

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**

Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen

Faculté De Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire pour l'obtention du diplôme

Master En Génie Mécanique

Option : Assemblages Soudée et Matériaux

Thème

***État de l'art sur les effets des contraintes résiduelles dues
au soudage sur la fissuration par fatigue***

Présenté par : **Bensabri Abdelhafid**

Le : 22 / 09 /2020 devant le jury composé de :

Président : HADJOUI Féthi	MCB	UABB Tlemcen
Encadreur : BENACHOUR Mustapha	MC_A	UABB Tlemcen
Co-Encadreur : BENACHOUR Nadjia	MC_B	UABB Tlemcen
Examineur : KARA ALI Djamel	MC_B	UABB Tlemcen

Année universitaire : 2019-2020

REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, avons toute chose, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience.*

*Le présent mémoire a été dirigé par Monsieur **BENACHOUR Mustapha**, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. C'est grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser. J'exprime mes gratitude, mes reconnaissances et mes sincères remerciements.*

*Egalement, j'associe mes remerciements à Madame **BENACHOUR Nadja**, Maître de Conférence à l'université de Tlemcen.*

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

*Je tiens aussi à remercier vivement messieurs **KARA ALI Djamel**, Maître de Conférence à l'université de Tlemcen et, qui ont accepté d'examiner ce travail.*

Je remercie particulièrement mes enseignants du département de génie mécanique pour leurs contributions, leurs précieux conseils durant ma formation.

Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribués de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

Dédicaces

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce travail :

A mes chers parents

A ma famille, mes frères, et sœurs

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes amis et mes collègues.

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé près ou de loin

Résumé

Le but général de ce travail est de :

Présenté un état de l'art sur les effets des contraintes résiduelles dues au soudage sur la fissuration par fatigue, à partir des études précédentes. Le premier procédé est le soudage par friction malaxage (FSW) appliqué sur une plaque en alliage d'aluminium 7050 T7451, le deuxième procédé est le soudage par plasma.

Les résultats montrent que en présence des contraintes résiduelles, les vitesses de fissuration dépendent du niveau du chargement appliqué et de l'état des contraintes résiduelles (compressive ou tensionnelle).

Mots clés : contraintes résiduelles, fatigue, alliage d'aluminium, le soudage par friction malaxage, soudage par plasma.

ABSTRACT

The general aim of this work is to:

Presented a state of the art on the effects of residual stresses due to welding on fatigue cracking, from previous studies. The first method is friction stir welding (FSW) applied to a 7050 T7451 aluminum alloy plate, the second method is plasma welding.

The results show that in the presence of residual stresses, the cracking rates depend on the level of the loading applied and the state of the residual stresses (compressive or tensile).

Keywords: residual stresses, fatigue, aluminum alloy, friction stir welding, plasma welding.

ملخص

الهدف العام من هذا العمل هو

تقديم دراسة فيما يتعلق بآثار الضغوط المتبقية بسبب اللحام على التكسير الناتج عن التعب. بشكل عام ، آثار الضغوط المتبقية بسبب عمليات اللحام التجميعية المختلفة من الدراسات السابقة. الطريقة الأولى هي لحام الدمج والطريقة الثانية هي اللحام بالبلازما T7451 المطبق على لوح سبائك الألومنيوم 7050 (FSW) الاحتكاكي

أظهرت النتائج أنه في حالة وجود ضغوط متبقية ، فإن معدلات التكسير تعتمد على مستوى التحميل المطبق وحالة الضغط أو الشد.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد المتبقي ، التعب ، سبائك الألومنيوم ، لحام الدمج الاحتكاكي ، اللحام بالبلازما

TABLES DES MATIERES

LISTES DES FIGURE..... I
LISTE DES TABLEAUXIV
LISTE DES ABRIVIATIONS V
LISTE DES SYMBOLESVI

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I

Généralité sur la fatigue et les contraintes résiduelle

Introduction.....3
I.1.Fatigue des métaux : généralités.....3
 I.1.1. Définition du phénomène fatigue.....3
 I.1.2. Comportement d'un matériau en fatigue : courbe de Wöhler4
 I.1.3. phases d'endommagement par fatigue4
I.2.les contraintes résiduelles6
 I.2.1.difinition des contraintes résiduelle.....6
 I.2.2.Origine des contraintes résiduelles.....8
 I.2.3.Déformations et contraintes induites par le soudage.....9
 I.2.3.1.Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés.....9
 I.2.4. Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé.....9

I.2.4.1. Résistance statique de l'ensemble.....	9
I.2.4.2. Risques dus aux contraintes résiduelles.....	10
Conclusion.....	10

Chapitre II

Etat de l'art sur les effets contraintes résiduelles dues au soudage sur la fissuration par fatigue

Introduction.....	12
II.1. l'effet de la taille des éprouvettes soudées de type CT et ESET par FSW	12
II.2. etude les distributions contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues soudage dans plaque.....	14
II.3. etude le profil de la contrainte résiduelle sur une plaque d'aluminium.....	15
II.4. l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue d'une éprouvette CT.....	18
II.5. étude propagation des fissures des joints en aluminium soudés au plasma 2219- T851 sur des échantillons de types CT et CCT.....	19
II.6. l'influence du rapport de charge sur la propagation de la fissure de fatigue dans un alliage d'aluminium 2024 T3.....	22
II.7. L'effet des contraintes résiduelles sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été étudié sur des éprouvettes MT et CT en alliage d'aluminium 2024 T351.....	23
II.8. comparaison entre Contrainte résiduelle longitudinale Facteur d'intensité de contrainte résiduelle pour les joints soudée par FSW.....	25
II.9. étude de Champ des contraintes résiduelles dans des échantillons entaillés C (T) et ESE (T) de Les soudures par friction-malaxage en aluminium 2195-T8.....	27
II.10. influence de rapport d'avance dans en alliage d'aluminium 7075-T6 sur la distribution des contraintes résiduelles dans un joint soudée par friction malaxage.....	28
II.11. étude la propagation de fissures longitudinales dans le noyau et dans la ZAT des joints SFM en alliage d'aluminium 7050-T7451.....	30
Conclusion.....	36

CHAPITRE III:

Effet des contraintes résiduelles dues au soudage sur la propagation des fissures de fatigue

I.Introduction.....	38
II. fatigue de joints soudée par friction malaxage.....	38
II.1. Introduction.....	38
II.2. Discussion des résultats.....	41
III. fatigue de joint soudée par plasma.....	43
III.1. Introduction.....	43
III.2. Discussion des résultats.....	44
Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49
Références bibliographiques.....	50

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Nomenclature utilisée pour décrire un chargement cyclique d'amplitude constante.....3

Figure.I.2: Représentation schématique des trois domaines de fatigue.....4

Figure.I.3: Représentation schématique de la phase d'amorçage.....5

Figure.I.4: Représentation schématique des phases I et II.....5

Figure.I.5: Domaine d'existence des contraintes d'ordre ∂^I 6

Figure.I.6: Domaine d'existence des contraintes d'ordre ∂^{II} 7

Figure.I.7: Domaine d'existence des contraintes d'ordre ∂^{III} 8

CHAPITRE II

FigureII.8 : Eprouvette soudées pour essais de fatigue.....13

figureII.9 : Champs des contraintes résiduelles dus au soudage par FSW.....14

Figure II.10 : Vitesse de fissuration pour une éprouvette de type ESE(T).....15

Figure II.11 : Vitesse de fissuration pour une éprouvette de type C(T).....15

Figure II.12: contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues soudage dans plaque.....16

Figure II.13 : Contrainte longitudinale le long de la soudure selon la distance par rapport au cordon de soudage.....17

Figure II.14: Contrainte transversale ∂_x selon la position longitudinale et le bridage en place.....17

Figure II.15 : Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage mono passe.....	18
Figure II.16: Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation Cas d'un assemblage multi passe.....	19
Figure II.17 : Eprouvette CT pour essai de fatigue.....	20
Figure II.18 : Effet des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue.....	20
Figure II.19: taux de propagation de fissures dans les échantillons CT non soudée.....	21
Figure II. 20: comparaison entre les résultats pertinents pour les échantillons CT et CCT pour fissure se propagent le long du cordon de soudure.....	22
Figure II.21 : comparaison entre es résultats pertinents pour les échantillons CT et CCT pour la fissure sur se propageant e long du cordon de soudure.....	22
Figure II.22 : contrainte résiduelles longitudinale mesuré dans une plaque soudée.....	23
Figure II.23: Contrainte résiduelle au fond de la fissure et taux de contrainte réel en fonction de la longueur de la fissure.....	24
Figure II.24: Effet des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue.....	25
Figure II.25 : Champ de contraintes résiduelles imposées le long de la propagation de la fissure.....	25
Figure II.26: Distribution des contraintes résiduelles dans une éprouvette MT.....	26
Figure II.27: Evolution de la vitesse de propagation dans une éprouvette MT.....	27
Figure II.28: Distribution des contraintes résiduelles dans une éprouvette CT.....	27
Figure II.29 : Evolution de la vitesse de propagation dans une éprouvette CT.....	28
Figure II.30:(a) Contrainte résiduelle longitudinale et (b) Facteur d'intensité de contrainte résiduelle $KI_{rés}$ obtenu avec la méthode de conformité de coupe pour FSW et les joints relevés.....	29
Figure II.31 : Taux de croissance des fissures en fonction de la distance de l'axe de la soudure pour éprouvettes testées aux $\Delta K_{app} = 21. m^{1/2}$ fissures se développent loin au milieu et près de ligne médiane de soudage.....	29
Figure II.32 : Taux de croissance des fissures et valeurs moyennes de dureté du joint FSW faible fissure le taux de croissance se produit dans la zone de pépite plus difficile.....	30
Figure II.33 : taux de croissance des fissures du cas M par rapport à ceux des cas soulagés mécaniquement joints FSW, éprouvettes testées pour $\Delta K_{app} = 21. m^{1/2}$	31

Figure II.34: Taux de croissance des fissures da/dN en fonction de la plage d'intensité de contrainte ΔK pour trois différentes tailles des échantillons ESE (T) à $R = 0,6$ et le plan de fissure perpendiculaire à la ligne de soudure.....	32
Figure II.35 : Taux de croissance des fissures da/dN et ΔK dans trois tailles d'échantillon différentes C (T) les échantillons fissurent le plan parallèlement à la ligne de soudure.....	32
Figure II.36 : Taux de croissance des fissures en fonction de la longueur des fissures à partir de la ligne de soudure pour les trois tailles de échantillons ESE (T) testés à $R = 0,6$.le plan de fissure perpendiculaire à la ligne de soudure. Ombre zone montre la position et l'étendue de la pépite de soudure et du TMAZ.....	33
Figure II.37 : Effets des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles; AA5083-H321 de 6 mm d'épaisseur.....	34
Figure II.38: Contraintes résiduelles dans la direction longitudinale dans un joint SFM en alliage d'aluminium 7075–T6 de 3 mm d'épaisseur).....	34
Figure II.39: Configuration des échantillons (a) et résultats des essais de propagation de fissure proche du seuil de propagation (b) d'un joint SFM en AA7050-T7451 de 6,35 mm d'épaisseur.....	35

CHAPITRE III:

Figure III.40 : Schéma illustratif du soudage par friction malaxage (FSW).....	39
Figure III.41 : Eprouvette de type ESET découpé de l'assemblage soudé par friction malaxage (FSW).....	40
Figure III.42 : Position de la fissure dans le noyau du joint de soudure et la ZAT pour essais de fatigue.....	40
Figure III.43 : Contraintes résiduelles longitudinales mesurées et parallèles au plan de l'entaille de l'éprouvette (contrainte suivant le chemin de propagation – coté soudure et coté racine).....	41
Figure III.44 : Vitesses de fissurations sous différentes conditions matérielles.....	43
Figure III.45 : Géométrie des éprouvettes M(T) et C(T) pour essais de fatigue.....	44
Figure III.46 : Contraintes résiduelles mesurées et prédites dans le joint de soudure dans la direction longitudinale pour l'éprouvette M(T).....	45
Figure III.47 : Contraintes résiduelles mesurées et prédites dans le joint de soudure dans la direction longitudinale pour l'éprouvette C(T).....	46
Figure III.48 : Résultats expérimentaux et prédites des vitesses de fissuration pour l'éprouvette M(T) en appliquant l'approche des contraintes résiduelles.....	46

Figure III.49 : Vitesses de fissuration pour l'éprouvette C(T) en appliquant l'approche des contraintes résiduelles et le phénomène de fermeture de fissure.....47

LISTE DES TABLAEUX

LISTE DES TABLAEUX

Tableau I.1: Différentes origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise en œuvre couramment utilisées dans l'industrie8

Tableau III.2 : Propriétés mécanique de l'alliage 7050 T7451 avant et après soudage par FSW.....39

ABREVIATIONS

ZAT/HAZ : Zone affectée thermiquement

FSW : soudage par friction –malaxage

CT : Compact Tension

CCT : Central Compact Tension

CR : Contrainte Résiduelle

ZF : Zone fondue

ZP : Zone plastique

SYMBOLES

MPa: Méga pascal (unité de pression)

m : Mètre (Unité de longueur)

N : Nombre de cycle [cycle]

R : Rapport de charge

R_{eff} :Rapport de charge effectif

$KI_{rés}$:Facteur d'intensité de contrainte résiduelle en mode I [$MPa.m^{1/2}$]

ΔK :Amplitude du facteur d'intensité de contrainte [$MPa.m^{1/2}$]

ΔK_{eff} :Amplitude efficace du facteur d'intensité de contraintes [$MPa.m^{1/2}$]

ΔK_{app} :Amplitude du facteur d'intensité de contrainte appliqué [$MPa.m^{1/2}$]

ΔS :La variation de contrainte [MPa]

da/dN : Vitesse de fissuration [mm/cycle]

S_{max} :Contrainte maximale [MPa]

S_{min} : Contrainte minimale [MPa]

S_m : Contrainte moyenne [MPa]

S_a : L'amplitude de contrainte [MPa]

σ^I :Contrainte de premier ordre [MPa]

σ^{II} :Contrainte de deuxième ordre [MPa]

σ^{III} : Contrainte de troisième ordre [MPa]

σ_d :Limite de fatigue [MPa]

σ_a : L'amplitude de contrainte [MPa]

σ_L : Contrainte longitudinale [MPa]

σ_t : Contrainte transversale [MPa]

σ_x : Contrainte suivant l'axe x [MPa]

σ_y : Résistance local à la rupture [MPa]

Cr : Chrome

Ni : Nickel

Introduction générale

Les structures mécaniques en service sont soumises à des sollicitations cycliques de différentes natures (phénomène de fatigue). L'étude du comportement en fatigue dépend des conditions d'utilisation, du matériau, de la géométrie (présence d'entailles),...etc. L'étude en fatigue sous chargement à amplitude constante représente la 1ère étape de caractérisation du comportement du matériau. Ce type de chargement permet l'étude de l'influence d'un paramètre bien particulier : rapport de charge "R". En effet il existe une multiplicité de paramètres influençant la durée de vie et la vitesse de fissuration. En plus du rapport de charge, la direction de propagation des fissures, état de surface, les contraintes internes ...etc. Parmi les paramètres influençant le comportement en fatigue des matériaux les contraintes résiduelles générées par différentes sources dont leur rôle est prépondérant.

L'objectif du présent mémoire est l'étude des effets des contraintes résiduelles de soudage sur la fissuration par fatigue.

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée de trois chapitres :

Le premier chapitre présente les notions générales sur le comportement en fatigue et la rupture des matériaux métalliques et Les différentes origines des contraintes résiduelles ont été présentées. Les effets des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé.

Le deuxième chapitre est consacré à l'effet des contraintes résiduelles de soudage sur la fissuration par fatigue des différents matériaux à travers une étude bibliographique.

Dans le chapitre III, nous présentons les effets des contraintes résiduelles dues au soudage d'assemblages. Le premier procédé est le soudage par friction malaxage (FSW) appliqué sur une plaque en alliage d'aluminium 7050 T7451, le deuxième procédé est le soudage par plasma.

Enfin une conclusion présentant une synthèse globale des résultats obtenus ainsi que les perspectives.

Chapitre : généralité sur la fatigue et les contraintes résiduelle

Introduction :

Le premier chapitre présente quelques généralités sur l'endommagement des matériaux en fatigue sont ensuite exposées avant de décrire l'impact des contraintes résiduelles. Pour finir, certaines notions sur l'influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé.

I.1. Fatigue des métaux : généralités

I.1.1. Définition :

La fatigue des métaux est définie comme l'endommagement provoqué par la répétition de sollicitations mécaniques à des valeurs de contraintes inférieures à celle nécessaire à la rupture statique d'une pièce. Cette notion de « fatigue » est apparue vers 1850, suite à la rupture répétée d'axes de trains. Le phénomène a intrigué l'Allemand August Wöhler, qui fut l'un des premiers à étudier la fatigue. La méthodologie qu'il a développée est toujours utilisée de nos jours [1]. La nature cyclique du chargement causant l'endommagement par fatigue est définie par des paramètres précis, comme le montre la figure I.1.

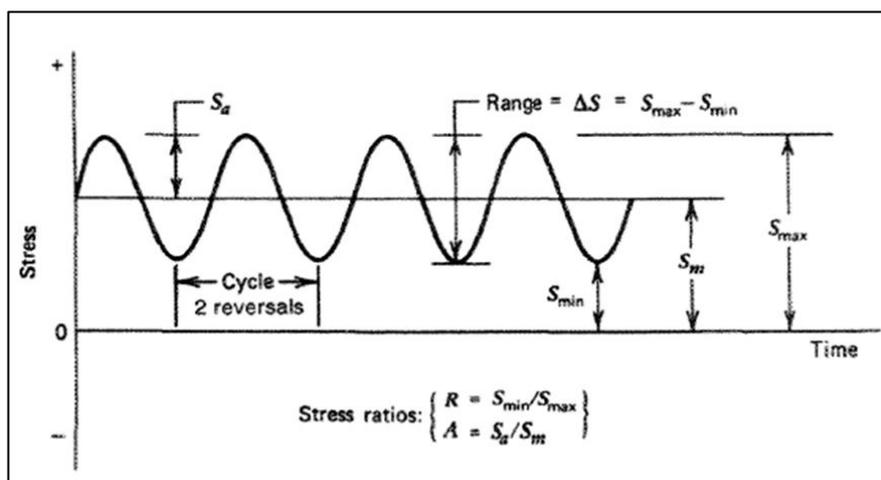


Figure I.1 : Nomenclature utilisée pour décrire un chargement cyclique d'amplitude constante [1]

Sur cette figure on retrouve :

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

Sm : la contrainte moyenne ;

Smax : la contrainte maximale ;

ΔS : la variation totale de contrainte soit $S_{max} - S_{min} = 2S_a$;

Smin : la contrainte minimale ;

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

I.1.2. Comportement d'un matériau en fatigue : courbe de Wöhler

Le phénomène de fatigue d'un matériau est peut être représentée à l'aide d'une courbe de Wöhler (courbe S-N), exprimant l'amplitude de contraintes en fonction de nombre de cycle à rupture. Cette courbe présente trois domaines de fatigue de dure de vie classé dans chaque cas selon un nombre de cycles approximatif « N » (figure I.2) :

1- Domaine oligocyclique : $N < 10^3 - 10^5$ cycles, caractérisé par déformation plastique en fond de fissure et une durée de vie faible ;

2- Domaine limite (d'endurance.): $10^4 < N < 10^7$, caractérisé par déformation élastique et augmentation de durée de vie avec diminution de l'amplitude de contrainte ;

3- Domaine illimité : $N > 10^7$ cycles, caractérisé par une contrainte inférieure à la limite d'endurance ;

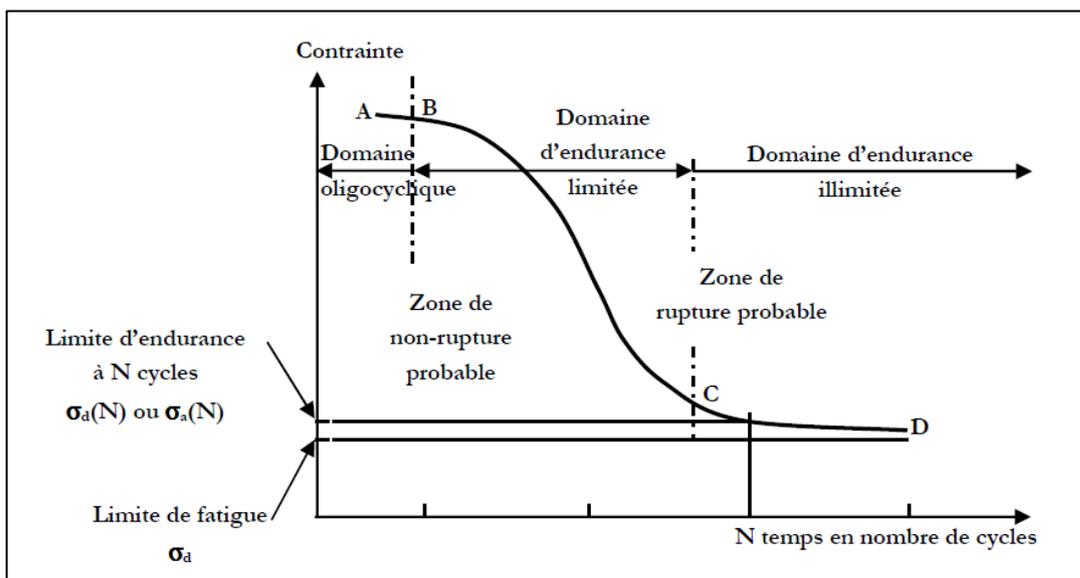


Figure I.2 : Représentation schématique des trois domaines de fatigue [2]

I.1.3. Phases d'endommagement par fatigue :

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

I. Amorçage d'une microfissure :

Lors de l'application d'efforts cycliques des extrusions et intrusions apparaissent en surface dans les zones de concentration de contrainte locales et se propagent de façon transgranulaire à travers quelques grains selon les plans de glissement préférentiellement. Des microfissures ou autres défauts microscopiques peuvent également être présents suite à la mise en forme.

II. propagation d'une fissure :

Une certaine profondeur la fissure quitte le plan de cisaillement maximale et change de direction pour se propager globalement de façon inter granulaire dans le plan perpendiculaire à la contrainte de traction maximale.

III. rupture :

Lorsque la fissure atteint une taille critique où la surface portante restante n'est plus suffisante pour résister à la contrainte normale il y a rupture de la pièce, la figure I.3 illustre la phase I, tandis que la figure I.4 montre les phases I et II combinées [3].

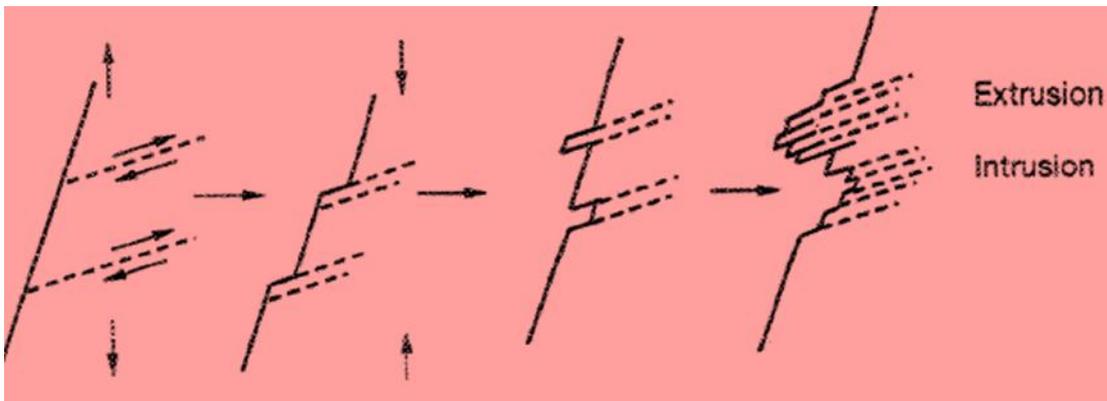


Figure I.3 : Représentation schématique de la phase d'amorçage [3]

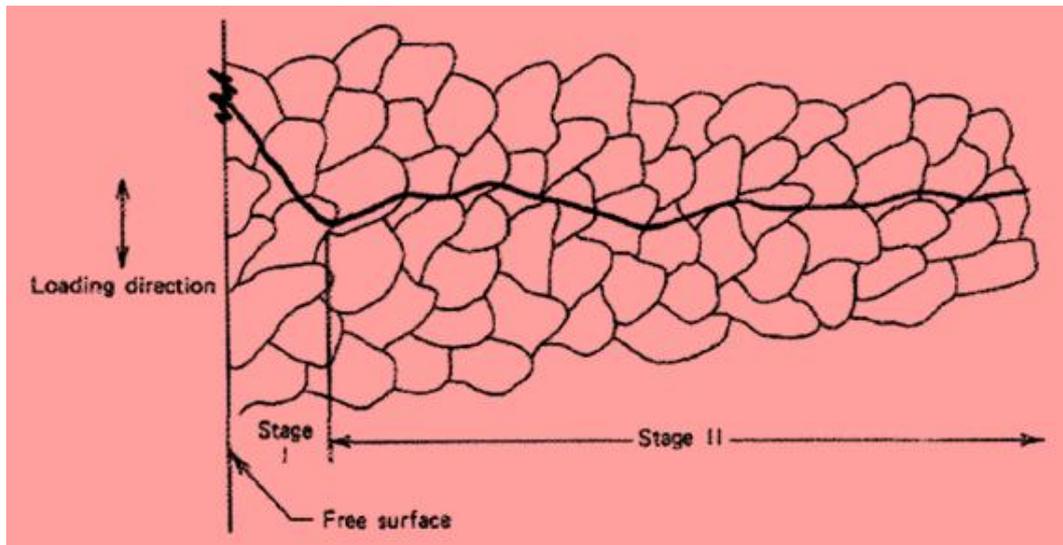


Figure I.4: Représentation schématique des phases I et II [3]

I.2. Les contraintes résiduelles :

I.2.1. Définition :

On peut être définir les contraintes résiduelles en tant que contraintes demeurant dans un matériau après fabrication et traitement en l'absence des forces externes ou des gradients thermiques [4],[5]. Ces contraintes sont généralement dues aux incompatibilités locales engendrées par des déformations plastiques ou induites par une variation de volume, la dilatation ou la contraction thermique elles sont souvent introduites dans un matériau lors de son élaboration ou dans les composants comme conséquence des procédés de fabrication, des traitements technologiques ou du fonctionnement en service. Malgré les techniques analytiques et de calcul modernes il est bien plus difficile de prédire et de modéliser les contraintes résiduelles que les contraintes de service d'un composant. Pour cette raison il est important d'avoir des méthodes expérimentales fiables pour l'évaluation des contraintes résiduelles [6], [7] et de comprendre le niveau d'information que l'on peut en obtenir.

Les contraintes résiduelles sont classées en trois catégories comme suit :

1-Premier ordre : Les contraintes résiduelles du premier ordre ou d'ordre 1 (σ^I) sont homogènes c'est-à-dire sont constantes en intensité et en direction, dans des domaines relativement importants s'étendant sur plusieurs grains dans le cas des matériaux monophasés (donc échelle de quelques dixièmes de millimètres). Les forces résultant des contraintes du premier ordre sont en équilibre dans chaque section de la pièce et les moments liés à ces forces sont nuls par rapport à tout axe (figure I.5). Les contraintes résiduelles du premier ordre également appelées contraintes résiduelles macroscopiques sont celles dont traite la mécanique des milieux continus [8].

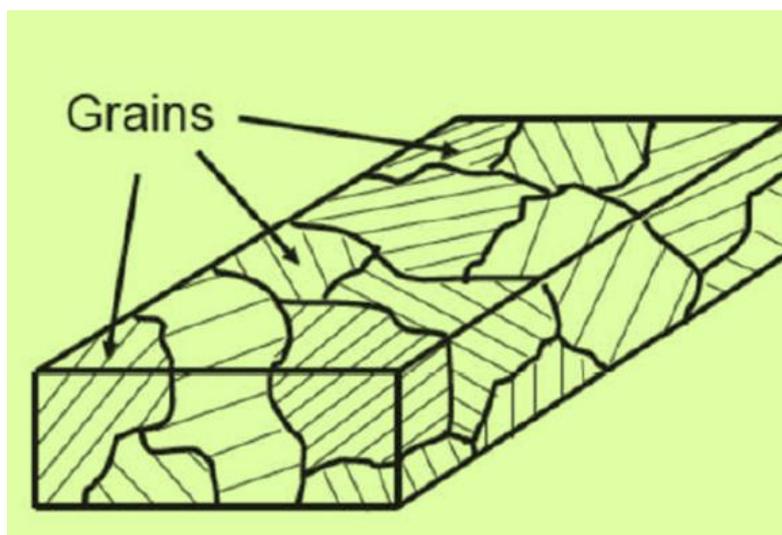


Figure I.5 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre σ^I

2-Deuxième ordre : Les contraintes résiduelles du deuxième ordre ou d'ordre 2 (σ^{II}) sont homogènes dans des domaines correspondant à un grain ou à une portion de grain pour des matériaux monophasés (donc échelle de quelques dizaines de micromètres) figure I.6. Elles proviennent dans ce cas de la différence d'orientation cristalline entre grains voisins. Les forces résultant des contraintes du second ordre et les moments associés s'équilibrent sur un nombre suffisant de grains. Les contraintes résiduelles du deuxième ordre sont appelées contraintes résiduelles microscopiques homogènes. Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du second ordre peut se traduire par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce[8].

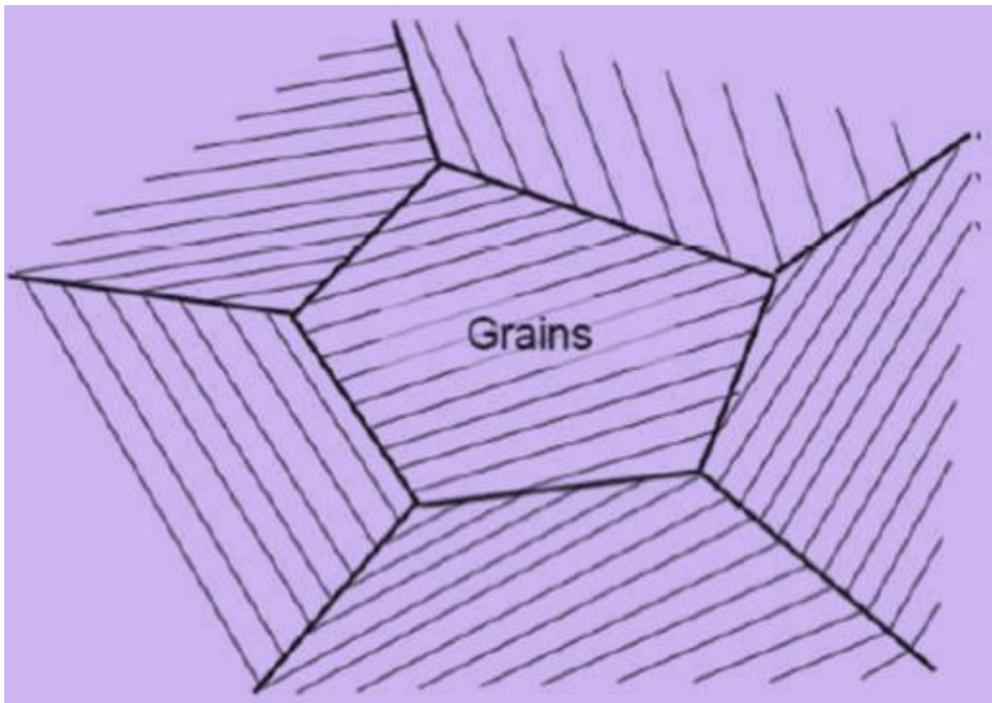


Figure I.6 :Domaine d'existence des contraintes σ^{II}

3-Troisième ordre : les contraintes résiduelles du troisième ordre ou d'ordre 3 (σ^{III}) sont hétérogènes même dans des zones s'étendant sur quelques distances interatomiques matériau (donc échelle de quelques dizaines de nanomètres). Elles sont associées en majorité aux déformations existant au voisinage des défauts cristallins. Les forces résultant des contraintes du troisième ordre et les moments associés s'équilibrent dans des zones représentant des portions très réduites d'un grain. Les contraintes résiduelles du troisième ordre sont appelées contraintes résiduelles microscopiques hétérogènes. Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du troisième ordre ne se traduit par

aucune variation dimensionnelle macroscopique. La figure I.7 est une représentation schématique du domaine d'existence des contraintes résiduelles d'ordre 3 [8].

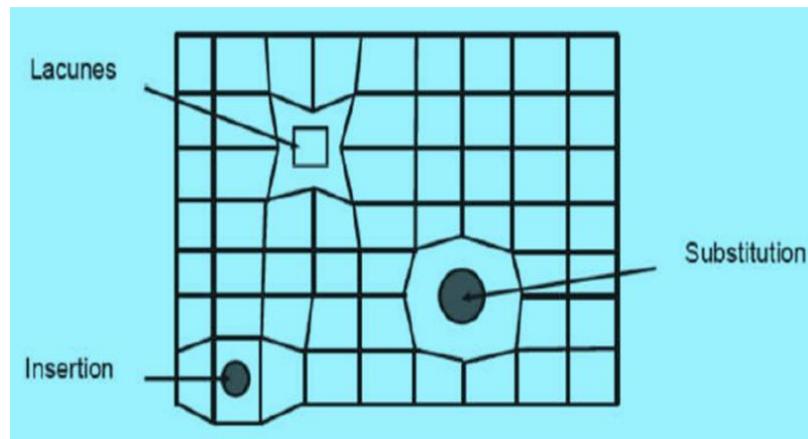


Figure I.7 : Domaine d'existence des contraintes d'ordre σ^{III}

I.2.2. Origine des contraintes résiduelles :

Le tableau I.1 indique les origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise-en-œuvre couramment utilisées dans l'industrie. Pour réaliser une pièce industrielle, l'état des contraintes résiduelles existant dans les composants, il faut d'abord identifier les sources de contrainte :

Tableau I.1: Différentes origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise en œuvre couramment utilisées dans l'industrie [8].

Procédé	Origine mécanique	Origine thermique	Origine structurale
Fonderie (moulage)	Non	Gradient de température pendant le refroidissement	Changement de phase
Traitement de surface mécanique et mise en forme à froid (grenailage, martelage, galetage, choc laser, pliage, roulage, repoussage, forgeage, redressage, filage)	Déformation plastique hétérogène entre le cœur et la surface de la pièce	Non	Possible dans certains cas
Usinage (rectification, tournage, fraisage, perçage, alésage)	Déformation plastique due à l'enlèvement de copeaux	Gradient de température dû à l'échauffement pendant l'usinage	Transformation de phase pendant l'usinage si la température est suffisamment élevée
Trempe sans transformation de phase	Non	Gradient de température	Non
Trempe superficielle avec transformation de phase (induction, Fe, laser, plasma, méthodes classiques)	Non	Gradient de température	Changement de volume dû à la transformation de phase
Cémentation (nituration)	Non	Incompatibilité thermique	Nouveau composant chimique avec variation de volume
Soudage	Bridage	Gradient thermique	Modification microstructurale (ZAT)
Brasage	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Nouvelle phase à l'interface
Dépôt électrolytique	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Composition de dépôt selon les bains
Projection à chaud (plasma, laser, jet Kote)	Incompatibilité mécanique, microfissuration	Incompatibilité thermique, gradient de température	Changement de phase de dépôt

I.2.3. Déformations et contraintes induites par le soudage :

I.2.3.1. Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés

Il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression, dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé. On peut avoir quatre types de contraintes :

- **contraintes résiduelles directes** : Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé, ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter ; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.
- **contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage** : Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, qui s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.
- **contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)** : Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage par exemple, masse de l'ensemble en porte à faux pendant le soudage. On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence.
- **contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout** : Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales (σ_L) atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal fondu. Pendant le soudage, le métal de base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est portées à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où le métal est pratiquement froid; les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement, une traction sur le métal de base. Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords [9], [10].

I.2.4. Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé :

I.2.4.1. Résistance statique de l'ensemble :

Les contraintes résiduelles s'auto-équilibrent et l'on admet généralement qu'elles n'ont pas d'influences défavorable sur le comportement statique de l'ensemble, à condition qu'une quantité suffisante de métal déposé assure une résistance convenable (sans fissure, ni amorce de rupture). Il existera toujours à coté de contraintes

résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposé et qui agiront dans le sens favorable. Lorsque de légères déformations plastiques se produisent sous l'effet des charges de service dans les zones les plus sollicitées, les contraintes résiduelles tendent à disparaître [11].

I.2.4.2. Risques dus aux contraintes résiduelles :

- Structures soumises au flambement (ou flambage) :

Les contraintes résiduelles, et surtout les déformations entraînent une diminution des charges admissibles sur les éléments soumis au flambement, les coefficients de flambement sont plus importants pour les ensembles soudés que pour les laminés ; les contraintes résiduelles peuvent donc réduire la valeur de la charge admissible, et se combiner avec les contraintes de service et, le cas échéant, avec des contraintes parasites dues à l'exécution ou au montage de l'ensemble.

- Structures soumises au risque de rupture fragile :

Lorsqu'un élément d'une structure est soumis à des contraintes multidirectionnelles de traction, il ne peut se déformer plastiquement. Dans ce cas, si la rupture se produit elle a lieu brutalement par décohésion (rupture fragile). Parmi les facteurs qui rendent un acier sensible au risque de rupture fragile on note entre autre le niveau des contraintes de traction auxquelles est soumis le métal. Les contraintes résiduelles du soudage, qui sont très souvent multidirectionnelles viennent s'additionner aux contraintes de service qui peuvent conduire à une rupture fragile. Il est donc très important, à chaque fois que cela est possible de diminuer au maximum l'importance des contraintes résiduelles, Surtout si le joint soudé doit travailler à la fatigue [9].

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre généralités sur le phénomène de fatigue et les contraintes résiduelles. Dans la première partie on a présenté une définition de phénomène de fatigue et ses types d'endommagements, ensuite on a présentée les contraintes résiduelles et ses origines, de plus les déformations et contraintes induites par l'opération de soudage.

Chapitre II :
ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS
DES CONTRAINTES
RESIDUELLES DUES AU
SOUDAGE SUR LA FISSURATION
PAR FATIGUE

II –Etat de l’art sur les effets des contraintes résiduelles dues au soudage sur la fissuration par fatigue :

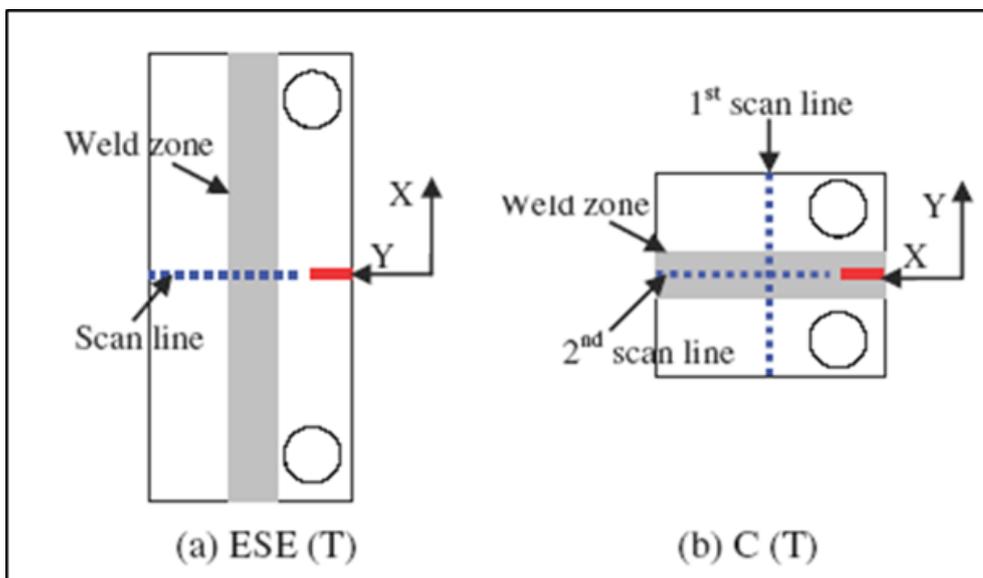
Introduction :

Il est reconnu que quel que soit le procédé de soudage, des contraintes résiduelles sont introduites dont la nature est de tension. Divers chercheurs ont investigués les effets des contraintes résiduelles sur l’amorçage et la propagation des fissures de fatigue.

II.1.L’effet de la taille des éprouvettes soudées de type CT et ESET par FSW :

Ma et al [12] ont étudié l’effet de la taille des éprouvettes soudées par FSW sur la distribution des contraintes résiduelles et la propagation des fissures de fatigue.

La propagation eut lieu le long du joint de soudure sur une éprouvette de type CT et ESET (figureII.8).Les effets des contraintes résiduelles parallèles et perpendiculaires à la ligne de la soudure ont été étudiés ou les champs de distribution sont donnés par la figureII.9.



FigureII.8 : Eprouvette soudées pour essais de fatigue [12]

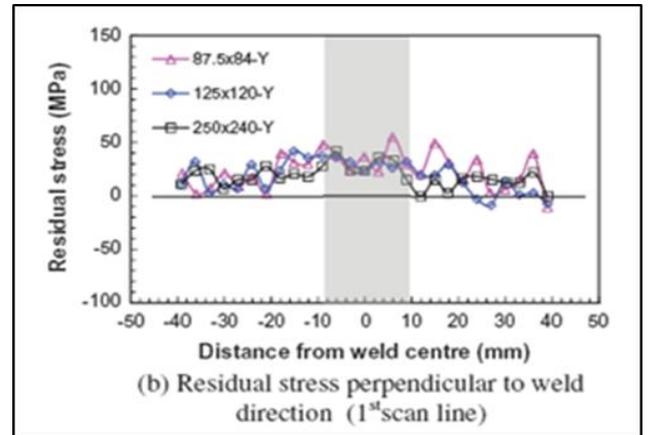
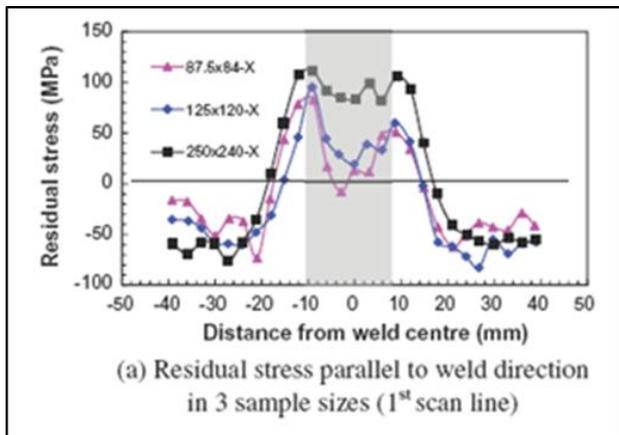
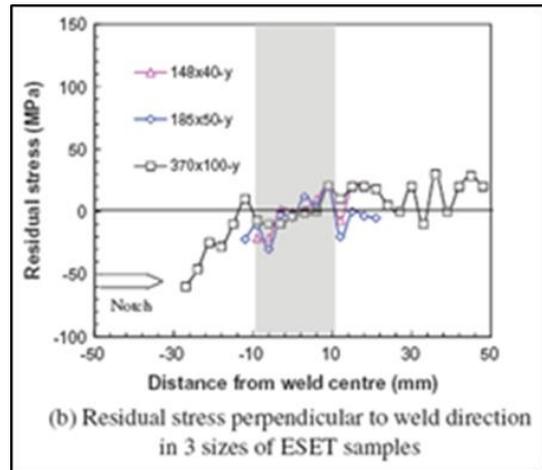
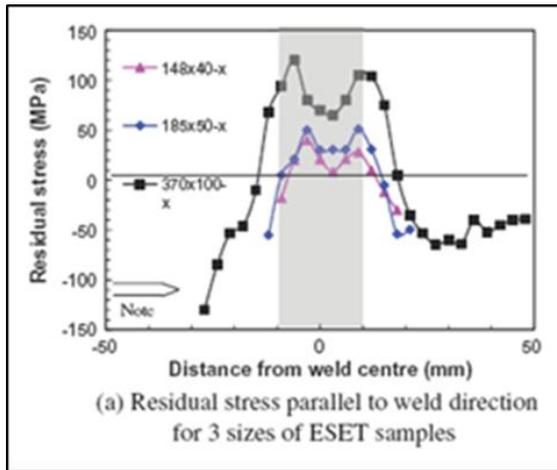


Figure II.9 : Champs des contraintes résiduelles dus au soudage par FSW [12]

Les courbes de fissurations montrent que la vitesse de fissuration est affectée par l'augmentation du rapport de charge et la taille des éprouvettes utilisées.

La figure II.10 montre que l'augmentation du rapport de charge fait augmenter la vitesse de fissuration et que la vitesse de fissuration est réduite dans le cas des éprouvettes fissurées par rapport aux éprouvettes non fissurées. Il est à noter que pour un rapport de charge dépassant 0.5 les contraintes résiduelles n'ont aucun effet sur la vitesse de fissuration et surtout pour ΔK inférieur 12 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Pour $R=0.1$, l'effet des contraintes résiduelles de compression est très significatif et bénéfique sur la vitesse de fissuration mais la longueur de fissuration est réduite.

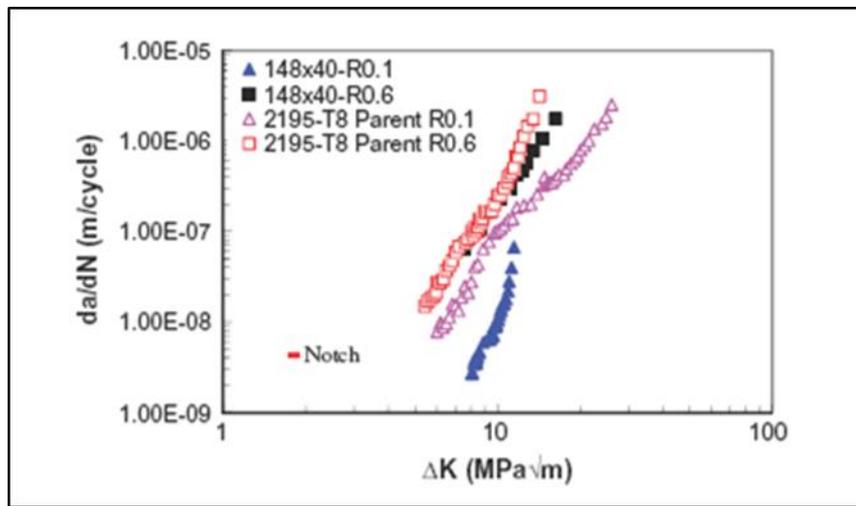


Figure II.10 : Vitesse de fissuration pour une éprouvette de type ESE(T) [12]

La figure II.11 montre les effets des niveaux des contraintes résiduelles induites par le procédé FSW par rapport au métal de base. On note une réduction des vitesses de fissuration pour les éprouvettes soudées par rapport au métal de base pour des facteurs d'intensité de contraintes inférieurs à $30 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Cette réduction est due à la présence des contraintes résiduelles de compression le long du chemin de propagation des fissures.

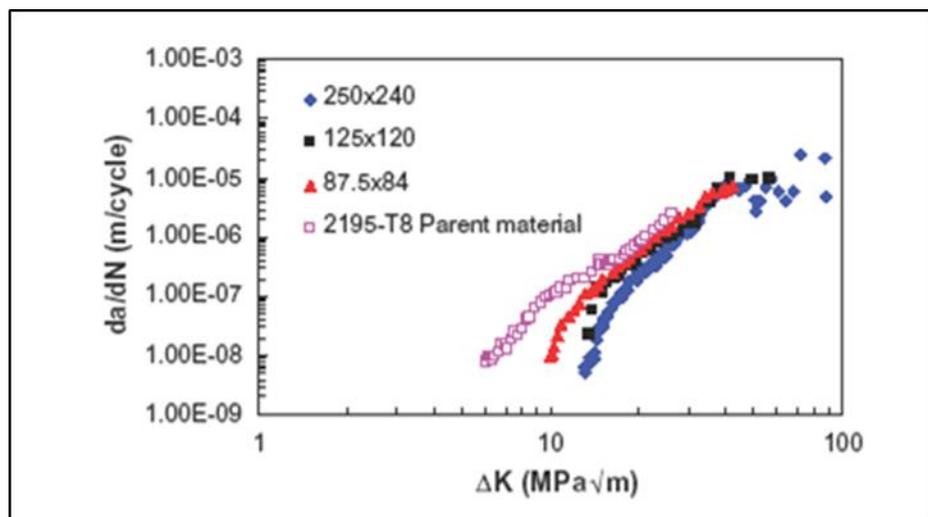


Figure II.11 : Vitesse de fissuration pour une éprouvette de type C(T) [12]

II.2. Etude des distributions de contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues au soudage dans plaque :

Kaplan et Maury [13] notent que le profil des contraintes générées varie selon l'orientation effectivement. Les contraintes longitudinales sont généralement plus élevées que les contraintes transversales et se distinguent par un maximum au niveau de la section centrale de la plaque soudée. Un exemple type de cette distribution est

illustré à la figure II.12 on note que le long de l'axe y, soit la direction de la soudure la contrainte longitudinale σ_l est toujours en tension mais diminue aux extrémités de la plaque. La contrainte transversale σ_t est quant à elle en tension sur presque toute la longueur de la plaque sauf aux extrémités où elle devient en compression. Le long de l'axe x on remarque le comportement inverse où c'est la contrainte transversale qui reste positive alors que la contrainte longitudinale passe de compression aux extrémités à tension dans le cordon de soudure.

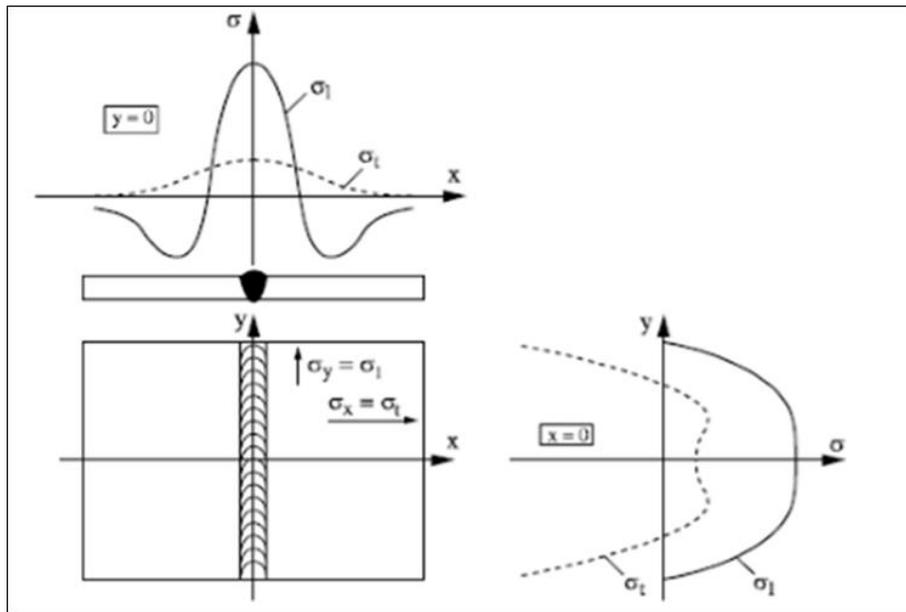


Figure II.12: contraintes résiduelle longitudinale et transversale dues soudage dans plaque [13]

II.3. Etude le profil de la contrainte résiduelle sur une plaque d'aluminium :

Une autre étude par James et al [12] sur une plaque d'aluminium soudée, les contraintes résiduelles n'ont pas le même profil dans toute l'épaisseur de la plaque. Les résultats obtenus et présentés à la **Figure II.13** montrent cette variation selon la profondeur de la plaque ($z=0$ correspond à la surface).

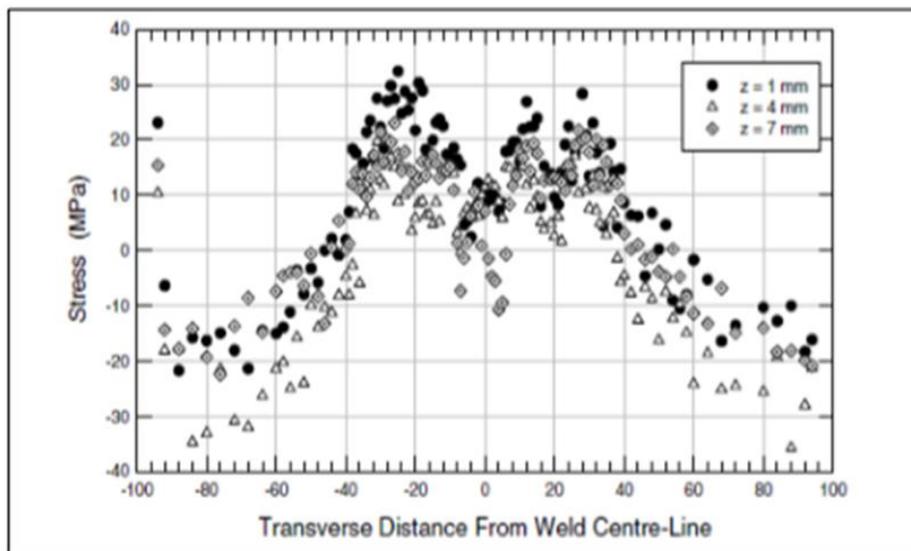


Figure II.13 : Contrainte longitudinale le long de la soudure selon la distance par rapport au cordon de soudage [13]

La figure II.13 expliqu e bien ce phénomène en comparant la contrainte transversale mesur e dans deux assemblages soud es, avec et sans bridage. L'ordre de grandeur des contraintes résiduelles de tension mesur es dans l'assemblage brid e est presque cinq fois plus grand que dans l'assemblage libre au moment du soudage. Notons que dans le cas de pièces soudées de grande dimension la masse de la pièce peut en elle-même avoir un effet de bridage [13].

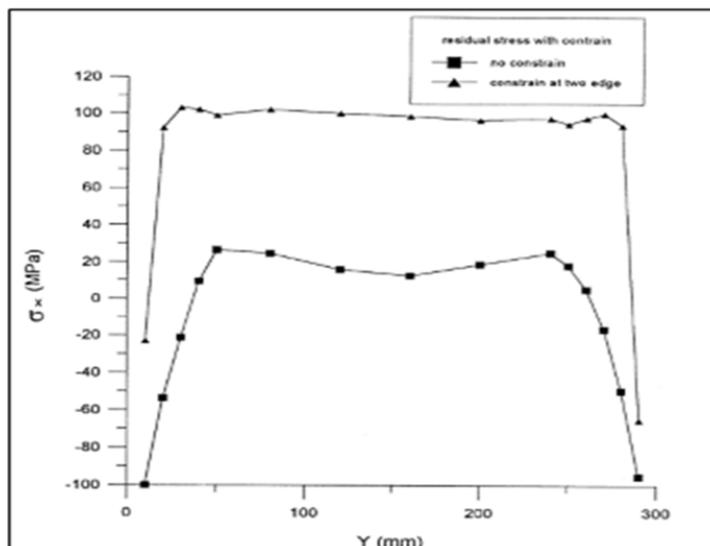


Figure II.14: Contrainte transversale σ_x selon la position longitudinale et le bridage en place [13]

Selon le matériel utilis e les modifications de la microstructure du métal peuvent générer des contraintes additionnelles. Prenons par exemple le cas d'une soudure d'acier martensitique tel que l'acier inoxydable 13% Cr - 4 %Ni. Lors du dépôt cet acier est à un état austénitique mais cette austénite se transforme presque compl etement en martensite lors du refroidissement [13].

La figure II.15 représente schématiquement la répartition des CR longitudinales de plasticité de dilatation (σ_y parallèle au cordon de sou- dure) en fonction d'un axe transversal quelconque situé en région ouvrante d'un assemblage mono passe. En l'absence d'un préchauffage, il y a lieu d'observer que la zone plastifiée (qui s'étend sur la ZF, a ZAT et le métal de base) est le siège d'une traction dont le niveau est au moins égal à la limite d'élasticité du métal (ou alliage) de base.

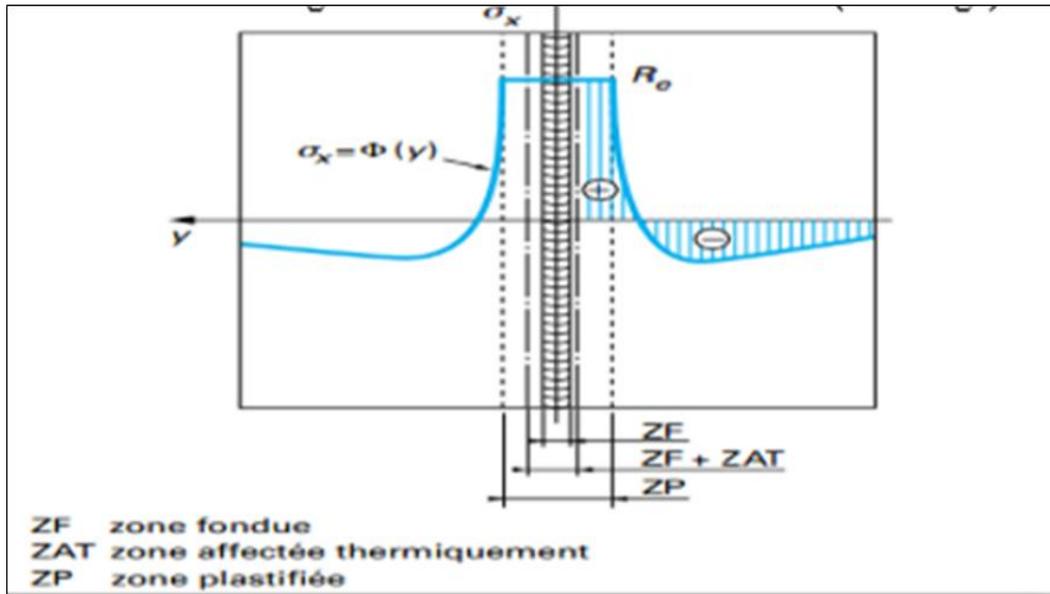


Figure II.15 : Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage mono passe [14]

Il convient également d'observer l'important gradient de contrainte séparant la zone plastifiée (ZP) tendue des zones comprimées qui la bordent et qui produisent, dans le cas de pièce minces un phénomène de voilement dont les ondes constituent à l'évidence un facteur aggravant sur le plan de résistance de l'ensemble au flambement sous effort de compression extérieur[14].

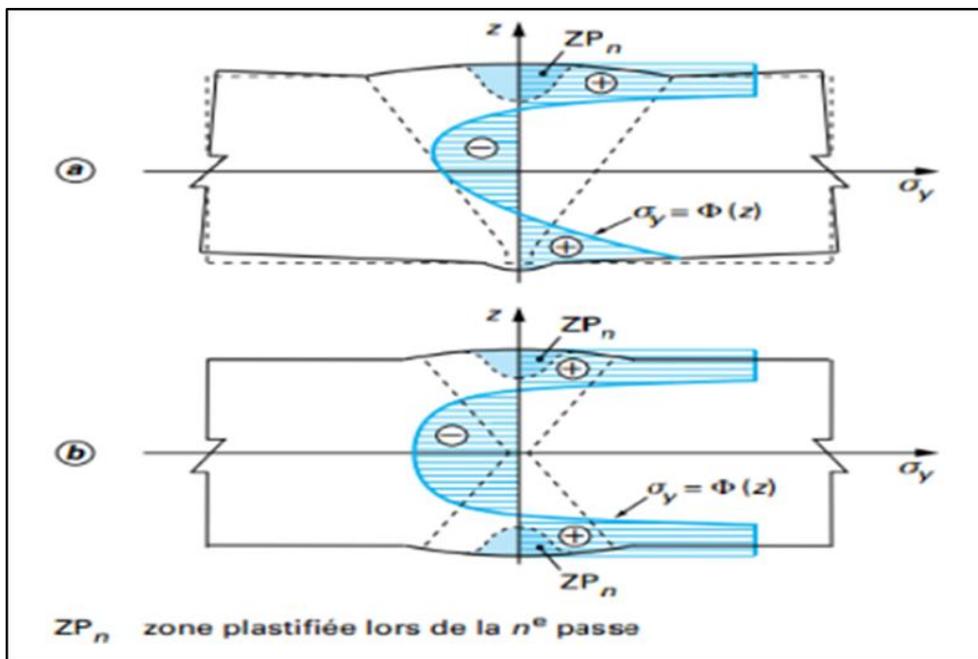


Figure II.16: Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation Cas d'un assemblage multi passe [14]

La figure II.16 représente la répartition des CR transversales de plasticité de dilatation (σ_y perpendiculaire au cordon de soudure) en fonction de l'épaisseur et en région courante d'un assemblage multi passe. Quelle que soit la préparation retenue en vue de l'exécution (chanfrein à simple ou à double ouverture), il est remarquable qu'un MOS multi passe conduise à la création de CR de traction sur chacune des peaux des pièces soudées.

Le niveau de contrainte obtenu dépend logiquement de l'auto bridage dû à l'épaisseur, lequel inclut la répartition spatiale des températures, générée par chacune des passes, qui demeure l'élément déterminant dans la création des zones plastifiées élémentaires. Il est important de noter qu'à l'inverse d'une préparation à simple ouverture (chanfrein V) qui est génératrice d'une traction dans la région de défauts potentiels qu'est la racine, la préparation à double ouverture (chanfrein X) tend à comprimer cet endroit, minimisant de la sorte la nocivité de ces mêmes défauts qui se situent par ailleurs au voisinage de la fibre neutre des éléments[14].

II.4.L'effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue d'une éprouvette CT :

Farrahi et al [15] ont étudié l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue d'une éprouvette CT figure II.17 par deux méthodes à savoir le grenailage et déformation plastique localisée [16], [17], [18]. Les contraintes induites sont des contraintes de compression. L'effet des contraintes résiduelles introduit par deux techniques la durée de vie et la vitesse de propagation est montrée sur la figure II.18. L'effet de fermeture de la fissure est plus dominant par la technique des déformations plastique localisé.

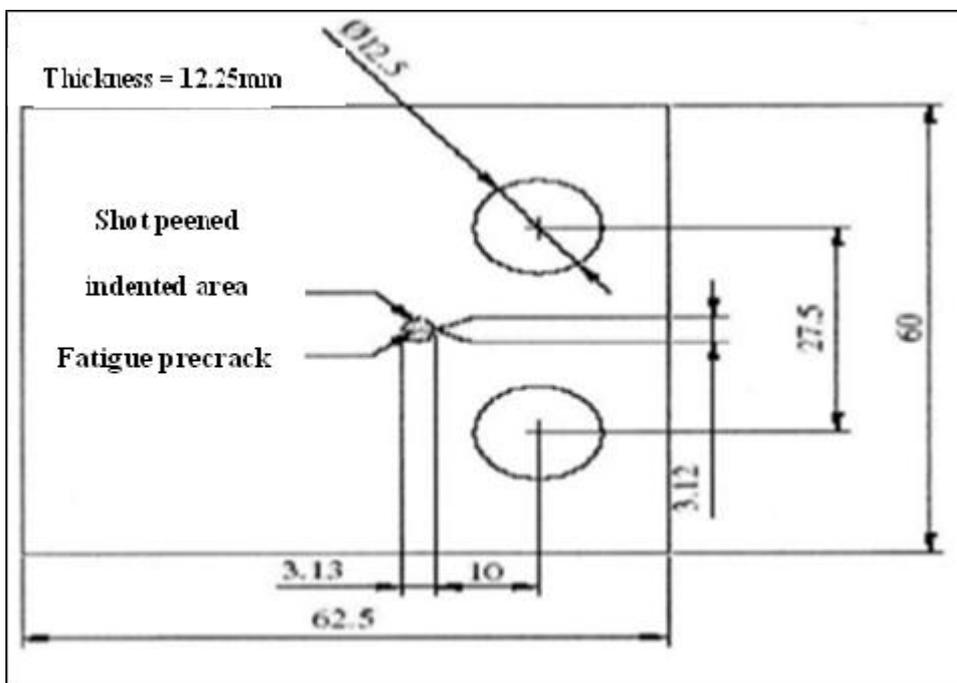


Figure II.17: Eprouvette CT pour essai de fatigue [19]

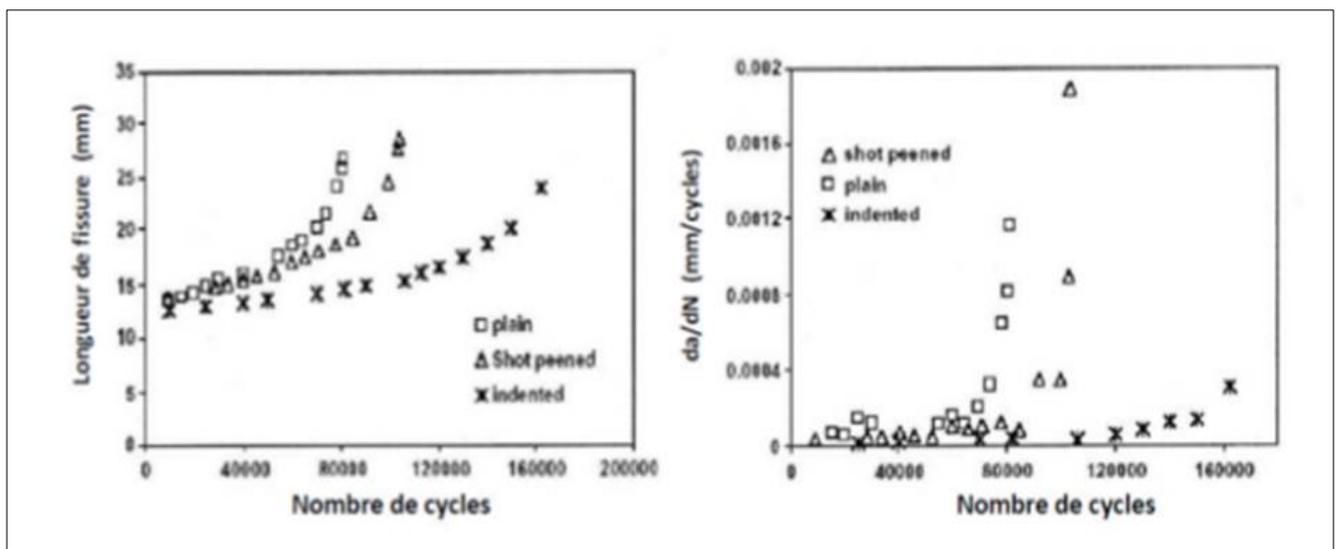


Figure II. 18: Effet des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue [19]

II.5. Etude de propagation des fissures des joints en aluminium soudés au plasma 2219- T851 sur des échantillons de types CT et CCT :

R. Galatolo et A. Lanciotti [20] présente quelques résultats récents d'un programme de recherche sur l'évaluation de la fracture propriétés mécaniques, principalement le taux de propagation des fissures des joints en aluminium soudés au plasma 2219- T851. Des essais de propagation de fissure ont été effectués sur des échantillons de tension de fissuration centrale (CCT) sur de petits échantillons de tension compacte (CT).

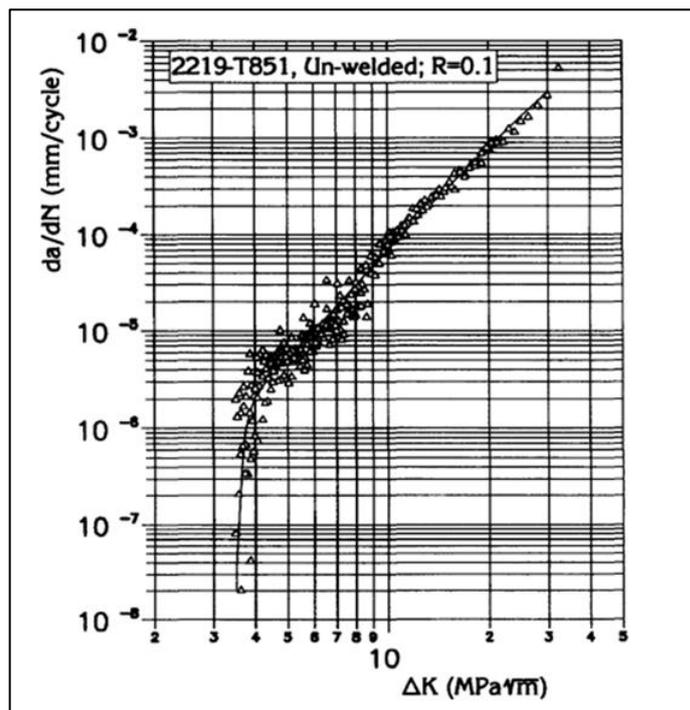


Figure II.19:taux de propagation de fissures dans les échantillons CT non soudée [20]

- la Figure II.19 montre la courbe de meilleur ajustement des résultats, aussi; cette courbe sera utilisée comme courbe de référence pour la comparaison des résultats concernant les éprouvettes soudées.

-La Figure II.20 montre les résultats du CT et du CCT échantillons dans le cas d'une fissure se propageant le long le cordon de soudure, il peut donc être a conclu que les deux types de tests étaient entièrement comparables. La principale différence entre les deux spécimens était dans les contraintes résiduelles, mais dans le cas d'une fissure qui se propage le long de cordon de soudure, contraintes résiduelles agissant dans la direction perpendiculaire à la fissure sont très faibles, de sorte que les résultats entre les deux échantillons doit être entièrement comparable.

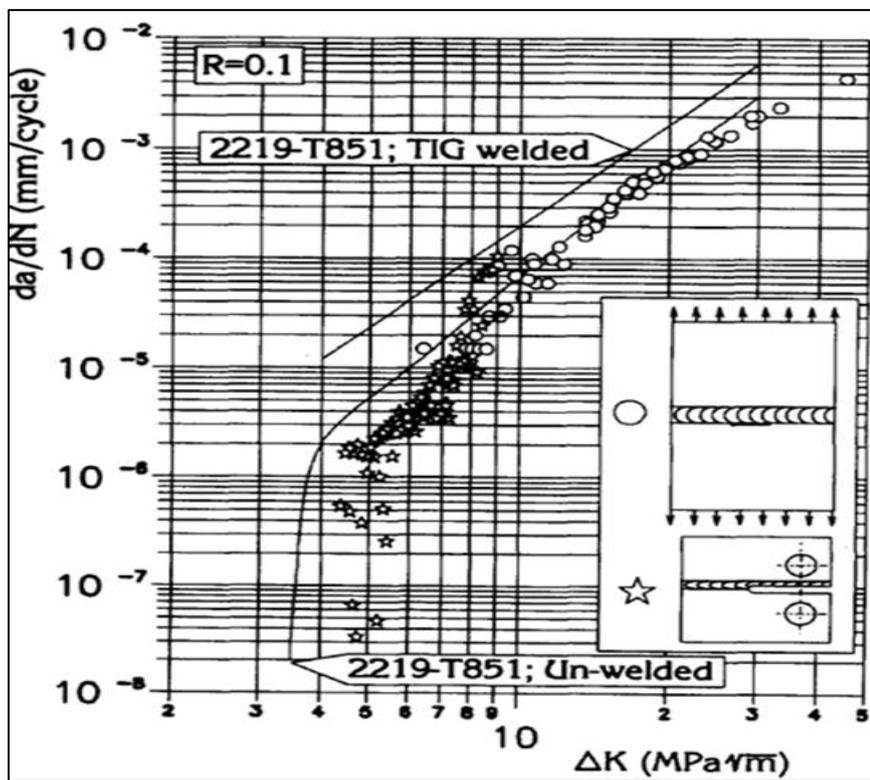


Figure II.20: comparaison entre les résultats pertinents pour les échantillons CT et CCT pour fissure se propage le long du cordon de soudure [20]

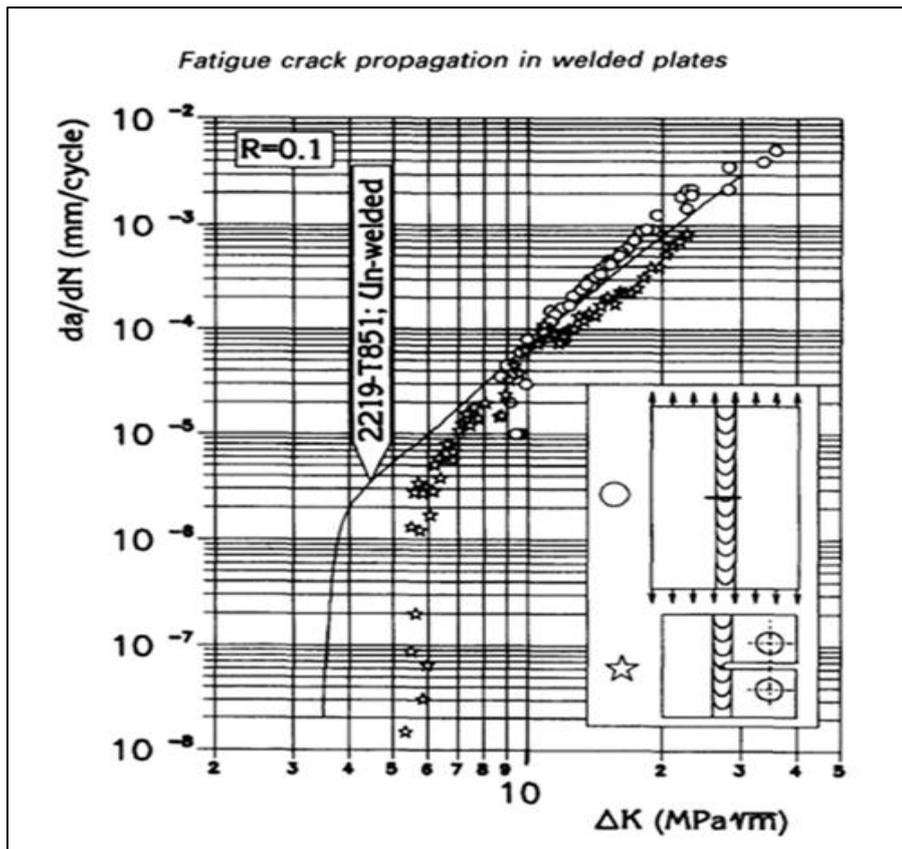


Figure II.21 : comparaison entre es résultats pertinents pour les échantillons CT et CCT pour la fissure sur se propageant e long du cordon de soudure [20]

La figure II.21 représente l'explication de ce résultat se trouve dans les contraintes résiduelles existant dans les plaques, comme indiqué ci-dessous, en ce qui concerne les résultats pertinents pour l'éprouvette CT. Les contraintes résiduelles ont été mesurées par instrumentation des plaques avec des jauges de coloration, puis par les sectionner par fraisage, pour produire la relaxation des contraintes résiduelles. La coupe a commencé à partir d'une coupe centrale, transversalement au cordon de soudure, qui était progressivement étendu de manière à simuler la croissance d'une fissure sur le cordon de soudure. De cette façon, il était possible d'évaluer les contraintes résiduelles agissant en une plaque soudée non fissurée, avec les résiduelles contraintes agissant dans une plaque soudée fissurée en fonction de la longueur de la fissure

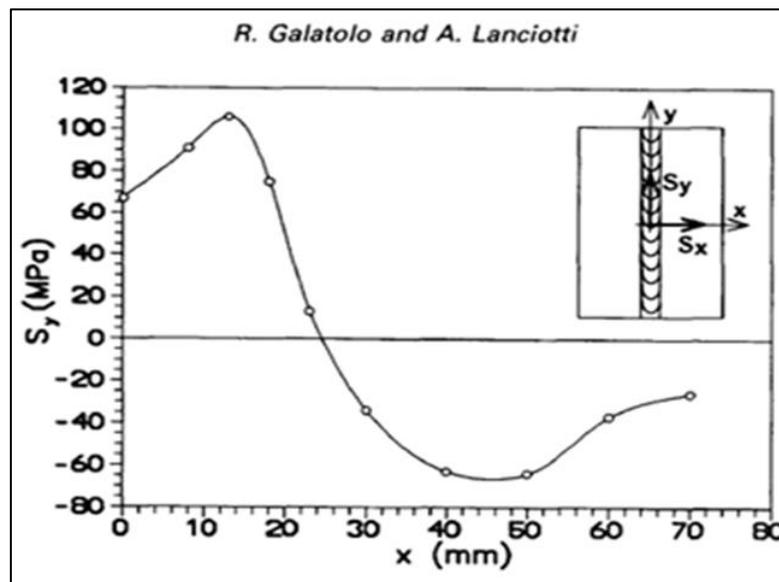


Figure II.22 : contrainte résiduelles longitudinale mesuré dans une plaque soudée [20]

- La figure II.22 montrée la distribution des contraintes longitudinales résiduelles σ_x dans une plaque non fissurée dans les mêmes tests la transversale la contrainte résiduelle $\sigma_x = 20\text{MPa}$. la distribution est présente dans la zone affectée par la chaleur, typique des alliages d'aluminium La contrainte maximale environ 100 MPa était assez élevé par rapport à la limite élastique du cordon de soudure.

Quant aux résultats obtenus tests de propagation des fissures sur des échantillons CCT ont été effectuées à deux différents rapports de contraintes, $R = 0,1$ et $R = 0,5$. En raison de la présence des contraintes résiduelles, ces valeurs sont des valeurs nominales, R_{nom} les valeurs réelles étaient plus élevées et variées tests dus à la relaxation des contraintes résiduelles.

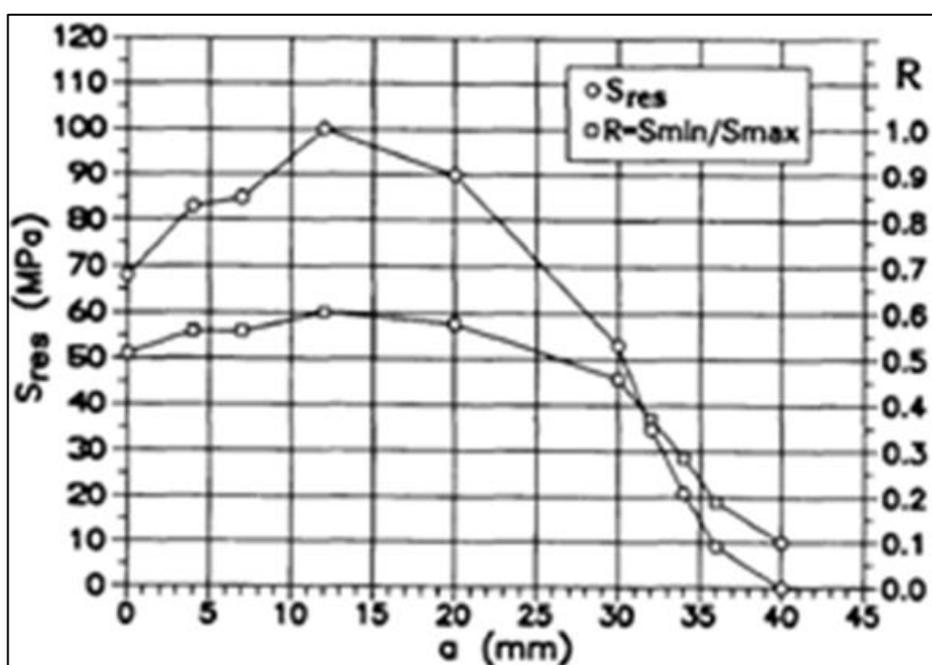


Figure II.23: Contrainte résiduelle au fond de la fissure et taux de contrainte réel en fonction de la longueur de la fissure [20]

La figure II.23 montre la contrainte résiduelle agissant à le fond de fissure est tracé en fonction de la longueur de la fissure avec la valeur réelle du paramètre R un test où $R_{nom} = 0.1$. En raison de la distribution de contraintes résiduelles, la contrainte résiduelle au fond de la fissure et la valeur R augmente initialement avec la longueur de la fissure jusqu'à une longueur de fissure de 20 mm ils diminuent ensuite et les contraintes résiduelles disparaissent lorsque la longueur de la fissure est 40 mm tandis que la valeur réelle du paramètre R atteint la valeur nominale ($R = 0,1$). Pour simplifier analyse dans la plage de fissures jusqu'à $2c = 50$ mm une valeur constante du paramètre R peut être supposée.

II.6. L'influence du rapport de charge sur la propagation de la fissure de fatigue dans un alliage d'aluminium 2024 T3 :

Lam et Lian [21] ont utilisé la méthode de déformation plastique localisée pour générer les contraintes résiduelles dans un alliage d'aluminium 2024 T3. Ils ont montré aussi l'influence du rapport de charge sur la propagation de la fissure de fatigue. L'évolution de R_{eff} a permis d'étudier l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de la fissure.

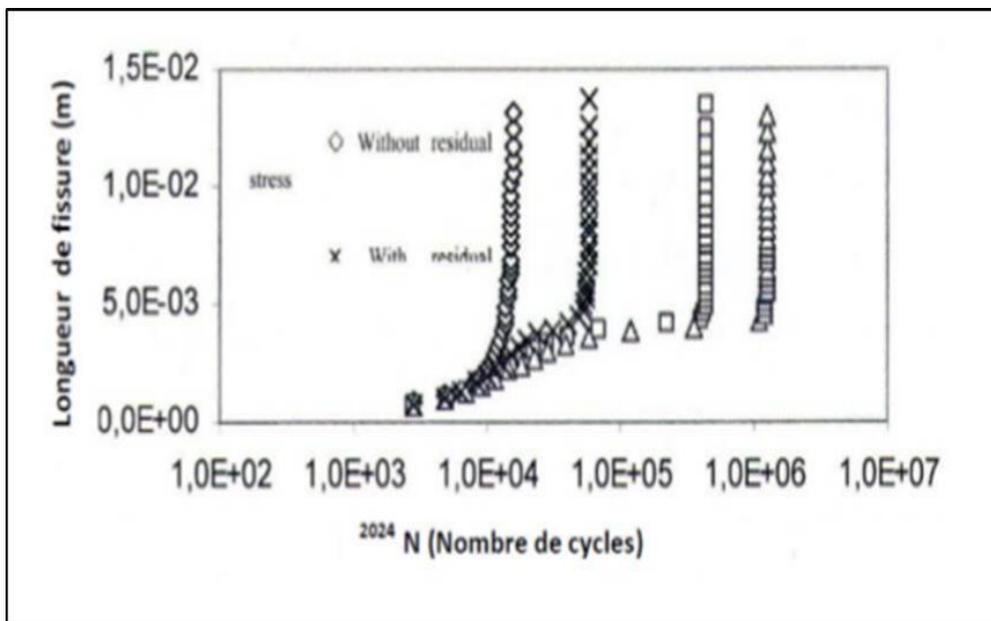


Figure II.24 : Effet des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue [22]

L'effet des contraintes résiduelles a été transformé en effet du rapport de charge où la durée de vie est faite par le champ de contraintes résiduelles imposée illustré à la figure II.15.

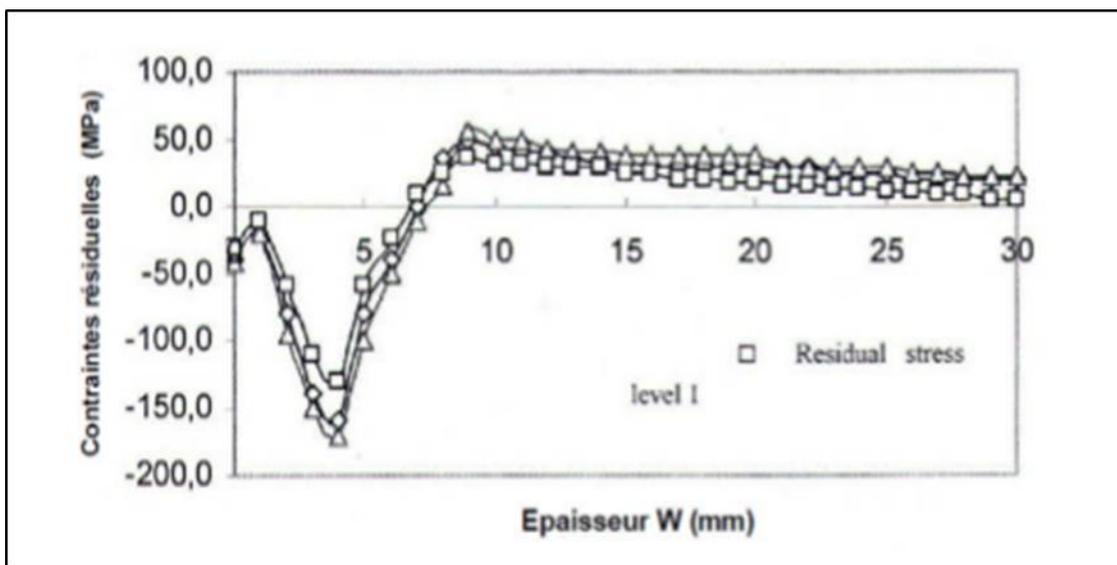


Figure II.25 : Champ de contraintes résiduelles imposées le long de la propagation de la fissure [23]

II.7. L'effet des contraintes résiduelles sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été étudié sur des éprouvettes MT et CT en alliage d'aluminium 2024 T351 :

L'effet des contraintes résiduelles par soudage sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été étudié sur des éprouvettes MT et CT en alliage d'aluminium 2024 T351 [24]. Ont montré que le champ de contrainte résiduelle de compression mesuré dans le sillage de la fissure de l'éprouvette M (T) était indépendant de l'application charge et ne peut donc pas être due à la fermeture physique ainsi que la fissure permis une croissance de la vitesse de propagation (Figure II.26).

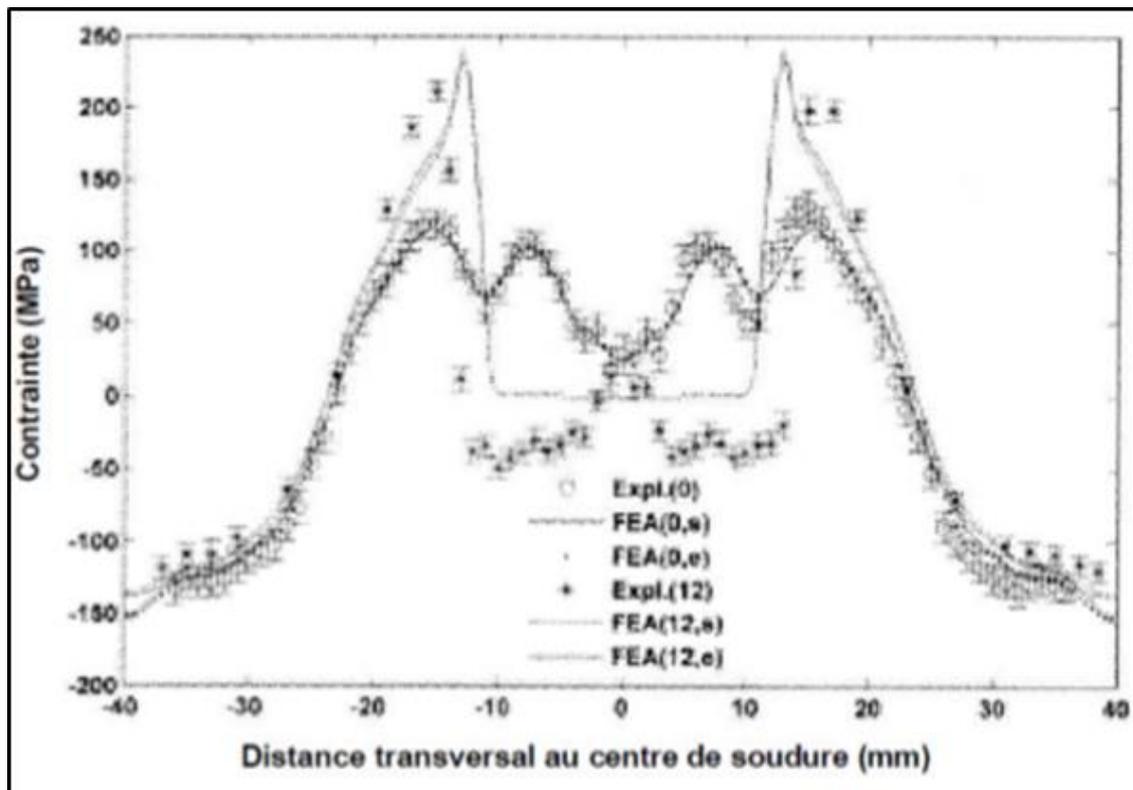


Figure II.26: Distribution des contraintes résiduelles dans une éprouvette MT [24]

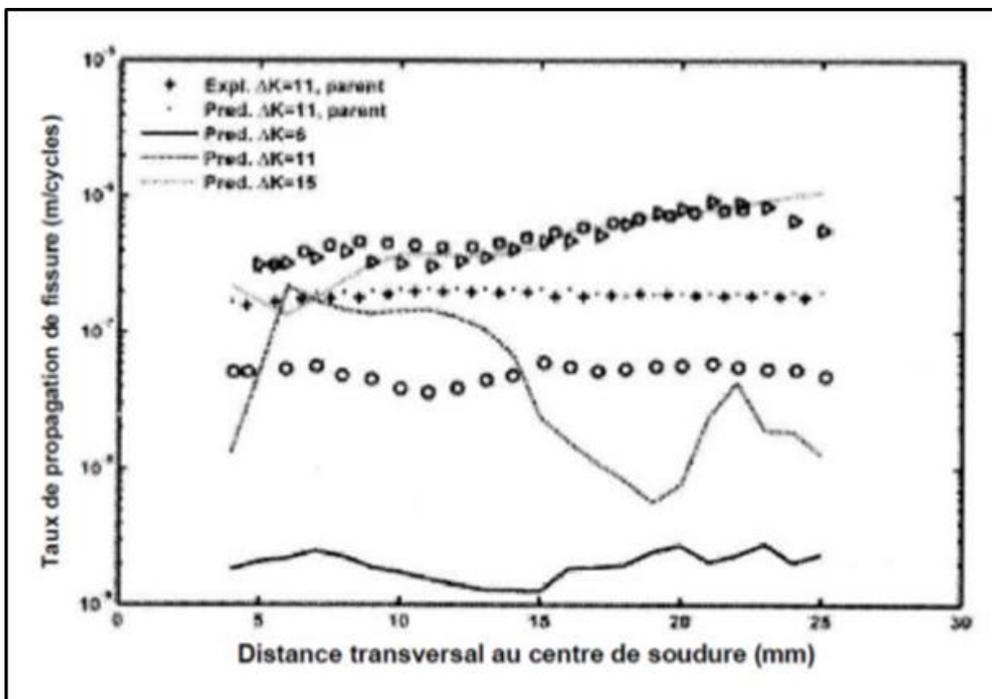


Figure II.27 : Evolution de la vitesse de propagation dans une éprouvette MT [24]

La distribution des contraintes résiduelles développées dans l'éprouvette C (T) sont varié et on remarque une décroissance de la vitesse de propagation.

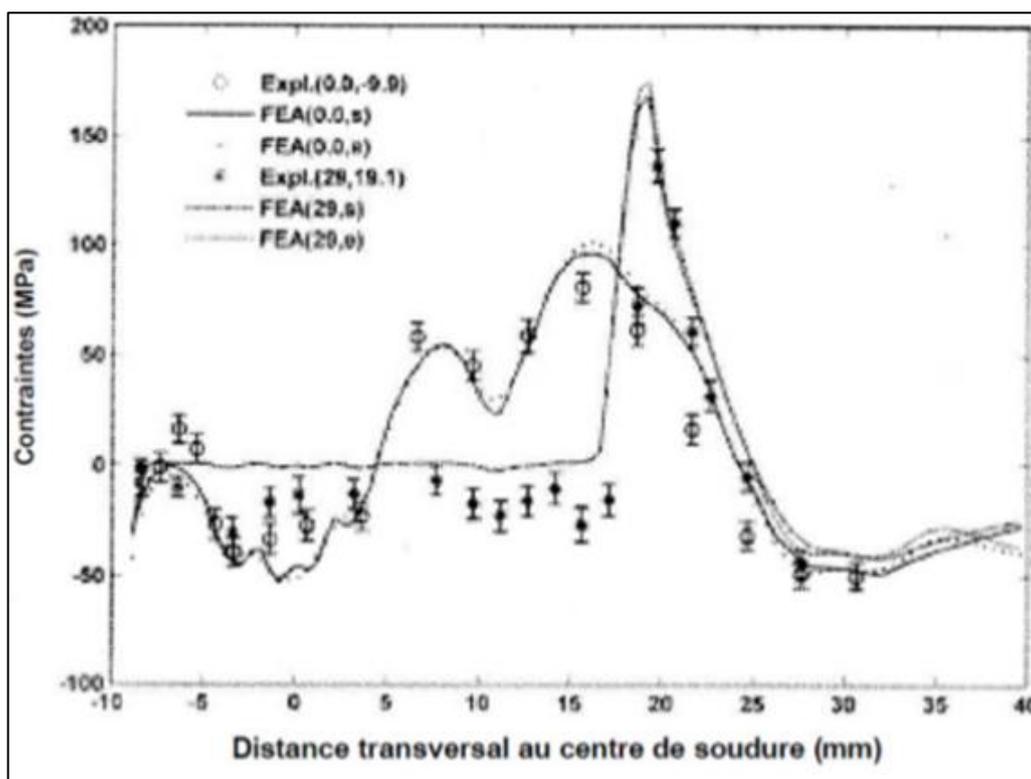


Figure II.28 : Distribution des contraintes résiduelles dans une éprouvette CT [24]

L'effet de la contrainte résiduelle de soudure est soulagement des contraintes indirectement, la microstructure sur la croissance des fissures de fatigue était étudiée pour les soudures par friction-agitation en alliage d'aluminium 2024-T351 [25].

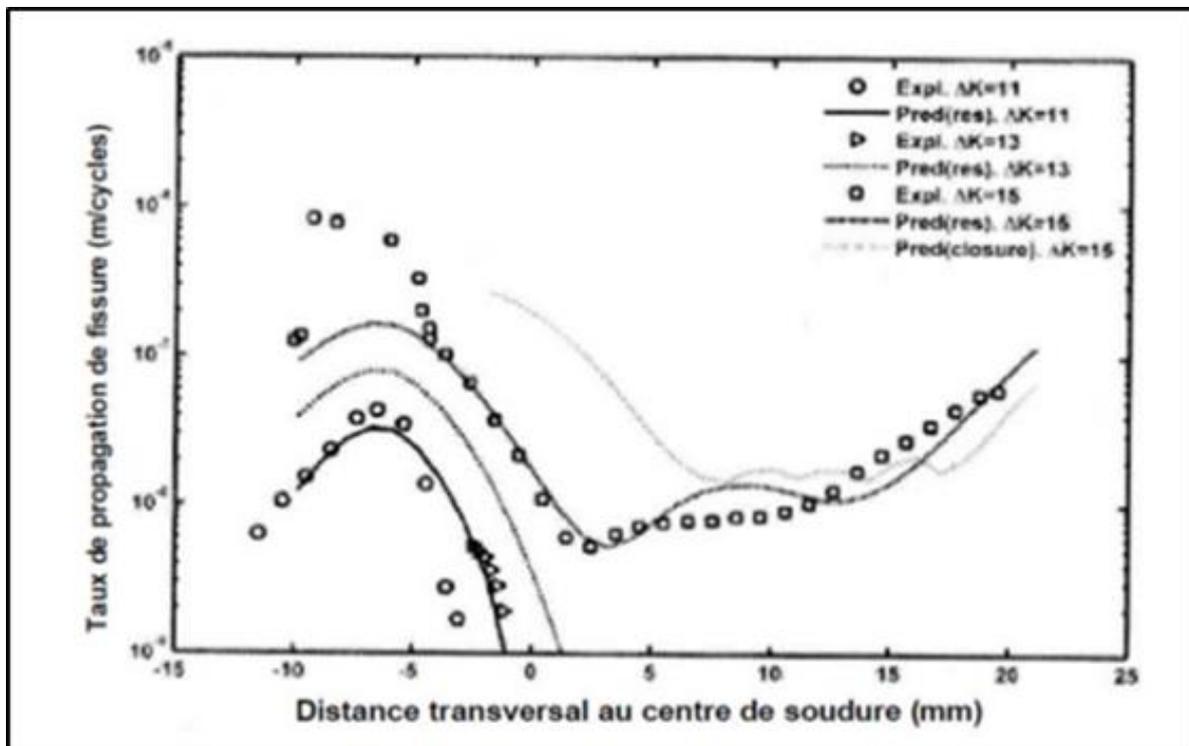


Figure II.29: Evolution de la vitesse de propagation dans une éprouvette CT [25]

II.8. Comparaison entre contrainte résiduelle longitudinale et facteur d'intensité de contrainte résiduelle pour les joints soudés par FSW :

Les figures II.30(a) et (b) montrent les profils $KI_{rés}$ est le résidu longitudinal de répartition des contraintes pour les joints FSW et relevés respectivement. Les Contraintes résiduelles de soudure sont en traction dans la soudure avec les régions externes soumises à une compression contrainte résiduelle ce champ de contrainte résiduelle n'a pas déformé la plaque soudée hors plan. Bien que la contrainte résiduelle maximale se produise dans la zone latérale en progression la distribution est assez symétrique. Par conséquent on pense que le côté à partir duquel la fissure se propage n'affecte pas grandement les résultats une réduction significative dans la contrainte résiduelle jusqu'à 90%.

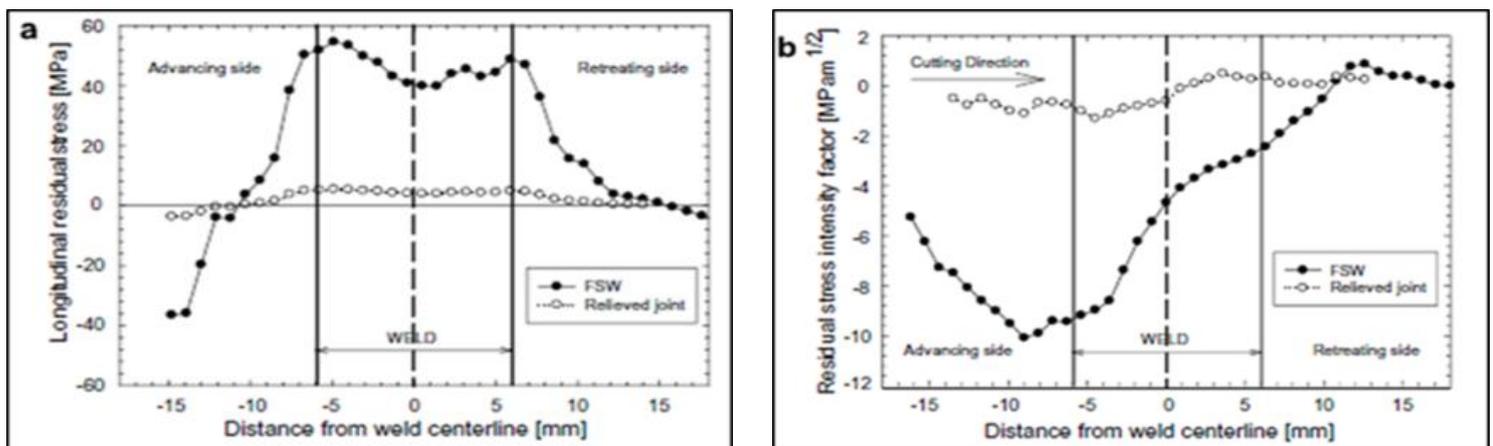


Figure II.30:(a) Contrainte résiduelle longitudinale et (b) Facteur d'intensité de contrainte résiduelle $KI_{rés}$ obtenu avec la méthode de conformité de coupe pour FSW et les joints relevés [26]

-La figure II.31 montre les courbes de taux de croissance des fissures pour les encoches placées à différentes positions par rapport à la ligne médiane de soudage. Une fois que la fissure de fatigue entre dans la zone de soudure les contraintes résiduelles de soudure, la dureté et la microstructure ont influencé la croissance des fissures de fatigue. La répartition des contraintes résiduelles à l'intérieur de la soudure devrait conduire à des taux de croissance élevés car les contraintes résiduelles devenir traction et le $KI_{rés}$ correspondant augmente.

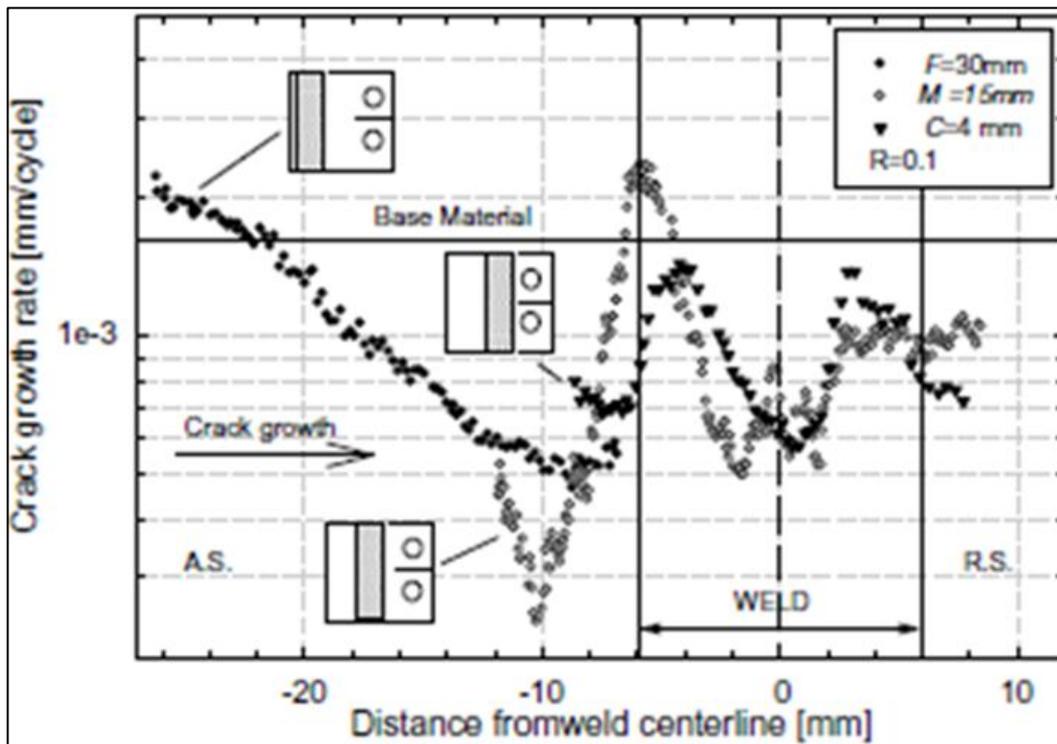


Figure II.31 : Taux de croissance des fissures en fonction de la distance de l'axe de la soudure pour éprouvettes testées aux $\Delta K_{app} = 21\text{mpa}\sqrt{\text{m}}$ fissures se développent loin, au milieu et près de ligne médiane de soudage [26]

La figure II.32 montre que la région la plus douce de HAZ correspond à valeurs de taux de croissance des fissures: supérieure à celles du matériau de base dans une manière différente, la propagation à travers le grain fin et la plus dure pépite a montré une diminution du taux de croissance des fissures jusqu'à des valeurs plutôt inférieur à ceux observés dans HAZ à l'intérieur de la soudure par conséquent les contraintes résiduelles ont démontré un faible impact sur la fissure comportement de croissance qui semble être dominé par la microstructure et la dureté change.

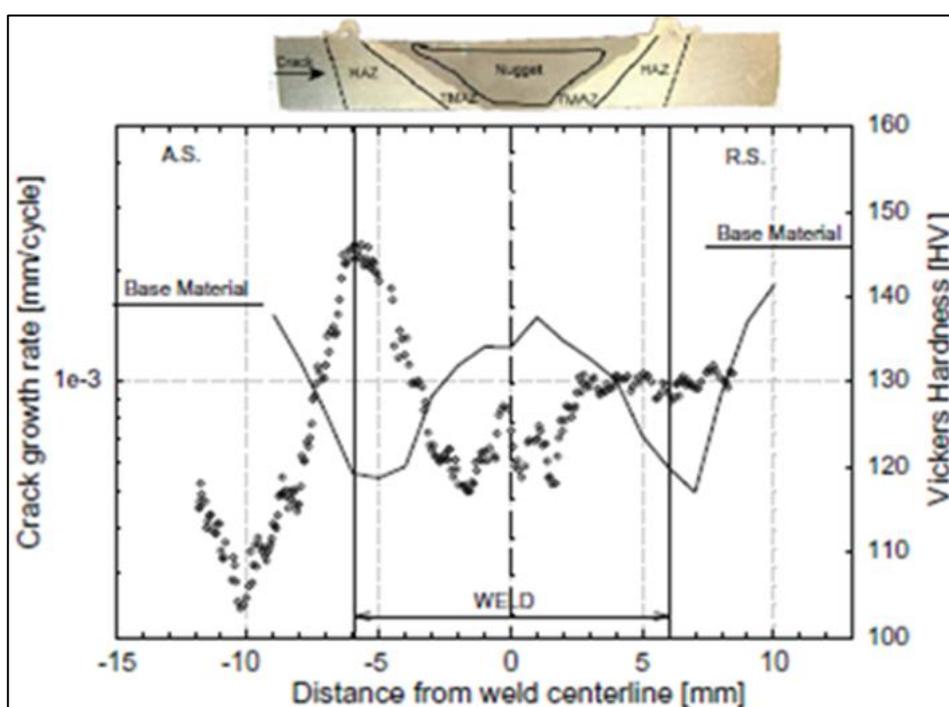


Figure II.32 : Taux de croissance des fissures et valeurs moyennes de dureté du joint FSW: faible fissure le taux de croissance se produit dans la zone de pépite plus difficile [26]

La figure II.33 donné la comparaison de la fissure courbe de taux de croissance pour les échantillons FSW et CT soulagés. Ça peut être vu que dans ce dernier cas la croissance précoce des fissures à l'extérieur de la soudure et n'est plus influencé par les contraintes résiduelles de sorte que la croissance des fissures les taux atteignent les valeurs attendues pour le matériau de base. Puisqu'aucune différence dans la dureté et la microstructure des plaques n'a été observée après 2% de déformation. On peut conclure que le changement dans la distribution des contraintes résiduelles après étirement est responsable des différences de fissure comportement de croissance.

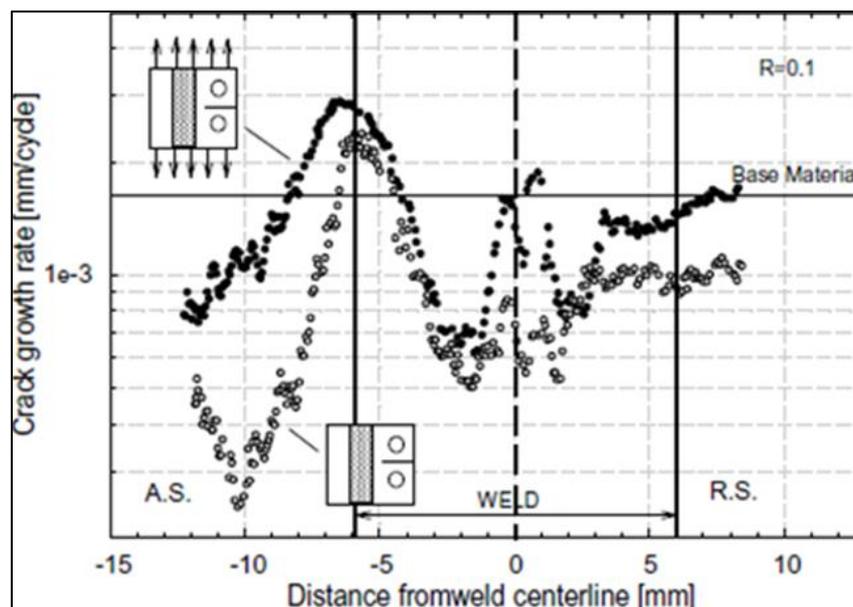


Figure II.33: taux de croissance des fissures du cas M par rapport à ceux des cas soulagés mécaniquement joints FSW; éprouvettes testées pour $\Delta K_{app} = 21 \text{ mpa}\sqrt{\text{m}}$ [26]

II.9. Etude de Champ des contraintes résiduelles dans des échantillons entaillés C (T) et ESE (T) de Les soudures par friction-malaxage en aluminium 2195-T8 :

Une autre étude de Champ des contraintes résiduelles dans des échantillons entaillés C(T) et ESE (T) de Les soudures par friction-malaxage en aluminium 2195-T8 ont une répartition des contraintes de traction à double pic jusqu'à 120 MPA parallèle à la direction de la soudure avec une contrainte réduite sur la soudure ligne médiane. Les contraintes résiduelles perpendiculaires à la soudure sont généralement plus petites que celles parallèles à la soudure [27].

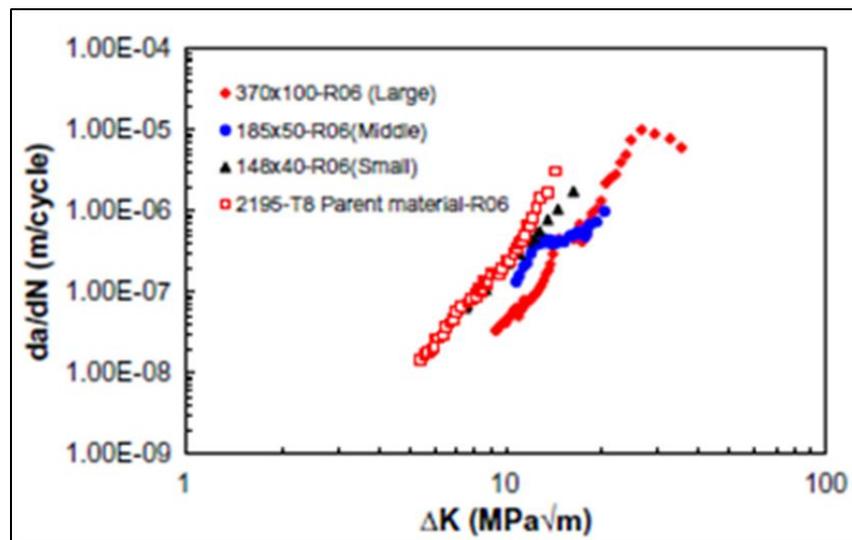


Figure II.34 : Taux de croissance des fissures da/dN en fonction de la plage d'intensité de contrainte ΔK pour trois différents tailles des échantillons ESE (T) à $R = 0,6$ et le plan de fissure perpendiculaire à la ligne de soudure [27]

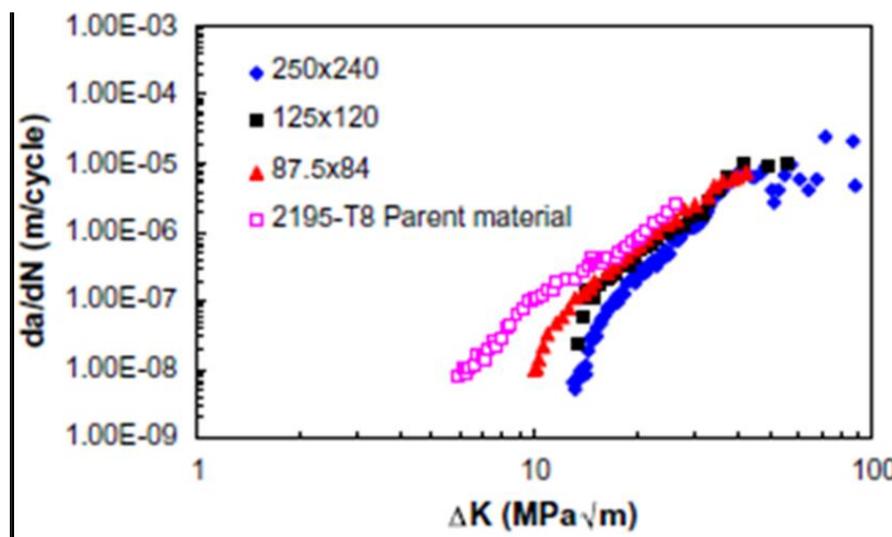


Figure II.35 : Taux de croissance des fissures da/dN et ΔK dans trois tailles d'échantillon différentes C (T) les échantillons fissurent le plan parallèlement à la ligne de soudure [27]

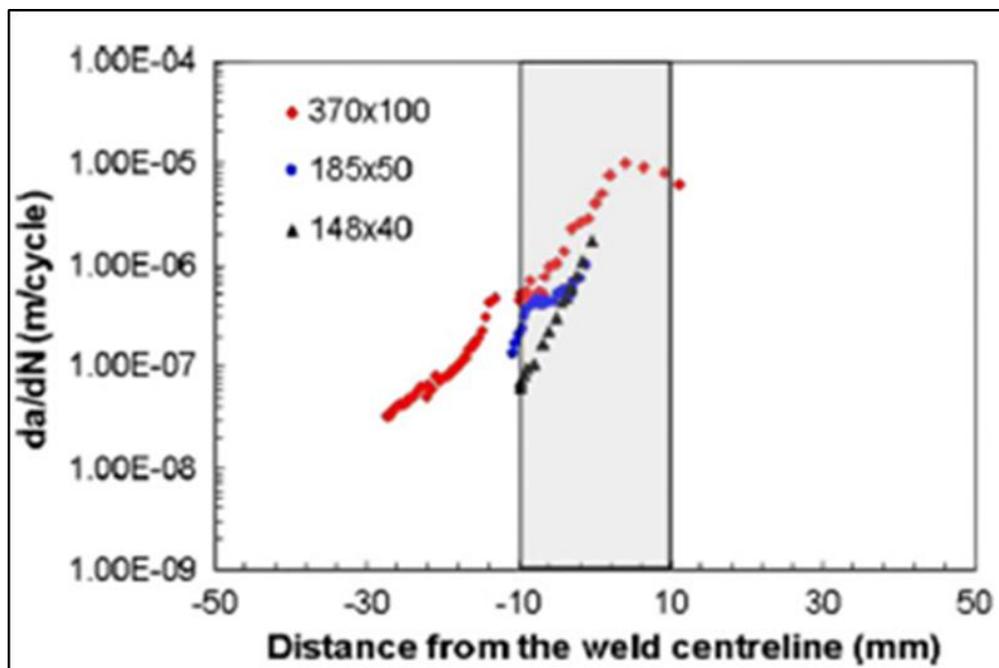


Figure II.36 : Taux de croissance des fissures en fonction de la longueur des fissures à partir de la ligne de soudure pour les trois tailles de échantillons ESE (T) testés à $R = 0,6$. le plan de fissure perpendiculaire à la ligne de soudure, ombre zone montre la position et l'étendue de la pépité de soudure [27]

II.10. Influence de rapport d'avance dans en alliage d'aluminium 7075–T6 sur la distribution des contraintes résiduelles dans un joint soudée par friction malaxage :

Les procédés de soudage sont générés des contraintes résiduelles. Elles sont causées principalement par le cycle thermique de soudage, par exemple les contraintes résiduelles dans un joint SFM restent de loin inférieures au niveau de contraintes laissées par les opérations de soudage par fusion [28].

Le niveau des contraintes résiduelles est influencé par les paramètres du soudage. Lombard, Hattingh et al [29] démontrent que le changement du rapport d'avance change la forme de la distribution et la valeur maximale des contraintes résiduelles dans les directions longitudinale et transversale dans un joint soudée par friction malaxage (figure II.36).

Dans la direction longitudinale (parallèle à la direction de soudage) les contraintes résiduelles sont en tension. Elles prennent alors la forme d'un "M" (figure II.37) dans lequel les contraintes maximales en tension se trouvent aux extrémités de l'épaulement de l'outil de chaque côté du joint [30],[31]. La largeur du "M" diminue avec la profondeur dans le joint [32] Les contraintes résiduelles sont plus basses au milieu du joint. Ceci est associé à la mise en solution des précipités qui cause la baisse des propriétés mécaniques du matériau dans le noyau du joint [33].

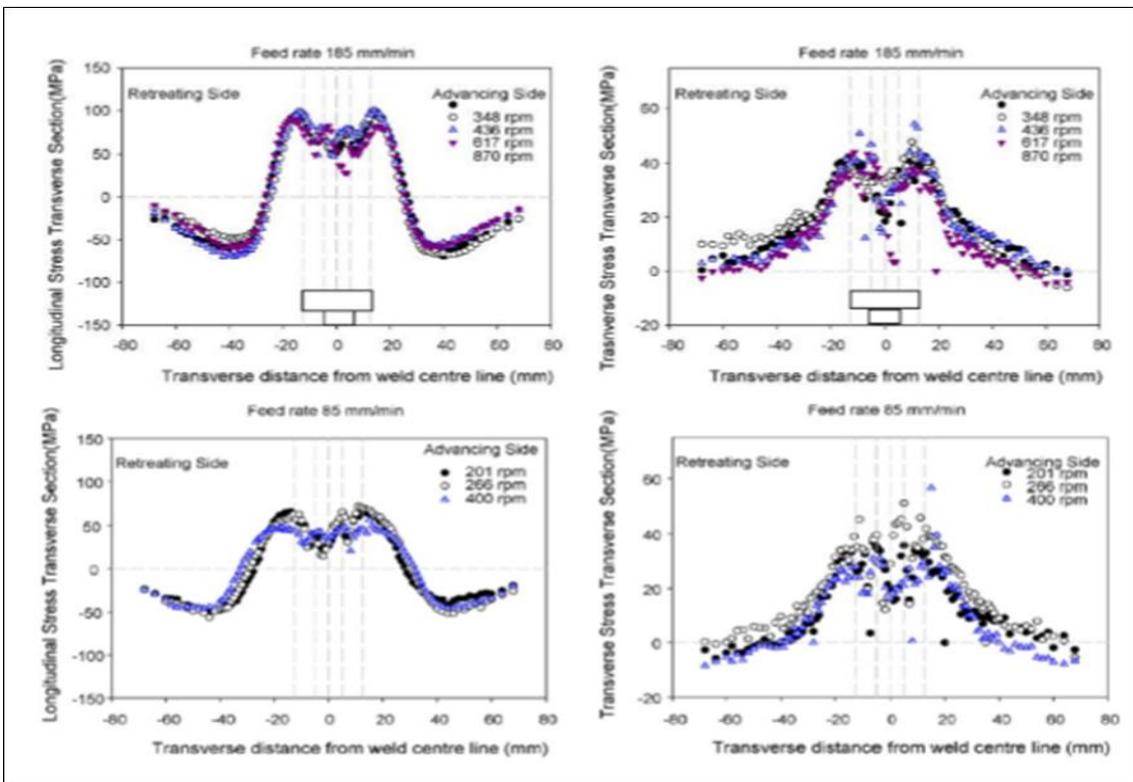


Figure II.37 : Effets des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles AA5083-H321 de 6 mm d'épaisseur [33]

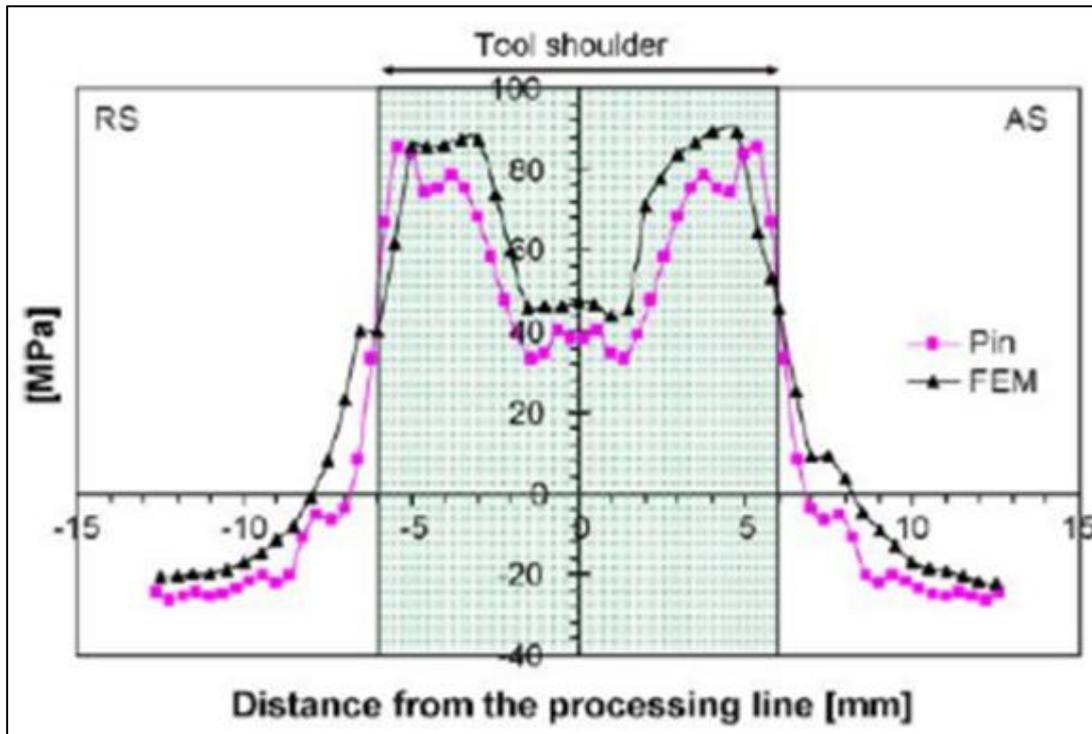


Figure II.38: Contraintes résiduelles dans la direction longitudinale dans un joint SFM en alliage d'aluminium 7075-T6 de 3 mm d'épaisseur) [33]

II.11. Etude propagation de fissures longitudinales dans le noyau et dans la ZAT des joints SFM en alliage d'aluminium 7050-T7451 :

La figure II.39(a) présente l'étude de Jata, Sankaran et al [33] sur la propagation de fissures longitudinales proches du seuil de propagation dans le noyau et dans la ZAT des joints SFM en alliage d'aluminium 7050-T7451.

Les résultats présentés à la figure II.39 b montrent que pour $R=0,33$ les seuils de propagation dans le métal de base à ZAT et le noyau sont de 1,83 ; 3,24 et 1,04 respectivement. On remarque que La même figure montre que pour un $R=0.7$ le seuil est pratiquement le même pour les trois positions.

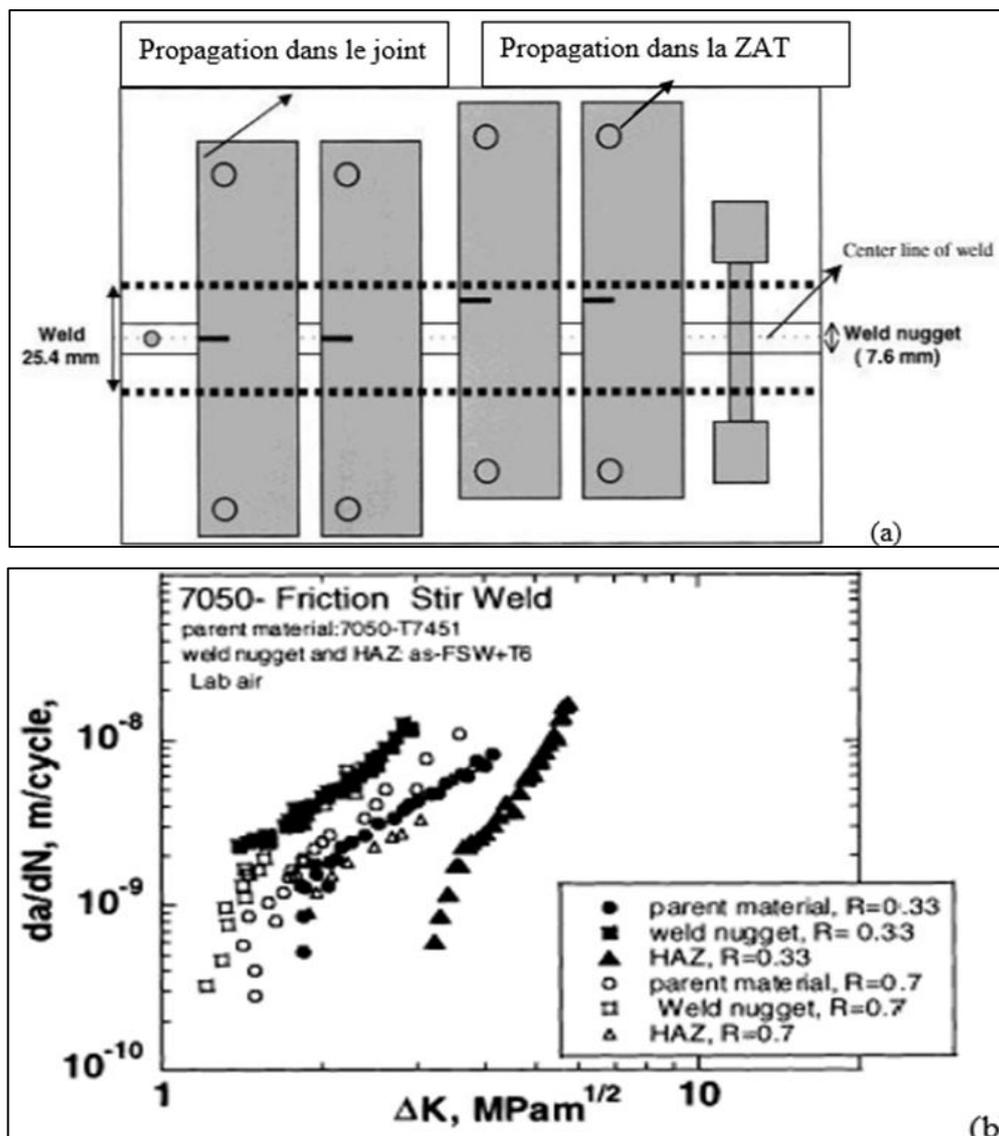


Figure II.39: Configuration des échantillons (a) et résultats des essais de propagation de fissure proche du seuil de propagation (b) d'un joint SFM en AA7050-T7451 de 6,35 mm d'épaisseur [33]

Conclusion

Dans une revue de littérature concernant l'influence des contraintes résiduelle due à l'opération de soudage sur la vie en fatigue endurance et propagation, les chercheurs sont montre que :

- La vitesse de fissuration est affectée par l'augmentation du rapport de charge et la taille des éprouvettes utilisées.
- L'effet de fermeture de la fissure est plus dominant par la technique des déformations plastique localisé.
- L'effet des contraintes résiduelles par soudage sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue sur éprouvette MT en alliage d'aluminium 2024 T351 est montré que le champ de contrainte résiduelle de compression était indépendant de l'application d'une charge et ne peut pas donc être due à la fermeture physique ainsi que la fissure permis une croissance de la vitesse de propagation.
- La répartition des contraintes résiduelles à l'intérieur du la soudure devrait conduire à des taux de croissance élevés car les contraintes résiduelles devenir traction et le $KI_{rés}$ cependant augmente.
- Taux de croissance des fissures et valeurs moyennes de dureté du joint FSWest de faible fissure et le taux de croissance se produit dans la zone de pépite plus difficile.
- Les procédés de soudage sont généré des contrainte résiduelle, elles sont causées principalement par le cycle thermique de soudage.

CHAPITRE III:
EFFET DES CONTRAINTES
RESIDUELLES DUES AU
SOUDAGE SUR LA
PROPAGATION DES
FISSURES DE FATIGUE

CHAPITRE III: Effet des contraintes résiduelles dues au soudage sur la propagation des fissures de fatigue :

I. Introduction

Il est reconnu que toute opération de soudage génère des contraintes résiduelles de nature tensionnelle ou compressive. L'action d'efforts cycliques (phénomène de fatigue) permet de faire propager une fissure amorcée à travers un champ de contraintes résiduelles dont le niveau dépend de la zone à considérer (joint de soudure, zone affecté thermiquement ou métal de base). Le présent chapitre a pour but de monter les effets des contraintes résiduelles dues à différents procédés de soudage d'assemblages à partir des études ultérieures. Le premier procédé est le soudage par friction malaxage (FSW) appliqué sur une plaque en alliage d'aluminium 7050 T7451, le deuxième procédé est le soudage par plasma.

II. fatigue de joints soudée par friction malaxage :

II.1. Introduction

Il est a signalé que les résultats expérimentaux des essais de fatigue et le modèle géométrique appliqué sont tirés de l'étude JATA et al. [33]

Le modèle géométrique utilisé est une éprouvette de type ESET découpée à partir d'in assemblage assuré par procédé de soudage FSW. Les figures 40 et 41 montrent respectivement une schématisation de l'opération de soudage FSW et l'éprouvette réalisée. La figure 42 montre la position de la fissure dans le noyau du cordon de soudure.

Les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 7050 T7451 et dans le joint de soudure traité à l'état T6 (FSW-T6) sont montrées par le tableau 1. Les résultats des essais de traction montrent respectivement une réduction de la limite élastique et de la limite de la rupture. Les taux de réduction sont respectivement de 60 % et 35%. De plus le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) réduit l'allongement c.à.d. diminution considérable de la ductilité. Ces résultats sont confirmés par d'autres études sur l'évolution des propriétés mécaniques des joints soudés des alliages d'aluminium par FSW [34][35][36]Les taux de réduction de l'allongement du métal

soudé (FSW) et du métal soudé traité (FSW+T6) par rapport au métal de base sont de l'ordre de 64 et 77%.

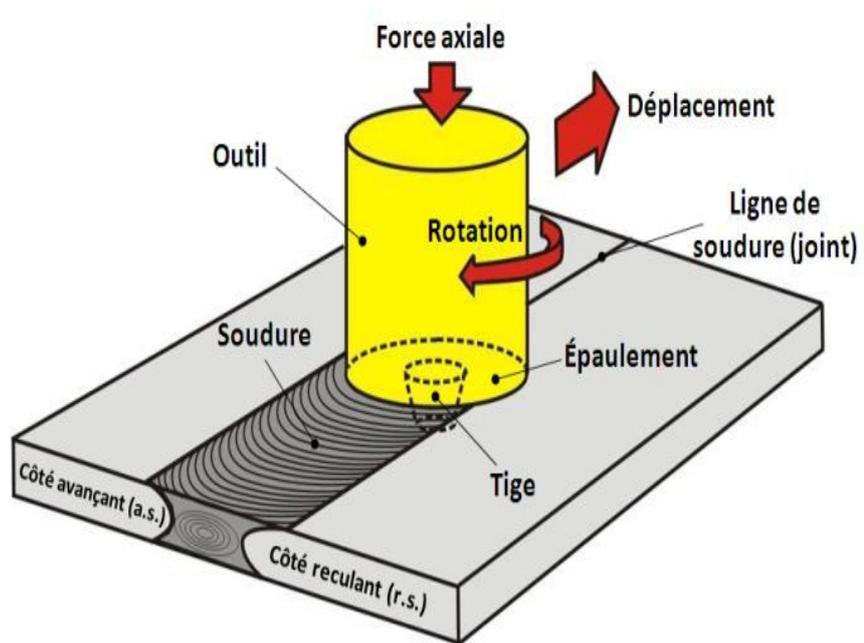


Figure III.40 : Schéma illustratif du soudage par friction malaxage (FSW)

Tableau III.2 : Propriétés mécanique de l'alliage 7050 T7451 avant et après soudage par FSW

Condition	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	A%
Métal de base	489	555	16.7
FSW	304	429	6
FSW+T6	291	417	3.8

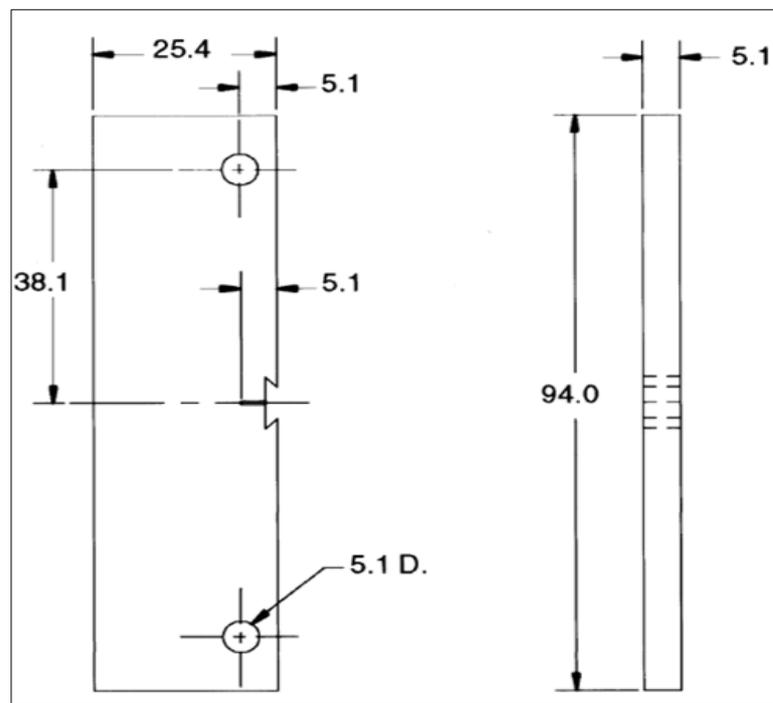


Figure III.41 : Eprouvette de type ESET découpé de l'assemblage soudé par friction malaxage (FSW) [34]

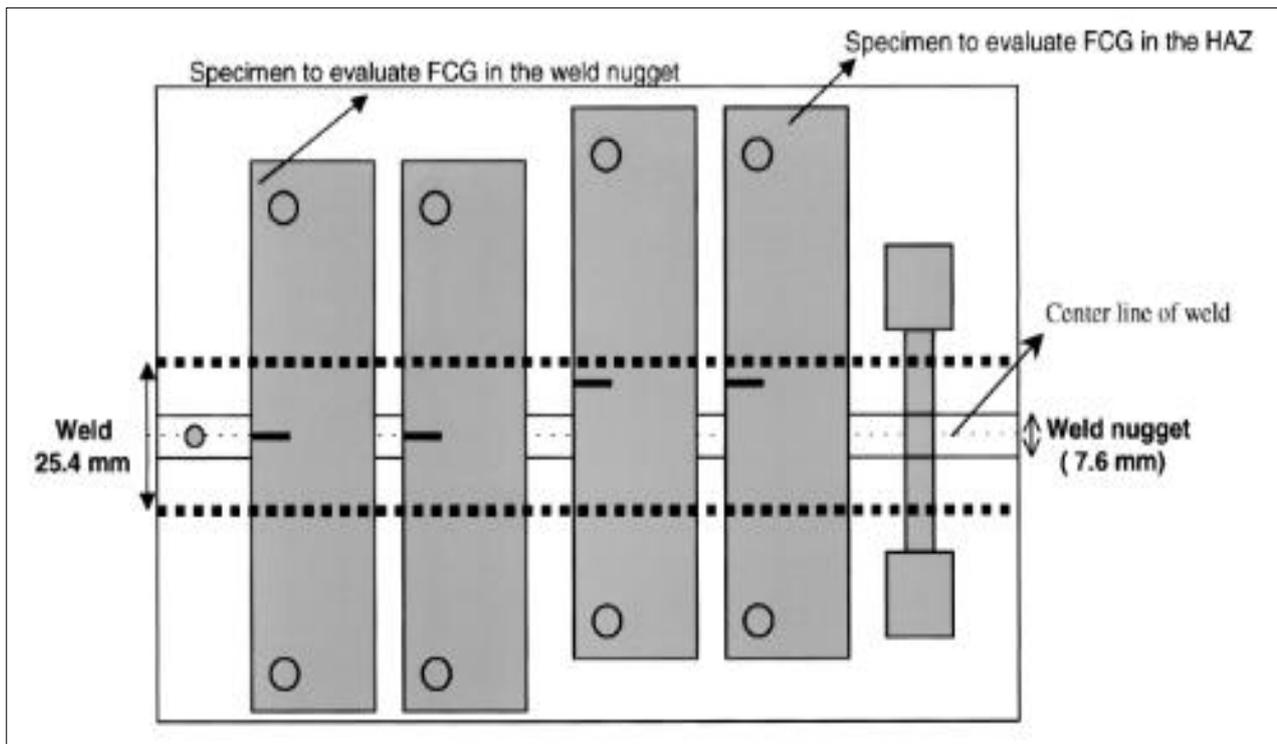


Figure III.42 : Position de la fissure dans le noyau du joint de soudure et la ZAT pour essais de fatigue [34]

Le facteur d'intensité de contrainte pour l'éprouvette de type ESET est exprimé par l'équation suivante :

$$K = \left(\frac{P}{B.W^{1/2}} \right) \times \beta_{ESET} \quad (2)$$

Où : β_{ESET} est le facteur de correction de géométrie pour une éprouvette ESET donné par :

$$\beta_{ESET} = \alpha^{1/2} (1.4 + \alpha)(1 - \alpha)^{3.2} \times G \quad (3)$$

La fonction de correction G est donnée par l'expression ci-dessous :

$$G = 3.97 - 10.88 \alpha + 26.25 \alpha^2 - 38.9 \alpha^3 + 30.15 \alpha^4 - 9.27 \alpha^5 \quad (4)$$

Avec $\alpha = a/W$

II.2. Discussion des résultats

Les champs des contraintes résiduelles générés par l'opération de soudage par FSW sont montrés par la figure 43. La distribution des contraintes résiduelles montre que les contraintes résiduelles sont de nature compressive, cela montre que si les fissures se propagent dans le sens longitudinal (noyau ou ZAT), la résistance à la fatigue est affectée [37]. Les contraintes résiduelles sont plus compressives coté soudé que le côté racine dans la zone du noyau de soudure et la zone affectée thermiquement. Sur le côté soudé la contrainte varie de -90 MPa à -120 MPa, par contre sur le côté racine les contraintes résiduelles varient de -110 MPa au niveau du noyau à 40 MPa sur le métal de base.

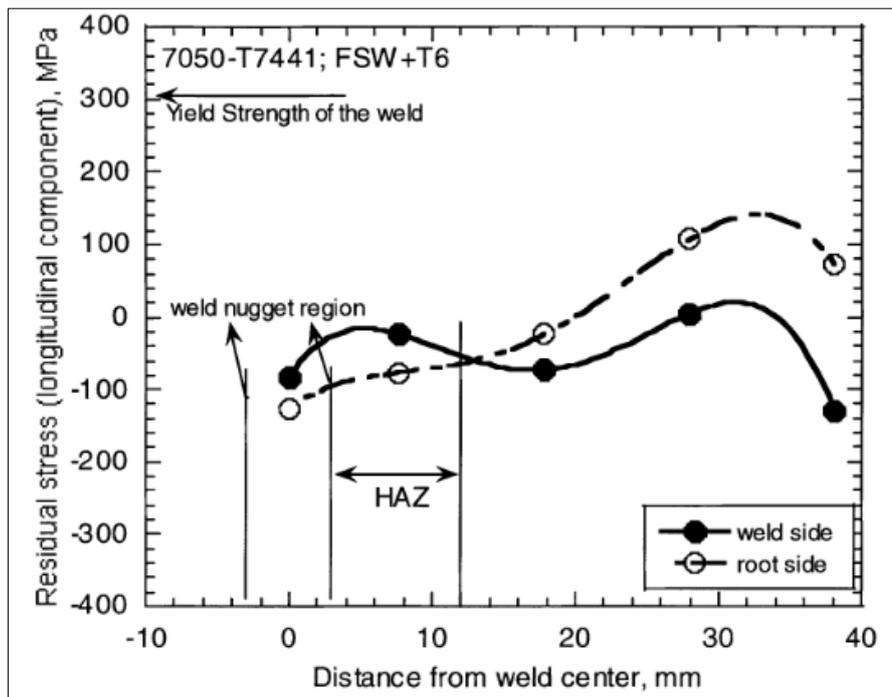


Figure III.43 : Contraintes résiduelles longitudinales mesurées et parallèles au plan de l'entaille de l'éprouvette (contrainte suivant le chemin de propagation – coté soudure et coté racine)

Les courbes des vitesses de fissurations obtenues expérimentalement par Jata et al. [34] sont présentées sur la figure 5. IL est à noter que pour un rapport de charge important ($R=0.7$), la différence des vitesses de fissuration pour le matériau de base, la zone affectée thermiquement et le noyau est négligeable. Pour rapport de charge $R=0.33$, on remarque que le seuil de non fissuration pour le noyau a diminué comparativement par rapport au seuil de non fissuration du métal de base. A titre d'exemple la vitesse de fissuration pour le métal de base est de l'ordre de 1.15×10^{-9} m/cycle et est augmenté pour le joint de soudure (noyau) à 4.0×10^{-9} m/cycle. Dans la zone affectée thermiquement, une augmentation significative du seuil de non fissuration est constatée. Le seuil de non fissuration ΔK_{th} pour le métal de base est de $1.83 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ est augmenté à $3.24 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ ce qui représente un taux d'augmentation de 77%.

De plus la figure 44 montre l'effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration où l'on note une augmentation de la vitesse de fissuration par l'augmentation du rapport de charge [38][39][40][41]. La résistance de fatigue dans la zone affectée thermiquement est améliorée comparativement par rapport au métal soudé et au métal de base pour $R=0.33$ où l'on note un large décalage de la courbe de fissuration, cela est due à la présence des contraintes résiduelles qui introduit une fermeture de fissures [13]. Par contre pour $R=0.7$, La courbe de fissuration dans la ZAT se rapproche à celle du métal de base.

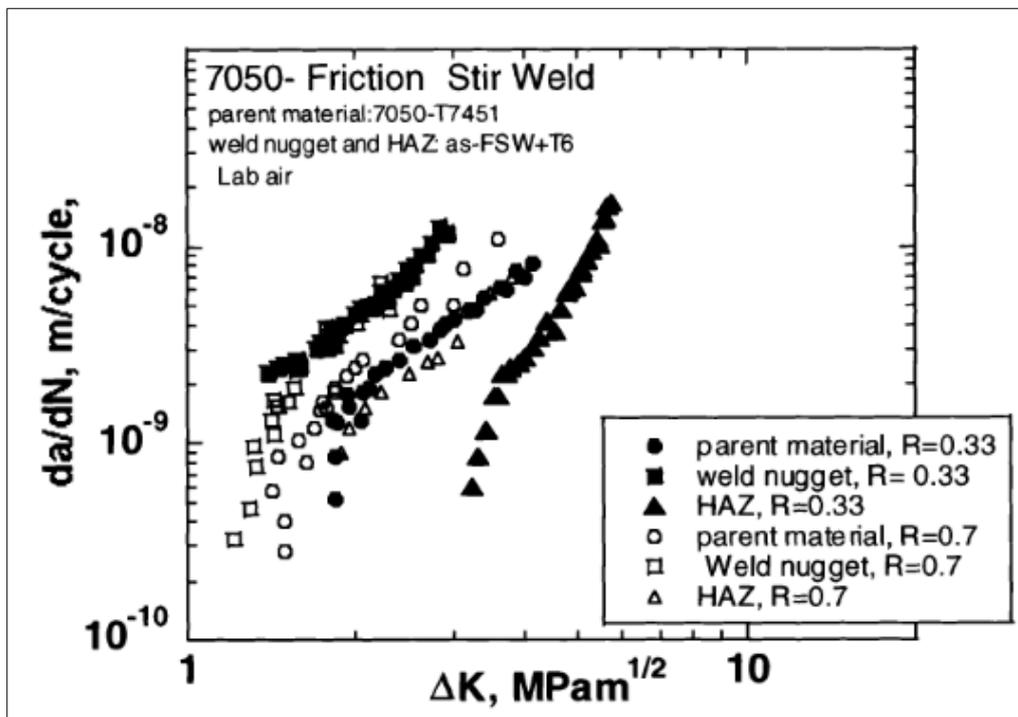


Figure III.44 : Vitesses de fissurations sous différentes conditions matérielles [34]

III. fatigue de joint soudée par plasma :

III.1. Introduction

L'investigation sur le comportement en fatigue des joints soudés par le procédé Plasma à polarité variable (VPPAW) destiné à souder les alliages d'aluminium [42][43][44][45] est présenté ci-dessous dont le but de monter les effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures de fatigue [46]. La source au plasma doit pouvoir souder en polarité variable (AC/DC) et avoir au minimum une intensité de courant de 350A. Pour le soudage de l'aluminium, il est impossible d'obtenir une soudure de qualité sans l'utilisation de la polarité variable. Le courant alternatif est indispensable. Ce procédé de soudage est largement utilisé en aéronautique et l'industrie automobile afin de produire des joints de soudure de haute qualité. L'augmentation de la densité d'énergie de l'arc est une méthode courante pour améliorer la qualité du joint de soudure [47, 48].

Afin d'étudier le comportement en fissuration par fatigue, des éprouvettes de type M(T) et C(T) en alliage d'aluminium 2024 T351 ont été découpées à partir d'une plaque soudée par plasma en polarité inverse (Figure 45). Le joint de soudure a été réalisé dans la direction longitudinale des plaques assemblées. Les éprouvettes ont été soumises à des essais de fatigue en mode I à ΔK constant et $R=0.1$. Les vitesses de

fissuration pour l'éprouvette M(T) sont mesurées pour les essais à $\Delta K = 6, 11$ et $13 \text{ MPa}(m)^{1/2}$. Par contre les éprouvettes C(T) ont été testées à $\Delta K = 11, 13$ et $15 \text{ MPa}(m)^{1/2}$.

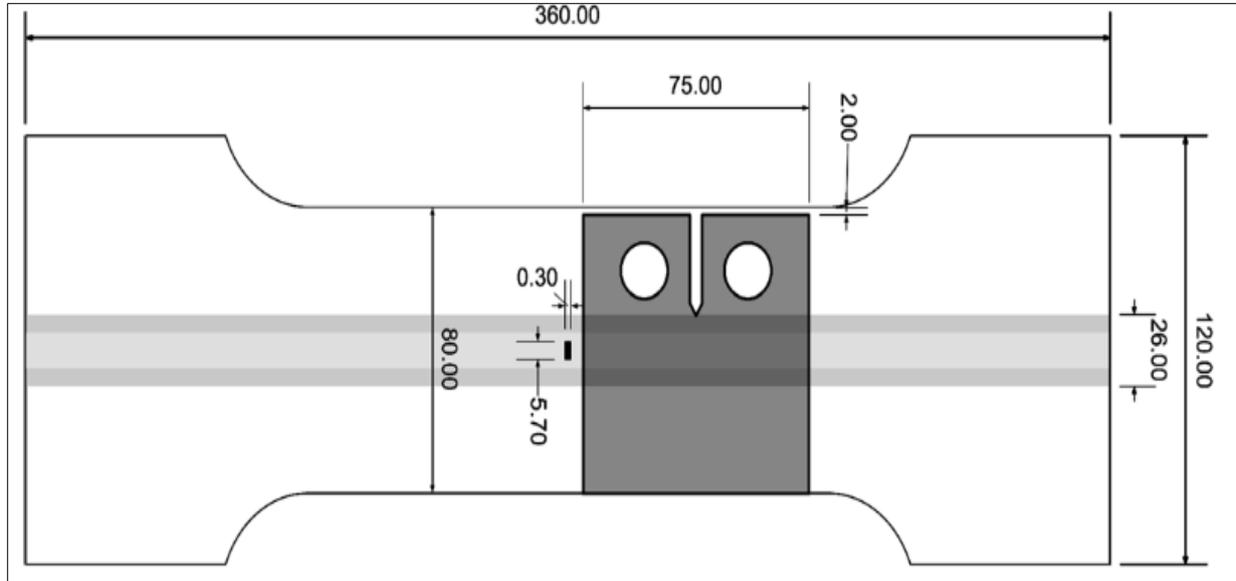


Figure III.45 : Géométrie des éprouvettes M(T) et C(T) pour essais de fatigue

III.2. Discussion des résultats

La mesure des contraintes résiduelles après découpage sur les éprouvettes a été faite par la technique non destructif « diffraction neutronique » [48],[49],[50]. Les distributions des contraintes résiduelles sont données respectivement par les figures 46 et 47 les éprouvettes M(T) et C(T). Les contraintes résiduelles mesurées sont comparées à ceux obtenues numériquement par la méthode des éléments finis dans le cas avant essais de fatigue et après une propagation par fatigue de 12 mm et 29.1 mm de longueur respectivement pour les éprouvettes M(T) et C(T). Pour l'éprouvette M(T), les contraintes sont maximales autour du cordon de soudure et de nature tensionnelle. Il est à noter que les contraintes résiduelles se redistribuent après la propagation de la fissure de 12 mm et le pic de contraintes est important après l'arrêt de fissuration.

Les contraintes résiduelles sur l'éprouvette C(T) présentées sur la figure 6 montrent que les contraintes résiduelles initiales sont trop faible par rapport aux contraintes sur l'éprouvette de type M(T) et cela est due à l'effet de l'usinage de l'entaille de l'éprouvette C(T).

Les vitesses de fissuration pour les éprouvettes soudés sont montrées par les figures 8 et 9. A partir de la figure 8, on note que la vitesse de fissuration de l'éprouvette M(T) est importante par rapport à la vitesse de fissuration dans le métal de base pour ΔK égale à 6 et 11 $\text{MPa(m)}^{1/2}$. Toutefois, la courbe de fissuration à $\Delta K = 15 \text{MPa(m)}^{1/2}$ tend vers la courbe de fissuration du métal de base. Les vitesses de fissuration le long du joint de fissure pour $\Delta K = 11$ et $15 \text{MPa(m)}^{1/2}$ varient de 2×10^{-7} m/cycle à 9×10^{-7} m/cycle.

Il est à noter que les vitesses de fissurations pour l'éprouvette C(T) testée à $\Delta K = 15 \text{MPa(m)}^{1/2}$ sont très inférieurs aux vitesses de fissurations de l'éprouvette M(T) testée à $\Delta K = 6 \text{MPa(m)}^{1/2}$ (Figure 9).

La figure 9 montre une fermeture de fissure en s'approchant de la ligne neutre du joint de soudure pour $\Delta K = 11 \text{MPa(m)}^{1/2}$. Cette fermeture se traduit par la présence des contraintes résiduelles de compression en début de fissuration de l'ordre de -40 MPa et une faible charge appliquée, à $\Delta K = 13 \text{MPa(m)}^{1/2}$ la fissure se propage d'une vitesse faible puis se referme.

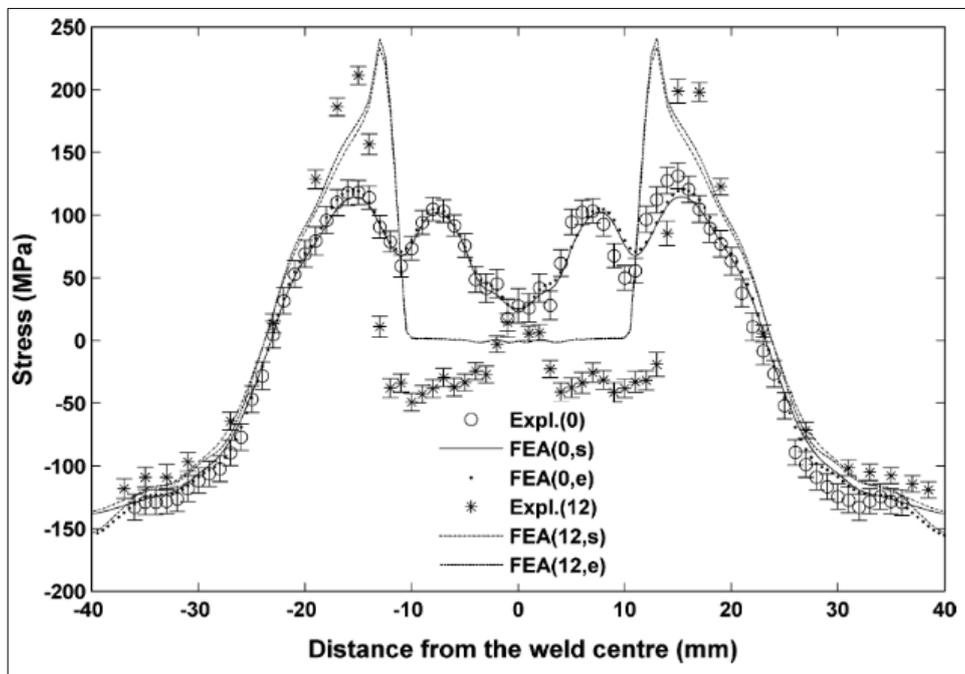


Figure III.46 : Contraintes résiduelles mesurées et prédites dans le joint de soudure dans la direction longitudinale pour l'éprouvette M(T)

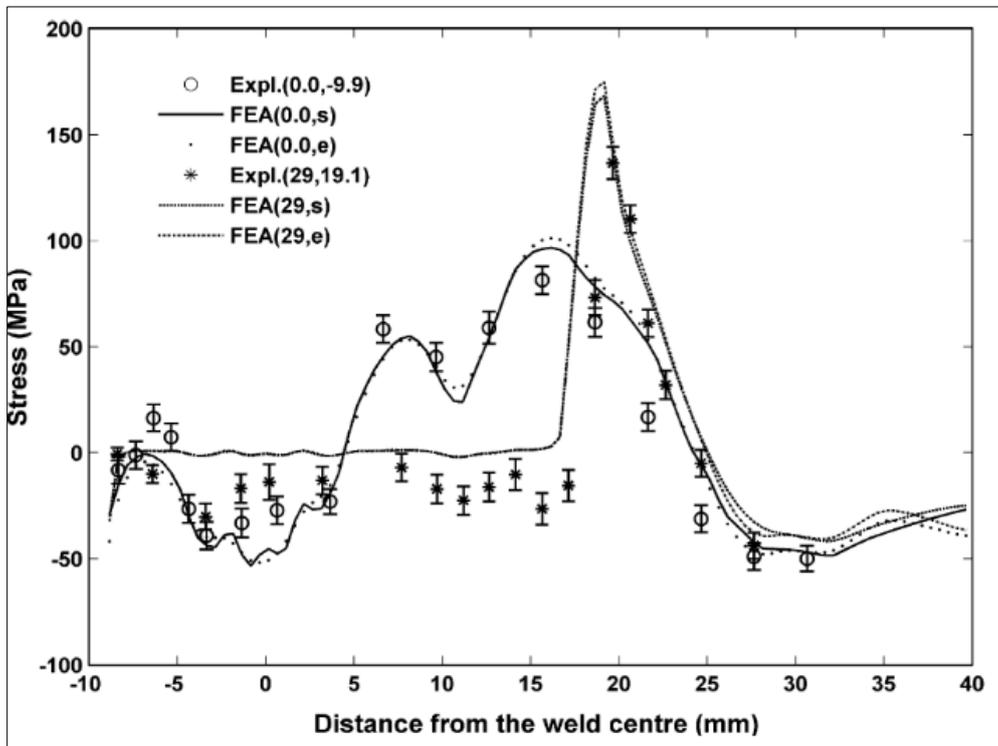


Figure III.47 : Contraintes résiduelles mesurées et prédites dans le joint de soudure dans la direction longitudinale pour l'éprouvette C(T)

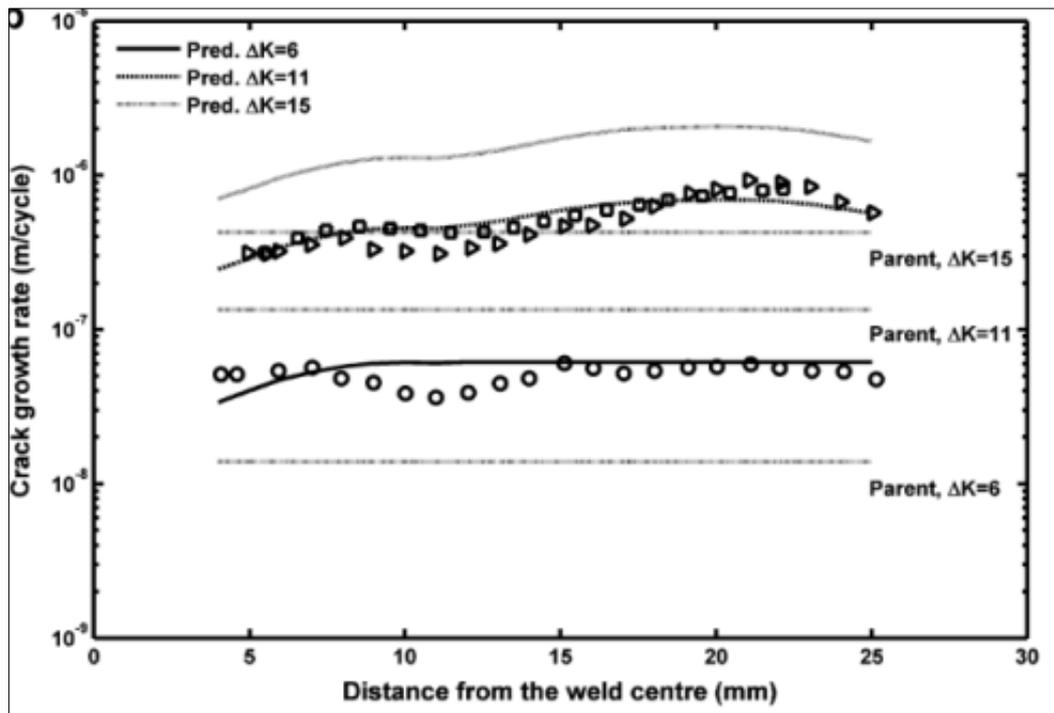


Figure III.48 : Résultats expérimentaux et prédites des vitesses de fissuration pour l'éprouvette M(T) en appliquant l'approche des contraintes résiduelles ($\Delta K=6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $\Delta K=11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $\Delta K=15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)

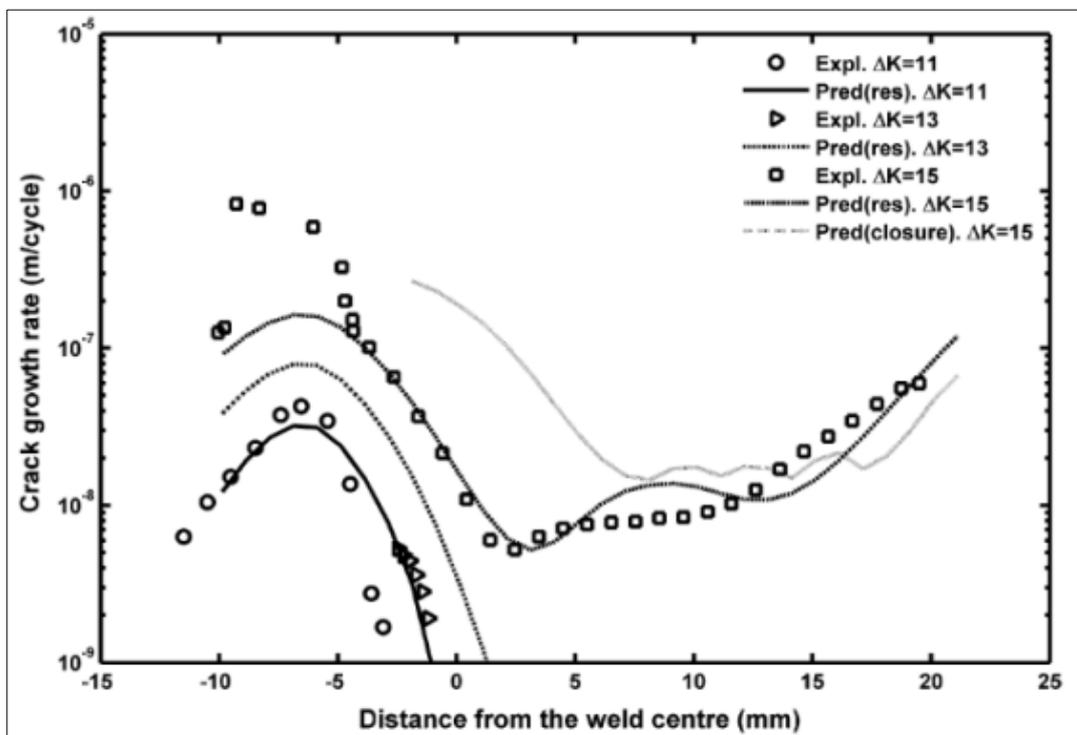


Figure III.49 : Vitesses de fissuration pour l'éprouvette C(T) en appliquant l'approche des contraintes résiduelles et le phénomène de fermeture de fissure

L'approche des contraintes résiduelles (contraintes résiduelles dues au soudage par plasma) appliquée pour prédire les vitesses de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contraintes dépend du facteur d'intensité de contraintes appliquées (K_{app}) et du facteur d'intensité de contraintes résiduelles (K_r). L'approche se base sur l'application d'un rapport de charge effectif défini ci-dessous

$$R_{eff} = \frac{K_{app-min} + K_r}{K_{app-max} + K_r} \quad (5)$$

Cette méthode de calcul est implémentée dans le code AFGROW et utilisée dans plusieurs études [38][39][40][41].

Conclusion

L'évaluation des contraintes résiduelles dues au processus de soudage s'avère très importante dans le but de prédire son comportement vis-à-vis du phénomène de fatigue (durée de vie d'amorçage et de propagation, vitesse de propagation). Les deux études présentées montrent que :

- Le soudage par friction malaxage (FSW) génère de faibles contraintes résiduelle (compressive ou tensionnelle),
- Le soudage par plasma ou soudage à l'arc d'une façon générale génèrent des contraintes résiduelles tensionnelles au niveau de la zone affectée thermiquement ZAT et au niveau du métal soudé [51][52][53].
- L'augmentation du rapport de charge affecte négativement la vitesse de fissuration.
- En présence des contraintes résiduelles, les vitesses de fissuration dépendent du niveau du chargement appliqué et de l'état des contraintes résiduelles (compressive ou tensionnelle).
- Au cours de la propagation de la fissure une grande majorité des études ont montré que les contraintes résiduelles se redistribuent [54][55][56][57].

Conclusion générale

Ce travail présente un état de l'art sur l'effet des contraintes résiduelles de soudage due à la fissuration par fatigue. La propagation de la fissure une grande majorité des études ont montré que les contraintes résiduelles se redistribuent.

Les résultats des études précédant montrent :

- Le soudage par friction malaxage (FSW) génère de faibles contraintes résiduelle (compressive ou tensionnelle) par contre le soudage par plasma ou soudage à l'arc d'une façon générale génèrent des contraintes résiduelles tensionnelles au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT) et au niveau du métal soudée.
- Les contraintes résiduelles à la pointe de la fissure sont des contraintes de compression qui évoluent avec l'évolution de la fissure.
- Chaque avancée de fissure, les contraintes résiduelles passent par une phase de compression puis une phase de tension en s'éloignant de la pointe de la fissure ces contraintes tendent vers zéro, donc il y a relaxation des contraintes.
- L'augmentation du rapport de charge fait augmenter la vitesse de fissuration.
- Au cours de la propagation de la fissure une grande majorité des études ont montré que les contraintes résiduelles se redistribuent

Les contraintes résiduelles, souvent dues aux procédés de fabrication (soudure, usinage...etc.) sont des paramètres influant à la propagation des fissures de fatigue. Enfin, nous proposons une étude expérimentale sur effets des contraintes résiduelles sur la propagation de fissures de fatigue en utilisant le logiciel AFGROW.

Reference bibliographique

[1] **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, ISBN0-471-51059-9, p.472

[2] **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 »

[3] **PHILIP MALTAIS**, ING. SEPTEMBRE «Mémoire développement d'une méthode de prédiction de la durée de vie de fatigue de structure tubulaire soudée en aluminium»

[4] **J. SPRAUEL**, «Thèse de doctorat Etude par diffraction X des facteurs mécaniques influençant la corrosion sous contraintes d'aciers inoxydables», Université Paris VI, Paris le 1998

[5] **L. L. MET-X**, Le 1992 «Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X», ENSAM Paris, Paris, Document de formation générale.

[6] **E. MACHERAU, H. WOHLFAHRT, and WOLFSTIEG**1973, «articleInternal stresses during rolling friction and their evaluation»HTM, vol. 23, p. 201.

[7] **K. KLAUS**, le 1981, «Fatigue Behaviour of Welded High-Strength Steels after High Frequency Mechanical Post-Weld Treatments»

[8] **KEBIR Tayeb**, le 15 /12 / 2013 « mémoire Etude de l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure de fatigue»

[9] **Anne-Sophie BILAT**, 2007« Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade caractérisation et modélisation», Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,

[10] **M.ZAOUI**, Juin 2000 thèse de magister« Caractérisation mécaniques et métallurgiques des joints de soudure, étude comparative entre deux procédés de soudage, le soudage MIG et le soudage au chalumeau».

[11] **P.BERTHET. Publications de la soudure autogène EYROLLES** 1988«Déformations et contraintes en soudage».

[12] **Yu E.Ma p.starom, T.Fischer** « article Size effets on résiduels stress and fatigue crack growth in friction stir welded 2195-T8 aluminium – Part I: expérimentes »

- [13] **Jean-Loup CURTAT** « mémoire étude de l'effet du martelage sur la vie en fatigue de l'acier E309L utilisé pour la réparation de turbines en acier 13Cr-4Ni » le 26 Mai 2016
- [14] **M. Benachour** « Compte rendu des essais de rupture par fatigue de l'alliage d'aluminium 2024 T351 », Centre des Matériaux, Ecole des Mines de Paris, juin 2007.
- [15] **P. S. Song, C. C. Wen** « article Crack closure and crack growth behaviour in shot panned fatigued specimen » Engineering Fracture Mechanics. Vol. 63 : 61-69, 1999.
- [16] **G. H. Farrahi, G. H. Majzoubi, F. Hosseinzadeh, S. M. Harati**, «article Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviour in CT specimen ».
- [17] **A.H. Mahmoudi, S. Hadidi-moud, C.E. Truman, D. J. Smith** « Article Influence of residual stress on the fracture behaviour of aluminium alloy »
- [18] **P.S. Song, G. L. Sheu** « Article Retardation of fatigue crack propagation by indentation technique »
- [19] **R. Galatolo and A. Lanciotti** « article Fatigue crack propagation in résiduel stress Fields of welded plates »
- [20] **P.S. Song, G. L. Sheu** « Article Retardation of fatigue crack propagation by indentation technique »
- [21] **Y. C. Lam, K. S. Lian** « Effet of résiduel stress and its redistribution on fatigue crack growth »
- [22] **R. J. Bucci** « Effect of stress on fatigue crack growth rate measurement »
- [23] **L.Fratini, S.Pasta, A.P.Reyholds** « Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joint : longitudinal stress and microstructural effects »
- [24] **Yu E.Ma, p.starom, T.Fischer** « article Size effets on résiduels stress and fatigue crack growth in friction stir welded 2195-T8 aluminium – Part II : expérimentes »
- [25] **Dattoma, V. M. Giorgi, et al.** « Article On the Residual Stress Field in the Aluminum Alloy FswJoints. Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures »
- [26] **Lombard, H. D. G. Hattingh, et al** « Article Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds »
- [27] **Ali. A, M. W. Brown, et al** « Article Caractérisation of 2024-T351 friction stir welding joint »

- [28] **Lima, E. B. F., J. Wegener** « Dependence of the microstructure, residual stresses and texture of AA 6013 friction stir welds on the welding proces »
- [29] **Prime, M. B., T. Gnäupel-Herold** « Résiduels stress miaulements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir Weald. »
- [30] **Buffa, G, L.Fratini, et al** «CIRP Annals On the thermo-mechanical loads and the resultant residual stresses in friction stir processing operations »
- [31] **FARAH Assaf** « thèse Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudée par frixion –malaxage et parachèves » le octobre 2013
- [32] **Jata, K., K. Sankaran** « Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451 »
- [33] **K.V. Jata, K.K. Sankaran, J.J. Ruschau (2000)** «Friction-Stir Welding effects on microstructure and of aluminum alloy 7050-T7451». Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 31A, pp 2181-2192.
- [34] **V. Fahimpour, S.K. Sadrnezhaad, F. Karimzadeh (2013)** «Microstructure and Mechanical Property Change During FSW and GTAW of Al6061 Alloy»Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 44A, pp 2187-2195.
- [35] **Marcello Cabibbo, Archimede Forcellese and Michela Simoncini (2016)** «New Approaches to the Friction Stir Welding of Aluminum Alloys». In Joining Technologies book edited by Mahadzir Ishak. IntechOpen. DOI: 10.5772/64523
- [36] **S. Dharani Kumar, S. Sendhil Kumar (2019)** «Investigation of mechanical behavior of friction stir welded joints of AA6063 with AA5083 aluminum alloys ». Mechanics and Mechanical Engineering, vol. 23, pp 59–63
- [37] **L.R. Link (1990)** « Fatigue and Fracture Testing of Weldments». ASTM STP 1058, H.I. McHenry and J.M. Potter, eds. ASTM, Philadelphia, PA, pp. 16-33.
- [38] **E. Di Todaro, C.T.O.F. Ruckert, M.T. Milan, W.W. Bose Filho, J.R. Tarpani, D. Spinelli (2006)** «Modelling of stress ratio effect on Al alloy SAE AMS 7475-T7351: Influence of loading direction »Journal of material Engineering and Performance . Volume 15(5), pp 608-613.
- [39] **Haftirman Idrus, M. Afendi, Wong Chun Hoe (2014)** «Fatigue crack initiation and growth of aluminum alloy with stress ratio effects». Key Engineering Materials Vols. 594-595, pp 1105-1111.

- [40] **Natália Ferreira, Pedro V. Antunes, José A. M. Ferreira, José D. M. Costa, Carlos Capela (2018)** «Effects of Shot-Peening and Stress Ratio on the Fatigue Crack Propagation of Al 7475-T7351 Specimens». *Appl. Sci.* 2018, 8, 375. Pp 1-14.
- [41] **Mustapha Benachour, Nadjia Benachour, Mohamed Benguediab (2016)** «Fractographic observations and effect of stress ratio on fatigue striations spacing in Al-alloy 2024 T351». *Materials Science Forum*, Vol. 887, pp 3-8
- [42] **Mohamed Benguediab (1988)** «Etude de la propagation des fissures de fatigue sous spectres de chargements réduits». Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France
- [43] **Qin Lian Zhang, Chun Li Yang, San Bao Lin (2014)** «Horizontal welding of aluminium alloys by soft plasma arc». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering*. Vol 228, Issue 11, pp 1481-1490
- [44] **Zhenyang Lu, Wang Zhang, Fan Jiang, Shujun Chen, Zhaoyang Yan (2019)**. «Primary study of variable polarity plasma arc welding using a pulsed plasma gas». *Materials*, 12, 1666; pp 1-14. Doi: 10.3390/ma12101666.
- [45] **C.D.M. Liljedahl, J. Brouard, O. Zanellato, J. Lin, M.L. Tan, S. Ganguly, P.E. Irving, X. Zhang, L. Edwards (2009)** «Weld residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of aluminium alloy 2024-T351». *International Journal of Fatigue*. Volume 31, Issue 6, pp 1081-1088.
- [46] **Mahrle, A.; Schnick, M.; Rose, S. (2011)** «Process characteristics of fibre-laser-assisted plasma arc welding». *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 44.
- [47] **Mahrle, A.; Rose, S.; Schnick, M. (2013)** «Stabilisation of plasma welding arcs by low power laser beams». *Sci. Technol. Weld. Join.*, 18, pp 323–328.
- [48] **G.A Webster, R.C. Wimpory (2001)** «Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction » *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3), pp 395-399.
- [49] **A.M. Paradowska, W. Suder, S. Williams (2010)** «Neutron Diffraction Residual Stress Measurements in Key-Hole Laser Formed Weldments». *Journal of Physics: Conference Series* 251 (2010) 012049.
- [50] **Gyudong Choi, Min-Ho Lee, E-Wen Huang, Wanchuck Woo, Soo Yeol Lee (2015)** «Fatigue crack-tip stress mapping using neutron diffraction» .*Korean Journal of Materials Research*, Vol.25 No.12 pp.690-693.

- [51] **Muthusamy Arunkumar, Veeman Dhinakaran (2020)** « Effect of plasma arc welding on residual stress and distortion of thin titanium sheet». *Materials Research*, 22(6), e20190366.
- [52] **Andreassen, M. J., Yu, Z., Liu, S., & Guerrero-Mata, M. P. (2016)** «Comparison of Welding Residual Stresses of Hybrid Laser-Arc Welding and Submerged Arc Welding in Offshore Steel Structures». In *Proceedings of the 10th International Conference on Trends in Welding Research*, pp. 96-101
- [53] **Nurul Syahida Mohd Nasir, Mohammad Khairul Azhar Abdul Razab, Sarizam Mamat, Muhammad Iqbal Ahma (2016)** «Review on welding residual stress». *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11(9), pp 6166-6175.
- [54] **Sanger, C., McDonald, R., and Kurath** «Prediction of Welding Residual Stresses and Redistribution/Relaxation due to Cyclic Loading »SAE Technical Paper 2005-01-1322, 2005,
- [55] **S.F. Estefen, T. Gurova, A. Leontiev (2013)**. «Redistribution of the residual welding stresses». *Marine Systems & Ocean Technology*, 8, pp 95-100.
- [56] **A.Mirzaee-Sisan, A.Bastola (2017)**. «Redistribution of welding residual stress following high plastic deformation in seamless pipes». *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 158, pp 37-50.
- [57] **Jazeel R. Chukkan, Guiyi Wu, Michael E. Fitzpatrick, Elvin Eren, Xiang Zhang, Joe Kelleher (2018)**. « Residual stress redistribution during elastic shake down in welded plates». *MATEC Web Conf.*, volume 165, 12th International Fatigue Congress (FATIGUE 2018).