
5	49,87	60,55	64,62	55,3
6	43,09	28,67	28,67	36,03
7**	126,63	119,25	111,3	123
8	43,09	56,37	43,09	49,87
9	28,67	47,64	47,64	38,42
14	43,09	64,62	60,55	54,23
15	28,67	28,67	64,62	28,67
16	52,07	76,18	64,62	64,62
17*	86,82	99,71	56,37	93,44
18*	-56,13	-44,71	-141,3	-50,38
19	23,59	18,36	38,42	20,99
20	38,42	33,61	49,87	36,03
21	23,59	33,61	47,64	28,67
22*	18,36			
23	-12,97	28,67	28,67	18,36
24	12,99	33,61	28,67	23,59
25	12,99	38,42	31,16	26,14
26	43,09	40,77	28,67	41,94
* : Points mesurés dans la zone soudée				
** : Points mesurés à l'arrête du bord d'attaque				

Annexe B Méthode de calcul pour la méthode du trou

L'évaluation des contraintes résiduelles par la méthode du trou selon la norme de l'ASTM (1999) est succinctement décrite dans cette section.

a) Le relâchement des contraintes résiduelles en surface suivant l'axe de jauge est caractérisé par la déformation enregistrée par cette dernière, ε_r , lorsqu'un trou est percé au centre d'une rosette. Cette déformation est exprimé en fonction des contraintes principales σ_{min} et σ_{max} (voir Figure B. 1).

$$\varepsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{min} \quad (3.3)$$

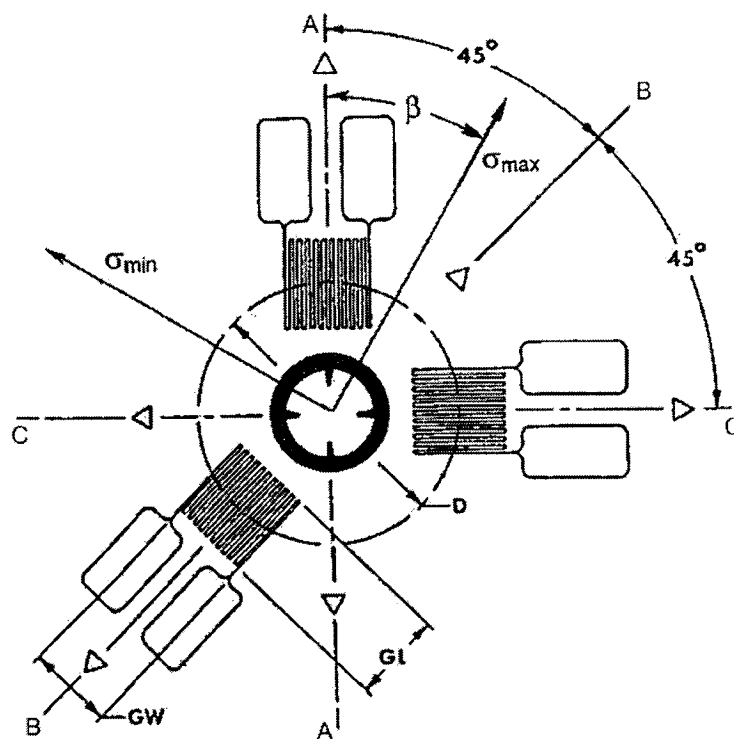


Figure B. 1 Géométrie d'une rosette utilisée pour la méthode du trou (adaptée de ASTM, 1999)

Les équations suivantes permettent de définir les constantes de l'équation (3.3) en fonction des propriétés du matériau ν (coefficient de poisson) et E (module d'élasticité).

$$\begin{aligned}\bar{A} &= -\bar{a}(1+\nu)/(2E) \\ \bar{B} &= -\bar{b}/(2E)\end{aligned}\tag{3.4}$$

Dans l'équation (3.4), $\bar{a}$ et $\bar{b}$ sont des variables qui sont indépendantes du matériau et exprimés en fonction des ratios D_0/D , Z/D et des caractéristiques de la rosette utilisée où D est le diamètre moyen de la rosette, D_0 est le diamètre du trou et Z , la profondeur du trou. Une table spécifiant tous ces paramètres est disponible dans la norme ASTM (1999).

b) Lorsque les mesures sont effectuées dans des pièces épaisses, la norme exige qu'une vérification soit effectuée pour s'assurer que les contraintes résiduelles sont uniformes pour toute la profondeur du trou percé. Cette vérification est effectuée à l'aide des combinaisons de déformations suivantes :

$$\begin{aligned}p &= (\varepsilon_c + \varepsilon_a)/2 \\ q &= (\varepsilon_c - \varepsilon_a)/2 \\ t &= (\varepsilon_c + \varepsilon_a - 2\varepsilon_b)/2\end{aligned}\tag{3.5}$$

où $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ sont les trois déformations enregistrées par la rosette.

Le pourcentage de relâchement des déformations devrait suivre la courbe de la Figure B. 2. Une non uniformité des contraintes résiduelles en fonction de la profondeur est définie par un écart inférieur à 3 % de part et d'autre de ces courbes. Dans ce cas, les mesures ne sont pas acceptables selon cette norme mais, tel que discuté à la section 1.4.2, ces mesures permettent quand même d'estimer approximativement le niveau de contraintes résiduelles.

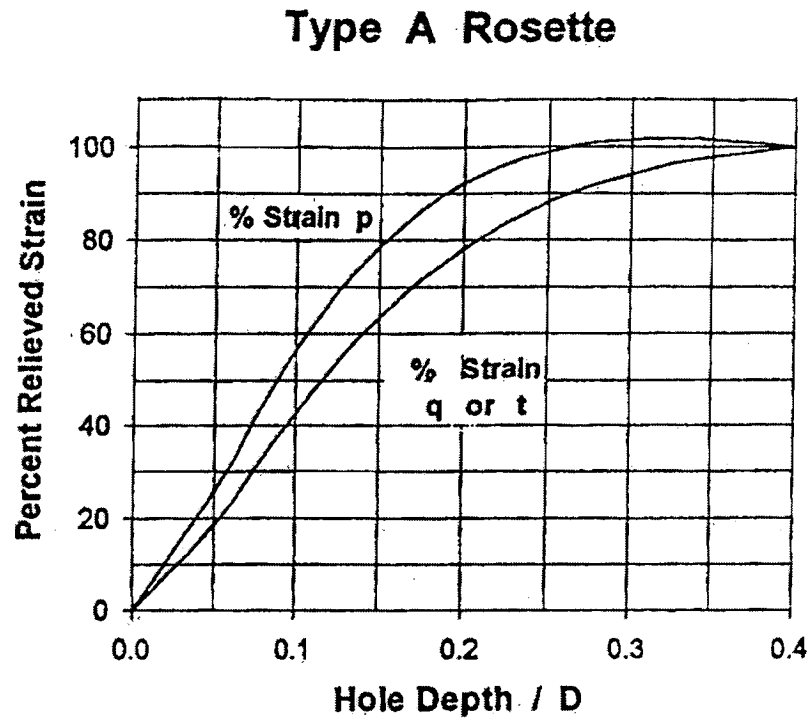


Figure B. 2 Déformation relâchée en fonction de la profondeur du trou

Les mesures sont effectuées pour n profondeurs du trou. Pour une pièce épaisse, les contraintes sont définies à partir des paramètres suivants :

$$\begin{aligned}
 P &= -\frac{E}{(1+\nu)} \left(\sum_i^n \bar{a}_i p_i \right) / \left(\sum_i^n \bar{a}_i^2 \right) \\
 Q &= -E \left(\sum_i^n \bar{b}_i q_i \right) / \left(\sum_i^n \bar{b}_i^2 \right) \\
 T &= -E \left(\sum_i^n \bar{b}_i t_i \right) / \left(\sum_i^n \bar{b}_i^2 \right)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \tag{3.7}$$

où i est un incrément pour la profondeur du trou.

L'orientation de l'axe principal β peut alors être calculé par :

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-T}{-Q} \right) \quad (3.8)$$

Annexe C Méthode de calculs des contraintes principales selon les déformations lues par une rosette rectangulaire

Une rosette rectangulaire ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) est composée de trois éléments orientés selon les angles présentés à la Figure C. 1. L'état de déformation, à partir des équations du cercle de Mohr (Gere et Timoshenko, 1990), pour une direction quelconque peut être décrit selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_{x'} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (3.9)$$

En considérant les déformations ε_x et ε_y associées aux axes principaux de déformations ($\varepsilon_x = \varepsilon_1$, $\varepsilon_y = \varepsilon_2$ et $\gamma_{xy} = 0$), il est alors possible d'obtenir les équations qui expriment les déformations enregistrées par les trois éléments de la rosette :

$$\varepsilon_A = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2(\varphi + 45^\circ) \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_C = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2(\varphi + 90^\circ) \quad (3.12)$$

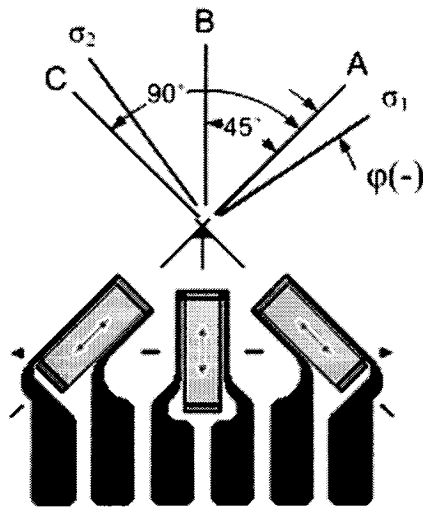
En combinant ces trois équations, les relations suivantes sont obtenues :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + (\varepsilon_B - \varepsilon_C)^2}{2}} \quad (3.13)$$

$$\tan 2\varphi = \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C} \quad (3.14)$$

Pour un état de contraintes planes, les contraintes principales σ_1 et σ_2 , aussi notées σ_{max} et σ_{min} pour la méthode du trou sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (3.15)$$



Si $\varepsilon_I > \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)}{2}$, φ est la direction de σ_1

Si $\varepsilon_I < \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)}{2}$, φ est la direction de σ_2

Si $\varepsilon_I = \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)}{2}$, $\varphi = \pm 45^\circ$

Figure C. 1 Rosette rectangulaire

Annexe D Programme Matlab

Cette annexe présente les principales fonctions qui ont été programmées dans *Matlab* afin d'effectuer le traitement des données brutes de la CMM, d'imposer les déplacements au modèle d'analyse par éléments finis d'*Ansys* et d'afficher les contraintes évaluées à l'aide de d'*Ansys*. Voici la description sommaire de chaque fonction :

- La fonction *cmm2matlab.m* est utilisée afin de transformer le fichier brute de la cmm en fichier *ASCII*.
- La fonction *plot_passes.m* permet de visualiser les passes d'intérêt.
- La fonction *coupe_passe.m* permet de remplacer un intervalle de mesure, pour une passe de mesure, par une interpolation linéaire entre deux points. Cette fonction est utilisée afin de supprimer les mesures erronées causées par des défauts dans la surface coupée (manque de fusion par exemple).
- La fonction *remplir_trou.m* permet de combler le manque d'information causé par les trous utilisés afin de brider les échantillons.
- La fonction *truncate_data.m* permet de tronquer les extrémités de plusieurs passes.
- La fonction *get_coordonnées.m* permet d'approximer chaque passe de mesure par des *B-Splines*. Ces courbes sont ensuite enregistrées sous forme de matrices. Cette fonction doit être modifiée manuellement d'un échantillon à l'autre afin de définir les paramètres à utiliser pour tracer les *B-Splines*.

- La fonction *retournement.m* est utilisée afin de transposer les coordonnées du montant dans le repère de la base.
- La fonction *ajust_data.m* est utilisé afin d'ajuster une surface aux courbes *B-Splines* définies par la fonction *get_coordonnées.m*. De plus, cette fonction ajuste la surface au plan de coupe initial. Elle fait appelle aux fonctions *translation.m* et *rotation_pt.m* qui permettent d'effectuer respectivement les opérations de translation et de rotation sur des points situés dans un repère cartésien.
- La fonction *longueur_unitaire.m* transforme le plan *x-y* dans un plan unitaire.
- La fonction *get_nodes.m* lit le fichier de nœuds d'*Ansys*, interpole les déplacements correspondant pour chacun des nœuds de la surface libre du modèle d'éléments finis et crée un fichier qui permet l'application automatique des déplacements dans le modèle d'éléments finis.
- La fonction *get_constraints.m* lit le fichier des contraintes calculées à l'aide d'*Ansys*, trie les données pour conserver uniquement l'information reliée aux nœuds de la surface coupée par EDM puis sauvegarde ces informations qui pourront être affichées à l'aide de la fonction *plot_constraints.m*.
- La fonction *plot_contrainte.m* lit le fichier de contraintes créé par la fonction *get_constraints.m* et affiche ces contraintes. Il est possible de cacher certaines bandes selon l'axe *x* et l'axe *y*.
- La fonction *plot_profil_moyen* trace le profil moyen des contraintes résiduelles en fonction de la longueur de l'échantillon (selon l'axe *x*).

À noter : les fonctions *get_coordonnees.m* et *ajust_data.m* sont très intéressantes car elles utilisent l'outil *Matlab spap2* qui permet d'ajuster facilement des surfaces à un champ de points.

D.1 *cmm2matlab.m*

```
function f = cmm2matlab (nom_lecture1, nom_ecriture, X, Y, Z)
% Cette fonction permet de lire les fichiers brutes de la cmm dans l'ordre Y,Z,X et cree un
% fichier contenant dans l'ordre les coordonnees x, y, z.
% Choisir l'extension *.res pour une uniformite des fichiers
% Eric Moisan, 2005-03-31
format('long');
%Ouverture du fichier a ecrire
ecrit = fopen('tmp_cmm2matlab.txt', 'w');
%Sequence permettant de lire le fichier.
% Premiere sequence
lit = fopen(nom_lecture1);
% Variable qui permet de savoir si la boucle principale doit etre
% recommencée ou si la fin du fichier est atteinte.
restart = 1;
while 1
    if restart == 1
        restart = 0;

        % On ne tient pas compte des parametres d'entete pour chacune des
        % passes
        x = 1;
        while x<=6
            tline = fgetl(lit);
            x=x+1;
        end
        % Lecture des points mesurees et ecriture de ces coordonnees selon
        % l'ordre x, y, z dans une autre fichier.
        while 1
            c = fscanf(lit, '%c', [6]);
            if strcmp(c, '')
                break;
            end;
            if strcmp(c(4), '0')
                restart = 1;
                break;
            end;
            if restart == 0
                a= fscanf(lit, '%f %f %f %f %f %f', [6]);
                fprintf(ecrit, '\n %f %f %f', [a(X) a(Y) a(Z)]);
            end
        end
    else
        break;
    end
end
% Fermeture des fichiers
```

```

fclose(lit);
fclose(ecrit);
% Ecriture du fichier de sortie
mat = load('tmp_cmm2matlab.txt');
save(nom_ecriture,'mat');
delete('tmp_cmm2matlab.txt');
f = 1;

```

D.2 *plot_passes.m*

```

function f = plot_passes(nom_fichier, matrice_interet)
% Cette permet de tracer le graphique des passes d'interet
% Eric Moisan, 2005-01-26
% Lecture du fichier matrice
load(nom_fichier,'mat')
% Appel de la fonction stock_passes qui emmagasine les donnees situees dans le fichier
matrice = stock_passes(mat, matrice_interet);
[h,l] = size(matrice);
% La derniere ligne du fichier est enlevee pour eviter la
% creation d'une ligne de travers dans le fichier puisque qu'il y a
% certaines passes qui n'ont pas toutes le meme nombre de lignes
% matrice(h,:) = [];
% matrice(h-1000:h,:) = [];
[u,v] = size(matrice);
% Les passes sont tracées successivement.
i = 0;
x = 0;
c = 'b';
% Puisque les passes n'ont pas toutes le meme nombre d'acquisition, des
% cellules ont 0 comme valeur. Le reste de la boucle permet d'eviter de
% tracer ces donnees.
tmp = matrice(:,i+2:i+3);
tmp2 = [0,0];
for inc = 1:l:u;
    if tmp(inc,1) ~= 0 && tmp(inc,2) ~= 0
        tmp2 = [tmp2;tmp(inc,:)];
    end
end
tmp2(1,:) = [];
plot(tmp2(:,1),tmp2(:,2),'k');
% Increments
i = i + 3;
x = x + 1;
end
f = 1;

```

D.3 *stock_passes.m*

```

function sortie = get_nodes(fichier_entree,matrice_entree,fichier_sortie,size_x,size_y)
% Cette fonction permet de lire un fichier de points Ansys de forme *.lis.
% Un triage est effectue et on conserve uniquement l'information reliee aux noeuds de coordonnee z = 0.
% Cette fonction cree un fichier (fichier_sortie) qui pourra etre lu par Ansys afin d'appliquer
% des déplacements aux noeuds de la surface z=0.

```

```

% Variables d'entree:
% Matrice entree: matrice sortie de moyenne.m contenant les matrices: xx, yy, zz
% size_x: dimension en x du maillage
% size_y: dimension en y du maillage
% Eric Moisan, 2005-02-07
format long e;
%Ouverture des fichiers
lit = fopen(fichier_entree);
ecrit = fopen(fichier_sortie,'w');
% Lecture de la matrice
load(matrice_entree);
% Le fichier est lu une premiere fois pour en connaitre la longueur et les
% dimensions de la matrice a creer pour enregistrer les donnees
stop = 0;
inc = 0;
while stop == 0;
    inc = inc + 1;
    scrap = fgetl(lit);
    if scrap == -1
        stop = 1;
    end
end
nb_lignes = inc-1;
% Calcul du nombre de blocs de donnees
nb_blocs_complets = fix((nb_lignes - 5)/22);
longueur_dernier_bloc = nb_lignes - 12 - nb_blocs_complets*22;
longueur_matrice = nb_blocs_complets*20 + longueur_dernier_bloc - 2;
fclose(lit);
lit = fopen(fichier_entree);
% Vecteur qui enregistre les donnees:
noeuds = zeros(longueur_matrice,4);
no_noeud = 0;
% On saute les premieres lignes du fichier
for i = 1:2
    scrap = fgetl(lit);
end
% Lecture des blocs complets
for inc = 1:nb_blocs_complets
    for i = 1:2
        scrap = fgetl(lit);
    end
    for i = 1:20
        no_noeud = no_noeud+1;
        ligne = fgetl(lit);
        [tmp1,tmp2] = strtok(ligne);
        noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));
        noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
        noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));
        noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
    end
end
% Lecture du dernier bloc
scrap = fgetl(lit);
scrap = fgetl(lit);
for i = 1:(longueur_dernier_bloc - 2)
    no_noeud = no_noeud+1;
    ligne = fgetl(lit);
    noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));

```

```

        noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
        noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));
        noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
    end
    % Il y a un changement de repere entre ansys et matlab afin de faciliter le maillage dans ansys.
    % Axe x_matlab = -axe z_ansys
    % Axe y_matlab = axe y_ansys
    % Axe z_matlab = axe x_ansys
    % Transfert de la matrice dans l'ordre de matlab selon l'ordre X, Y, Z, no_noeud
    noeuds_matlab = [-noeuds(:,4),noeuds(:,3),noeuds(:,2),noeuds(:,1)];
    % On conserve uniquement les noeuds sur le plan z = 0
    i = 0;
    while i < length(noeuds_matlab);
        i = i+1;
        if noeuds_matlab(i,3) > 0.001 || noeuds_matlab(i,3) < -0.001
            noeuds_matlab(i,:) = [];
            i = i - 1;
        end
    end
    % Interpolation pour trouver les déplacements en z pour tous les noeuds
    % On ajuste la matrice de déplacements aux dimensions de la piece maillee dans Ansys
    xx = xx*size_x;
    yy = yy*size_y;
    [X,Y] = meshgrid(xx,yy);
    Z = zz;
    % Vecteur qui va emmagasiner les déplacements
    [u,v] = size(noeuds_matlab)
    Zi = zeros(u,1);
    i = 0;
    while i < u
        i = i+1;
        Zi(i,1) = interp2(X,Y,Z,noeuds_matlab(i,1),noeuds_matlab(i,2));
        if (i/100 - fix(i/100)) == 0;
            fprintf(num2str(i));
            fprintf('\n');
        end
    end
    % Ajout des déplacements dans la matrice noeuds_matlab_z0
    noeuds_matlab(:,3) = Zi;
    % Ecriture du fichier
    fprintf('debut de l\'écriture du fichier')
    i = 0;
    while i < u
        i = i+1;
        tmp = 'd,';
        tmp = [tmp,num2str(noeuds_matlab(i,4))];
        tmp = [tmp,','];
        % Le signe negatif permet d'imposer les déplacements dans Ansys afin de
        % repositionner la surface libre dans sa position initiale avant la
        % coupe
        tmp = [tmp,num2str(-noeuds_matlab(i,3))];
        tmp = [tmp,', , , UX, , , ,'];
        fprintf(ecrit, '%s\n', tmp);
    end
    % Affichage de la surface
    tri = delaunay(noeuds_matlab(:,1),noeuds_matlab(:,2));
    trimesh(tri,noeuds_matlab(:,1),noeuds_matlab(:,2),noeuds_matlab(:,3));
    fclose(lit);

```

```
fclose(ecrit);
sortie = 1;
```

D.4 coupe_passe.m

```
function sortie = coupe_passe(fichier_entree,fichier_sortie,ligne, y1,y2)
% Cette fonction permet de couper les donnees de les passes incluses dans les vecteur 'ligne' entre les
% coordonnees y1 et y2
% Eric Moisan, 2005-02-18
format('long');
% Lecture du fichier matrice d'entree
load(fichier_entree,'mat')
[u,v] = size(mat);
% Par default l'ordre est considere croissante
ordre = 1;
[i,j] = size(ligne);
for inc_ligne = 1:1:j
    % Plage d'erreur pour la coordonnee x
    x_plus = ligne(inc_ligne) + .1;
    x_moins = ligne(inc_ligne) - .1;
    tmp = 0;
    for inc = 1:1:u
        if mat(inc,1) > x_moins && mat(inc,1) < x_plus
            % Verification de l'ordre des coordonnees en y
            if tmp == 0
                tmp = mat(inc,2);
            elseif mat(inc,2) > tmp
                ordre = 1;
            else
                ordre = 0;
            end
        % On cherche 4 positions pour pouvoir modifier les points coupes par des points
        % approximes par une droite joignant les deux cotes de la zone coupee
        if ordre == 1
            if mat(inc,2) <= (y1 - 0.5)
                yi_1 = inc;
            elseif mat(inc,2) <= y1
                yi_2 = inc;
            elseif mat(inc,2) <= y2
                yi_3 = inc;
            elseif mat(inc,2) <= (y2 + 0.5)
                yi_4 = inc;
            end
        elseif ordre == 0
            if mat(inc,2) >= (y2 + 0.5)
                yi_4 = inc;
            elseif mat(inc,2) >= y2
                yi_3 = inc;
            elseif mat(inc,2) >= y1
                yi_2 = inc;
            elseif mat(inc,2) >= (y1 - 0.5)
                yi_1 = inc;
            end
        end
    end
end
end
```

```

end
if ordre == 1
    moy1 = mean(mat(yi_1:yi_2,3));
    moy2 = mean(mat(yi_3:yi_4,3));
    A = (moy2-moy1)/(mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2));
    b = moy1 - A*mat(yi_2,2);
    mat(yi_2:yi_3,3) = mat(yi_2:yi_3,2).*A + b;
elseif ordre == 0
    moy1 = mean(mat(yi_2:yi_1,3));
    moy2 = mean(mat(yi_4:yi_3,3));
    A = (moy2-moy1)/(mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2));
    b = moy1 - A*mat(yi_2,2);
    mat(yi_3:yi_2,3) = mat(yi_3:yi_2,2).*A + b;
else
    fprintf('Il y a un probleme d'ordre dans le fichier');
end
end
% Sauvegarde de la matrice coupee
save(fichier_sortie,'mat');
sortie = 1;

```

D.5 *supprime_passe.m*

```

function sortie = supprime_passe(fichier_entree,fichier_sortie,lignes)
% Cette fonction permet d'enlever des passes du fichier de mesures
% Eric Moisan, 2005-03-23
format('long');
% Lecture du fichier matrice d'entree
load(fichier_entree,'mat','yy')
[u,v] = size(mat);
% Par default l'ordre est consideree croissante
fin_passe = 0;
[i,j] = size(lignes);
ligne_debut = 1;
ligne_fin = 1;
for inc_ligne = 1:1:j
    % Plage d'erreur pour la coordonnee x
    x_plus = lignes(inc_ligne) + .1;
    x_moins = lignes(inc_ligne) - .1;
    compteur = 1;
    stop = 0;
    while stop == 0
        if mat(compteur,1) < x_moins
            ligne_debut = compteur;
            compteur = compteur + 1;
        elseif mat(compteur,1) > x_moins && mat(compteur,1) < x_plus
            ligne_fin = compteur;
            compteur = compteur + 1;
        else mat(compteur,1) > x_plus
            stop = 1;
            mat(ligne_debut:ligne_fin,:) = [];
        end
        if compteur == u+1
            stop = 1;
            mat(ligne_debut:ligne_fin,:) = [];
        end
    end
end

```

```

end
end
end
% Sauvegarde de la matrice tronquee
save(fichier_sortie,'mat','yy');
sortie = 1;

```

D.6 remplir_trou.m

```

function sortie = remplir_trou(fichier_entree,fichier_sortie,ligne, y1,y2)

% Cette fonction permet de remplir le trou pour les passes incluses dans les vecteur 'ligne' entre les
% coordonnees y1 et y2
% Eric Moisan, 2005-02-21
format('long');
% Lecture du fichier matrice d'entree
load(fichier_entree,'mat')
[u,v] = size(mat);
% Par default l'ordre est consideree croissante
ordre = 1;
[i,j] = size(ligne);
for inc_ligne = 1:1:j
    fprintf(['La lecture est rendue a x = ' num2str(ligne(inc_ligne)) '\n']);
    % Plage d'erreur pour la coordonnee x
    x_plus = ligne(inc_ligne) + .1;
    x_moins = ligne(inc_ligne) - .1;
    tmp = 0;
    for inc = 1:1:u
        if mat(inc,1) > x_moins && mat(inc,1) < x_plus
            % Verification de l'ordre des coordonnees en y
            if tmp == 0
                tmp = mat(inc,2);
            elseif mat(inc,2) > tmp
                ordre = 1;
            else
                ordre = 0;
            end
            % On cherche 4 positions pour pouvoir modifier les points coupes
            % par des points approximes par une droite joignant les deux cotes de
            % la zone coupee
            if ordre == 1
                if mat(inc,2) <= (y1 - 0.5)
                    yi_1 = inc;
                elseif mat(inc,2) <= y1
                    y_2 = inc;
                elseif mat(inc,2) <= y2
                    yi_3 = inc;
                elseif mat(inc,2) <= (y2 + 0.5)
                    yi_4 = inc;
                end
            elseif ordre == 0
                if mat(inc,2) >= (y2 + 0.5)
                    yi_4 = inc;
                elseif mat(inc,2) >= y2
                    yi_3 = inc;

```

```

elseif mat(inc,2) >= y1
    yi_2 = inc;
elseif mat(inc,2) >= (y1 - 0.5)
    yi_1 = inc;
end
end
end
if ordre == 1
    moy1 = mean(mat(yi_1:yi_2,3));
    moy2 = mean(mat(yi_3:yi_4,3));
    A = (moy2-moy1)/(mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2));
    b = moy1 - A*mat(yi_2,2);
    [x,y] = size(mat);
    nb_donnees = round((mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2))/0.02);
    pas = (mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2))/nb_donnees;
    mat_tmp = mat(1:yi_2,:);
    compteur = mat(yi_2,2);
    % On ajoute des donnees pour boucher le trou
    tmp = zeros(nb_donnees,3);
    for i = 1:nb_donnees
        compteur = compteur + pas;
        tmp(i,:) = [ligne(inc_ligne),compteur,compteur*A + b];
    end
    mat_tmp = [mat_tmp;tmp;mat(yi_3:x,:)];
    mat = mat_tmp;
elseif ordre == 0
    moy1 = mean(mat(yi_2:yi_1,3));
    moy2 = mean(mat(yi_4:yi_3,3));
    A = (moy2-moy1)/(mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2));
    b = moy1 - A*mat(yi_2,2);
    [x,y] = size(mat);
    nb_donnees = round((mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2))/0.02);
    pas = (mat(yi_3,2)-mat(yi_2,2))/nb_donnees;
    mat_tmp = mat(1:yi_3,:);
    compteur = mat(yi_3,2);
    % On ajoute des donnees pour boucher le trou
    tmp = zeros(nb_donnees,3);
    for i = 1:nb_donnees
        compteur = compteur - pas;
        tmp(i,:) = [ligne(inc_ligne),compteur,compteur*A + b];
    end
    mat_tmp = [mat_tmp;tmp;mat(yi_2:x,:)];
    mat = mat_tmp;
else
    fprintf('Il y a un probleme sur l\'ordre des donnees dans le fichier');
end
end
% Sauvegarde de la matrice coupee
save(fichier_sortie,'mat');
sortie = 1;

```

D.7 *truncate_data.m*

```
function sortie = truncate_data(fichier_entree,fichier_sortie,y1,y2)
% Cette fonction permet de conserver uniquement les donnees dans la zone y1 a y2 desiree.
% Eric Moisan, 2005-01-26
format('long');
% Lecture du fichier matrice d'entree
load(fichier_entree,'mat')
ecrit = fopen('trunc_tmp.txt', 'w');
[u,v] = size(mat);
inc = 0;
pass = (round(10*mat(1,1)))/10;
% Analyse de la matrice ligne par ligne
while inc < u;
    inc = inc + 1;
    newPass = (round(10*mat(inc,1)))/10;
    if pass ~= newPass
        pass = newPass;
        fprintf(['La lecture est rendue a x = ' num2str(pass) '\n']);
    end
    if mat(inc,2) > y1 && mat(inc,2) < y2
        fprintf(ecrit, '\n %f %f %f', [mat(inc,1),mat(inc,2),mat(inc,3)]);
    end
end
% Sauvegarde de la matrice tronquee
fclose(ecrit);
mat = load('trunc_tmp.txt');
save(fichier_sortie,'mat');
delete('trunc_tmp.txt');
sortie = 1;
```

D.8 *get_coordonnees.m*

```
function sortie = get_coordonnees(fichier_entree, fichier_sortie)

% Cette fonction permet de lire un fichier de points et cree un fichier contenant les B-splines de chacune des passes
du fichier.
% Le fichier de sortie pourra etre lu par exec_spap2.m
% fichier_sortie contiendra la matrice "mat" qui represente le champ de points contenant les B-splines de
% chacune des passes.
% L'extension du fichier de sortie doit absolument etre *.mat
% Eric Moisan, 2005-01-26
format long e;
% Lecture du fichier
load(fichier_entree,'mat');
% Cette matrice enregistre le nombre de donnees par passe et ou elle se
% retrouvent dans la matrice des resultats.
location = [];
pass = 0;
newPass = 0;
matrice = [];
new = 0;
```

```

i = 0;
stop = 0;
no_colone = 0;
v = 0;
% Matrice qui contient toute l'information de toutes les splines
% approximées a une série de valeur y définie par yy
splines = [];
% Parametres pour l'ajustement des B-splines. Ces parametres doivent etres ajuster pour chaque type de
% surface mesuree.
l = 35;
k = 4;
yy = [3.35:0.05:82.5];
% a= fscanf(lit, '%f %f %f', [3]);
[u,v] = size(mat);
a = mat(1,:);
inc = 1;
while inc < u;
    newPass = (round(10*a(1)))/10;
    if pass == newPass
        i = i+1;
        matrice(i,1) = a(1);
        matrice(i,2) = a(2);
        matrice(i,3) = a(3);
    else
        if new == 1;
            sp = [];
            % Calcul des B-splines selon y
            sp = spap2(l,k,matrice(:,2),matrice(:,3));
            vals = fnval(sp,yy);
            % Les nouvelles donnees sont ajoutées a la matrice
            If size(splines)==[0 0]
                no_colone = 1;
                splines = [pass, vals]';
            else
                no_colone = no_colone + 1;
                tmp = [pass,vals];
                splines= [splines,tmp]';
            end
        end
        pass = newPass;
        new = 1;
        matrice = [];
        fprintf(['La lecture est rendue a x = ' num2str(pass) '\n']);
        i = 1;
        matrice(i,1) = a(1);
        matrice(i,2) = a(2);
        matrice(i,3) = a(3);
    end
    inc = inc + 1;
    a = mat(inc,:);
    if inc == u
        sp = [];
        sp = spap2(l,k,matrice(:,2),matrice(:,3));
        vals = fnval(sp,yy);
        tmp = [newPass,vals];
        splines= [splines,tmp]';
        stop = 1;
    end
end

```

```

end
% Enregistrement des donnees
mat = splines';
save(fichier_sortie,'mat','yy');
% Affichage des B-splines propres a chaque passe de mesure
[i,j] = size(mat);
mesh(mat(:,1),yy,mat(:,2:j));
sortie = 1;

```

D.9 *retournement.m*

```

function sortie = retournement(fichier_entree, fichier_sortie)
% Cette fonction permet de retourner les coordonnees du montant pour
% qu'elles apparaissent dans le meme repere que la base
% Eric Moisan, 2005-02-04
format long e;
% Lecture de la matrice mat et du vecteur yy
% L'extension du fichier de sortie doit etre *.mat
load(fichier_entree,'mat','yy');
[i,j] = size(mat);
tmp = zeros(i,j);
tmp(:,1) = mat(:,1);
iteration = 1;
while iteration < j
    iteration = iteration + 1;
    tmp(:,iteration) = mat(:,j - iteration + 2);
end
mat = [];
mat = tmp;
save(fichier_sortie,'mat','yy');
sortie = 1;

```

D.10 *ajust_data.m*

```

function sortie = ajust_data(fichier_entree, fichier_coupe_edm, fichier_sortie)
format long e;
% Eric Moisan, 2005-01-26
% Lecture de la matrice mat et du vecteur yy
% L'extension du fichier de sortie doit etre *.mat
load(fichier_entree,'mat','yy');
% Limites de la matrice
[i,j] = size(mat);
x = mat(:,1)';
y = yy;
z = mat(:,2:j);
% Definition de l'ordre de B-Splines
kx = 4;
ky = 4;
% Definition des noeuds utilises
knotsy = augknt([0:5:180],ky);
knotsx = augknt([x(1):12.5:x(i)],kx);
% Quadrillage utilise pour le calcul des valeurs pour l'affichage graphique
xx = [x(1):2:(x(i))];

```

```

% Calcul des B-splines selon y
sp = spap2(knotsy,ky,y,z);
% Creation des valeurs qui seront utilisees pour le calcul des B-splines selon les axes x et y
coefsy = fnbrk(sp,'c');
% Calcul des B-splines selon x et y
sp2 = spap2(knotsx,kx,x,coefsy.);
% On transpose les coefficients
coefs = fnbrk(sp2,'c').';
% Calcul des valeurs
values = spcol(knotsx,kx,xx)*coefs*spcol(knotsy,ky,yy).';
% Affichage graphique
figure(1);
mesh(xx,yy,values.'). view(150,50);
zz = values.';
shading interp
% On retire de la surface la courbure reliee a la coupe par EDM
% Dimensions de la matrice zz et compteurs u_inc et v_inc
[u,v] = size(zz);
% La soustraction est uniquement effectuee si un fichier est identifie.
% Sinon, on place le chiffre 1 a la place du nom du fichier dans la fonction
if fichier_coupe_edm ~= 1
    % Lecture des donnees de la courbure de la coupe par EDM
    % L'extension du fichier de sortie doit etre *.mat
    load(fichier_coupe_edm,'y','z');
    y_edm = y;
    z_edm = z;
    [u_edm,v_edm] = size(y_edm);
    % On ajuste les donnees de l'edm sur la largeur de la plage de mesures
    y_edm = (y_edm - y_edm(1))*(yy(u)-yy(1))/(y_edm(v_edm)-y_edm(1)) + yy(1);
    % Interpolation des mesures du bloc test sur la plage de mesures
    z_edm = interp1(y_edm,z_edm,yy);
    % Modification de la matrice des coordonnees en Z
    v_inc = 0;
    while v_inc < v
        v_inc = v_inc + 1;
        zz(:,v_inc) = zz(:,v_inc) - z_edm';
    end
end
% Affichage des donnees non positionnees
figure(2);
mesh(xx,yy,zz). view(150,50);
% Calcul permettant de trouver le plan moyen
% Ajustement selon l'axe y
angle_inc = 0.004;
stop = 0;
iteration = 0;
while stop == 0
    iteration = iteration + 1;
    % Calcul le deplacement a effectuer sur le champ de points pour obtenir la
    % somme des deplacements = 0;
    moyenne = mean(mean(zz));
    u_inc = 0;
    while u_inc < u
        u_inc = u_inc + 1;
        mat_tmp = [];
        mat_tmp = [xx;yy(u_inc)*ones(1,v);zz(u_inc,:)];
        % Translation selon l'axe z afin de ramener le plan a z = 0
        mat_trans = [];

```

```

        mat_trans = translation(mat_tmp, 0, 0, -moyenne);
        zz(u_inc,:) = mat_trans(3,:);
    end
    % Verification de la somme des moments par rapport a l'axe y
    u_inc = 0;
    moment = 0;
    while u_inc < u
        u_inc = u_inc+1;
        moment = moment + sum(xx.*zz(u_inc));
    end
    if moment < .01 && moment > -.01
        stop = 1;
    else
        % Rotation des donnees pour tenter d'equilibrer le moment global
        % selon y
        u_inc = 0;
        if moment > 0
            angle_inc = -abs(angle_inc/2);
        else
            angle_inc = abs(angle_inc/2);
        end
        % Ajustement du champ de point selon la rotation a effectuer
        while u_inc < u
            u_inc = u_inc+1;
            mat_tmp = [];
            mat_tmp = [xx;yy(u_inc)*ones(1,v);zz(u_inc,:)];
            mat_rot = [];
            % Rotation effectuee autour du point 0,0,C
            mat_rot = rotation_pt(mat_tmp, 0, 0, 0, 0, angle_inc, 0);
            % Hypothese des petites rotations xx' = xx et yy' = yy
            z(u_inc,:) = mat_rot(3,:);
        end
    end
    if iteration > 50
        stop = 1;
    end
end

% Increment de depart sur l'angle de rotation
angle_inc = 0.002;
stop = 0;
iteration = 1;
while stop == 0
    iteration = iteration + 1;
    % Calcul le deplacement a effectuer sur le champ de points pour obtenir la
    % somme des deplacements = 0;
    moyenne = mean(mean(zz));
    u_inc = 0;
    while u_inc < u
        u_inc = u_inc+1;
        mat_tmp = [];
        mat_tmp = [xx;yy(u_inc)*ones(1,v);zz(u_inc,:)];
        % Translation selon Z afin de ramener le plan a z = 0
        mat_trans = [];
        mat_trans = translation(mat_tmp, 0, 0, -moyenne);
        zz(u_inc,:) = mat_trans(3,:);
    end
    % Verification de la somme des moments par rapport a l'axe x

```

```

u_inc = 0;
moment = 0;
while u_inc < u
    u_inc = u_inc + 1;
    moment = moment + yy(u_inc)*sum(zz(u_inc,:));
end
if moment < .01 && moment > -.01
    stop = 1;
else
    % Rotation des donnees pour tenter d'equilibrer le moment global selon x
    u_inc = 0;
    if moment > 0
        angle_inc = -abs(angle_inc/2);
    else
        angle_inc = abs(angle_inc/2);
    end
    % Ajustement du champ de point selon la rotation a effectuer
    while u_inc < u
        u_inc = u_inc + 1;
        mat_tmp = [];
        mat_tmp = [xx;yy(u_inc)*ones(1,v);zz(u_inc,:)];
        mat_rot = [];
        % Rotation effectuee autour du point 0,0,C
        mat_rot = rotation_pt(mat_tmp, 0, 0, 0, angle_inc, 0, 0);
        % Hypothese des petites rotations xx' = xx et yy' = yy
        zz(u_inc,:) = mat_rot(3,:);
    end
end
if iteration > 50
    stop = 1;
end
end
% Affichage des donnees modifiees
figure(3);
mesh(xx,yy,zz), view(150,50);
shading interp
% Affichage du plan z = 0
hold on
xx_plan = [x(1):10:(x(i)-3)];
yy_plan = [0:10:max(knotsy)];
[XX_plan,YY_plan] = meshgrid(xx_plan,yy_plan);
ZZ_plan = zeros(size(XX_plan));
surf(XX_plan,YY_plan,ZZ_plan);
save(fichier_sortie,'xx','yy','zz');
sortie = 1;

```

D.11 translation.m

```

function t = translation(data, x, y, z)
% Cette fonction effectue une translation sur une matrice (data) de trois
% rangée de vecteurs. Elle retourne une matrice tradatée
data(1,:) = data(1,:) + x;
data(2,:) = data(2,:) + y;
data(3,:) = data(3,:) + z;
t = data;

```

D.12 rotation_pt.m

```
function r = rotation_pt(data, x, y, z, w, phi, k)
% Cette fonction effectue une rotation par rapport a un point donné (x,y,z) pour une matrice data de 3
% rangées de vecteurs selon les angles w (autour de l'axe x), phi (autour de l'axe y) et k (autour de l'axe z).
% Elle retourne une matrice de points retournés.
% Angles en radians
format long e;
w = -w;
phi = -phi;
k = -k;
m = zeros(3,3);
% Construction de la matrice de rotation
m(1,1) = cos(phi)*cos(k);
m(1,2) = sin(w)*sin(phi)*cos(k) + cos(w)*sin(k);
m(1,3) = -(cos(w))*sin(phi)*cos(k) + sin(w)*sin(k);
m(2,1) = -(cos(phi))*sin(k);
m(2,2) = -(sin(w))*sin(phi)*sin(k) + cos(w)*cos(k);
m(2,3) = cos(w)*sin(phi)*sin(k) + sin(w)*cos(k);
m(3,1) = sin(phi);
m(3,2) = -(sin(w))*cos(phi);
m(3,3) = cos(w)*cos(phi);
% Translation sur une matrice (data) de trois rangée de vecteurs.
data(1,:) = data(1,:) - x;
data(2,:) = data(2,:) - y;
data(3,:) = data(3,:) - z;
% Rotation autour du point défini
data = m*data;
% Les coordonnées sont ramenés dans le repere d'origine:
data(1,:) = data(1,:) + x;
data(2,:) = data(2,:) + y;
data(3,:) = data(3,:) + z;
% Renvoie la matrice transformée
r = data;
```

D.13 longueur_unitaire.m

```
function sortie = longueur_unitaire(fichier_entree, fichier_sortie)
% Cette fonction permet de transformer les donnees sous une base x-y de
% longueur unitaire afin de faciliter la comparaison entre les surfaces ainsi que le
% passage des déplacements vers ansys.
% Eric Moisan, 2005-02-04
format long e;
% Lecture de la matrice mat et du vecteur yy
% L'extension du fichier de sortie doit etre *.mat
load(fichier_entree,'xx','yy','zz');
% On transforme les coordonnees x et y sur une base unitaire (de 0 a 1)
[i,j] = size(zz);
y = yy - yy(1);
y = y/(yy(i)-yy(1));
x = xx - xx(1);
x = x/(xx(j)-xx(1));
% Definition des nouvelles coordonnees d'interpolation
xx = [0:.001:1];
```

```

yy = [0:.002:1];
[xi,yi] = meshgrid(xx,yy);
[X,Y] = meshgrid(x,y);
zi = interp2(X,Y,zz,xi,yi);
zz = [];
zz = zi;
% Affichage de la surface
[X,Y] = ndgrid(xx,yy);
figure(2);
mesh(X,Y,zz'), view(150,50);
save(fichier_sortie,'xx','yy','zz');
sortie = 1;

```

D.14 get_nodes.m

```

function sortie = get_nodes(fichier_entree,matrice_entree,fichier_sortie,size_x,size_y)
% Cette fonction permet de lire un fichier de points Ansys de forme *.lis. Un triage est effectuée et on conserve
uniquement l'information reliée aux noeuds de coordonnée z = 0.
% Cette fonction crée un fichier (fichier_sortie) qui pourra être lu par Ansys afin d'appliquer
% des déplacements aux noeuds de la surface z=0.
% Variables d'entree:
    % Matrice entree: matrice sortie de moyenne.m contenant les matrices: xx, yy, zz
    % size_x: dimension en x du maillage
    % size_y: dimension en y du maillage
% Eric Moisan, 2005-02-07
format long e;
%Ouverture des fichiers
lit = fopen(fichier_entree);
ecrit = fopen(fichier_sortie,'w');
% Lecture de la matrice
load(matrice_entree);
% Le fichier est lu une première fois pour en connaître la longueur et les
% dimensions de la matrice à créer pour enregistrer les données
stop = 0;
inc = 0;
while stop == 0;
    inc = inc + 1;
    scrap = fgetl(lit);
    if scrap == -1
        stop = 1;
    end
end
nb_lignes = inc-1;
% Calcul du nombre de blocs de données
nb_blocs_complets = fix((nb_lignes - 5)/22);
longueur_dernier_bloc = nb_lignes - 12 - nb_blocs_complets*22;
longueur_matrice = nb_blocs_complets*20 + longueur_dernier_bloc - 2;
fclose(lit);
lit = fopen(fichier_entree);
% Vecteur qui enregistre les données:
noeuds = zeros(longueur_matrice,4);
no_noeud = 0;
% On saute les premières lignes du fichier
for i = 1:2
    scrap = fgetl(lit);

```

```

end
% Lecture des blocs complets
for inc = 1:nb_blocs_complets
    for i = 1:2
        scrap = fgetl(lit);
    end
    for i = 1:20
        no_noeud = no_noeud+1;
        ligne = fgetl(lit);
        [tmp1,tmp2] = strtok(ligne);
        noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));
        noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
        noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));
        noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
    end
end
% Lecture du dernier bloc
scrap = fgetl(lit);
scrap = fgetl(lit);
for i = 1:(longueur_dernier_bloc - 2)
    no_noeud = no_noeud+1;
    ligne = fgetl(lit);
    noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));
    noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
    noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));
    noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
end
% Il y a un changement de repere entre ansys et matlab afin de faciliter le
% maillage dans ansys.
% Axe x_matlab = -axe z_ansys
% Axe y_matlab = axe y_ansys
% Axe z_matlab = axe x_ansys
% Transfert de la matrice dans l'ordre de matlab selon l'ordre X, Y, Z, no_noeud
noeuds_matlab = [-noeuds(:,4),noeuds(:,3),noeuds(:,2),noeuds(:,1)];
% On conserve uniquement les noeuds sur le plan z = 0
i = 0;
while i < length(noeuds_matlab);
    i = i+1;
    if noeuds_matlab(i,3) > 0.001 || noeuds_matlab(i,3) < -0.001
        noeuds_matlab(i,:) = [];
        i = i - 1;
    end
end
% Interpolation pour trouver les déplacements en z pour tous les noeuds
% On ajuste la matrice de déplacements aux dimensions de la piece maillee dans Ansys
xx = xx*size_x;
yy = yy*size_y;
[X,Y] = meshgrid(xx,yy);
Z = zz;
% Vecteur qui va emmagasiner les déplacements
[u,v] = size(noeuds_matlab)
Zi = zeros(u,1);
i = 0;
while i < u
    i = i+1;
    Zi(i,1) = interp2(X,Y,Z,noeuds_matlab(i,1),noeuds_matlab(i,2));
    if (i/100 - fix(i/100)) == 0;
        fprintf(num2str(i));
    end
end

```

```

        fprintf('\n');
    end
end
% Ajout des déplacements dans la matrice noeuds_matlab_z0
noeuds_matlab(:,3) = Zi;
% Ecriture du fichier
fprintf('debut de l\'écriture du fichier')
i = 0;
while i < u
    i = i+1;
    tmp = 'd,';
    tmp = [tmp,num2str(noeuds_matlab(i,4))];
    tmp = [tmp,','];
    % Le signe negatif permet d'imposer les déplacements dans Ansys afin de
    % repositionner la surface libre dans sa position initiale avant la
    % coupe
    tmp = [tmp,num2str(-noeuds_matlab(i,3))];
    tmp = [tmp,',',,UX,',',,'];
    fprintf(ecrit, '%s\n', tmp);
end

% Affichage de la surface
tri = delaunay(noeuds_matlab(:,1),noeuds_matlab(:,2));
trimesh(tri,noeuds_matlab(:,1),noeuds_matlab(:,2),noeuds_matlab(:,3));
fclose(lit);
fclose(ecrit);
sortie = 1;

```

D.15 get_contraintes.m

```

function sortie = get_contraintes(fichier_entree_noeuds,fichier_entree_stress,matrice_sortie)
% Cette fonction permet de lire un fichier de points Ansys de forme *.lis ainsi qu'un fichier de
% contraintes en chaque noeuds *.lis. Un triage conserve uniquement l'information reliee aux noeuds
% de coordonnee z = 0.
% La fonction cree un fichier matlab qui pourra etre utiliser pour afficher les contraintes.
% Eric Moisan, 2005-04-08
format long e;
%Ouverture des fichiers
lit_noeuds = fopen(fichier_entree_noeuds);
lit_stress = fopen(fichier_entree_stress);
% Le fichier des noeuds est lu une premiere fois pour en connaitre la longueur et les
% dimensions de la matrice a creer pour enregistrer les donnees
stop = 0;
inc = 0;
while stop == 0;
    inc = inc + 1;
    scrap = fgetl(lit_noeuds);
    if scrap == -1
        stop = 1;
    end
end
nb_lignes = inc-1;
% Calcul du nombre de blocs de donnees
% nb_blocs_complets = fix((nb_lignes - 5)/22);
% longueur_dernier_bloc = nb_lignes - 12 - nb_blocs_complets*22;

```

```

% longueur_matrice = nb_blocs_complets*20 + longueur_dernier_bloc - 2;
% Calcul du nombre de blocs de donnees
nb_blocs_complets_noeuds = fix((nb_lignes - 5)/22);
longueur_dernier_bloc_noeuds = nb_lignes - 12 - nb_blocs_complets_noeuds*22;
longueur_matrice_noeuds = nb_blocs_complets_noeuds*20 + longueur_dernier_bloc_noeuds - 2;
fclose(lit_noeuds);
lit = fopen(fichier_entree_noeuds);
% Le fichier des contraintes est lu une premiere fois pour en connaitre la longueur et les
% dimensions de la matrice a creer pour enregistrer les donnees
stop = 0;
inc = 0;
while stop == 0;
    inc = inc + 1;
    scrap = fgetl(lit_stress);
    if scrap == -1
        stop = 1;
    end
end
nb_lignes = inc-1;
% Calcul du nombre de blocs de donnees
nb_blocs_complets_stress = fix((nb_lignes - 11)/46);
longueur_dernier_bloc_stress = nb_lignes - 11 - nb_blocs_complets_stress*46;
longueur_matrice_stress = nb_blocs_complets_stress*35 + longueur_dernier_bloc_stress - 11;
fclose(lit_stress);
lit = fopen(fichier_entree_stress);
% Triage des noeuds situes a z = 0;
% Vecteur qui enregistre les donnees dans cet ordre:
% Numero du noeux, coord Z
noeuds = zeros(longueur_matrice_noeuds,4);
no_noeud = 0;
% On saute les premieres lignes du fichier
for i = 1:2
    scrap = fgetl(lit_noeuds);
end
% Lecture des blocs complets
for inc = 1:nb_blocs_complets_noeuds
    for i = 1:2
        scrap = fgetl(lit_noeuds);
    end
    for i = 1:20
        no_noeud = no_noeud+1;
        ligne = fgetl(lit_noeuds);
        noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));
        noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
        noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));
        noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
    end
end
% Lecture du dernier bloc
for i = 1:2
    scrap = fgetl(lit_noeuds);
end
for i = 1:(longueur_dernier_bloc_noeuds - 2)
    no_noeud = no_noeud+1;
    ligne = fgetl(lit_noeuds);
    noeuds(no_noeud,1) = str2num(ligne(1:10));
    noeuds(no_noeud,2) = str2num(ligne(11:22));
    noeuds(no_noeud,3) = str2num(ligne(23:34));

```

```

        noeuds(no_noeud,4) = str2num(ligne(35:46));
    end
    % Il y a un changement de repere entre ansys et matlab.
    % Axe x_matlab = -axe z_ansys
    % Axe y_matlab = axe y_ansys
    % Axe z_matlab = axe x_ansys
    % Transfert de la matrice dans l'ordre de matlab selon l'ordre X, Y, Z,
    % no_noeud
    noeuds_matlab = [-noeuds(:,4),noeuds(:,3),noeuds(:,2),noeuds(:,1)];
    % On conserve uniquement les noeuds sur le plan z = 0
    i = 0;
    while i < length(noeuds_matlab);
        i = i+1;
        if noeuds_matlab(i,3) > 0.001 || noeuds_matlab(i,3) < -0.001
            noeuds_matlab(i,:) = [];
            i = i - 1;
        end
    end
    % Traitement des noeuds inclus dans le fichier stress
    % Vecteur qui enregistre les donnees des contraintes
    stress = zeros(longueur_matrice_stress,2);
    no_stress = 0;
    % On saute les premieres lignes du fichier
    for i = 1:2
        scrap = fgetl(lit);
    end
    % Lecture des blocs complets
    for inc = 1:nb_blocs_complets_stress
        for i = 1:11
            scrap = fgetl(lit_stress);
        end
        for i = 1:35
            no_stress = no_stress+1;
            ligne = fgetl(lit_stress);
            stress(no_stress,1) = str2num(ligne(1:8));
            stress(no_stress,2) = str2num(ligne(9:21));
        end
    end
    % Lecture du dernier bloc
    for i = 1:11
        scrap = fgetl(lit_stress);
    end
    for i = 1:(longueur_dernier_bloc_stress - 11)
        no_stress = no_stress+1;
        ligne = fgetl(lit_stress);
        stress(no_stress,1) = str2num(ligne(1:8));
        stress(no_stress,2) = str2num(ligne(9:21));
    end
    % On agrandit la matrice noeuds
    [u,v] = size(noeuds_matlab);
    noeuds_matlab = [noeuds_matlab,zeros(u,1)];
    for i = u:-1:1
        coord = find(stress(:,1) == noeuds_matlab(i,4));
        if isempty(coord)
            noeuds_matlab(i,:) = [];
        else
            noeuds_matlab(i,5) = stress(coord,2);
        end
    end

```

```

end
% Enregistrement du fichier de donnees
mat = noeuds_matlab;
save(matrice_sortie,'mat');
fclose(lit_noeuds);
fclose(lit_stress);
sortie = 1;

```

D.16 plot_contraintes.m

```

function f = plot_contraintes(matrice_entree,matrice_sortie,bandes,rangees)
% Cette fonction permet de lire la matrice de sortie de la fonction get_contraintes. La fonction place les
% coordonnees en ordre croissant pour les directions X et Y puis trace les resultats sur un graphique.
% La matrice d'entree bande de dimension X par 2 permet de ne pas considerer certaines bandes ou les
% donnees ne sont pas bonnes. Le debut de la bande (coordonnee x) doit etre entree dans la premiere
% colonne de la matrice et la fin de la bande dans la deuxieme colonne. La matrice peut avoir une
% longueur X variable. Si aucune bande doit etre enlevee, bandes = 1. La meme chose est effectuee pour
% des rangees.
% Eric Moisan, 2005-04-10
format long e;
load(matrice_entree);
mat(:,3:4) = [];
% On place la matrice en ordre selon la coordonnees X
[scrap,ordre] = sort(mat,1);
mat1 = zeros(size(mat));
for i = 1:length(ordre)
    mat1(i,:) = mat(ordre(i),:);
end
% On trouve le nombre de colonne a effectuer correspondant aux rangees
% d'elements dans le modele d'elements finis
u = 1;
stop = 0;
while stop == 0
    u = u+1;
    if find(round(mat1(u,1)*10)/10 ~= round(10*mat(1,1))/10)
        stop = 1;
        u = u-1;
    end
end
% On cree les matrices qui contiennent les informations sur les positions et contraintes selon Z
v = length(mat1)/u;
X = zeros(u,v);
Y = zeros(u,v);
Z = zeros(u,v);
for i = 1:v
    X(:,i) = mat1((u*i-u+1):(u*i),1);
    Y_ini(:,i) = mat1((u*i-u+1):(u*i),2);
    Z_ini(:,i) = mat1((u*i-u+1):(u*i),3);
end
% Triage des donnees colonne par colonne en fonction de la positions Y
Y = zeros(size(Y_ini));
Z = zeros(size(Z_ini));
for j = 1:v
    [scrap,ordre] = sort(Y_ini(:,j),1);
    for i = 1:u

```

```

        Y(i,j) = Y_ini(ordre(i,1),j);
        Z(i,j) = Z_ini(ordre(i,1),j);
    end
end
% Sauvegarde des contraintes et positions
save(matrice_sortie,'X','Y','Z')
% Les bandes sont enlevees des donnees
if bandes ~= 1
    [u_bandes,v_bandes] = size(bandes);
    for i = 1:u_bandes
        for j=1:v
            if X(1,j) >= bandes(i,1) && X(1,j) <= bandes(i,2)
                Z(:,j) = 0;
            end
        end
    end
end
% Les rangees sont enlevees des donnees
if rangees ~= 1
    [u_rangees,v_rangees] = size(rangees);
    for i = 1:u_rangees
        for j=1:v
            if Y(j,1) >= rangees(i,1) && Y(j,1) <= rangees(i,2)
                Z(j,:) = 0;
            end
        end
    end
end
end
figure(3);
axes('FontSize',12);
hold off
surf(X,Y,Z);
shading interp;
colorbar;
% Calcul des contraintes maximales et leur positions
Zmin = min(min(Z));
[u_min,v_min] = find(Z == Zmin);
Xmin = X(u_min,v_min);
Ymin = Y(u_min,v_min);
Zmax = max(max(Z));
[u_max,v_max] = find(Z == Zmax);
Xmax = X(u_max,v_max);
Ymax = Y(u_max,v_max);
fprintf(['Contrainte minimale = ',num2str(Zmin),' MPa en x = ', num2str(Xmin),'mm, y = ',num2str(Ymin),'mm\n']);
fprintf(['Contrainte maximale = ',num2str(Zmax),' MPa en x = ', num2str(Xmax),'mm, y = ',num2str(Ymax),'mm\n']);
% Affichage des positions des contraintes maximales et minimales
figure(3);
hold on;
plot3(Xmin,Ymin,Zmin,'ob');
plot3(Xmax,Ymax,Zmax,'or');
xlabel('Position suivant x (mm)');
ylabel('Position suivant y (mm)');
title('Contrainte résiduelle en fonction de la position (MPa)','FontSize',14)
f = 1;

```

D.17 *plot_profil_moyen.m*

```

function f = plot_profil_moyen_base(matrice_entree1, bandes, rangees)
% Cette fonction permet de lire 2 matrices de sortie de la fonction plot_contraintes. Elle trace le profil
% moyen des contraintes en fonction de la longueur des échantillons, dans un plan 2-D
% Eric Moisan, 2005-05-15
format long e;
petite_matrice = 1;
load(matrice_entree1);
[u,v] = size(X);
% Les bandes sont enlevées des données
bandes_supp = [];
if bandes ~= 1
    [u_bandes,v_bandes] = size(bandes);
    for i = 1:u_bandes
        for j=1:v
            if X(1,j) >= bandes(i,1) && X(1,j) <= bandes(i,2)
                bandes_supp = [bandes_supp,j];
            end
        end
    end
end
for i = length(bandes_supp):-1:1
    Z(:,bandes_supp(i)) = [];
end
bandes_supp = [];
% Les rangees sont enlevées des données
if rangees ~= 1
    [u_rangees,v_rangees] = size(rangees);
    for i = 1:u_rangees
        for j=1:u
            if Y(j,1) >= rangees(i,1) && Y(j,1) <= rangees(i,2)
                bandes_supp = [bandes_supp,j];
            end
        end
    end
end
end
% On affiche les données retirées environ égales à 0
for i = length(bandes_supp):-1:1
    Z(bandes_supp(i),:) = 0;
end
moyenne = mean(Z,2);
i = length(Y(:,1));
yy = Y(:,1);
y = yy - yy(1);
y = y/(yy(i)-yy(1));
% On interpole les points à l'aide de splines
Y_affichage = [0:.005:1]';
Z_affichage = interp1(y,moyenne,Y_affichage,'cubic');
figure(1)
axes('FontSize',12);
plot(Y_affichage,Z_affichage,'k');
xlabel('Position relative suivant y/C');
ylabel('Contrainte résiduelle moyenne (MPa)');
f = 1;

```