

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux (ASM)

Par : MOULKHALOUA Abdelkarim

Sujet

Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure sur le comportement en fatigue

Soutenu publiquement, le **04 / 06 /2023**, devant le jury composé de :

M. HADJOUI Fethi	MCB	Université de Tlemcen	Président
M. KARA ALI Djamel	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. BENACHOUR MUSTAPHA	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme. SERIARI Fatima Zohra	Docteur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023.

Remerciement :

Avant d'entamer mon travail, Je remercie ALLAH Le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent projet.

*Au terme de ce travaille, j'ai l'honneur et le plaisir de présenter ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur Monsieur **BENACHOUR Mustapha**, professeur à l'université Abou Bekr Belkadi de Tlemcen, qu'il a dirigé mon mémoire et de m'avoir donné l'opportunité de découvrir le monde de la recherche.*

J'aimerais également le remercier pour sa confiance, c'est grâce à lui, à ses remarques, et ses conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser

*Également, j'associe mes remerciements à Madame **SERIARI Fatima Zohra***

*Je tiens à remercier vivement Monsieur **HADJOUI Fethi**, maître de conférence à l'université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur d'être le Président de mon jury.*

*Je remercie aussi monsieur **KARA ALI Djamel**, maître de Conférence à l'université de Tlemcen et, qui ont accepté d'examiner ce travail.*

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de génie mécanique ~~pr~~ leurs contributions, leurs précieux conseils durant ma formation.

Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribués de près ou de loindans l'accomplissement de mon travail

Dédicaces

Avant tout, Elhamdulillah puisque c'est grâce à dieu je suis Arrive-la

J'ai le grand plaisir de dédier ce travail :

A mes chers parents qui grâce à leur sacrifice et leur amour, je suis

Arrivé à ce niveau.

A ma famille, mes frères,

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes amis et mes collègues.

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé.

Résumé

L'assemblage par soudage est le moyen le plus répandu dans l'industrie et consiste à assembler deux ou plusieurs pièces métalliques par fusion pour créer une liaison permanente entre eux. Cependant, cet assemblage peut contenir des défauts qui affectent les performances de ces assemblages et sont soumis à des sollicitations répétées et cycliques appelées fatigue. Le comportement en fatigue des assemblages soudés dépend de plusieurs paramètres : type de matériau, rapport de charge cyclique appliquée et longueur initiale de la fissure, coefficient de contrainte, géométrie de cordon, etc.

Le but général de ce travail est de Présenter un état de l'art sur les effets des techniques d'amélioration des joints de soudure sur le comportement en fatigue.

En résumé, les techniques illustrés dans ce mémoire offrent des traitements rentables pour améliorer la résistance à la fatigue des joints soudés et introduit des contraintes résiduelles de compression qui permettent de réduire les contraintes résiduelles dus aux charges appliquées, et en conséquence permet d'améliorer la durée de vie en fatigue.

Mots clés : soudage, défauts du soudage, les techniques d'amélioration, contraintes résiduelles, fissuration par fatigue, durée de vie en fatigue, dureté, limite d'endurance.

Summary

Welding assembly is the most common method in the industry and involves joining two or more metal pieces to create a permanent connection between them.

However, this assembly can contain defects that affect the performance of these joints and are subjected to repeated and cyclic loading known as fatigue. The fatigue behavior of welded assemblies depends on several parameters: material type, applied cyclic load ratio, initial crack length, stress concentration factor, weld geometry, etc.

The general aim of this work is to present a state-of-the-art review on the effects of welding joint improvement techniques on fatigue behavior.

In summary, the techniques illustrated in this thesis provide cost-effective treatments to enhance the fatigue strength of welded joints and introduce compressive residual stresses that help reduce the residual stresses caused by applied loads, consequently improving the fatigue life.

Keywords: *welding, welding defects, improvement techniques, residual stresses, fatigue cracking, fatigue life, hardness, endurance limit.*

ملخص

التجميع بواسطة اللحام هو الطريقة الأكثر انتشاراً في الصناعة وتتضمن تجميع قطعتين أو أكثر من المعدن لإنشاء ربط دائم بينهما. ومع ذلك، يمكن أن يحتوي هذا التجميع على عيوب تؤثر على أداء هذه التجمعات وتخضع لتحميلات متكررة ودورية تسمى التعب الميكانيكي. يعتمد سلوك التعب للتجمعات الملحومة على العديد من العوامل: نوع المواد، نسبة التحميل الدوري المطبقة وطول الشق الأولي، معامل التركيز الإجهادي، هندسة اللحام، إلخ.

الهدف العام لهذا العمل هو تقديم مراجعة لحالة الفن حول تأثير تقنيات تحسين تجاوير اللحام على سلوك التعب. في الخلاصة، توفر التقنيات الموضحة في هذه الرسالة معاملات فعالة من حيث التكلفة لتحسين مقاومة التعب للتجاوير، الملحومة وتعمل على إدخال توترات متبقية ضاغطة تساهم في تقليل التوترات المتبقية الناجمة عن التحميل المطبق وبالتالي تساهم في تحسين عمر التعب.

الكلمات المفتاحية: اللحام، عيوب اللحام، تقنيات التحسين، التوترات المتبقية، تشقق التعب، عمر التعب
صلادة، الحد الأقصى للتحمل.

Table des matières

Titre	Pages
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des abréviations</i>	
<i>Liste des symboles</i>	
<i>I. Introduction Générale</i>	1
Chapitre 1	
<i>I. Introduction</i>	3
<i>II. Généralités sur les opérations de soudage</i>	3
<i>II – 1. Avantages techniques et économiques du soudage</i>	3
<i>II-2. Types de soudures</i>	4
<i>II-3. Défauts de soudure</i>	5
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fissuration</i> • <i>Soufflures et piqures</i> • <i>Caniveaux</i> • <i>Morsures</i> • <i>Manque de pénétration</i> • <i>Inclusions</i> • <i>Défauts retassures et criques</i> • <i>Défauts géométriques des cordons</i> 	6 7 7 8 8 9 10
<i>I. Conclusion</i>	11
<i>Références</i>	11
Chapitre 2	
<i>I. Introduction</i>	13
<i>II. Notion générale de la fatigue</i>	13
<i>II-1. Limite de la fatigue</i>	15
<i>II-2. Durée de vie en fatigue</i>	15
<i>II-3. Fatigue des composants soudés</i>	16
<i>II-4. Facteurs affectant la résistance à la fatigue des joints de soudures</i>	17
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Imperfections de soudure</i> 	18

<ul style="list-style-type: none"> • <i>Contraintes résiduelles</i> • <i>Effet de la concentration des contraintes résiduelles</i> • <i>Effet de taille</i> 	19
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Effet de la concentration des contraintes résiduelles</i> • <i>Effet de taille</i> 	21
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Effet de taille</i> 	22
III. <i>Généralités sur la propagation des fissures en fatigue</i>	21
III-1. <i>Phase d'endommagement par fatigue</i>	21
III-1.1. <i>Phase d'endommagement par fatigue</i>	22
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Amorçage d'une microfissure</i> • <i>Propagation des fissures</i> 	22
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Propagation des fissures</i> 	23
IV. <i>Conclusion</i>	25
<i>Références</i>	26
Chapitre 3	
I. <i>Introduction</i>	30
II. <i>Techniques d'amélioration des joints de soudure</i>	30
II-1. <i>Techniques de meulage</i>	31
II-1.1. <i>Techniques de meulage</i>	31
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Meulage des bavures</i> • <i>Principe de meulage des bavures</i> • <i>Meulage des disques</i> • <i>Erosion par jet d'eau</i> 	31
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Principe de meulage des bavures</i> • <i>Meulage des disques</i> • <i>Erosion par jet d'eau</i> 	32
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Meulage des disques</i> • <i>Erosion par jet d'eau</i> 	32
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Erosion par jet d'eau</i> 	33
II-2. <i>Techniques de refusion</i>	33
II-2.1. <i>Techniques de refusion</i>	33
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Refusion TIG</i> • <i>Conditions et procédure de refusion TIG</i> • <i>Refusion par plasma</i> 	33
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Conditions et procédure de refusion TIG</i> • <i>Refusion par plasma</i> 	34
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Refusion par plasma</i> 	35
II-3. <i>Techniques d'amélioration spéciaux</i>	35
II-3.1. <i>Techniques d'amélioration spéciaux</i>	35
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Contrôle de profil de soudure</i> 	35
II-4. <i>Méthodes basées sur l'introduction des contraintes résiduelles :</i>	36
II-4.1. <i>Méthodes basées sur l'introduction des contraintes résiduelles :</i>	36
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grenaillage</i> • <i>Martelage</i> • <i>Martelage à l'aiguille</i> • <i>Martelage par ultrasons</i> 	36
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Martelage</i> • <i>Martelage à l'aiguille</i> • <i>Martelage par ultrasons</i> 	37
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Martelage à l'aiguille</i> • <i>Martelage par ultrasons</i> 	38
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Martelage par ultrasons</i> 	39
II-5. <i>Réduction des contraintes résiduelles par un traitement thermique</i>	41
III. <i>Conclusion</i>	42
<i>Références</i>	43

Chapitre 4	
<i>I. Introduction</i>	47
<i>II. Influence de meulage</i>	47
<i>III. Influence de l'érosion par jet d'eau</i>	54
<i>IV. Influence de refusion TIG et dressage plasma</i>	57
<i>V. Techniques d'amélioration spéciaux</i>	63
<i>V-1. Influence de profilage de contour d'un joint de soudure</i>	63
<i>VI. Influence des méthodes mécaniques</i>	64
<i>VI-1. Influence de grenailage</i>	64
<i>VI-2. Influence de martelage</i>	71
<i>VI-3. Influence de martelage par ultrasons</i>	78
<i>VII. Influence des méthodes de réduction des contraintes résiduelles</i>	80
<i>VIII-1. Influence de traitement thermique</i>	80
<i>VIII. Synthèse</i>	85
<i>Références</i>	86
<i>Conclusion générale</i>	90
	94

Index des figures

Chapitre 01

Figure	Pages
<i>Figure 1 : Zones d'un joint soudé</i>	5
<i>Figure 2 : Fissuration à chaud dans la zone fondue</i>	6
<i>Figure 3 : Fissuration à froid dans un pied de cordon de soudure</i>	7
<i>Figure 4 : Fissures dans les joints de soudures bout à bout et en angles</i>	7
<i>Figure 5 : Défauts de soufflures</i>	7
<i>Figure 6 : Défauts de caniveaux</i>	8
<i>Figure 7 : Défauts de morsure</i>	8
<i>Figure 8 : Défaut manque de pénétration</i>	8
<i>Figure 9 : Défaut d'inclusions</i>	9
<i>Figure 10 : Défaut de retassures et criques</i>	9
<i>Figure 11 : Défaut de géométries des cordons</i>	9
<i>Figure 12 : surépaisseur excessive du cordon</i>	10

Chapitre 02

Figure	Pages
<i>Figure 1 : Nomenclature utilisée pour décrire un chargement cyclique d'amplitude constante</i>	14
<i>Figure 2 : Représentation schématique des trois domaines de fatigue</i>	15
<i>Figure 3 : Courbe d'endurance pour certaines assemblages soudés</i>	16
<i>Figure 4 : Fissures en pied du cordon et à la racine</i>	17
<i>Figure 5 : Contraintes résiduelles dans un joint soudé</i>	18
<i>Figure 6 : Concentration de contrainte au pied du cordon de soudure</i>	20
<i>Figure 7. Représentation schématique de la phase d'amorçage</i>	22
<i>Figure 8. Variation de la vitesse de fissuration et paramètres d'influence</i>	23

Chapitre 03

Figure	Pages
<i>Figure 1 : Classification des techniques d'amélioration des joints de soudure</i>	29
<i>Figure 2 : Meulage des bavures</i>	30
<i>Figure 3 : Technique de meulage des bavures</i>	30
<i>Figure 4 : Refusions TIG</i>	32
<i>Figure 5 : Position typique de la torche et de la zone de dressage</i>	33
<i>Figure 6 : Principe du grenailage</i>	34
<i>Figure 7 : Machine de martelage (a) Principe de conception de l'actionneur (b) Montage expérimental (c) Illustration des paramètres important du processus de martelage</i>	36
<i>Figure 8 : Principe de martelage à aiguille</i>	37
<i>Figure 9 : Outil de martelage ultrasonique</i>	38
<i>Figure 10 : Le transducteur de martelage par ultrason</i>	38
<i>Figure 11 : Profile of amélioré du pied de cordon de soudure par martelage ultrasonique</i>	39

Chapitre 4

Figure	Pages
<i>Figure 1 : Courbes S-N des joints soudés sous-marins de DH36 mesurés par la contrainte nominale ($R = 0,1$)</i>	46
<i>Figure 2 : Profils des contraintes résiduelles dans le sens de la profondeur</i>	46
<i>Figure 3 : Sites d'amorçage des fissures de fatigue</i>	47
<i>Figure 4 : Micro dureté moyenne à 50 μm de la surface</i>	47
<i>Figure 5 : (a) Géométrie soudée et traitement par meulage, (b) détail</i>	48
<i>Figure 6 : Comparaison des formes de soudure (a) Sans traitement (b) Meulée</i>	49
<i>Fatigue 7 : Durée de vie en fatigue</i>	49

<i>Figure 9 : Influence de la technique d'amélioration par meulage en soudage MAG de l'acier inoxydable Duplex S31803 à air</i>	50
<i>Figure 10 : Influence du meulage de l'acier inoxydable Duplex S31803 en solution corrosive à 3 % de NaCl</i>	51
<i>Figure 11 : Influence du meulage sur le joint soudé en acier inoxydable 304L</i>	51
<i>Figure 12 : Comparaison des données de fatigue analysées sur la base d'une pente $m=4$ avec les courbes $S-N$ de conception recommandées pour l'état brut de soudage ($m=3$)</i>	51
<i>Figure 13 : Résultat du test fissuration par corrosion dans un assemblage bout à bout avec et sans traitement de martelage au jet d'eau</i>	52
<i>Figure 14 : Evolutions des contraintes résiduelles des joints soudés en AISI 304 traités à : (a) $p = 20$ MPa et $z = 45$ mm (b) $p = 40$ MPa et $z = 70$ mm (c) $p = 60$ MPa et $z = 100$ mm à l'aide d'une circulaire buse de $d = 1,9$ mm (p : pression, z : distance entre le milieu du cordon et la nature des contraintes résiduelles de compression)</i>	53
<i>Figure 15 : Influence des paramètres de traitement par jet d'eau sur le niveau des contraintes résiduelles. (a) grenailage par jet d'eau avec abrasifs (AWJ) du cpTi ; (b) grenailage par jet d'eau avec abrasifs (AWJ) du Ti6Al4V; (c) Comparaison du traitement par jet d'eau (WJ) du cpTi et du Ti6Al4V</i>	53
<i>Figure 16a : Influence du nombre de passes du jet d'eau et de l'avance sur la rugosité moyenne de la surface traitée</i>	54
<i>Figure 16b : Influence du nombre de passes du jet d'eau et de l'avance sur la rugosité moyenne de la surface traitée</i>	55
<i>Figure 17: Profil des joints soudés (a) refusion TIG et (b) dressage par Plasma</i>	55
<i>Figure 18 : Courbes d'endurances $S-N$ et limites de confiance (a) séries AW. (b) série TAS (c) série TDR. (d) série PDR</i>	56
<i>Figure 19 : Distribution des contraintes résiduelles longitudinales en fonction de la distance à partir du pied du cordon de soudure (a) série AW. (b) refusion TIG, (c) série PDR par Plasma</i>	57
<i>Figure 20 : Courbe d'endurance $S-N$ obtenue à partir des essais de fatigue à $R=0.1$ pour différents traitements d'amélioration sus indiqués</i>	58

<i>Figure 21 : Micro dureté autour du pied du cordon de soudure à différents traitements</i>	60
<i>Figure 22: Amélioration de la résistance à la fatigue par profilage des cordons de soudure</i>	60
<i>Figure 23 : Courbe de conception S-N (API) - Amélioration de la résistance à la fatigue par profilage</i>	61
<i>Figure 24. Surface grenillée d'un échantillon soudé</i>	62
<i>Figure 25 : Ruptures par clivage après sous essai de traction d'une soudure réalisée par TIG, pour (a) éprouvette non grenillée, (b) Eprouvette grenillée</i>	63
<i>Figure 26 : Morphologie en coupe transversale de l'éprouvette de grenillage</i>	63
<i>Figure 27 : Micro dureté de la couche superficielle avant et après grenillage.</i>	63
<i>Figure 28. Ruptures de fatigue d'éprouvettes non traitées obtenues à (a) 20 °C, (b) 350 °C, (c) 650 °C et éprouvettes grenillées à (d) 20 °C, (e) 350 °C, (f) 650 °C sous contrainte maximale $\sigma_{max} = 530$ MPa</i>	64
<i>Figure 29 : Courbes S-N de l'alliage GH4169 avant et après grenillage à différentes températures</i>	65
<i>Figure 30 : Redistribution des contraintes résiduelles par grenillage dans les échantillons (a) B (TRS), (b) B (CRS) échantillons</i>	66
<i>Figure 31 : Distributions des contraintes résiduelles pour tous les échantillons, (a) σ_x, (b) σ_z, toutes les lignes proviennent de FE</i>	66
<i>Figure 32 : (a) dureté de surface pour tous les spécimens, (b) distribution de la micro-dureté en profondeur</i>	67
<i>Figure 33 : Répartition de la micro-dureté dans la couche superficielle du matériau base et du laser éléments soudés par poutres, et composants soudés GTAW</i>	68
<i>Figure 34 : Contrainte interne dans la soudure (W), la zone affectée thermiquement (HAZ) et le matériau de base (BM) dans l'axe x (a) et l'axe y (b) avant et après grenillage</i>	68
<i>Figure 35 : Croissance des fissures de bord dans les spécimens : 1, spécimens non martelés ; 2, spécimen martelé (pression de l'outil 0,5 MPa</i>	69
<i>Figure 36 : Relation entre le taux de croissance des fissures de fatigue da/dN et la plage d'intensité de contrainte AK : 1, fissure dans les spécimens non martelés ; 2, fissure dans les éprouvettes martelées (pression de l'outil 0,5 MPa)</i>	70

<i>Figure 37: Distribution de RS à travers l'épaisseur de la soudure (a) Moyenne longitudinale (b) . Moyenne transversale</i>	71
<i>Figure 38 : . Dureté de surface pour différentes procédures de réparation</i>	71
<i>Figure 39: Dureté du sous-sol dans les échantillons S41500 martelés et non martelés</i>	72
<i>Figure 39: Dureté du sous-sol dans les échantillons S41500 martelés et non martelés</i>	72
<i>Figure 40 : Résultats de fatigue pour WM, WMHM, S41500M en flexion inversée et CA6NM en fatigue traction-compression uni axiale</i>	72
<i>Figure 41 : Résultats des contraintes résiduelles sur différentes configurations (valeurs moyennes et barres d'erreur correspondant à l'écart type)</i>	73
<i>Figure 42 : Résultats de fatigue avec les classes FAT</i>	74
<i>Figure 43 : Comparaison des résistances à la fatigue 'Vm, 50 % avec les classes FAT selon EC 3 et IIW</i>	74
<i>Figure 44 : Comparaison des résultats des tests dans les propositions de conception existantes pour la condition de pointe martelée à haute fréquence</i>	75
<i>Figure 45 : Contrainte résiduelle de soudure avec filler 316 SS comparaison par martelage par ultrason par perceur 4 mm et sans traitement</i>	76
<i>Figure 46 : Micro-dureté du pied de soudure par rapport à la profondeur de la surface</i>	76
<i>Figure 47 : Soudure courbe S-N par un remplisseur 347 SS et 316 SS à l'application UP avec une panne différente diamètres</i>	77
<i>Figure 48: vue picturale des différentes zones soudées</i>	78
<i>Figure 49 : Variations de micro-dureté à la surface des différentes zones de soudure</i>	79
<i>Figure 50 : L'effet du post-traitement thermique sur da/dN vs ΔK pour les alliages d'aluminium 7075-T651 (a) Matériau de base (b) Friction Stir Joint soudé sous une charge d'amplitude constante</i>	80
<i>Figure 51: (a) Schéma de variation du taux de croissance des fissures (da/dN) en fonction de la plage de facteur d'intensité de contrainte (DK) et de la valeur seuil (DKth) en fonction de la contrainte rapport R pour les matériaux de base. (b) Relation entre la valeur du seuil de croissance des fissures et le rapport de contrainte</i>	81
<i>Figure 52 : Niveau de contrainte résiduelle de surface d'échantillons soudés et traités au laser de deux nuances d'acier différentes : S690QL et S420MC. Les échantillons sont différents et épaisseur de plaque (a) 10 mm (b) 5 mm</i>	82

Index des tableaux

Tableau	Pages
<i>Tableau 1 : Effet du traitement de meulage d'un joint soudé sur la durée de vie en fatigue</i>	48
<i>Tableau 2 : Effet des traitements d'améliorations sur l'angle et le rayon au pied du cordon</i>	59
<i>Tableau 3 : Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 5754 avant et après grenailage</i>	62

Abréviation

ZAT : La zone affectée thermiquement

ZF : La zone de fusion

MB : Métal de base

ASTM : l'Américain Société pour les essais et les matériaux

R : Rapport de chargement ou ratio de fatigue donné par $\sigma_{min}/\sigma_{max}$.

TTPS : Traitement thermique post-souder

TIG : Tungstène Inert Gas

IIW : Institue international de soudage

AWS : Société American de soudage

MHP : Martelage Haute Pression

MPU : Martelage par ultrasons

TIU : Traitement par impact par ultrasons

HFMI : Martelage haute fréquence

PDR : Dressage au plasma

S-N : Courbe d'endurance

API : L' American Petroleum Institute

C : Carbone

Mn : Magnésiums

Cr : Chrome

Mo : Molybdène

V : Vanadium

Ni : NICKEL

Cu : Cuivre

Ar : Argon

Fe : Fer

Si : Silicium

Symboles

MPa : Méga pascal (unité de pression)

M : mètre

N : Nombre de cycles

K_f : Facteur de concentration de contrainte

ΔK_I : Facteur d'intensité de contrainte

K_{eff} : Facteur d'intensité de contrainte effective

R_{eff} : Rapport de charge effectif,

da/dN : Vitesse de fissuration

σ_a : L'amplitude de contrainte ou la contrainte alternée ;

σ_m : Contrainte moyenne ;

σ_{max} : Contrainte maximale ;

$\Delta\sigma$: Variation totale de contrainte soit $\sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$;

σ_{min} : Contrainte minimale ;

C, m : Coefficient de Paris dépend du matériau

H : La dureté

Introduction

I. INTRODUCTION :

Le soudage est un processus de fabrication couramment utilisé pour joindre deux pièces de métal par fusion. Cependant, les joints de soudure peuvent présenter des défauts tels que des porosités, des fissures ou des soudures incomplètes, etc., qui peuvent affaiblir la structure de la pièce et réduire sa durée de vie.

La qualité des joints de soudure est essentielle pour garantir la sécurité, la durabilité et les performances des structures ou des composants qui en dépendent.

Les techniques d'amélioration des joints de soudure ont pour objectif de renforcer cette qualité, en réduisant les défauts et la sévérité des concentrations des contraintes au niveau des cordons en améliorant leur propriété mécanique et leur durée de vie. Ces techniques peuvent être utilisées pour divers types de soudures, tels que les soudures à l'arc, les soudures au laser, les soudures à friction, les soudures par ultrasons, etc.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier l'influence des techniques d'amélioration sur le comportement en fatigue d'un joint de soudure

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une introduction générale sur le processus de soudage, en mettant l'accent sur les différents défauts de soudure.
- Le deuxième chapitre traite de la fatigue et de la fissuration des matériaux.
- Le troisième chapitre présente une vue d'ensemble des techniques courantes d'amélioration des joints de soudure.
- Le quatrième chapitre est consacré aux résultats et interprétations de l'influence des techniques d'amélioration des joints de soudure sur le comportement en fatigue.

Chapitre 1

I. INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage adaptés aux différents composants à fabriquer et aux propriétés des métaux utilisés. Le soudage est actuellement l'une des méthodes d'assemblage les plus courantes dans l'industrie car il permet la fabrication efficace et fiable des composants indémontables, notamment dans le domaine de la construction mécanique pour la fabrication de navires, de trains, d'avions, de fusées, d'automobiles, de ponts, tuyaux, réservoirs d'eau et bien d'autres choses qui ne peuvent pas être construites sans utiliser de soudure [1].

II. GENEALITES SUR LES OPERATIONS DE SOUDAGE

Le soudage est une opération qui vise à créer une jonction solide entre deux pièces métalliques en assurant leur continuité mécanique. Ce joint peut être obtenue soit en utilisant un métal d'apport, soit en fusionnant directement les pièces. Dans le cas où un métal d'apport est utilisé, il est important que celui-ci possède des propriétés similaires à celles des matériaux à assembler, notamment une température de fusion proche pour obtenir une soudure homogène et résistante.[2].

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base (c'est-à-dire les éléments à assembler) sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments.

Le métal d'apport doit répondre à deux besoins : apport de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfrein) assurant une section efficace entre les deux parties à assembler et de changer la composition métallographique de la zone fondue afin de lui offrir des caractéristiques mécaniques meilleurs [3].

III. AVANTAGES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES DU SOUDAGE

Le processus de soudage offre des avantages techniques et économiques cités ci-dessous comparativement par rapport à d'autres processus d'assemblage, principalement le boulonnage.

- Facilité de mise en œuvre [4].
- Meilleures propriétés mécaniques de l'assemblage [4].
- Assure de la continuité métallique de la pièce [4].
- Conférant des caractéristiques de l'assemblage équivalentes à celles du métal de base [4].
- Assure l'étanchéité de la pièce soudée. [4].

- Économie de matière et meilleure solution technique [4].
- Haute productivité à bas prix. [5].
- Diminution des coûts des équipements de soudage [5].

IV. TYPES DE SOUDURES

Selon la nature des matériaux à assembler, on distingue trois types de soudures :

- **Soudure autogène :**

Le concept de participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint implique que le matériau formant le joint de soudure est de même nature que celui des pièces à souder. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler.[5].

- **Soudure homogène :**

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé, le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport [5].

- **Soudure hétérogène :**

Le soudage est hétérogène lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente (type A) ou les métaux de base formant l'assemblage et le métal d'apport sont de natures différentes (type B) [1].

V. DIFFERENTES ZONES D'UN CORDON DE SOUDURE

Un joint soudé typique se compose de plusieurs zones distinctes, chacune ayant des caractéristiques spécifiques. Les principales zones d'un joint soudé (figure 1) :

- **Zone de fusion (ZF) :** C'est la zone qui correspond à la région où les deux pièces à souder sont fondues pour créer un bain de fusion. Cette zone est généralement caractérisée par une température élevée et une fusion totale des métaux de base, permettant ainsi la formation du cœur du joint soudé [6].
- **La zone affectée thermiquement (ZAT) :** est la région adjacente à la zone de fusion qui a été exposée à la chaleur pendant le processus de soudage, sans avoir fondu. La ZAT subit généralement des cycles de chauffage et de refroidissement rapides, ce qui peut entraîner des changements microstructuraux importants. Ces changements comprennent des modifications de la dureté, de la résistance et de la ténacité des matériaux, pouvant affecter les propriétés mécaniques de la zone. [7].

- Zone du métal de base (MB) : C'est la partie du joint soudé qui n'a pas été affectée par le processus de soudage et conserve les caractéristiques du matériau de base d'origine. La zone du métal de base est généralement située à distance de la zone de fusion et de la ZAT.
- Zone de pénétration : C'est la partie du joint soudé où le métal d'apport a pénétré dans les pièces à souder et s'est mélangé avec elles pour former la zone de fusion. La profondeur de la zone de pénétration dépend des paramètres de soudage, tels que le courant, la tension et la vitesse de soudage.
- Zone de liaison : Zone marquant la frontière entre la zone fondue et l'effectuée thermiquement (ZAT). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage [8]

Il est important de prendre en compte que la qualité et les propriétés du joint soudé dépendent de ces différentes zones, ainsi que des paramètres de soudage utilisés. Un soudage approprié, avec des paramètres bien contrôlés, peut produire un joint soudé solide et fiable, tandis qu'un soudage incorrect peut entraîner des défauts ou des propriétés indésirables dans les différentes zones du joint soudé.

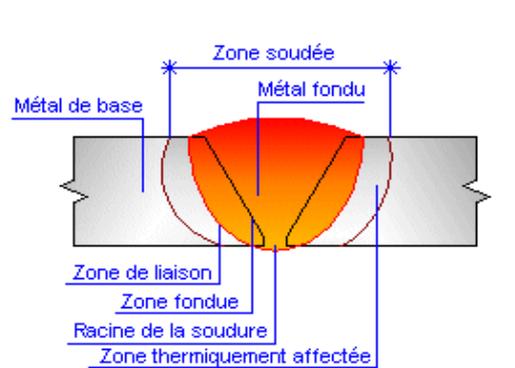


Figure 1 : Zones d'un joint soudé [9]

VI. DEFANTS DE SOUDURE

L'inspection des soudures peut être effectuée pour diverses raisons, mais la plus importante est certainement de déterminer si la qualité de la soudure convient à l'application prévue. L'identification et la caractérisation des défauts sont des tâches critiques dans le processus de contrôle de qualité des soudures. Elle consiste à identifier les indications de défauts éventuels et à appliquer les critères d'acceptabilité définis par les documents de référence appropriés. En fonction de la conformité de la soudure avec ces critères, le produit peut être soit accepté, soit rejeté. La norme internationale EN ISO 6520-1 classe les défauts géométriques dans les

soudures des matériaux métalliques [4]. Pour les composants plats et lisses légèrement encochés, la phase d'amorçage est la plus importante, la majorité de la durée de vie est limitée à l'initiation de petites fissures. Cependant, dans le cas des composants soudés, il est généralement admis que de petits défauts de type fissure existent intrinsèquement au niveau des soudures du processus de soudage et donc la phase d'amorçage est relativement insignifiante. La majeure partie de la durée de vie en fatigue des composants soudés est consacrée à la propagation de ces défauts de durée de vie des fissures jusqu'à la rupture finale. Par exemple, des résultats expérimentaux sur des joints à pleine pénétration les soudures transversales ont montré qu'environ 70 % de la durée de vie en fatigue est consacrée à la propagation du pied du cordon de soudure fissuré d'une taille initiale de 0,5 mm à la rupture finale [10-13].

a. Fissuration :

Parmi les défauts de soudure les plus courants, on retrouve les fissures, qui sont causées par des tensions internes excessives dans le métal soudé. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la formation de fissures, notamment l'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, la réalisation d'un cordon de soudure trop petit, ou encore les tensions internes créées par le retrait. Pour prévenir les fissures, il est donc important de faire un choix judicieux du métal d'apport, de réaliser un préchauffage approprié, de préparer soigneusement les joints, et de former un cordon de soudure respectant les dimensions exigées. [14].

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud [15] (figure 2) et la fissuration à froid [16] (figure 3).

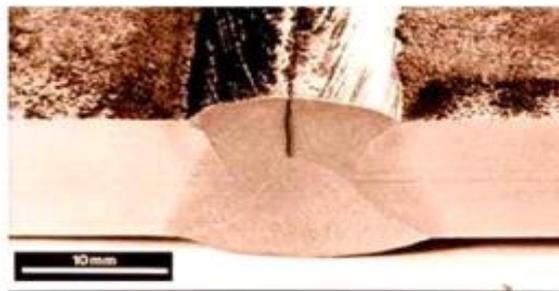


Figure 2: Fissuration à chaud dans la zone fondue [15].

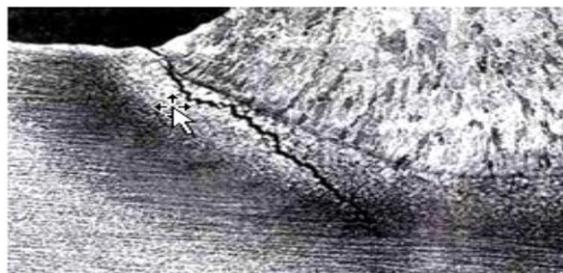
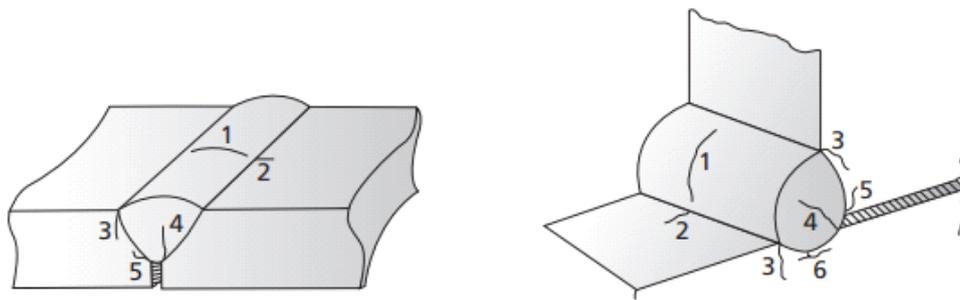


Figure 3 : Fissuration à froid dans un pied de cordon de soudure [16].



- 1) Fissures transversales dans la zone fondue
- 2) Fissures transversales dans la ZTA
- 3) Fissures dans la zone de liaison
- 4) Fissures dans la zone fondue
- 5) Fissures à la racine
- 6) Fissure sous le cordon

Figure 4: Fissures dans les joints de soudures bout à bout et en angles [18].

b. Soufflures et piqures :

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, causées par la présence de gaz piégé dans le métal fondu lors du processus de soudage. Lorsque Des soufflures débouchant, on parle alors de piquûres (figure 5) [18].

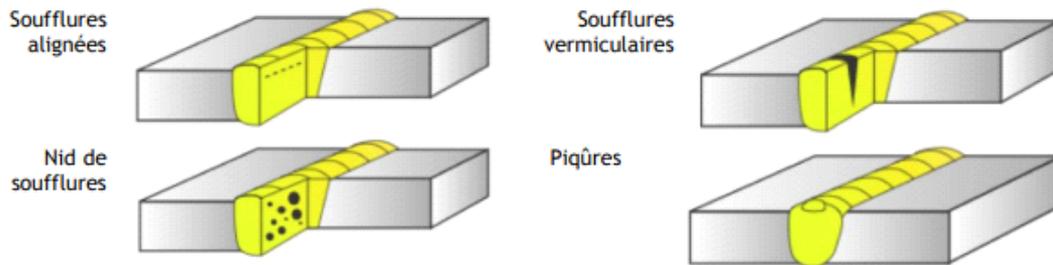


Figure 5: Défauts de soufflures [18]

c. Caniveaux :

C'est un manque de métal sous forme de sillon en bordure du cordon. Ce défaut peut être causé par un courant de soudage trop intense et à une technique opératoire défectueuse (figure 6) [19].

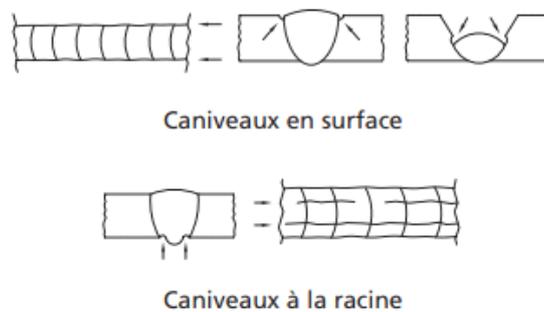


Figure 6: Défauts de caniveaux [18]

d. Morsures

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. [18]

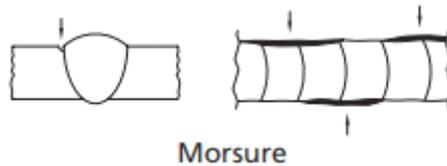


Figure 7 : Défauts de morsure [18]

e. Manque de pénétration

Ce défaut est dû par l'absence de fusion complète entre les bords des pièces à souder. Cela peut être très préjudiciable car cela réduit la section résistante du cordon et se trouve généralement à la base du cordon où les concentrations de contraintes sont élevées, ce qui augmente les risques de rupture [7]. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. De plus, ce défaut est à l'origine d'entailles qui peuvent servir d'amorces de rupture par fatigue. On peut avoir un manque sur la racine ou bien dans la soudure (figure 8) [17].

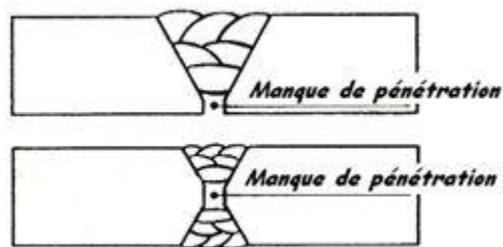


Figure 8 : Défaut manque de pénétration [15]

f. Inclusion

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (figure 9). Cela peut être dû à la géométrie des bords à souder, mauvais choix de l'intensité du courant et de l'électrode.



Figure 9 : Défaut d'inclusions [15]

g. Défauts retassures et criques :

Lorsque le métal se refroidit, il est possible que le cordon ne se referme pas de façon uniforme en fin de soudure. Le creux formé est appelé retassure. Les retassures de cratère sont des défauts dus à une mauvaise reprise de passes ou à un arrêt trop brusque de l'arc électrique. Les criques sont défauts non visibles. [15]



Figure 10 : Défaut de retassures et criques [15]

h. Défauts géométriques des cordons :

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave

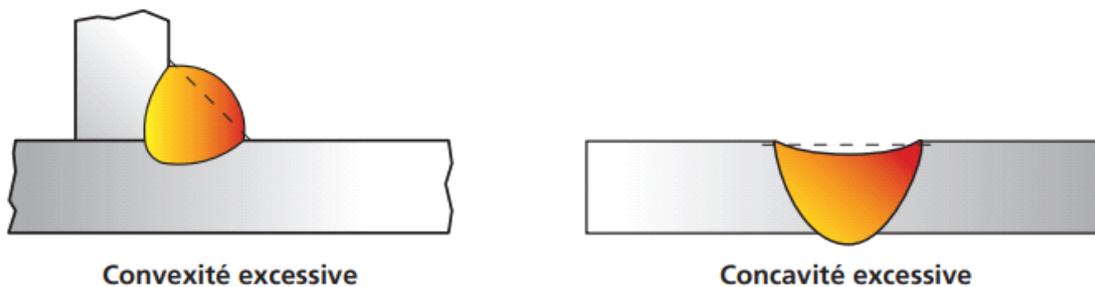


Figure 11 : Défaut de géométries des cordons [15]

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure 12). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu. [15].

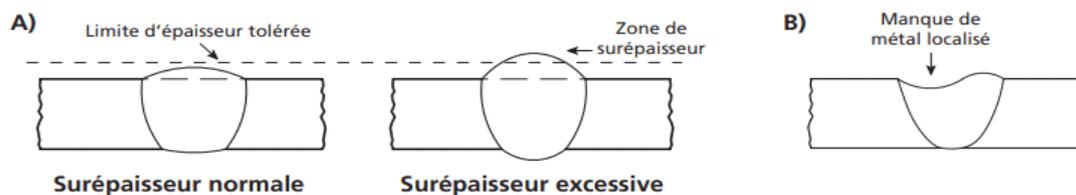


Figure 12 : surépaisseur excessive du cordon [15]

VII. CONCLUSION

Le soudage est un procédé d'assemblage qui pour but la création de la continuité physique entre deux pièces métalliques par fusion, mais au cours de ce processus c'est tout à fait possible d'avoir des défauts tels que : les fissurations, les défauts géométrique ... etc.

Ces derniers peuvent influent négativement sur le comportement en fatigue d'un joint de soudure par diminuer leur durée de vie.

Références :

- [1] Bachir Mezrag. Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2015. Français. ffNNT : 2015MONTTS275ff.
- [2] : A. Roos, B. Milet : « Précis de Métallurgie Appliquée », Edition Technique et Documentation-Lavoisier, ISBN 2-85206-141-4, (1982).
- [3] : Chainarong Srikunwong « Modélisation du procédé de soudage par points » These de doctora, l'Ecole des Mines de Paris, octobre 2005
- [4] :Short-arc.Jean-Pierre : « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode » PlanckaertCentre de Recherche en Automatique de Nancy CRAN – CNRS UMR 7039 2008.
- [5] :M .Sebaa Fethi , M.Rahou Mohamed : 2019 / 2020 Préparation aux examens IWT Procédés et matériels de soudage .
- [6] : Enseignant : S.Mansouri Cours – Technique de soudage L.M.D / M1 C.M. S.1 2020-2021 Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2 Faculté de Technologie Département de Génie Mécanique .
- [7] : : Amaouche Samira Caractérisation d'une soudure hétérogène réalisée par le procédé MAG Mémoire de fin d'études , promotion 2011-2012, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou .
- [8] :A. Michel. Pièces mécaniques soudées (rappels et définitions). Technique d'ingénieur, (BM 5 185), 2006.
- [9] :H.Granjon. «Bases métallurgiques de soudage » 2 ème édition. publications de soudage et de ses applications Paris .1995.
- [10] : R.Baus, W.Chaprau, Application du soudage aux constructions,1979.
- [11] : Mécanosoudage , ISBN 2-85400-146-X, 1989.
- [12] :« Notice d'utilisation pour la simulation numérique » ; code_aster ; N :1191 ;P :1/24,2009.
- [13]: Fatigue of Welded Structures , Ceferino Steimbregger 2014 , Master of Science (120 credits) Materials Engineering Luleå University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics .
- [14] :Welding Processes Handbook By Klas Weman published in north america by CRC press LLc 2000 , Corporate BLVD , NW BOCA Raton FL 3343A , USA
- [15] :Jean Maton (2014). Technologie de soudage : Chapitre "Positions de soudage ". <https://www.rocdacier.com/Position-de-soudage-assemblage>

[16]: Election of welding electrodes end user: welders and concerned SSE/JES CAMTECH/E/17-18/EP-3/Welding Electrodes/1.0 Maharajpur, GWALIOR - 474 005 .

[17] :Beneddeb Mostefa Mémoire de fin d'études : Étude les défauts de soudage des pipelines
Juin 2012 Université Mohamed Khider Biskra

[18] : Bruce Anglade , Hélène Horsin Molinaro, Sylvain lavernhe : 'Les principaux défauts et risques liés au soudage' Edité le 10/03/2017 .

[14] :L.Devillers, D. Kaplan, A. Ribes, P.V. Riboud : « Métallurgie et propriétés mécanique du métal fondu en soudage multi passe sous flux d'acier au C-Mn microallié », Mémoires et etudes scientifiques revue de métallurgie, n° 1, pp. 43-62, (1986).

[15] :Jean Maton (2014). Technologie de soudage : Chapitre "Défauts de soudage en arc électrique électrode enrobée". <https://www.rocdacier.com/defauts-de-soudage-electrode-enrobee/>

Chapitre 2

I. INTRODUCTION :

Même lorsqu'elle est effectuée de manière adéquate, l'opération de soudage engendre différents défauts qui, bien qu'ils n'affectent pas nécessairement la résistance statique du joint, peuvent avoir une influence significative sur sa résistance à la fatigue. L'objectif est de trouver une solution qui augmentera, voire créera la phase d'amorçage, soit en inhibant les défauts par l'introduction de contrainte résiduelle de compression ou en améliorant la géométrie locale d'amorçage potentiel des sites. Dans ce cas, les défauts aigus qui agissent comme des fissures initiales doivent être éliminés et une géométrie plus appropriée obtenue [1].

Une fois le risque d'amorçage de fissure par fatigue éliminé au pied de la soudure, de nombreuses solutions permettent d'améliorer la résistance à la fatigue des assemblages soudés, dont le point critique est situé au pied de la soudure ; ces solutions visent toutes l'un des ce qui suit :

- de réduire, voire de supprimer, les défauts de soudure, notamment les défauts ouverts,
- d'améliorer la géométrie locale du pied de soudure en réduisant le coefficient de concentration de contrainte
- d'introduire des champs de contraintes résiduelles de compression [2].

II. NOTIONS GENERALES DE LA FATIGUE :

Le terme de fatigue englobe un ensemble de mécanismes physiques responsables de la dégradation progressive d'une pièce mécanique soumise à des chargements mécaniques répétés. Le processus de fatigue peut être divisé en deux phases principales : l'initiation et la propagation des fissures jusqu'à la rupture. L'initiation des fissures peut être causée par des phénomènes de micro-plasticité cyclique qui se produisent dans certains grains ayant une orientation défavorable, ainsi que près d'inclusions agissant comme des concentrations de contraintes .[3] Selon l'Américain Société pour les essais et les matériaux (ASTM), norme E 1823[4] , la fatigue est définie comme: "le processus de changement structurel permanent localisé progressif se produisant dans un matériau soumis à des conditions qui produisent des contraintes et des déformations fluctuantes à un ou plusieurs points et pouvant aboutir à des fissures ou à une fracture complète après un nombre suffisant de fluctuations" (figure 1). La fatigue est la cause d'environ 90 % des défaillances des composants d'ingénierie [5]

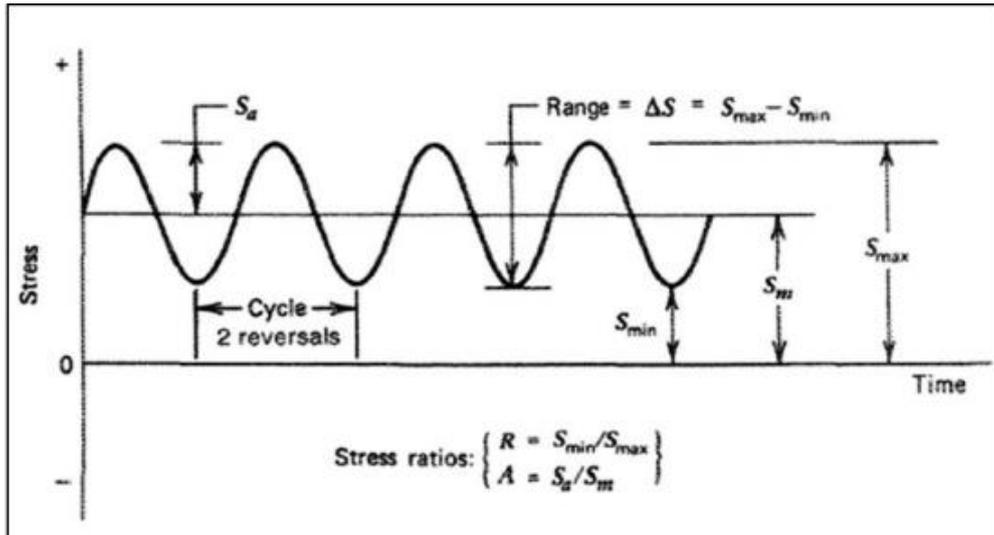


Figure 1 : Nomenclature utilisée pour décrire un chargement cyclique d'amplitude constante

[6]

Sur cette figure on retrouve :

σ_a : l'amplitude de contrainte ou la contrainte alternée ;

σ_m : la contrainte moyenne ;

σ_{max} : la contrainte maximale ;

$\Delta\sigma$: la variation totale de contrainte soit $\sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$;

σ_{min} : la contrainte minimale ;

R : le rapport de chargement ou ratio de fatigue donné par $\sigma_{min}/\sigma_{max}$.

Les étapes principales de la fatigue sont :

- Amorçage de fissures,
- Propagation des fissures,

Elle suit d'abord approximativement le plan de scission maximale. La vitesse de propagation est alors très faible. Les défauts ne sont décelables qu'au laboratoire, Puis elle suit le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale. La vitesse de propagation s'accélère. Pendant cette période, les contrôles décèlent la fissure.

- La rupture finale.

II.1. Limite de fatigue

La limite de fatigue est la valeur maximale de contrainte variable qu'un matériau peut supporter dans un cycle de fatigue infini. Elle est généralement déterminée à partir du diagramme S-N, où elle correspond à la contrainte asymptotique de la courbe des points de résistance à la fatigue nominale de plusieurs échantillons lors d'essais de fatigue. En d'autres termes, la limite d'endurance [7]

II.2. Durée de vie en fatigue

La durée de vie en fatigue correspond au nombre de cycles nécessaires pour provoquer une rupture due à la fatigue, pour un niveau de contrainte alternée donné et une moyenne alternée. Autrement dit, c'est la quantité de cycles que le matériau peut supporter avant de se rompre sous l'effet de contraintes répétées. [8].

Les résultats des tests d'un certain nombre de niveaux de contraintes différents peuvent être tracés pour obtenir une courbe contrainte-durée de vie (figure 2), également appelée courbe S-N ou bien courbe de Wöhler [9] exprimant l'amplitude de contraintes en fonction de nombre de cycle à rupture. Cette courbe présente trois domaines de fatigue de durée de vie classé dans chaque cas selon un nombre de cycles approximatif « N »

1-Domaine Oligo cyclique : $N < 10^3$ cycles, caractérisé par déformation plastique en fond de fissure et une durée de vie faible ;

2- Domaine d'endurance limitée : $10^4 < N < 10^6$, caractérisé par déformation élastique et augmentation de durée de vie avec diminution de l'amplitude de contrainte ;

3-Domaine d'endurance illimitée : $N > 10^7$ cycles, caractérisé par une contrainte inférieure à la limite d'endurance [10].

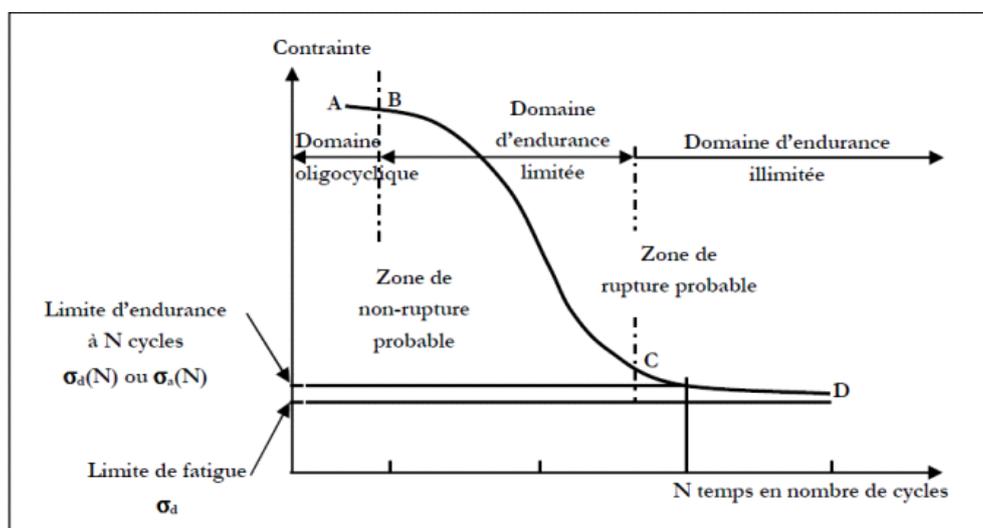


Figure 2 : Représentation schématique des trois domaines de fatigue [10]

Pour certains matériaux, principalement dans les aciers, il semble y avoir un niveau de contrainte inférieur à dont le matériau a une durée de vie infinie. Un tel niveau de stress limite est appelé la limite de fatigue ou la limite d'endurance et elle est généralement signalée après 2 à 5 millions rondes [11, 12, 13].

II.3. Fatigue des composants soudés :

Selon la nature et l'orientation par rapport au chargement d'une soudure ; il existe un certain nombre de sites possibles pour l'initiation de la fissuration par fatigue. Le site le plus probable est le pied du cordon de soudure. Les fissures de fatigue sont facilement initiales à partir de tels défauts avec pour résultat que, contrairement au comportement à la fatigue du matériau brut. L'amorçage d'une fissure de fatigue occupe une part négligeable de la durée de vie en fatigue d'un assemblage soudé défailant du pied de la soudure [14]. La rupture due à la fatigue est largement considérée comme un facteur limitant dans la conception des composants soumis à des contraintes répétées. C'est particulièrement critique pour les composants soudés, car la résistance à la fatigue de ces structures est généralement inférieure à celle des composants non soudés. En conséquence, il est nécessaire de prendre des mesures spécifiques pour améliorer la résistance à la fatigue des joints soudés afin de garantir la durabilité et la fiabilité des structures. [9]. Ceci est illustré à la figure qui compare les courbes S-N d'une plaque lisse, d'une plaque trouée et d'une pièce soudée.

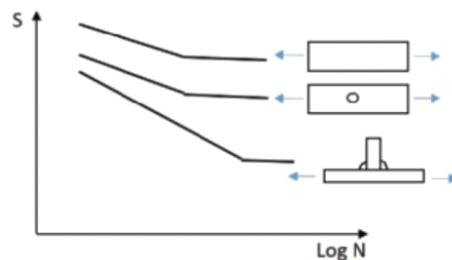


Figure 3 : Courbe d'endurance pour certaines assemblages soudés [9]

Tel que mentionné, nombre de facteurs influencent la résistance à la fatigue d'un détail dont la résistance du matériau, les contraintes moyennes et la surcharge occasionnelle. Par contre, pour un détail soudé, c'est principalement les contraintes résiduelles et la qualité de la soudure qui viendront dicter son comportement en fatigue pendant toute sa durée de vie. Le soudage amène donc deux aspects supplémentaires, par rapport à une section plane et lisse, dont il faut tenir compte lors de l'analyse de la résistance à la fatigue. Comme le montre la figure 4, la présence de soudures crée des chemins préférentiels pour la fissuration, au pied de la soudure (Weld toe

crack) et à la racine de la soudure (Weld root crack)[15].

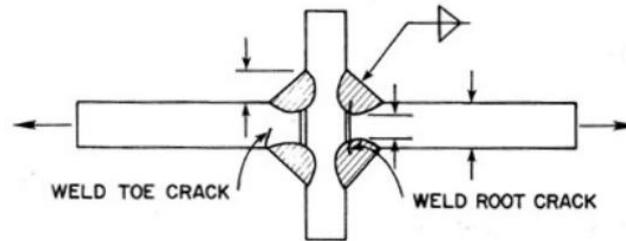


Figure 4 : Fissures en pied du cordon et à la racine [15]

II.4. Facteurs affectant la résistance à la fatigue des joints de soudures :

Il y a de très nombreux paramètres influençant la résistance à la fatigue d'un cordon soudé.

On peut citer :

- a) Imperfections de soudure ;
- b) Contraintes résiduelles ;
- c) L'effort concentration au pied de soudure
- d) Effets de taille.

La résistance en fatigue d'un cordon de soudure peut atteindre 50 à 70% de celle du métal de base, mais pour cela il est nécessaire de maîtriser pleinement tous les paramètres. Les courbes de fatigue dépendant principalement de la géométrie du cordon.

De plus, d'autres facteurs tels que le type de joint peuvent affecter la durée de vie de soudures. Les principaux facteurs sont détaillés ci-dessous.

a) Imperfections de soudure :

Dans le cas des composants non soudés, l'étape d'amorçage des fissures est généralement considérée comme étant la plus importante, car la majeure partie de la durée de vie est consacrée à l'initiation et à la croissance de petites fissures. Cependant, lorsqu'il s'agit de structures soudées, il est largement reconnu que des imperfections sont souvent présentes dans la zone de soudure, ce qui signifie que la phase d'amorçage des fissures est relativement moins significative. La majorité de la durée de vie en fatigue des composants soudés est donc consacrée à la propagation de la fissure jusqu'à la rupture finale [16]. L'effet des défauts de soudure sur la durée de vie en fatigue a été largement étudié [17-18].

Un autre type d'imperfection est le désalignement qui diminue la durée de vie en améliorant la sévérité des concentrations de contraintes existantes [19]. La gravité des imperfections dépend de leur taille, de leur forme, de leur distribution et de leur emplacement dans la soudure.

Wahab et Alam [20] ont étudié l'effet des fissures de solidification, de la présence des caniveaux

et de la porosité sur la propagation des fissures de fatigue dans les joints de soudures. Ils ont constaté que la durée de propagation des fissures de fatigue diminue significativement avec les imperfections de la soudure. La résistance à la fatigue a été réduite à environ 55 % pour la soudure contenant des fissures de solidification, 45 % pour la présence de caniveaux et 18 % pour la porosité à 2 millions de cycles, par rapport à la résistance à la fatigue d'une soudure idéale [20].

b) Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont communément appelées "contraintes d'auto-équilibrage" car elles sont en équilibre dans le matériau sans l'application de forces externes. Elles sont désignées sous le terme de contraintes résiduelles car elles persistent dans les composants après les opérations de fabrication précédentes. La soudure est un processus qui génère des contraintes résiduelles de traction importantes, pouvant atteindre la limite d'élasticité du matériau de base. Ces contraintes peuvent contribuer à une diminution de la résistance à la fatigue des composants et des structures soudées. En revanche, les contraintes de compression présentes à la surface des joints peuvent considérablement améliorer la résistance à la fatigue. Afin d'évaluer de manière précise la résistance à la fatigue, il est essentiel de comprendre en détail les contraintes résiduelles [22].

L'effet de la dilatation et le retrait au cours du refroidissement génère des contraintes résiduelles. Par leur nature, les contraintes résiduelles peuvent être globales, c'est-à-dire se produire sur l'ensemble du composant structural correspondant au chargement externe, ou contraintes résiduelles locales (figure 5) [21].

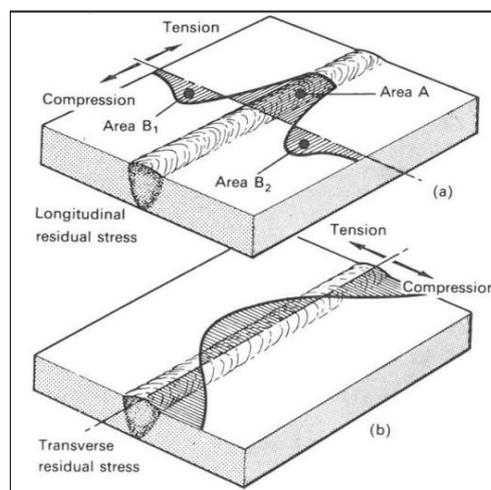


Figure 5 : Contraintes résiduelles dans un joint soudé [23]

La libération des contraintes qui élimine les contraintes résiduelles de traction au niveau de la solubilité peut augmenter la résistance à la fatigue dans des situations où un assemblage est principalement chargé en compression, selon Gurney. (1978). À cet égard, la gestion des contraintes ou le traitement thermique post-souder (PWHT) peut être considéré comme une amélioration de la fatigue. Cependant, il convient de noter que même après le PWHT, il peut subsister des contraintes localisées d'environ 20 à 30% de la limite d'élasticité. Dans De plus, dans de grandes structures telles que les structures navales, il peut y avoir un arrangement avec une portée plus longue et des contraintes liées à la construction qui peuvent également contribuer à une région de contraintes de traction résiduelles. Ils peuvent être soulagés dans une certaine mesure par le service (effet secouer), mais il est difficile de prédire. Par conséquent, même lorsque les contraintes causées par les charges appliquées sont nominale-ment compressives, la gestion de la contrainte ou PWHT ne peut que légèrement augmenter la résistance à la fatigue d'un assemblage de composants dans un ensemble structurel. Si la charge appliquée aux données spécifiques ne fait qu'augmenter les contraintes liées à la traction, l'effet de la libération des contraintes est minime.[24]

L'étude menée par Kaufmann [40] portait sur l'impact des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue des éprouvettes en acier doux soumises à des essais de traction pulsée, avec des plaques de perles de soudure déposées longitudinalement. Les contraintes résiduelles dans les spécimens soudés ont été déterminées à l'aide d'une méthode de sectionnement et ont été mesurées jusqu'à 30 Ksi, ce qui correspondait à la limite élastique du métal de base.

Nordmark a étudié les effets des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue des joints de soudures longitudinales bout à bout des plaques en aluminium (5456-H321). Les éprouvettes brutes de soudage ont été grenillées. Les essais de fatigue ont montré qu'en raison de la compression par le grenillage, l'amélioration de la tenue en fatigue est plus importante que celle produite par traitement thermique [25].

c) Effet de la concentration des contraintes résiduelles :

La forme du cordon de soudure peut entraîner une modification de la géométrie, ce qui provoque une concentration de contrainte. Cette concentration se produit principalement au niveau des pieds de cordon de soudure. Une transition en douceur entre le pied de soudure et le métal de base entraîne une concentration de contrainte relativement faible. En revanche, un changement brusque de la géométrie du cordon de soudure entraîne une concentration de contrainte très élevée. Par conséquent, le pied du cordon de soudure est l'endroit le plus susceptible d'initier des fissures de fatigue. [12].

Fall [26] a étudié la résistance à la fatigue en flexion des joints de soudures bout à bout en tôles d'acier à faible et hautes résistances. Les résultats ont indiqué que la limite de fatigue de l'acier à faible résistance était proche de sa limite d'élasticité, tandis que celle de l'acier à haute résistance était considérablement inférieure à sa limite d'élasticité. Cette étude a conclu que la forme du cordon de soudure était le facteur le plus crucial qui influençait la résistance à la fatigue. De plus, les concentrations de contrainte présentes dans les éléments soudés ont un impact significativement plus important sur la résistance à la fatigue de l'acier à haute résistance. L'impact de la géométrie du pied de soudure sur la résistance à la fatigue des pièces soudées a été étudié par Gurney [27]. Les résultats ont révélé que le rayon et l'angle du pied de soudure, en particulier le rayon de pied de soudure, sont des qui influencent la durée de vie en fatigue. L'augmentation du rayon de pied de soudure, de l'angle ou des deux contribue à accroître la résistance à la fatigue en réduisant la concentration de contraintes au niveau du pied du cordon de soudure. [28-29].

Niu et Glinka [46] ont proposé une relation entre le facteur de concentration de contrainte, K_t , au rayon du pied du cordon de soudure (figure 6) :

$$K_t = 1 + 0.5121(\phi)^{0.572}(t/r)^{0.469}$$

Dans cette équation, " ϕ " est l'angle du flanc de la soudure, " r " est le rayon au pied du cordon de soudure et " t " est l'épaisseur de plaque. A partir de l'équation ci-dessus, on peut déduire qu'en augmentant le rayon du pied du cordon de soudure et en diminuant l'angle de flanc, le facteur de concentration de contraintes diminue. Cela résulte dans une plus grande résistance à la fatigue des pièces soudées [9].

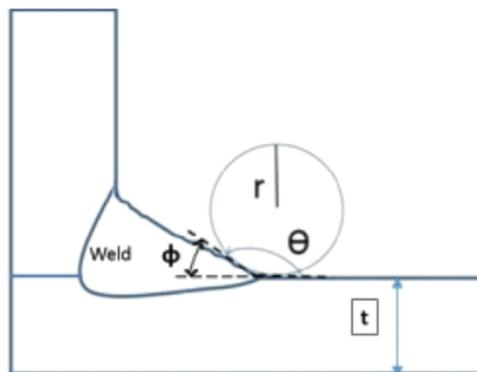


Figure 6 : Concentration de contrainte au pied du cordon de soudure[9].

d)Effet de taille :

La résistance à la fatigue diminue des plaques soudées suivants les conditions ci-dessous [31-32] :

- En augmentant l'épaisseur de la tôle, à rayon de pied de soudure constant, le rapport entre le rayon du pied du cordon et l'épaisseur de la plaque devient plus petit, ce qui entraîne une concentration de contraintes plus élevée au pied du cordon de la soudure [9].
- Dans une plaque plus épaisse, les contraintes résiduelles de traction dans le pied de soudure se répartissent sur une plus grande profondeur. Cela signifie que la propagation des fissures à partir du pied de soudure deviendra beaucoup plus rapide [9].

L'influence de l'épaisseur de la tôle sur résistance à la fatigue dans les structures à parois minces (épaisseur de tôle inférieure à 5 mm) et les structures soudées ont également été étudiées numériquement et expérimentalement par plusieurs chercheurs à savoir Fourlaris et al., Gustafsson, Mashiri et al., Ringsberg et al (2008) et Sonsino et al (2007) [33-35].

III. GENERALITES SUR LA PROPAGATION DES FISSURES EN FATIGUE :

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude d'un comportement d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. On distingue généralement deux types de rupture, la rupture fragile et la rupture ductile. Dans le cas de la rupture fragile, la plasticité reste localisée au niveau de la pointe de la fissure, qui est de petite taille par rapport aux dimensions de la structure. On parle alors de mécanique linéaire de la rupture. Cela signifie que la zone plastique est négligeable et que le comportement du matériau peut être décrit en utilisant des concepts de la mécanique linéaire, tels que la résistance des matériaux. En revanche, pour la rupture ductile, la zone plastique devient non négligeable et peut s'étendre bien au-delà de la pointe de la fissure. Dans ce cas, on parle de mécanique élasto-plastique de la rupture. La plasticité du matériau joue un rôle important et peut entraîner une déformation permanente, même en dehors de la zone de la fissure. Ce comportement est souvent observé dans les matériaux ductiles tels que les métaux.[36].

III.1. Phases d'endommagement par fatigue :

L'endommagement par fatigue est généralement divisé en trois phases comme suit :

- Amorçage d'une microfissure :

Lorsqu'une charge cyclique est appliquée à un matériau, des zones de concentration de contrainte locales peuvent entraîner l'apparition de protubérances (extrusions) et d'affaissements (intrusions) en surface. Ces déformations se propagent de manière trans-granulaire à travers quelques grains, suivant des plans de glissement préférentiels. De plus, des microfissures ou d'autres défauts microscopiques peuvent également être présents en raison du processus de mise en forme. [37]

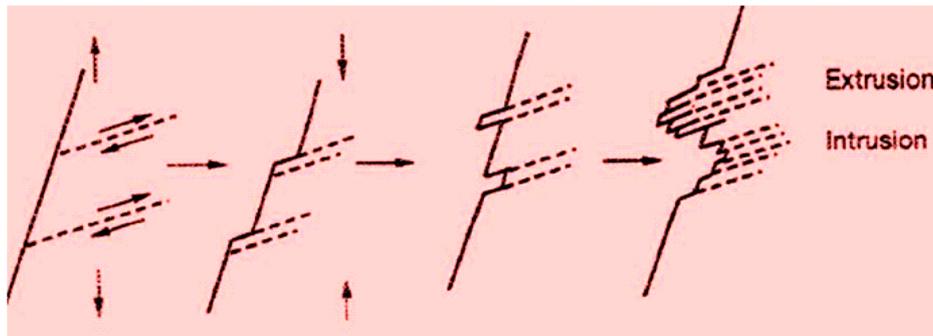


Figure 7. Représentation schématique de la phase d'amorçage [37]

- Propagation d'une fissure

La propagation d'une fissure peut varier en termes de vitesse, influencée par plusieurs facteurs, notamment l'étendue de la contrainte et la longueur initiale de la fissure. Lorsqu'on évalue la durée de vie d'une structure, le stade II de la propagation de fissure joue un rôle prédominant, car la vitesse de propagation dans ce stade est généralement plus lente par rapport aux stades I et III. La théorie de la mécanique de rupture fournit une description partielle de ce stade. L'étendue de contrainte y est ramenée à une variation du facteur d'intensité de contrainte (ΔK_I) décrivant l'état des contraintes en pointe de fissure lors du chargement cyclique. La figure 8 montre l'évolution de la vitesse de fissuration (da/dN) en fonction de la variation de (ΔK_I) et les paramètres d'influences dans chaque zone de propagation. [38].

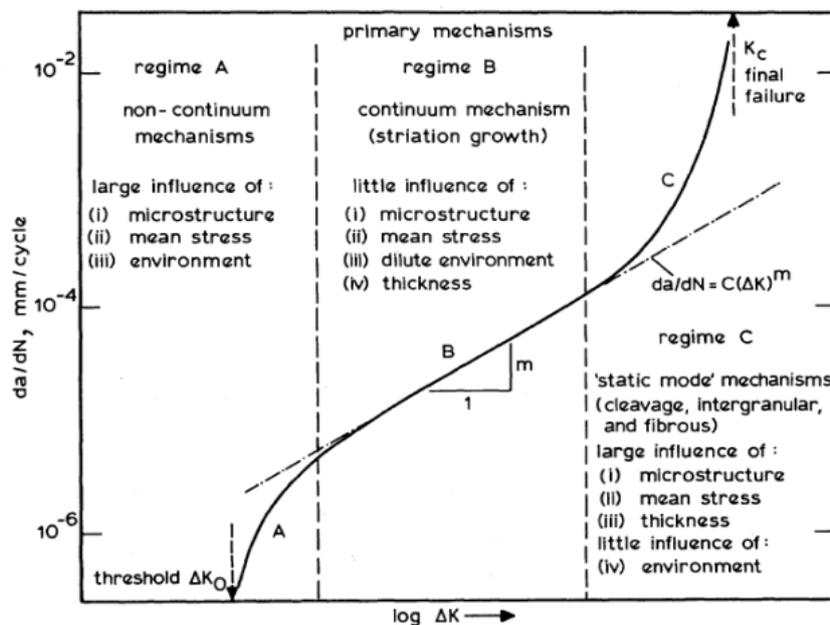


Figure 8. Variation de la vitesse de fissuration et paramètres d'influence [38]

La vitesse de fissuration peut être subdivisée en trois zones distinctes. Dans la zone A, la variation du facteur d'intensité des contraintes (ΔK_I) n'est pas supérieure au seuil critique (ΔK_{th}), ainsi bien que la fissure soit initiée, aucune propagation n'a lieu. L'étendue de contrainte se trouve donc sous la limite d'endurance de la pièce. Cette limite est une particularité des métaux ferreux et est établie en général à 10^6 ou 10^7 cycles. La propagation de la fissure se produit principalement dans les zones B et C de la courbe de propagation de fissure. Dans la zone C, la vitesse de propagation de la fissure augmente de manière exponentielle, ce qui peut conduire rapidement à la rupture du matériau, conformément à la théorie de la mécanique de la rupture.

Quant à la zone B, la vitesse de fissuration peut être considérée comme constante à l'échelle logarithmique. Cette zone est souvent décrite par la loi de Paris qu'est une relation empirique qui établit une corrélation entre le taux de croissance de la fissure (da/dN) et le facteur d'intensité de contrainte (ΔK). Elle est exprimée par l'équation :

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

C et m sont des constantes empiriques spécifiques au matériau.[39].

IV. CONCLUSION

Après le traitement de soudage qu'introduit des défauts dans le joint de soudure, on peut avoir une diminution de la durée de vie et présence des contraintes résiduelles qui peuvent influencer sur la résistance à la fatigue d'une pièce soudée.

La fatigue des pièces mécaniques est définie par l'apparition de fissures macroscopiques et leur croissance sous des sollicitations répétées. Par conséquent, un nombre suffisant de telles charges peut provoquer de grandes fissures et provoquer une destruction partielle ou totale.

Références :

- [1] : H.P.Lieurade, I.Huther - in "Festigkeit von schweissverbindungen ", Edit. Pries, nitschke-pagel, pub lshaker verlag, 2001, p. 101-122
- [2] :Henri-Paul Lieurade “ fatigue improvement of welded components by shot peening” Cetim, Senlis, France 2005.
- [3] :M. R. d. M. Pinho, «Modélisation de l’endurance en fatigue sous chargement complexe, statique et vibratoire,» Paris-Saclay, soutenue le 20 décembre 2019 Thèse de doctorat .
- [4] :ASTM E. 96 (Reapproved 2002). Stand terminol relat fatigue fract test annu .Book ASTM Stand 1823; 3.
- [5] :Macdonald K. Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures. Elsevier; 2011.
- [6] :Stephens R.I., A. Fatemi, R.R. Stephens et H.O. Fuchs, 2001« Livre métal fatigue in engineering» 2nd édition, John Willy and sons, New-York, ISBN0471-51059-9, p.472
- [7] :Ramdane Rania et Si ahmed Chahira. Memoire de fin d’etude master academiqu amelioration de la tenue en fatigue mecanique sous chargement d’amplitude constante 07/ 07 / 2021 Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem .
- [8] :«help.solidworks.com,» 2017. [En ligne]. Available: <https://help.solidworks.com>.
- [9] :Ebrahim Harati “ Improving fatigue properties of welded high strength steels “ Department of engineering science university west 2017.
- [10] : Laure Magnier-monin le 11 décembre 2007 «Mémoire tenue en services d’assemblage soudée en acier 304L: influence des contraintes résiduelle et de parachèvement mécanique »
- [11] :Dimatteo ND, Lampman SR. ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and fracture. Vol. 19 Vol. 19. Materials Park: ASM international; 1996.
- [12] : Kirkhope KJ, Bell R, Caron L, Basu RI. Weld detail fatigue life improvement techniques, ship structure committee, 1997.
- [13] :Seto A, Masuda T, Machida S, Miki C. Very low cycle fatigue properties of butt welded joints containing weld defects. Study of acceptable size of defects in girth welds of gas pipelines. Weld Int 2000; 14:26–34. Doi: 10.1080/09507110009549134.
- [14] :Madox S J « Improving the fatigue life of fillet weld by shot peening «) ABSE 1982 377-384
- [15] :Frank, K. H. et J. W. Fisher (1979). "Fatigue strength of fillet welded cruciform joints." 105, 1727-1740.
- [16] :Lassen T. Fatigue life analyses of welded structures. London ; Newport Beach, CA: ISTE; 2006.

- [17] :Seto A, Masuda T, Machida S, Miki C. Very low cycle fatigue properties of butt welded joints containing weld defects. Study of acceptable size of defects in girth welds of gas pipelines. *Weld Int* 2000; 14:26–34. Doi: 10.1080/09507110009549134
- [18] :Shirahata H, Miki C, Yamaguchi R, Kinoshita K, Yaginuma Y. Fatigue crack detection by the use of ultrasonic echo height change with crack tip opening. *Weld World* 2014; 58:681–90. Doi: 10.1007/s40194-014-0149-4.
- [19] :Hobbacher AF. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Springer; 2015.
- [20] :Wahab MA, Alam MS. The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints. *J Mater process technol* 2004; 153–154:931–7.
- [21] :J. Hensel, T. Nitschke-Pagel, K. Dilger, Residual stress based fatigue design of welded structures, *Mater. Perform. Charact.* 7 (2018) 630e642, <https://doi.org/10.1520/mpc20170113>.
- [22] : Stephens RI, Fatemi A, Stephens RR, Fuchs HO. *Metal fatigue in engineering* John Wiley & Sons. N Y 2001
- [23] : Maddox, S. J., *Fatigue strength of welded structures*, 2. ed., Abington, Cambridge, 1991.
- [24] :K.J. Kirkhope, R. Bell, L. Caron and R.I. Basu and al “ Weld detail fatigue life improvement techniques “ August 26, 1999 Ottawa, Ontario, CANADA K2H 8S9
- [25] :Nordmark, G. E. Peening increases fatigue strength of welded aluminum. *Metal Progress* 84, No. 5: 101-103. Nov. 1963.
- [26] :Fall, H. W., Brugioni, D. L., Randall, M. D. and Monroe, R .. E. Improvement of low cycle fatigue strength of high strength steel weldments. *Welding Journal* 41: 145s-153s. 1962. Station Bulletin Series No. 384. 1950.
- [27] :Pope, J, A. Stress concentration factors. In Pope, J, A. ed. *Metal fatigue*. pp. 55-80. London, England, Chapman and Hall, Ltd. 1959.
- [28] :Williams HE, Ottosen H, Lawrence FV, Munse WH. The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections. University of Illinois engineering experiment station, college of engineering, USA, 1970.
- [29] :Barsoum Z, Jonsson B. Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds. *Eng fail anal* 2011; 18:971–9. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.12.001.
- [30] : Niu X, Glinka G. The weld profile effect on stress intensity factors in weldments. *Int j fract* 1987; 35:3–20. Doi: 10.1007/BF00034531
- [31] : Macdonald K. *Fracture and fatigue of welded joints and structures*. Elsevier; 2011.

- [32] : Kihl DP, Sarkani S. Thickness effects on the fatigue strength of welded steel cruciforms. *Int J Fatigue* 1997; 19:311–6. Doi: 10.1016/S0142- 1123(97)00041-8.
- [33] :Dong P. and Hong J.K. (2008). Fatigue of tubular joints: hot spot stress method revisited. In: Soares C.G., ed. ASME 27th International conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE 2008), Estoril, Portugal, OMAE2008-57914 on CD-ROM. Mashiri F.R., Zhao X.L., Hirt M.A. and Nussbaumer A. (2007). Size effect of welded thinwalled tubular joints. *International journal of structural stability*
- [34] : Mashiri F.R., Zhao X.L., Hirt M.A. and Nussbaumer A. (2007). Size effect of welded thinwalled tubular joints. *International journal of structural stability*
- [35] : D. Mashiri, F.R. and Zhao, X.-L. (2005). Thickness Effect in Welded Joints - A Review. *Proceedings of ISPOE (2005)* 325-332.
- [36] :.Manel BACCAR Thèse de doctorat de Toulouse. Etude de l'endommagement et du comportement en fatigue des aciers à outils "Thèse confidentielle" jeudi 20 mars 2014 délivré par École nationale supérieure des mines d'albi-carmaux conjointement avec l'INP toulouse
- [37] :Philip maltais, ING. Septembre «Mémoire développement d'une méthode de prédiction de la durée de vie de fatigue de structure tubulaire soudée en aluminium»
- [38] :Bathias, C. et A. Pineau (2008). *Fatigue des matériaux et des structures*. Paris, Hermès Science Publications,
- [39] :François Pepin comportement en fatigue d'une connexion soudée à angle avec support envers d'un pont à béquilles – Étude expérimentale et numérique Québec, Canada 2014 1795-1804.2009
- [40] : Spraragen, W. and Rosenthal, D. *Welding Journal* 21: 297s-347s. Fatigue strength of welded joints. 1942.

Chapitre 3

I. INTRODUCTION

La résistance à la fatigue relativement faible des joints soudés peut être attribuée principalement à la présence de défauts semblables à des fissures et à des zones de concentration de contraintes. (Chapitre II). Les concentrations des contraintes associées au profil du cordon de soudure et à la géométrie, ainsi que les contraintes résiduelles résultant du processus de soudage, jouent un rôle essentiel dans l'estimation de la durée de vie en fatigue. [1]. Une fois que le risque d'initiation d'une fissure de fatigue au niveau de la racine de la soudure est éliminé, il existe plusieurs solutions pour améliorer la résistance à la fatigue des joints soudés, en particulier au niveau du pied du cordon de soudure. [2]. Le chapitre en question se concentre sur les techniques à caractère mécanique visant à améliorer la résistance à la fatigue des joints de soudure. L'objectif principal de ce chapitre est d'examiner et de présenter des techniques mécaniques spécifiques qui peuvent être utilisées pour renforcer les joints de soudure et améliorer leur résistance à la fatigue.[1]. Ces traitements peuvent être divisées en deux grandes catégories, celles qui traitent les problèmes géométriques (concentrations de contraintes) et celles qui traitent des problèmes de contraintes résiduelles. La figure 1 présente la classification de ces techniques d'améliorations [3].

II. TECHNIQUES D'AMELIORATION DES JOINTS DE SOUDURE :

La géométrie de la soudure est l'un des principaux facteurs qui contrôlent la durée de vie des éléments soudés. En conséquence, les techniques qui améliorent le profil de la géométrie de la soudure, en particulier la géométrie du pied du cordon de soudure, aura un effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue. Les méthodes de modification de la géométrie du pied de soudure reposent principalement sur la réduction de la concentration des contraintes due au profil de la soudure. Ils peuvent également supprimer ou réduire les défauts de pied de soudure [5].

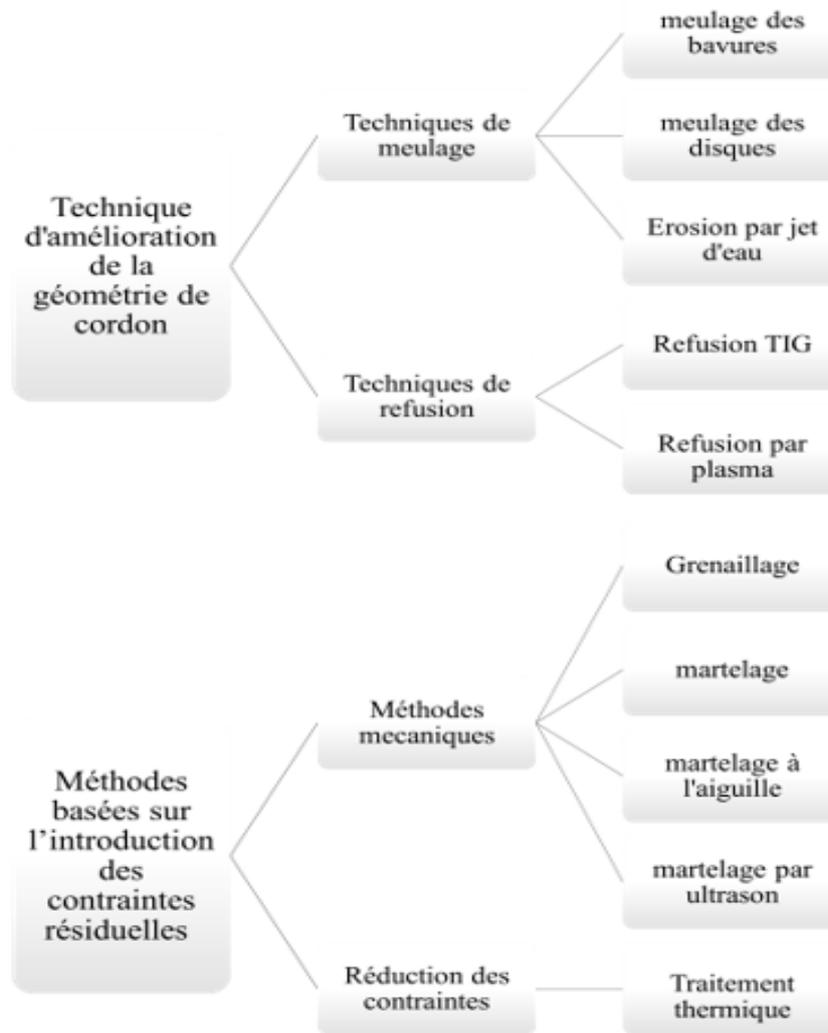


Figure 1 : Classification des techniques d'amélioration des joints de soudure [4]

II.1. Techniques de meulage

Diverses techniques sont utilisées pour modifier la géométrie du pied de soudure dans le but de réduire les concentrations de contraintes au pied de cordon de soudure tels que le meulage, les principaux sont le meulage des bavures, le meulage des disques et l'érosion par jet d'eau :

- Meulage des bavures :

Le meulage des bavures de soudure est réalisé à l'aide d'une meuleuse pneumatique, hydraulique ou électrique à grande vitesse entraînant des fraises rotatives à une vitesse de rotation comprise entre 15000 et 40000 tr/min. La soudure doit être nettoyée à la brosse métallique avant le meulage des bavures [6].



Figure 2 : Meulage des bavures [6].

L'objectif principal du meulage est d'éliminer ou de réduire la taille des défauts de pied de soudure à partir desquels les fissures de fatigue se propagent. En même temps, il vise à réduire l'effet de concentration de contraintes locales du profil de la soudure en mélangeant en douceur la transition entre la plaque et la face de soudure. Par conséquent, le matériau est enlevé à une profondeur d'au moins 0,5 mm en dessous de tous caniveaux visibles, mais ne doit pas dépasser 5 % de l'épaisseur de la plaque [31].

- Principe de meulage

La bavure est centrée sur le pied de soudure. L'axe de l'outil doit être à 45-60° par rapport à la plaque principale et à environ 45° par rapport à la direction de voyage. La meuleuse peut être poussée ou tirée le long de la soudure. Habituellement, le premier est plus réussi à établir une rainure droite de même profondeur. En général, le meulage doit s'étendre sur une profondeur d'au moins 0,5 mm en dessous de tous défauts visibles.

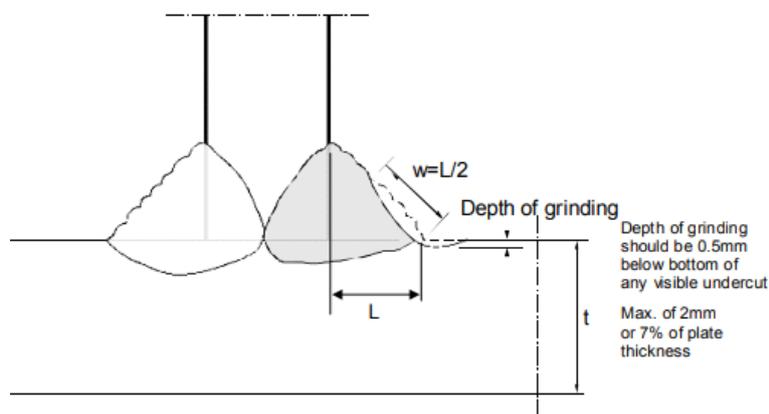


Figure 3 : Technique de meulage des bavures [6]

- Meulage des disques :

Lorsqu'une meuleuse à disque est utilisée pour éliminer les inclusions de laitier et les défauts de caniveaux et modifier la forme de la soudure le processus prend moins de temps et donc moins coûteux. De plus, le meulage à disque présente l'inconvénient de laisser des marques normales à la direction de la contrainte dans une soudure chargée transversalement, qui servent

de sites d'initiation des fissures de fatigue. Ainsi, les résultats d'amélioration de la fatigue obtenus en utilisant le meulage à disque sont un peu inférieurs à ceux obtenus pour le meulage à bavures et les résultats ont également une plus grande dispersion. L'amélioration de la résistance à la fatigue obtenue pour les joints soudés rectifiés au disque à 2×10^6 cycles se situe entre 20 et 50 % [7].

- Erosion par jet d'eau :

La technique d'érosion par jet d'eau consiste à diriger un jet d'eau à haute pression contenant des particules abrasives au niveau de la soudure. Les particules abrasives érodent le matériau de la face de soudure en éliminant la zone du pied de soudure, y compris les caniveaux et les inclusions de laitier. Les mécanismes physiques de l'amélioration de la résistance à la fatigue qui en résulte sont similaires aux autres traitements du pied du cordon de soudure, à savoir, l'angle du pied du cordon de soudure est réduit pour fournir une transition en douceur vers la plaque de base, et les inclusions et caniveaux du pied de cordon de soudure sont supprimées, ce qui entraîne une réduction de la concentration de contrainte. Il est rapporté par Harris [8] que cette technique peut être appliquée plus rapidement et donc plus efficacement que d'autres traitements tels que le meulage, le TIG ou le pansement par plasma.

II.2. Techniques de refusions

En appliquant ces techniques, la zone du pied du cordon de soudure est soumise à une fusion superficielle, ce qui entraîne la formation d'une soudure avec une résistance à la fatigue considérablement améliorée. Cette amélioration résulte d'une meilleure forme du pied de cordon de soudure, ce qui réduit les concentrations de contraintes. De plus, l'élimination des inclusions de laitier et des défauts dans la zone du pied du cordon de soudure, ainsi qu'une augmentation de la dureté dans la zone affectée par la chaleur, contribuent également à renforcer la résistance à la fatigue de la soudure. [10]. Il existe principalement deux types de dressage :

- Refusions TIG :

La refusion du pied du cordon de soudure est réalisée à l'aide du procédé TIG (Tungsten Inert Gas) comme illustré dans la figure 4. Ce procédé est sensible à la présence de contaminants tels que la calamine, la rouille, l'huile et la peinture. Par conséquent, il est nécessaire de préparer la zone à souder en effectuant un nettoyage, un brossage métallique et un léger meulage. De nombreux paramètres ont un impact sur le résultat final, notamment le gaz de protection, la vitesse de déplacement, le courant de soudage, la position de la torche, etc. Pour obtenir les spécifications précises de la procédure de refusion TIG appropriée, il est recommandé de se référer aux directives de l'IIW (International Institute of Welding). Le but du dressage TIG est

de remédier aux défauts présents au niveau du pied du cordon de soudure en refondant le matériau à cet endroit. Il a également pour réduire l'effet de concentration de contraintes local causé par le profil du pied du cordon de soudure, en assurant une transition en douceur entre la plaque et la surface de la soudure. [6].

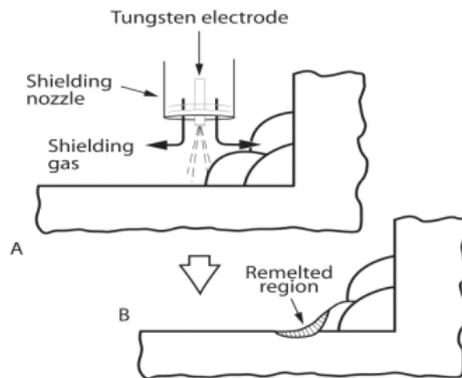


Figure 4 : Refusions TIG [11]

- Conditions et procédure de refusions TIG :

La forme de l'arc varie en fonction de la forme et de l'état de la pointe de l'électrode. Il est important d'éviter d'utiliser un débit de gaz trop faible ainsi que les courants d'air afin de prévenir toute instabilité de l'arc [12]. De plus, pour éviter la fissuration, il est recommandé de réaliser un préchauffage d'environ 150 °C pendant au moins 20 minutes lorsque le processus de dressage TIG est appliqué immédiatement après le soudage. L'augmentation de l'apport de chaleur lors du processus de dressage TIG conduit à la formation d'un cordon de soudure plus lisse avec une résistance à la fatigue accrue. Lorsqu'il est combiné avec la possibilité d'atteindre des vitesses de dressage plus élevées, cela contribue à une plus grande efficacité et productivité. Ainsi, il est souhaitable de maintenir le courant aussi élevé que possible, tout en évitant la formation de caniveaux ou de profils de cordon non conformes aux normes [13-14]. Il est recommandé d'avoir un apport de chaleur minimal d'au moins 1,0 kJ/mm et de veiller à ce que la pointe de l'électrode soit propre et tranchante afin de prévenir la formation de porosités [15]. Les meilleurs résultats du procédé dressage par TIG sont obtenus lorsque la zone refondue est positionnée soigneusement par rapport au pied du cordon de soudure d'origine. La figure 5 indique un emplacement approprié de l'arc centré par rapport au pied du cordon de soudure et il montre une légère inclinaison latérale de la torche à partir de la position perpendiculaire, ce qui peut entraîner un profil de cordon favorable. De même, une petite inclinaison vers l'arrière aide à maintenir un débit de gaz adéquat, améliorant ainsi la résistance à la fatigue [12].

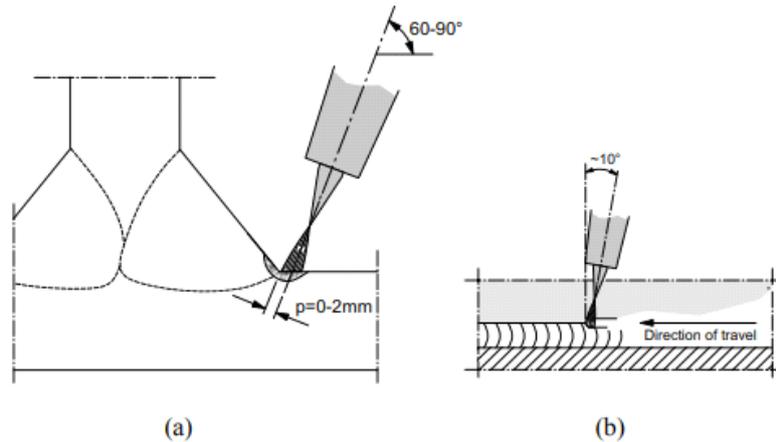


Figure 5 : Position typique de la torche et de la zone de dressage [12]

- Refusion par plasma :

La refusion par plasma et la refusion TIG sont similaires, mais la principale différence réside dans l'apport de chaleur, qui est environ deux fois plus élevé dans la refusion par plasma. Cette chaleur supplémentaire génère un bain de soudage plus important, ce qui favorise une meilleure fusion entre le matériau de soudure et le métal de base. De plus, le bain de soudage plus grand rend cette méthode moins sensible à la position de l'électrode par rapport à la zone de soudure. [9]. Il a été constaté que les améliorations de la durée de vie de la fatigue obtenues par le dressage par plasma sont généralement plus grandes par rapport à la refusion TIG [4].

Il est à noter l'existence de techniques de soudage spéciales permettant l'amélioration du profil du cordon de soudure [17] par la passe finale de soudage, en conséquence la réduction du facteur de concentration de contraintes ou l'utilisation d'électrodes spéciales.

III. Techniques d'amélioration spéciaux

Les techniques de soudage spéciales sont des méthodes d'amélioration de la fatigue qui sont appliquées pendant le processus de soudage lui-même. Elles visent à éliminer ou réduire la nécessité de modifications coûteuses après le soudage, tout en réduisant la concentration de contraintes au niveau du pied de la soudure. Ces techniques cherchent à améliorer directement la qualité du joint soudé afin de minimiser les contraintes résiduelles et les zones de concentration de contraintes qui pourraient entraîner une défaillance prématurée en fatigue.

- Contrôle du profil de soudure :

Selon l'AWS (American Welding Society) en 1996, il est possible de réduire le facteur de concentration de contraintes dans les joints soudés multi passes en contrôlant la forme de la soudure. Pour ce faire, il est spécifié que le profil de soudure doit être concave, ce qui permet d'assurer une transition en douceur au niveau du pied de la soudure. Cette transition est obtenue

en utilisant une technique appelée "dime test". La passe de pied de soudure (passe de beurre) est déposée avant que le bouchage passe et le pied de soudure est inspecté à l'aide d'un "dime" de diamètre égal à l'épaisseur de la fixation (jusqu'à un diamètre maximum de 50 mm). Si la soudure ne passe pas le test de dime, il est possible d'effectuer un meulage correctif au niveau du pied de soudure et des encoches entre les cordons [32]

III. METHODES BASEES SUR L'INTRODUCTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES :

Il existe différentes techniques de réduction des contraintes résiduelles afin de diminuer les contraintes de traction élevées présentes dans le cordon de soudure et même de générer des contraintes de compression au pied de la soudure [18]. Diverses méthodes pour réduire la sensibilité des structures soudées aux défaillances causées par les contraintes résiduelles. [19]

- Grenaillage :

Le grenaillage est de plus en plus utilisé comme un processus de traitement à froid pour renforcer la résistance à la fatigue des soudures. Il est également devenu une méthode courante pour éliminer les fissures de fatigue dans les structures en acier. Ce processus consiste à projeter des billes métalliques rondes à grande vitesse sur la surface d'une pièce métallique, ce qui entraîne une déformation plastique de la surface. Cette déformation laisse une trace concave à la surface du métal, comme illustré dans la figure 6. Les contraintes résiduelles de compression bénéfique sont introduites à la surface. De nombreuses études ont montré que plusieurs facteurs intervenaient sur l'efficacité du grenaillage suivant les pièces à traiter, à savoir les caractéristiques mécaniques des projectiles, leurs tailles, la vitesse de projection, l'angle d'attaque, le débit de la grenaille et le temps d'exposition. L'intensité du traitement se mesure alors via la déformée d'éprouvettes de type « Almen » et par évaluation du taux de recouvrement. Par ailleurs, il est indispensable d'assurer un tri des projectiles déformés ou cassés au cours du traitement [20].

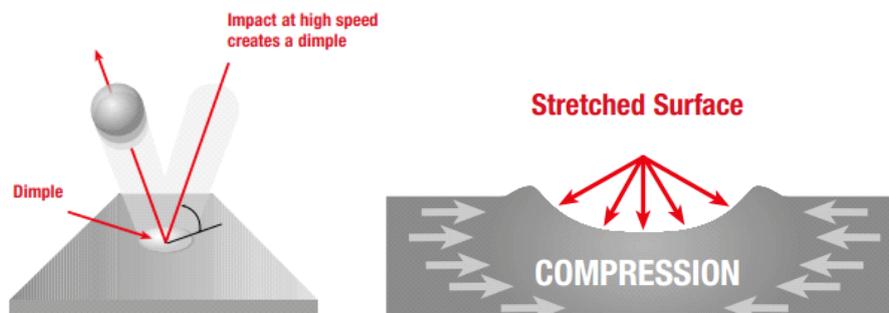
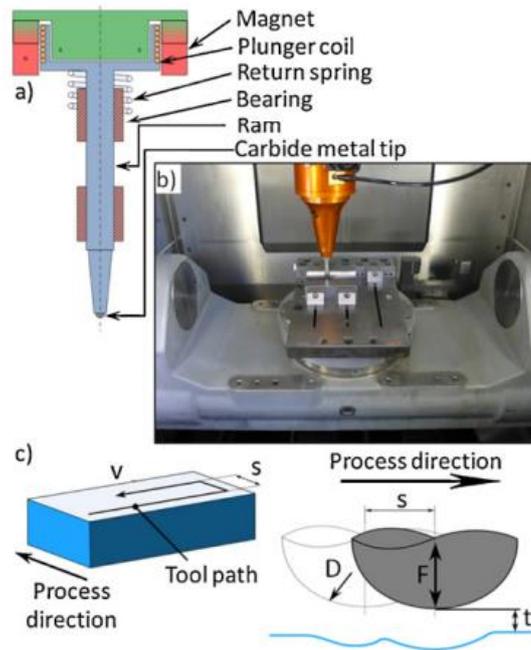


Figure 6 : Principe du grenaillage [12]

- Martelage :

Le martelage est une technique manuelle qui remonte aux années 1940 et qui implique l'utilisation d'outils pneumatiques ou électriques pour créer des contraintes résidues de compression par déformation plastique de la surface d'une pièce. Les outils pneumatiques sont les plus couramment utilisés et ils fonctionnent à une fréquence d'environ 80 coups par seconde. Ces outils utilisent des pointes semi-sphériques en acier trempé [11]. Lors du martelage, l'outil doit être maintenu à peu près perpendiculaire à la surface de la soudure et incliné à un angle de 45 degrés par rapport à la surface de la plaque de base. La figure 1.a présente le schéma de base du dispositif MHP (Martelage Haute Pression). Le vérin du dispositif MHP est guidé par deux paliers linéaires et est actionné axialement par une bobine de piston. Lorsqu'un courant sinusoïdal circule dans la bobine, le piston est poussé contre la surface du matériau, puis se soulève à nouveau. En l'absence de courant, un ressort de rappel déplace le piston en position haute pour garantir une course de départ définie. L'actionneur responsable de ce mouvement peut être basé sur divers principes de fonctionnement, tels qu'un système d'actionneur électromagnétique. Il est généralement intégré à une machine-outil ou à un robot. Grâce au positionnement contrôlé par commande numérique de la pointe de martelage, il est possible d'usiner la surface par des impacts bien dirigés (Fig. 1b). La capacité à réaliser une modification de surface contrôlée est l'un des avantages distinctifs du processus MHP par rapport à d'autres technologies similaires telles que le grenailage., le procédé MHP permet de garantir une intensité d'impact uniforme sur l'ensemble de la zone usinée, ce qui offre un meilleur contrôle sur la modification de surface réalisée. [21]. Les paramètres qui peuvent être ajustés pour influencer le processus de martelage sont illustrés par la figure 1c.

Le martelage des soudures est réalisé en travaillant l'outil le long du pied du cordon de soudure à une vitesse d'environ 1 po/sec. Les chercheurs ont constaté que cette technique nécessite plusieurs passages pour obtenir des résultats optimaux. Ce type de traitement produit des améliorations beaucoup plus élevées de la résistance à la fatigue par rapport au grenailage en raison de la déformation locale produite à froid, ce qui entraîne des contraintes résiduelles de compression. Les contraintes résiduelles émanant de ces déformations plastiques locales atteignent généralement entre 2 et 5 mm de profondeur. Le traitement de martelage réduit également la concentration de contraintes au pied de la soudure en modifiant l'angle de la pointe de la soudure et le rayon du pied de soudure [9].



- Martelage à l'aiguille :

Le martelage à l'aiguille est un processus qui ressemble au martelage traditionnel, mais au lieu d'utiliser un outil solide, on utilise un faisceau de fils d'acier d'environ 2 mm de diamètre avec des extrémités arrondies. Pendant l'opération, l'outil est maintenu à un angle d'environ 45° par rapport à la surface de la plaque, et les extrémités des aiguilles sont en contact avec le cordon de soudure. On applique une force suffisante sur l'outil lors du martelage à l'aiguille afin d'éviter les mouvements instables et d'assurer un grenailage uniforme. [6]. Le marquage à l'aiguille consiste à frapper plusieurs fois la surface avec une pointe d'aiguille, comme le montre la figure 8. Ce processus génère des contraintes résiduelles de compression bénéfiques dans la couche de surface autour du pied du cordon de soudure. De plus, l'utilisation de cette méthode entraîne un écrouissage et réduit la concentration de contraintes au niveau du pied du cordon de soudure.[23].

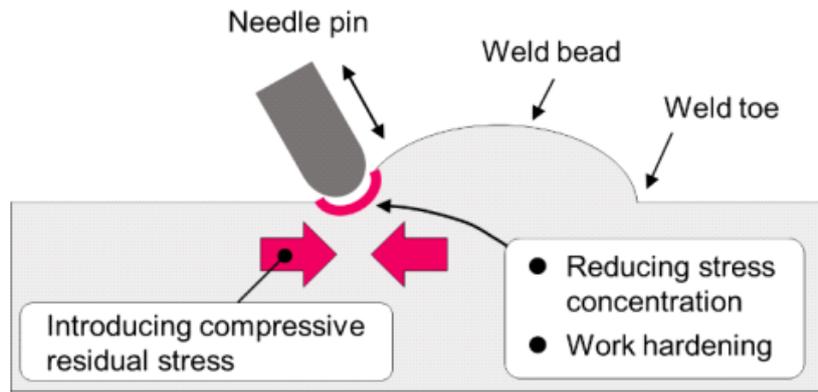


Figure 8 : Principe de martelage à aiguille (needle peening) [23]

- Martelage par ultrason :

Le martelage par ultrasons (UP) est une technique prometteuse pour la déformation plastique de surface des matériaux, des pièces et des éléments soudés. Une autre méthode de parachèvement de soudure utilisant les ultrasons est le traitement par impact par ultrasons (UIT), également connu sous le nom de martelage haute fréquence (HFMI) ou impact mécanique haute fréquence (Figure 9). Ce traitement mécanique à froid consiste à appliquer des impacts à l'aide d'une aiguille ou d'un percuteur sur la zone de soudure, ce qui provoque un élargissement du rayon de la soudure et l'introduction de contraintes résiduelles de compression.[24].

La technique UP repose sur l'utilisation combinée d'impacts à haute fréquence générés par des percuteurs spéciaux et d'oscillations ultrasoniques dans le matériau traité. L'un des principaux avantages de la technologie UP réside dans la fréquence élevée des impacts, qui est plus élevée que celle des autres méthodes d'amélioration connues. L'équipement optimisé pour UP ne consomme qu'une faible quantité d'énergie électrique, généralement entre 0,2 et 0,4 kW. La qualité du traitement UP permet d'obtenir les caractéristiques de fatigue les plus élevées pour les éléments soudés par rapport aux autres méthodes d'amélioration. Un transducteur à ultrasons, qui peut être basé sur la technologie piézoélectrique ou magnétostrictive (Figure 10), génère des oscillations à une fréquence élevée de 20 à 30 kHz. Quelle que soit la technologie utilisée, l'extrémité de sortie du transducteur oscille généralement avec une amplitude de 20 à 40 μm [25].

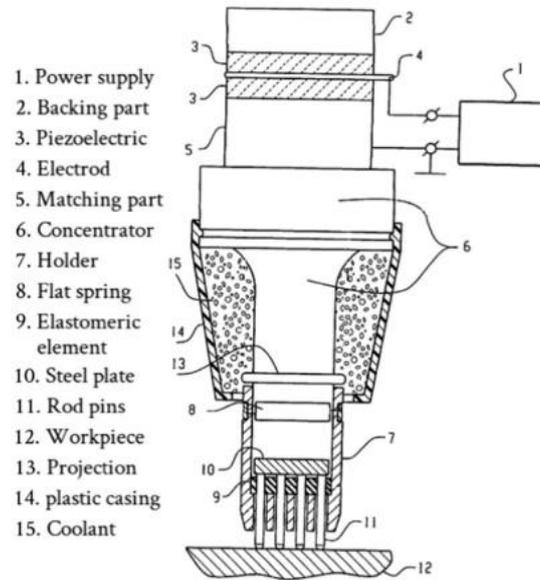


Figure 9 : Outil de martelage ultrasonique [26]

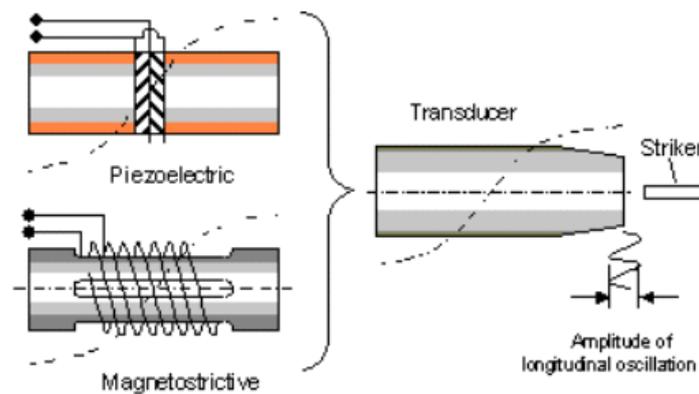


Figure 10 : Le transducteur de martelage par ultrason [25]

Le martelage ultrasonique "UP" est très efficace pour éliminer les contraintes résiduelles de traction nuisibles et introduire les contraintes résiduelles de compression bénéfiques dans la couche de surface des pièces et des éléments soudés. Le mécanisme de redistribution des contraintes résiduelles est principalement lié à deux facteurs. Lors d'un chargement d'impact à haute fréquence, l'oscillation avec un spectre de mode de fréquence complexe se propage dans un élément traité. La nature de ce spectre dépend de la fréquence de transducteur ultrasonique, masse, quantité et forme des unités d'impact (sphères, tiges, etc.), ainsi que sur la géométrie de l'élément traité. Ces oscillations entraînent une baisse de la valeur des contraintes résiduelle de soudage, le deuxième et le plus important facteur, au moins pour l'amélioration de la fatigue, est la déformation plastique de surface, qui conduit à l'introduction de la compression bénéfique des contraintes résiduelles [25]

La figure 11 illustre le concept d'amélioration de la résistance à la fatigue des éléments soudés

grâce à la technique UP. Lorsqu'il s'agit d'éléments soudés, il est généralement suffisant de traiter uniquement la zone du pied du cordon de soudure. Cette zone de transition entre le métal de base et la soudure permet d'obtenir une augmentation significative de la durée de vie de l'élément soumis à des contraintes de fatigue. [27, 28].

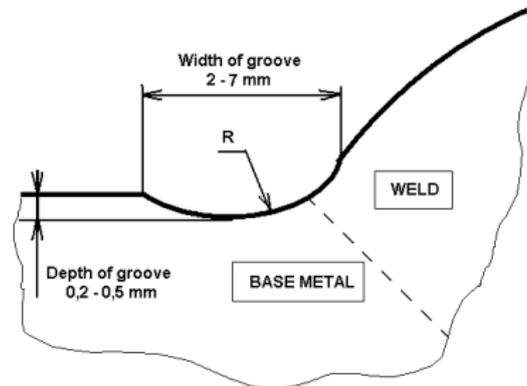


Figure 11: Profil amélioré du pied de cordon de soudure par martelage ultrasonique

IV. Réduction du contrainte résiduelle par un traitement thermique :

Le traitement thermique post-soudage (PWHT) est utilisé pour réduire les niveaux de contraintes résiduelles de traction dans les joints soudés, en particulier lorsque les contraintes appliquées sont partiellement compressives. Ce procédé implique de soumettre l'acier à une variation contrôlée de la température dans le temps.[29]

Malgré un cycle thermique minutieusement contrôlé, le traitement post-soudage (PWHT) ne permet pas de réduire les niveaux de contraintes résiduelles à zéro. Même dans des conditions optimales, les niveaux de contrainte résiduelle finale sont généralement d'au moins 30% de la limite d'élasticité du matériau. Si une contrainte résiduelle de traction d'environ 100 MPa subsiste après le traitement thermique post-soudage (PWHT), la plupart des cycles de fatigue appliqués, étant généralement inférieurs à 100 MPa dans la plage de contraintes, entraîneront toujours des contraintes de traction au niveau du pied de soudure. Ces contraintes augmenteront les risques de fissuration. Comme l'ensemble du cycle de contrainte appliquée est presque certainement toujours en traction, les codes de conception en fatigue ne reconnaissent aucun avantage en termes de durée de vie en fatigue et exigent que la même approche de conception soit utilisée pour les joints soudés et PWHT. Cependant, le traitement n'aggrave pas les performances de fatigue du joint, et il peut être effectué pour d'autres raisons telles que le contrôle dimensionnel, l'amélioration des performances de rupture ou la prévention de la

fissuration par l'hydrogène.[30]

V. Conclusion

Pour réduire les défauts de soudage qu'on peut avoir afin de processus de soudage et éliminer les contraintes résiduelles de traction au pied du cordon , y a des technique à faire qu'ils appelés les techniques de parachèvement qui peuvent améliorer le tenue en fatigue et la durée de vie d'un joint de soudure et rendre le plus résistant.

Références :

- [1] : RADM Robert C. North K.J. Kirkhope, R. Bell, L. Caron and R.I. Basu and all weld detail fatigue life improvement techniques . December 1996 Ottawa, Ontario, CANADA K2H 8S9
- [2] ::H.P.Lieurade, I.Huther - in "Festigkeit von schweissverbindungen ", Edit. Pries, nitschke-pagel, PubLSHAKER Verlag, 2001, p. 101-122
- [3] :M.H. (Johnny) Johnson process barron “ Fatigue life improvement techniques for welds 2770 “ Welborn street pelham, Alabama 35124
- [4] :Haagensen PJ. Improving the strength of welded joints. In: Almar-Naess A, editor. Fatigue hand-book. Trondheim: Tapir, 1985
- [5] :Marquis GB, Barsoum Z. A guideline for fatigue strength improvement of high strength steel welded structures using high frequency mechanical impact treatment. Procedia eng 2013; 66:98–107. doi:10.1016/j.proeng.2013.12.066.
- [6] :P. J. Haagensen and S J. Maddox “ IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminium structures the international institute of welding IIW commission XIII Revised 4 July, 2001
- [7] :I.F.C. Smith and M.A. Hirt, A review of fatigue strength improvement methods . Canda J Cical Eng. 1985 12:166-83
- [8] : Harris ID . Abrasive water jet cutting and its applications at TWI (UK) . Welding in the world 1994 ; 33 (4) /277-86
- [9] :K.J Kirkhope , R. Bell , L .Caron and all Weld detail fatigue life improvement techniques Part 1 : review 23 february 1999 Canda
- [10] : S. Kado et al., 1975 "Influence of the conditions in tig dressing on the fatigue strength in welded high tensile strength steels", IIW document XIII-771-75.
- [11] :Johnny Johnson, Fatigue improvement techniques for welds 2770 welborn street pelham, Alabama 35124
- [12] :.Ceferino Steimbregger “ Fatigue of welded structures “ Luleå university of technology deparment of engineering sciences and mathematics 2014
- [13] :ANON. “The method of TIG dressing”. Welding in the World, 14 (3/4), pp. 100-107, 1976.
- [14] :Haagensen, P. J. and Maddox, S.J. IIW recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints, IIW-2142-10, 1 st ed. Woodhead publishing series in welding and other joining technologies, 2013.

- [15] :Haagensen, P. J., "Improvement of the fatigue strength of welded joints". ECSC (European Commission for Steel Construction) Plenary session 6, International Conference Steels in Marine Structures, Paris, 5-8 October 1981.
- [17] :American welding society .Structural welding-steels code .AWS D1.1 Miami Florida , 1996
- [18] :1. Fisher, J. W. 1 984. Fatigue and Fracture in Steel Bridges. John Wiley & Sons. 2. Gurney, T. R. 1979. Fatigue of Welded Structures. 2nd Ed., Cambridge Univ. Press
- [19] :C. G. Schmidt and D. A. Shockey " Reduction of residual stresses in weldments with explosive treatments " Welding journal, december 1992
- [20] :Guénhaël le quilliec . Thèse de doctorat " Application du martelage à haute fréquence à l'optimisation de la maintenance des ouvrages et des structures soudées " Le 30 mars 2011 à l'ifsttar - centre de Nantes
- [21] Montross CS, Wei T, Ye L, Clark G, Mai YW (2002) " Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review" . International journal of fatigue 24:1021–1036.
- [22] Friedrich bleicher, christoph lechner, christoph habersohn, ernst kozeschnik, beatrix adjassoho, heinz kaminski, (2012). "Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology". CIRP Annals, Volume 61, Issue 1, pp. 375-378,
- [23] :Ryutaro fueki , Koji takahashi ; and Mitsuru handa " Fatigue limit improvement and rendering defects harmless by needle peening for high tensile steel welded joint" 28 january 2019
- [24] : <https://sonats-et.com/martelage/parachevement-de-soudure/>
- [25] :. Kudryavtsev, J. Kleiman ;L. Lobanov, V. Knysh .G. Prokopenko IIW document XIII-2010-04 fatigue life improvement of welded elements by ultrasonic peening .2010
- [26] G.I. Prokopenko, O.I. Kozlov, J.I. Kleiman, P.P. Micheev, V.V. Knysh, Y.F. Kudryavtsev, device for ultrasonic peening of metals, US Patent, No. US6467321-B2, Integrity testing laboratory, Inc., United states, 2002.
- [27] :.Y.F. Kudryavtsev, V.F.Korshun and A.Z.Kuzmenko. Improvement of fatigue life of welded joints by the ultrasonic impact treatment. Automatic Welding (Paton Welding Institute). 1989. No. 7. p. 24-28.
- [28] :Y.F. Kudryavtsev, P.P.Mikheev, V.F.Korshun. Influence of plastic deformation and residual stresses, created by ultrasonic impact treatment, on the fatigue strength of welded joints. Automatic Welding (Paton Welding Journal). 1995. No. 12. p. 3-7.

Chapitre III : Techniques d'amélioration des joints de soudure

[29] : P. Renaud, « Modélisation numérique du grenailage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées,» Paris, 2011, soutenue le 17 juin 2011 these de doctorat.

[30] : Philippa Moore, Geoff Booth, in [The Welding Engineer's Guide to Fracture and Fatigue](#), 2015

[31] Haagensen PJ, Maddox SJ. Specifications for weld toe improvement by burr grinding, TIG dressing and hammer peening for transverse welds. IIW commission XIII working group 2, collaborative Test program on improvement techniques, 1995

[32] American welding society .Structural welding-steels code .AWS D1.1 Miami Florida , 1996

Chapitre 4

I. INTRODUCTION

La soudure est couramment utilisée pour joindre des matériaux, mais les structures soudées ont généralement une résistance à la fatigue plus faible que celle des matériaux d'origine et de remplissage. Cela est principalement dû à la présence de tensions résiduelles importantes, de concentrations de contraintes élevées et souvent d'une dureté de surface insuffisante. Dans le domaine de la conception à la fatigue, il est souvent nécessaire d'améliorer les joints soudés à l'aide de techniques de parachèvement après la soudure. Ce chapitre présente un aperçu des techniques visant à améliorer les joints soudés et examine leur impact sur le comportement en fatigue ainsi que les effets des contraintes résiduelles.

II. INFLUENCE DU MEULAGE

L'étude menée par Gao et al. [1] examine l'effet du meulage et du traitement d'impact par ultrasons sous-marine (UUIT) sur la résistance à la fatigue des soudures réalisées sous l'eau. Le matériau de base utilisé est une plaque d'acier DH36 d'une épaisseur de 12,7 mm. Pour effectuer la soudure, une électrode sous-marine E7014 d'un diamètre de 3,2 mm et revêtue de cire est utilisée.

Les résultats indiquent que la résistance à la fatigue des joints croisés soudés, soumis à une contrainte de 135 MPa et pour une durée de vie de 2×10^6 cycles, est améliorée grâce au meulage des bavures, au traitement d'impact par ultrasons subaquatiques (UUIT) et à la combinaison de meulage et UUIT. Les améliorations observées sont de l'ordre de 20%, 35% et 61%, ce qui correspond à des contraintes de 162 MPa, 182 MPa et 217 MPa respectivement. Ces résultats sont confirmés par la Figure 1. [1]

L'application de contraintes résiduelles de compression a entraîné une diminution du facteur d'intensité de contrainte effective, K_{eff} , et du rapport de charge effectif, R_{eff} . Pour un chargement avec un rapport de contrainte R égal à 0,1, le rapport de charge effectif a atteint une valeur nulle. Cela a conduit à une augmentation de la durée de vie en fatigue. La Figure 2 illustre la distribution des contraintes résiduelles transversales dans le joint, à la fois dans le métal de base (MB) et dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Ces contraintes résiduelles ont une nature compressive en raison du refroidissement rapide par l'eau lors du processus de soudage.[1]

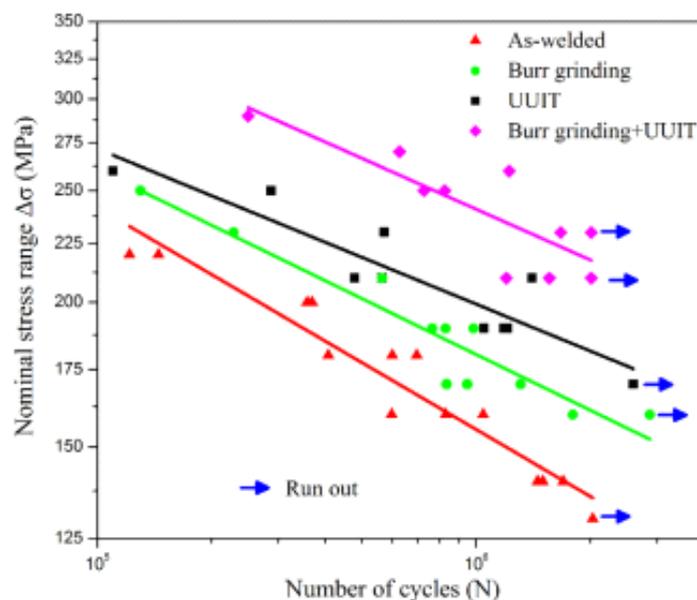


Figure 1 : Courbes S-N des joints soudés sous-marins de DH36 mesurés par la contrainte nominale ($R = 0,1$) [1]

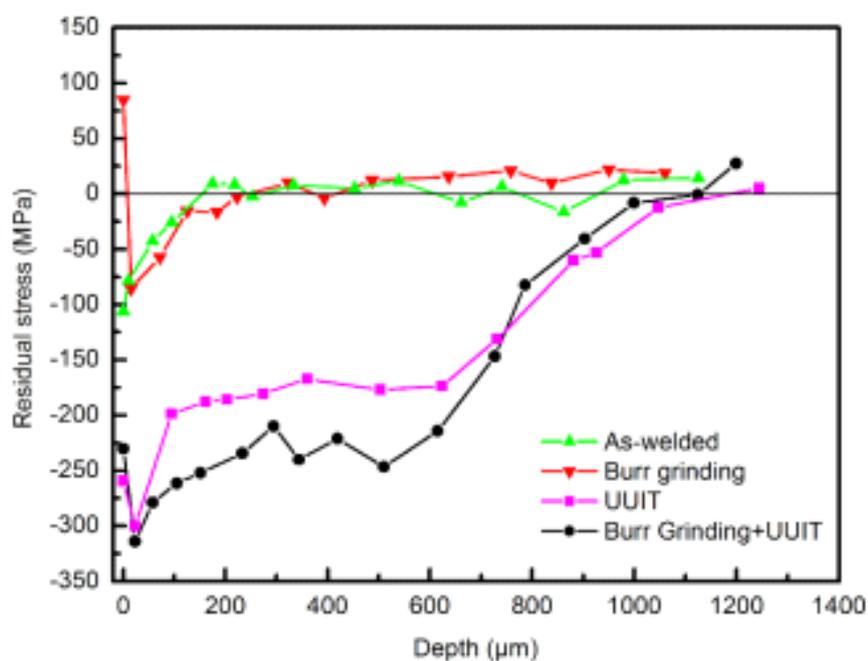


Figure 2 : Profils des contraintes résiduelles dans le sens de la profondeur [1]

Les fissures de fatigue s'amorcent près de la ligne de fusion (figure 3) en raison des variations des contraintes résiduelles de compression transversales entre le métal de base et la zone affectée thermiquement pour les quatre types d'amélioration étudiés. De plus, les procédés combinés de meulage et d'UUIT ont permis d'améliorer la dureté au niveau du joint de soudure, comme le met en évidence la Figure 4. [1]

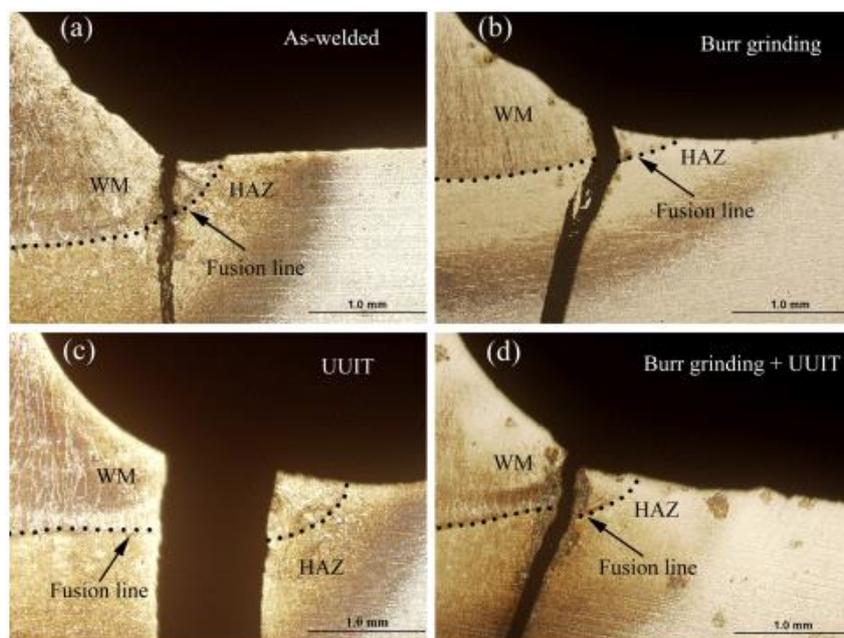


Figure 3 : Sites d'amorçage des fissures de fatigue [1]

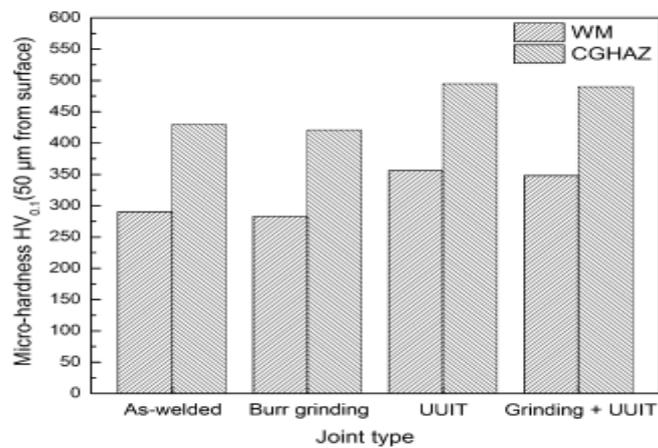


Figure 4 : Micro dureté moyenne à 50 μm de la surface [1]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Zhongqiu et al. [2] ont étudié l'effet du traitement par meulage sur les performances en fatigue de la soudure en nervure-toit de tabliers de pont en acier. Dans le Tableau 1, les spécimens sont répartis en trois groupes : le groupe SJ1, qui n'a subi aucun traitement, le groupe SJ2, qui a été soumis à un traitement de meulage. Chaque groupe SJ1 et SJ2 comprenait trois spécimens. Le groupe SJ3 a été découpé pour comparer les changements microstructuraux qui se produisent. La figure 5 montre la géométrie soudée et traitée par meulage.

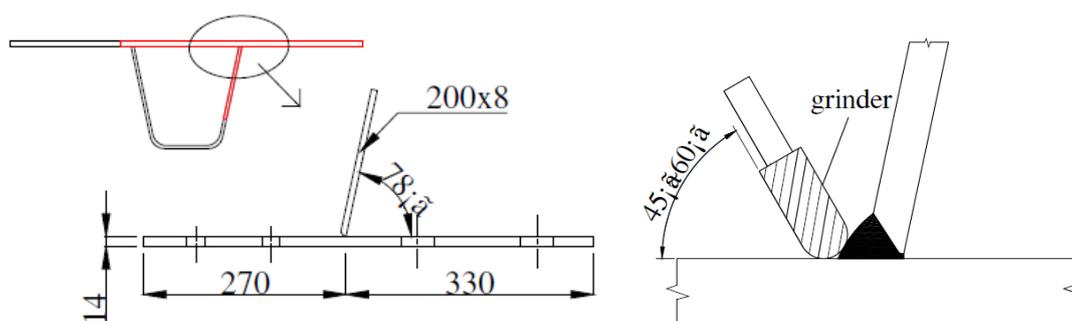


Figure 5 : (a) Géométrie soudée et traitement par meulage, (b) détail [2]

Tableau 1 : Effet du traitement de meulage d'un joint soudé sur la durée de vie en fatigue [2]

Numéro de l'échantillon	Traitement	Amplitude de contrainte appliquée	Durée de vie en fatigue (cycles)	Observations
SJ1-1	Non	100.9	4177100	
SJ1-2	Non	100.9	2243700	
SJ1-3	Non	101.4	2429400	
SJ2-1	Meulé	101.3	>10000000	Sans fissure
SJ2-2	Meulé	101.1	>10000000	15 mm de fissure
SJ2-3	Meulé	100.9	2585300	-
SJ3-1	Non	-	-	Test métallographique
SJ3-2	Meulé	-	-	//

Les résultats indiquent que le traitement de meulage a entraîné une augmentation du rayon de transition du pied du cordon de soudure. Le meulage a contribué à améliorer la stabilité géométrique en réduisant les changements de forme au niveau du pied du cordon. Cependant, le traitement n'a pas pu réduire les changements de forme à la racine du côté présentant un angle aigu. Cela est illustré dans la Figure 6. [2]

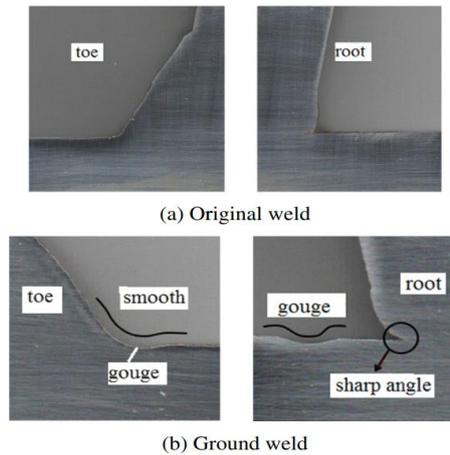
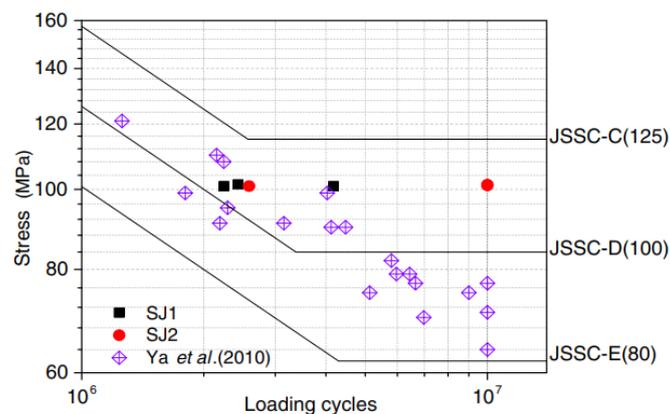


Figure 6 : Comparaison des formes de soudure (a) Sans traitement (b) Meulée [2]

La Figure 7 démontre que les éprouvettes sans traitement de meulage (groupe SJ1) ont toutes présenté des fissures d'une longueur de 100 mm avant d'atteindre 10 millions de cycles de chargement. Leurs durées de vie en fatigue étaient significativement plus courtes par rapport aux éprouvettes ayant subi un traitement de meulage (groupe SJ2). A 10 millions de cycles de chargement, l'éprouvette SJ2-1 n'a présenté aucune fissure, tandis que le spécimen SJ2-2 a montré une fissure d'une longueur de 15 mm. La fissure sur le spécimen SJ2-3 a atteint une longueur de 100 mm après 2 585 300 cycles de charge. Par conséquent, la durée de vie réelle en fatigue des spécimens SJ2-1 et SJ2-2 a dépassé les 10 millions de cycles de chargement. On observe une augmentation de 155% de la durée de vie en fatigue après le traitement de meulage, par rapport aux résultats obtenus par Yamada et al. [3]. Après le meulage, la première contrainte maximale a été trouvée en fond de la gouge de meulage et elle a diminué avec l'augmentation du rayon de la gouge et la diminution de la profondeur de la gouge (Figure 8). [2]



Fatigue 7 : Durée de vie en fatigue [2]

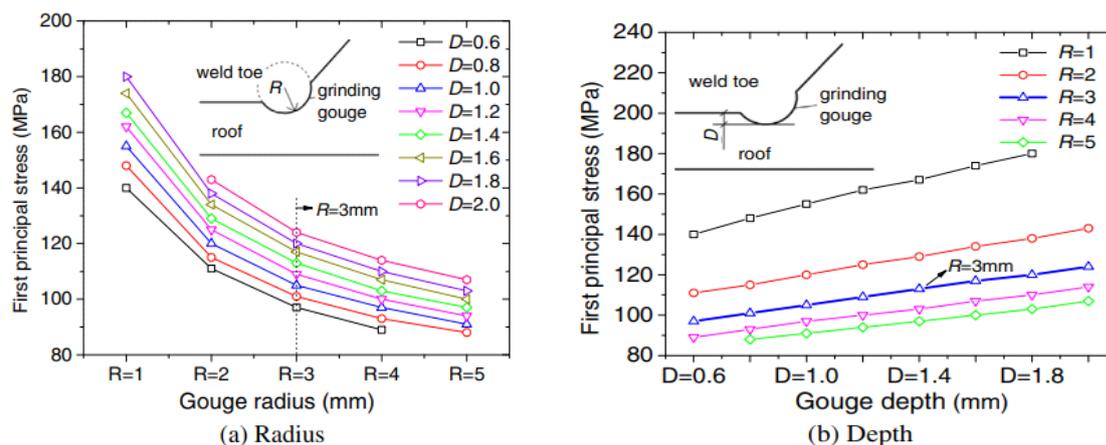


Figure 8 : Influence des paramètres de meulage (a) rayon (b) profondeur [2]

Le comportement en fatigue des assemblages soudés d'aciers inoxydables traités par meulage en pied de soudure et soumis à la corrosion saline a été étudié par Baptista et al. [4]. Ils ont aussi comparé le comportement en fatigue vis-à-vis de l'environnement (air et 3% NaCl) et du traitement du pied de soudure (meulage du pied). Les essais de fatigue conduits sur deux types de matériaux en aciers inoxydables : Duplex S31803 et Austénitique 304L. Les essais ont été réalisés en traction sur des éprouvettes cruciformes avec un cycle de fatigue à amplitude constante à $R = 0.1$ et 0.5 .

Les résultats montrent que la durée de vie en fatigue des éprouvettes meulées en pied de du cordon de soudure donne une valeur plus élevée par rapport aux éprouvettes en acier inoxydable Duplex S31803 soudées. La courbe d'endurance des joint meulées du cordon de soudure est nettement supérieure pour les faibles charges et a permis une augmentation de la résistance à la fatigue (Figure 9). Pour des essais sous corrosion et joints meulés on note aussi une augmentation de la résistance à la fatigue par rapport aux joints soudés bruts (figure10). [4]

La figure 11 représente l'effet bénéfique du meulage du cordon de soudure sur la courbe d'endurance de l'acier 304L comparativement par rapport à la courbe d'endurance du joint non amélioré. On note que pour une même amplitude de contrainte de 200 MPa, la durée de vie a augmenté de 5×10^5 à 9×10^7 cycles, cela est dû à la réduction des contraintes résiduelles de traction et introduction des contraintes de compression. [4]

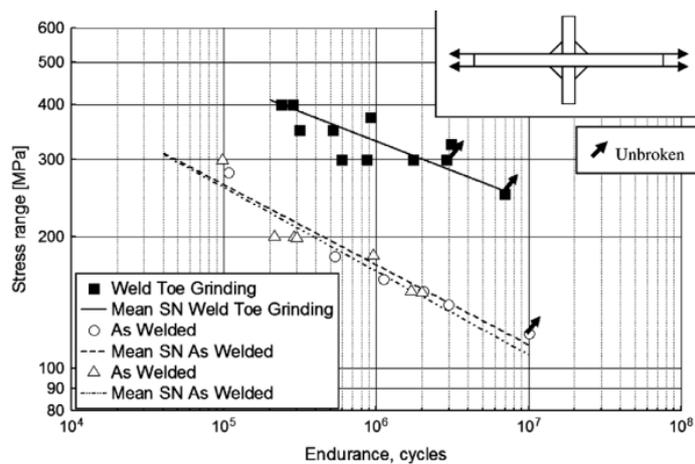


Figure 9 : Influence de la technique d'amélioration par meulage en soudage MAG de l'acier inoxydable Duplex S31803 à air [4]

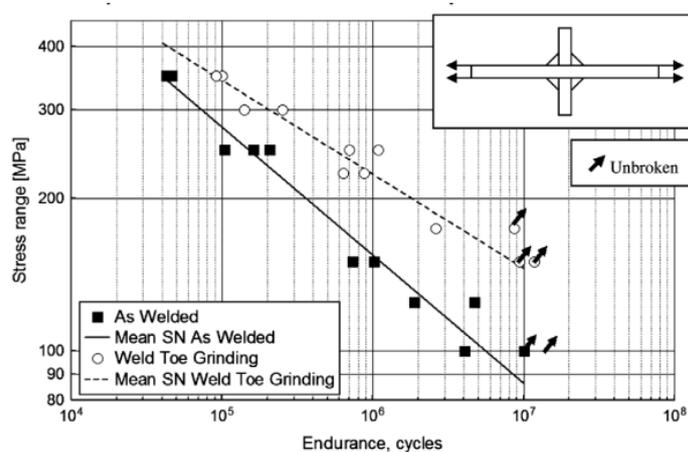


Figure 10 : Influence du meulage de l'acier inoxydable Duplex S31803 en solution corrosive à 3 % de NaCl [4].

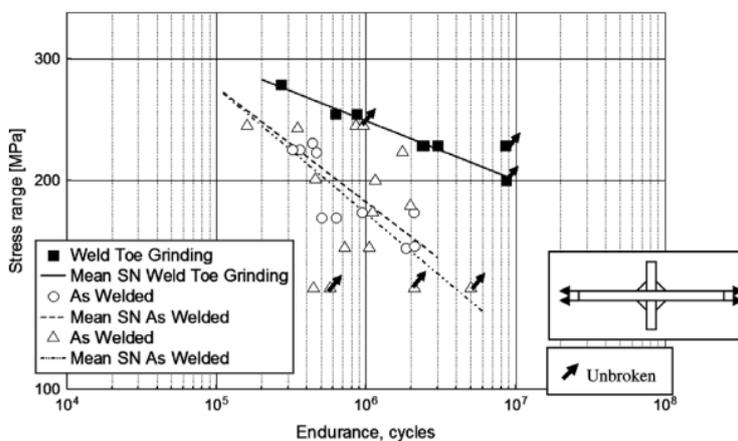


Figure 11 : Influence du meulage sur le joint soudé en acier inoxydable 304L [4]

L'effet du meulage des pieds des cordons de soudure et du profilage sur la résistance à la fatigue a fait l'objet d'une revue et synthèse par Braun et Wang [5]. Les résultats d'essais expérimentaux présentés sous l'effet du meulage ont montré une amélioration des pentes des courbes de résistance en fatigue en passant d'une pente $m=3$ à une pente $m=4$. Les courbes en pente $m=3$ défini le joint de soudure sans amélioration et est défini par IIW. A titre d'exemple, la figure 12 montre une comparaison des courbes d'endurances pour un joint soudé en bout à bout amélioré ($m=4$) par meulage par rapport à un joint soudé non traité ($m=3$). [4]

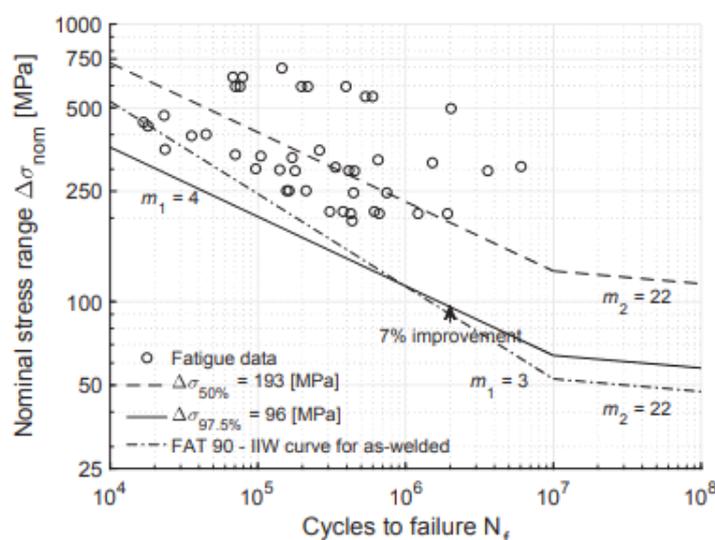


Figure 12: Comparaison des données de fatigue analysées sur la base d'une pente $m_1= 4$ avec les courbes S–N de conception recommandées pour l'état brut de soudage ($m_1 = 3$) [5]

III. INFLUENCE DE L'EROSION PAR JET D'EAU

Mochizuki et al. [6] ont examiné l'efficacité de l'érosion par jet d'eau de l'acier inoxydable austénitique soudé bout à bout, les résultats montrent que la technique de l'érosion par jet d'eau par meulage et martelage élimine les fissures de corrosion sous contrainte dans les joints soudés, car aucune fissure n'a été observée dans la région traitée au jet d'eau (figure 13).

L'effet du grenailage par jet d'eau pulsé par ultrasons sur la distribution des contraintes résiduelles et les propriétés de surface a été étudié par Madhulika et al. [7]. Les résultats indiquent que la technologie du jet d'eau sous pression (PWJ) est une méthode prometteuse pour le traitement de surface. Cette technique a entraîné une augmentation significative des contraintes résiduelles de compression maximales, passant de -67 MPa à -332 MPa dans la région soudée et de -122 MPa à -449 MPa dans la zone affectée thermiquement.

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Ce résultat a été obtenu à une pression beaucoup plus faible de 20 MPa et à une vitesse de rotation de 2 mm/s, par rapport aux autres méthodes de grenailage qui nécessitent des pressions de fonctionnement élevées de 100 à 400 MPa (Figure 14). Ces contraintes résiduelles présentent un effet bénéfique sur la résistance à la fatigue et la propagation des fissures. [7]

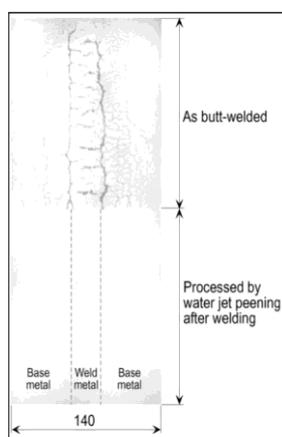


Figure 13 : Résultat du test fissuration par corrosion dans un assemblage bout à bout avec et sans traitement de martelage au jet d'eau [6]

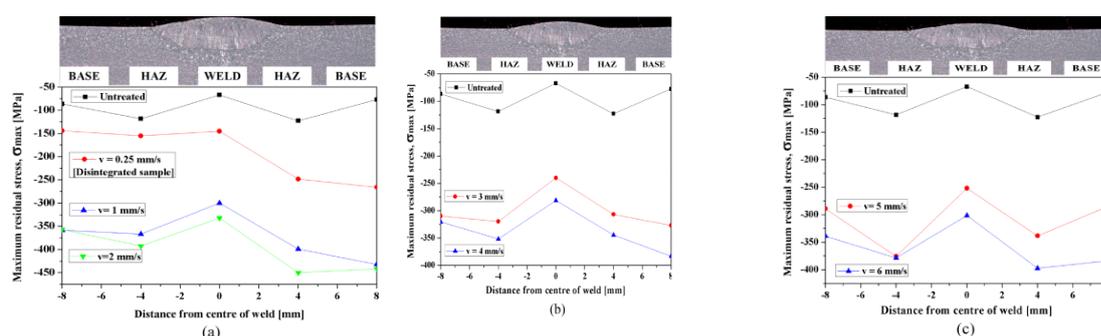


Figure 14 : Evolutions des contraintes résiduelles des joints soudés en AISI 304 traités à : (a) $p = 20$ MPa et $z = 45$ mm (b) $p = 40$ MPa et $z = 70$ mm (c) $p = 60$ MPa et $z = 100$ mm à l'aide d'une circulaire buse de $d = 1,9$ mm (p : pression, z : distance entre le milieu du cordon et la nature des contraintes résiduelles de compression) [7]

De même, Arola et al. [8] ont étudié le traitement de surface par jet d'eau et par jet d'eau abrasif du titane pur et de l'alliage de titane et ils ont observé que la contrainte résiduelle résultant du traitement par jet d'eau abrasif augmente avec l'augmentation de la pression du jet d'eau. Ils ont conclu que le traitement par jet d'eau abrasif offre de meilleurs résultats sur l'amélioration des contraintes résiduelles. La Figure 15a et 15b illustrent l'impact de la pression du jet et du nombre de mailles d'abrasif sur les contraintes résiduelles dans les échantillons en titane

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

commercial pur (cpTi) et l'alliage de titane (Ti6Al4V). Une diminution de la taille de l'abrasif et de la pression du jet d'eau a conduit à une augmentation de l'amplitude de la contrainte résiduelle de compression dans les deux matériaux. En revanche, une augmentation de la pression du jet d'eau et l'utilisation d'abrasifs plus gros ont favorisé une augmentation de l'énergie du jet, ce qui a entraîné une plus grande érosion hydrodynamique. Les contraintes résiduelles résultant du grenailage par jet d'eau des deux métaux ont augmenté avec la pression de traitement, comme le montre la figure 16c. Ce résultat a été confirmé de l'étude menée par Azhari et al. [9] où l'effet de l'augmentation de la pression et de la vitesse du jet d'eau a été mis en évidence sur l'état de rugosité de la surface traité (figure 16a et 16b).

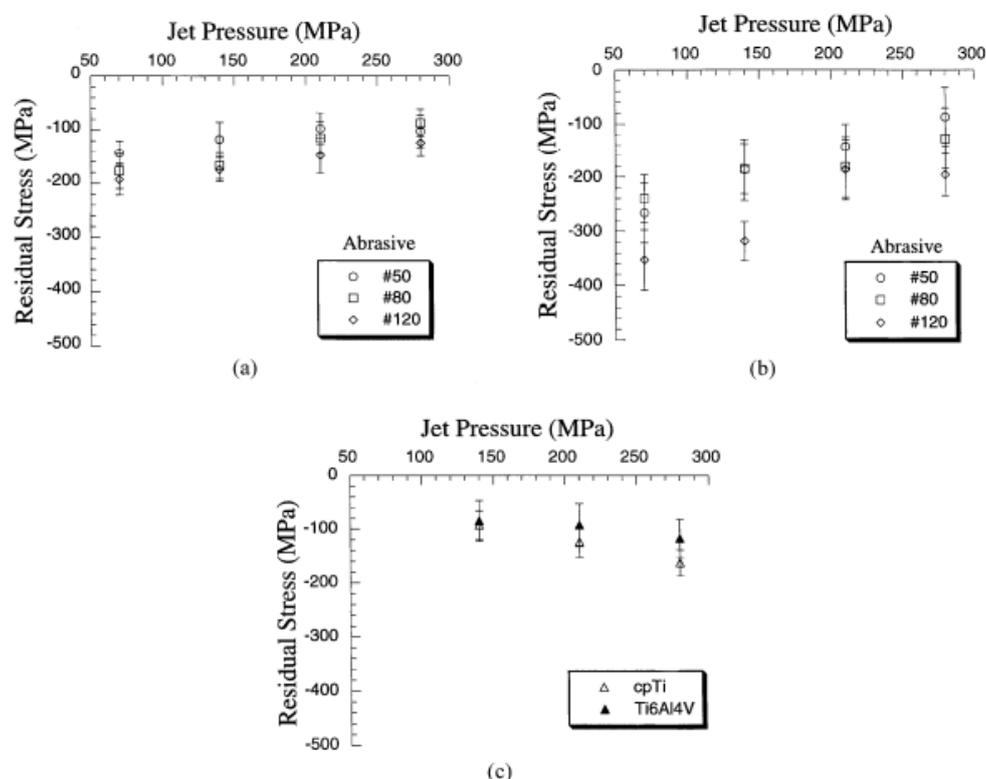


Figure 15 : Influence des paramètres de traitement par jet d'eau sur le niveau des contraintes résiduelles. (a) grenailage par jet d'eau avec abrasifs (AWJ) du cpTi ; (b) grenailage par jet d'eau avec abrasifs (AWJ) du Ti6Al4V; (c) Comparaison du traitement par jet d'eau (WJ) du cpTi et du Ti6Al4V [8]

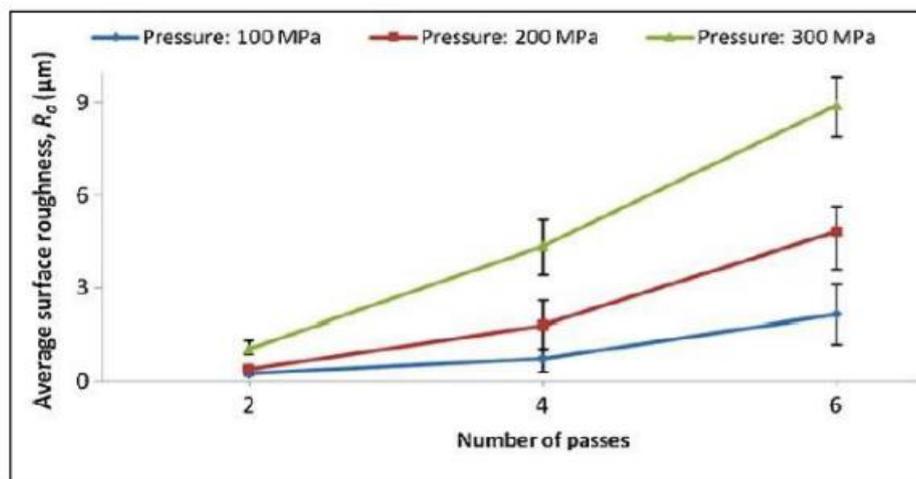


Figure 16a : Influence du nombre de passes du jet d'eau et de la pression sur la rugosité moyenne de la surface traitée [9]

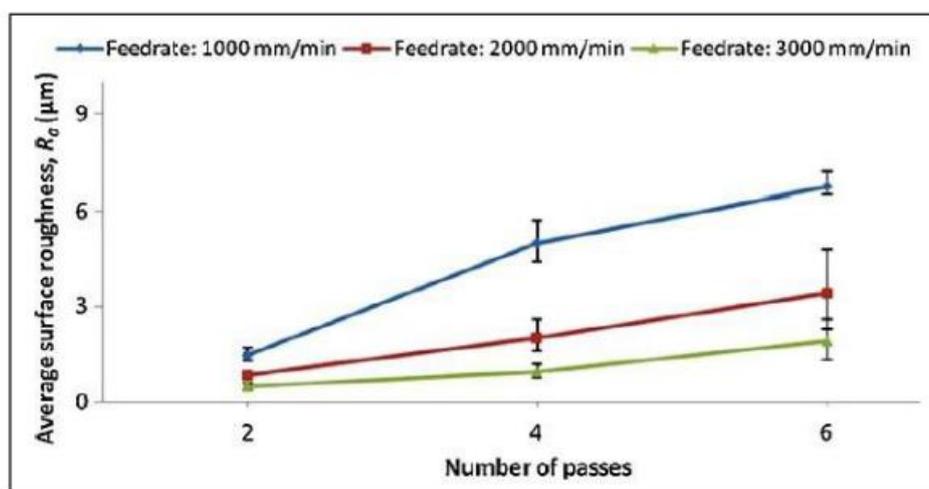


Figure 16b : Influence du nombre de passes du jet d'eau et de l'avance sur la rugosité moyenne de la surface traitée [9]

IV. REFUSION TIG ET DRESSAGE PAR PLASMA

Il est reconnu que les techniques d'amélioration après soudage éliminent les défauts de soudure et réduisent la concentration de contraintes au pied du cordon de soudure. De plus après amélioration, la durée de vie à l'amorçage des fissures sous chargement en fatigue augmente et la résistance à la fatigue est améliorée. Les techniques d'améliorations citées plus chacune à ses effets sur le comportement en fatigue et les caractéristiques mécaniques. Les techniques de la refusion TIG et dressage par Plasma sont parmi les techniques qui ont apportés leurs effets bénéfiques sur le comportement mécanique et la résistance à la fatigue. Des travaux de recherches menés ont contribué à la mise en œuvre de ses techniques. Ramalho et al. [10] ont

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

investigué expérimentalement l'effet de réhabilitation des joints soudés en T par refusion TIG et par dressage Plasma sur le comportement en fatigue des assemblages en acier de construction à résistance moyenne. Les essais de fatigue ont été réalisés en flexion trois points sous chargement d'amplitude constante avec un rapport de charge $R = 0,05$ et une fréquence de 7 Hz. Les joints traités par refusion TIG et dressage par Plasma sont montrés par la figure 17a et 17b. Les résultats des essais de fatigue indiquent que la technique de refusion TIG des joints bruts de soudure avec des fissures de fatigue profondes au niveau du pied du cordon de soudure (à une profondeur de 4 mm) est inappropriée pour la réhabilitation des joints de soudure présentant de telles fissures profondes. Les essais de fatigue en endurance après traitement montrent des performances similaires à celles des joints de soudure non améliorés en termes de résistance à la fatigue (Figures 18a et 18b). [10]

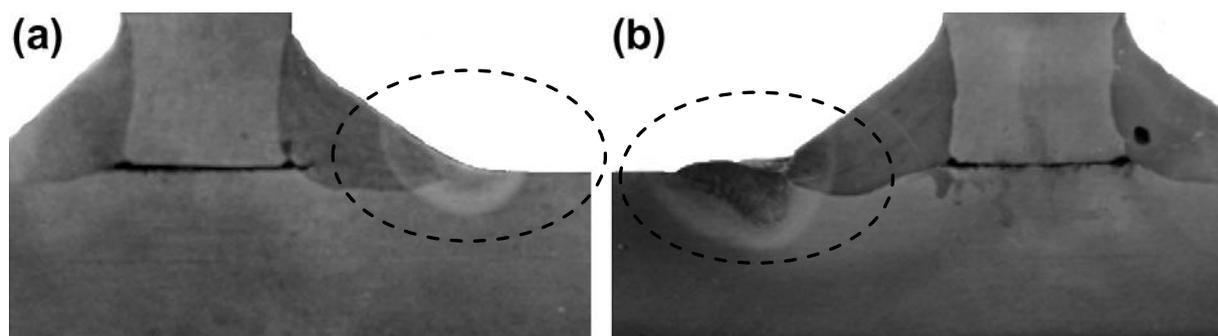


Figure 17: Profil des joints soudés (a) refusion TIG et (b) dressage par Plasma [10]

De l'analyse des courbes S–N obtenues, on peut souligner certains aspects pertinents à savoir qu'aucune amélioration attendue n'est produite de la durée de vie des éprouvettes des joints soudés après fissuration par fatigue (TAS) (figure 18c). Après réparation par dressage au Plasma (PDR) (figure 18d), les éprouvettes atteignent des durées de vie proches de celles de la série des joints soudés sans réparation (AW) (figure 18a) ; Les résultats des tests de fatigue ont montré que les éprouvettes réparées par refusion TIG présentaient des performances nettement inférieures à celles des éprouvettes réparées par plasma. Cependant, les courbes d'endurance (S–N) obtenues pour toutes les séries étaient supérieures aux courbes de conception imposées principalement par le code IIW [11] pour ce type de joint soudé non amélioré. Les auteurs ont démontré que les pentes des courbes S–N obtenues pour la série traitée par refusion TIG sont proches de celles fournies par le code IIW [14] pour des joints soudés similaires. Le gain en amélioration de la durée de vie en fatigue par la technique de refusion TIG et dressage Plasma

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

est due à la contribution des contraintes résiduelles de compression près du pied du cordon de soudure (figure 19). [10]

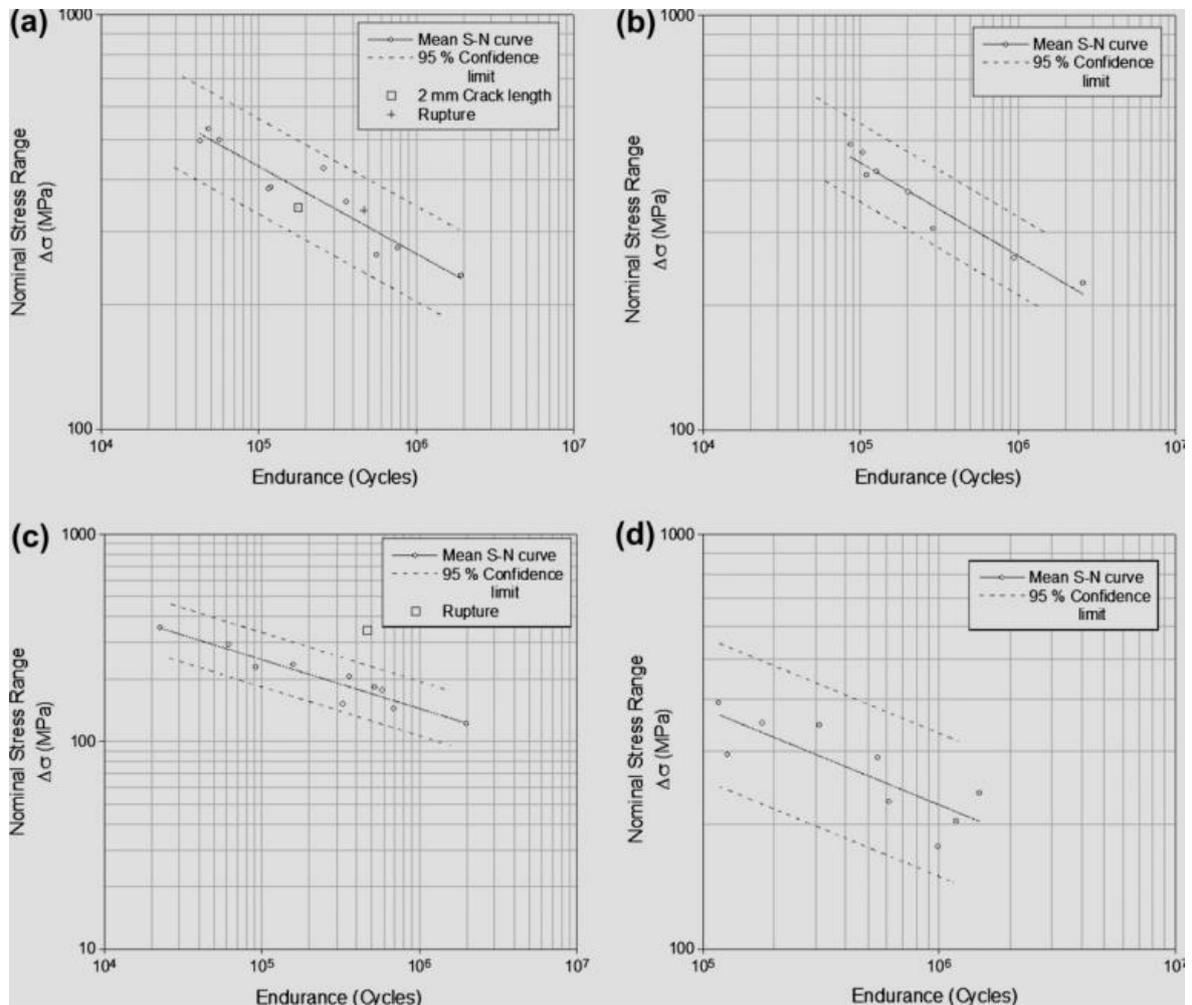


Figure 18 : Courbes d'endurances S–N et limites de confiance (a) séries AW. (b) série TAS (c) série TDR. (d) série PDR [10]

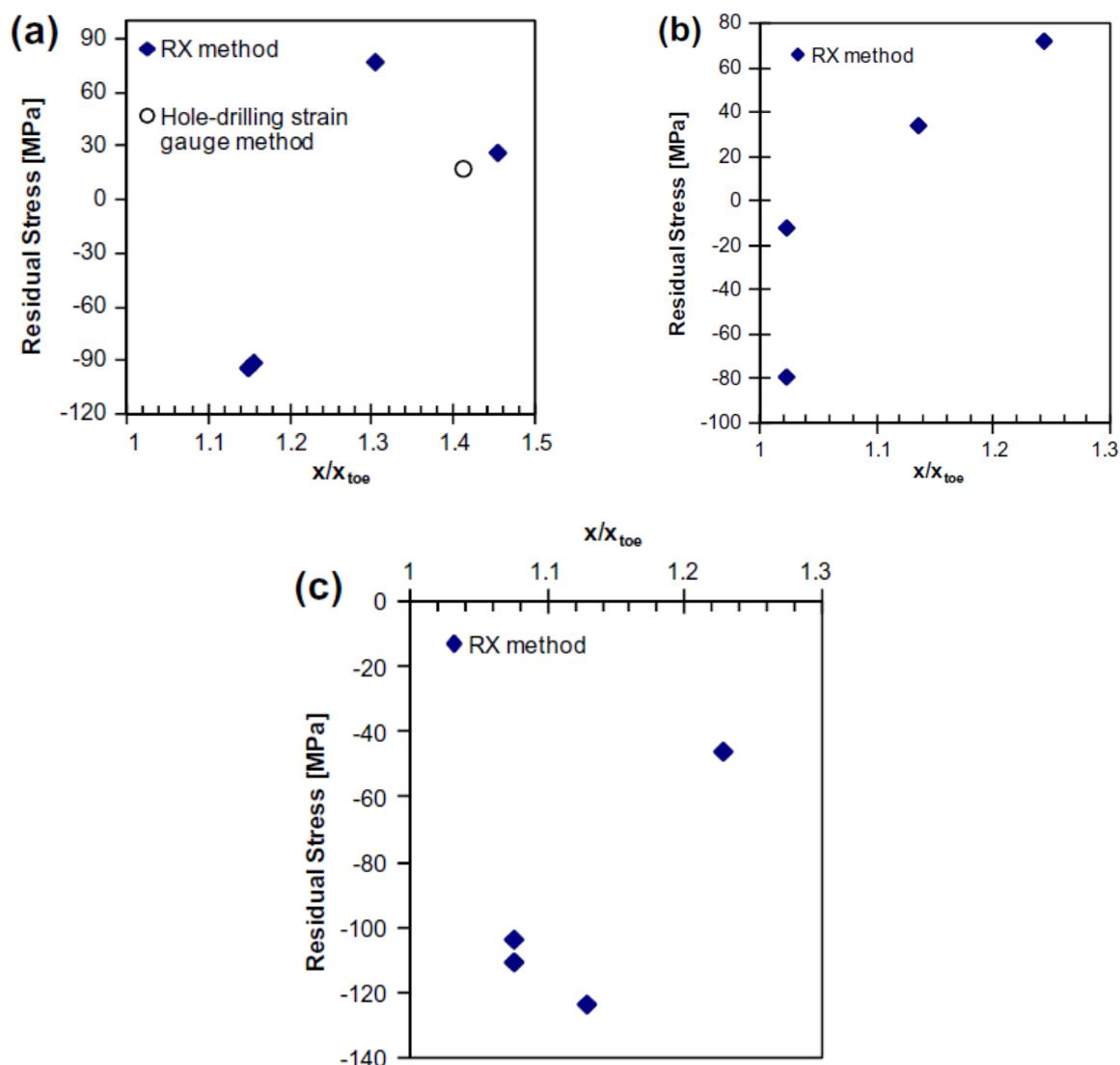


Figure 19 : Distribution des contraintes résiduelles longitudinales en fonction de la distance à partir du pied du cordon de soudure (a) série AW. (b) refusion TIG, (c) série PDR par Plasma

L'étude expérimentale conduite par Barzegar-Mohammadi et al. [12] a été destinée à investiguer l'effet des traitements par refusion TIG (TD), traitement post soudage (PWHT) et traitement par trempe du cordon de soudure (TB). Les échantillons non traités sont nommés (ORG). Ses traitements ont conjointement ont réduits le coefficient de concentration de contraintes et la relaxation des contraintes résiduelles de tension dues au soudage. Le tableau 2 montre l'effet des traitements indiqués sur le rayon et l'angle au pied du cordon de soudure. [12]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Tableau 2 : Effet des traitements d'améliorations sur l'angle et le rayon au pied du cordon[12]

	ORG	PWHT	TD	TB
Rayon au pied du cordon de soudure	0.8±0.1	0.8±0.1	2.5±0.18	3.5±0.19
Angle au pied du cordon de soudure	125±8	126±9	129±8	3.5±10

L'effet des traitements d'amélioration sur la résistance à la fatigue sont montrés sur la figure 20. Les résultats montrent que les échantillons à cordon trempé « TB » et cordon post traité « PWHT » ont montré une faible réponse à la fatigue par rapport aux échantillons originaux « ORG ». Le traitement PWHT est désavantageux pour les durées de vie lorsque les amplitudes de contraintes sont faibles contrairement aux amplitudes de contraintes importantes. De même, le traitement TB est un traitement à effet défavorable sur la durée de vie comparativement par rapport aux échantillons non traités « ORG). Le traitement par refusion TIG « TD » présente un effet bénéfique et principalement lorsqu'on diminue l'amplitude de contrainte, la durée de vie augmente. Les auteurs ont notés que les effets des traitements « TB » et « PWHT » ne sont pas généralisés. De plus les courbes d'endurance des échantillons trempé « TD » rejoignent les courbes S-N du métal de base selon les règles de fatigue recommandé par IIW [13]. La durée de vie moyenne obtenue par traitement « TD » est environ trois fois la durée de vie des échantillons non traités « ORG ». [12]

L'analyse de la micro-dureté pour les quatre types d'échantillons a révélé que l'augmentation significative de la dureté dans la zone soudée peut être considérée comme le principal facteur contribuant à l'augmentation de la durée de vie en fatigue des éprouvettes traitées par refusion TIG (TD). Dans ce cas, les fissures s'amorcent dans le métal de base, comme le montre la Figure 21. [12]

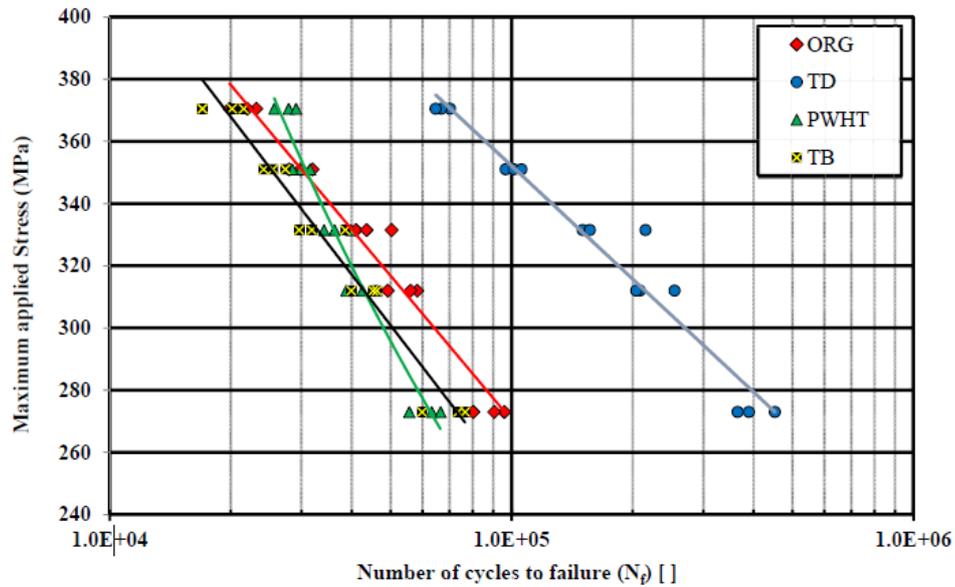


Figure 20 : Courbe d'endurance S-N obtenue à partir des essais de fatigue à $R=0.1$ pour différents traitements d'amélioration sus indiqués [12]

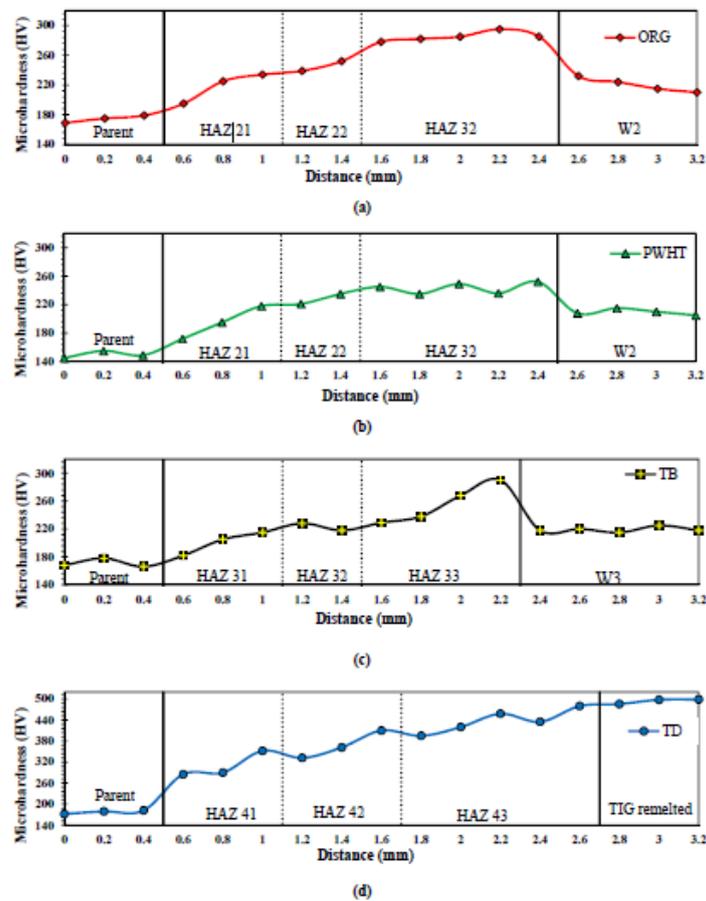


Figure 21 : Micro dureté autour du pied du cordon de soudure à différents traitements [12]

V. TECHNIQUES D'AMELIORATION SPECIALAUX

- Influence de profilage du contour du joint de soudure

La résistance à la fatigue des joints de soudure peut être augmentée par le profilage de la soudure, l'avantage est attribué à la réduction du facteur de concentration de contraintes en augmentant la longueur du pied du cordon de soudure [14]. Hagensen et al. [15] ont étudié l'effet du profilage des cordons de soudure sur le comportement cyclique d'un assemblage soudé en T soumis à la flexion (figure 22). Une augmentation de la résistance à la fatigue d'environ 25 à 30% a été observée, ce qui peut être attribué à la réduction de l'angle au niveau du pied du cordon et à l'élargissement de la zone de concentration de contrainte.

Selon les recommandations de l'American Petroleum Institute (API) [16], le profilage des cordons de soudure tubulaires est requis pour la conception en fatigue. L'API recommande d'utiliser la courbe API X1 lorsque le profilage est effectué, tandis que la courbe API X2 est utilisée pour les cordons non améliorés (figure 23). Les essais réalisés sur des joints tubulaires ont démontré les effets bénéfiques du profilage contrôlé.

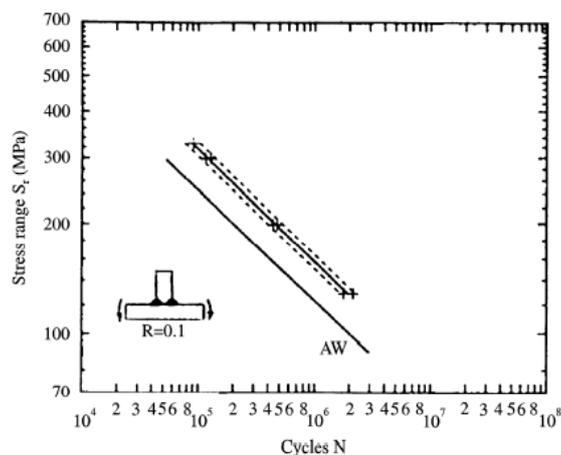


Figure 22: Amélioration de la résistance à la fatigue par profilage des cordons de soudure [15].

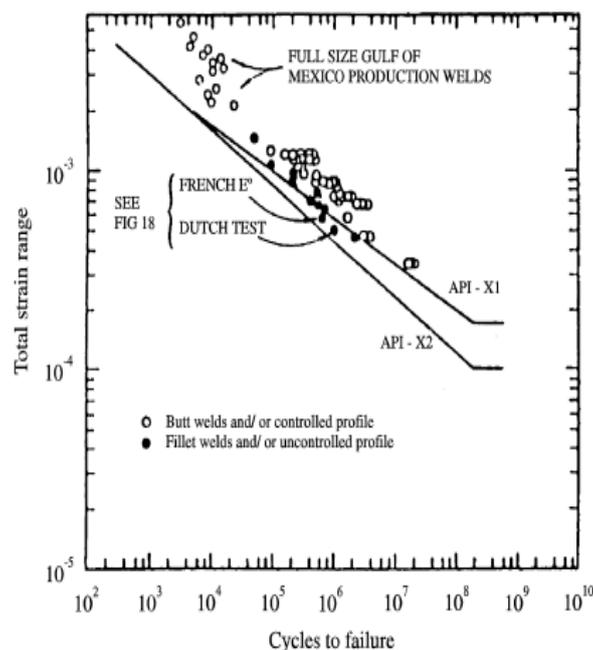


Figure 23 : Courbe de conception S-N (API) - Amélioration de la résistance à la fatigue par profilage [16]

VI. INFLUENCE DES METHODES MECANIQUES

- Effets du grenailage :

Barbara et al [17] ont investigué l'influence du grenailage sur la structure et les propriétés mécaniques des joints soudés en alliage d'aluminium 5754 par le procédé TIG. Le processus de grenailage a entraîné une augmentation de la rugosité de surface, passant d'une valeur de Ra de 8.812 μm à 24.514 μm .

L'analyse des essais de rupture par essais de traction a montré l'existence des ruptures par clivage (rupture fragile) des échantillons grenailés et non grenailés dans la zone de recristallisation (Figure 24). De plus, le traitement par grenailage a entraîné une augmentation de la limite d'élasticité et du module d'élasticité G de 20% et 29%, respectivement (Tableau 3).[17]

Tableau 3 : Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 5754 avant et après grenailage

	Alliage d'aluminium sans grenailage	Alliage d'aluminium avec grenailage
Charge de rupture (MPa)	109	113
Limite d'élasticité (MPa)	49.66	60
Module d'élasticité G (MPa)	3.47×10^4	4.48×10^4

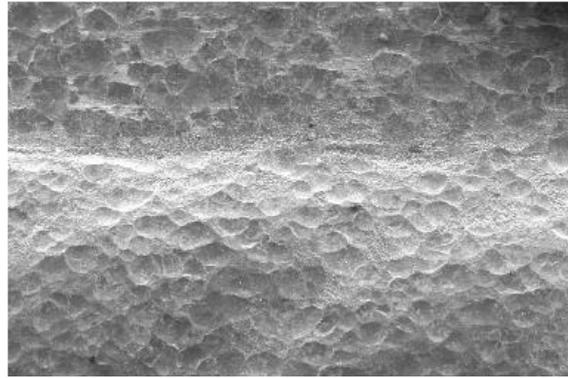


Figure 24. Surface grenillée d'un échantillon soudé [17]



Figure 25 : Ruptures par clivage après sous essai de traction d'une soudure réalisée par TIG, pour (a) éprouvette non grenillée, (b) Eprouvette grenillée [17]

Xiaohui et al [18] ont investigué l'influence du grenillage sur les propriétés de fatigue de l'alliage GH4169 à 20 °C, 350 °C et 650 °C dans l'air. Les résultats montrent qu'après grenillage, déformation plastique sévère accompagnée de l'écrouissage est générée à la surface de l'éprouvette, comme illustré par la figure 26

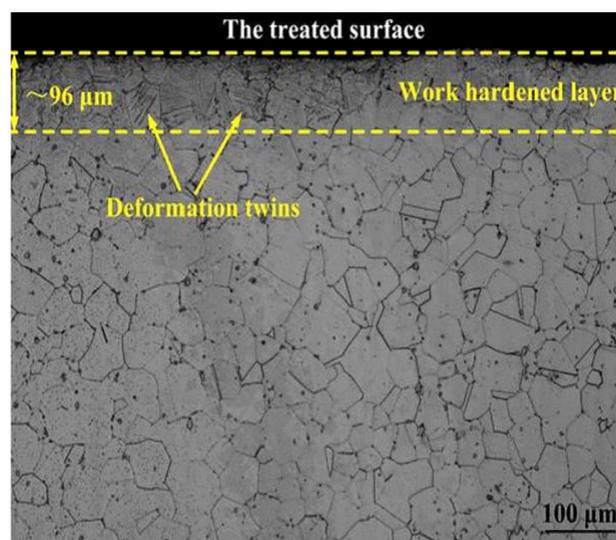


Figure 26 : Morphologie en coupe transversale de l'éprouvette de grenillage [18]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

le grenailage provoque une dureté plus élevée près de la surface et l'augmentation de la valeur de micro-dureté pour la surface supérieure atteint environ 34,6 %. (Figure 27).[18]

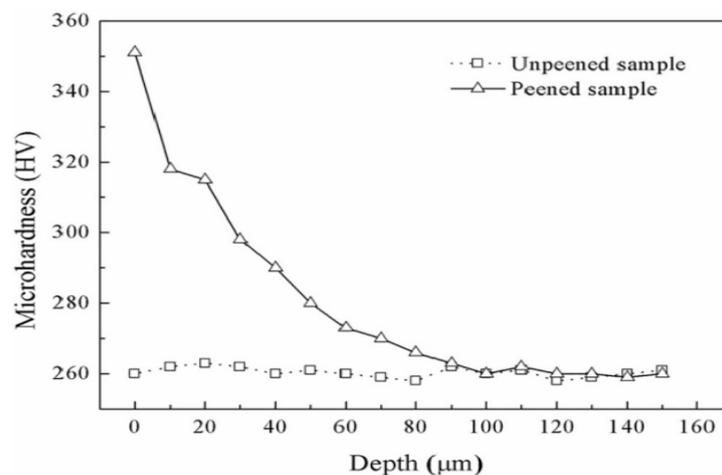


Figure 27: Micro-dureté de la couche superficielle avant et après grenailage.[18]

La Figure 28 illustre que toutes les fissures de fatigue ont pour origine la surface extérieure. Les spécimens non traités présentent plusieurs sources de fissures de fatigue, tandis que les échantillons grenailés ne présentent qu'une seule source de fissures de fatigue. De plus, les ruptures des spécimens non traités sont caractérisées par une surface incurvée, per contre les ruptures des spécimens grenailés sont principalement lisses. .[18]

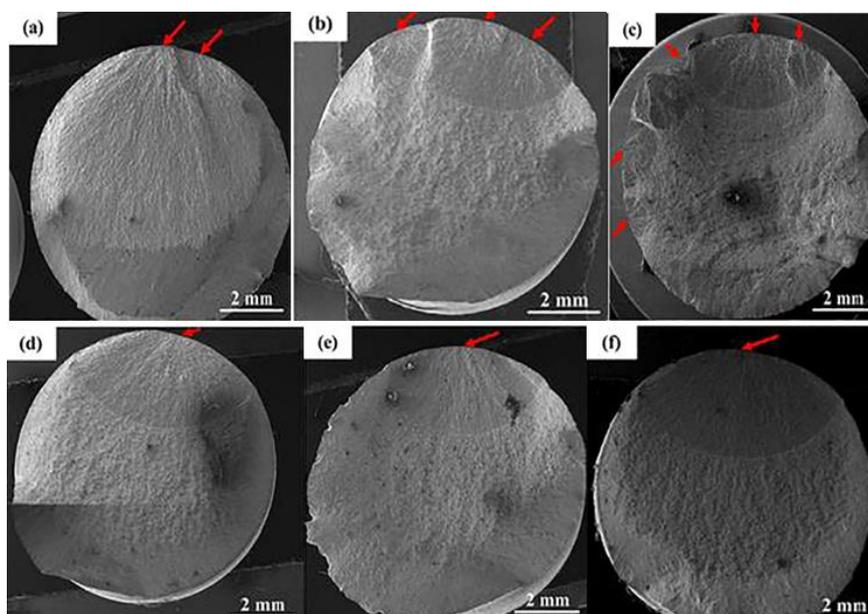


Figure 28 . Ruptures de fatigue d'éprouvettes non traitées obtenues à (a) 20 °C, (b) 350 °C, (c) 650 °C et éprouvettes grenailées à (d) 20 °C, (e) 350 °C, (f) 650 °C sous contrainte maximale $\sigma_{max} = 530 \text{ MPa}$ [18]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

La durée de vie en fatigue de l'alliage GH4169 est améliorée par le grenailage à n'importe quel niveau de contrainte lorsque la température d'essai est de 20 ° C et 350 ° C, et l'extension de la durée de vie induite par le grenailage est considérablement augmentée lorsque la charge appliquée diminue. La même tendance se retrouve à 650 ° C, mais l'efficacité de l'amélioration est relativement faible par rapport aux deux autres cas. Cela est illustré dans la Figure 29. [18]

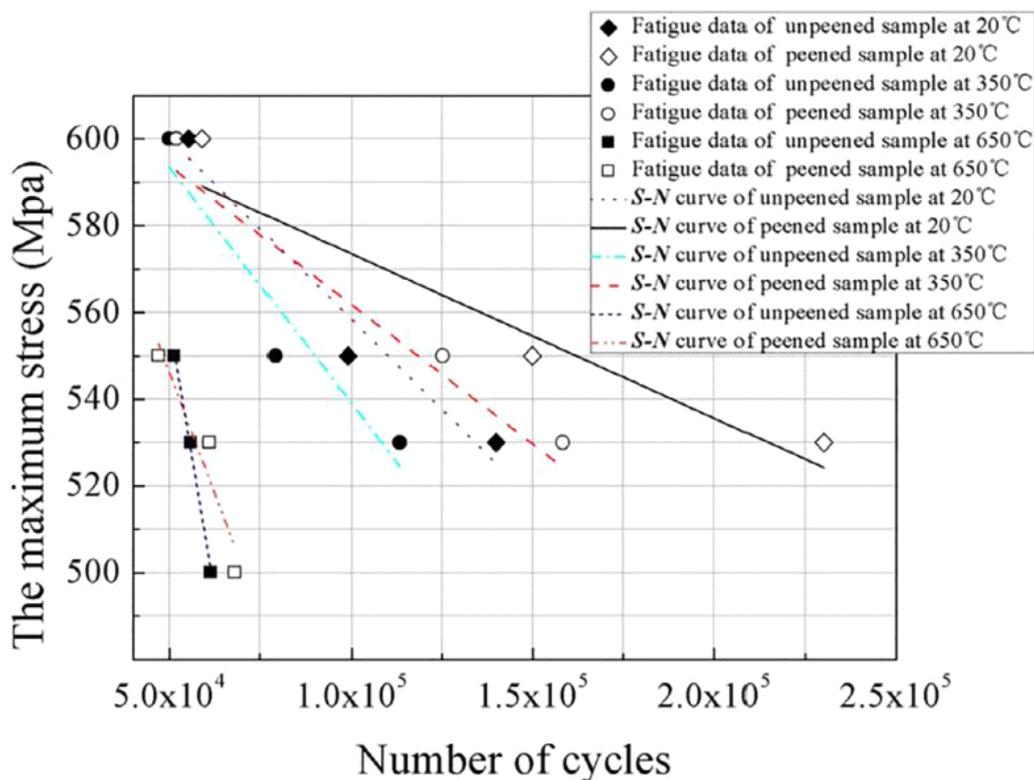


Figure 29: Courbes S–N de l'alliage GH4169 avant et après grenailage à différentes températures [18]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Mahmoudi et al [19] ont présenté une étude expérimentale et numérique complète sur la redistribution des contraintes résiduelles par grenailage, le matériau utilisé dans cette étude était de l'acier faiblement allié DIN 34CrNiMo6 (1.6582).

Les résultats montrent que le grenailage a éliminé toutes les contraintes résiduelles du processus de pliage et redistribué les contraintes résiduelles tout à fait similaires aux contraintes dans les échantillons grenillés. On peut voir que des quantités d'erreurs plus élevées sont observées pour les profondeurs plus élevées (figure 30). La présence de contraintes initiales peut modifier considérablement les contraintes résiduelles de grenailage au-delà de la contrainte résiduelle de compression maximale indiquée. Ces changements dépendaient profondément de la quantité et de la direction des contraintes résiduelles (figure 31).

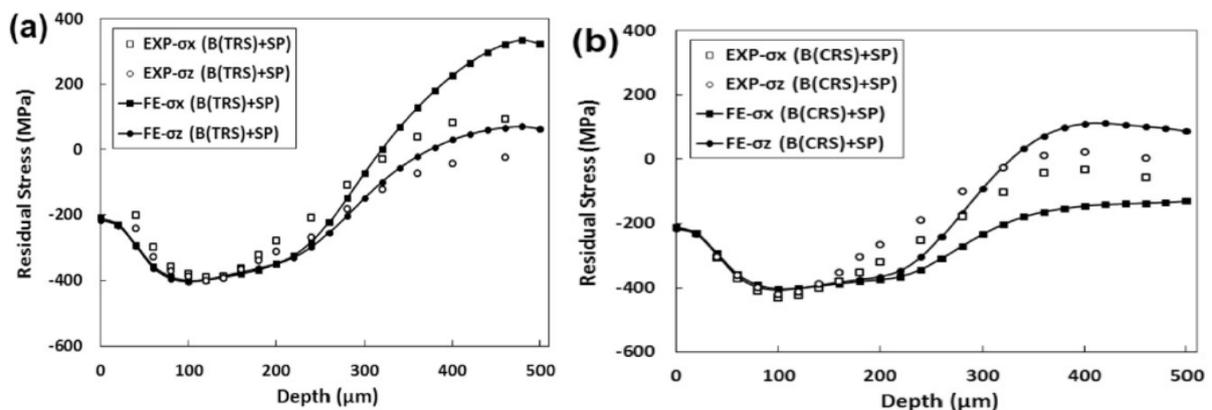


Figure 30 : Redistribition des contraintes résiduelles par grenailage dans les échantillons (a) B (TRS), (b) B (CRS) échantillons [19].

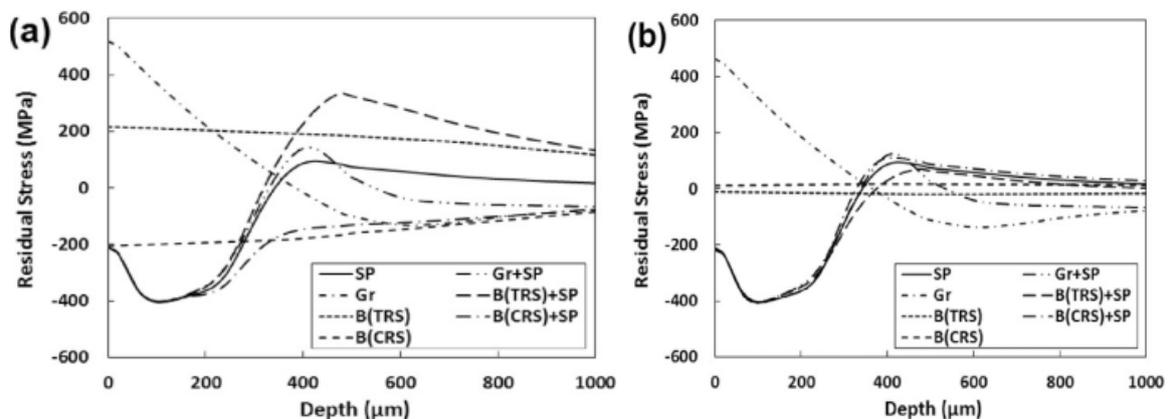


Figure 31 : Distributions des contraintes résiduelles pour tous les échantillons, (a) σ_x , (b) σ_z , toutes les lignes proviennent de FE [19]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

D'après la Figure 32, il est possible de constater que le grenailage présente des avantages à la fois en termes de répartition des contraintes et d'augmentation de la dureté des composants soumis aux contraintes initiales. Ce traitement permet non seulement de générer des contraintes résiduelles de compression, mais également d'obtenir une surface plus dure.[19]

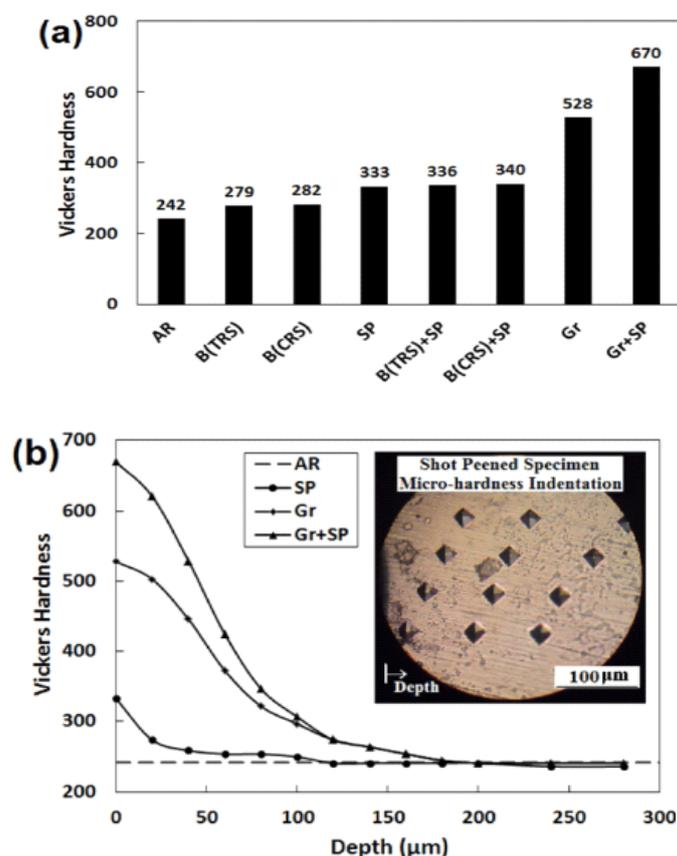


Figure 32 : (a) dureté de surface pour tous les spécimens, (b) distribution de la micro-dureté en profondeur [19]

Barbara et al [20] ont investigué l'effet du grenailage sur la résistance à la corrosion des assemblages en acier inoxydable austénitique 904 L réalisés par faisceau laser CO₂ et soudage GTAW. Les résultats montrent que la micro-dureté du métal de base avant le grenailage était d'environ 290 HV (20 microns dans la surface), qui a augmenté à environ 400 HV après le grenailage, La micro-dureté de la zone affectée thermiquement (HAZ) et le cordon de soudure (W) des composants non grenailés à une profondeur de 20 μm était d'environ 190 HV. Le processus de grenailage a entraîné une augmentation de la micro-dureté à ~ 420 HV dans la HAZ et ~ 380 HV dans la zone W à une profondeur de ~ 20 μm (figure 33)

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

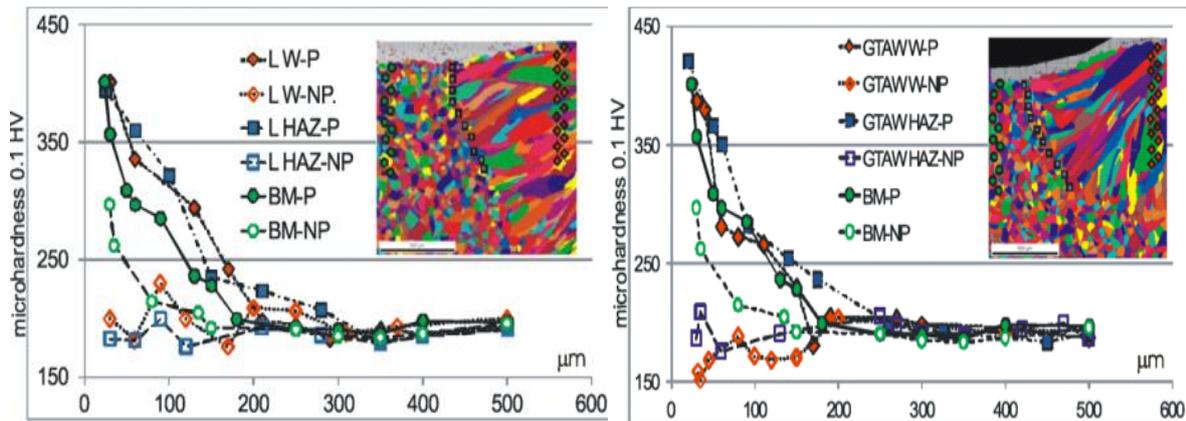


Figure 33 : Répartition de la micro-dureté dans la couche superficielle du matériau de base et du laser éléments soudés par poutres, et composants soudés GTAW [20]

La figure 34 montrent que les contraintes de compression sur la surface des joints soudés au laser et au GTAW a augmenté après le grenailage. Avant le grenailage, des processus de contrainte de traction ont été observés dans les zone affecté thermiquement et le cordon de soudure. Cependant, des contraintes de compression se sont toujours produites dans le métal de base [20].

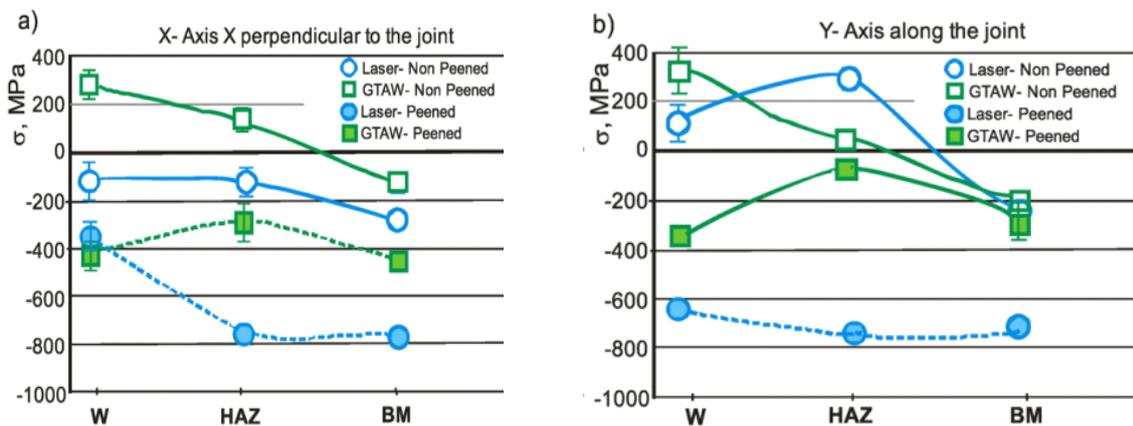


Figure 34 : Contrainte interne dans la soudure (W), la zone affectée thermiquement (HAZ) et le matériau de base (BM) dans l'axe x (a) et l'axe y (b) avant et après grenailage [20]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

- Influences de martelage :

Kopsov [21] a étudié l'effet du martelage sur l'initiation et la propagation des fissures de fatigue dans de l'acier à haute résistance en utilisant des échantillons d'entailles de bord. Les résultats indiquent que le martelage a réduit de manière significative la durée de vie à l'amorçage des fissures par fatigue dans les éprouvettes entaillées ($SCF = 6$) en un facteur de trois. La figure 35 montrent que la durée de propagation des fissures, qui exclut d'amorçage, a été augmentée d'un facteur 2,7 dans le cas d'une pression d'outil de 0,5 MPa et est restée inchangée dans le cas d'une pression d'outil de 0,3 MPa.

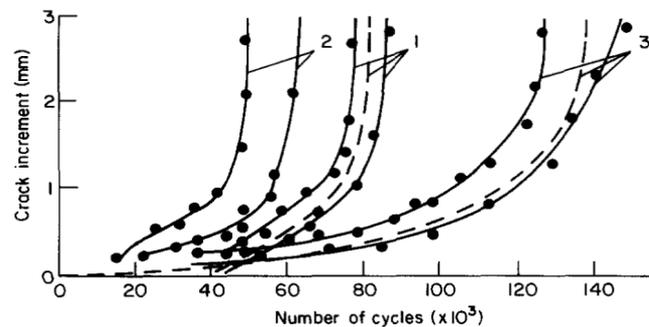


Figure 35: Croissance des fissures de bord dans les spécimens : 1, spécimens non martelés ; 2, spécimen martelé (pression de l'outil 0,5 MPa [21])

Une correction du facteur d'intensité de contrainte a été appliquée pour tenir compte de la relaxation et de la redistribution des contraintes résiduelles. Lorsqu'une contrainte cyclique élastique est appliqué, la relaxation des contraintes est faiblement dépendante des propriétés du matériau. Par conséquent, on peut supposer que les valeurs du facteur m sont similaires pour différents aciers et alliages. Cela est illustré par la Figure 36. [21]

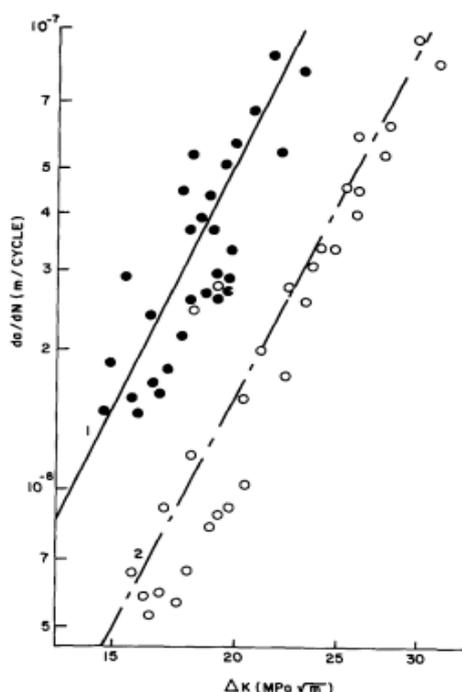


Figure 36 : Relation entre le taux de croissance des fissures de fatigue da/dN et la plage d'intensité de contrainte ΔK : 1, fissure dans les spécimens non martelés ; 2, fissure dans les éprouvettes martelées (pression de l'outil 0,5 MPa) [21]

Jean-Loup et al [22] ont investigué l'influence du martelage sur la durée de vie en fatigue de l'acier E309L utilisé pour les réparations des canaux de pale 13%Cr-4%Ni. Les résultats montrent qu'après le soudage, les contraintes résiduelles de traction du E309L sont très proches de la résistance à la traction du matériau, et après le martelage, le niveau des contraintes résiduelles de compression près de la surface de soudure est similaire dans le sens longitudinal et transversal, malgré les contraintes de traction longitudinale beaucoup plus élevées avant le martelage comme il est illustré dans la figure 37. [22]

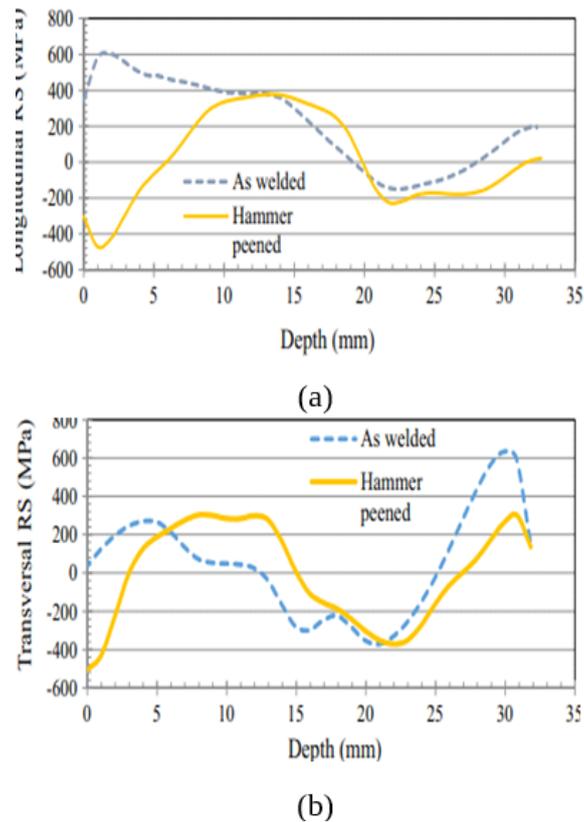


Figure 37: Distribution de RS à travers l'épaisseur de la soudure (a) Moyenne longitudinale (b) . Moyenne transversale [22]

D'après la figure 38, on peut observer que le martelage a pour effet d'augmenter la dureté de surface de l'E309L, atteignant un niveau similaire à celui de la zone affectée thermiquement. Cette augmentation de dureté dans la zone est probablement due à la présence de martensite non trempée. De plus, on constate que le martelage permet de créer des contraintes de compression jusqu'à des profondeurs d'au moins 3 mm. L'augmentation de la dureté est cependant observée jusqu'à au moins 4 mm. Il semble y avoir une corrélation entre augmentation de la dureté et profondeur des contraintes de compression. [22]

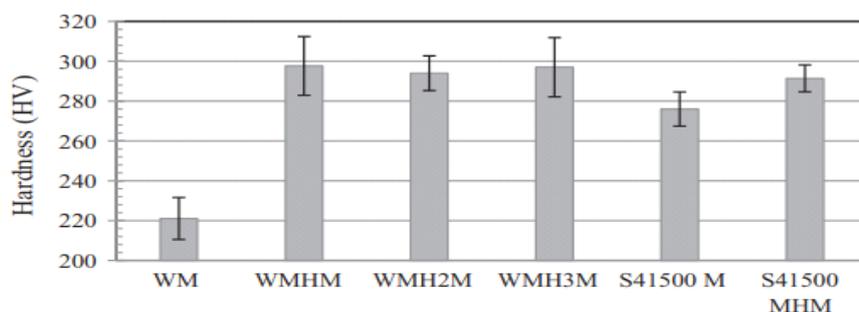


Figure 38 : . Dureté de surface pour différentes procédures de réparation [22]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Le martelage du S41500 entraîne également une augmentation de sa dureté, bien que dans une moindre mesure que dans le cas de l'E309L. De plus, les contraintes de compression générées sont moins intenses que dans le cas de l'E309L, comme le montre la figure 39. [22]

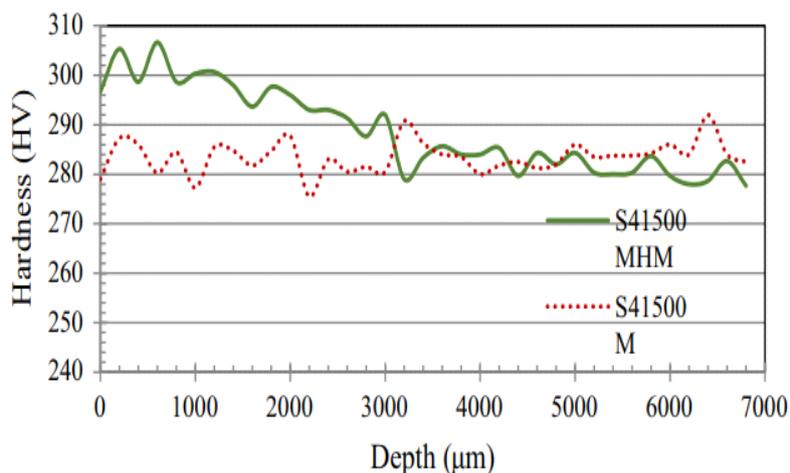


Figure 39: Dureté du sous-sol dans les échantillons S41500 martelés et non martelés[22]

La figure 40 montre que la soudure E309L a des performances de fatigue inférieures à celles du S41500, mais ses performances pourraient être supérieures à l'acier inoxydable CA6NM qui est actuellement utilisé dans Parc de production d'Hydro-Québec. [22]

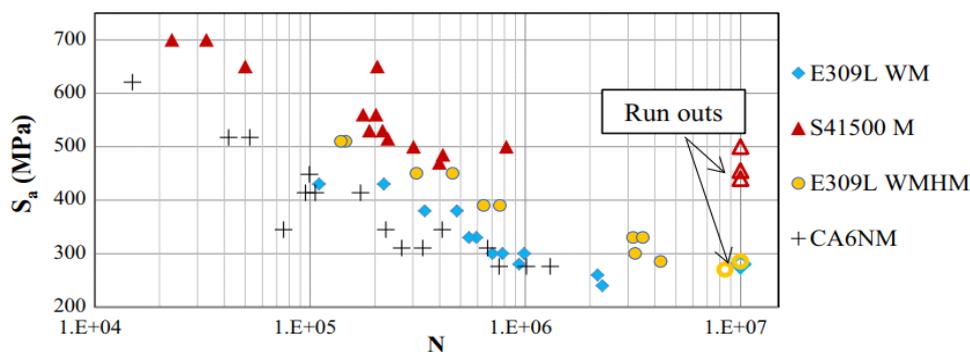


Figure 40 : Résultats de fatigue pour WM, WMHM, S41500M en flexion inversée et CA6NM en fatigue traction-compression uniaxiale [22]

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

L'effet du martelage sur la résistance à la fatigue de l'acier soudé à haute résistance S690 a été étudié par Fabien et al [23]. Les essais de flexion cyclique à quatre points ont été réalisés sur des échantillons de soudure bout à bout, en utilisant à la fois le martelage manuel et automatique. Les résultats mettent en évidence l'importance des contraintes résiduelles de compression induites par le martelage, qui jouent un rôle significatif dans le comportement mécanique des échantillons. Les contraintes résiduelles longitudinales sont supérieures aux contraintes transversales. Comme prévu, le traitement thermique effectué sur les éprouvettes martelées manuellement, sur les éprouvettes « brutes de soudage » et sur la rainure usinée. La figure 41 montre que les éprouvettes martelées avec le dispositif Pitec à double balayage présentent des valeurs de contraintes résiduelles plus élevées dans le sens transversal que les éprouvettes conventionnelles martelées manuellement par contre les éprouvettes martelées par SONATS présentent des valeurs de contraintes résiduelles similaires à celles qui ont été martelées avec Pitec à double balayage relaxation des contraintes résiduelles dans les deux sens (sens longitudinal et sens transversal). [23].

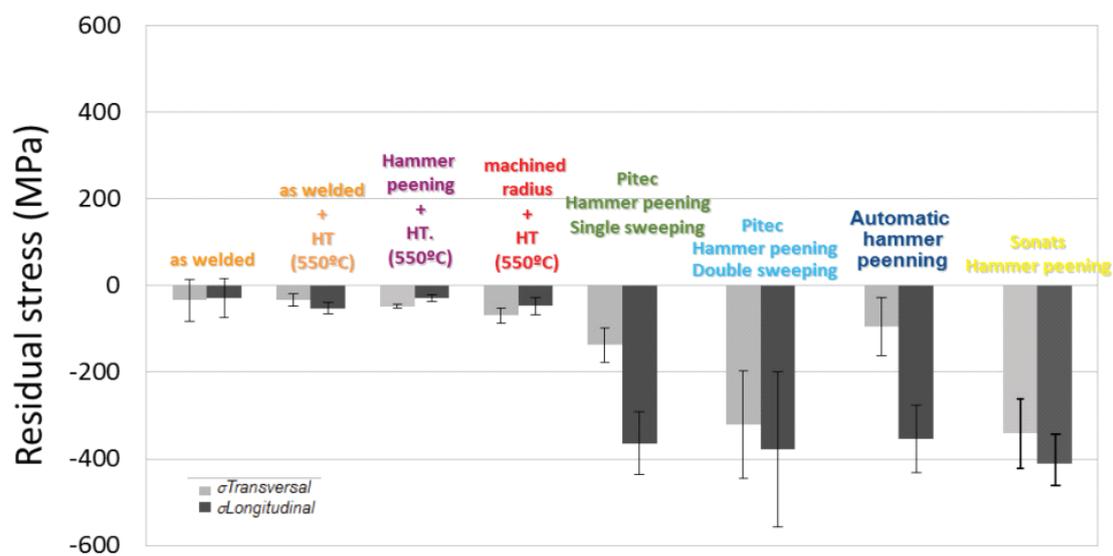


Figure 41 : Résultats des contraintes résiduelles sur différentes configurations (valeurs moyennes et barres d'erreur correspondant à l'écart type) [23]

Selon les résultats obtenus dans la figure 42, il est prévu que les joints soudés qui ont été martelés et soumis à une détente présentent des performances améliorées en termes de résistance à la fatigue par rapport aux joints soudés non traités. [23].

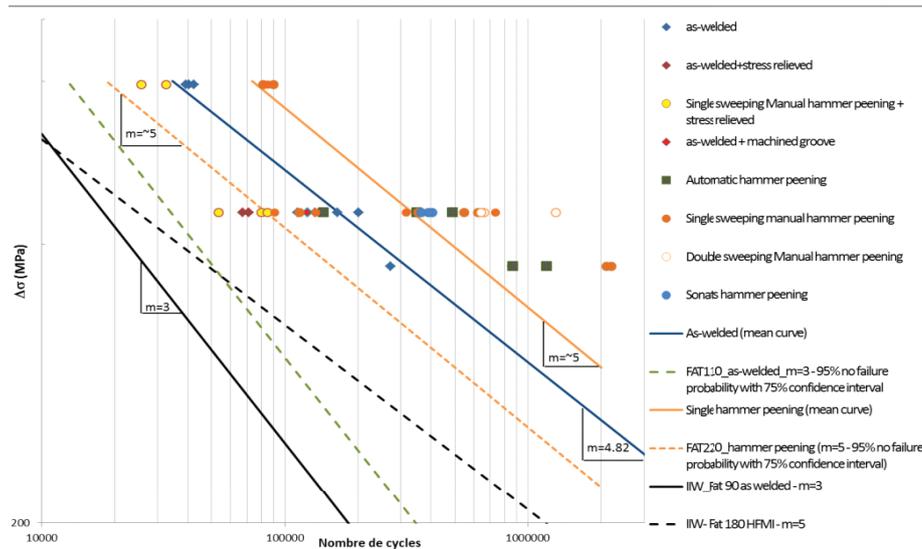


Figure 42 : Résultats de fatigue avec les classes FAT [23].

Dans leur étude, Joern et Natalie [24] ont examiné l'effet du martelage à haute fréquence (HFHP) sur la résistance à la fatigue. Ils ont constaté que cet effet était limité aux aciers de résistance maximale S960 et aux épaisseurs de plaque de 5 mm et plus. Ils ont observé que les pentes des courbes S-N des échantillons traités au HFHP augmentaient, atteignant environ $m \sim 5$ lorsque les fissures de fatigue se formaient au niveau des pieds de soudure, comme le montre la figure 43. [23].

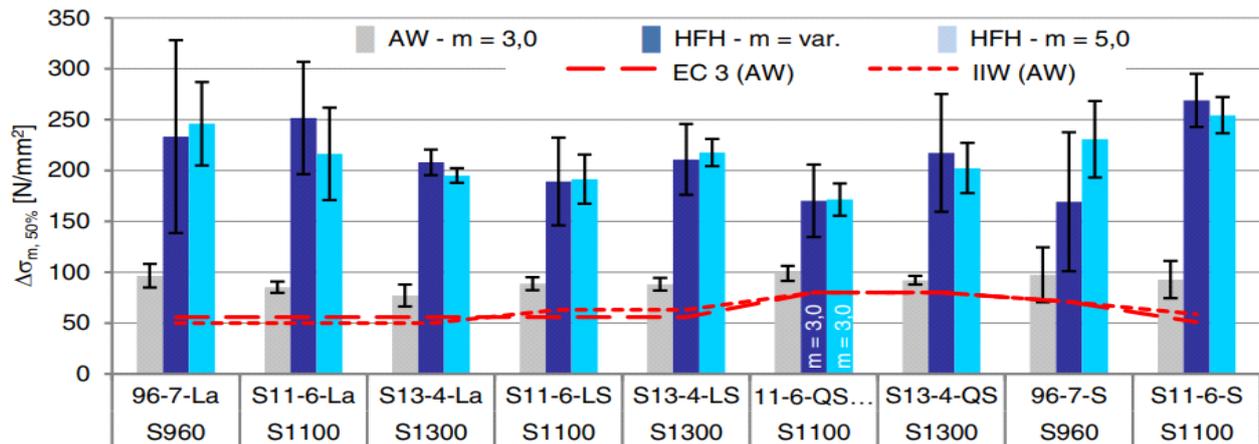


Figure 43 : Comparaison des résistances à la fatigue $\Delta\sigma_m$, 50 % avec les classes FAT selon EC 3 et IIW [24].

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

La figure 44 révèle que les éprouvettes traitées au HFHP présentent une résistance à la fatigue au moins deux fois supérieure à celle des éprouvettes dans leur état initial de pied soudé. Dans le cas des détails d'encoche de raidisseur longitudinal et de soudure bout à bout, la résistance à la fatigue a augmenté d'environ 15 % et 10 % respectivement avec une augmentation de la limite d'élasticité de 1100 à 1300 N/mm² pour le renfort longitudinal et de 960 à 1100 N/mm² pour la soudure bout à bout. [24].

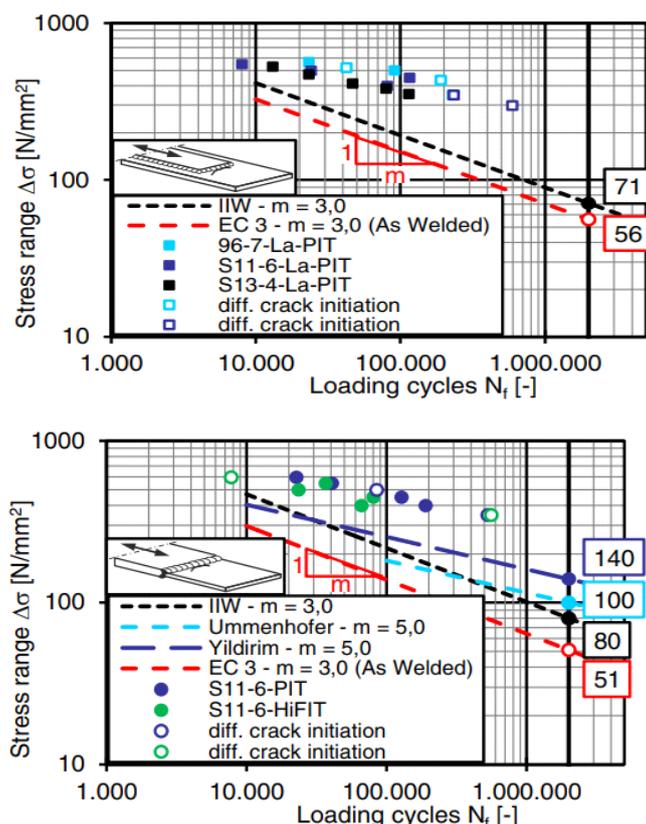


Figure 44 : Comparaison des résultats des tests dans les propositions de conception existantes pour la condition de pointe martelée à haute fréquence [24].

Les courbes S-N des joints soudés en conditions initiales et des joints traités au HFHP présentent des pentes différentes, ce qui entraîne une intersection théorique d'environ 4 000 cycles de chargement [24].

- Influence de martelage par ultrason :

Fereidooni et al [25] ont investigué l'influence de la déformation plastique sévère sur la durée de vie appliquée par martelage par ultrasons (UP) dans les joints de tuyaux soudés en acier inoxydable 316 SS et 347 SS dans un environnement corrosif ; Selon les résultats, l'application de martelage par ultrasons a entraîné une réduction d'environ 50 % de la contrainte résiduelle dans la zone du pied de soudure (figure 45).

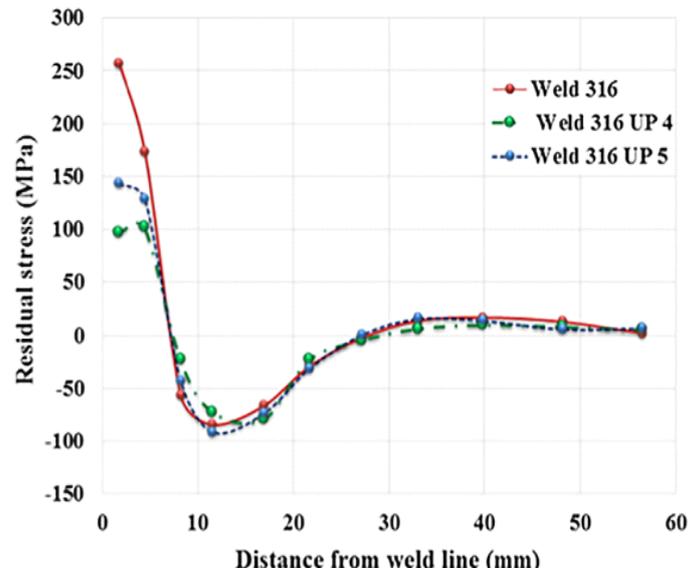


Figure 45 : Contrainte résiduelle de soudure avec filler 316 SS comparaison par martelage par ultrason par perceur 4 mm et sans traitement [25]

Les résultats de la figure 46 démontrent que l'utilisation du martelage par ultrasons a conduit à une amélioration significative de la dureté de surface, avec une augmentation d'environ 200 à 350 %. De plus, il a été observé que l'utilisation d'un diamètre de perceur de 4 mm a généré une dureté de surface plus élevée qu'un perceur de diamètre de 5 mm, conformément aux conclusions de l'étude menée par [25].

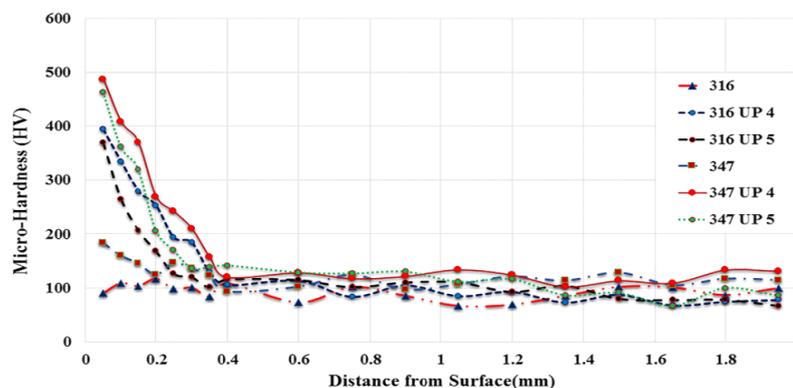


Figure 46: Micro-dureté du pied de soudure par rapport à la profondeur de la surface[25].

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

L'utilisation du martelage par ultrasons (UP) s'est avérée être un processus de revitalisation efficace pour augmenter la durée de vie en fatigue d'un joint soudé en utilisant du matériau 316 SS. Cependant, il convient de noter que le martelage par ultrasons n'a pas pu améliorer la durée de vie en fatigue d'un joint soudé lorsque la charge de fatigue était augmentée. Néanmoins, pour une limite d'élasticité de 85 %, le martelage par ultrasons a entraîné une augmentation significative de la durée de vie, allant jusqu'à 40 %, comme illustré dans la figure 47. [25].

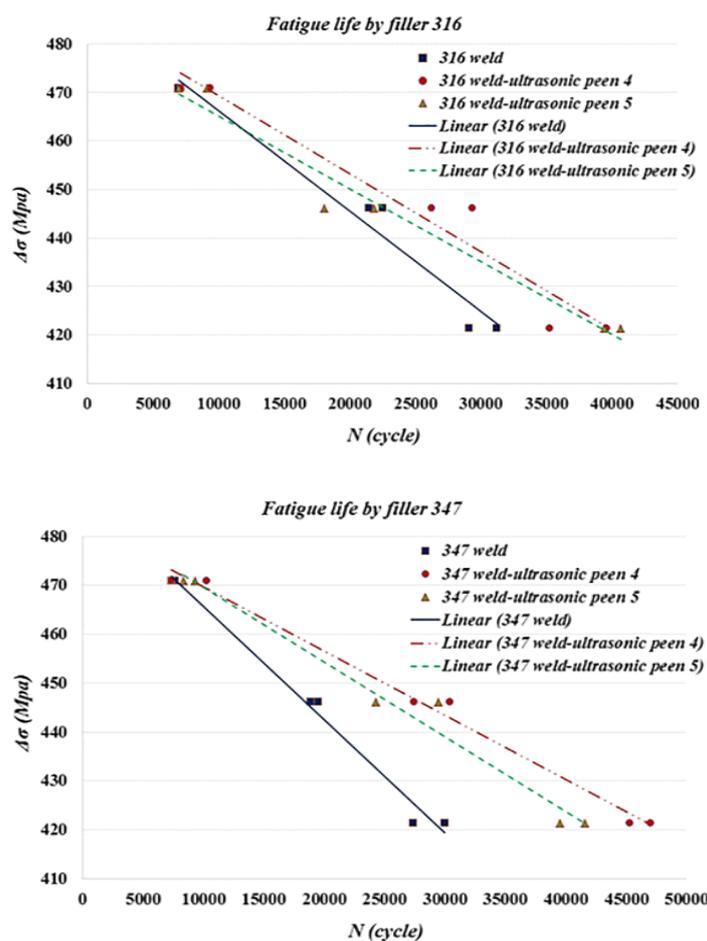


Figure 47 : Soudure courbe S-N par un remplisseur 347 SS et 316 SS à l'application UP avec une panne différente diamètres [25].

Le martelage par ultrasons a un effet bénéfique sur la réduction du potentiel de fissuration en améliorant l'angle du pied de soudure. De plus, il contribue à refermer les fissures et microfissures qui se sont formées pendant le processus de soudage dans le pied de soudure [25].

VII Influence des méthodes de réduction du contrainte résiduelle :

- Influence de traitement thermique :

Ayush et al. [26] ont étudié l'impact du traitement thermique post-soudage (PWHT) sur les propriétés mécaniques et le comportement de croissance des fissures de fatigue de l'alliage Al 7075-T651 soudé par friction. Les différentes conditions de traitement thermique comprenaient le vieillissement naturel (NA), le vieillissement artificiel à 190 °C pendant 24 heures (HT1) et à 423 °C pendant 12 heures (HT2) (Figure 48). Les résultats de l'étude indiquent que les propriétés de traction de l'alliage Al 7075-T651 soudé par friction-malaxage peuvent être rétablies presque au niveau de celles du métal de base grâce à ce processus. Les joints FSW soumis à un vieillissement naturel pendant 6 mois et à un traitement thermique HT1 à 190 °C pendant 24 heures, suivi d'un refroidissement contrôlé, ont montré des valeurs de limite d'élasticité et de résistance à la traction atteignant environ 78 % et 70 % respectivement par rapport au métal de base. [26]



Figure 48: vue picturale des différentes zones soudées [26] .

Après le traitement thermique des échantillons soudés, une légère diminution de la ductilité d'environ 17 à 20 % est observée, [26].

Selon la figure 49, on observe une différence négligeable de dureté dans la zone de soudure entre les traitements thermiques post-soudage NA et HT1. Il n'y a pas de variation significative de dureté entre le côté avançant et le côté reculant. Cependant, on observe une dureté plus élevée pour les échantillons soumis au traitement HT1 et au vieillissement naturel (NA) par rapport au traitement HT2. Cette différence de dureté peut être attribuée à des mécanismes de ramollissement différents en raison des températures et de la durée de trempage du traitement thermique post-soudage. [26]

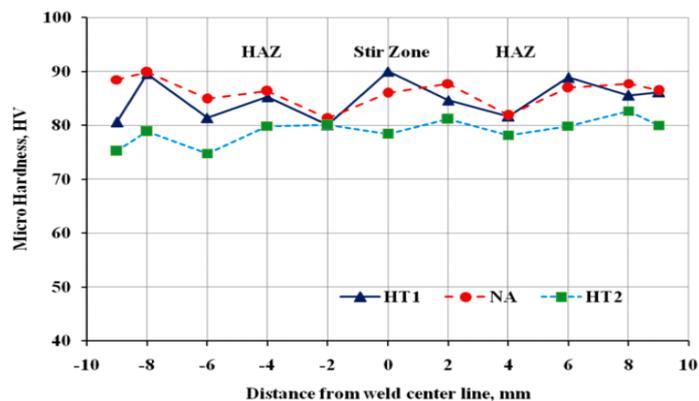


Figure 49 : Variations de micro-dureté à la surface des différentes zones de soudure [26].

La figure 50 démontre une augmentation d'environ 16 à 26 % du facteur d'intensité de contrainte de fermeture à une distance donnée du point d'application de la surcharge de traction par rapport à sa valeur au point d'application. Cette augmentation conduit à la présence de plasticité devant le fond de fissure, ce qui entraîne une diminution du taux de croissance des fissures de fatigue. Le pourcentage d'augmentation dépend principalement des propriétés du matériau ou du traitement thermique effectué après le soudage. Le traitement thermique post-soudure améliore l'effet de retardement dû à la surcharge de traction et le degré d'amélioration dépend du PWHT. [26].

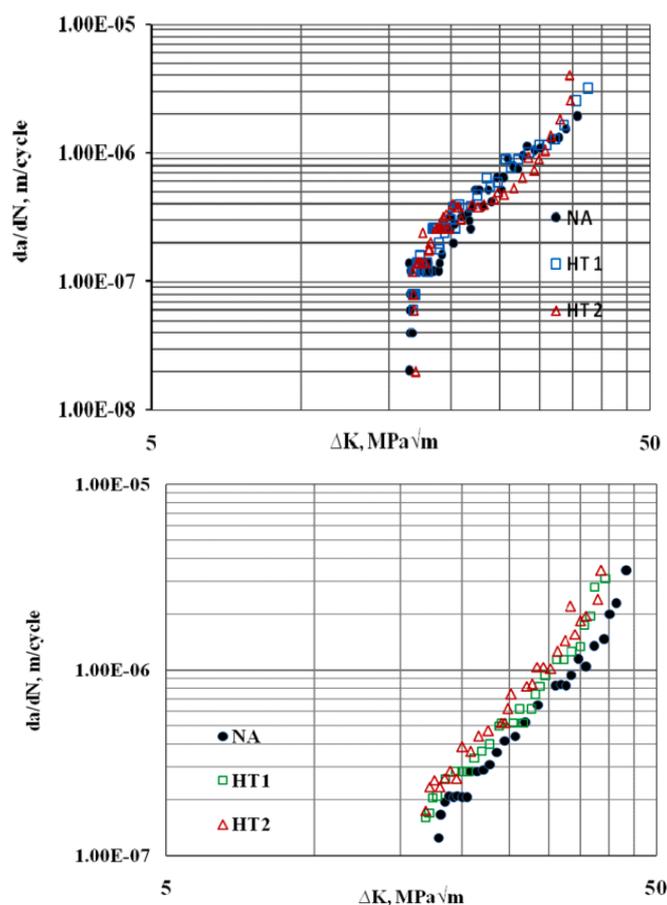


Figure 50 : L'effet du post-traitement thermique sur da/dN vs ΔK pour les alliages d'aluminium 7075-T651 (a) Matériau de base (b) Friction Stir Joint soudé sous une charge d'amplitude constante [26].

Xiaohua et al [27] ont réalisé une étude sur les contraintes résiduelles produites par les traitements post-soudage, en analysant leur amplitude et leur distribution sous la surface. L'objectif de l'étude était également de déterminer l'effet de ces traitements sur la résistance à la fatigue. Les résultats de l'étude ont révélé que le traitement post-soudage induisait des contraintes résiduelles de compression maximales qui dépassaient la limite d'élasticité du matériau de base, principalement près de la surface. Ces contraintes étaient présentes dans une région spécifique avec une profondeur d'environ 1,5 à 1,7 mm et une largeur d'environ ± 15 mm. Cependant, il convient de noter que dans la région soudée, la couche de compression était réduite à une épaisseur d'environ 1 mm en raison de la présence d'une contrainte résiduelle de traction associée au processus de soudage. Cette information est représentée dans la figure 51b [27].

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

Après le traitement post-soudage, la valeur du seuil de croissance des fissures, K_{th} , a été augmentée, ce qui a renforcé la résistance à la fatigue du matériau. Cette amélioration est attribuée à la présence d'une couche mince de contrainte de compression induite par le traitement. L'effet bénéfique de cette couche est plus prononcé lors de l'initiation des fissures de fatigue et de la croissance des fissures à un stade précoce, plutôt que lors de la propagation des fissures à un stade II (figure 51a). [27].

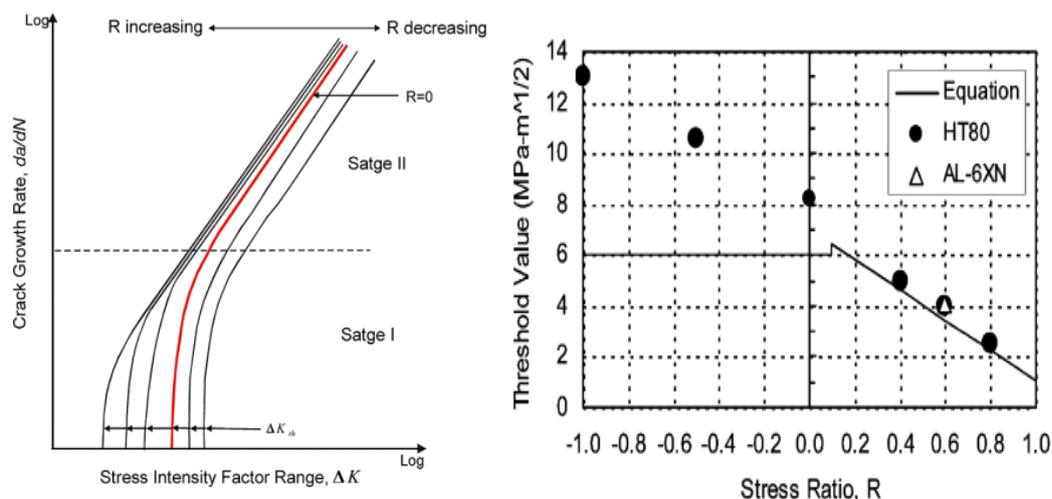


Figure 51: (a) Schéma de variation du taux de croissance des fissures (da/dN) en fonction de la plage de facteur d'intensité de contrainte (ΔK) et de la valeur seuil (ΔK_{th}) en fonction de la contrainte rapport R pour les matériaux de base. (b) Relation entre la valeur du seuil de croissance des fissures et le rapport de contrainte [27].

Chapitre IV : Influence des techniques d'amélioration des joints de soudure

- Dans leur étude, Lasse et al [28] ont examiné les niveaux de contrainte résiduelle de surface sur des échantillons soudés et traités au laser de deux nuances d'acier différentes, à savoir le S690QL et le S420MC. Les échantillons différaient également en termes d'épaisseur de plaque, avec une épaisseur de (a) 10 mm et (b) 5 mm. Les résultats ont montré que les plaques plus minces étaient plus sensibles aux contraintes de traction élevées que les plaques plus épaisses. Cette observation peut également être liée à la présence de différentes quantités de couches de contrainte. De plus, lors des essais de fatigue, les contraintes résiduelles de compression ont montré des niveaux de relâchement différents (figure 52).

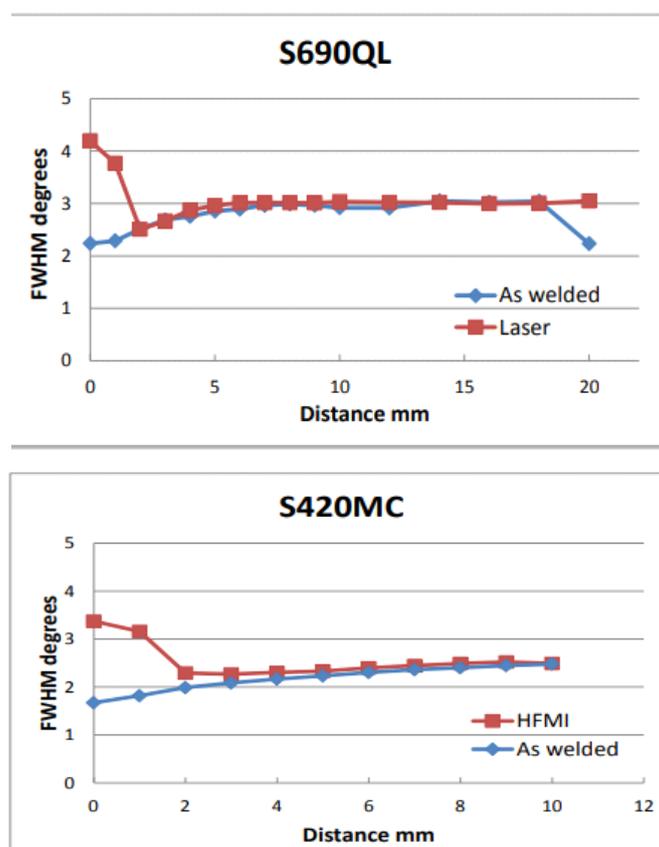


Figure 52 : Niveau de contrainte résiduelle de surface d'échantillons soudés et traités au laser de deux nuances d'acier différentes : S690QL et S420MC. Les échantillons sont de différentes épaisseurs de plaque (a) 10 mm (b) 5 mm [28].

VIII Synthèse

Les techniques d'amélioration des joints de soudure et leurs effets sur le comportement en fatigue ont été présentés dans ce chapitre.

Il a été déterminé que chacun de ces techniques peuvent être facilement utilisés dans toutes les positions tant qu'il y a un bon accès au cordon de soudure.

De nombreuses techniques ne sont pas utilisées en raison de l'inspection et le contrôle de la qualité sont extrêmement difficiles. Certaines méthodes, telles que le grenailage et le meulage des pieds de cordon sont largement utilisés dans certaines industries car il existe des procédures de contrôle de la qualité bien développées.

Les résultats présentés ici indiquent que les niveaux d'amélioration suivants peuvent être attendus :

- VIII. Pour les traitements de meulage en pointe et de dressage TIG, la contrainte sur les courbes S-N de conception soudées a été augmentée de 30 % pour tous les joints sans changement de pente des courbes S-N (c'est-à-dire $m=3$). Cette augmentation correspond à une amélioration d'environ 120% en termes de durée de vie en fatigue, sous réserve que la durée de vie en fatigue initiale du joint non amélioré soit supérieure à 10^6 cycles.
- IX. Pour les traitements de martelage, une augmentation de 40- 60 % de la contrainte sur la courbe S-N de conception après soudage pour tous les joints sans changement de pente des courbes S-N (c'est-à-dire $m = 3$). Cela correspond à une augmentation d'environ 300 % en termes de durée de vie, à condition que la durée de vie initiale en fatigue du joint non amélioré soit supérieure à 10^6 cycles.
- X. Le martelage par ultrason dans le test de fatigue a augmenté efficacement la durée de vie dans des charges de fatigue faibles jusqu'à 70% et dans des charges de fatigue élevées jusqu'à 40%.
- XI. Pour le traitement thermique, les contraintes maximales induite par le traitement a dépassé la limite d'élasticité de la base matériau près de la surface donc la résistance a la fatigue est renforcée, parce que la contrainte de compression est mince. Le traitement thermique post-soudure améliore l'effet de retardement dû à la surcharge de traction.
- XII. Cependant, il convient de noter que les résultats sont largement basés sur des données expérimentales.
- XIII. En conclusion, le meulage des bavures, le dressage TIG et le martelage sont rentables traitements pour améliorer la résistance à la fatigue des joints soudés.

Références :

- [1] Gao W, Wang D, Cheng F, Deng C, Liu Y, Xu W. (2015). "Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment". *J Mater Process Technol*, 223, pp. 305–12
- [2] Zhongqiu Fu, Bohai Ji, Xiangming Kong, Xiang Chen, (2017). "Grinding treatment effect on rib-to-roof weld fatigue performance of steel bridge decks". *Journal of Constructional Steel Research College of Civil and Transportation Engineering*, Vol. 129, pp. 163-170
- [3] K. Yamada, T. Ishikawa, T. Kakiichi, Rehabilitation and improvement of fatigue life of welded joints by ICR treatment, *Adv. Steel Constr.* 11 (3) (2015) 294–304.
- [4] R. Baptista, V. Infante, C.M. Branco (2008). "Study of the fatigue behavior in welded joints of stainless steels treated by weld toe grinding and subjected to salt water corrosion" *International Journal of Fatigue*, 30, pp. 453–462.
- [5] Moritz Braun, Xiru Wang (2021). A review of fatigue test data on weld toe grinding and weld profiling. *International Journal of Fatigue*, 145, 106073.
- [6] Masahito M. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress corrosion cracking. *Journal of Nuclear Engineering and Design* 2007; 237: 107–123.
- [7] Madhulika Srivastavaa, Sergej Hlochb, Lucie Krejcid, Somnath Chattopadhyaya, Amit Rai Dixit, Josef Foldyna (2018). "Residual stress and surface properties of stainless steel welded joints induced by ultrasonic pulsed water jet peening". *Measurement*, Vol. 127, pp. 453-462.
- [8] Arola D., McCain M.L, Kunaporn S., Ramulu M. (2002). "Water jet and abrasive water jet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress". *Wear*, Vol. 249, pp. 943-950.
- [9] Azhari A, Schindler C, Kerscher E, Grad P. (2012). "Improving surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012;63: 1035–1046.
- [10] Armando L. Ramalho, José A.M. Ferreira, Carlos A.G.M. Branco (2011). "Fatigue behaviour of T welded joints rehabilitated by tungsten inert gas and plasma dressing". *Materials and Design* 32 (2011) 4705–4713
- [11] Lieurade HP, Huther I, Lefebvre H. (2007). "Effect of weld quality and post weld improvement techniques on the fatigue resistance of extra high strength steel". *IIW Doc. XIII-2184-07*; 2007.
- [12] Sajjad Barzegar-Mohammadi, Mohammad Haghpanahi, Mostafa Zeinoddini, Reza Miresmaeili (2023). "Effects of TIG dressing, PWHT and temper bead techniques on

microstructure and fatigue strength of fillet welded steel patch repairs: an experimental investigation". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 22, pp. 3442-3462.

[13] Hassan Al-Karawi, R.U. Franz von bock und polach, mohammad Al-Emrani (2020). "Fatigue crack repair in welded structures via tungsten inert gas remelting and high frequency mechanical impact. *Journal of constructional steel research*, Vol. 172, 106200.

[14] Vosikovsky O, Bell R. (1991). "Attachment thickness and weld-profile effects on the fatigue life of welded joints". *Proceedings offshore mechanics and arctic engineering conference, stravanger, norway*.

[15] Haagensen PJ, Dragen A, Slind T, Orjasaeter O. (1987). "Prediction of the improvement in fatigue life of welded joints due to grinding, TIG dressing, weld shape control and shot peening". *Proceedings third international conference on steel in marine structures (SIMS 87)*, paper TS35. Amsterdam: Elsevier publishers, 1987.

[16] American petroleum institute (1993). "Recommended practice for planning, designing and constructing offshore platforms". *Recommended Practice RP 2A*.

[17] Barbara nasiłowska, Paweł bogusz, Wojciech skrzeczanowski (2019). "The influence of shot-peening on structure and mechanical properties of 5754 aluminium alloy joints welded with TIG method". *Published by elsevier B.V procedia structural integrity* 23 (2019) 583–588

[18] Xiaohui Zhaoa,b , Hongyang Zhoua , Yu Liu 'Effect of shot peening on the fatigue properties of nickel-based superalloy GH4169 at high temperature'. *Results in physics* 11 (2018) 452 -460

[19] A.H. Mahmoudi a, *, A. Ghasemi a , G.H. Farrahi b et al ' A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening'. *Materials and Design* 90 (2016) 478–487

[20] Barbara Nasiłowska a, *, Zdzisław Bogdanowicz a , Michał Wojucki b ' Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance'. *Journal of constructional steel research* 115 (8-September 2015) 276–282

[21] I.E. Kopsov ' The influence of hammer peening on fatigue in high-strength steel'. *Int J Fatigue* 13 No 6 (1991) pp 479-482

[22] Jean-Loup Curtat a , Jacques Lantaigne b , Henri Champlaud et al ' Influence of hammer peening on fatigue life of E309L steel used for 13%Cr-4%Ni blade runner repairs'. *International journal of fatigue* 100 (7 March 2017) 68–77

[23] Fabien Lefebvrea *, Catherine Peyraca , Guillaume Elbel et al ' Understanding of fatigue strength improvement of steel structures by hammer peening treatment'. *Procedia engineering*

133 (2015) 454 – 464 .

[24] Joern Berga *, Natalie Stranghoenera ‘ Fatigue strength of welded ultra high strength steels improved by high frequency hammer peening ‘ a University of Duisburg-Essen, Institute for metal and lightweight structures, 45141 Essen, Germany *procedia materials science* 3 (2014) 71 – 76

[25] B. Fereidooni, M.R. Morovvati* , S.A. Sadough-Vanini ‘ Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment ‘ Mechanical engineering department, Amirkabir university of technology, tehran, Iran 21 March 2018

[26] Ayush Joshi a , Aditya Gope b , Prakash Chandra Gope a, ‘ Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth behaviour of friction stir welded 7075-T651 Al alloy ‘ *Theoretical and applied fracture mechanics* 123 (2023) 103714

[27] Xiaohua Cheng a,*, John W. Fisher a,b, Henry J. Prask c ‘ Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures ‘ *International journal of fatigue* 25 (2003) 1259–1269

[28] Lasse Suominen1,* , Mansoor Khurshid2 , Jari Parantainen ‘Residual stresses in welded components following post-weld treatment methods ‘ 5th fatigue design conference, fatigue design 2013 *procedia engineering* 66 (2013) 181 – 191

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

L'objectif de cette étude et la mise en évidence c'est de présenter un état de l'art sur l'influence des techniques d'amélioration des joints de soudure sur le comportement en fatigue au pied de cordon.

Une étude exhaustive a été réalisée sur les différentes techniques permettant d'améliorer la résistance à la fatigue des soudures. Cette revue a couvert les techniques de meulage, de refusion, de grenailage, de relaxation des contraintes résiduelles, et les techniques d'amélioration spéciales, ainsi que les méthodes mécaniques et les traitements thermiques.

Avant d'examiner l'impact de ces techniques sur la résistance à la fatigue des joints de soudures, une recherche documentaire a été menée pour étudier les différents défauts qui peuvent être générés lors du processus de soudage.

Une synthèse a été présentée sur les effets des différentes techniques visant à améliorer la résistance à la fatigue des joints de soudure.

Les résultats des études précédant montrent :

- Le processus de soudage engendre des contraintes résiduelles, à la fois compressives et tensionnelles, dans la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi que dans le métal
- Les techniques d'amélioration des joints de soudure augmenté la durée de vie de la fatigue de cordon de soudure.
- Les techniques d'amélioration des joints de soudure étudiées peuvent créer des contraintes résiduelles de compression sur la courbe S-N
- Les contraintes résiduelles à la pointe de la fissure sont des contraintes de compression qui évoluent avec l'évolution de la fissure.
- Ces traitements ont également pour effet de la zone traitée. d'augmenter la dureté de la zone parachevée.
- Les techniques de martelage et le grenailage offrent le plus grand avantage d'amélioration de la résistance à la fatigue.

