

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 : Maintenance Industrielle

Thème

*Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudure
et leurs effets sur la fissuration par fatigue*

Présenté par : **CHERAITIA Redouane**

Le : 14 / 06 / 2015 devant le jury composé de :

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

Année universitaire : 2014-2015

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**, Maître de Conférence 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 gratitudes, 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 Abdelhamid**, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur d'être le Président de mon jury.*

*Je tiens aussi à remercier vivement messieurs **HADJOUI Féthi**, Maître de Conférence à l'université de Tlemcen et **KARA ALI Djamel**, Maître de Conférence à l'université de Tlemcen, 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 la mémoire de ma très chère défunte Mère.

A mes chers parents, Taher et Chahla ;

A ma sœur unique Khadidja, et mes frères, Faudel, Seif, Taki ; Midou ;

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.

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1. Les différents modes de fissuration.....	3
Figure 1.2. Fissure en mode I - Etat de contrainte au niveau de la pointe de la fissure.....	4
Figure 1.3. Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique).....	6
Figure 1.4. Définition de la fatigue.....	7
Figure 1.5. Cycle de contrainte en fatigue.....	8
Figure 1.6. Les différentes formes de cycles de contrainte au cours d'essai de fatigue.....	9
Figure 1.7. Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement.....	11
Figure 1.8. Courbe d'endurance (courbe de Wöhler).....	12
Figure 1.9. Les différents régimes de la fissuration.....	14
Figure 1.10. Principe d'ouverture et de fermeture de la fissure.....	18

CHAPITRE II

Figure 2.1. Soudure bout à bout sur chanfrein en V.....	25
Figure 2.2. Types d'assemblages soudés.....	30
Figure 2.3. Porosités débouchantes en surface de cordon de soudure.....	32
Figure 2.4. Macrographie d'une soudure avec soufflures.....	33
Figure 2.5. Inclusion d'une soudure MAG.....	33
Figure 2.6. Retassures.....	34
Figure 2.7. Excès de pénétration.....	34
Figure 2.8. Manque de fusion en bord de chanfrein et sous cordon.....	35
Figure 2.9. Manque de pénétration et collage en bord du joint.	35
Figure 2.10. Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale.....	36
Figure 2.11. Caniveaux sur soudure multipasse.....	37
Figure 2.12. Caniveau en surface de joint soudé.....	37

Figure 2.13. Défauts d'alignements.....	38
Figure 2.14. Projections.....	38

CHAPITRE III

Figure 3.1. Éprouvette CT50 utilisé pour les essais de fissuration.....	42
Figure 3.2. Représentation Schématique de la position des entailles sur les trois zones.....	43
Figure 3.3. Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de ΔK pour les trois zones.....	45
Figure 3.4. Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les trois zones.....	45
Figure 3.5. Vue schématique (2-D) d'un joint bout à bout avec divers défauts de soudure....	46
Figure 3.6. Effet des défauts de soudure sur la vie de propagation de fissure de fatigue.....	47
Figure 3.7. Effet combiné d'une fissure de solidification et une porosité circulaire sous chargement bi-axiale.....	48
Figure 3.8. Effet des défauts de soudure sur la vitesse de propagation des fissures.....	49
Figure 3.9. Éprouvettes C(T) : (a) l'emplacement soudure (b) lignes de balayage pour la mesure des contraintes résiduelles.....	49
Figure 3.10. Contrainte résiduelle parallèle à la direction soudure (1st scan line).....	51
Figure 3.11. Contrainte résiduelle perpendiculaire à la direction soudure (1st scan line).....	51
Figure 3.12. Vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction du ΔK (Fissure parallèle au joint de soudure)	52
Figure 3.13. Fissure semi-elliptique en soudure d'angle double.....	53
Figure 3.14. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 30^\circ$	53
Figure 3.15. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 45^\circ$	54
Figure 3.16. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 60^\circ$	54
Figure 3.17. Effet de l'angle θ pour $a/c = 0.1$ sur la propagation de fissure de fatigue.....	55
Figure 3.18. Courbes de propagation des fissures de fatigue au $\sigma_{\max} = 20$ MPa.....	55
Figure 3.19. Courbes de propagation des fissures de fatigue au $\sigma_{\max} = 160$ MPa.....	56

LISTES DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau 2.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répondus.....	27
---	----

CHAPITRE III

Tableau 3.1. Compositions chimiques de l'acier A48AP et du métal déposé.....	43
Tableau 3.2. Propriétés mécaniques des trois zones.....	43
Tableau 3.3. Equations caractérisant la Loi de Paris dans les différentes zones étudiées.....	44
Tableau 3.4. Composition chimique de métal de base et d'apport.....	46
Tableau 3.5. Propriétés mécaniques des : métal de base, métal d'apport, et la ZAT (A36)....	47
Tableau 3.6. Dimensions des éprouvettes C(T).....	50
Tableau 3.7. Composition chimique de l'alliage 2195–T8 Al-Li.....	50
Tableau 3.8. Propriétés mécaniques de l'alliage 2195–T8.....	50
Tableau 3.9. Caractéristiques des matériaux.....	53

ABREVIATIONS

DP : Déformation plane

CP : Contrainte plane

T-L : Sens longitudinale

MB : Métal de base

MF : Métal fondu

ZAT : Zone affectée thermiquement

MOS : Mode opératoire de soudage

FSW : soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding)

ZL : Zone de liaison

ZF : Zone fondu

CT : Epreuve Compact Tension

EE : L'électrode enrobée

h : Hauteur de l'éprouvette.

SYMBOLES

Pa, MPa, GPa : (Unités de pression)

m : Mètre (Unité de longueur)

E : Module de Young [Pa]

C et m : Paramètres de la loi de Paris

r : Rayon de la zone plastifiée

a : Longueur de fissure [mm]

a_0 : Longueur de fissure initiale [mm]

N : Nombre de cycle [cycle]

N_R : Nombre de cycles à rupture de l'échantillon [cycle]

R : Rapport de charge

K : Facteur d'intensité de contrainte [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

KI : Facteur d'intensité de contrainte en mode I [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

K_{max} : Facteur d'intensité de contrainte maximale [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

K_{min} : Facteur d'intensité de contrainte minimale [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

K_{crit} : Facteur d'intensité de contrainte critique (model Nasgro) [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

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

ΔK_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]

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

C_W et m_W : Paramètres de la loi de Walker

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

σ_m : Contrainte moyenne [MPa]

σ_{max} : Contrainte maximale [MPa]

σ_{min} : Contrainte minimale [MPa]

σ_D : Limite de fatigue [MPa]

σ_a : L'amplitude de contrainte [MPa]

σ_y : Résistance local à la rupture [MPa]

$\sigma_{0,2}$: Limite d'élasticité (0,2% de déformation plastique) [MPa]

σ_R : Résistance à la rupture [MPa]

Al : Aluminium

P : Phosphore

S: Soufre

Cr : Chrome

Ni : NICKEL

V : Vanadium

Mo : Molybdène

Cu : Cuivre

C : Carbone

Mn : Magnésium

Fe : Fer

Si : Silicium

TABLES DES MATIERES

LISTES DES FIGURES.....III
LISTES DES TABLEAUX.....V
LISTES DES ABRIVIATIONS VI
LISTES DES SYMBOLES VII

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I

Notions Sur Les Comportements En Fatigue

I. INTRODUCTION.....2
II. APPROCHE DE LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE.....3
 II.1 Différent modes de rupture3
 II.2 Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure4
 II.3 Zone plastique au niveau de la pointe de la fissure.....5
III. GENERALITE SUR LA FATIGUE6
 III.1 Définitions du phénomène de fatigue.....6
 III.2 Processus du phénomène de fatigue10
IV. DEFENITION D’AMORCAGE.....10
V. PROPAGATION D’UNE FISSURE DE FATIGUE.....13
VI. CONCLUSION 20
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE I..... 21

CHAPITRE II

Défauts dans les joints de soudure

I. INTRODUCTION.....23
II. DEFINITIONS.....24
 II.1 Définitions du soudage24

II.2	Parties constitutives d'un joint soudé	24
II.3	Procédés de soudage.....	26
II.4	Notion de soudabilité	28
III.	DIFFERENTS TYPES D'ASSEMBLAGES SOUDES	28
IV.	DEFAUTS DES JOINTS SOUDES	31
V.	CONCLUSION	40
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE II	41

CHAPITRE III

Effet des défauts sur la fissuration par fatigue

I.	INTRODUCTION.....	42
II.	ANALYSE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE DES MATERIAUX SOUDE.....	42
II.1	Matériaux en acier	42
II.1.1	Effet de caractéristiques mécaniques des matériaux.....	42
II.1.2	Effets des défauts de soudure sur la fissuration par fatigue.....	46
II.2	Alliages d'aluminium	49
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE III	57
	CONCLUSION GENERALE.....	58

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Assurer l'intégrité des structures et composants industriels passe par la considération de la présence de défauts et par la détermination des conditions d'amorçage, de propagation et d'arrêt des fissures dues à la présence de ces défauts.

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique, automobile, transport pétrolier, marin...etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement, permet de prévenir les anomalies, et de choisir les conditions adaptées à son utilisation.

L'objectif de ce travail est de présenter les différents types de défauts liés au procédé de soudage et l'influence des paramètres de soudage. Un état d'art sur l'influence des défauts de soudage sur la fissuration par fatigue a été détaillé.

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

- Chapitre I : Notions sur les comportements en fatigue

Le premier chapitre présente les notions générales sur le comportement en fatigue et la rupture des matériaux métalliques.

- Chapitre II : Défauts dans les joints de soudure

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des défauts dans les joints de soudure et leurs causes.

- Chapitre III : Effet des défauts sur la fissuration par fatigue

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

Enfin, une conclusion générale permettra de souligner les résultats les plus importants obtenus dans cette étude.

CHAPITRE 01 :

Notions Sur Les

Comportements En Fatigue

I. INTRODUCTION

Une pièce en service peut subir des efforts statiques ou des charges répétées, aléatoires ou cycliques de plus ou moins forte intensité [1]. L'expérience indique que les ruptures des pièces de machines ou de structures en fonctionnements normal sont, le plus souvent, du a la fatigue. Cette fatigue provoque alors la rupture des structures d'où l'importance de tenter de prédire la durée vie de la structure.

Le responsable de ces ruines est très souvent le phénomène de fatigue des matériaux, au caractère particulièrement insidieux puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiquement des pièces et des structures dans des zones souvent inaccessibles mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception.

L'expérience a montré que le dimensionnement des structures sous une sollicitation monotone ou au choc est insuffisant, vu que la majorité de ces structures sont soumises à des chargements cycliques d'où le phénomène de fatigue. Au cours de l'application de ces chargements, les caractéristiques mécaniques des matériaux changent à cause de la formation de microfissures qui se développent en macro fissure qui entraînent la rupture lorsqu'elles atteignent un certain niveau.

L'endommagement par fatigue est un phénomène connu depuis le 19^e siècle. Ce phénomène à été observé pour la première fois en 1829 par W.A.J Albert [2] sur des ruptures de convoyeurs de charbon. Les recherches sur la fatigue des matériaux métalliques ont eu depuis lors un intérêt croissant [3]. Les chercheurs ont pu découpler l'endommagement par fatigue en trois étapes distinctes.

- Une phase d'amorçage qui correspond à l'apparition des premières microfissures au sein du matériau.
- Une phase de propagation où les microfissures amorcées dans le matériau vont croître de façon stable.
- Une phase de rupture où les fissures ont atteint une taille instable et provoquent la rupture de la pièce ou de la structure.

II. APPROCHE DE LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

La rupture désigne la séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique, c'est-à-dire qu'elle est constante ou qu'elle varie peu avec le temps. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion.

La rupture ductile se caractérise par une vaste déformation plastique située à proximité d'une fissure qui se propage. Elle se déroule assez lentement, à mesure que s'allonge la fissure. Une telle fissure est dite stable, c'est-à-dire qu'elle résiste à tout allongement ne résultant pas d'un accroissement de la contrainte appliquée.

II.1 Différent modes de rupture

Il est convenu que le déplacement relatif des deux surfaces (les lèvres) de la fissure peut être découpé suivant trois modes de fissuration. En générale, il est considéré que la fissure tend à propager suivant le mode de fissuration qui facilite son ouverture, à savoir le mode I de fissuration (Figure 1.1).

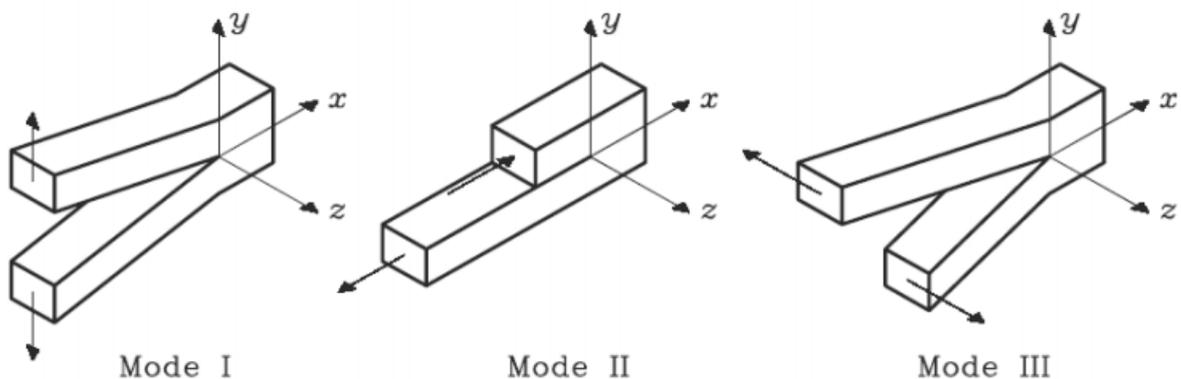


Figure 1.1. Les différents modes de fissuration.

- **Mode I :** Correspond à une ouverture dans la direction normale au plan des lèvres des fissures. Dans ce cas, les lèvres sont ouvertes mais non cisillées.
- **Mode II :** Correspond à un glissement des lèvres de fissures. Ce cas, les lèvres sont fermées mais cisillées.
- **Mode III :** est une combinaison des deux modes précédents. Le **Mode Mixte** est quant à lui exclu.

Dans le cas général, la surface de rupture se développe suivant une combinaison de ces trois modes. Notons que les ruptures brutales résultent souvent de la propagation des fissures en mode I (figure 1.1). C'est la raison pour laquelle la mécanique de la rupture s'intéresse plus particulièrement à ce mode.

II.2 Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure

Le champ des contraintes (équation 1.1) au voisinage de la pointe de fissure (figure 1.2) est donné dans le cadre de l'élasticité linéaire par l'équation de Westergaard [4].

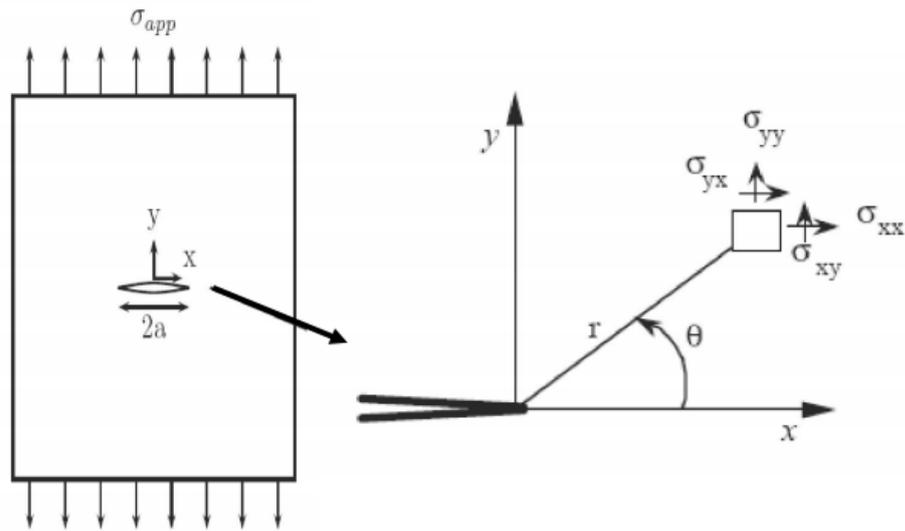


Figure 1.2. Fissure en mode I - Etat de contrainte au niveau de la pointe de la fissure.

Le champ de contrainte pour une plaque sollicitée en mode I est décrit par le système d'équations :

$$\begin{cases} \sigma_{xx}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xx}(\theta) = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{(DP)} \\ \sigma_{zz} = 0 \quad \text{(CP)} \end{cases} \quad (1.1)$$

Où K_I représente le facteur d'intensité de contrainte en mode I.

Le succès de la mécanique de la rupture provient de ce que les conditions à l'extrémité de la fissure dépendent de ce seul et unique paramètre (K). Au moment de la rupture, en particulier, K atteint une valeur critique K_C qui est donc toujours la même et par conséquent, caractéristique du matériau. K s'exprime en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

II.3 Zone plastique au niveau de la pointe de la fissure

La mécanique linéaire de la rupture prédise des contraintes infinies à l'extrémité d'une fissure aigue. Mais dans les métaux réels, les contraintes à l'extrémité d'une fissure restent finies car le rayon en fond de fissure n'est pas nul. Ces contraintes dépassent la limite élastique du matériau et une déformation plastique résultant, conduit à une relaxation des contraintes à l'extrémité de la fissure. La contrainte normale en contraintes plans en un point situé à une distance « r » de la pointe d'une fissure sollicité en mode I ($\theta = 0$) est égale à :

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1.2)$$

Irwin [5], sur l'hypothèse d'une zone plastifiée circulaire (figure 1.3), définit le rayon de la zone plastifiée par :

$$r_P = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \quad (1.3)$$

La taille et la forme de la zone plastifiée dépendent essentiellement de l'état de contraintes. Irwin propose pour un état de déformations planes la forme suivante :

$$r_P = \frac{K_I^2}{6\pi\sigma_y^2} \quad (1.4)$$

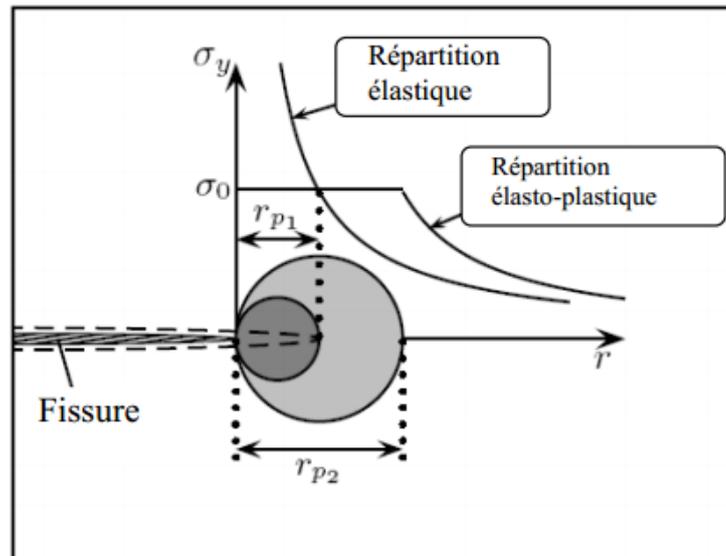


Figure 1.3. Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique).

III. GENERALITE SUR LA FATIGUE

III.1 Définitions du phénomène de fatigue

La fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Encore les zones critiques de la structure sont créées par une discontinuité de matériaux. Il est décrit comme un « phénomène mystérieux » pouvant se produire sans signes avant-coureurs. Les recherches sur la fatigue des matériaux métalliques ont eu depuis lors un intérêt croissant et partagé pour les industriels et les chercheurs du monde entier.

Pineau et Bathias [6] ont défini que *la fatigue ou endommagement par fatigue* est la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycle d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la ruine des pièces constituées avec ces matériaux.

En règle générale, la fatigue se produit avec une déformation plastique localisée autour des défauts présents dans les matériaux, à l'extrémité d'une fissure lorsque celle-ci s'est formée, et ne se produit pas avec une déformation d'ensemble (figure 1.4).

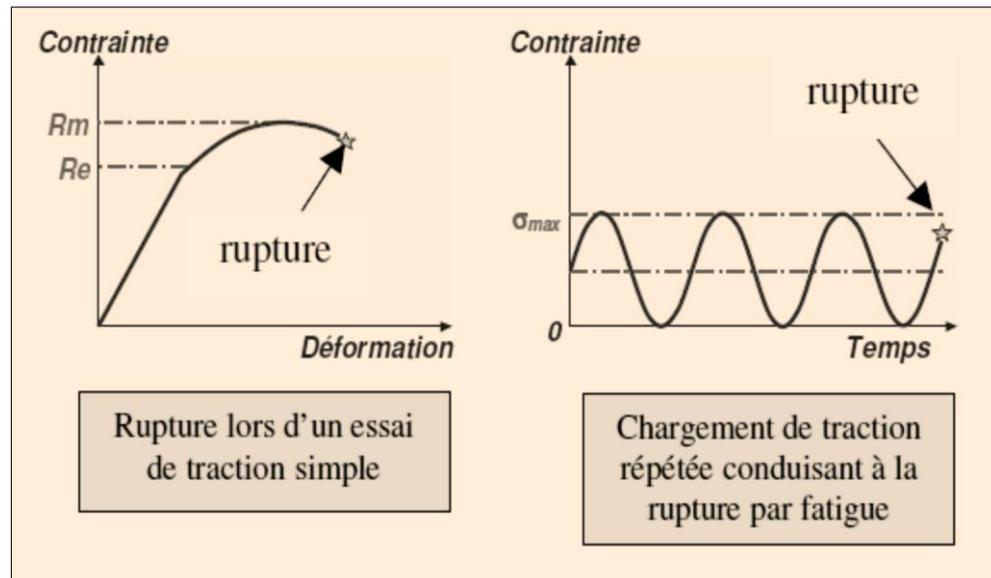


Figure 1.4. Définition de la fatigue [3].

Le cycle de contrainte de fatigue est défini par la contrainte maximale σ_{max} , la contrainte minimale σ_{min} , la contrainte moyenne σ_m et l'amplitude de la contrainte σ_a (figure 1.5). On en déduit :

- La contrainte moyenne σ_m est définie par :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.5)$$

- L'amplitude de contrainte σ_a est définie par :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.6)$$

- L'étendue de variation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (1.7)$$

- Un autre paramètre important qui sera décrit par la suite est le rapport de charge "R" caractérisant le chargement est défini par la relation :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.8)$$

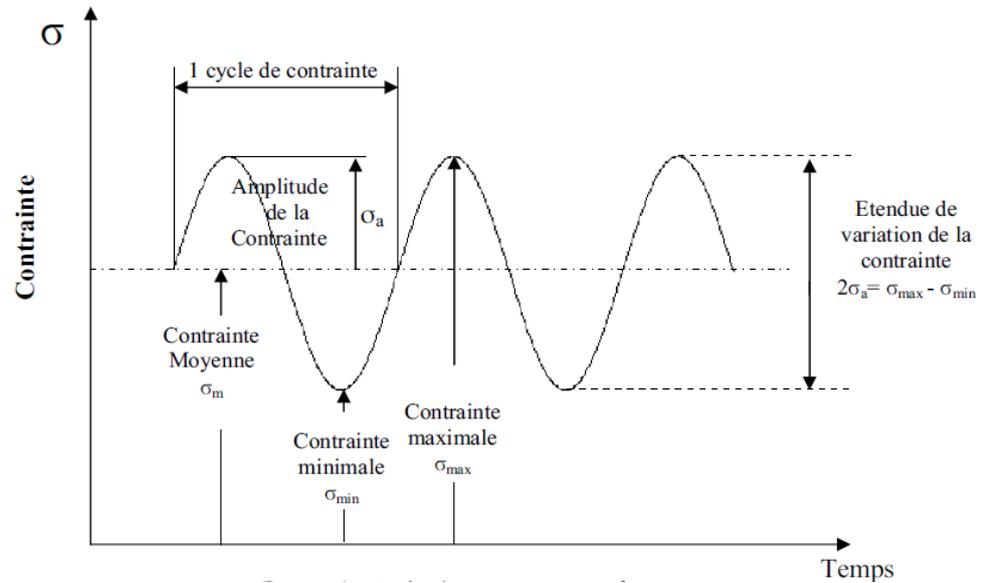


Figure 1.5. Cycle de contrainte en fatigue.

i. Types de cycle de contraintes en fatigue

Il existe autres formes des cycles des contraintes en fatigue et la figure 1.6 montre les différents types de cycle de contraintes appliquées :

- *Contrainte purement alternée* : contrainte qui varie entre des valeurs égales dans le sens positif et négatif. Pour ce cycle de contrainte $\sigma_m = 0$.
- *Contrainte alternée* : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes. Pour ce cycle de contrainte: $0 < \sigma_m < \sigma_a$.
- *Contrainte ondulée* : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive ou entre 0 et une valeur maximale négative. Pour ce cycle de contrainte : $\sigma_m = \sigma_a$.
- Contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe. Pour ce type de cycle : $\sigma_m > \sigma_a$.

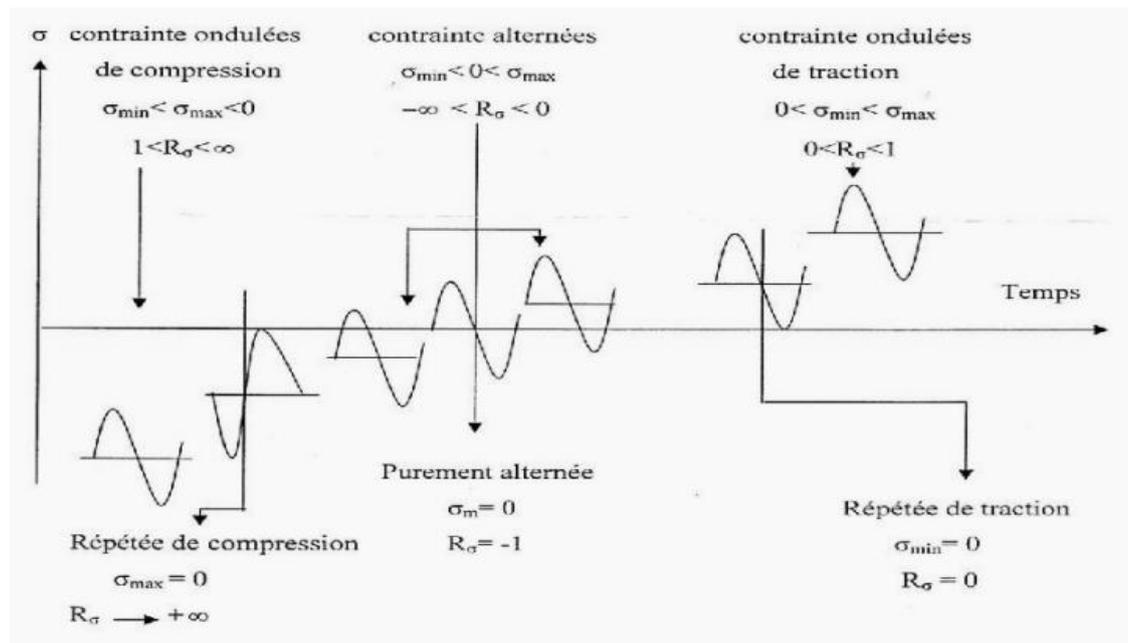


Figure 1.6. Les différentes formes de cycles de contrainte au cours d'essai de fatigue.

ii. Contraintes résiduelles

Au cours de la fabrication, de l'installation ou de l'entretien, le matériau peut être laissé dans un état tel que des contraintes agissent de manière permanente à l'intérieur du matériau. La contrainte résiduelle est appliquée de manière continue à l'intérieur du matériau durant toute la durée de vie de l'équipement. On peut pratiquer des ouvertures à la perceuse, souder ou plier les pièces pour appliquer des contraintes résiduelles dans un matériau. Une définition plus officielle suivra. La contrainte résiduelle est une tension ou une compression, qui existe dans le substrat du matériau en l'absence de l'application de charges externes (force appliquée, déplacement d'un gradient thermique).

Ces contraintes peuvent trouver leur origine dans différentes étapes de fabrication :

- Procédés impliquant des déformations plastiques (laminage, formage à froid, tournage, polissage...).
- Traitements thermiques (effet des différentiels de vitesse de refroidissement)
- Assemblages (chassage,...)
- Gradient de déformations plastiques autour de défauts (entailles, phases secondaires,...)

III.2 Processus du phénomène de fatigue

Lorsqu'une éprouvette ou une pièce donne lieu à une rupture par fatigue, la vie peut être décomposée en trois stades :

- Amorçage d'une fissure ;
- Propagation lente de cette fissure ;
- Propagation brutale conduisant à la rupture ;

Cet endommagement mené jusqu'à la ruine, il contient des durées variables suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations.

IV. DEFINITION D'AMORCAGE

Plusieurs définitions sont utilisées dans la littérature : variation de la rigidité de l'éprouvette, apparition d'une fissure de quelques microns, chute de la charge supportée par l'éprouvette [7]. La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures « courtes » mais la longueur seuil de fissure à laquelle l'amorçage se produit manque de définition uniforme. Plusieurs auteurs pensent que la phase d'amorçage d'une fissure de fatigue est de durée négligeable et qu'il existe des « petites » fissures de taille comparable à celle d'un défaut microstructural. Ces fissures se manifestent dès les premiers cycles de sollicitation [8].

IV.1 Mécanismes d'amorçage des fissures de fatigue

Bien que les défauts existent dans toutes les pièces soumises à la fatigue, irrégularités de surface ou inclusions, provoquant des concentrations de contrainte locales très élevées conduisant à la rupture rapide par formation de microfissures particulièrement dangereuses, ils ne sont pas les seuls sites d'amorçage des fissures. Dans de nombreux cas où le matériau est globalement soumis à des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité, il y a formation de bandes de glissement persistantes dans certains grains. Ces bandes de glissement peuvent donner lieu à des microfissures permanentes par formation d'intrusions et d'extrusions [9] ou par réunion entre elles. Le mécanisme de formation des intrusions et extrusions à la surface est illustré sur la (Figure 1.7).

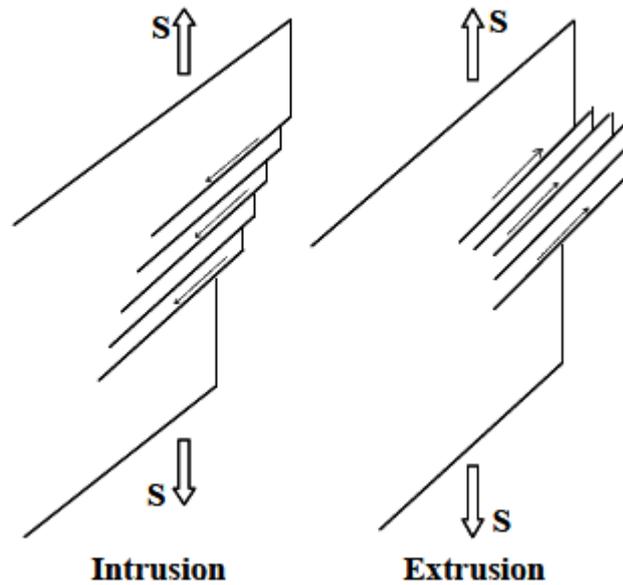


Figure 1.7. Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement.

La phase d'amorçage est très importante par rapport à la phase de propagation et représente plus de 90% de la durée de vie. La représentation des résultats en fatigue peut être réalisée suivant la méthode de :

IV.2 Diagramme d'endurance

Il existe de nombreuses courbes pour définir la durée de vie en fatigue d'un matériau. Ces courbes sont issues de campagnes d'essais et reflètent le comportement statistique du matériau. L'essai de fatigue le plus simple consiste à soumettre un lot d'éprouvettes non entaillées, à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude et de fréquence fixées, et à noter le nombre de cycles à la rupture N_R pour chaque éprouvette [6]. On obtient alors une courbe en échelle semi-logarithmique, appelée *Courbe d'endurance* ou *Courbe de Wöhler*, qui a l'allure représentée sur la figure 1.8.

Cette courbe est déterminée à partir d'un ensemble d'éprouvettes soumises chacune à un effort périodique d'amplitude maximale σ et de fréquence constante, la rupture se produisant au bout d'un nombre de cycles N_R . A chaque éprouvette correspond un point du plan (σ, N_R) . D'après la figure 1.8, la rupture est atteinte après un nombre de cycles qui croît quand la contrainte décroît. Les résultats des essais de fatigue sont répartis de façon statistique, de telle sorte que l'on puisse définir des courbes correspondant à des probabilités de rupture données selon l'amplitude de contrainte et le nombre de cycles.

On peut distinguer sur la courbe de Wöhler trois domaines :

- **Zone 1** : une zone à faible nombre de cycles ou zone de fatigue oligocyclique , sous forte contrainte, où la rupture qui intervient après un faible nombre de cycles, est précédée d'une déformation plastique significative ;
- **Zone 2** : une zone de fatigue ou fatigue polycyclique, où la rupture est atteinte après un nombre de cycles plus important, nombre qui croît lorsque la contrainte décroît ;
- **Zone 3** : une zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité sous faible contrainte, pour laquelle la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles généralement supérieur à 10^6 cycles pour les aciers et 10^7 cycles pour les alliages légers.

Dans de nombreux cas, on peut tracer une branche asymptotique horizontale à la courbe de Wöhler : l'asymptote étant appelée *limite d'endurance* ou limite de fatigue et notée σ_D . Par contre, dans certains cas, par exemple lorsqu'il y a simultanément fatigue et corrosion, il ne semble pas y avoir d'asymptote horizontale. On définit alors une limite conventionnelle d'endurance comme la valeur de la contrainte maximale qui ne conduit pas à la rupture avant un nombre de cycles fixés (par exemple 10^7 cycles).

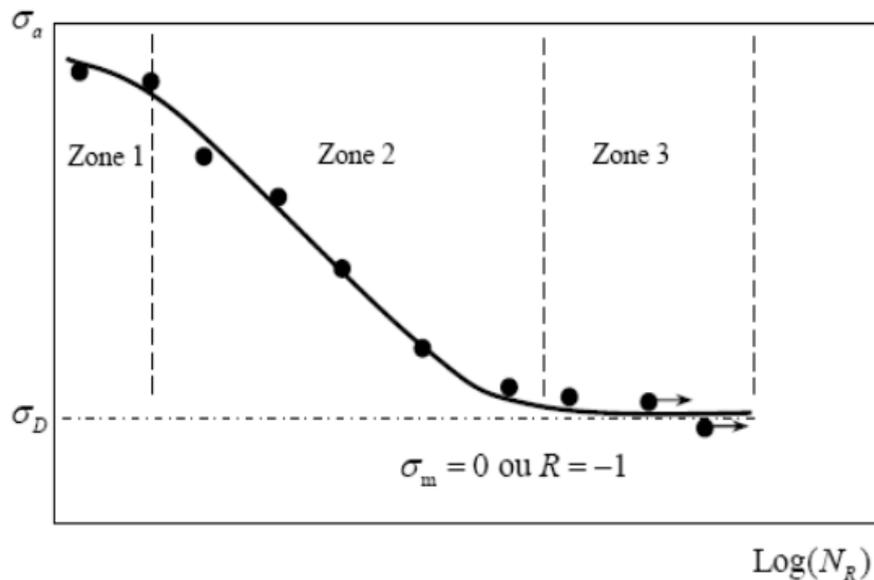


Figure 1.8. Courbe d'endurance (courbe de Wöhler).

La notion de limite d'endurance est donc relative; sa définition dépend du problème traité; par exemple, les limites d'endurance en traction et en torsion alternées sont différentes.

V. PROPAGATION D'UNE FISSURE DE FATIGUE

Le principe de base de cette démarche est qu'un corps contenant un défaut initial subit un endommagement progressif lorsque soumis à un chargement cyclique, même pour des niveaux de contraintes appliquées bien en deçà des limites statiques.

Au cours des cycles de fatigue, la microfissure initiale devient grande par rapport à la taille du grain, et les différentes microfissures vont coalescer. Une macro-fissure apparaît ainsi et sa direction est généralement imposée par les contraintes d'ouverture, maximum des contraintes principales de traction [10].

V.1 Domaines de fissuration par fatigue

Paris et plusieurs auteurs ont trouvés expérimentalement la relation entre le taux de propagation d'une fissure de fatigue da/dN et le facteur d'intensité de contrainte maximal K_{max} pour un chargement cyclique avec une charge minimale nulle [11].

Donc la mécanique de rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et brutale des fissures. Ces auteurs trouvés que la vitesse de fissuration pouvait s'écrire selon la formulation générale de la loi de Paris (Paris et al. '1963') :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.9)$$

Avec :

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (1.10)$$

Où N le nombre de cycles, ΔK la variation du facteur d'intensité de contrainte maximal K_{max} et minimal K_{min} au cours d'un cycle de chargement, est C et m sont des constantes de matériaux déterminées expérimentalement étudié.

Selon la courbe typique du taux de propagation da/dN en fonction du ΔK (en échelle logarithmique). On y distingue trois régimes de propagation (figure 1.9) :

- **Régime du seuil :** (régime I) On est dans le domaine des faibles vitesses de fissuration. Caractérisé par le seuil de propagation ΔK_{seuil} en dessous duquel les fissures longues ne se propagent pas.

- **Régime de Paris :** (régime II) C'est un régime intermédiaire dans lequel la loi de Paris (éq.1.9) est valable. Le taux de propagation dans cette région peut être influencé notamment par le rapport de charge R . (éq.1.11) :

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (1.11)$$

- **Régime de propagation accélérée :** (régime III) C'est un domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en points de fissure. Les vitesses de propagation sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce. Où K_{max} atteint la ténacité K_{Ic} du matériau.

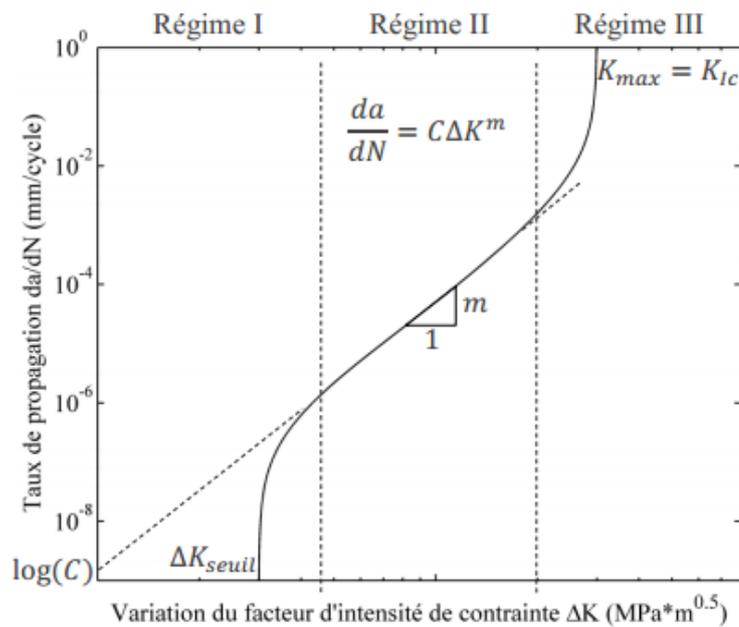


Figure 1.9. Les différents régimes de la fissuration.

V.2 Modèle de propagation d'une fissure de fatigue

V.2.1 Introduction

Une variété de modèles ont été proposés pour prédire la durée de vie et la vitesse de fissuration « da/dN » sous différentes conditions. Dans cette partie on présente les modèles de prédiction de la durée de vie sous chargement à constante et sans effet du rapport de charge R . Parmi les plus reconnus, on note :

a. Modèle de Paris

Pour les matériaux à comportement élastique, Paris [11] a proposé d'utiliser la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK pour décrire la croissance stable des fissures par fatigue en élasticité linéaire (domaine II).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.12)$$

Cette démarche empirique est justifiée dans le cas où il n'y a pas de fermeture à la pointe de la fissure ni d'émoussement. La loi proposée par Paris ne décrit pas la totalité de la courbe de propagation; cependant, d'autres lois empiriques ou analytiques ont été proposées pour décrire l'ensemble de la courbe de propagation.

b. Modèle de Walker

La principale limite de la loi de Paris est son incapacité à prendre compte de l'effet du rapport de charge. Cet inconvénient a été notifié par Walker [12] afin d'améliorer le modèle de Paris en incluant l'effet du rapport de charge. Walker a proposé le paramètre $\overline{\Delta K}$, qui est équivalent au facteur d'intensité de contrainte à $R=0$ et qui provoque la même vitesse de propagation au K_{max} réelle, et la combinaison du rapport R . Elle est exprimée par la relation suivante (équation.1.13) :

$$\overline{\Delta K} = K_{max}(1 - R)^{\gamma_w} \quad (1.13)$$

Où $\Delta K_{max} = \Delta K/(1 - R)$ et l'équation (1.13) devient :

$$\overline{\Delta K} = \Delta K/(1 - R)^{1-\gamma_w} \quad (1.14)$$

Par conséquent, la loi de Walker est représenté par :

$$\frac{da}{dN} = C_w \left(\frac{\Delta K}{(1 - R)^{1-\gamma_w}} \right)^{m_w} \quad (1.15)$$

Pour $R = 0$, l'équation (1.15) est écrite sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C_w (\Delta K)^{m_w} \quad (1.16)$$

Les paramètres C_w et m_w sont respectivement équivalents aux paramètres C et m de la loi de Paris. Le modèle de Walker permet de tenir compte du rapport de charge R au prix d'une constante supplémentaire (γ_w).

c. Modèle de Forman

Forman [13] a amélioré le modèle de Walker en suggérant un nouveau modèle dont est capable décrire la région III de la courbe de la vitesse de propagation et inclut l'effet de rapport de charge. La loi de Forman est donnée par :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1 - R) \cdot (K_{IC} - K_{max})} \quad (1.17)$$

Cette loi ne semble pas décrire convenablement le comportement des aciers ou l'effet du rapport R est généralement moins marqué. On remarque, que dans la relation précédant, le rapport da/dN tend vers l'infini quand K_{max} tends vers K_{IC} . De plus, cette relation ne tient pas compte de l'existence d'un seuil de fissuration.

Des modifications du modèle de Forman ont été proposées par Hartman et Schijve [14] afin de tenir compte du facteur d'intensité de contrainte seuil ΔK_{th} (région I). Le modèle modifié est représenté par l'équation (1.18).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K - \Delta K_{th})^m}{(1 - R) \cdot K_{IC} - \Delta K} \quad (1.18)$$

Où

ΔK : désigne la variation du facteur d'intensité de contrainte.

C et m : sont des constantes propres au matériau et à l'environnement considéré.

R : rapport de charge.

d. Modèle de McEvily

En 1974, McEvily [15] a proposé un modèle relie la propagation de la fissure par cycle dans le mode de striation en fonction de l'ouverture de la fissure où l'effet seuil (ΔK_{th}) est inclut (équation 1.19).

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \quad (1.19)$$

Une modification de ce modèle a été proposée afin de tenir compte de l'effet du rapport de charge R et de la zone de propagation instable.

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left(1 + \frac{\Delta K}{K_c - K_{max}} \right) \quad (1.20)$$

L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil ΔK_{th} est exprimée par la relation (1.21) :

$$\Delta K_{th} = \frac{1.2(\Delta K_{th0})}{1 + 0.2 \left(\frac{1+R}{1-R} \right)} \quad (1.21)$$

e. Modèle de Zheng

Zheng and Manfred [16] a élaboré un modèle de propagation en expliquant l'émoussement en pointe de la fissure contrairement aux travaux Lal et Weiss [17]. Le modèle décrit par l'équation dépend de la résistance à la rupture σ_f et coefficient de ductilité ε_f ainsi que du facteur d'intensité de contrainte maximale K_{max} et du facteur d'intensité de contrainte seuil K_{th} .

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{2\pi E \sigma_f \varepsilon_f} (K_{max} - K_{th})^2 \quad (1.22)$$

f. Modèle de Wang

Wang et al. [18] ont proposé une théorie de cumul de dommages où ils considèrent le composant plastic de l'intégral J comme un facteur d'endommagement résultant d'une formulation simple de la propagation des fissures de fatigue. Ils ont montré que la vitesse de propagation de fissure ne dépend pas seulement ΔK mais elle dépend de la valeur moyenne de la résistance à la rupture et de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte effective dans la région II et III. Le modèle ainsi développé est donné par l'équation (1.23) :

$$\frac{da}{dN} = \alpha \frac{K_{max}^4}{\bar{\sigma}_y^2} \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - \frac{1}{1 - (R\xi)^2} \right] \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - (R\xi)^2}} \right]^2 \quad (1.23)$$

Où :

$$\xi^2 = \frac{K_{max}^2}{2K_{eff}} \quad (1.24)$$

$$K_{max} = \sigma_y \sqrt{\sigma \cdot a} \quad (1.25)$$

α : Constante dépendant du matériau

σ_y : Résistance local à la rupture

$\bar{\sigma}_y$: Résistance locale moyenne à la rupture

V.2.2 Modèle basé sur la fermeture de fissure

i. Modèle d'Elber

Elber [19, 20] a suggéré qu'une fissure de fatigue peut se fermer sous une charge de traction appliquée à une distance de la zone de contraintes résiduelles de compression laissées dans le sillage de la pointe de la fissure. La figure (1.10) illustre le concept de fermeture de fissure induit par plasticité. La zone plastique développée au niveau de la pointe de la fissure participe à la fermeture de la fissure.

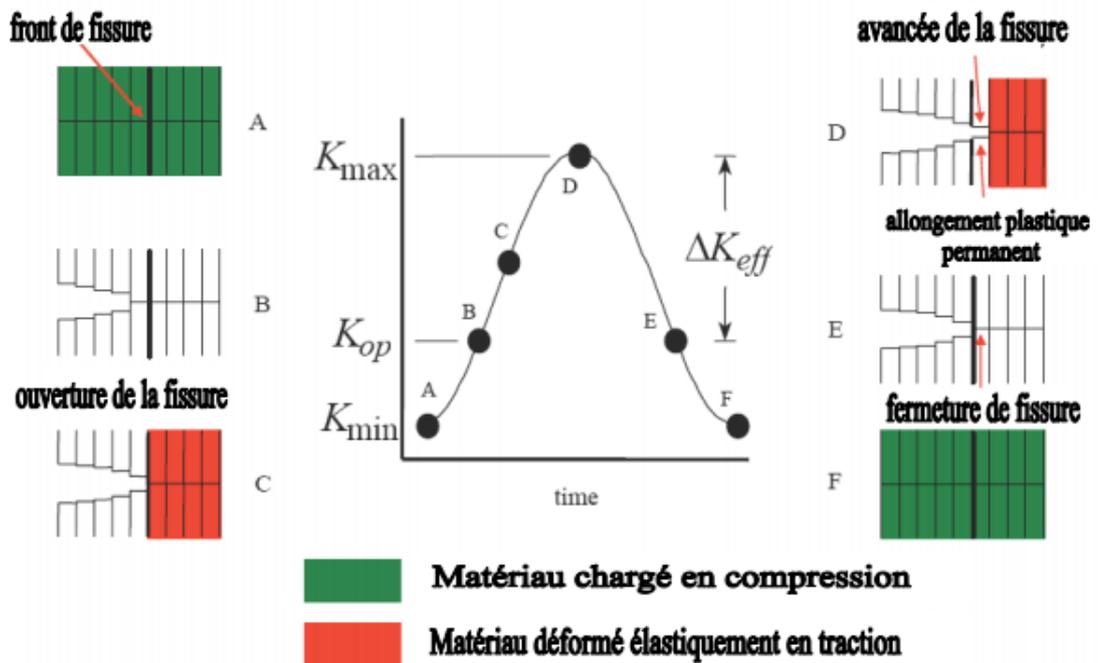


Figure 1.10. Principe d'ouverture et de fermeture de la fissure.

La vitesse de fissuration est exprimé par :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad (1.26)$$

Où :

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{Op} \quad (1.27)$$

C et m sont des paramètres expérimentaux du modèle d'Elber.

Le facteur d'intensité de contrainte peut être exprimé par la fonction $U(R)$.

$$\Delta K_{eff} = U(R) \Delta K \quad (1.28)$$

Avec :

$$U(R) = \frac{K_{max} - K_{ouv}}{K_{max} - K_{min}} \quad (1.29)$$

La fonction $U(R)$ a fait l'objet de plusieurs études. Elber [19] fut le premier à déterminer la fonction $U(R)$ pour l'alliage d'aluminium 2024-T351 dans un état de contrainte plane :

$$U(R) = 0.5 + 0.4R \quad (-0.1 \leq R \leq 0.7) \quad (1.30)$$

ii. Modèle NASGRO

L'élaboration de modèles de propagation a pris une grande vitesse afin de tenir compte de plusieurs paramètres et conditions imposés de service ou de laboratoire qui agissent sur la propagation des fissures. Les paramètres qui agissent peuvent être classés en deux catégories à savoir :

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau : module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgiques du matériau.
- Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, différemment de la nature du matériau étudié : température, fréquence, environnement, dimensions des éprouvettes, rapport de charge...etc.

Le modèle NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été développé par Forman et al [21]. Pour tenir compte de toute la courbe de propagation. L'équation NASGRO est écrite sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (1.31)$$

" f " représente la contribution de la fermeture de la fissure. Les paramètres C , n , p , q sont déterminés expérimentalement, ΔK_{th} est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil pour des charges à amplitudes constantes. K_{max} et K_{crit} sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique.

VI. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique sur le comportement en fatigue. Dans la première partie on a présenté l'approche de la mécanique linéaire de la rupture avec ces différents modes de rupture, la distribution des contraintes et les zones plastiques au niveau de la pointe de la fissure, ensuite on a présenté les généralités sur le phénomène de fatigue et le comportement en fissuration par fatigue des matériaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE I

- [1] A. Berrehili. "Comportement cyclique et tenue en fatigue sous chargement multiaxial d'un polyéthylène : expériences et critère d'endurance". Thèse de doctorat, Université de Poitiers, (2010).
- [2] W.A.J. Albert. "Uber treibseile am harz". Archiv für Mineralogie, Geognose. Bergbau und Hüttenkunde , 10, (1837), pp. 215-234.
- [3] W. Schutz. "A history oh fatigue". Engineering Fracture Machines 54(2), (1996), pp. 263-300.
- [4] H.M. Westergaard. " Bearing pressures and cracks ". Transactions ASME, Journal App. Mech., A 49, (1939).
- [5] G. R. Irwin. " Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate ". Journal of Applied Mechanics, 24, (1957), pp. 361-364.
- [6] A. Pineau, C. Bathias. " Fatigue des matériaux et structures 1 " : introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique, édition Lavoisier. (2008), pp. 24-29, pp. 85-87.
- [7] F. Nguedjio. " Amorçage des fissures de fatigue et probalisation ". Calvin université de technologie de Compiègne mécanique appliquée et matériaux, (1989).
- [8] N. Gérard. " Etude du comportement des fissures courtes au fond d'une entaille mécanique sous sollicitation en fatigue ". Thèse de doctorat, Université françois-rabelais (tours), vol. 1, (2003).
- [9] P. Coppin. " Amorçage et propagation des fissures courtes dans un alliage d'aluminium lithium ". Thèse de doctorat, École centrale Paris, 1991.
- [10] A. Guedri. " Conception et simulation numérique des caractéristiques mécaniques des pipelines ". Thèse de doctorat, Université de Annaba, (2008).
- [11] P.C. Paris, M.P. Gomez, and W. E. Anderson. " A rational analytic theory of fatigue ". The Trend in Engineering, vol. 13, (1961), pp. 9-14.
- [12] E.K. Walker. " The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: Effect of environment and complex load history

- on fatigue life “. ASTM STP 462. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, (1970), pp.1–14.
- [13] Forman, R. G. “ Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory “. *Engineering Fracture Mechanics* 4(2), (1972), pp. 333–345.
- [14] A. Hartman, and J. Schijve. “ The effects of environment and load frequency on the crack propagation law for macro fatigue crack growth in aluminum alloys “. *Engineering Fracture Mechanics*, 1(4), (1970), pp. 615-631.
- [15] McEvily, A.J. “ Phenomenological and microstructural aspects of fatigue “. Third International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Cambridge, England; published by The Institute and The Iron and Steel Institutes, Publication, W36, (1974), pp. 204-213.
- [16] Zheng, Xiulin, A. Manfred. “ Fatigue crack propagation in steels “. *Engineering Fracture Mechanics*, 18(3), (1983), pp. 965-973.
- [17] Lal. D.N, and V. Weiss. “ A notch analysis of fracture approach to fatigue crack propagation “. *Metallurgical Transactions*, 9A, (1978), pp. 413-425.
- [18] Wang, Wei and Cheng Thomas, 1994. “ Fatigue crack growth rate of metal by plastic energy damage accumulation theory “. *Journal of Engineering Mechanics*, 120 (4), (1994), pp. 776-795.
- [19] Elber, W. “ Fatigue crack closure under cyclic tension “. *Engineering Fracture Mechanics* 2, (1970), pp. 37-45.
- [20] W. Elber. “ The significant of fatigue crack closure “. In: *Damage tolerance in aircraft structures*, ASTM STP 486. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, (1971), pp. 230-242.
- [21] R.G. Forman, S. R. Mettu. “ Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy “. *Fracture Mechanics 22nd Symposium*, vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Ernst, A. Saxena, D.L. Mc Dowell, eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1992), pp. 519–46.

CHAPITRE 02 :

*Défauts dans les joints de
soudure*

I. INTRODUCTION

Le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Depuis les premières applications, les soudeurs sont dans la pratique, confrontés aux déformations engendrées par les soudures et ont appris à les prévoir, pour les compenser et produire des ensembles de forme "convenable". L'ampleur des déformations leur laissait à penser qu'un état de contrainte important devait être développé, et intuitivement ils avaient admis que dans le sens longitudinal de la soudure, les contraintes pouvaient atteindre la limite d'élasticité de la zone fondue, tandis que dans le sens transversal, leur niveau devait être en rapport avec l'intensité du bridage de retrait. Le développement des moyens de mesure des contraintes en surface, est venu peu à peu confirmer leurs estimations.

Certes, l'implication des contraintes dans divers processus de fissuration, lors de l'exécution des soudures, était connue, de même que dans celui de la rupture brutale des soudures fragiles, mais les soudeurs s'étaient accommodés d'évaluations qualitatives. Par souci de sécurité, la réglementation des récipients à pression avait simplement prescrit la relaxation complète par traitement thermique partout où le risque pouvait exister.

Ce n'est qu'à l'avènement de la mécanique de la rupture que les mécaniciens sont indiqués aux soudeurs que la connaissance exacte du champ des contraintes propres dans l'épaisseur de la soudure, était nécessaire pour améliorer la prévision du comportement des assemblages en fatigue et à la rupture brutale, alors que simultanément, le développement du calcul numérique ouvrait des perspectives pour atteindre cette connaissance.

Des besoins ont été alors exprimés:

- Une évaluation de la nocivité réelle des défauts des soudures pour atteindre un degré d'acceptation,
- Une amélioration des règles de prévision des comportements à rupture pour éviter la pratique excessive de l'ajout systématique au chargement d'une contrainte résiduelle positive égale à la limite d'élasticité,
- Une révision des règles de relaxation des contraintes qui grèvent le coût de fabrication.

Ces évolutions ne peuvent être menées que dans une connaissance du champ des contraintes réel dans un certain nombre d'assemblages types.

Enfin, les soudeurs ont ressorti leur ancienne préoccupation jamais suffisamment satisfaite, de la prévision des déformations d'une soudure à partir de ses caractéristiques.

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés [1].

II. DEFINITIONS

II.1 Définitions du soudage

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Actuellement le soudage est utilisé dans presque tous les domaines, dans la fabrication et les assemblages métalliques et on soude presque la totalité des métaux existants et ceci de 0.01mm à 100mm d'épaisseur, en utilisant plusieurs procédés.

II.2 Parties constitutives d'un joint soudé

Nous distinguons plusieurs parties (figure 2.1) :

- Métal de base (M.B) : métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou dissemblables.
- Métal d'apport : non nécessaire dans tous les cas, c'est le métal ajouté par fusion au joint à réaliser. La masse du métal d'apport ainsi ajoutée se nomme métal déposé.
- Bain de fusion : dans les soudures par fusion, le bain est formé du métal de base seul (lorsque la soudure est effectuée sans métal d'apport) ou du mélange de métal de base et de métal d'apport à l'état liquide. Le métal composant le bain de fusion, prend après solidification, le nom de métal fondu et le volume qu'il occupe est nommé zone fondue.

- Zone affectée thermiquement : la (ZAT) est la partie du métal de base non fondue [2], mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage.
- Zone de liaison : zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement; en quelque sorte, c'est la limite entre le métal fondu et solidifié, et le métal resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage.
- Pénétration : profondeur sur laquelle s'est étendue la fusion dans le métal de base.
- Passe : trajet parcouru le long du joint pour fondre les bords du métal de base et s'il y a lieu, déposer le métal d'apport. Le résultat d'une passe est un cordon de soudure. Dans la pratique, on emploie souvent le mot «passe» pour désigner un cordon; c'est la raison pour laquelle une soudure comportant plusieurs cordons est une soudure multi passe. La première passe déposée prend le nom de passe de fond (racine). Les passes suivantes étant des passes de remplissage. Enfin les dernières soudures sont appelées passes de finition.
- Endroit d'une soudure : côté par lequel la majeure partie de la soudure a été effectuée. L'envers est le côté opposé ; il comporte la racine de la soudure dans le cas des soudures sur bords droits et sur chanfrein simple.
- Soudure avec reprise à l'envers : une soudure est dite avec reprise à l'envers lorsqu'on y dépose un cordon par une passe à l'envers. Il comporte la racine de la soudure dans le cas des soudures sur chanfrein simple.
- Raccordement : limite extérieure entre le métal fondu et le métal de base, soit à l'endroit, soit à l'envers de la soudure.

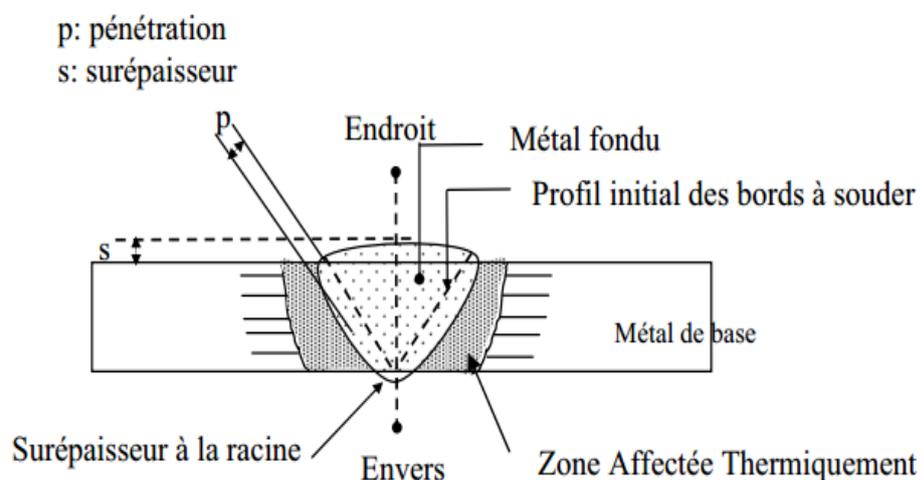


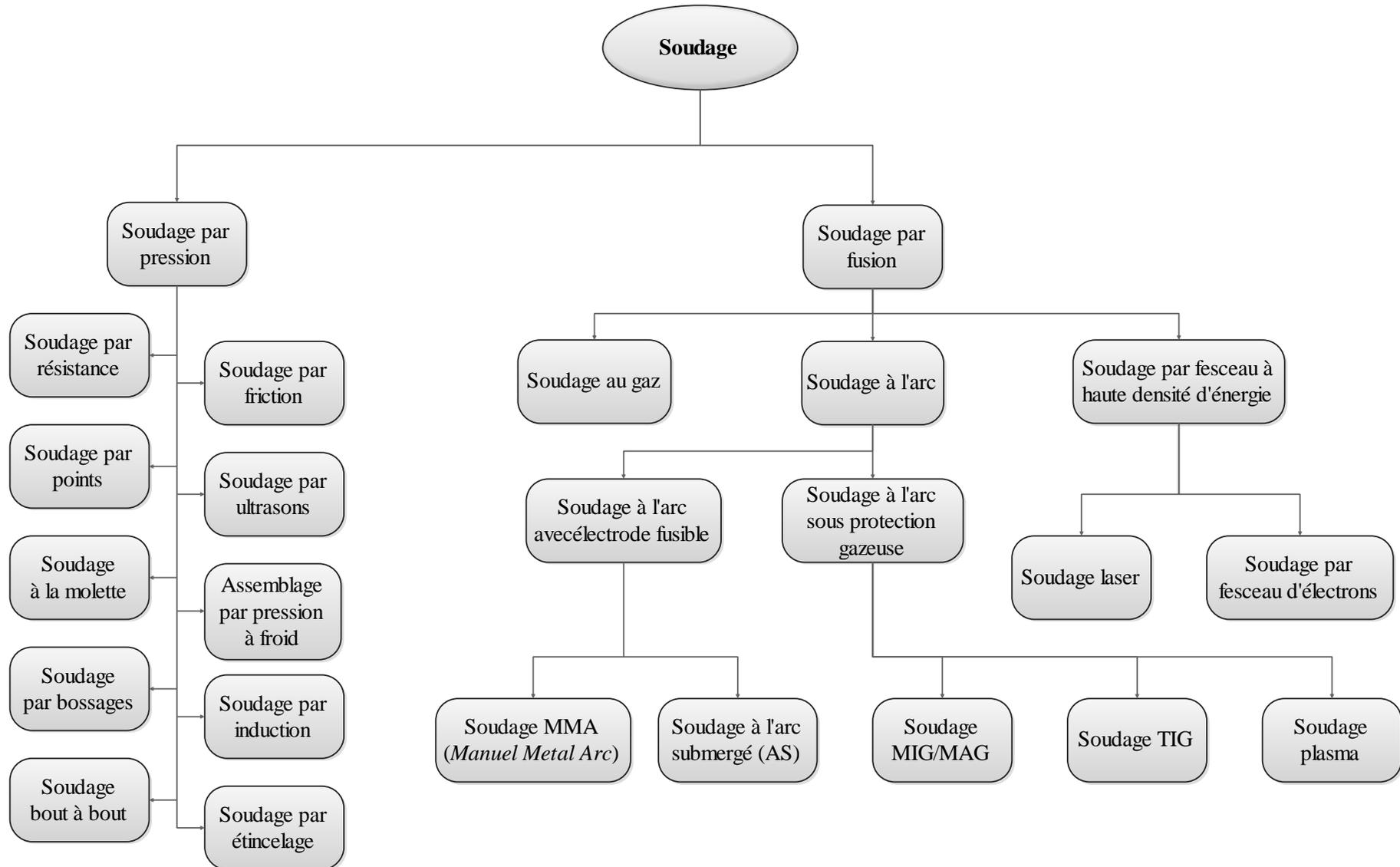
Figure 2.1. Soudure bout à bout sur chanfrein en V.

II.3 Procédés de soudage

Il existe un très grand nombre de procédés de soudage, dont les principes sont très différents [3]. Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler ; pour d'autres, la continuité métallique est obtenue à froid par effet purement mécanique. Entre ces deux modes extrêmes de soudage, par fusion ou à froid, il existe des modes intermédiaires combinant les effets mécaniques et calorifiques pouvant être obtenus à partir de sources d'énergie très variées : chimique, électrique, de radiation, etc. Chaque procédé possède un domaine d'application plus ou moins étendu, mais aucun ne supprime complètement les autres.

La nature de l'énergie mise en œuvre est un moyen commode pour classer les divers procédés de soudage, dont les plus courants apparaissent au *Tableau 2.1* [4].

Tableau 2.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.



II.4 Notion de soudabilité

À la lueur des modifications susceptibles d'être observées au cours du soudage, des notions de soudabilité sont à introduire. En réalité le terme soudabilité est à considérer selon divers niveaux distincts.

➤ Soudabilité opératoire

Il s'agit de l'aptitude physique que présente le matériau considéré à assurer la continuité (métallique) par le biais de la solidification ou de la diffusion retenue comme mode d'obtention au travers du procédé mis en œuvre. L'exemple typique d'un problème de soudabilité opératoire est celui généré par la présence d'une couche d'oxyde réfractaire et résistante à la surface de certains métaux et alliages (Al et Mg par exemple), qui empêche la diffusion et crée une solution de continuité lors de la solidification.

➤ Soudabilité locale

Cette notion fait intervenir l'altération des propriétés du matériau au voisinage même de la liaison soudée (ZF – ZL – ZAT) par suite du cycle thermique, mécanique ou thermomécanique induit par le mode opératoire de soudage (MOS) mis en œuvre. L'exemple typique d'un problème de soudabilité locale est celui de la trempe martensitique en soudage d'acier trempant, conduisant en ZL et ZAT à la création d'une zone de fragilité éventuellement excessive et sensible à la fissuration.

➤ Soudabilité globale

Cette notion prend en compte les modifications du comportement global de construction soudée qui se trouve affecté par :

- La sensibilité à la fissuration (à froid ou à chaud),
- La présence de contraintes résiduelles.

L'archétype de la soudabilité globale est, dans le cas des aciers non austénitiques, le problème de la rupture fragile.

III. Différents types d'assemblages soudés

III.1 Introduction

L'assemblage soudé sert à transmettre des efforts entre des membrures ou des pièces jointes par soudage. Les forces et les tensions introduites en différents points d'une structure sont transmises aux surfaces, et aux membrures à travers la soudure. Le type de sollicitation en service a une influence sur la conception du joint soudé.

La méthode de soudage choisie peut nécessiter la préparation d'un chanfrein, qui sera usiné par coupage thermique, au chalumeau oxyacétylénique, au plasma, au laser ou par usinage mécanique. La soudure se fait par fusion des bords, sans ou avec peu de métal d'apport. De même en angle, les pièces sont généralement assemblées sans chanfrein, mais utilisant un métal d'apport. Le plus souvent une préparation chanfreinée est nécessaire pour assurer les caractéristiques et la résistance de l'assemblage.

i. Assemblage bout à bout

Un assemblage bout à bout correctement exécuté assure une parfaite continuité géométrique de la matière. Son comportement aux sollicitations de tous types est bon. La présentation des bords à assembler nécessite des soins particuliers pour assurer l'alignement et l'écartement des éléments, lors de la préparation des joints à soudure, afin de permettre la bonne exécution de la soudure. Généralement, pour les épaisseurs à 4 ou 5 mm la préparation des bords est chanfreinée (figure 2.2-a).

ii. Assemblage en coin

On rencontre cet assemblage dans la reconstitution de caisson. L'assemblage de ce type (figure 2.2-b), est particulièrement difficile à réaliser. La tolérance sur le jeu entre les deux pièces doit être sévère. Lorsque le jeu est trop important, il y a effondrement du bain de fusion.

iii. Assemblage à bords relevés

Cette préparation convient pour l'assemblage de tôles de faible épaisseur sans métal d'apport (figure 2.2-c).

iv. Assemblage en T

Cet assemblage est surtout utilisé pour la fixation des raidisseurs sur les panneaux, sur la préfabrication des profilés reconstitués et dans les pièces mécano-soudées (figure 2.2-d).

v. Assemblage à clin ou à recouvrement

Les tôles à assembler sont facilement accostées l'une sur l'autre (figure 2.2-e).

vi. Assemblage avec couvre-joints

Cette préparation convient pour l'assemblage des pièces peu sollicitées. L'accostage est facilité dans le cas des joints de chantier (figure 2.2-f).

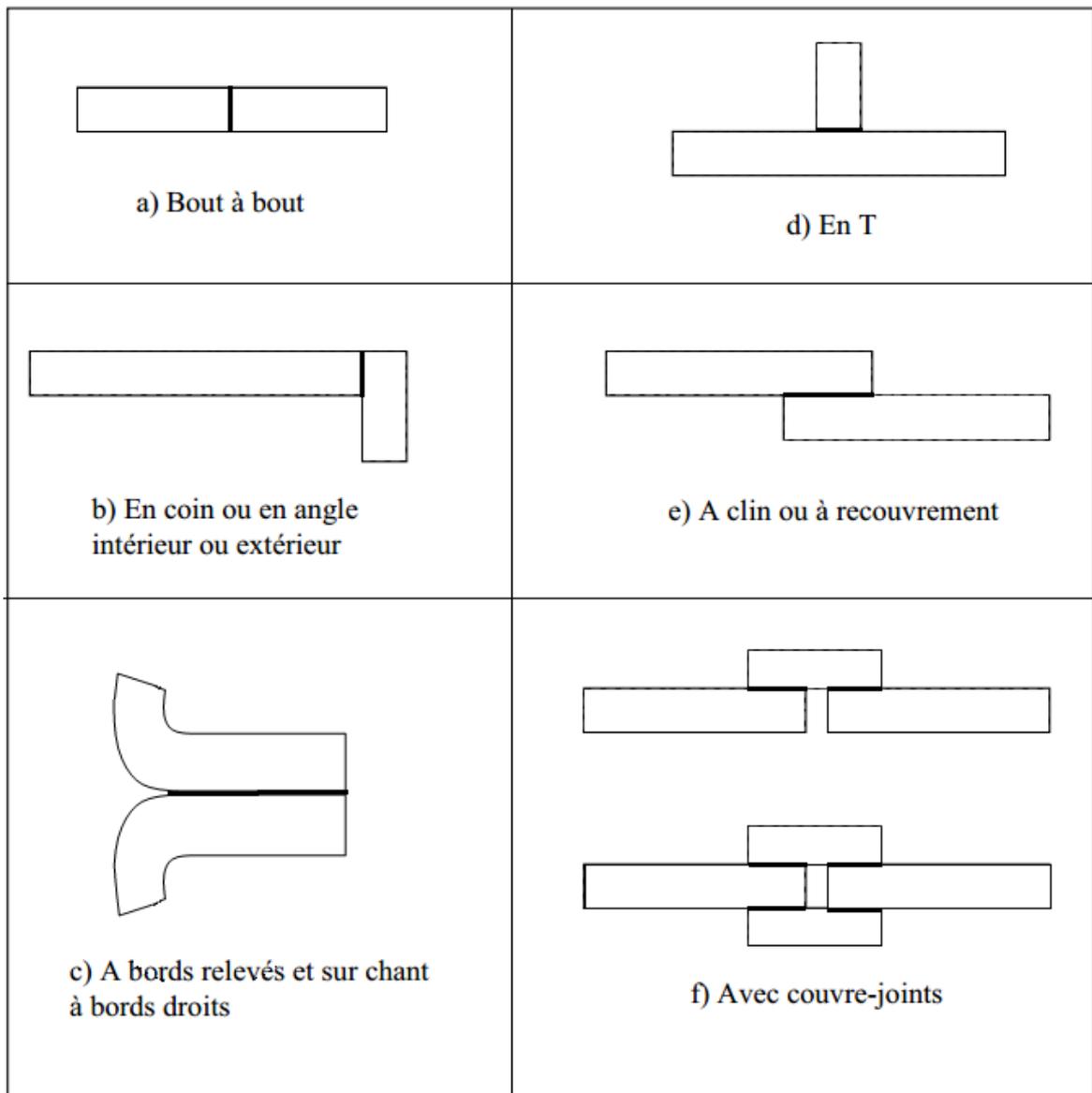


Figure 2.2. Types d'assemblages soudés.

III.2 Qualité des assemblages

La qualité d'un cordon de soudure s'apprécie vis-à-vis de sa conformité par rapport à un cahier de charge imposé à l'assemblage final. Il peut s'agir d'une exigence de tenue mécanique, d'étanchéité, ou de tenue à la corrosion. La qualité s'apprécie de manière globale à d'essais en

sollicitant l'assemblage complet ou des éprouvettes réalisées dans les mêmes conditions opératoires, et/ou en observant de façon très fine cet assemblage à l'aide de contrôles non destructifs ou destructifs. Et dans le paragraphe suivant, nous présenterons quelques défauts possibles dans le soudage.

IV. Défauts des joints soudés

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Cette partie vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé [5]. Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

On peut classer les défauts des joints soudés en fonction de leur géométrie, de leur position dans la soudure et de leur origine, Nous distinguons plusieurs types de défauts :

1. Fragilité produite par la ségrégation

Le soudage implique généralement le chauffage local du métal. Il s'agit d'un traitement thermique local. Il y a donc une modification locale de la microstructure et de l'état métallurgique de la zone du métal affectée par le chauffage (ZAT). En effet, le cycle de température inhérent au soudage perturbe les conditions d'équilibres et les propriétés telles qu'elles existaient à la livraison du matériau.

Le chauffage active un certain nombre de mécanismes, notamment la diffusion des atomes. Il se produit un phénomène appelé *ségrégation* : le métal n'étant pas pur, les atomes étrangers (impuretés, éléments d'alliage) migrent vers les joints de grain. Ceci peut entraîner une fragilisation des joints de grain, et faciliter la rupture fragile inter-granulaire.

2. Corrosion du cordon de soudure

La soudure est la juxtaposition de deux métaux différents. On peut donc avoir un phénomène de corrosion galvanique. Ce défaut peut se présenter dans le cas du soudage hétérogène d'un assemblage mal conçu, sous réserve de la présence d'un électrolyte. De plus, on peut également voir apparaître un phénomène de corrosion inter-faciale, peut être rencontré lors de la ségrégation du Bore aux joints de grains dans les bases Nickel ou lors de la ségrégation du Carbone aux joints de grains dans les aciers inoxydables.

3. Porosités

La porosité est un nom collectif décrivant des cavités ou des pores provoqués par le gaz et occlusion matérielle non métallique en métal fondu pendant la solidification (figure 2.3). Il y a beaucoup de causes qui incluent la contamination, arc protégeant et instable insatisfaisant, espace d'arc technique trop courte et pauvre de soudure en général. La porosité peut être réduite au minimum de beaucoup de différentes manières par le choix approprié des électrodes et/ou des matériaux de remplissage, des techniques de soudure améliorées, plus d'attention à la zone de manœuvre pendant la préparation de soudure et une vitesse plus réduite d'accorder le temps de gaz de s'échapper.

Les effets de la porosité sur l'exécution dépendent de la quantité, de la taille, de l'alignement, et de l'orientation aux efforts. Une fois groupée au centre de la soudure, la porosité n'est pas considérée un instigateur dangereux de fatigue, ou nuisible à la résistance de fatigue, bien qu'elle puisse réduire la capacité de charge d'effort statique de la soudure.



Figure 2.3. Porosités débouchantes en surface de cordon de soudure.

4. Soufflures

Ce terme désigne un groupe de porosités non débouchantes. Allongées, on parle de soufflures vermiculaires. Si elles sont débouchantes, on parle alors de piqûres (figure 2.4).

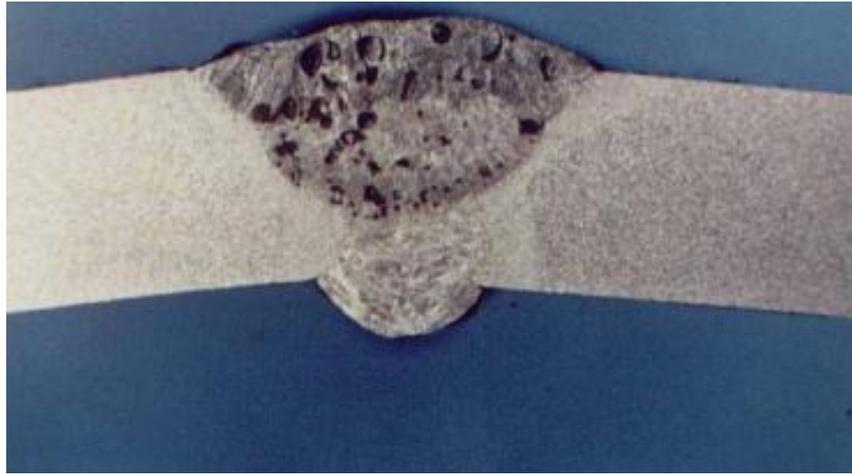


Figure 2.4. Macrographie d'une soudure avec soufflures.

5. Inclusions

Des inclusions sont produites par le matériel étranger tel que la pièce devenant d'inclusions de scories, de tungstène (cas du soudage TIG), de sulfure et d'oxyde de la soudure. Ces défauts sont souvent associés au dégagement, à la pénétration inachevée et au manque de fusion en soudures (figure 2.5). Le nettoyage insuffisant entre le multipassage en machine soude et la manipulation incorrecte de courant et d'électrode peut laisser des scories et les sections non fixées le long de la soudure joignent. Les inclusions de scories non seulement réduisent la force de section du joint mais peuvent servir de point de déclenchement à la fissuration sérieuse. Ce défaut peut seulement être réparé en rectifiant vers le bas ou en gougeant dehors et le ressoudée.

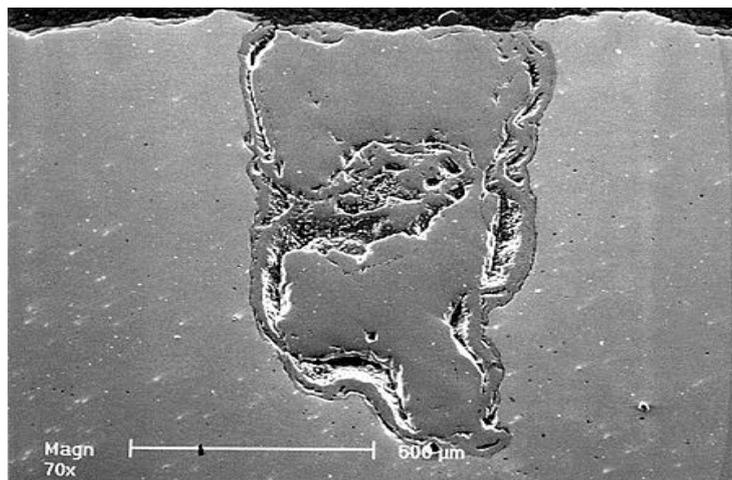


Figure 2.5. Inclusion d'une soudure MAG.

6. Retassures

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (figure 2.6). Certaines retassures

ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une **retassure à la racine** apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une **retassure de cratère** est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

Comme il existe la crique de solidification et c'est le même défaut que les retassures sauf que le défaut est non apparent. La crique de solidification est un défaut de fonderie.

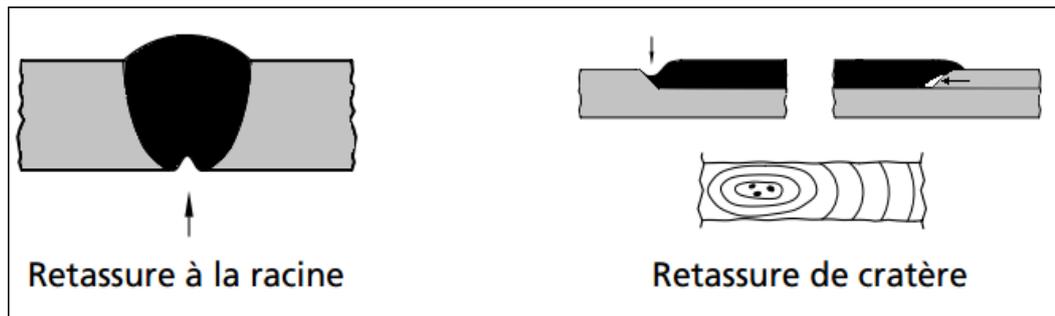


Figure 2.6. Retassures.

7. Excès de pénétration

L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente (figure 2.7).

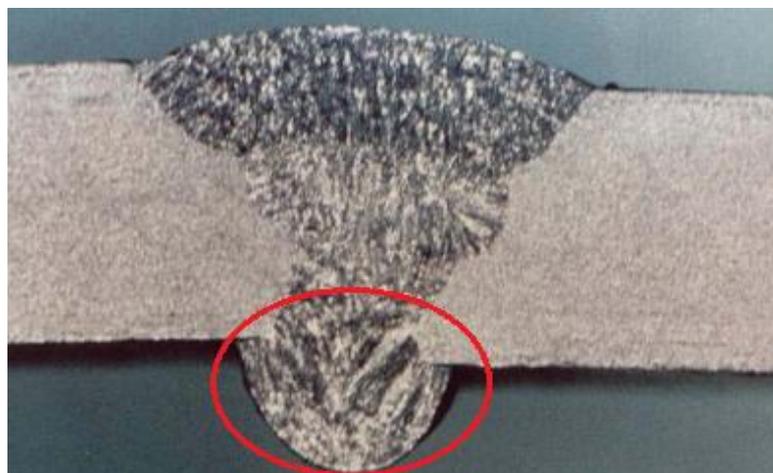


Figure 2.7. Excès de pénétration.

8. Manques de fusion ou de pénétration

Le manque de fusion (ou collage) est un manque de liaison entre le métal de base et la zone fondue (figure 2.8). C'est un défaut plan. Il peut être lié à un décalage entre le faisceau et le plan de joint. Dans le cas d'un assemblage hétérogène, il est favorisé par une différence de conductibilité importante entre les matériaux. Il est difficilement détectable par les contrôles non destructifs.

Le manque de pénétration est un manque de fusion de bords à souder. Il se situe en racine de cordon (figure 2.9). Il est souvent dû à une puissance du faisceau insuffisante ou à une dégradation de la focalisation du faisceau.



Figure 2.8. Manque de fusion en bord de chanfrein et sous cordon.

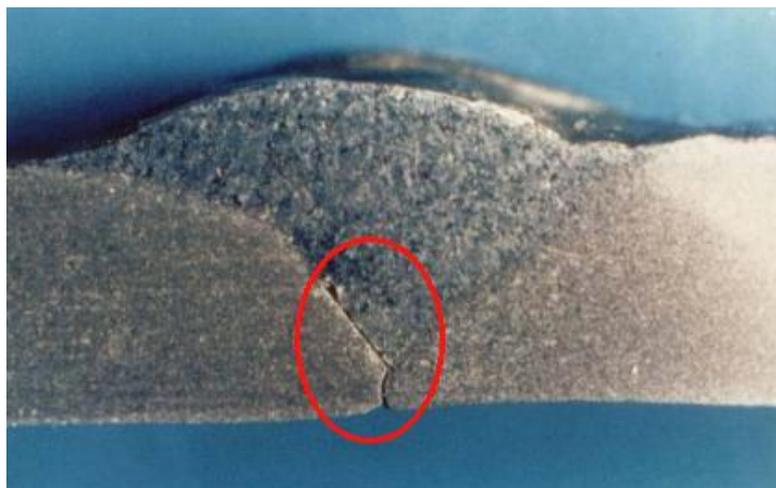


Figure 2.9. Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein.

9. Fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint.

Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales (figure 2.10), en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [6].

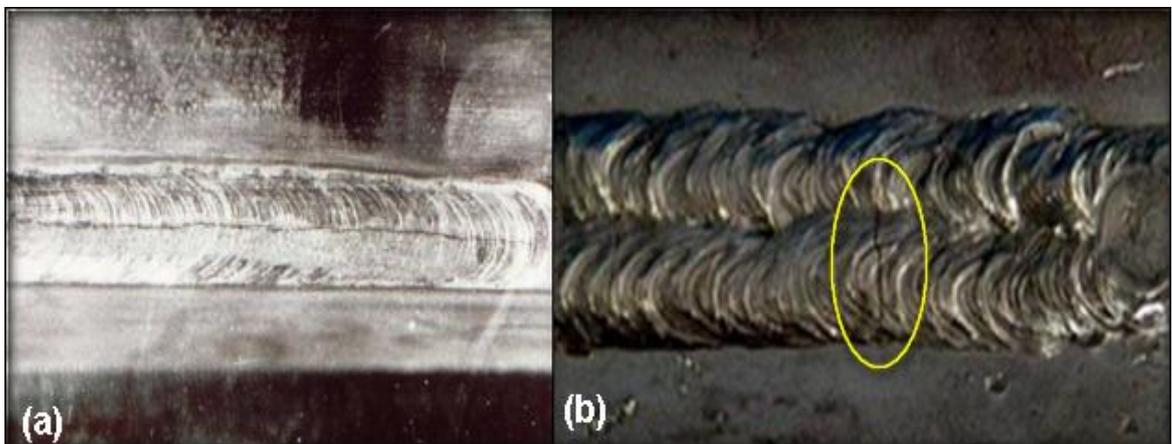


Figure 2.10. Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale.

On distingue aussi différents types de fissure :

- **Fissures à chaud** : sont les plus fréquemment rencontrées du fait des vitesses de solidification élevées et, dans la majorité des cas, de l'absence de métal d'apport. Elles sont débouchantes ou non débouchantes et de petite dimension. Elles sont appelées « fissures à chaud » lorsqu'elles apparaissent à la fin de la solidification. Ce sont des fissures interdendritiques ou intergranulaires liées à un phénomène de ségrégation dans le joint.
- **Fissures à froid** : sont dites « fissures à froid » lorsqu'elles apparaissent vers la fin du refroidissement, vers 150 °C ou moins. Ces fissures se rencontrent dans la zone fondue ou dans la zone affectée thermiquement. Elles sont liées au durcissement par trempé martensitique, à la fragilisation par l'hydrogène et aux contraintes internes. Les aciers non alliés ou faiblement alliés sont sensibles à la fissuration à froid en fonction de leur teneur en carbone et en éléments d'alliages.

10. Morsures

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon (figure 2.11).

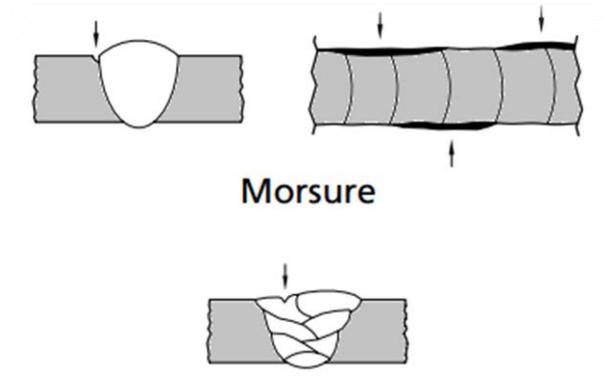


Figure 2.11. Caniveaux sur soudure multipasse.

11. Pollution ferreuse

La pollution ferreuse est corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche de passivation et activée par la présence de fer. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils métalliques (brosse, cisaille, etc.), après usinage, mise en forme ou la conséquence de projections de métal fondu lors d'opérations de soudage.

12. Défauts de forme

i. Caniveaux

Le caniveau est un défaut dû à une trop grande énergie apportée pendant la soudure. Ce qui entraîne un creux sur une grande partie de la longueur de la soudure. Les caniveaux peuvent être en surface, entre le cordon et le métal de base (figure 2.12). Ils peuvent aussi être à la racine.



Figure 2.12. Caniveau en surface de joint soudé.

ii. Défauts d'alignement

Ils correspondent à un décalage entre les deux parties à souder (figure 2.13). Ce décalage peut laisser subsister un manque de fusion en racine. C'est-à-dire que ces défauts peuvent être des défauts d'alignement entre les pièces, un cordon trop bombé...etc.

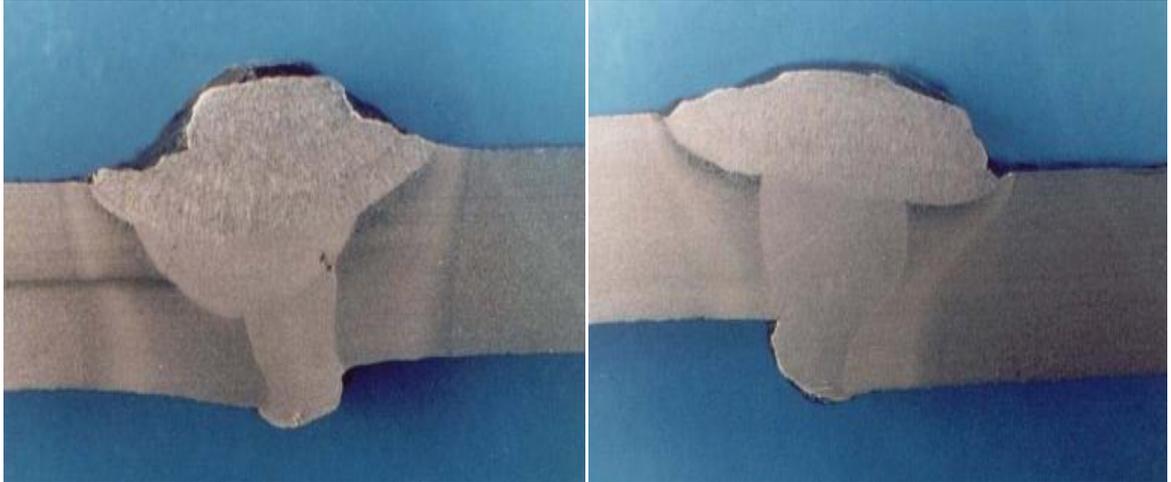


Figure 2.13. Défauts d'alignements.

iii. Projections

Les projections métalliques durant le soudage peuvent être adhérents ou non. Elles peuvent être provoquées par une densité de puissance trop élevée, la présence de produits organiques sur la surface de la pièce ou dans le plan de joints, une protection gazeuse inadéquate. Le soudage d'aciers nitrurés ou carbonisés peut provoquer ces projections (figure 2.14).

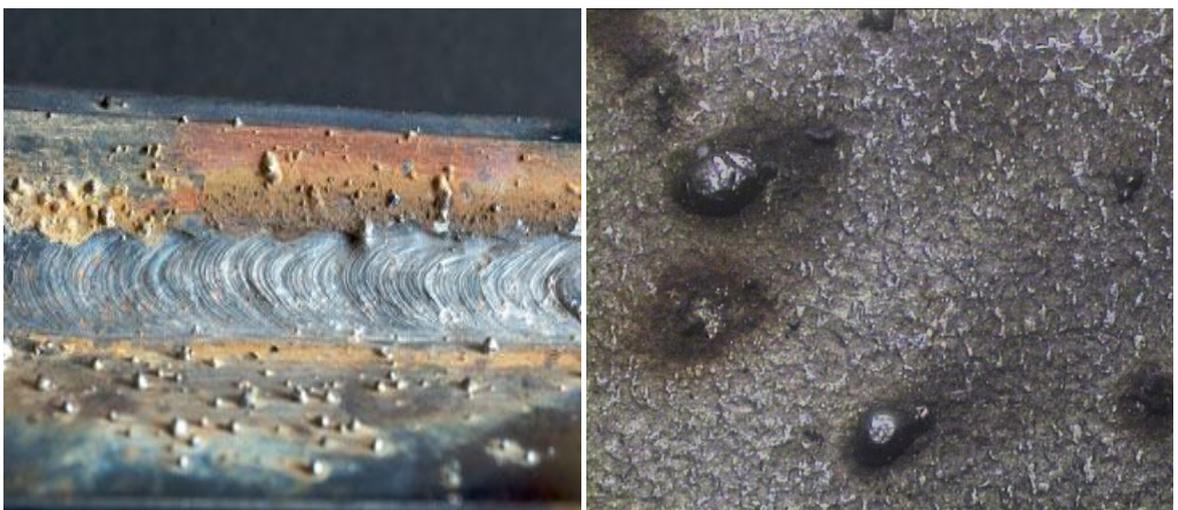


Figure 2.14. Projections.

Tous les procédés de soudage avec électrode fusible à arc ouvert produisent une certaine quantité de projections (par ex. soudage manuel à l'électrode avec enrobage cellulosique), mais si la densité des projections est trop importante, les causes spécifiques peuvent être :

- Apport d'énergie trop élevé ;
- Longueur de l'arc trop important ;
- Produits de soudage contaminés.

V. CONCLUSION

Comme défauts de soudure peut considérablement affecter l'exécution de soudure et la longévité, le dépistage précoce et la correction est important pour s'assurer que les soudures peuvent effectuer leur but conçu.

Les techniques de détection doivent être assez sensibles pour détecter des discontinuités nocives ou rejetables mais pas au point où tous les défauts sont rejetés. Il est seulement nécessaire de réparer les défauts qui sont considérés nuisibles à l'intégrité structurale de la structure. Les soudures ne doivent pas être parfaites trop coûteuse et longue pour réaliser. Elles doivent simplement être dans les limites acceptables de fonctionnement spécifiques par le code de contrôle de qualité étant employé pendant l'inspection de soudure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE II

- [1] R. GAZES. “ Soudage à l’arc “, Techniques de l’ingénieur, (1995).
- [2] H. GRANJON. “ Bases métallurgiques de soudage “, 2^{ème} édition, publications de soudage et de ses applications Paris, (1995).
- [3] S. CETIM. “ Mécano-soudage, Fabrication “. [S.1]: Centre technique des industries mécaniques, France, (1983).
- [4] K. WEMAN. “ Procédés de soudage “. Aide-mémoire, édition DUNOD, Paris, (2011), pp. 6.
- [5] A. ZALT. “ Endommagement par Fatigue et Prédiction de la Durée de Vie des Joints Soudés de Type Caisson “. Thèse doctorat. Université de Lorraine, (2012).
- [6] Document de l’industrie. “ COSIDER Canalisation“. Biskra, (2012).

CHAPITRE 03 :

Effet des défauts sur la

fissuration par fatigue

I. INTRODUCTION

Généralement, la soudure représente une discontinuité dans la structure chargée, et provoque une concentration de contrainte assez importante, influençant la durée de vie des assemblages soudés. Cette concentration de contraintes, élevée en raison de la forme de joint soudé ou les défauts indésirables, existent dans la soudure ainsi que le manque de pénétration, le caniveau, la porosité, les soufflures, les inclusions...etc.

Le traitement de la tenue en fatigue des assemblages soudés est assez compliqué. Il est soumis à plusieurs facteurs ainsi qu'à l'état hétérogène de la structure du matériau, les inclusions, les contraintes résiduelles, l'angle de soudure,...etc.

II. Analyse du comportement en fatigue des matériaux Soudé

II.1 Matériaux en acier

II.1.1 Effet de caractéristiques mécaniques des matériaux

La résistance à la fatigue d'un joint soudé en acier A48AP a été étudiée par Alioua et al [1]. La fissuration en fatigue à température ambiante a été réalisé sur des éprouvettes de type CT (figure 3.1) prélevés suivant le sens (T-L). Le comportement en fatigue a été étudié en trois zones : métal de base (MB), métal fondu (MF), et de la zone affectée thermiquement (ZAT) (figure 3.2).

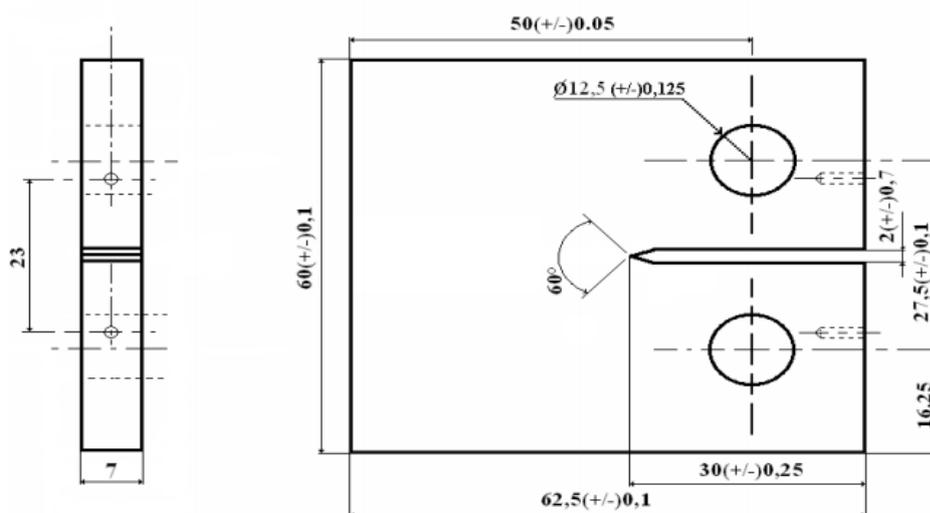


Figure 3.1. Éprouvette CT50 utilisé pour les essais de fissuration [1].

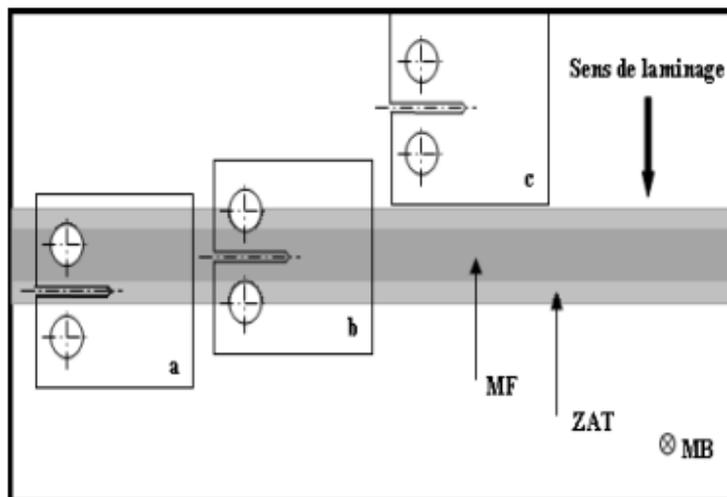


Figure 3.2. Représentation Schématique de la position des entailles sur les trois zones [1].

Les procédés de soudage utilisés, sont le soudage à l'électrode enrobée (EE) et le soudage à l'arc. La composition chimique du métal de base et le métal d'apport est présentée dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Compositions chimiques de l'acier A48AP et du métal déposé [2].

Elément (%)	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V
A48AP	0.198	0.021	0.01	0.207	0.77	0.135	0.09	0.03	0.27	0.023	0.02
Métal déposé	0.074	0.021	0.017	0.35	0.73	0.02	0.03	0.004	0.05	0.006	0.015

Les propriétés mécaniques des trois zones du cordon de soudure donnée par le tableau 3.2, montre que la limite élastique et la résistance à la rupture est importante dans la zone affectée thermiquement (ZAT) avec un faible coefficient d'érouissage.

Tableau 3.2. Propriétés mécaniques des trois zones.

	Propriétés mécaniques				
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)	K	n
MB	325	400	20	980	0.401
ZAT	405	600	25	836	0.302
MF	350	351	15	1009	0.508

Les essais de fissuration par fatigue à l'air ambiante pour un rapport de charge fixe ($R = 0.1$), et une fréquence de 25 Hz , été effectués dans les trois zones qui constituent le joint de soudure, et dans un domaine des vitesses comprises entre $4 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-2} \text{ mm/cycle}$.

Les résultats des essais de fissuration obtenus dans les trois zones (Loi de Paris), et les valeurs de ΔK sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Equations caractérisant la Loi de Paris dans les différentes zones étudiées

Désignation	Loi de Paris	ΔK
MF	$da/dN = 1.08e^{-11}\Delta K^{5.2}$	18 à 48 MPa. \sqrt{m}
MB	$da/dN = 2.63e^{-11}\Delta K^{5.13}$	17 à 45 MPa. \sqrt{m}
ZAT	$da/dN = 1.33e^{-11}\Delta K^{5.015}$	21 à 52 MPa. \sqrt{m}

L'évolution des vitesses de propagation de fissure montrent que la variation des zones (MB - MF - ZAT) au niveau des joints soudés en fonction de ΔK affecte la vitesse de fissuration par fatigue (figure 3.3). Les courbes présentent une allure quasi rectiligne sur une grande partie du domaine exploré, aussi pour le même niveau de ΔK , on observe que la vitesse de fissuration da/dN , diffère dans les trois zones. Pour les faibles valeurs de ΔK ($\Delta K < 25 \text{ MPa}\sqrt{m}$), la vitesse de fissuration est décroissante respectivement dans les zones MB, MF, et ZAT, cependant, cet écart diminue lorsque ΔK augmente.

Pour même valeur de facteur d'intensité de contraintes ($\Delta K = 40 \text{ MPa}\sqrt{m}$), la vitesse de fissuration par fatigue pour le métal de base (MB) est de l'ordre $7.5 \times 10^{-3} \text{ mm/cycles}$ et d'une vitesse de $6 \times 10^{-3} \text{ mm/cycles}$ pour la zone affectée thermiquement (ZAT). Le métal fondu (MF) a une vitesse de fissuration lente ($2 \times 10^{-3} \text{ mm/cycles}$) comparativement au métal de base et la zone affectée thermiquement. L'étude présentée par Inal et al [3], montre qu'après une certaine valeur de ΔK , une déviation de la fissure accompagne la vitesse de propagation vers le métal de base. Cette déviation due à la différence de caractéristiques mécaniques entre les trois zones, la fissure dans cette partie dirigeant d'une microstructure très dure vers une microstructure très douce.

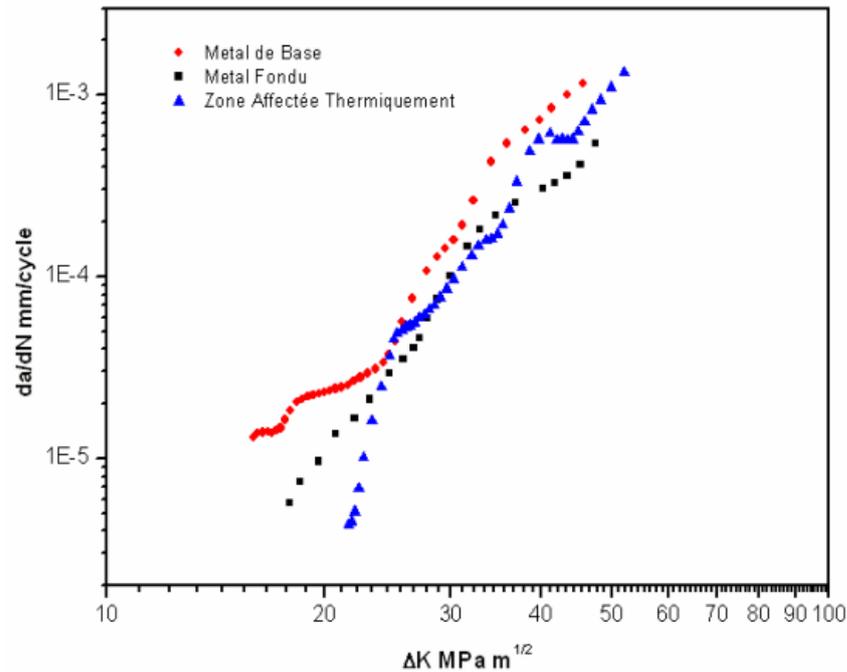


Figure 3.3. Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de ΔK pour les trois zones [1].

Afin de prédire l'évolution de la longueur de fissure en fonction de nombre de cycle, la Loi de Paris a été appliquée (figure 3.4). L'écart en durée de vie est important entre la durée de vie pour la fissuration dans le métal de base et la zone affectée thermiquement par rapport au métal fondu. Cette différence est de l'ordre de 4.5×10^5 cycles.

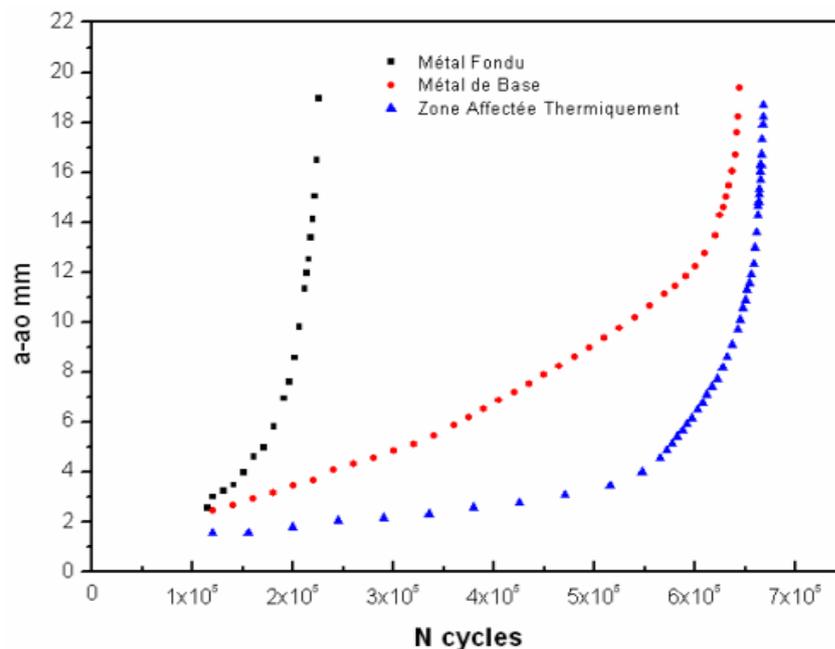


Figure 3.4. Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les trois zones [1].

II.1.2 Effets des défauts de soudure sur la fissuration par fatigue

Les travaux effectués par Wahab et Alam [4] sur l'acier ASTM A36, montre l'importance et les effets de la présence des défauts dans les joints de soudure (figure 3.5) ainsi que le comportement en fissuration par fatigue des joints soudés.

Les joints soudés contiennent généralement des contraintes résiduelles importantes (charge de torsion). Ces contraintes résiduelles présentent un effet néfaste sur la résistance à la fatigue. L'étude de Wahab et Alam, présentée sous un aspect numérique où différents types de défauts ont été introduits séparément sur une plaque soudée bout à bout (figure 3.5) de dimension ($100 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$).

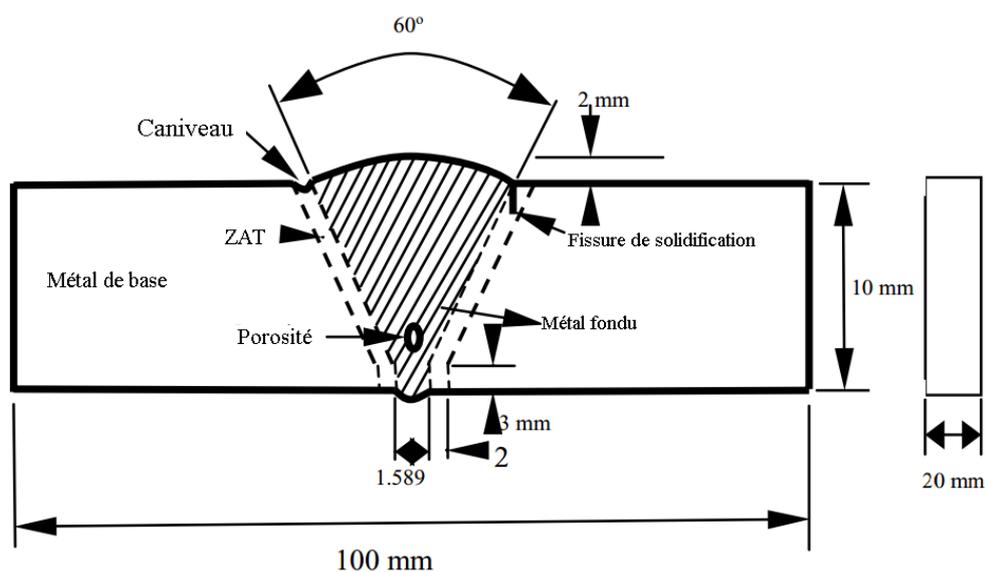


Figure 3.5. Vue schématique (2-D) d'un joint bout à bout avec divers défauts de soudure [4].

Le métal de base (ASTM A36), et le métal d'apport (E60S-3) sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Composition chimique de métal de base et d'apport.

Matériau	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
ASTM-A36	0.21	1.1	0.12	0.021	<0.10	<0.10	0.08	0.10	0.10	Bal.
E60S-3	0.09	1.0	0.017	0.024	0.50	--	--	--	--	Bal.

Les caractéristiques mécaniques de métal de base et métal d'apport, ainsi que celles de la zone affectée thermiquement sont présentées sur le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Propriétés mécaniques des : métal de base, métal d'apport, et la ZAT (A36).

Matériau	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_R (MPa)	E (MPa)
ASTM A36	280	460	207
E60S-3	580	710	189
A36 (ZAT)	534	667	189

$\sigma_{0.2}$: Limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% de la déformation plastique.

σ_R : Contrainte à la rupture.

E : Module d'élasticité.

On remarque toujours que la zone affectée thermiquement présente des caractéristiques mécaniques meilleures, par rapport au métal de base (bonne résistance mécanique). Les résultats des essais de fatigue en présence des différents défauts sont montrés par la figure 3.6 (essais d'endurance). Ces essais d'endurance montrent qu'un joint de soudure avec une fissure de solidification présente une faible résistance à la fatigue comparativement aux éprouvettes ayant les joints idéals, les défauts de porosité et de caniveau.

On constate que pour une même amplitude de contrainte (100 MPa), la différence en durée de vie et l'ordre entre une éprouvette avec une fissure de solidification et un joint ayant des porosités, est de 5×10^6 cycles. Pour une durée de vie 2×10^6 cycles, la résistance à la fatigue a diminué de 55% pour la fissure de solidification, de 45% en présence du caniveau, et de 18% en présence de défaut de porosité.

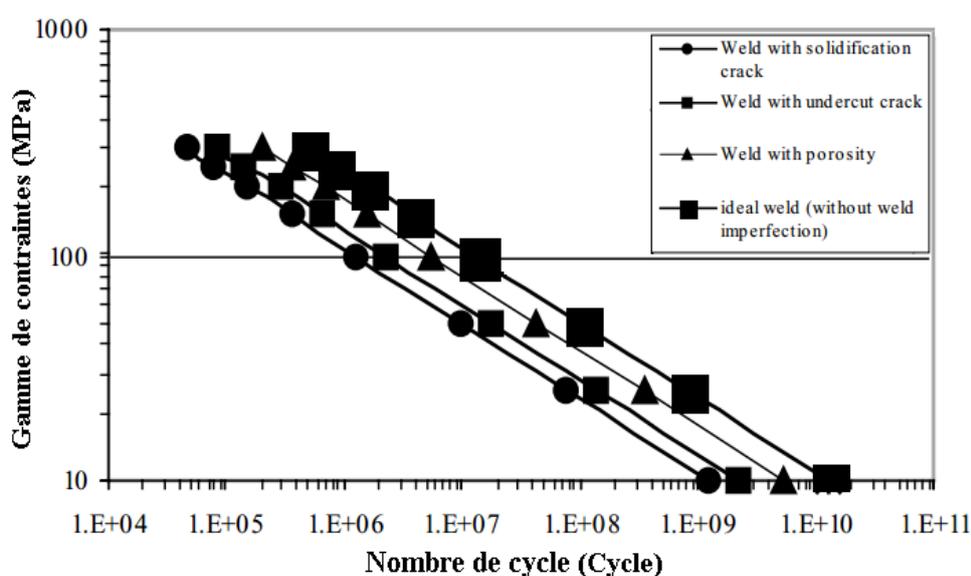


Figure 3.6. Effet des défauts de soudure sur la vie de propagation de fissure de fatigue [4].

La figure 3.7 représente les effets combinés d'une fissure de solidification et d'une porosité circulaire interne sous chargement bi-axiale. L'étude comparative par rapport au chargement uni-axial montre que la différence en durée de vie est importante pour des amplitudes de contraintes supérieures à 100 MPa. Pour une durée de vie de 10^6 cycles, la résistance à la fatigue diminue d'environ 20% à cause de torsion. La combinaison entre deux défauts diminue la résistance à la fatigue de 15% pour une même durée de vie.

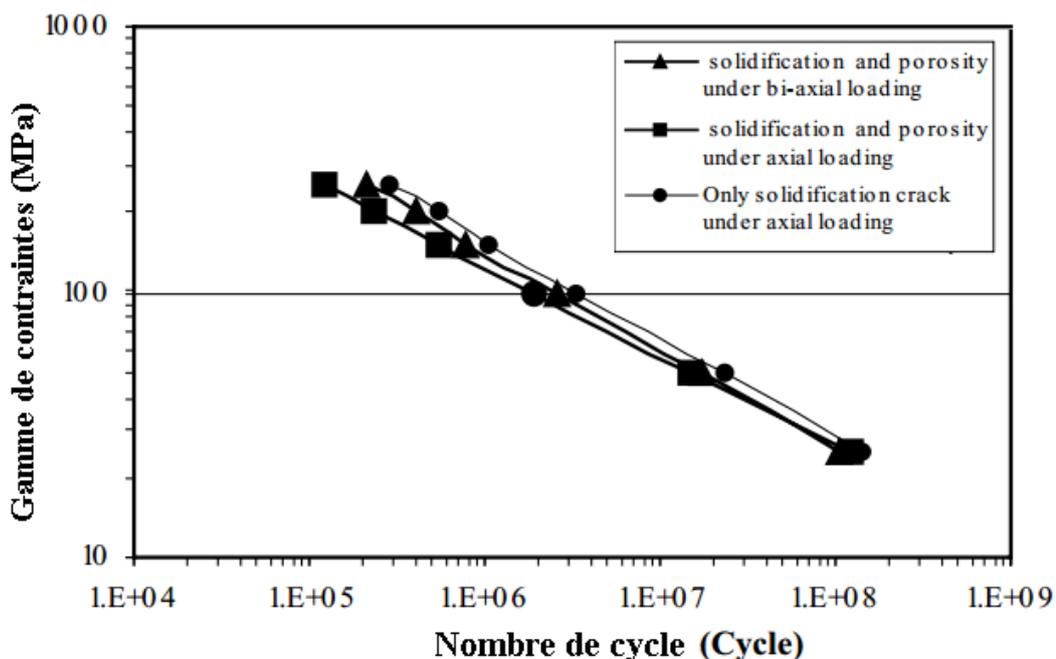


Figure 3.7. Effet combiné d'une fissure de solidification et une porosité circulaire sous chargement bi-axiale [4].

L'évolution des vitesses de fissuration en fonction de l'amplitude de contrainte en présence des défauts est donnée par la figure 3.8. La présence des défauts permet d'augmenter les vitesses de fissuration. En effet, la fissuration dans un joint soudé présentant un défaut de solidification de fissure est plus dangereuse. Comparativement à un joint soudé idéal pour une même amplitude de contrainte (100MPa), la vitesse de fissuration est augmentée de $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$. La présence des défauts fait perdre la résistance à la fatigue. Par exemple à une vitesse de 10^{-7} mm/cycle , la résistance à la fatigue pour le défaut de fissure de solidification a diminué de 55%, de 44% en présence de caniveaux et de 18% en présence de porosité.

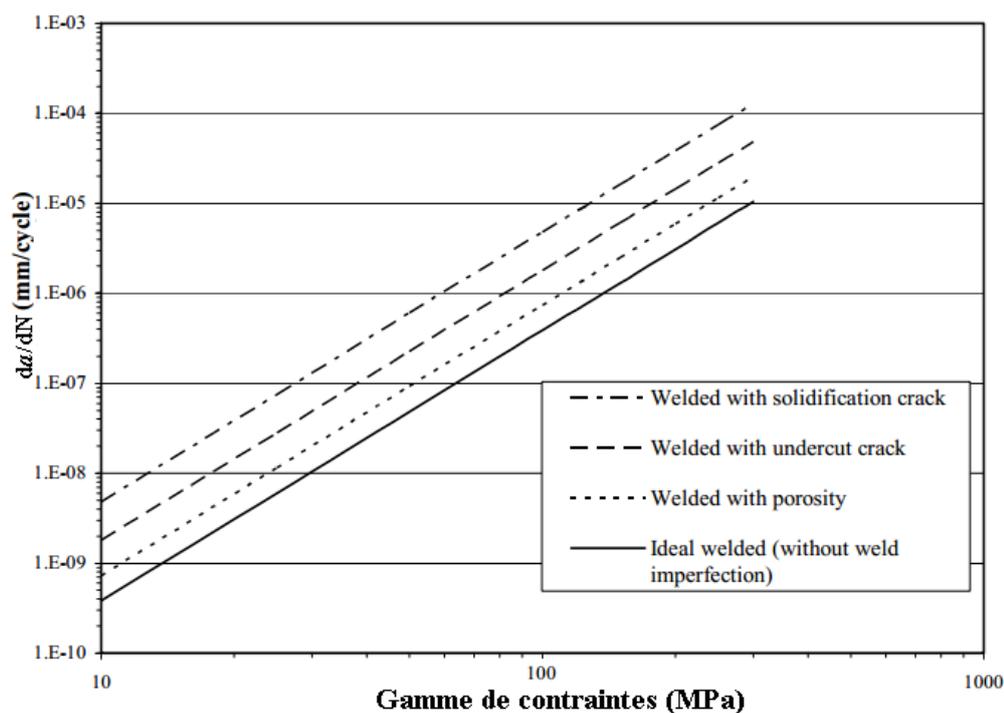


Figure 3.8. Effet des défauts de soudure sur la vitesse de propagation des fissures [4].

II.2 Alliages d'aluminium

II.2.1 Effets de la taille des grains sur les contraintes résiduelles et la fissuration par fatigue

Ma et al [5] ont étudié les effets des contraintes résiduelles sur la propagation des fissures par fatigue dans les joints soudés par friction-malaxage (friction stir welding - FSW). Ces essais des effets des contraintes ont été effectués sur l'alliage d'aluminium 2195-T8 Al-Li (figure 3.9).

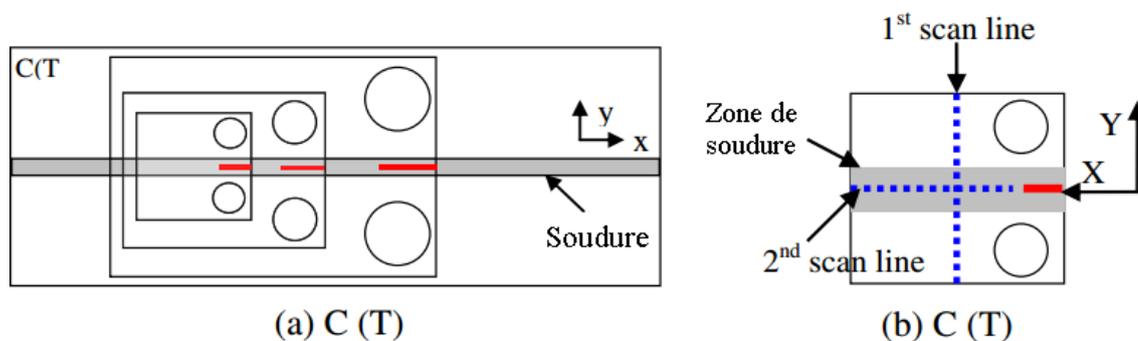


Figure 3.9. Éprouvettes C(T) : (a) l'emplacement soudure (b) lignes de balayage pour la mesure des contraintes résiduelles [5].

Les dimensions des échantillonnages de type C(T) sont présentées sur le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Dimensions des éprouvettes C(T) :

Relation avec soudure	Type	Taille de l'échantillon (mm)	
		Longueur x largeur	h (mm)
Fissure parallèle à la soudure	C(T)	84 X 87.5	
		120 X 125	
		240 X 250	

La composition chimique de l'alliage d'aluminium 2195-T8 est donnée sur le tableau 3.7.

Tableau 3.7. Composition chimique de l'alliage 2195-T8 Al-Li.

Elément	Si (max)	Fe (max)	Cu	Mn (max)	Mg	Zr	Li	Ag
%	0.12	0.15	3.7 - 4.3	0.75	0.36	0.08 - 0.16	0.8 - 1.2	0.25 - 0.6

Les propriétés mécaniques du matériau sont présentées sur le tableau 3.8.

Tableau 3.8. Propriétés mécaniques de l'alliage 2195-T8.

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_R (MPa)	E (GPa)	A (%)
580	615	79	9

$\sigma_{0.2}$: Limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% de la déformation plastique.

σ_R : Contrainte à la rupture.

E : Module de Young.

A : Allongement total à la rupture.

Les contraintes résiduelles représentent un paramètre important et affectant la fissuration par fatigue, si les contraintes résiduelles de tension augmentent les vitesses de fissuration et les contraintes de compression les diminuent. La redistribution et la relaxation des contraintes résiduelles que la fissure développe ont des effets importants sur la croissance de la fissure.

Les essais de fissuration par fatigue ont été conduits sur des éprouvettes le long du joint de soudure. Les contraintes générées par le procédé de soudage friction-malaxage sont présentées par la figure 3.10, où ces contraintes sont maximales au niveau de la bande de contact entre le métal de base et le métal d'apport. Les contraintes résiduelles suivant le sens de la soudure variant

parallèlement à la soudure pour les tailles de grains (250x240, 125x120, et 87.5x84), sont respectivement de 110 MPa, 95 MPa, et 82 MPa. Les contraintes résiduelles sur les côtés des joints de soudure sont plus élevées par rapport aux contraintes présentées au milieu du joint de soudure (figure 3.10). Ce niveau de contrainte favorise la fissuration rapide (vitesse de fissuration importante).

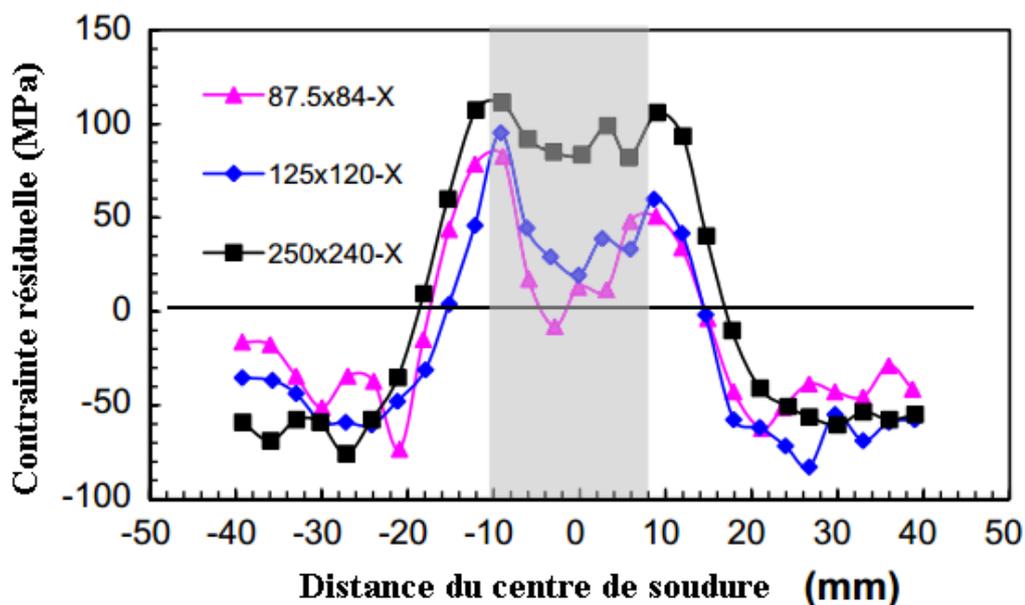


Figure 3.10. Contrainte résiduelle parallèle à la direction soudure (1st scan line) [5].

Les contraintes résiduelles perpendiculaires (figure 3.11) à la direction de soudure présente un faible niveau (contraintes résiduelles ne dépasse pas 50 MPa).

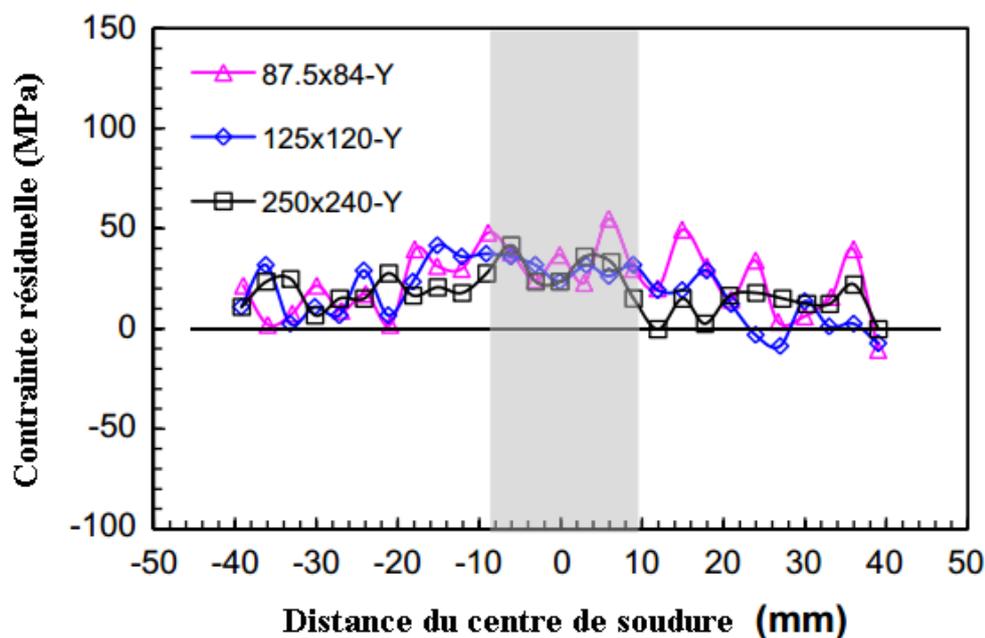


Figure 3.11. Contrainte résiduelle perpendiculaire à la direction soudure (1st scan line) [5].

L'évolution des vitesses de fissure en fonction de ΔK pour des éprouvettes ayant différentes tailles de grains (zone de soudure) sont comparées à la vitesse de fissuration du métal de base (figure 3.12). Les vitesses de fissuration par fatigue diminuent par l'augmentation de la taille des grains. Pour des valeurs de $\Delta K < 20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Comparativement au métal de base (MB), les joints de soudure présentes une meilleure résistance à la fissuration par fatigue.

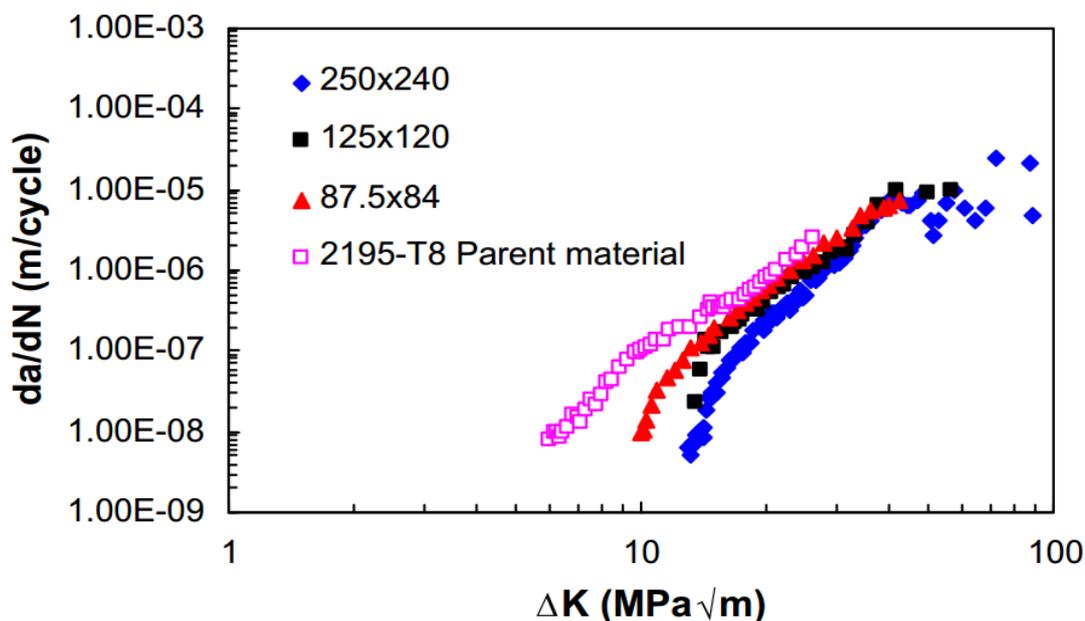


Figure 3.12. Vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction du ΔK
(Fissure parallèle au joint de soudure) [5].

II.2.2 Effet d'angle d'inclinaison, rapport géométrique, et le chargement cyclique

La fissuration par fatigue dans un joint de soudure d'angle double en présence de fissure semi-elliptique (figure 3.13) a été étudiée par Benachour et al [6]. Pour cela un type d'alliage d'aluminium a été considéré à savoir 2024-T351

Les effets des paramètres géométriques de la fissure (rapport a/c , l'angle d'inclinaison, et le niveau de chargement appliquée) ont été étudiés. La figure 3.13 représente la géométrie de la double soudure d'angle, la fissure semi-elliptique se produit fréquemment aux bords de la soudure des joints soudés. Les caractéristiques d'alliage d'aluminium 2024-T351 est donnée sur le tableau 3.6.

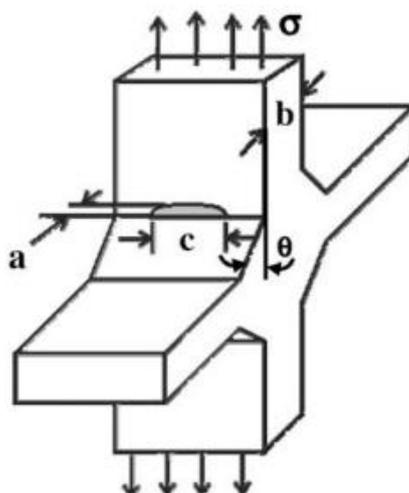


Figure 3.13. Fissure semi-elliptique en soudure d'angle double [6].

Les propriétés mécaniques du matériau sont présentées sur le tableau 3.9.

Tableau 3.9. Caractéristiques des matériaux

Matériau	E (GPa)	ΔK_{th} (MPa \sqrt{m})	C	m
2024-T351	71.02	2.0	4.34×10^{-11}	3.45

1. Effet du rapport géométrique de la fissure a/c

Pour la fissuration par fatigue le rapport a/c est étudié. Les figures 3.14-3.16 montrent l'effet de l'augmentation du rapport initial a/c sur la durée de vie en fatigue. A $\theta = 30^\circ$, on remarque des intersections des courbes des durées de vie pour les faibles rapports a/c . Pour les angles de 45° et 60° , on remarque la présence de paliers où la fissure est retardée.

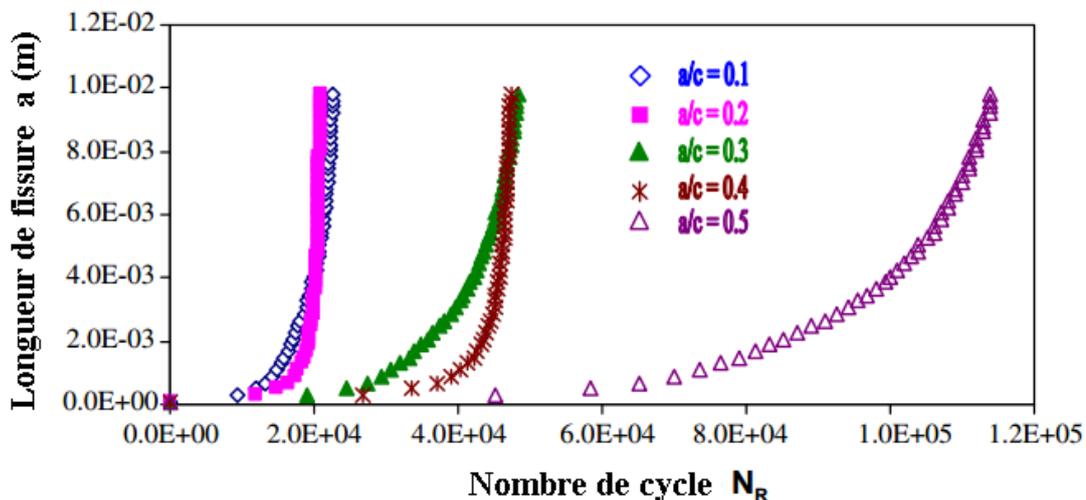


Figure 3.14. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 30^\circ$ [6].

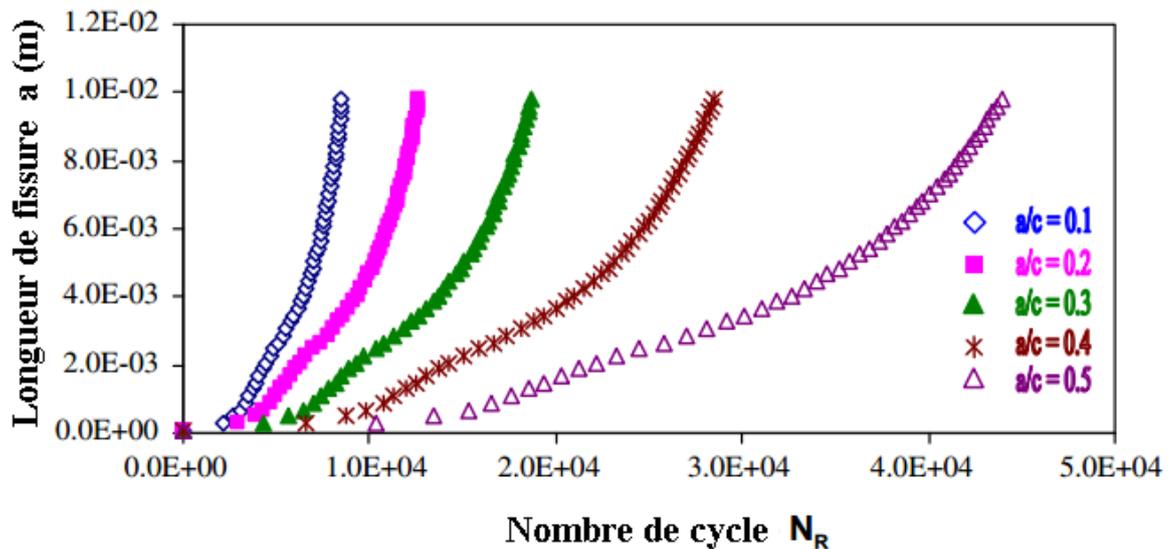


Figure 3.15. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 45^\circ$ [6].

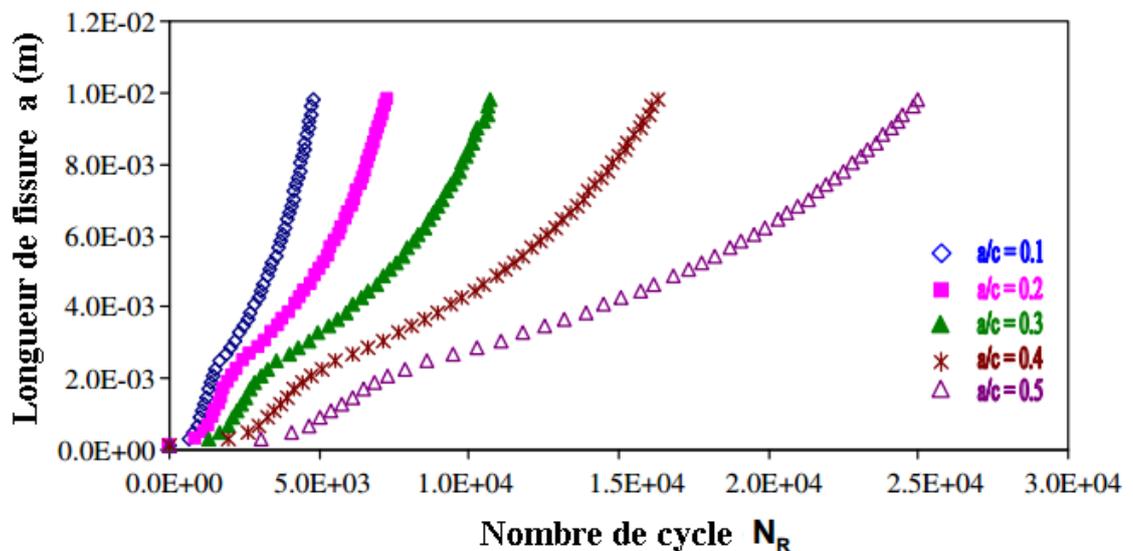


Figure 3.16. Propagation de fissure de fatigue pour $\theta = 60^\circ$ [6].

2. Effet de l'angle d'inclinaison de la soudure

L'effet des angles est montré clairement par la figure 3.17 pour un rapport $a/c = 0,1$. Une diminution de la durée de vie est constatée par l'augmentation de l'angle θ . On constate que pour une même longueur fissure ($6 \times 10^{-3} \text{ m}$), la différence en durée de vie entre l'angle d'inclinaison de 30° et 60° , est de l'ordre de $1,8 \times 10^4 \text{ cycles}$.

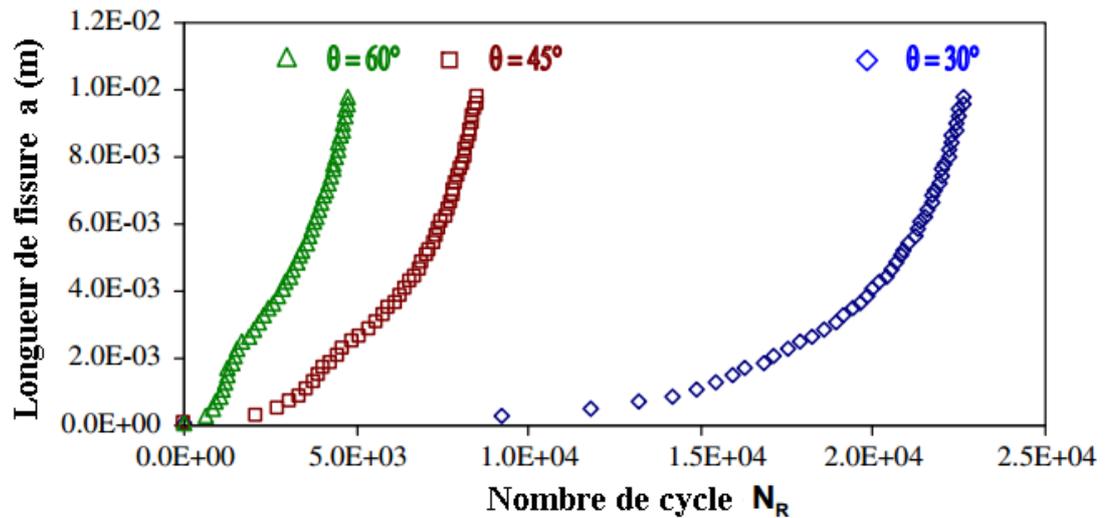


Figure 3.17. Effet de l'angle θ pour $a/c = 0.1$ sur la propagation de fissure de fatigue.

3. Effet du rapport de charge

L'effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue est montré par les figures 3.18 et 3.19 pour deux niveaux de chargement ($\sigma_{max} = 20$ et 160MPa). L'augmentation du rapport de charge (de 0.14 à 0.25) fait augmenter la durée de vie en fatigue. Pour un chargement faible (figure 3.18) et à $R = 0.25$, la durée de vie en fatigue est de l'ordre 2.4×10^5 cycles. Par contre pour un niveau de chargement important (figure 3.19), la durée de vie en fatigue est de l'ordre de 2.0×10^4 cycles, cela présente une diminution de 8.3 fois.

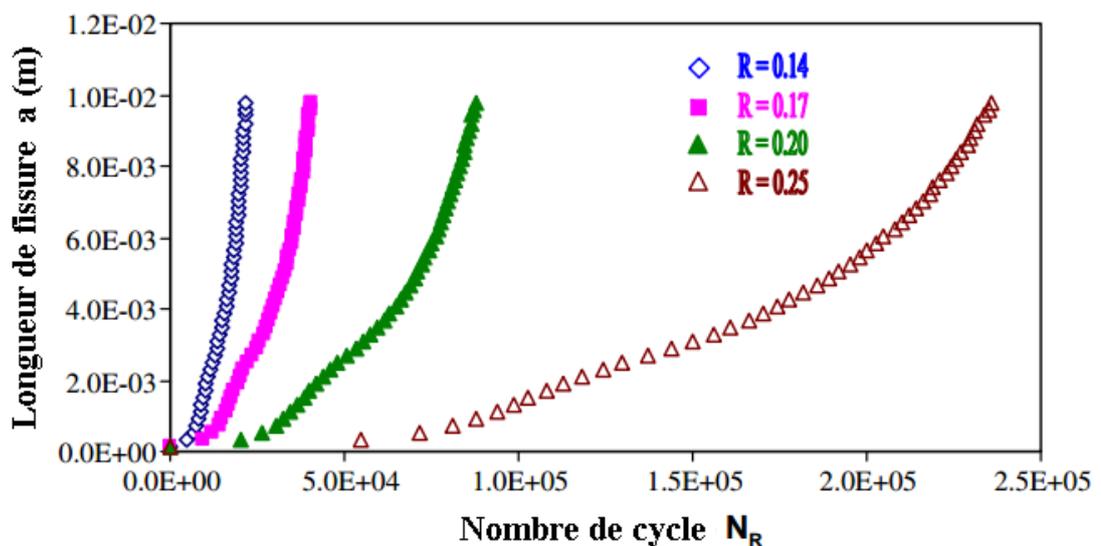


Figure 3.18. Courbes de propagation des fissures de fatigue au $\sigma_{max} = 20\text{MPa}$.

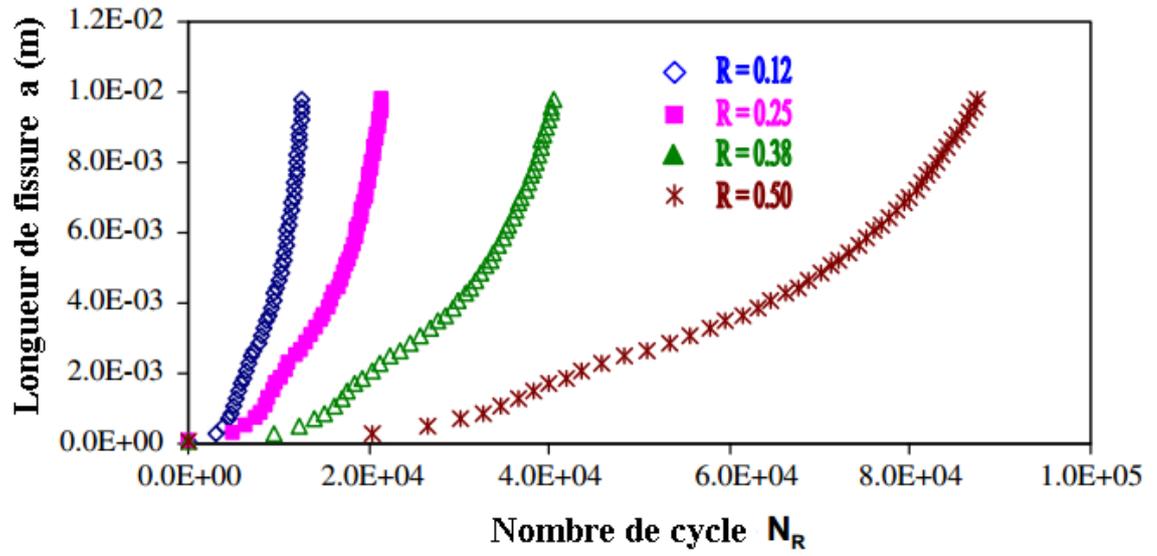


Figure 3.19. Courbes de propagation des fissures de fatigue au $\sigma_{max} = 160$ MPa.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE III

- [1] A. Alioua, B. Bouchouicha, M. Zemri. “ Comportement des différentes zones d’un joint de soudure vis-à-vis a la résistance a la fatigue “. 3^{ème} Conférence internationale sur le soudage, Université SBA, (2012).
- [2] B. Bouchouicha. “ Contribution à l’étude de la déchirure ductile et propagation des fissures fatigue dans les joints soudés “. Thèse Doctorat, Université, SBA, (2007).
- [3] K. Inal, L. M’cirdi, J.L Lebrun, G. Barbier. “ Mechanical behaviour analysis of phase interaction in a rolled and a cast duplex stainless steels “. Duplex, (2000), pp. 173-182.
- [4] M.A. Wahab, M.S. Alam. “ The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints “. Journal of Materials Processing Technology 153–154, (2004), pp. 931–937.
- [5] Yu E. Ma, P. Staron, T. Fischer, P.E. Irving. “ Size effects on residual stress and fatigue crack growth in friction stir welded 2195-T8 aluminium – Part I: Experiments “. International Journal of Fatigue 33, (2011), pp 1417–1425.
- [6] M. Benachour, M. Benguediab, A. Hadjoui, F. Hadjoui, N. Benachour. “ Fatigue crack growth of a double fillet weld “. Computational Materials Science 44, (2008), pp. 489–495.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION

Ce travail présente un état de l'art sur le comportement en fissuration par fatigue des aciers et des alliages d'aluminium à durcissement structural. Les résultats issus de l'état de l'art montrent que les joints de soudure sont influencés par plusieurs paramètres liés à la géométrie des cordons des soudures et les charges qui leur sont appliqués.

Les résultats analysés montrent que :

- La vitesse de fissuration da/dN , pour les faibles valeurs de facteur d'intensités de contrainte ΔK est décroissante respectivement dans les zones suivantes : métal de base, métal fondu, et la zone affectée thermiquement, tandis que, cet écart diminue lorsque ΔK augmente.
- Les défauts de soudure comme la fissure de solidification, caniveau, et la porosité réduisent de manière significative la résistance à la fatigue et accélèrent la propagation de la fissure.
- Un joint de soudure avec une fissure de solidification présente une faible résistance à la fatigue, comparativement aux éprouvettes ayant les joints idéals, les défauts de porosité et de caniveau.
- L'augmentation de la taille des grains dans un cordon de soudure a fait augmenter les contraintes résiduelles suivant le sens parallèle à la direction de soudure, ainsi que ces contraintes résiduelles sont très élevées sur les côtés par rapport aux contraintes présents au milieu de joint de soudure.
- Les vitesses de fissuration par fatigue augmentent par la diminution de la taille des grains du joint de soudure.
- La durée de vie en fatigue est affectée par la taille de la fissure initiale et la géométrie du cordon de soudure.
- Le rapport de charge R présente un paramètre très influent sur la résistance à la fatigue.

RESUME :

Le soudage est un moyen d'assemblage très utilisé dans l'industrie. Les assemblages par soudeure constituent des éléments de jonction particulièrement sensibles. En effet, les zones proches des soudures sont susceptibles de comporter des défauts en raison de leur sensibilité à la fissuration. Dans ce mémoire, nous avons analysé les défauts dans les joints de soudeure et leurs effets sur la fissuration par fatigue. L'effet du chargement cyclique, rapport de géométrie, et les défauts dans les joints soudés, ont été mise en évidence sur les aciers et l'alliage d'aluminium.

Mots-clés :

Défauts de soudeure, métal de base, métal fondu, zone affectée thermiquement, fissuration par fatigue.

ملخص :

اللحام هو وسيلة تجميع، و هو يستخدم على نطاق واسع في الصناعة. المفاصل الملحومة تشكل العناصر الحساسة بشكل خاص. والواقع أن المناطق القريبة من اللحام قد تتضمن عيوب بسبب حساسية في الإنشقاق. في هذه الأطروحة، قمنا بتحليل عيوب وصلات اللحام و آثارها على التشعر بالكلل. تأثير التحميل الدوري، النسبة الهندسية، و العيوب في المفاصل الملحومة، قد أثبتت على الصلب و سبائك الألومنيوم.

الكلمات المفتاحية :

عيوب اللحام ، معدن الأساس ، معدن المنصهر، المنطقة المتضررة حرارياً، التشعر بالكلل.

ABSTRACT :

The welding is a means of assembly very used in the industry. The assemblies by weld constitute particularly sensitive junction elements. Indeed, zones close to welds may contain defects because of their sensibility in the fissuring. In this dissertation, we analyzed defects in welded joints and their effects on fatigue cracking. The effect of the cyclic loading, the geometric ratio, and defects in welded joints, were highlighted on steels and alloy of aluminum.

Keywords :

Weld defects, base metal, molten metal, heat affected zone, the fatigue cracking.