

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie mécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

THEME :

Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles

Présenté par : BELABED Abdelmadjid

Soutenue publiquement, le 06/06/2017, devant les jurys composé de :

M. HADJOUI Fethi	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M.BENACHOUR Mustapha	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme. BENACHOUR Nadjia	MCB	Univ. Tlemcen	Co-encadreur
M.SEBA A Fethi	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M.KARA ALI Djamel	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2016-2017

Remerciements

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

*Le présent mémoire a été dirigé par monsieur **BENACHOUR Mustapha**, professeur à l'université Abou Bakri BELKAID - Tlemcen. C'est grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser. Je l'exprime mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements. Et Egalement, j'associe mes remerciements à Madame **BENACHOUR Nadja**, Maître de Conférence à l'université de Tlemcen.*

*C'est un honneur pour moi que Monsieur **HADJOUI Fethi** Maître de Conférence à l'université à l'université de Tlemcen, qui a accepté de présider le jury.*

*Je tiens à remercier vivement messieurs **SEBAA Fethi** maitre de conférence et **KARA ALI Djamel**, Maitres de conférence à l'université de Tlemcen qu'ils ont accepté d'examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.*

Mes remerciements s'adresser à tous les professeurs de notre cursus universitaire pour leurs contributions, leurs précieux conseils.

Et finalement, un vif remerciement à toute ma famille qui n'a jamais arrêté de me soutenir et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

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

A mes chers parents

A mes frères.

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes amis et mes collègues.

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

Résumé

L'assemblage par soudage est le moyen le plus répandu dans le domaine industriel, il consiste à assembler deux ou plusieurs corps métalliques en créant une liaison permanente entre eux.

Cependant, cette liaison peut contenir des défauts nuisibles sur le comportement de ces assemblages qui sont sollicités sous un chargement cyclique répété appelé fatigue. Le comportement en fatigue des assemblages soudés dépend de plusieurs paramètres à savoir la nature du matériau, le taux des chargements cycliques appliqués et de longueur de fissure initiale.

Dans ce mémoire, une étude a été menée afin de prédire l'effet des défauts du soudage sur la fissuration par fatigue, ainsi que les types de défauts ont été étudiés sur les assemblages en bout à bout et en angles. Les effets des paramètres de chargement et les paramètres liée à la géométrie des défauts ont mise en évidence.

Mots clés : le soudage, défauts du soudage, fissuration par fatigue, durée de vie en fatigue.

ملخص

تعد عملية التجميع بالتحميم الوسيلة الأكثر استخداما في المجال الصناعي , فهو يقتضي على جمع الأجسام المعدنية عن طريق إنشاء رابطة دائمة بينهم, في حين قد تحتوي هذه الرابطة على عدة عيوب التي تؤثر سلبا على سلوكها عند خضوعها لإجهادات دورية متكررة و التي تعرف بالكلل او التعب الميكانيكي.

سلوك الأجسام الملحومة اثناء التعب الميكانيكي يعتمد على عدة عوامل أهمها طبيعة المواد , معدل الحمولات الدورية المطبقة و كذلك طول الشق الأولي.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة تأثير عيوب التحميم على التصدعات الحاصلة عن طريق التعب الميكانيكي بواسطة عينات ملحومة على الحواف وأخرى عند الزوايا مع الأخذ بإعتبار عوامل التحميل و كذا العوامل المرتبطة بشكل العيب.

الكلمات المفتاحية : التحميم , عيوب التحميم , التشعر بالكلل , مدة الحياة عند الكلل .

Abstract

Assembly by welding is the most common process in the industrial field, it consists of joining two or more metallic structures by creating a permanent connection between them.

The fatigue behavior of a welded joints depends on several parameters, like the material's type, the rate of cyclic loading applied and the initial crack length.

In this dissertation, a study was carried out to predict the effect of welding defects on fatigue cracking, as well as the types of defects were studied on the butt joint and double fillet welding. The effects of the loading parameters and the parameters related to the geometry of the defects have been clarified.

Key words: welding, welding defects, fatigue crack, fatigue life

List des symboles

- a : Longueur de la fissure
- a_0 : Longueur de la fissure initiale
- a_f : Taille finale de la fissure
- AISI : American Iron and Steel Institute
- ASTM : American Society for Testing Material
- α : Facteur de correction géométrique
- C, m : Coefficient de Paris dépend du matériau
- da/dN : Vitesse de fissuration
- DMOS : Descriptif de Mode Opérateur de Soudage
- E : Module d'Young
- EE : Soudage à l'arc avec électrode enrobée
- FHDE : Soudage par faisceau à haute densité d'énergie
- f (a/W) : Fonction de calibration lié à la géométrie de l'éprouvette
- ϕ : Facteur de forme de la fissure
- H : La dureté
- K : Facteur d'intensité de contrainte
- KI : Facteur d'intensité de contrainte en mode I
- K_t : Facteur de concentration de contrainte
- K_{max} : Facteur d'intensité de contrainte maximal dans le cycle
- K_{min} : Facteur d'intensité de contrainte minimale
- K_c : Facteur d'intensité critique
- KIC : Ténacité du matériau
- MB : Métal de base
- MF : Métal fondu
- MLR : Mécanique linéaire de la rupture
- MIG : Métal Inerte Gaz
- MAG : Métal Active Gaz

MLR : Mécanique linéaire de la rupture
N : Nombre de cycles
OA : Soudage oxyacétylénique
R : Rapport de charge
S-N : Stress - Number of cycles
TIG : Tungstène Inerte Gaz
ZF : Zone fondu
ZAT : Zone affectée thermiquement
ZFP : Zone fondue partiellement
 σ_a : Amplitude de la contrainte
 σ_m : Contrainte moyenne
 σ_{max} : Contrainte maximale
 σ_{min} : Contrainte minimale
 ΔK : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte
 ΔK_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil
C : Carbone
Mn : Magnésiums
Cr : Chrome
Mo : Molybdène
V : Vanadium
Ni : NICKEL
Cu : Cuivre
Ar : Argon
Fe : Fer
Si : Silicium

Liste des figures

Figure 1	: Exemple du Descriptif de Mode Opérateur de Soudage	4
Figure 2	: Représentation schématique du joint soudé.....	6
Figure 3	: Préparation des bords en assemblage bout-à-bout.....	7
Figure 4	: Assemblages en angles	7
Figure 5	: Assemblage à bords relevés	8
Figure 6	: Assemblage à recouvrement	8
Figure 7	: Soudage oxyacétylénique	10
Figure 8	: Matériel propre au soudage oxyacétylénique	10
Figure 9	: Zones de la flamme	11
Figure 10	: Types de la flamme	12
Figure 11	: Soudage à l'arc avec électrode enrobé.....	13
Figure 12	: Electrode enrobée durant le soudage	13
Figure 13	: Soudage TIG	14
Figure 14	: Soudage MIG / MAG	15
Figure 15	: Soudage plasma	16
Figure 16	: Soudage vertical sous laitier	17
Figure 17	: Soudage par faisceau d'électron	18
Figure 18	: Soudage par faisceau Laser	19
Figure 19	: Soudage par point	21
Figure 20	: Soudage à la molette	22
Figure 21	: Soudage par bossage	23
Figure 22	: Soudage en bout par étincelage	24
Figure 23	: Soudage par friction en rotation	25
Figure 24	: Soudage par friction malaxage	26
Figure 25	: Soudage par explosion	27
Figure 26	: Organigramme des procédés de soudage.....	29
Figure 27	: Défauts de soufflures	30
Figure 28	: Défauts des retassures	31
Figure 29	: Défauts des inclusions.....	31
Figure 30	: Fissure dans le cordon de soudure	32
Figure 31	: Fissures à chaud	33
Figure 32	: Types de la fissure à froid	33
Figure 33	: Morsures et Caniveaux	34
Figure 34	: Défauts de manque de fusion	35
Figure 35	: Défauts de pénétration	36
Figure 36	: Défaut d'alignement	36
Figure 37	: Défauts angulaires	37
Figure 38	: Défauts des projections	37
Figure 39	: Exemple de la rupture ductile/fragile	39
Figure 40	: Différents modes de fissuration	40
Figure 41	: Etat de contrainte au niveau du pointe de la fissure en mode I	40
Figure 42	: Principe de l'essai de fatigue par flexion rotative.....	42

Figure 43 : Courbe de Wöhler	43
Figure 44 : Modes de variation de contrainte appliquée en fonction du temps	44
Figure 45 : Faciès de la rupture	45
Figure 46 : Amorçage d'une micro fissure à partir des bandes de glissement	46
Figure 47 : Concentration de contrainte dans une plaque à trous centrale	47
Figure 48 : Schématisation des domaines de la propagation d'une fissure de fatigue	48
Figure 49 : Fenêtre principale du code eFatigue	53
Figure 50 : Schéma des démarches de la simulation par le code efatigue	54
Figure 51 : Modèle de PARIS	56
Figure 52 : Eprouvette en géométrie bout à bout	58
Figure 53 : Eprouvette en géométrie double filet	59
Figure 54 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=0.5\text{mm}$	61
Figure 55 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$	62
Figure 56 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$	62
Figure 57 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$	63
Figure 58 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$	64
Figure 59 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$	64
Figure 60 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$	65
Figure 61 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=0,5\text{mm}$	66
Figure 62 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$	66
Figure 63 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$	67
Figure 64 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$	67
Figure 65 : Effet de taille de la fissure dans les différents matériaux pour $R=0,2$	68
Figure 66 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=30^\circ$ et $R=0,2$	70
Figure 67 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=45^\circ$ et $R=0,2$	70
Figure 68 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=60^\circ$ et $R=0,2$	71
Figure 69 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$	72
Figure 70 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$	72

Figure 71 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $a/c=0,5$ et $R=0,2$	73
Figure 72 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=30^0$ et $a/c=0,2$	74
Figure 73 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=45^0$ et $a/c=0,2$	74
Figure 74 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=60^0$ et $a/c=0,2$	75
Figure 75 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=30^0$ et $R=0,2$	76
Figure 76 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=45^0$ et $R=0,2$	77
Figure 77 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=60^0$ et $R=0,2$	77
Figure 78 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$	78
Figure 79 : effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$	79
Figure 80 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=30^0$ et $a/c=0,2$	80
Figure 81 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=45^0$ et $a/c=0,2$	80
Figure 82 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=60^0$ et $a/c=0,2$	81
Figure 83 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=30^0$ et $R=0,2$	82
Figure 84 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=45^0$ et $R=0,2$	82
Figure 85 : Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=60^0$ et $R=0,2$	83
Figure 86 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$	84
Figure 87 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$	84
Figure 88 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,5$ et $R=0,2$	85
Figure 89 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=30^0$ et $a/c=0,2$	86
Figure 90 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=45^0$ et $a/c=0,2$	86
Figure 91 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=60^0$ et $a/c=0,2$	87
Figure 92 : Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=30^0$	88
Figure 93 : Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=45^0$	88

Figure 94 : Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=60^0$ 89

Liste des tableaux

Tableau 1 : procédés du soudage selon ISO 4063.....28

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques et paramètres de propagation des matériaux57

Tableau 3 : Evolution de la contrainte moyenne pour différents rapports de charge....59

Sommaire

List des symboles.....	I
List des Figures.....	III
List des Tableaux.....	VI
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Notion générales sur le soudage	
I . Introduction.....	3
II . Paramètres du soudage.....	3
II.1 Notion soudabilité.....	4
II.2 Zone constitutives d'un joint soudé.....	5
II.3 Types des assemblages soudés.....	6
II.3.1 Assemblage bout-à-bout.....	6
II.3.2 Assemblage en coin.....	7
II.3.3 Assemblage à bords relevés.....	8
II.3.4 Assemblage par recouvrement.....	8
III . procédés de soudage	9
III.1 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique.....	9
III.1.1 Soudage à la flamme.....	9
III.1.2 Soudage à l'arc.....	12
a. Soudage à l'arc avec électrode enrobé.....	13
b. Soudage avec électrode réfractaire TIG	14
c. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse MIG/MAG.....	14
d. Soudage plasma.....	15
e. Soudage verticale sous laitier.....	16
III.1.3 Soudage aluminothermique.....	17
III.1.3 Soudage par faisceau à haut densité d'énergie.....	17
a. Soudage par faisceau d'électrons.....	17
b. Soudage par faisceau Laser.....	18
III.2 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique.....	19
III.2.1 Soudage par point.....	20
III.2.2 Soudage à la molette.....	21
III.2.3 Soudage par bossages.....	22
III.2.4 Soudage en bout par étincelage.....	23
III.3 Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique.....	24
III.3.1 Soudage par diffusion.....	24
III.3.2 Soudage par friction.....	25
III.4 Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage.....	26
III.4.1 Soudage par ultrasons.....	26
III.4.1 Soudage par explosion.....	27
IV. Principaux défauts des soudures.....	30
IV. Défauts des cavités.....	30
IV.1.1 Défauts des soufflures.....	30
IV.1.2 Défauts des retassures.....	31
IV.1.3 Défauts des inclusions.....	31
IV.2 Les fissures.....	32

IV.3 Morsures et les Caniveaux.....	34
IV.4 La Pollution ferreuse.....	34
IV.5 Défaut de manque de fusion.....	35
IV.6 Défauts de pénétration.....	35
IV.7 Défauts de géométries des cordons.....	36
IV.7.1 Défaut d'alignement.....	36
IV.7.2 Défauts angulaires.....	37
IV.8 Défauts des projections.....	37

CHAPITRE II :Fissuration par fatigue

I. Introduction.....	38
II. Notions de mécanique de la rupture.....	38
II.1 Types de la rupture.....	39
II.2 Modes de la rupture.....	40
II.3 Facteur d'intensité des contraintes.....	41
III. Endommagement par fatigue.....	42
III.1 Courbe de Wöhler.....	42
III.2 Notions des contraintes cycliques	43
III.3 Mécanisme de propagation des fissures.....	45
III.3.1 Amorçage d'une fissures de fatigue.....	45
III.3.2 Propagation d'une fissure de fatigue.....	47
III.4 Modèles de propagation d'un fissure de fatigue.....	49

CHAPITER III :Etude de la fissuration par fatigue & Résultats et discussion

I. Introduction.....	53
II. Présentation de code de calcule eFatigue.....	53
II.1 Facteur d'intensité de contraintes	54
II.2 Analyse de l'évolution de la fissure à amplitude constant.....	55
II.3 Modèle de PARIS.....	55
III. Caractéristique mécanique et propriétés des matériaux.....	56
III.1 Matériaux d'étude.....	56
III.2 Géométries des éprouvettes	58
III.3 Paramètres de chargement.....	59
IV. Résultats et discussion.....	60
IV.1 Soudure bout-à-bout.....	60
IV.1.1 Effet du rapport de charge sur le comportement en fatigue de l'acier A316..	60
IV.1.2 Effet du rapport de charge sur le comportement en fatigue de l'acier A542..	63
IV.1.3 Effet du rapport de charge sur le comportement en fatigue de l'acier A517..	65
IV.1.4 Etude comparative.....	68
IV.2 Soudure à double fillet.....	69
IV.2.1 Etude de comportement en fatigue de l'acier A316.....	69
a. Effet du rapport a/c.....	69
b. Effet de l'angle θ	71
c. Effet du rapport de charge R.....	73
IV.2.2 Etude de comportement en fatigue de l'acier A542.....	75

a. Effet du rapport a/c.....	75
b. Effet de l'angle θ	78
c. Effet du rapport de charge R.....	79
IV.2.3 Etude de comportement en fatigue de l'acier A517.....	81
a. Effet du rapport a/c.....	81
b. Effet de l'angle θ	83
c. Effet du rapport de charge R.....	85
IV.2.4 Etude comparative.....	87
Conclusion générale.....	90
List des références	91

INTRODUCTION
GENERALE

L'assemblage par soudage est connu depuis le XIX^e siècle dans l'esprit scientifiques, il se développe rapidement dans la main des techniciens passant par le soudage oxyacétylénique puis le soudage à l'arc et le soudage par résistance et enfin le soudage laser. Il représente actuellement le principal moyen d'assemblage des structures métalliques, sans lui, de nombreuses applications industrielles n'auraient pas pu être réalisées.

En effet, la majorité des assemblages soudés soumises à des sollicitations cycliques appelées fatigue, sont susceptibles à la rupture ; ce qui représente un souci majeur pour les concepteurs, pour cela le concept de la mécanique de la rupture est devenu une obligation pour analyser le comportement des matériaux vis-à-vis la fatigue et étudier la nocivité des défauts, principalement les fissures, dans les assemblages soudés ainsi que la prédiction de la durée de vie sous des différents paramètres à titre d'exemple l'amplitude des contraintes, le rapport de charge et la géométrie du défaut.

Ce mémoire intitulé par « *analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles* » a pour objective d'identifier les défauts liés au procédé du soudage ainsi que d'examiner, à travers d'une simulation numérique, l'influence de la taille des fissures et les paramètres liés au chargement et la géométrie du cordon du soudure sur le comportement des joints soudés soumis en fatigue afin de prédire leur durée de vie sous ces circonstances .

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

- ❖ Le premier chapitre représente les notions générales sur le soudage tel que les procédés de soudage, les paramètres d'assemblage et les différents types de défauts constatés
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude globale du phénomène de la fatigue et la rupture des matériaux et aussi bien, les mécanismes de la propagation de la fissure.
- ❖ Le troisième chapitre est visé pour l'étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles à travers une simulation numérique effectuée par le code « eFatigue » pour objective de la prédiction de la durée de vie en fatigue. Ce chapitre est devisé en trois partis, la première partie présente une description du code or dans la deuxième partie, une présentation des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés ainsi que les éprouvettes et les paramètres de chargement et finalement une interprétation des résultats obtenue ont été effectuée dans la troisième partie.

Chapitre I :

Notions générales sur le soudage

I. INTRODUCTION

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le plus répandu dans la plupart des domaines industriels (transporte, industrie pétrolier et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.).

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler [1], sous l'action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers procédés mis en œuvre (combustion de gaz, arc électriques, pression...) .On soude presque la totalité des métaux existants en utilisant plusieurs procédés .Il existe deux cas de soudage :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder

On utilise le terme " soudure " pour désigner le résultat de l'opération du soudage.

Dans ce chapitre on va présenter de manière détaillé les paramètres et les procédés du soudage ainsi que les principaux défauts rencontrés dans les joints soudés.

II. PARAMETRES DE SOUDAGE

Les paramètres de soudage sont les conditions et les propriétés liées à la réalisation d'un assemblage telle que le procédé utiliser, la préparation des surfaces, le temps de soudage et de maintien, l'intensité du courant électrique, en respectant certaines règles élémentaires de sécurité.

Tous les paramètres et les consignes sont regroupés et présentés dans un document technique préparatoire d'une fabrication soudée nommé par le Descriptif de Mode Opérateur de Soudage «DMOS » (figure 1).

**Descriptif de mode opératoire de soudage
du constructeur ou du fabricant (DMOS)**

Code : _____

Lieu : _____ EXAMINATEUR OU ORGANISME D'INSPECTION : _____
 DMOS référence N° : 1
 PV-QMOS N° : _____
 Constructeur ou Fabricant : _____
 Nom du soudeur : xy
 Procédé de soudage : 136
 Type de joint : BW
 Détails de préparation de joint (Schéma)* : _____

Méthode de préparation et nettoyage : oxycaupage / meulage
 Spécification matériau de base : S355 K2 G3
 Epaisseur du matériau de base (mm) : 10
 Diamètre du matériau de base (mm) : _____
 Position de soudage de l'assemblage : PA

Schéma de préparation	Disposition des passes

Paramètres de soudage :

Passes n°	Procédé	Dimension métal d'apport	Courant +/- A 15/	Voltage +/- V 2V	Type de courant Polarité	Alimentation en fil Vitesse d'avance*	Energie de soudage *
1	136	φ 1,2	140	19	CC +	15 cm/min	
2	1	1	270	28	1	42 "	
3-6	1	1	290	29		39 "	

Métal d'apport : codification : T46 S M9 1MS Autres informations : N° Covitéc 10241501
 marque et type : SAFDUAL 200
 Reprise spéciale ou séchage : _____
 Gaz de protection/flux : endroit : ARCAL 21
 envers : _____
 Débit de gaz - endroit : 12 L/min + 2
 envers : _____
 Type d'électrode de tungstène/Dimension : _____
 Détails de gougeage ou du support envers : _____
 Température de préchauffage : _____
 Température entrepasses : ≤ 250°C
 Traitement thermique après soudage ou vieillissement : _____
 Temps, Température, Méthode : _____
 Vitesses de montée en température et de refroidissement* : _____
 L'assemblage de qualification décrit ci-dessus a été soudé en présence de : _____

Constructeur ou fabricant
Nom, date et signature : _____

Examineur ou organisme d'inspection
Nom, date et signature : _____

*Si nécessaire

Figure 1: Exemple du Descriptif de Mode Opératoire de Soudage [2]

II. 1 Notion de soudabilité

On considère qu'un matériau métallique est soudable, à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé, qui par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leurs présences, satisfont aux propriétés requises, est choisies comme base de jugement [3].

Dans le cas des aciers, un critère de soudabilité est donné par la valeur de carbone équivalent fixé par l'institut international de soudure. Il est donné par [4]:

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1.1)$$

Avec : C_{eq} : Valeur de Carbone équivalent

Et : C : Carbone, Mn : Manganèse, Cr : Chrome, Mo : Molybdène, V : Vanadium, Ni : Nickel, Cu : Cuivre.

Selon la valeur de Carbone équivalent on distingue que :

- Si $C_{eq} \leq 0.40$, soudage sans précaution.
- Si $0.40 \leq C_{eq} \leq 0.60$, on effectue un préchauffage entre 100 à 250 C°.
- Si $C_{eq} \geq 0.60$, soudage difficile.
- Si $C_{eq} > 0.70$, acier non soudable.

II. 2 Zones constitutives d'un joint soudé

Afin d'obtenir un joint soudé, en faisant fondre le métal de base des deux composants à relier avec ou sans métal d'apport. Dans la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé on distingue cinq zones (figure 2):

- La zone de fusion (ZF) mélangé : la zone où de métal d'apport et le métal de base sont mélangés de façon homogène (Bain de fusion) sous une température élevée adaptée dit température de liquidus.
- La zone affectée thermiquement (ZAT) : ou zone affectée par la chaleur est la zone de métal de base où ses propriétés mécaniques et microstructures sont modifiées par la chaleur du soudage.
- La zone fondue partiellement (ZFP) : elle est nommée aussi par la zone de liaison, elle se situe entre la zone de fusion et la zone affectée thermiquement.
- La racine : endroit jusqu'où le métal d'apport a pénétré.
- Le Face ou surépaisseur : surface extérieure de la soudure.

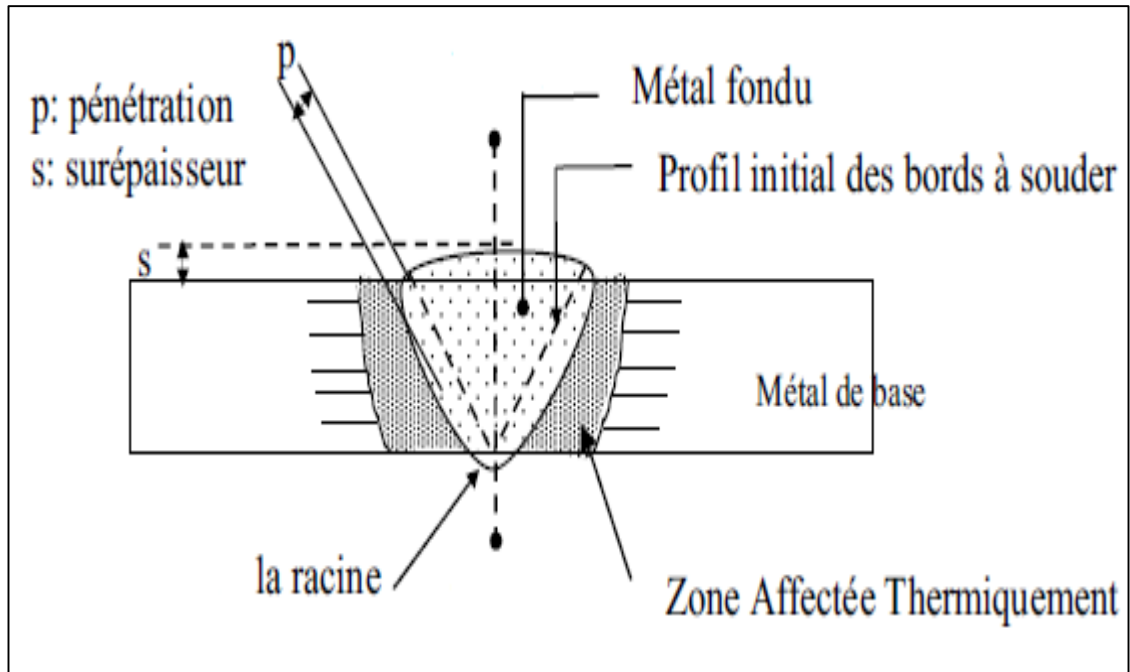


Figure 2: Représentation schématique du joint soudé [5]

II. 3 Types des assemblages soudés

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permette de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration.

Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis.

II. 3.1 Assemblage bout-à-bout

La soudure bout-à-bout (figure 3) est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle.

Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égale à 5 mm.

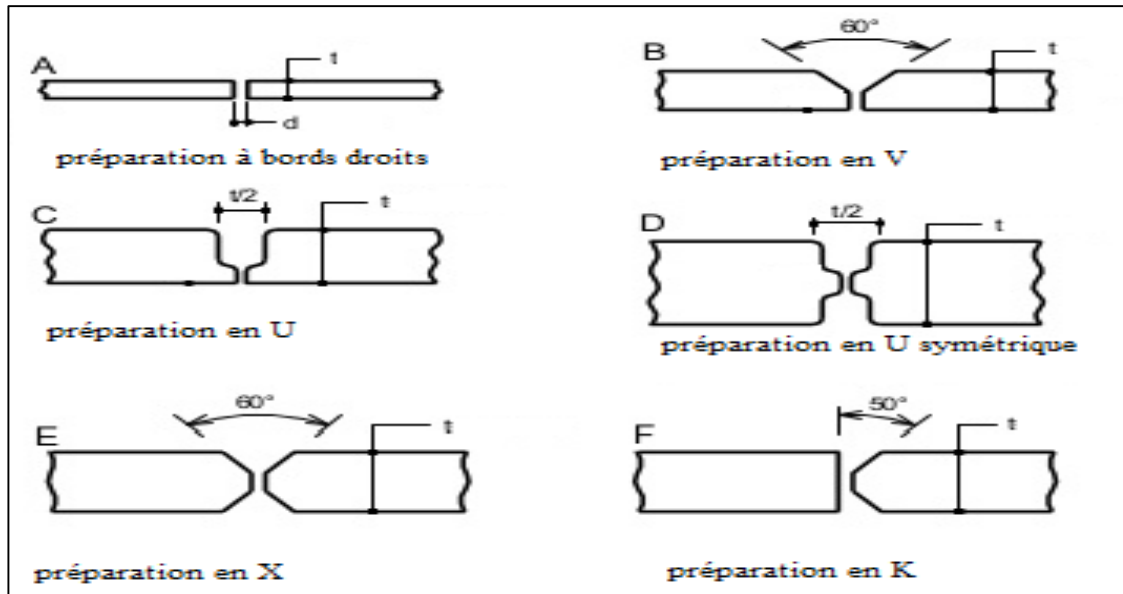


Figure 3: Préparation des bords en assemblage bout-à-bout [6]

II. 3.2 Assemblage en coin ou en angles

Comme son nom l'indique, il est utilisé pour connecter deux pièces ensemble à un certain angle et le jeu entre eux doit être approprié pour éviter l'effondrement du bain de fusion.

Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de 90° faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en T (figure 4).

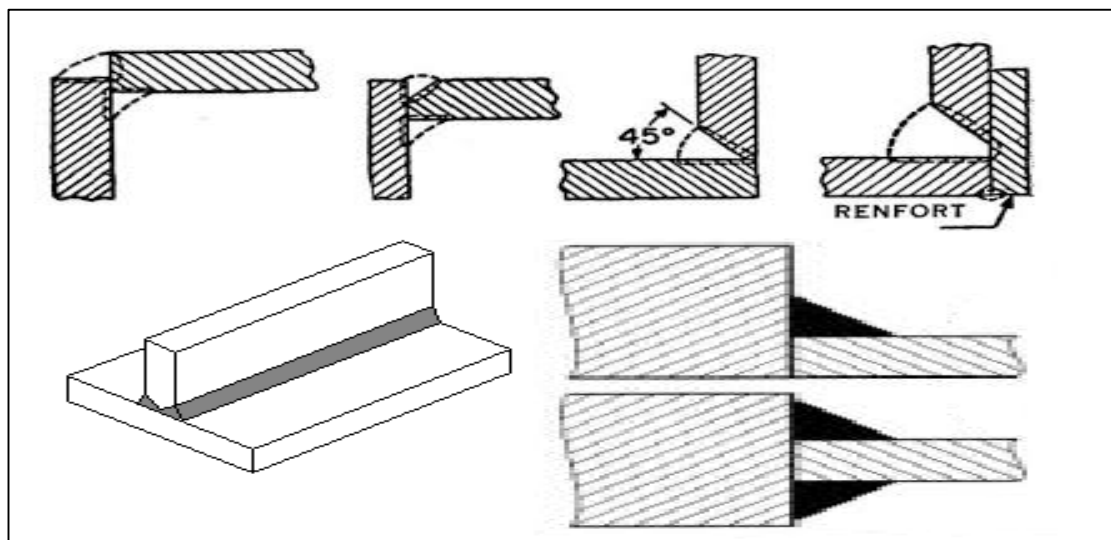


Figure 4: Assemblages en angles

II. 3.3 Assemblage à bords relevés

Un type soudure à rainure, est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces de tôlerie qui ont des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être faite pour réunir deux pièces adjacentes (figure 5).

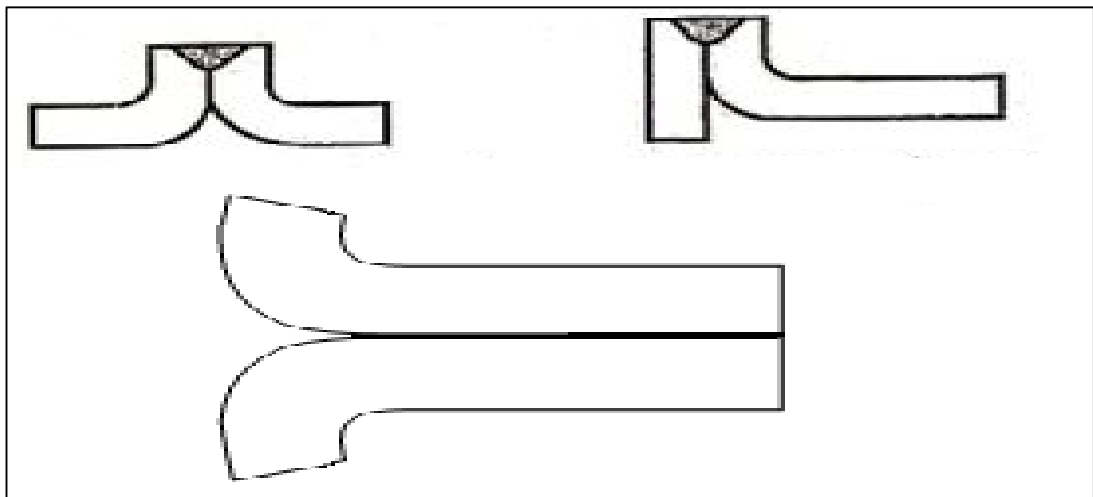


Figure 5: Assemblage à bords relevés

II. 3.4 Assemblage par recouvrement

Il se forme lorsque deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur une certaine distance le long du bord (figure 6). Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.

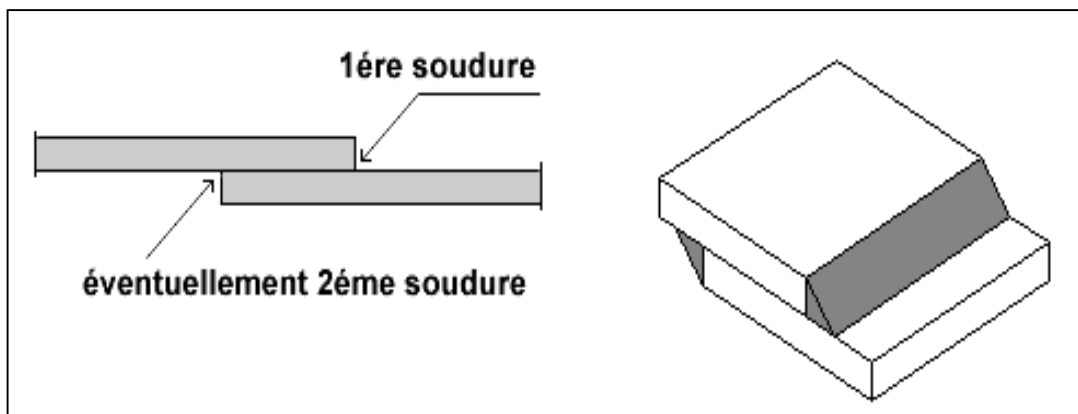


Figure 6: Assemblage à recouvrement

III. PROCÉDES DE SOUDAGE

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont des types chimiques, électriques, ou mécaniques. [7]

Ces procédés sont classés ici selon [8] :

- Les procédés faisant intervenir la fusion locale sans une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir la fusion locale avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage.

III. 1 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique

La fusion locale des pièces à assembler peut être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le moyen de protection du métal fondu contre l'action chimique de l'atmosphère ambiante. C'est ainsi on peut répertorier :

- le soudage à la flamme
- le soudage à l'arc
- le soudage aluminothermique
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie

III. 1.1 Soudage à la flamme

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO 4063) est connue par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène O_2) et un gaz combustible (généralement l'acétylène C_2H_2), en créant une flamme qui peut atteindre une température situé entre $2850^{\circ}C$ et $3200^{\circ}C$ à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré [9].

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion (figure 7).

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement .Le soudage O.A est limitée pour les pièces de faible épaisseur environ de 5 mm.

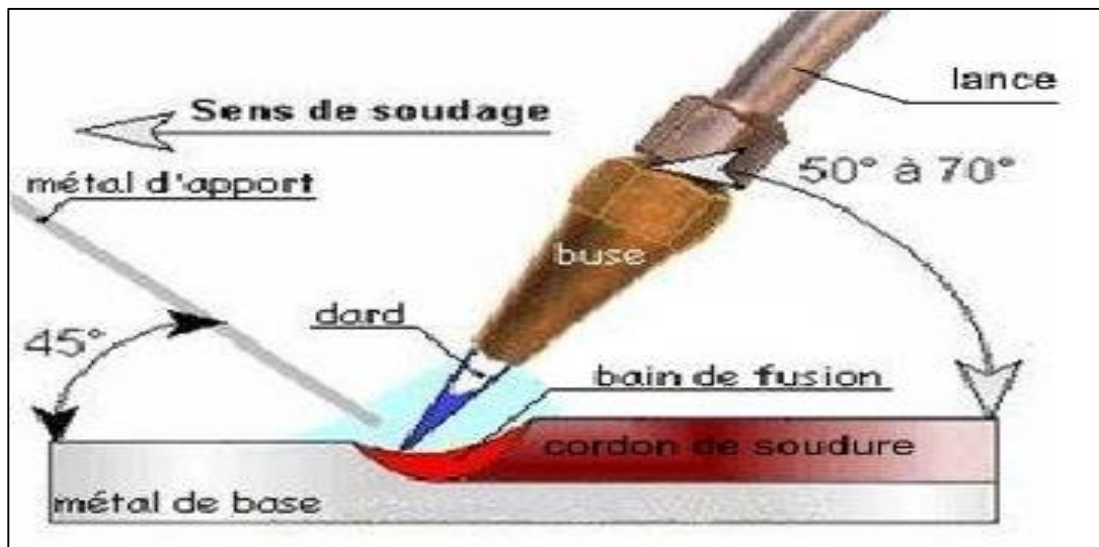


Figure 7: Soudage oxyacétylénique [10]

Le détail du matériel mise en disposition pour effectuer ce type de soudage est illustré dans la figure 8 :

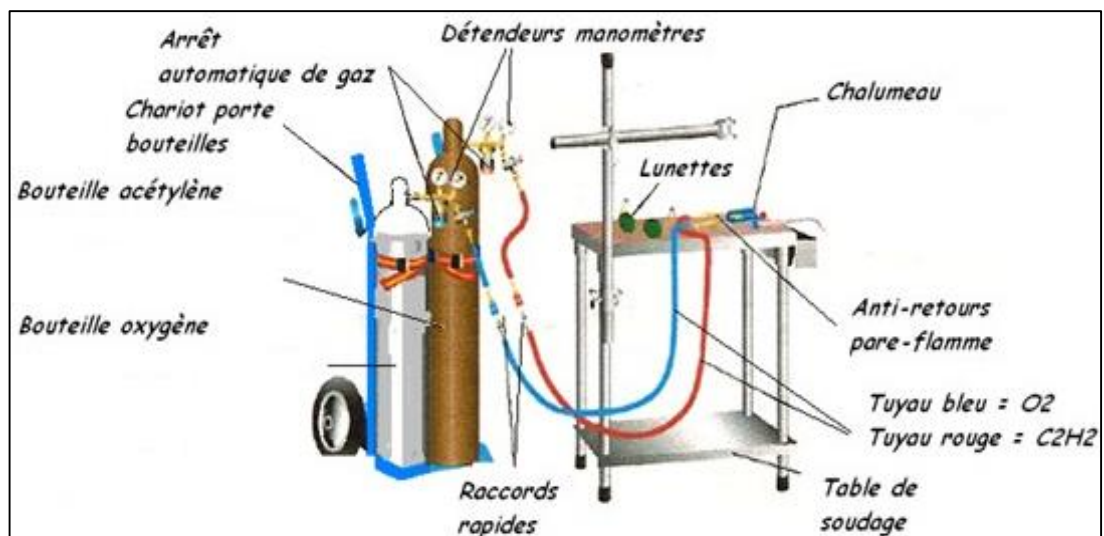


Figure 8: Matériel propre au soudage oxyacétylénique [11]

Après avoir le mélange entre l'acétylène et l'oxygène par l'intermédiaire du chalumeau, la flamme produite comporte trois zones consécutives :

- une darde de couleur blanc brillant à la sortie de la buse
- zone réductrice
- un panache.

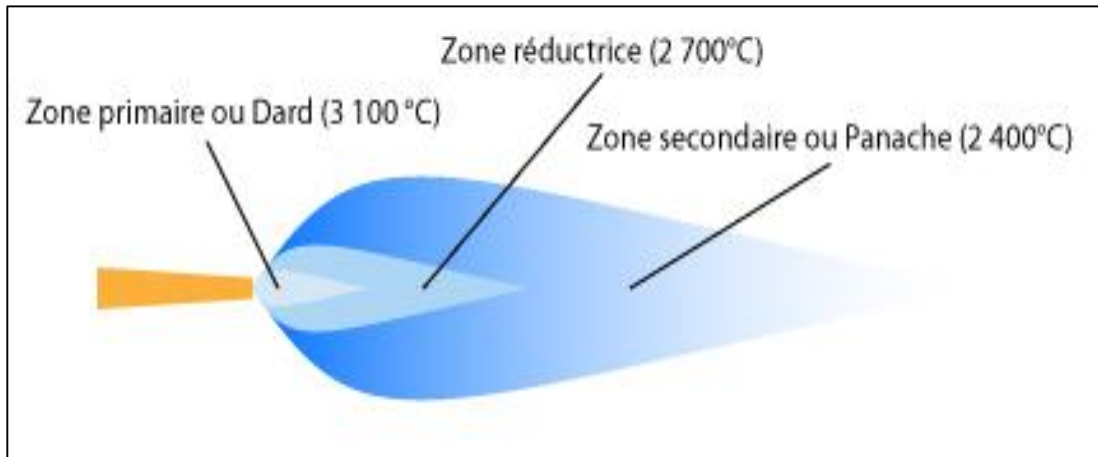


Figure 9: Zones de la flamme [12]

Le réglage de la flamme (figure 10) fait par l'intervention du rapport de consommation 'r' (équation 1.2), ce qui traduit par trois types des flammes [13] :

- Flamme neutre ou normale : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse. (figure 10.a)
- Flamme oxydante : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement. Le panache est plus lumineux (figure 10.b).
- Flamme carburante : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières (figure 10.c).

Le soudage parfait nécessite une flamme neutre correspondant à $1 \leq r \leq 1.2$.

$$r = \frac{\text{volume du } O_2}{\text{volume du } C_2H_2} \quad (1.2)$$

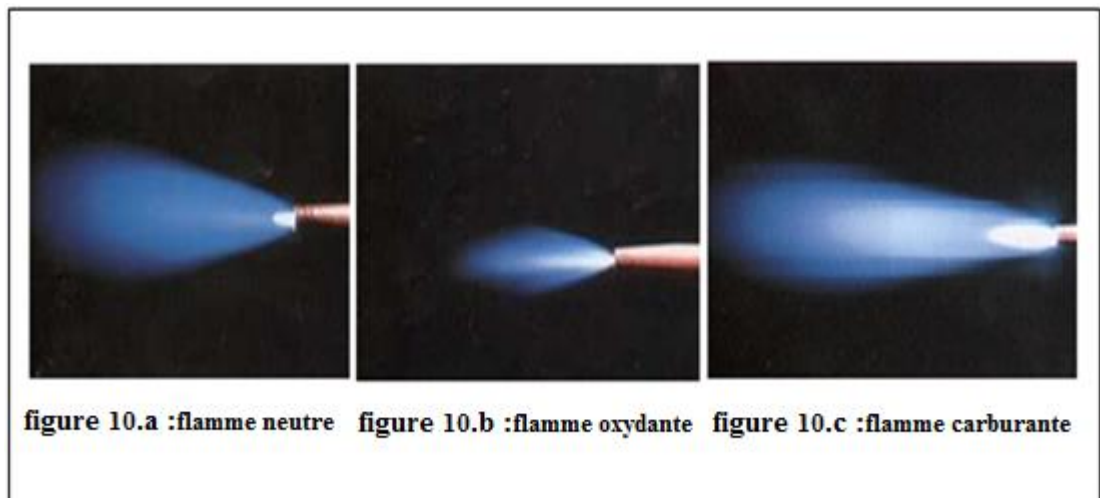


Figure 10: Types de la flamme [14]

III. 1.2 Soudage à l'arc

La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm.

La formation du bain de métal fondu est assuré par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternative qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder ,cette fusion assure la liaison après le refroidissement des éléments entre eux.

L'arc doit s'amorcer facilement et reste stable par le réglage de la tension d'amorçage suffisante et emploi de corps émissifs dans l'enrobage ainsi que la protection avec un milieu gazeux adapté qui favorisant le soudage

Ce procédé regroupe les types de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage avec électrode enrobées ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG ;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.
- Le soudage vertical sous laitier.

a. Soudage à l'arc avec électrode enrobée

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE) (procédé 111 selon l'ISO 4063) est réalisé à partir d'une source de chaleur engendrée par un arc électrique entre l'âme métallique de l'électrode [15] (où son diamètre est compris entre 1mm et 10mm et de longueur d'environ 400mm) et les pièces à souder (figure 11).

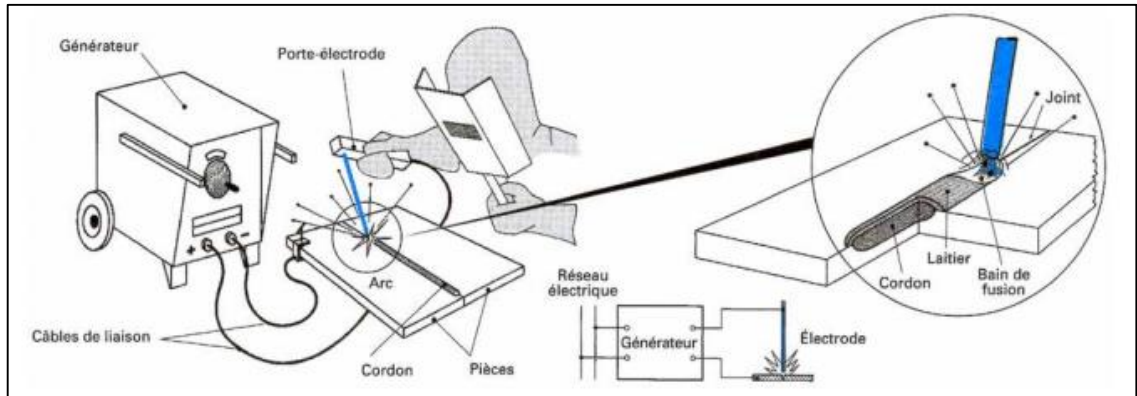


Figure 11: Soudage à l'arc avec électrode enrobé [16]

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

L'âme : partie métallique (métal d'apport) située au centre de l'électrode pour conduire le courant électrique.

L'enrobage : partie extérieure adhérent à l'âme qui dépose lors de sa fusion un laitier protecteur contre l'action de l'air ambiant, son rôle est d'assurer la stabilité et la continuité de l'arc et d'apporter les éléments chimiques d'addition nécessaires pour la formation de bain du métal fondu (figure 12).

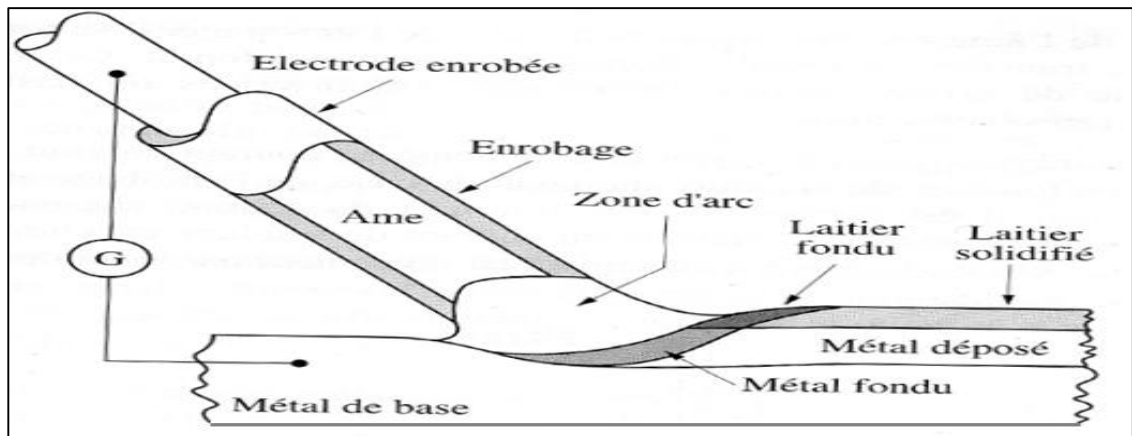


Figure 12: Electrode enrobée durant le soudage [17]

b. Soudage avec électrode réfractaire TIG

Le soudage TIG est un procédé de soudage sous flux gazeux avec électrode réfractaire sous une alimentation en courant continu pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivre ...) et un courant alternatif pour les alliages légers d'aluminium ou du magnésium (procédé 141 selon l'ISO 4063).

La fusion du métal d'apport à souder est obtenue par la formation d'un arc électrique entre une électrode inconsommable (diamètre ente 1mm et 4mm [18]) fabriquée à l'aide d'un métal à très haut point de fusion (le tungstène) et les pièces à souder avec la mise en place une protection gazeuse (soit l'argon ou l'hélium soit des mélanges entre eux).

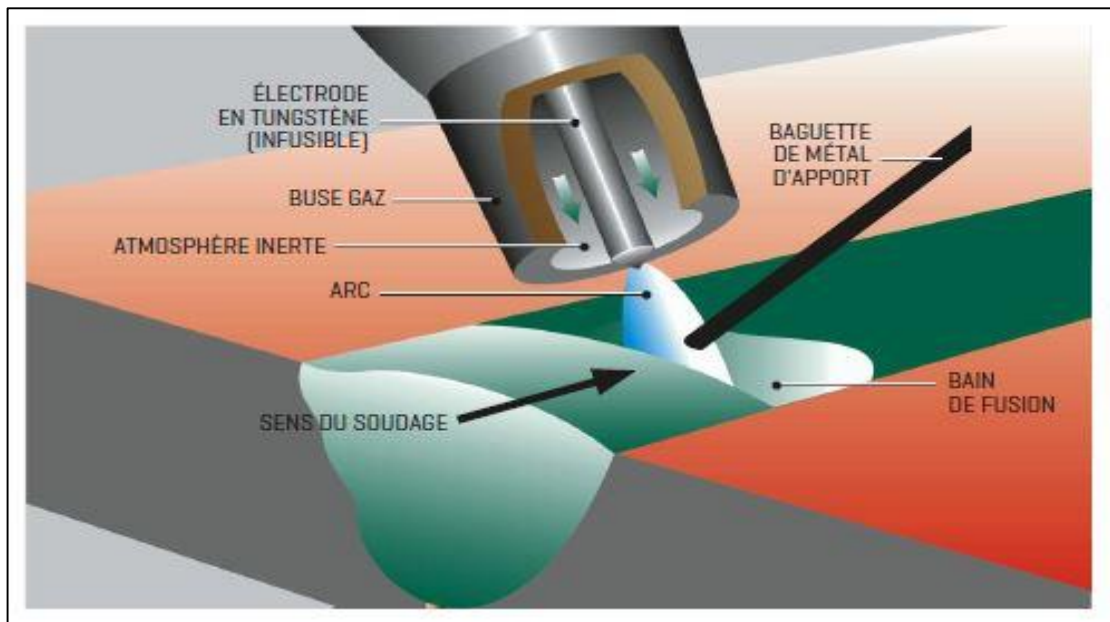


Figure 13: Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) [19]

c. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG

Le procédé de soudage MIG/MAG (procédé 131/135 selon l'ISO 4063) consiste à créer un arc électrique en courant continu entre un fil fusible (environ 0.5mm à 2.4mm de diamètre [20]) provenant d'une bobine et les pièces à souder, tout en protégeant l'arc et le bain de fusion par une atmosphère protectrice gazeuse. Cette atmosphère peut être inerte (Argon) ou active (CO₂ ou un mélange Argon/CO₂).

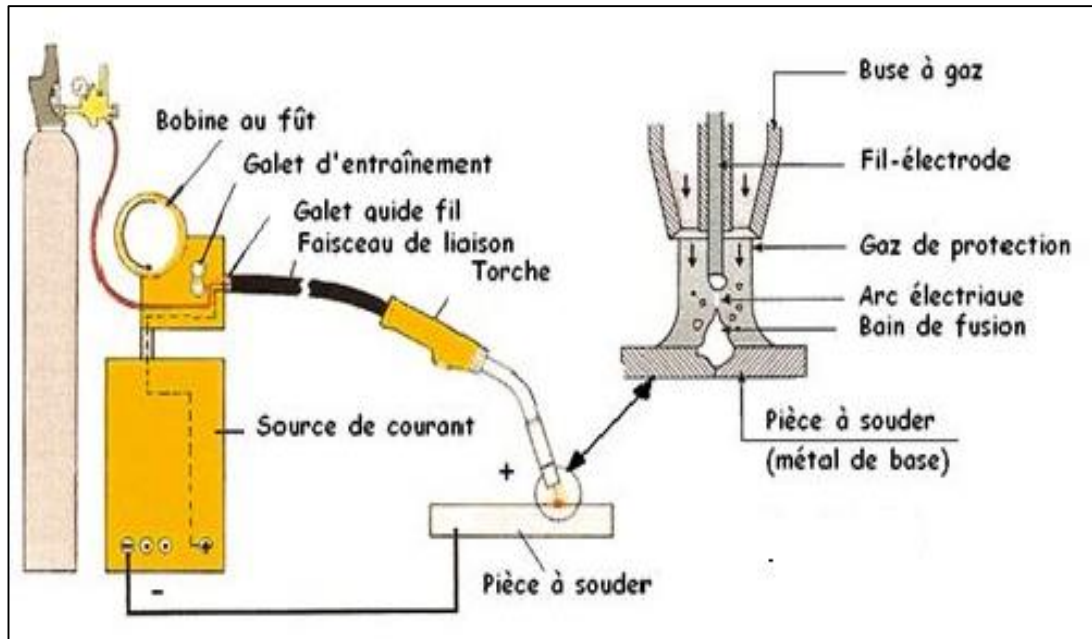


Figure 14: Soudage MIG / MAG [21]

d. Soudage plasma

Considéré comme une évolution du soudage TIG (figure 15), destiné pour le soudage bord à bord des tôles et des tubes dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 8mm (procédé 15 selon l'ISO 4063).

Un arc est créé entre une électrode de tungstène et la pièce à soudée, à la manière du procédé TIG, un gaz plasmagène est injecté dans une chambre refroidie et permet de forcé l'arc à passer au travers d'une tuyère (également refroidie), et augmente ainsi la puissance de l'arc qui devient très localisé.

Un gaz additionnel protège le bain de fusion des influences atmosphériques. Le procédé plasma requiert un gaz plasmagène et un gaz de protection. Le plasma permet d'atteindre une température de 15 000 °C et il est très fortement accéléré par le passage dans la tuyère. Le terme plasma est utilisé lorsque l'arc n'est plus composé d'atomes et de molécules, mais d'ions et d'électrons [22-23].

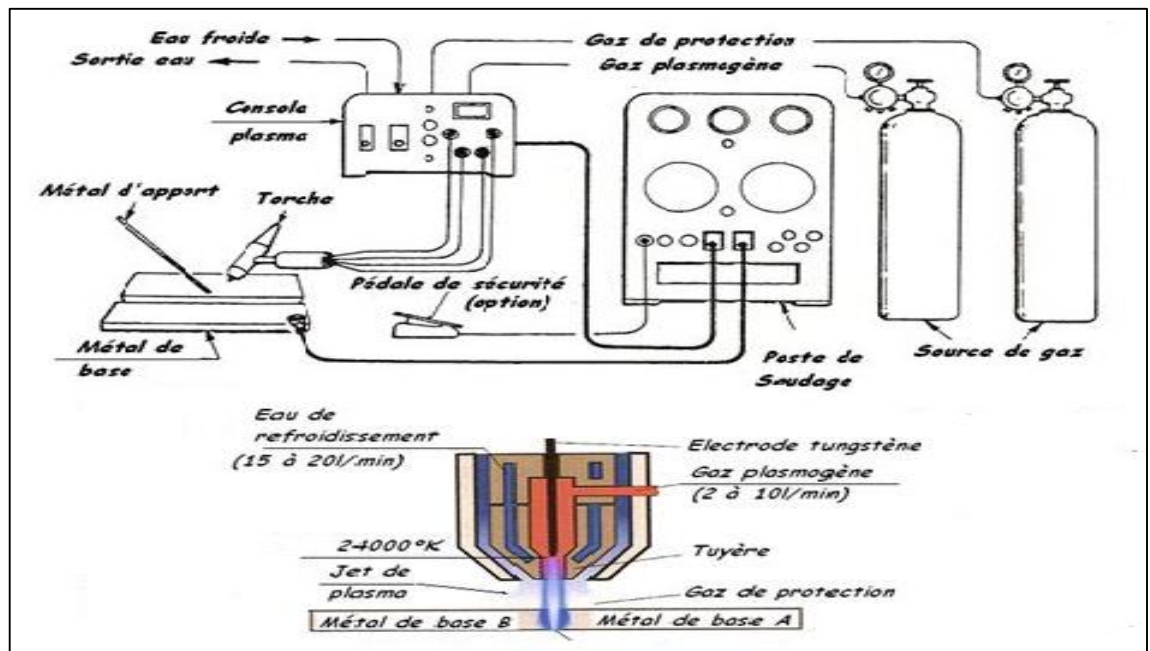


Figure 15 : Soudage plasma [24]

e. Soudage vertical sous laitier

Dans ce procédé le bain de métal fondu est formé dans un moule parallélépipède vertical créé entre les deux pièces à souder dont leur épaisseur est supérieure à 25 mm et recouvert par deux patins en cuivre (refroidis par la circulation d'eau) [25].

Le soudage progresse verticalement de bas en haut par la fusion de métal d'apport (fil d'électrode fusible guidé) à partir de l'amorçage d'un arc électrique entre ce fil d'électrode et une latte qui ferme le bas du moule (figure 16).

Au-dessus du bain de métal fondu, un bain de laitier constitué par le flux de soudage assure la protection (procédé 72 selon l'ISO 4063).

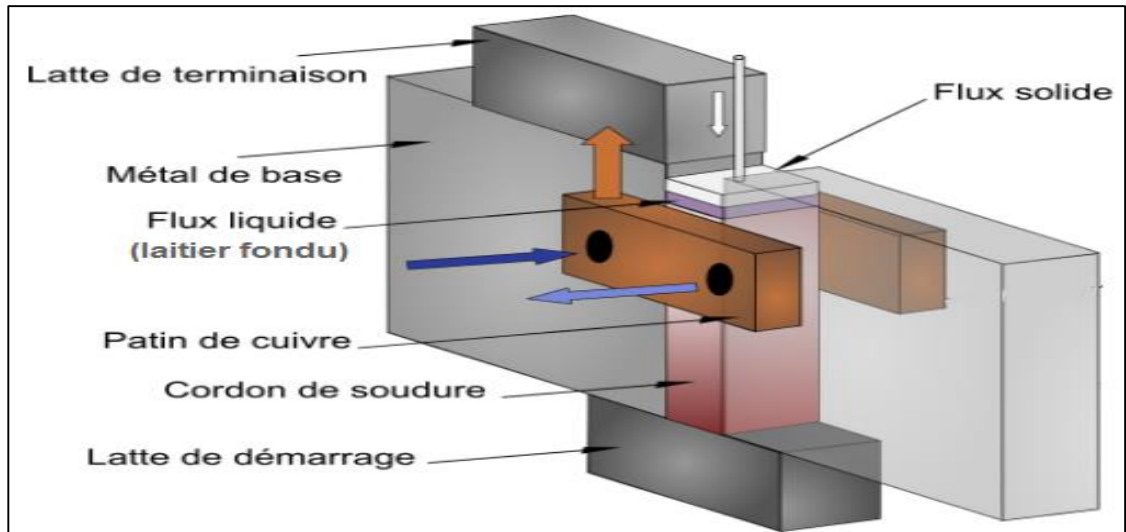


Figure 16 : Soudage vertical sous laitier [26]

III. 1.3 Soudage aluminothermique

Le procédé est largement utilisé dans le domaine de soudage des rails de chemins de fer (procédé 71 selon l'ISO 4063), il consiste à couler le métal d'apport liquide dans un moule étanche construit en matière réfractaire autour des deux pièces à assembler placées face à face à une certaine distance.

Le soudage se fait par une réaction chimique exothermique entre l'aluminium en poudre et des grains d'oxydes de fer ; après démoulage, il est nécessaire d'ébarber les pièces à assembler pour éliminer les appendices de coulée.

III. 1.4 Soudage par faisceau à haute densité d'énergie

Les procédés de soudage par faisceau à haute densité d'énergie (FHDE) sont caractérisés par la focalisation d'une densité d'énergie très importante au point d'impact sur le joint des pièces à assembler.

Le soudage est assisté de façon automatique par des grandes classes de machines ce qui permet la rapidité, la précision et l'assemblage des pièces de différents matériaux et dans des géométries complexes, donc la qualité de la soudure est excellente.

a. Soudage par faisceau d'électrons

Est un procédé de soudage par fusion utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec les pièces à assembler où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis à forte vitesse et accélérés dans le vide par un canon à électrons (figure 17).

Ce procédé de soudage est essentiellement automatisé et il permet de souder des épaisseurs importantes en une seule passe ainsi que de très fines épaisseurs sans besoin du métal de base généralement (procédé 51 selon l'ISO 4063).

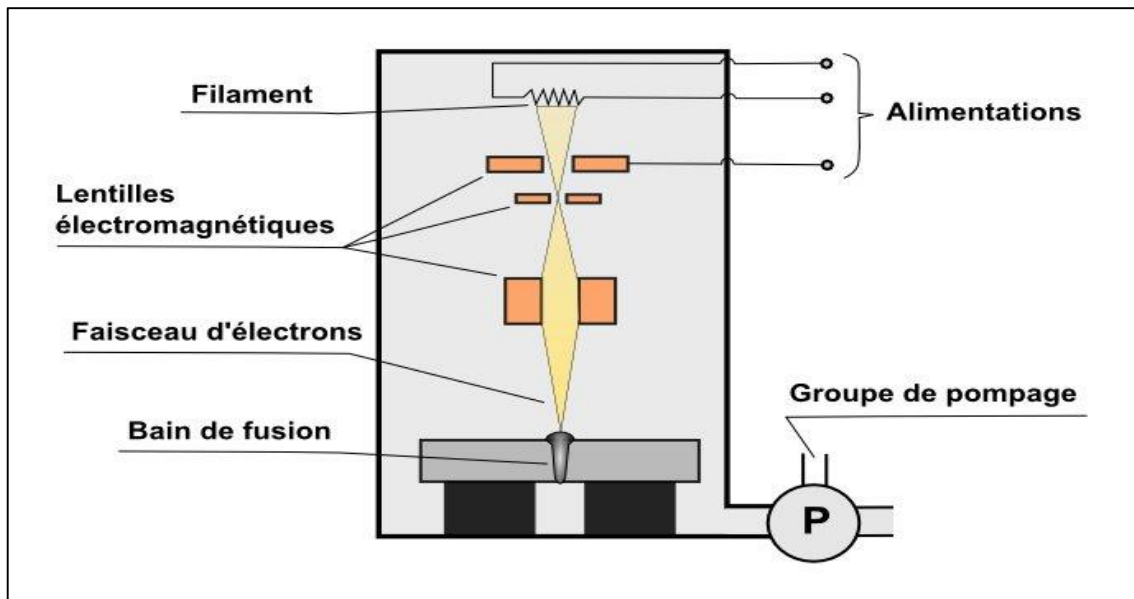


Figure 17: Soudage par faisceau d'électron [27]

b. Soudage par faisceau Laser

Le mot laser indique « amplification de lumière par émission stimulée de radiation » (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), le faisceau laser remplis de vapeur métallique dit capillaire est la source de chaleur qui est extrêmement concentrée et guidé vers le joint soudé, ce qui permet des soudures étroites, profonds, à une cadence rapide (procédé 52 selon l'ISO 4063).

Une opération de soudage par laser (figure 18), se conduit au moyen d'une machine automatique ou d'un robot. La démarche est similaire à celle du soudage automatique par fusion à l'arc TIG/plasma ou par faisceau d'électrons avec les particularités suivantes [28]:

- la source laser prend la place du générateur de courant d'arc ;
- une tête de focalisation remplace la torche ;
- un conduit optique amène le rayon de la source à la tête.

Cette technique est souvent utilisée dans le cas de gros volumes de production comme l'industrie automobile rempli de vapeurs métalliques.

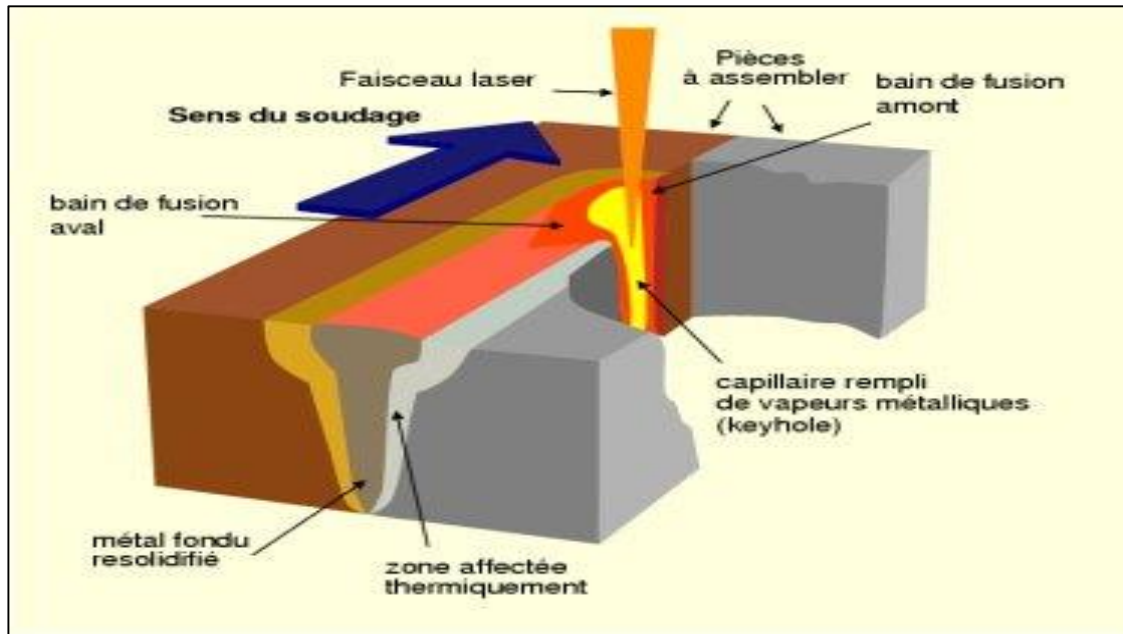


Figure 18: Soudage par faisceau Laser [29]

III. 2 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique

Dans ces procédés, la chaleur utilisée pour former le bain du métal fondu est assurée par la combinaison entre l'effet Joule d'un courant électrique alternatif à haute intensité et une pression ponctuelle.

L'énergie nécessaire de la fusion des métaux est obtenue par effet Joule, caractérisée par :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1.3)$$

Avec W : quantité d'énergie engendrée par l'effet joules en joules

R : la Résistance en Ohm

I : intensité en ampère

t : temps de soudage en millisecondes (très court)

Ces procédés ne nécessitent pas d'apport extérieur (Soudage autogène) car la résistance de contact entre les surfaces des deux pièces à assembler permet la localisation de la fusion dans ce plan. Ces procédés sont :

- Le soudage par point
- Le soudage à la molette
- Le soudage par bossage
- Le Soudage en bout par étincelage

III. 2.1 Soudage par point

Le soudage par points (procédé 21 selon l'ISO 4063) est un procédé d'assemblage discontinu par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'épaisseur de 0.5 à 10mm pour tous les matériaux conducteurs (aciers, aluminium ...).

Les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L'action d'une pédale liée à la machine de soudage déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes [30]:

- L'accostage : les électrodes viennent appuyer et comprimer les pièces à souder
- Le soudage : le passage du courant dû à la fermeture de circuit crée une zone fondue par l'effet de Joule.
- Le forgeage ou le maintien : effet de maintenir pour laisser le temps à l'assemblage de refroidir.
- Le remonté : la fin du procédé les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

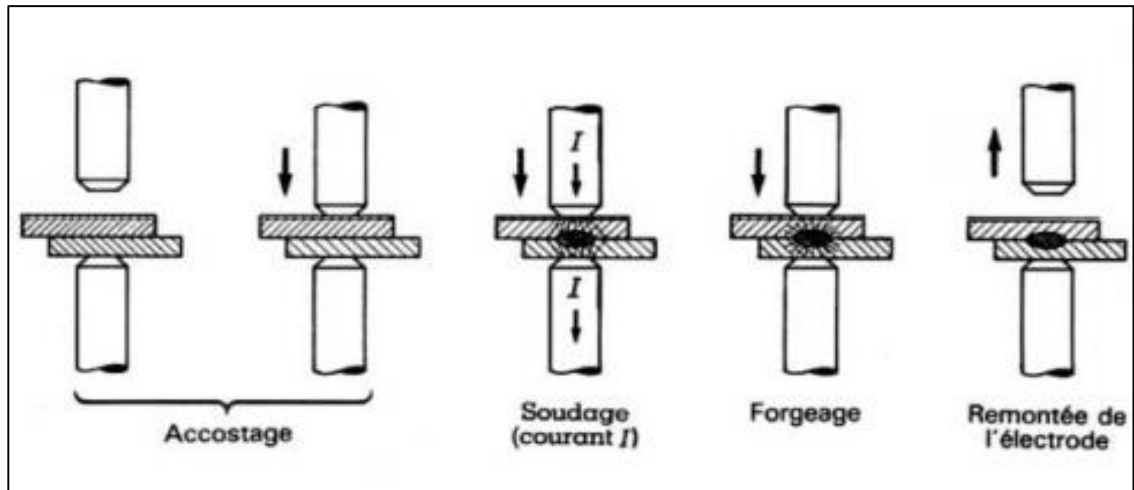


Figure 19: Soudage par point [31]

III. 2.2 Soudage à la molette

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou molettes, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser (procédé 22 selon l'ISO 4063).

Le cycle de soudage (figure 20), comporte des phases similaires à celles du soudage par point :

- L'accostage : Les deux pièces à souder sont au point de départ et les deux molettes viennent serrer, pour localiser le courant.
- le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue entre les deux pièces
- l'arrêt et le remonté des molette: qui commande l'écartement des molettes en fin de cordon.

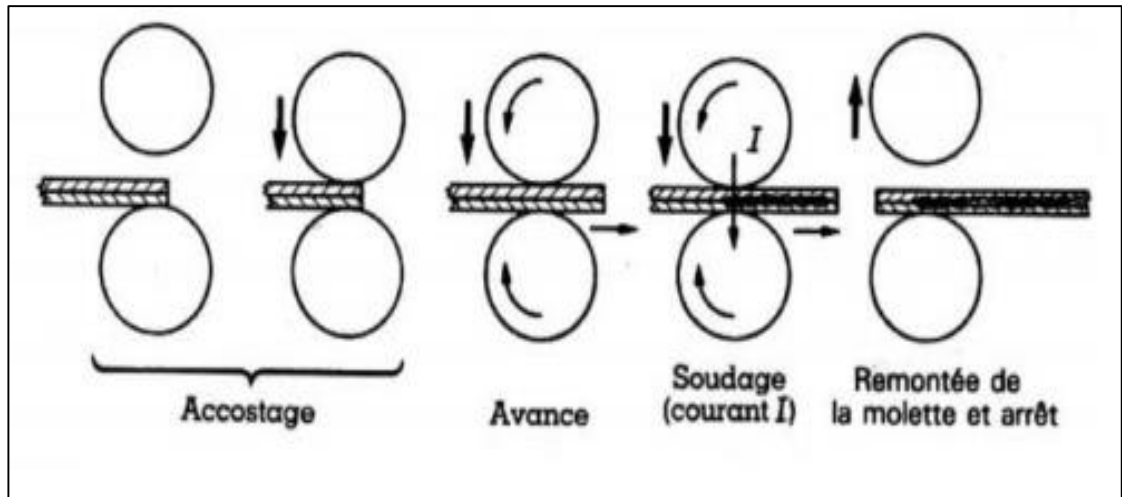


Figure 20: Soudage à la molette [32]

III. 2.3 Soudage par bossages

Le soudage par bossages a le même principe de soudage par points, la différence entre eux c'est que le passage du courant électrique est localisé par des reliefs appelés bossages qui ont créé sur une seule surface des deux pièces à souder (figure 21).

Ces bossages assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser (procédé 23 selon l'ISO 4063).

On retrouve dans ce cycle les mêmes phases précédemment examinées en soudage par points:

- l'accostage : les deux outillages se serrent sur les pièces préalablement positionnées
- le soudage : le courant passe et s'accompagne de l'affaissement des bossages
- le forgeage : à la fin duquel les outillages s'ouvrent

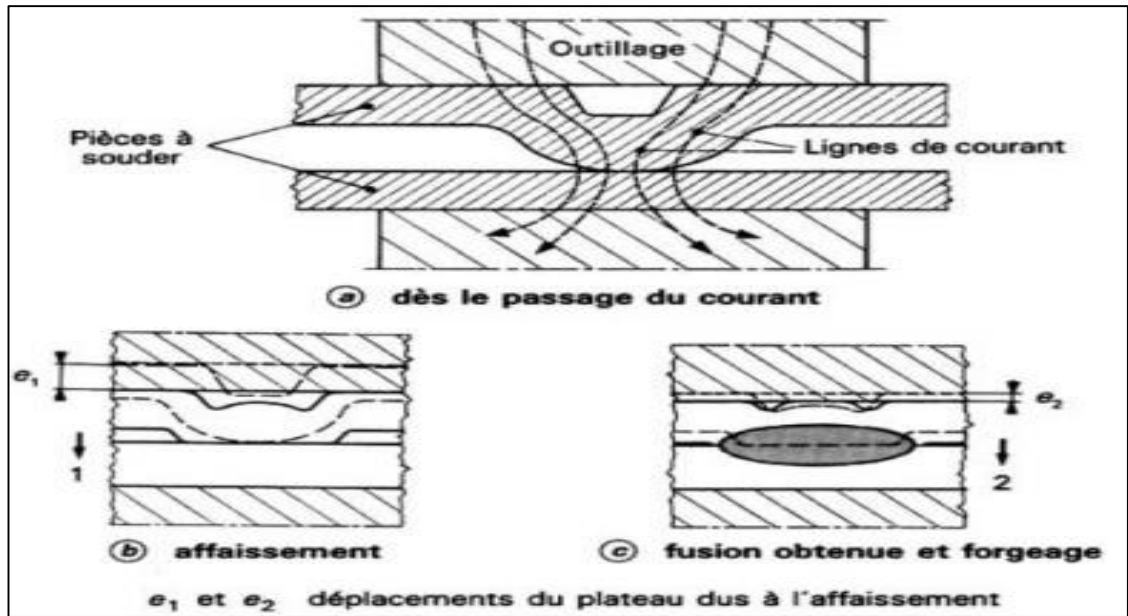


Figure 21: Soudage par bossage [33]

III. 2.4 Soudage en bout par étincelage

Le soudage en bout par étincelage est utilisé pour assembler les pièces (barres, tubes ou autres produits...) où ils ont la même section droite. Les pièces à assembler sont placées en contact dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage (figure 22).

Les deux sont amenées d'abord à la température de soudage par l'effet Joule dû à un courant électrique important traversant ces surfaces, ensuite un effort de forgeage est appliqué pour finaliser la soudure (procédé 24 selon l'ISO 4063).

Le cycle se déroule automatiquement de la façon suivante [34] :

- avance et accostage : le chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces qui viennent en contact sous un effort déterminé.
- soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire du circuit de puissance, et porte les parties en contact à la température de soudage.
- forgeage ou maintien : exercé par l'effort du chariot mobile et à la fin duquel les mâchoires s'ouvrent en permettant le retour au repos du chariot.

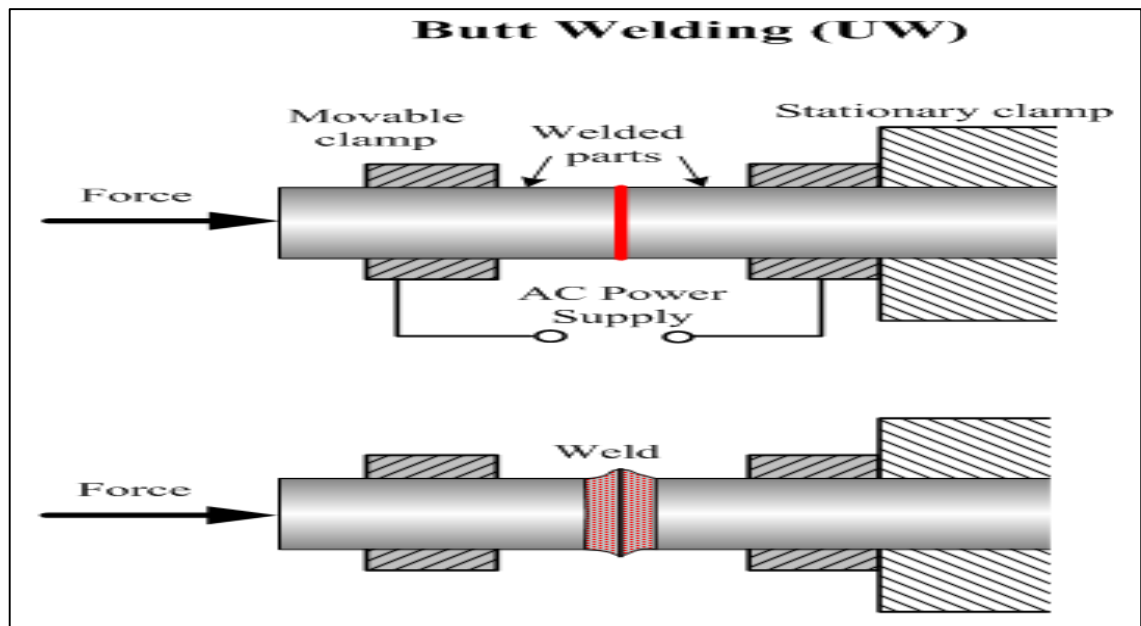


Figure 22: Soudage en bout par étincelage [35]

III. 3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique

Le chauffage peut être effectué par apport extérieur de chaleur ou par action mécanique (frottement). Les efforts appliqués doivent être soigneusement pilotés.

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques [36] et elles regroupent :

- Le soudage par diffusion
- Le soudage par friction

III. 3.1 Soudage par diffusion

Le procédé de soudage par diffusion consiste à assembler deux pièces en état solide en provoquant une diffusion des atomes à travers le plan de joint ce qui assure une continuité métallique sous l'application d'une pression adaptée et une température suffisamment élevée proche à la température de fusion avec du nécessité de le nettoyage et la préparation des surfaces par polissage afin de garantir le contact parfait et éliminer tous genres de pollution qui peuvent gêner la diffusion (procédé 45 selon l'ISO 4063).

III. 3.2 Soudage par friction

Le soudage par friction (procédé 42 selon l'ISO 4063) est un procédé de soudage en bout des pièces cylindriques (Soudage par rotation) où les tôles (soudage malaxage) à lequel la rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction.

Dans le soudage par friction en rotation (figure 23), une des deux pièces est en rotation relative par rapport à l'autre .l'application d'un effort axial assure le frottement et donc l'échauffement des extrémités des pièces à souder. Lorsque la température nécessaire est atteinte, la rotation est arrêtée et l'effort axial de forgeage est simultanément augmenté pour former la soudure.

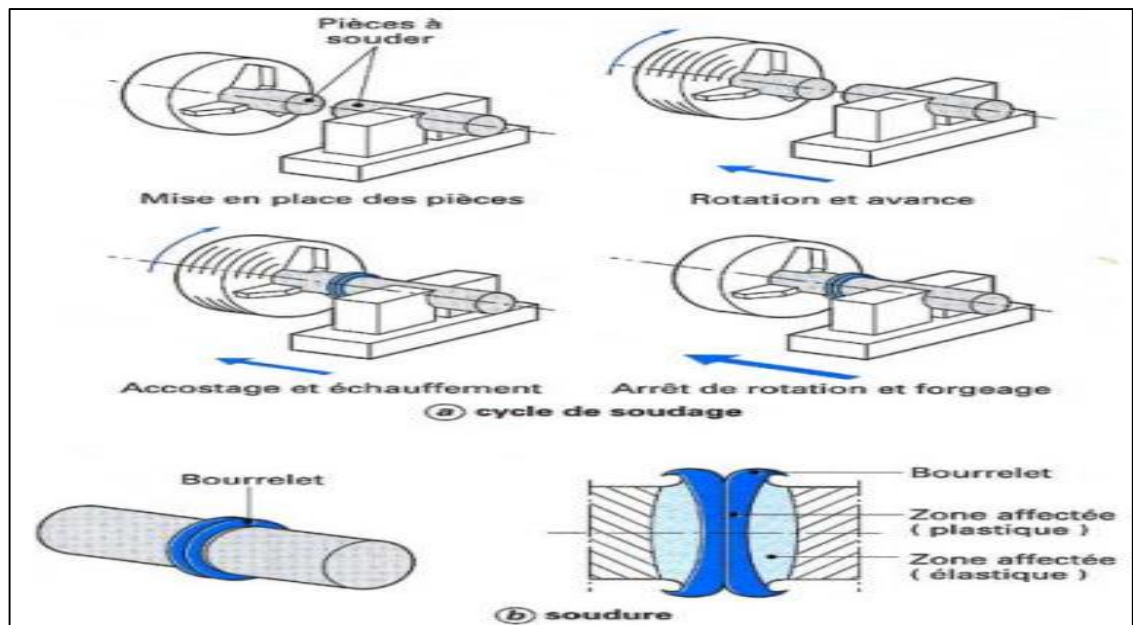


Figure 23: Soudage par friction en rotation [37]

Dans soudage par friction malaxage (figure 24), un outil rotatif constitué d'une tige profilée et d'un épaulement est enfoncé dans le plan de joint jusqu'à l'épaulement touche les surfaces des deux pièces à souder .le frottement engendré par la rotation de l'outil provoque un échauffement important et le mouvement de translation de l'outil assure la liaison entre ces deux pièces.

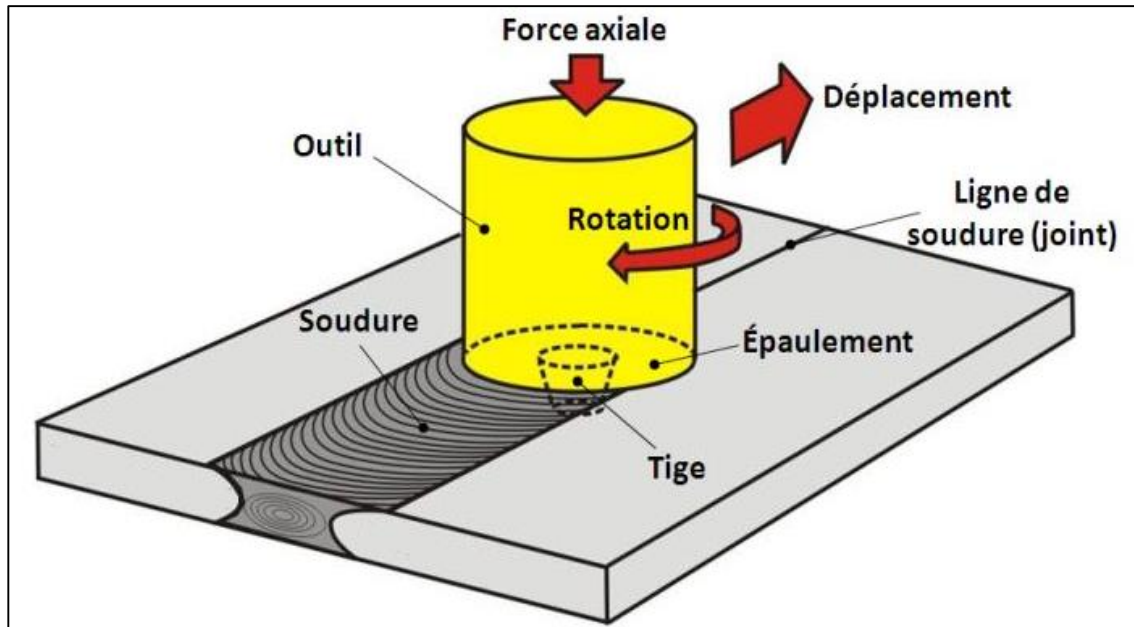


Figure 24: Soudage par friction malaxage [38]

III. 4. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage

Ces procédés l'assemblage des pièces se fait par recouvrement et seulement par une action mécanique (pression) à la mise en œuvre des outils particuliers, et elles contiennent :

- Le soudage par ultrason
- Le soudage par explosion

III. 4.1 Soudage par ultrasons

Un procédé voisin du soudage par friction ,d'où les pièces à souder sont généralement de 2mm d'épaisseur qui sont placées en recouvrement sous une pression modérée entre une enclume et une sonotrode qui transmet à l'une d'elles des vibrations ultrasonores à haut fréquence (de 20 à 100 kHz) parallèles à la surface de contact [39].

Il se produit donc, des micro-glissements suffisants pour expulser les matières étrangères et permettre une liaison parfaite entre les pièces sans aucune fusion.

La transformation de l'énergie électrique en énergie vibratoire est assurée par un transducteur à Magnétostriction (procédé 41 selon l'ISO 4063).

III. 4.2 Soudage par explosion

Ce procédé est utilisé pour réaliser des assemblages par recouvrement par une collision de haute énergie de deux surfaces superposées ou inclinées l'une par rapport à l'autre.

L'explosif est placé sur une plaque ou une tôle supérieure (métal de recouvrement) qui est elle-même placée à une certaine distance de la pièce de base sur laquelle la tôle va être soudée, lors de l'explosion (commandée par un détendeur) l'onde de choc se propage à travers la tôle et provoque une injection violente de métal de recouvrement ce qui permet de d'établir la liaison dans toute la surface entre ces deux pièces (procédé 441 selon l'ISO 4063).

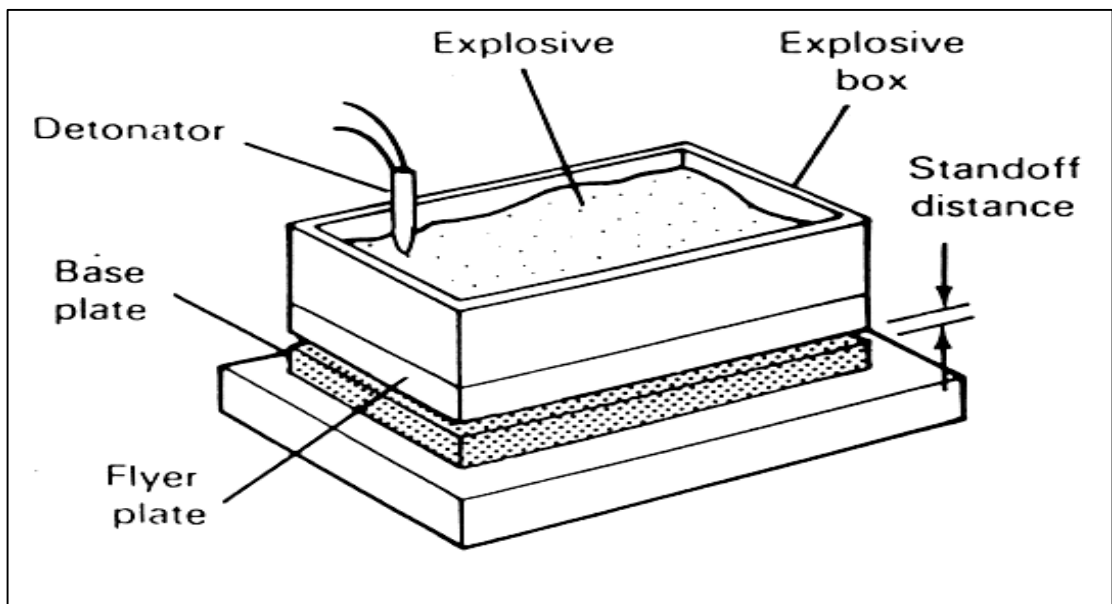


Figure 25: Soudage par explosion [40]

La numérotation des procédés de soudage pour la représentation symbolique des dessins est conforme à la norme ISO 4063 [41].

1	Soudage à l'arc	3	Soudage aux gaz
11	Électrode fusible sans protection gazeuse	311	oxyacétylénique
111	électrode enrobée	4	Soudage par pression (à l'état solide)
13	Sous protection gazeuse avec fil-électrode fusible	41	par ultrasons
131	MIG	42	par friction
135	MAG	45	par diffusion
14	Sous protection gazeuse avec électrode réfractaire	441	Par explosion
141	TIG	5	Soudage par faisceau
15	Au plasma	51	par faisceau d'électrons
2	Soudage par résistance	52	par faisceau Laser
21	par points	7	Autres procédés de soudage
22	à la molette	71	Par aluminothermie
23	Par bossage	72	vertical sous laitier
24	en bout par étincelage		

Tableau 1: procédés du soudage selon ISO 4063

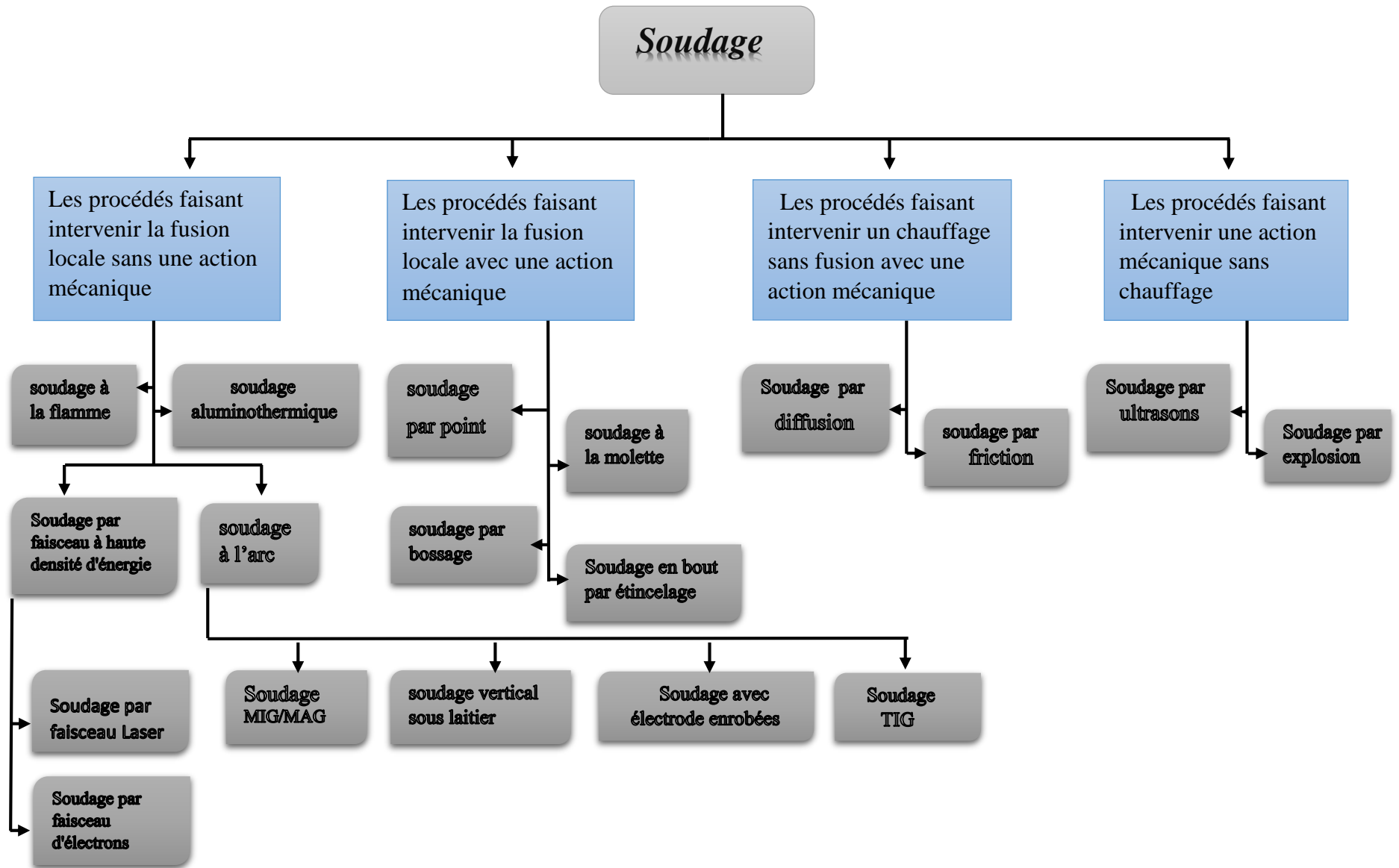


Figure 26: Organigramme des procédés de soudage

IV. PRINCIPAUX DEFAUTS DES SOUDURES

Les principaux défauts des soudures peuvent être divisés en deux catégories : les défauts internes comme les fissures à chaud, les fissures à froid, les fissures au réchauffage et les porosités etc. ; et les défauts ayant une origine purement opératoire tels que caniveaux, manque de pénétration, collage. Par contre il existe aussi des principales méthodes pour prévenir et lutter contre ces défauts.

IV. 1 Défauts des cavités

Ce sont des défauts volumiques, elles comprennent :

IV. 1.1 Défauts des soufflures

Les soufflures sont des défauts fréquents en soudage généralement sphériques, formés par des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure .si elles sont visibles en surface (débouchantes) on parle donc des piqûres et si elles sont allongées, on parle donc, à des soufflures vermiculaires (figure 27).

Les causes de soufflures peuvent être dues à des courants d'air, un manque de gaz de protection, ou des impuretés dans le joint à souder. Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

Donc, pour limiter le risque de soufflures il faut s'assurer que la surface du métal de base et d'apport est propre et vérifier que la protection gazeuse est suffisante.

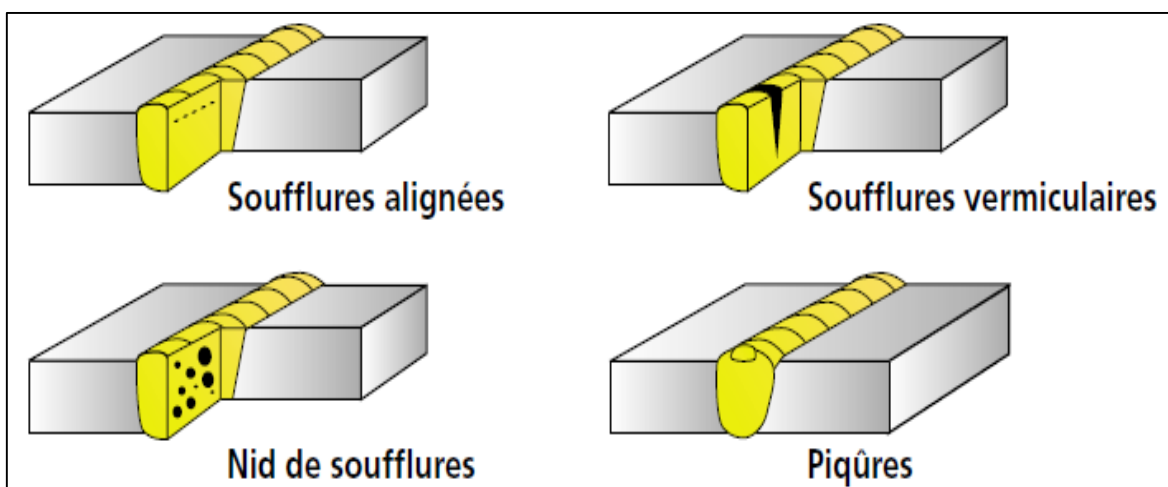


Figure 27: Défauts de soufflures [42]

IV. 1.2 Défauts des retassures

Les retassures sont des défauts sous forme des espaces vides qui apparaissent suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement .ce sont des défauts non visibles qu'avec un microscope.

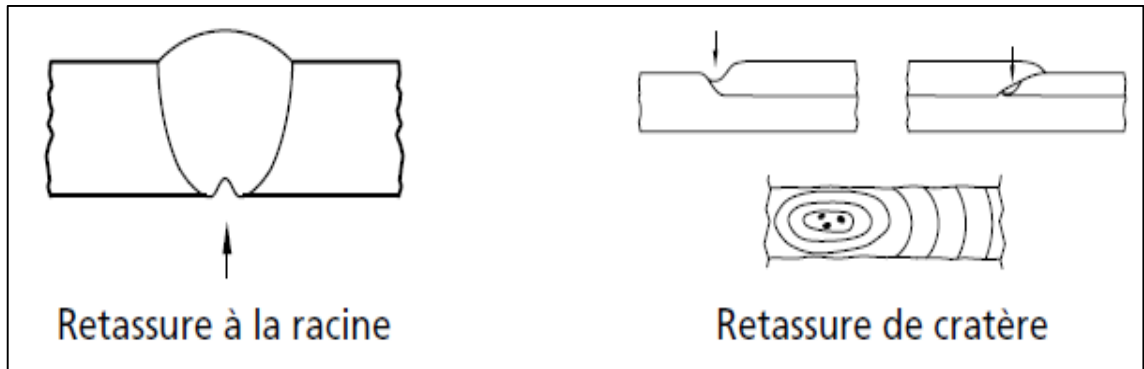


Figure 28: Défauts des retassures [43]

IV. 1.3 Défauts des inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation dans le cordon de soudure, d'un composé étranger, il existe plusieurs types d'inclusions (figure 29):

- Inclusion solide : Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu talque la poussière.
- Inclusion de laitier : Les inclusions de laitier peuvent être alignées, isolées ou distribuées de façon aléatoire.
- Inclusion métallique : Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (souvent lors du soudage TIG).

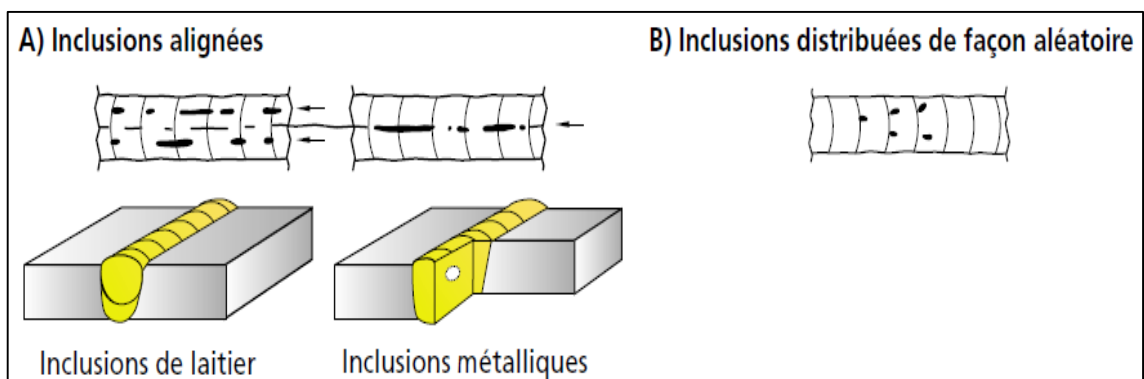


Figure 29: Défauts des inclusions [44]

Ces défauts sont détectés principalement par le contrôle visuel et le contrôle radiographie et ultrasons.

IV. 2 Les fissures

Les fissures sont connues comme des discontinuités brutales dans un matériau ; ce sont les plus fréquents défauts dans la soudure. Elles peuvent se produire dans plusieurs endroits (dans le métal fondu, la ZAT, et le métal de base) quand les contraintes localisées dépassent la résistance mécanique maximum du matériau.

Les fissures sont divisées en deux catégories selon leur Orientation :

- Les fissures longitudinales (parallèle à l'axe de la soudure): sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées dans les soudures de fortes sections.
- Les fissures transversales (perpendiculaires à l'axe de la soudure) : sont généralement le résultat des contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité.

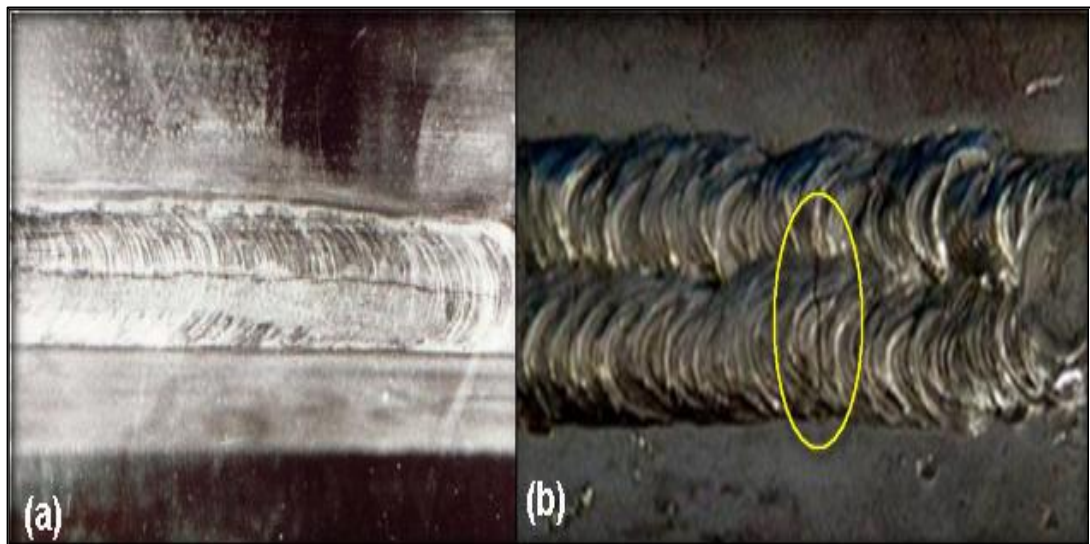


Figure 30: Fissure dans le cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale. [45]

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

- Fissures à chaud : La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion, elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Elles peuvent être internes ou déboucher en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces inter-dendritiques et suivent donc les directions de solidification.

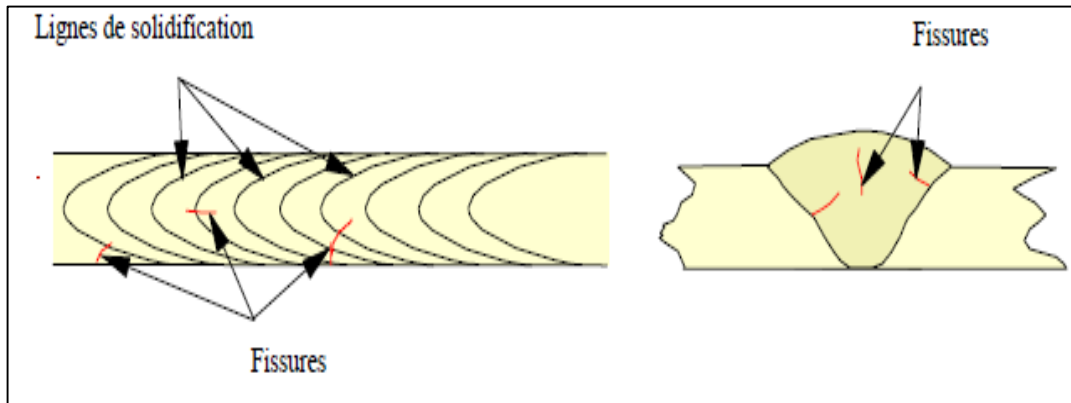


Figure 31: Fissures à chaud [46]

- Fissures à froid : elles apparaissent à la phase de refroidissement, vers 200 °C ou moins [47]. Elles se développent le plus souvent dans la zone de soudage et la zone affectée thermiquement.

Ce type des défauts est dû à la fragilisation par l'hydrogène coincé dans la soudure et les contraintes internes.

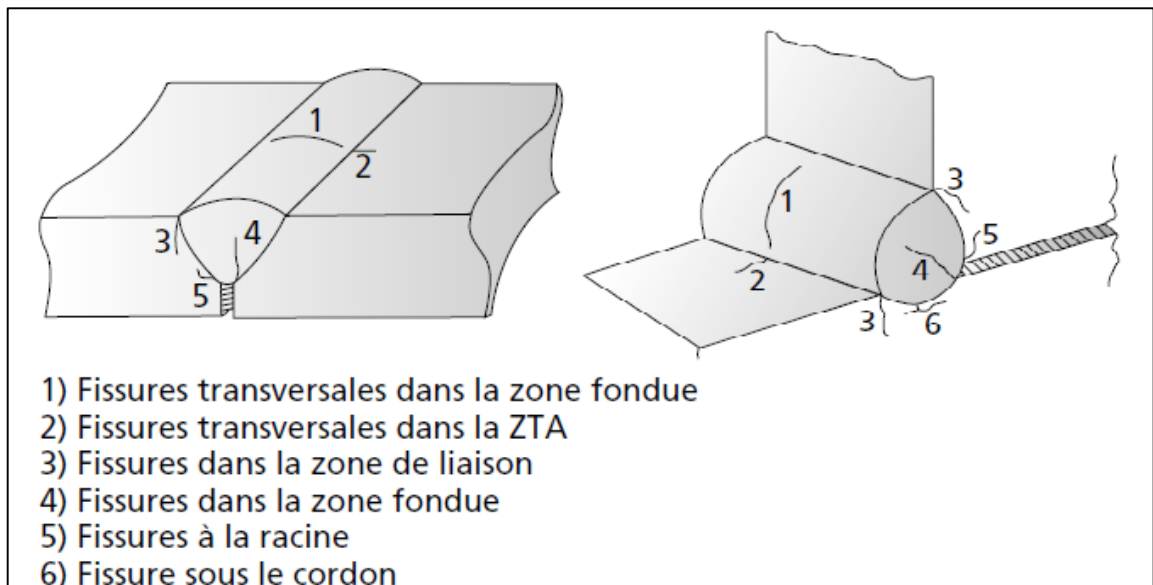


Figure 32: Types de la fissure à froid [48]

Les méthodes de détection des fissures sont : l'examen visuel, magnétique ou ressuage pour les fissures débouchant en surface ; et l'examen par ultrasons ou radiographie pour fissures internes. Donc pour éviter les fissures il faut Choisir un métal d'apport approprié et effectuer un préchauffage approprié ainsi qu'une bonne préparation des joints.

IV. 3 Morsures et les Caniveaux

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

Un caniveau est une morsure de grande taille proportionnellement à la grandeur du métal de base due à une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou la densité du métal .

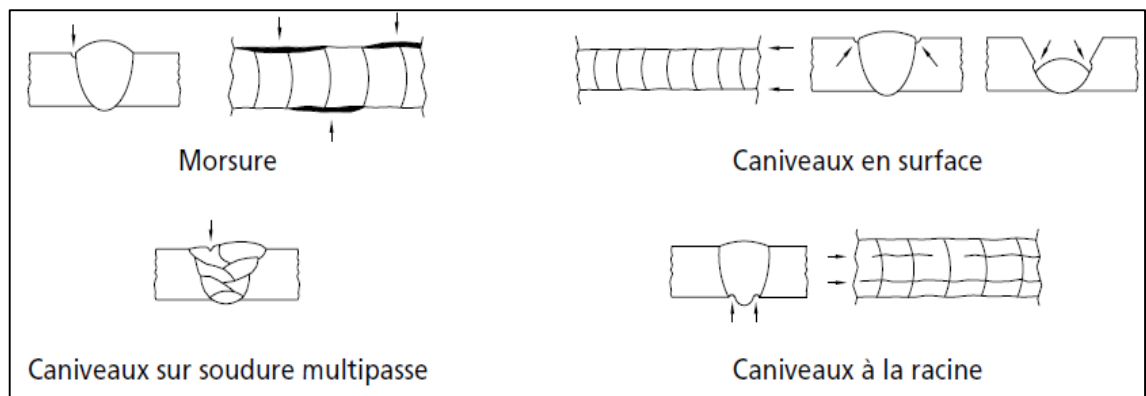


Figure 33: Morsures et Caniveaux [49]

Les causes probable qui peuvent engendre ces défauts sont :

- Le soudage avec forte intensité
- Vitesse de soudage trop basse
- L'instabilité de l'électrode.

IV. 4 La Pollution ferreuse

La pollution ferreuse est un risque liée au soudage des aciers inoxydables par la destruction de la couche protectrice superficielle, cette destruction provoque, avec le

temps, une corrosion (rouille).Elle se résulte par l'utilisation des outils pendant la rectification ou la mise en forme des surfaces.

IV. 5 Défaut de manque de fusion

Les manques de fusion ou collages sont des manques ou absence de contact entre le métal fondu et le métal de base, ces manques conduisent à des mauvaises continuités métallurgiques entre les métaux à assembler ce qui diminue la section efficace de la soudure. Les Types de manque de fusion sont :

- Manque de fusion des bords à souder.
- Manque de fusion entre les passes.
- Manque de fusion à la racine.

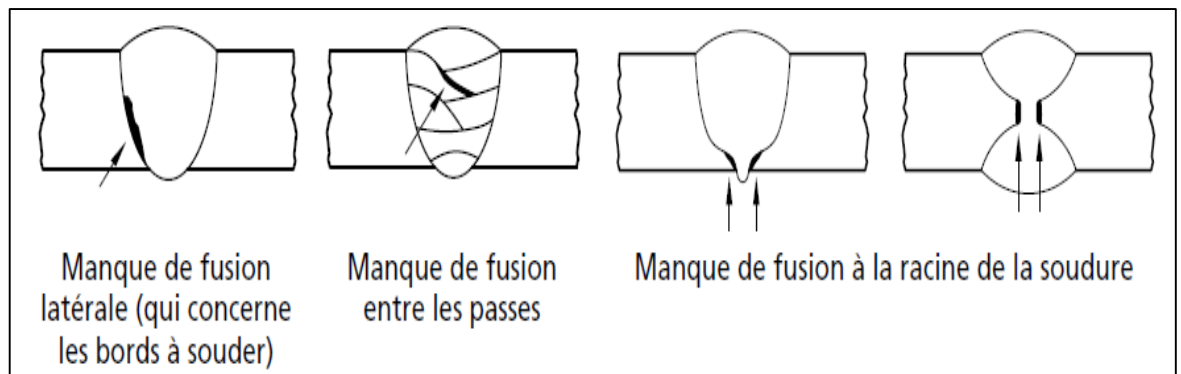


Figure 34: Défauts de manque de fusion [50]

Ces défauts sont fréquents en soudage MAG et surviennent généralement quand l'angle du chanfrein est trop étroit ; le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande donc il faut mettre en œuvre un DMOS adapté.

IV. 6 Défauts de pénétration

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration (figure 35). L'excès de pénétration est un surplus du métal d'apport soit à la racine ou à la surface du cordon de soudure ,par contre le manque de pénétration est l'insuffisance du métal d'apport au-dessus ou au-dessous de cordon de soudure .Les principaux causes de ce type des défauts sont classé pour le manque et l'excès respectivement :

- Vitesse petite de soudage /trop grande.
- Apport calorifique forte/ trop faible.
- Distance électrode courte /pièce trop large.

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et éventuellement le contrôle radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).

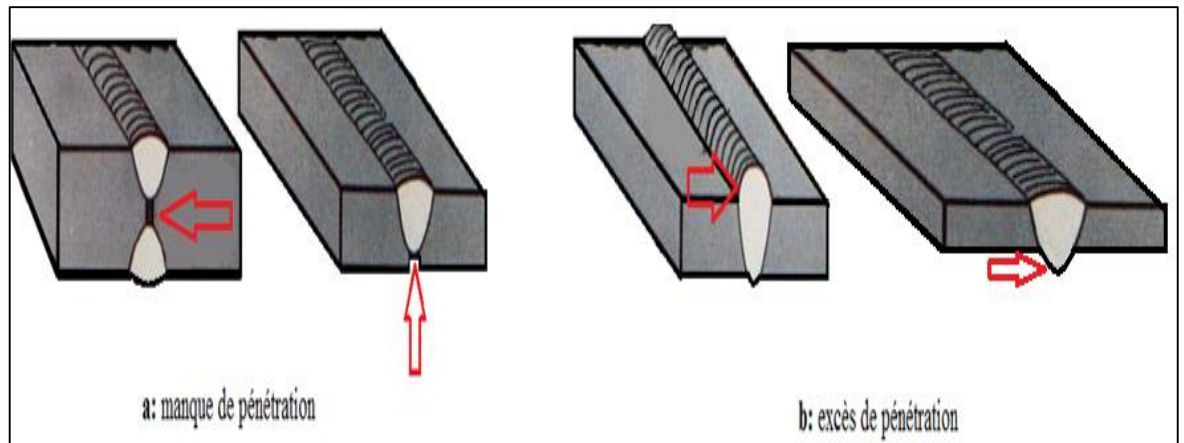


Figure 35: Défauts de pénétration

IV. 7 Défauts de géométries des cordons

Ce sont des défauts où les déformations du cordon sont lié à la mauvaise préparation des pièces à unir, et ils sont caractérisé par :

IV. 7.1 Défaut d'alignement

Un défaut d'alignement est remarqué généralement une soudure bout à bout quand les pièces à unir sont mal bridées le pointage est insuffisant.

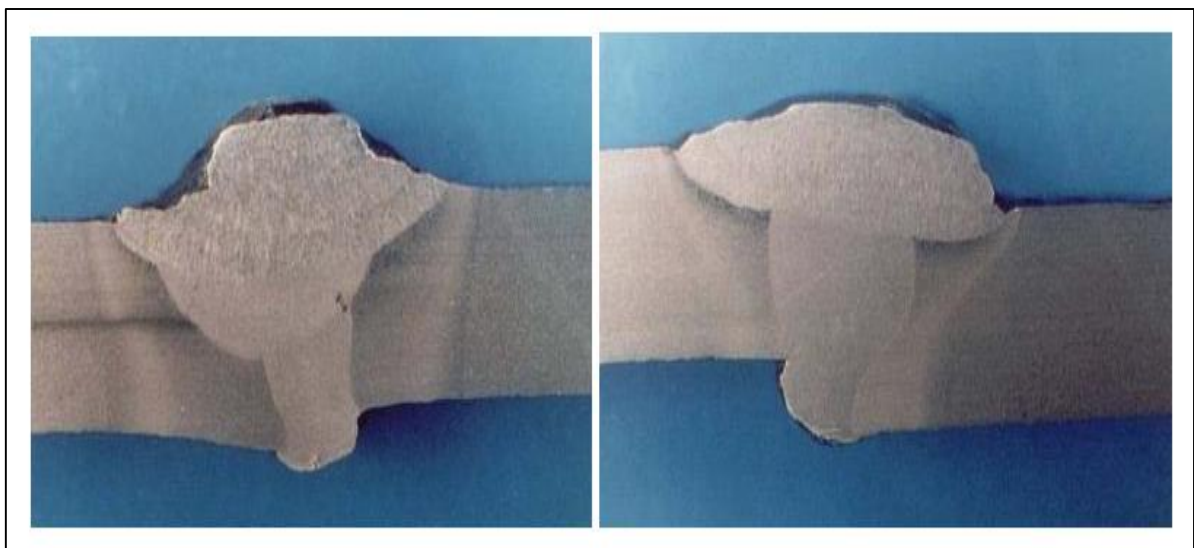


Figure 36: Défaut d'alignement [51]

IV. 7.2 Défauts angulaires

Les défauts angulaires sont des déformations importantes (le pliage ou le cintrage) générés grâce à la dilatation des pièces sous le grand effet calorifique au cours de l'opération du soudage.

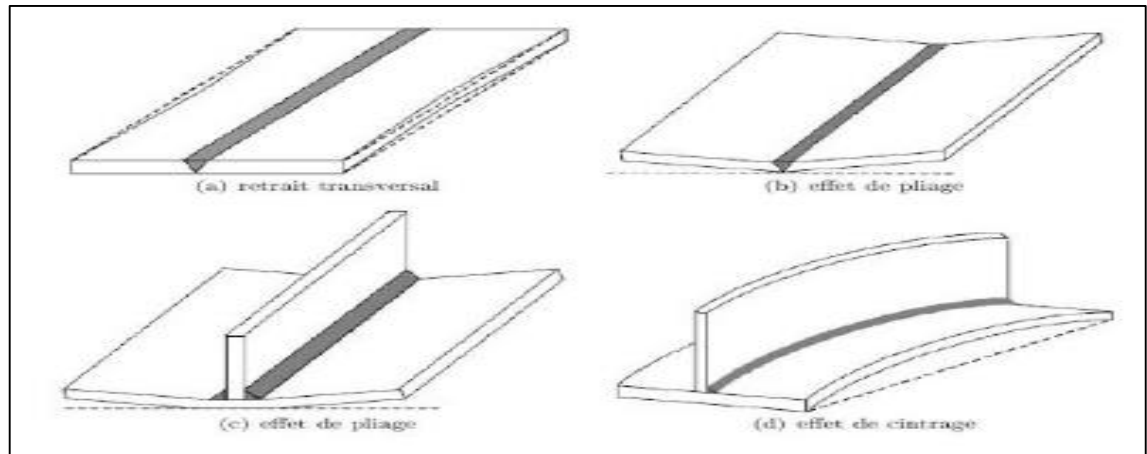


Figure 37: Défauts angulaires [52]

IV. 8 Défauts des projections

Les projections sont des particules métalliques en fusion projetées pendant le soudage et qui adhèrent au métal de base ou au cordon déjà solidifié. Les projections peuvent être causées par un courant trop fort, un arc trop long ou le soufflage de l'arc. Un mauvais débit et certains gaz de protection peuvent aussi favoriser l'apparition de projections.

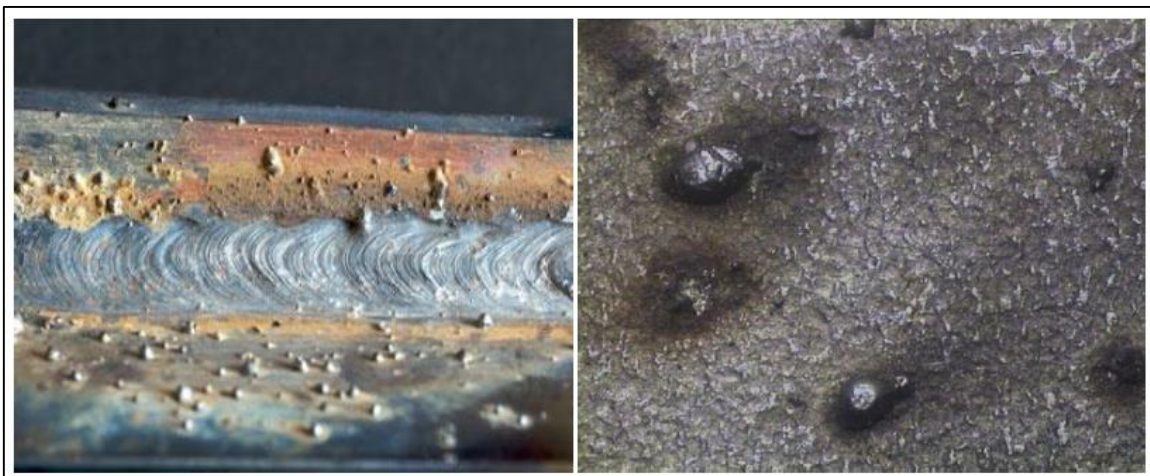


Figure 38: Défauts des projections [53]

Chapitre II :

Fissuration par fatigue

I. INTRODUCTION

Tout pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables, ce qui provoque non seulement des variations des contraintes appliquées mais aussi des modifications dans sa structure ce qui conduit donc à la rupture. En effet, la ruine est parfois catastrophique d'où la cause principale de 90% des défaillances d'origine mécanique est le phénomène de fatigue.

L'endommagement par fatigue se développant lentement au cours du temps, passant par la phase d'amorçage où la microfissure s'initie au sein du matériau puis en deuxième phase elle se propage de façon stable jusqu'à elle atteint une taille relativement grande qui conduit à la rupture finale de la structure.

La rupture peut se produire après une grande déformation, le plus souvent après une instabilité plastique qui résulte de la présence de deux effets opposés, d'une part la réduction de la section et d'autre part, la consolidation de matériau par écrouissage [54]. Elle peut cependant se produire sans déformations préalables, sous des contraintes généralisées qui sont souvent du domaine plastique. On se trouve alors en présence de la rupture brutale.

II. NOTIONS DE MECANIQUE DE LA RUPTURE

La mécanique de la rupture couvrant un domaine extrêmement vaste, elle est connue depuis le *XIX^e* siècle. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1829 par *Alber* [55] dans les ruptures de convoyeurs de charbon. Le développement des industries aéronautiques, spatiales, nucléaire, transport de gaz et pétrole durant le *XX^e* siècle, a contribué à l'étude et la compréhension du phénomène de rupture par fatigue et principalement à l'étude de la propagation des fissures dans des structures complexes aux différents stades d'évolution de l'endommagement

Elle a des objectifs doubles, d'une part elle concerne la description des champs mécaniques au voisinage de la pointe de la fissure et les énergies qui leur sont associées et d'autre part, elle traite l'évaluation de la nocivité d'une fissure en terme de propagation.

II. 1. Types de la rupture

La réalisation d'une déformation plastique de plus en plus importante conduit à la rupture du métal, rupture qui peut prendre plusieurs aspects dépendant du mécanisme mis en jeu. C'est ainsi que l'on distingue [56] :

- la rupture ductile : Le matériau plastifie et rompt progressivement à cause de l'amorçage sur des particules présentes dans le métal (cavités, précipités, inclusions), elle nécessite une forte énergie de la rupture et la déformation sera plastique irréversible.
- la rupture fragile : Au contraire de la précédente, est une rupture brusque précédée pratiquement sans déformations plastiques .La fragilité d'un matériau est influencée par la température et la vitesse de chargement.
- les ruptures « à temps » dues à des phénomènes complexes dont le développement fait que la rupture n'intervient qu'après une durée de service qui peut être très importante (des semaines, des mois ou même des années), elle regroupe la rupture par fatigue, la rupture par fluage et la rupture par corrosion.

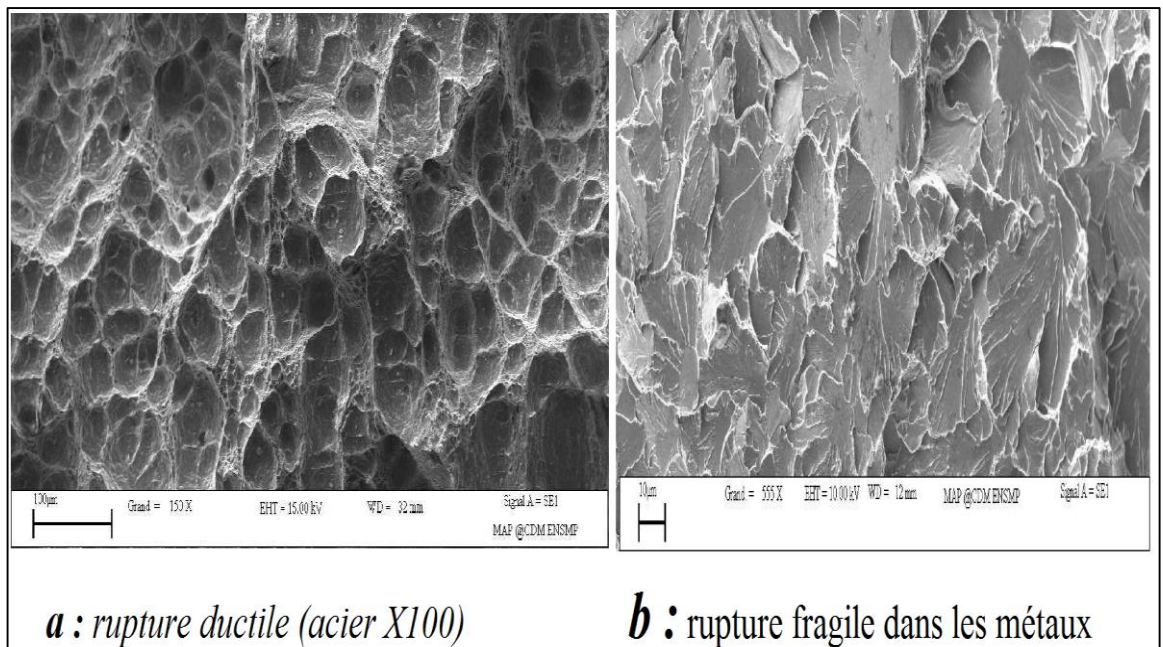


Figure 39: Exemple de la rupture ductile/fragile [57]

II. 2. Modes de la rupture

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants [58] :

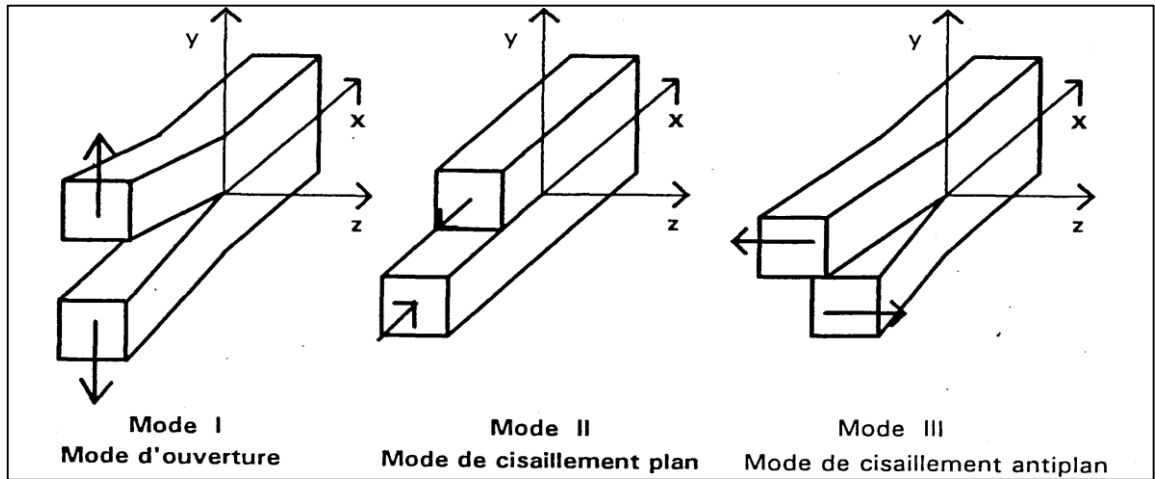


Figure 40: Différents modes de fissuration [59]

- Mode I (mode d'ouverture) : ce mode est le plus "courant" et le plus catastrophique où le chargement est perpendiculaire au plan de la fissure.

La distribution du champ des contraintes pour ce mode est montrée dans la figure ci-dessous ainsi que le système d'équations (2.1):

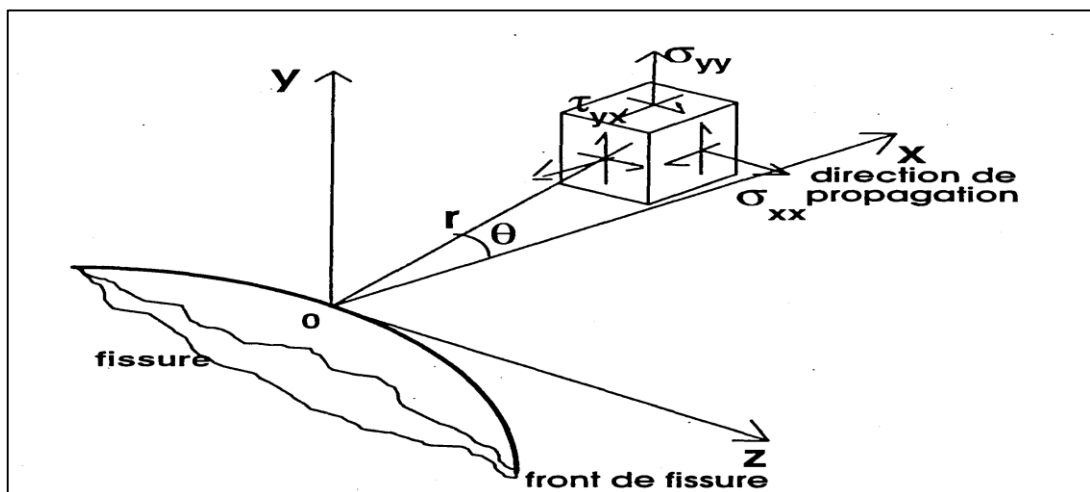


Figure 41: Etat de contrainte au niveau de la pointe de la fissure en mode I [60].

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

- Mode II : mode de cisaillement plan où le chargement est dans le plan de la fissure
- Mode III : mode de cisaillement anti-plan où le chargement de cisaillement, est toujours dans le plan de la fissure.

II. 4 Facteur d'intensité des contraintes **K**

La théorie de l'élasticité permet de développer une formulation analytique pour la contrainte dans la région de la pointe de fissure. Les composants du tenseur σ peuvent s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.2)$$

K est le facteur d'intensité de contrainte défini par la relation:

$$K = \sigma \times \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

Où σ est la contrainte à l'infini et **a** est la longueur de la demi-fente. α est un facteur de correction géométrique.

Quand le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur critique, les contraintes sont tellement importantes en pointe de fissure qu'il y a rupture brutale. Cette valeur seuil est appelée ténacité, elle est notée K_{IC} . Cela correspond à un facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} .

III. ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

Le terme « fatigue » est utilisé pour décrire l'endommagement par la réduction de la résistance à la rupture d'un matériau après une longue période des déformations et des contraintes cycliques. La fatigue est définie comme une forme de défaillance qui se produit dans les structures (les ponts, les avions, les pièces mécaniques ...) subissant des contraintes dynamiques et variables [61,62]. Elle est susceptible de se manifester même lorsque la contrainte est nettement inférieure à la résistance à la traction ou à la limite conventionnelle d'élasticité dans le cas d'une charge statique.

Les essais les plus simples consistent à imposer à des séries d'éprouvettes (cylindriques ou rectangulaires) des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux soit par charge axiale soit par flexion rotative (figure 42). Donc l'essai de fatigue caractérise une alternance de tension et de compression répétées au cours de temps et se termine par la rupture de l'éprouvette.

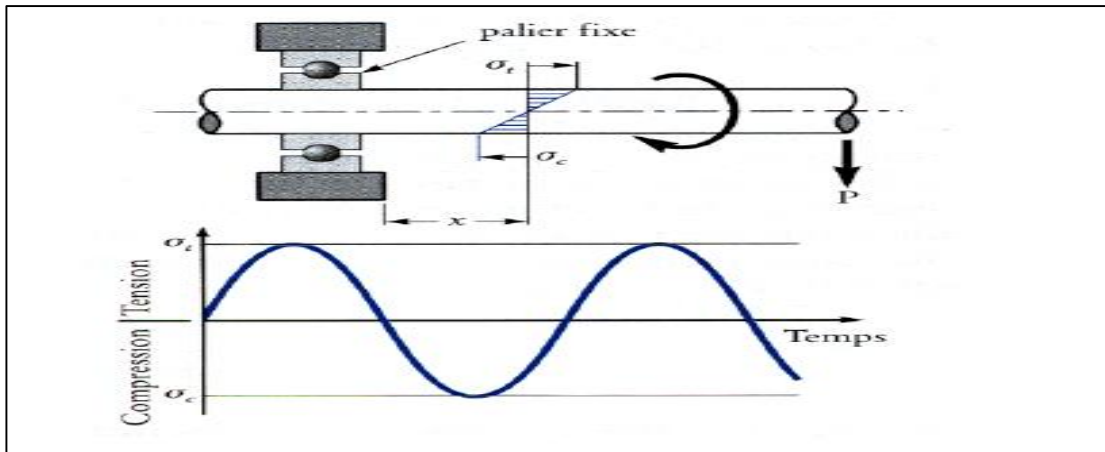


Figure 42: Principe de l'essai de fatigue par flexion rotative [63]

III. 1 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler ou la courbe S-N est la plus ancienne et la seule permettant de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Les trois zones d'écrites, sont celles utilisées par les ingénieurs pour d'écrire trois comportements différents :

Chapitre II : Fissuration par fatigue

- la zone de fatigue oligocyclique (la zone AB), correspond aux zones de forte contraintes et de faibles durées de vie ($N < 10^4$ ou 10^5 cycles) elle provoque à chaque cycle une déformation plastique et l'amplitude de contrainte est importante,
- zone de fatigue ou d'endurance limitée (la zone BC), où la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre 10^5 à 10^7 . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique.
- zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité (la zone CD), pour laquelle la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles généralement supérieur 10^7 cycles pour certain alliages.

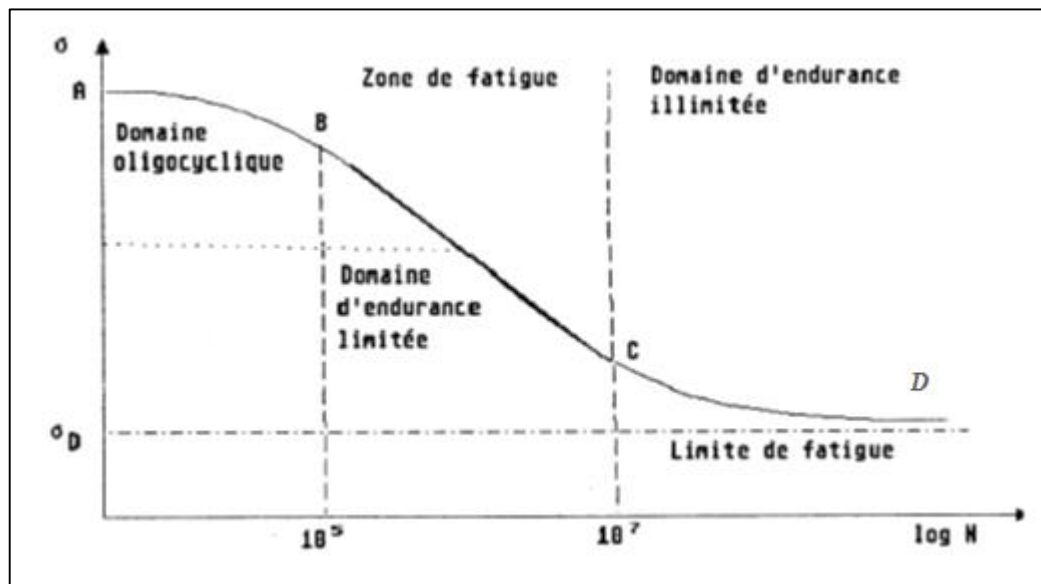


Figure 43: Courbe de Wöhler [64]

III. 2 Notions des contraintes cycliques

Les contraintes appliquées peuvent être assimilées à des sollicitations telles que la traction ou la compression, la flexion ou à la torsion ou, le chargement cyclique est défini par l'amplitude de la contrainte (σ_a), par la valeur moyenne de la contrainte (σ_m), et par le rapport R entre la contrainte minimale et maximale au cours d'un cycle. Il existe généralement trois types possibles qui illustrent la variation de la contrainte en fonction de temps (figure 44) :

Chapitre II : Fissuration par fatigue

- La contrainte varie régulièrement et de façon sinusoïdale en fonction du temps.
- Les contraintes max et min sont asymétriques par rapport à une contrainte nulle.
- Le cycle de contraintes aléatoire.

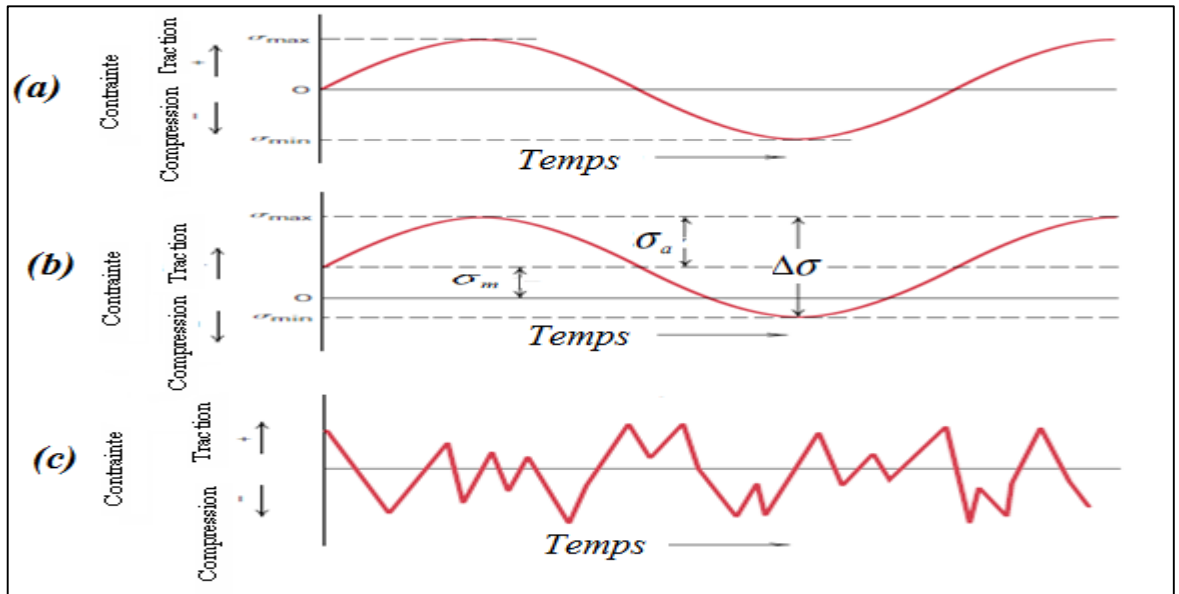


Figure 44: Modes de variation de contrainte appliquée en fonction du temps [65]

La plus petite partie de la fonction sinusoïdale contrainte-temps qui se répète périodiquement est connue par le cycle de contrainte dans lequel la contrainte passe par un maximum σ_{max} et par un minimum σ_{min} .

On définit :

La contrainte moyenne :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

L'amplitude de la contrainte :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.5)$$

Le rapport de contrainte :

$$R\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.6)$$

L'étendue variation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (2.7)$$

III. 3 Mécanisme de propagation des fissures

L'endommagement par fatigue comprend trois périodes d'importance variable selon les matériaux et les caractéristiques de sollicitations :

- Période d'amorçage de la fissure
- Période de propagation
- Rupture brutale



Figure 45: *Faciès de la rupture [66]*

III. 3.1 Amorçage d'une fissures de fatigue

La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures, le plus souvent à la surface de la pièce à partir de bandes de glissement où il y a concentration de contraintes dû au changement brusque de section ou de géométrie, inclusions ou défauts de surface. Elle est connue par nombre de cycles nécessaire à créer une fissure à partir du mouvement des dislocations.

L'amorçage peut essentiellement naître de trois sources différentes [67]:

◊ **Le glissement cyclique irréversible** : L'application d'une contrainte mécanique lors du chargement de fatigue entraîne le mouvement des dislocations sur les plans de glissement cristallographiques au sein des différents grains du matériau sous l'effet de la contrainte de cisaillement cyclique locale.

Chapitre II : *Fissuration par fatigue*

Tant que ce glissement reste réversible, le comportement local du matériau reste élastique. Dans le cas particulier d'un grain débouchant à la surface, si le vecteur de Burgers du système actif pointe vers la surface, le glissement des dislocations dans ce grain va provoquer l'apparition de marches à la surface par le mécanisme de création d'une paire intrusion/extrusion (figure 46). Ces marches sont connues sous le nom de bandes de glissement persistantes et constituent des microfissures potentielles.

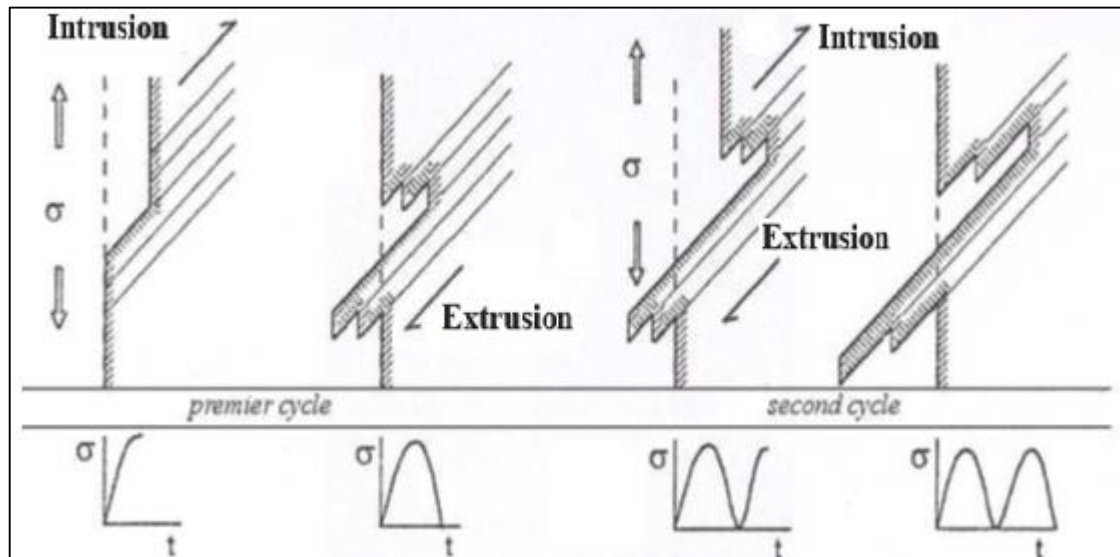


Figure 46: Amorçage d'une micro fissure à partir des bandes de glissement [68]

◊ **L'amorçage à partir de micro-hétérogénéités de la microstructure** : la plupart des matériaux métalliques sont des alliages composés de certains éléments principaux et des éléments d'additions. Ces matériaux sont micro-hétérogènes car ils contiennent des particules intermétalliques comme les joints de grains, les porosités qui créent localement une incompatibilité de déformation ou une concentration de contrainte dans lesquels une microfissure peut s'amorcer par accumulation de dislocation qui se propage tout dépend de la contrainte appliqué.

◊ **L'amorçage à fond d'entaille** : Dans une structure réelle, les coins, congés ou trous ne peuvent généralement pas être évités. Le fait que ces particularités géométriques soient des sites préférentiels d'amorçage des fissures de fatigue est connu sous le nom d'effet d'entaille [69-70].

Au niveau de ces sites, la concentration des contraintes est caractérisée par un facteur adimensionnel qui dépend des dimensions de la pièce et du type de sollicitation

Chapitre II : Fissuration par fatigue

appelé le facteur de concentration de contrainte K_t , ce dernier est donné par la relation suivante :

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{pic}}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (2.8)$$

Avec : σ_{pic} représente la contrainte maximale et σ_{nom} est la contrainte nominale.

A titre d'exemple, pour un plaque mené d'un trou centrale de diamètre d et de largeur W (figure 47), la contrainte nominale σ_{nom} est donnée par :

$$\sigma_{\text{nom}} = \sigma \times \frac{w}{d-w} \quad (2.9)$$

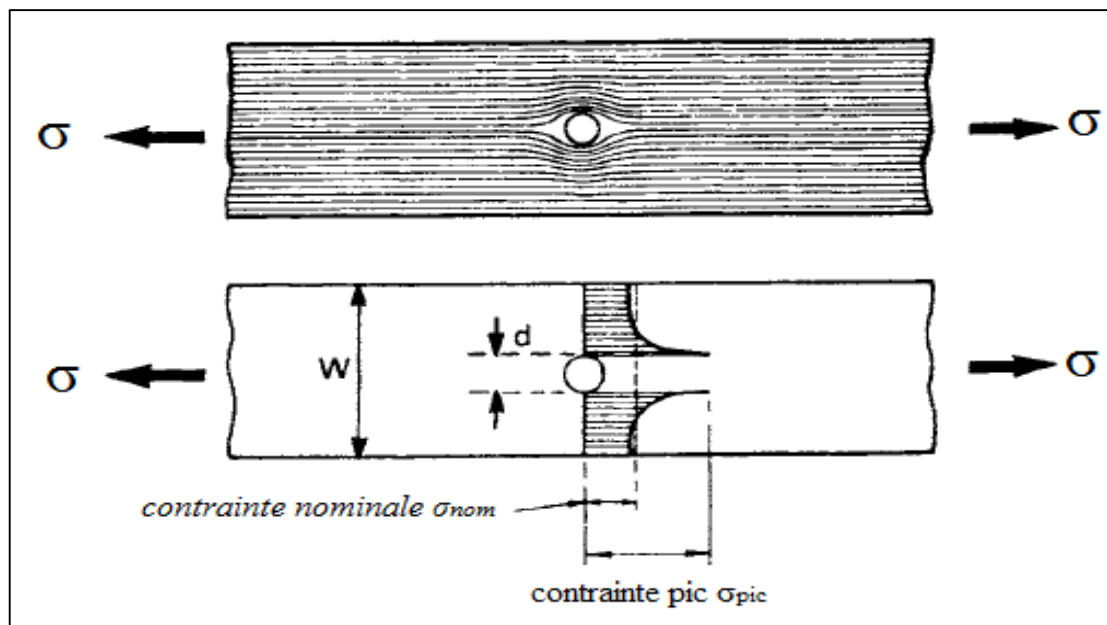


Figure 47: Concentration de contrainte dans une plaque à trous centrale [71]

III. 3.2 Propagation d'une fissures de fatigue

Les phénomènes liés à la propagation de la fissuration en fatigue sont très complexes d'où les modèles qui se proposent de décrire cette propagation devraient tenir compte de tous les paramètres qui conditionnent cette propagation dans un matériau donné. Les paramètres sont classés en deux grandes catégories :

- ◊ Les paramètres intrinsèques dépendant du matériau lui-même, par exemple, module d'Young, limite d'élasticité, ténacité etc.

Chapitre II : Fissuration par fatigue

◊ Les paramètres extrinsèques dépendant des conditions d'utilisation, par exemple le rapport de charge, l'environnement etc.

Une fois que les fissures se sont amorcées; elles peuvent se propager d'une façon stable. L'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK , permet de faire distinguer trois domaines de fissuration [72.73].

Pour une fissure de longueur "a", la loi de propagation s'écrit donc sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, K_{\max}, K_{\min}, K_C, \Delta K_S, \dots) \quad (2.10)$$

Avec : K_C est le facteur d'intensité critique à rupture, et ΔK_S est le facteur d'intensité seuil

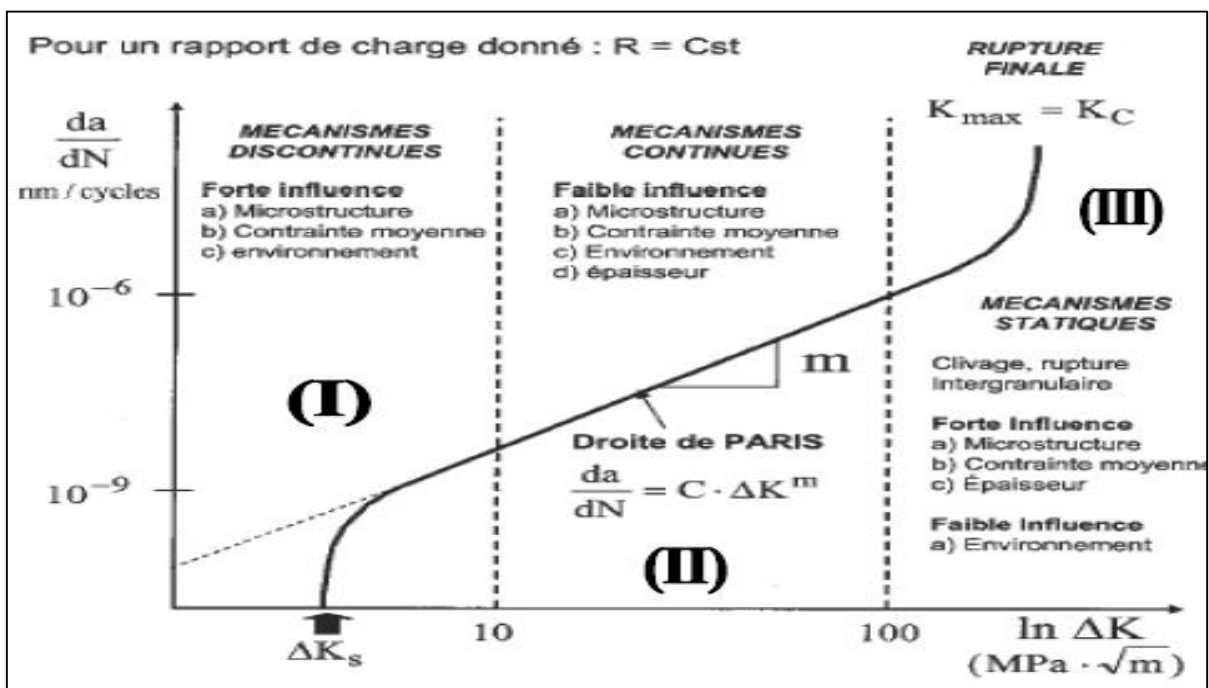


Figure 48: Schématisation des domaines de la propagation d'une fissure de fatigue [74]

Ces domaines sont liés aux trois étapes de l'endommagement par fatigue précédemment cités :

- **le domaine I** : se caractérise par une rapide décroissance de la vitesse de propagation lorsque la valeur de 'K' approche d'une valeur caractéristique. Cette valeur est appelée seuil de propagation et notée ΔK_{seuil} . Ce domaine est

Chapitre II : Fissuration par fatigue

Caractérisé une faible vitesse de fissuration et par une forte influence de la microstructure, du rapport de charge et de l'environnement.

- **le domaine II** : appelé régime de *PARIS*, dans lequel la courbe présente généralement une partie linéaire sur un assez large intervalle. Cette linéarité traduit par une relation entre la vitesse de propagation (da/dN), l'amplitude de facteur d'intensité de contrainte ΔK et les variables du matériau (C, m) :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2.11)$$

Où : $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ (2.12)

- **le domaine III** : correspond à une accélération de la propagation juste avant la rupture brutale. Celle-ci intervient lorsque la valeur maximale du facteur d'intensité de contrainte K_{max} au cours du cycle devient égale à une valeur critique caractéristique du matériau notée K_C .

III. 4. Modèle de propagation d'une fissure de fatigue

Les modèles de prédiction de la durée de vie et la vitesse de fissuration « da/dN » sous chargement à amplitude constante et sans effet du rapport de charge R sont nombreux, on distingue :

Modèle de Paris :
$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (2.11)$$

Modèle de Walker
$$\frac{da}{dN} = C_w \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \right)^{m_w} \quad (2.13)$$

Les paramètres C_w et m_w sont respectivement équivalents aux paramètres C et m de la loi de Paris plus d'une constante supplémentaire (γ).

Modèle de Forman :
$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R) \cdot (K_{IC} - K_{max})} \quad (2.14)$$

Chapitre II : Fissuration par fatigue

Ce modèle est une amélioration du modèle de Walker, il est capable de décrire la région III de la courbe de la vitesse de propagation et inclut l'effet de rapport de charge.

Avec :

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

Modèle de McEvily :
$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \quad (2.15)$$

Ce 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.

Afin de tenir compte de l'effet du rapport de charge "R" et de la zone de propagation instable, une modification de ce modèle a été proposée :

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left(1 + \frac{\Delta K}{K_C - K_{max}} \right) \quad (2.16)$$

Modèle de NASGRO :
$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_C} \right)^q} \quad (2.17)$$

Le modèle NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation de fissuration de fatigue a été développé par Forman et Mettu [75]. Le modèle de NASGRO prédit la vitesse de fissuration pour les trois domaines.

Où :

C, n, p, q sont des paramètres empiriques K_{max} et K_C sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique.

f : représente la contribution de la fermeture de la fissure :

Chapitre II : *Fissuration par fatigue*

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \\ A_0 + 2A_1 & R < -2 \end{cases} \quad (2.18)$$

Les coefficients A_i sont données par :

$$A_i \begin{cases} A_0 = (0,825 - 0,34 \alpha + 0,05 \alpha^2) \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \right) \right]^{1/\alpha} \\ A_1 = (0,415 - 0,71 \alpha) \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

α : Rapport de contrainte/déformation plane

$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$: Rapport de la contrainte maximale appliquée sur la contrainte d'écoulement

ΔK_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil donnée par :

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \left(\frac{a}{a+a_0} \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)} \right)^{(1+C_{th}R)} \quad (2.20)$$

ΔK_0 : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à $R = 0$

a : Longueur de la fissure

a_0 : Longueur de la fissure initiale

C_{th} : Coefficient seuil

Chapitre III :

Etude de la fissuration
par fatigue dans les
soudures d'angles

&

Résultats et discussion

I. INTRODUCTION

Le travail élaboré dans cette étude est orienté vers la prédiction de l'évolution de la fissuration par fatigue des joints soudés sous l'effet de différents paramètres. Trois matériaux sont investigués à savoir les aciers A316, 542 et le A517. Les éprouvettes utilisées sont des structures soudées de géométrie "bout à bout" et soudure double filets, contenant des fissures. Afin de mener cette investigation, le code de calcul «eFatigue» est utilisé.

II. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL EFATIGUE

Le code nommé par « eFatigue » (figure 49) est l'un des codes modernes spécialisé dans le domaine de l'endommagement des pièces par fatigue qui permette la suivie de la croissance de la fissure dans les différents structures et donc la prévision de leur durée de vie.

Ce code nous offre un accès facile à une riche base de données matériaux, les géométries ainsi que les outils de calcul comme le calculateur de fatigue, les modèles des éléments finis, la fatigue multiaxial, la fatigue thermique et l'analyseur de fatigue dans les structures soudées. L'étude de la fissuration par fatigue est basée sur le modèle de Paris

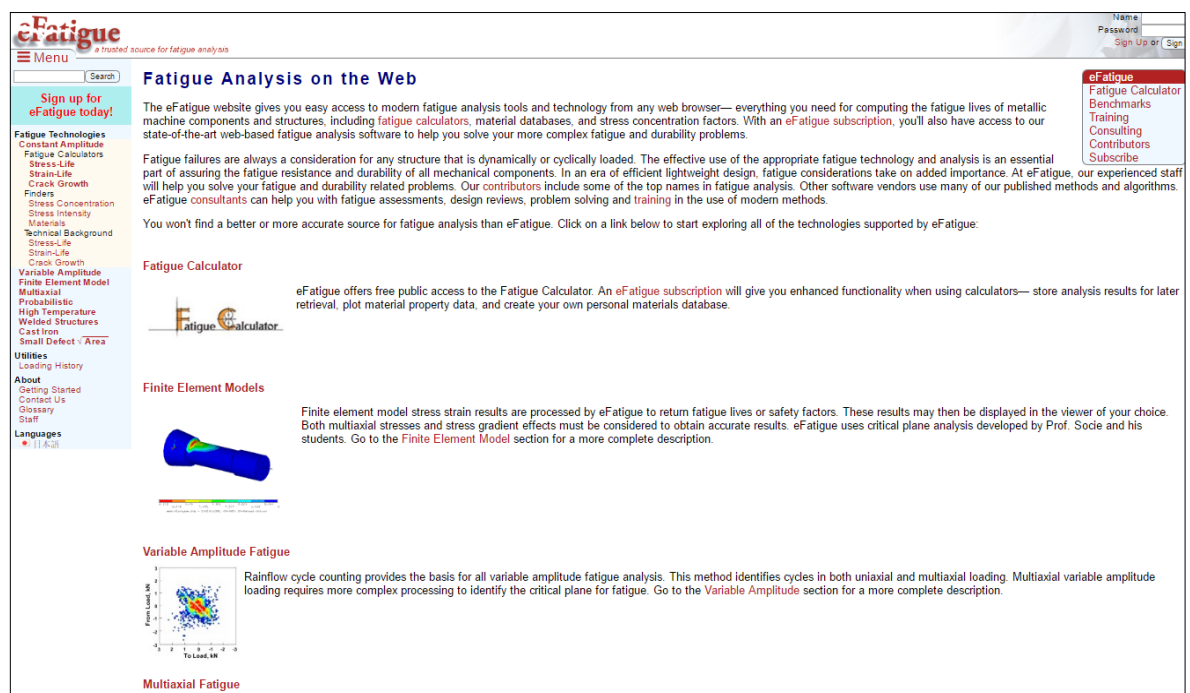


Figure 49: Fenêtre principale du code eFatigue

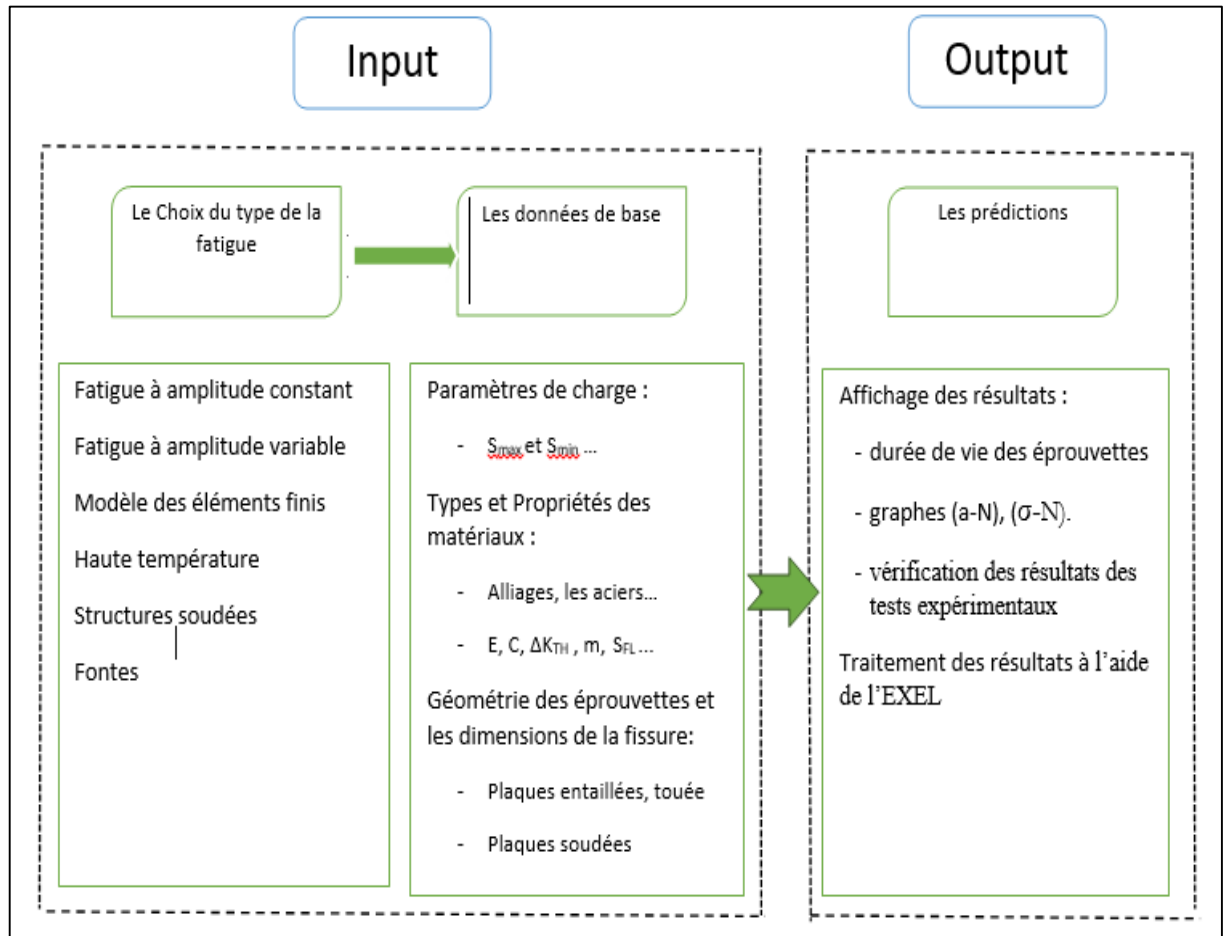


Figure 50: Schéma des démarches de la simulation par le code eFatigue

II.1 Facteur d'intensité de contraintes

Le facteur d'intensité de contraintes décrit l'état des contraintes et les déformations en fond de fissure, il dépend de la géométrie du corps fissuré, de ses dimensions et du mode de sollicitation. Mais pour une valeur donnée du facteur K et pour un matériau de caractéristiques élastiques données, l'état de contrainte et de déformation au voisinage de la fissure est parfaitement connu.

L'équation du facteur d'intensité de contraintes pour une structure sollicité en mode 1 est donnée par :

$$K = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.1)$$

Où :

K : facteur d'intensité de contrainte

σ : Contrainte appliquée

$f(a/w)$: fonction de correction de géométrie

ϕ : Facteur de forme de la fissure

II.2 Analyse de l'évolution de la fissure a amplitude content

Le comportement de l'endommagement par fatigue utilise les lois de la mécanique linéaire de la rupture (MLR) ainsi que les propriétés de matériaux afin de déterminer à quelle vitesse une fissure se propage et par conséquent, une estimation de la durée de vie résiduelle de la structure qui contienne cette fissure.

La rupture est basée sur la notion de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK qui décrit l'étendue de la variation de la contrainte $\Delta\sigma$, la taille du défaut a et la forme de la fissure $f(a/b)$.

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.2)$$

II.3 Modèle de PARIS

Le modèle de Paris est l'un des premiers modèles qui gouverne la propagation des fissures de fatigue qui relie la vitesse de propagation de fissures (da/dN) en fonction du facteur d'intensité des contraintes, dans une équation nommée par la loi de PARIS.

Le modèle de Paris s'exprime par la relation ci-dessous :

$$\frac{da}{dN} = C.\Delta K^m \quad (3.3)$$

ΔK : amplitude du facteur d'intensité de contrainte

C et m paramètres expérimentaux liés au matériau étudié

Le modèle de Paris est valable que dans le stade II (domaine linéaire).

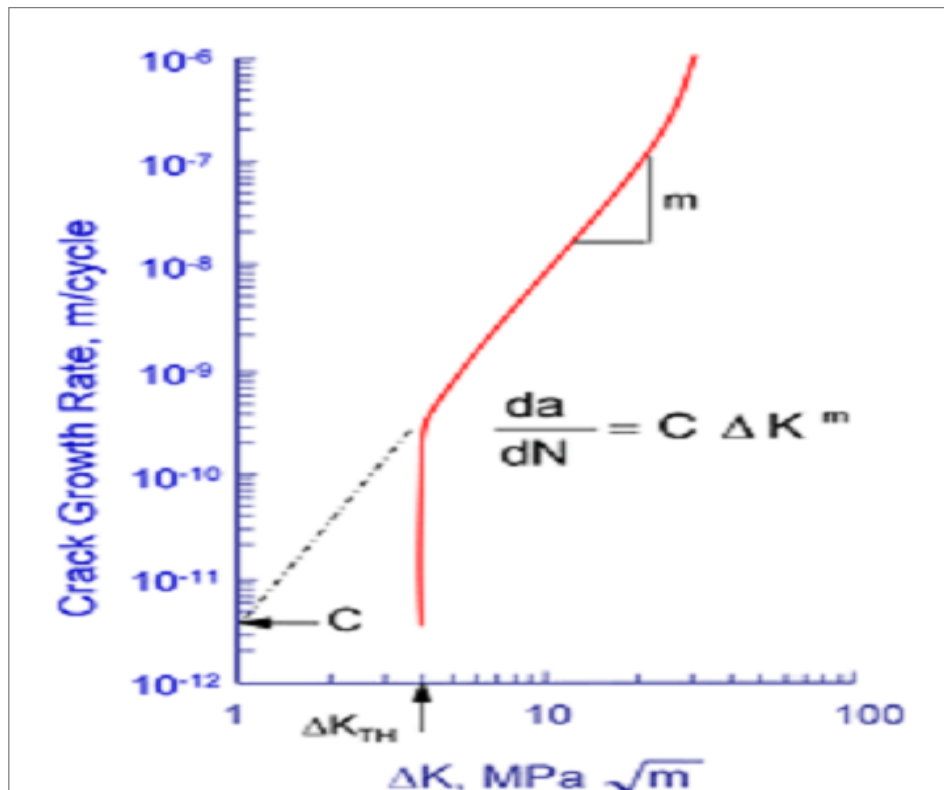


Figure 51: Modèle de PARIS

III. CARACTERISTIQUES MECANQUES ET PROPRIETES DES MATERIAUX

III.1 Matériaux d'étude

Notre choix des matériaux est basé sur les métaux et précisément les aciers, grâce à plusieurs critères telle que :

- Les propriétés mécaniques : parmi les propriétés mécaniques qui caractérisent les aciers, on cite le Module d'élasticité (E), la limite élastique et la résistance à la traction (R_e , R_m), la dureté (H), la ténacité (KIC).
- Les propriétés physico-chimiques : on cite la conductivité thermique et électrique (λ , σ_e), la résistance à la corrosion
- L'aptitude à la coupe et au soudage

Donc les matériaux d'étude sont trois aciers de différents classements qui se trouvent dans la base de données du code « fatigue » : L'acier inoxydable 'A316', et deux aciers de construction 'A542' et 'A517'.

Chapitre III : Etude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles

- L'acier inoxydable qui porte la désignation A316 selon AISI (American Iron and Steel Institute) : est fabriqué à partir d'un alliage du fer (plus de 50%), le Carbone (moins de 1.2%), le Chrome (au minimum de 10,5%) et des additives comme le Nickel et le Molybdène pour améliorer la solidité et la résistance à la rouille [76].
Son qualité inoxydable est obtenue par l'intermédiaire de la formation d'un film invisible et adhérent d'oxyde riche en chrome. Il s'utilise dans les milieux agressifs tels que les zones côtières, les zones industrielles, piscines.
- L'acier de construction, dit A542 selon ASTM (American society for testing material) : est un alliage du Fer et de Chrome-Molybdène – Vanadium et approximativement 0.15% de Carbone, trempé et revenu pour la fabrication des réservoir sous pression, la construction navale, et l'industrie pétrochimie sous forme des tôles au minimum de 5mm d'épaisseur [77].
- L'acier de construction qui prend la désignation A517 selon ASTM (American society for testing material) : est un alliage de l'acier et Carbone (entre 0.08-0.22), le Nickel 0.60%, le Silicium (0.65%), le Chrome (1%) et aussi des traces d'autre élément comme le Cuivre et le Vanadium [78]. Cet alliage est destiné à la fabrication des réservoirs à haute résistance à la pression.

Les propriétés mécaniques et de fissuration des matériaux utilisées données par le tableau 2 :

Matériaux	E (MPa)	C (m/cycle)	$\Delta K_{TH} (MPa\sqrt{m})$	m
A316	190000	4.26E-13	5.15	3.6
A517	207000	5.28E-12	4	3.39
A542	207000	8.02E-12	7.3	3

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques et paramètres de propagation des matériaux

III.2 Les géométries des éprouvettes

L'éprouvettes mise en œuvre sont des assemblages soudés de géométrie bout à bout et double filet.

- L'éprouvette en géométrie bout à bout : L'éprouvette caractérise un assemblage soudé homogène entre deux tôles d'épaisseur ' $b = 15\text{mm}$ ' (figure 52) en présence d'un défaut en surface de taille initial a_0 . Pour notre étude la fissure initiale varie de 0.5 à 2.5mm. La limite de la rupture est limitée par une fissure finale de taille $a_f = 10\text{mm}$. L'éprouvette est sollicitée en traction pour des rapports de charge R variant de 0.1 à 0.4.

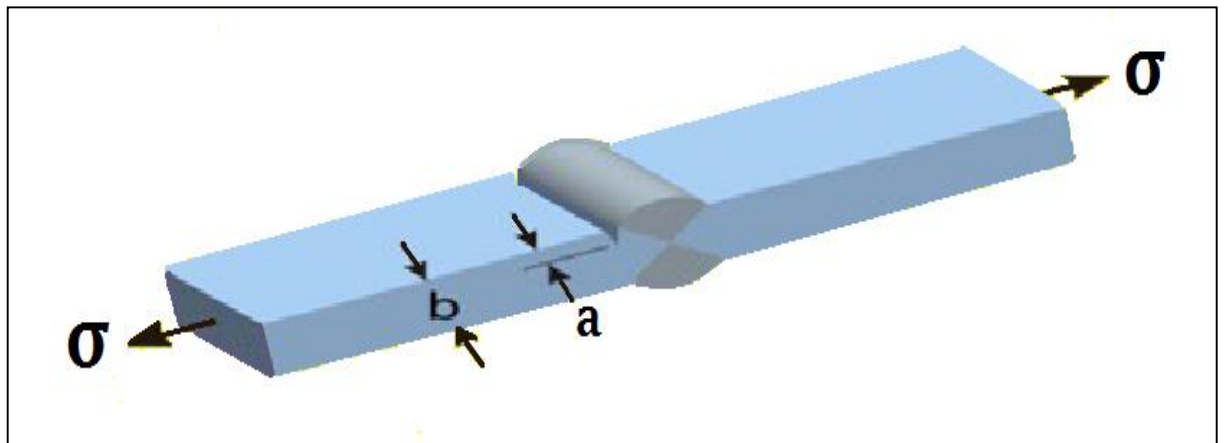


Figure 52: Eprouvette en géométrie bout à bout

- L'éprouvette en géométrie double filet ou en croix : Dans cette géométrie il s'agit d'un assemblage soudé homogène en angle des tôles en épaisseurs $b=10\text{mm}$ (figure 53), soumis en traction avec une fissure de forme semi elliptique définie par le rapport (a/c) , où « a » est la profondeur de la fissure et « c » est la longueur.

Les dimensions de la fissure initiale sont caractérisées par le rapport a/c variable (de 0.1 à 0.5) ainsi que l'angle de cordon de soudure θ ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) et le chargement appliqué pour des rapports de charge R variant de 0.1 à 0.4.

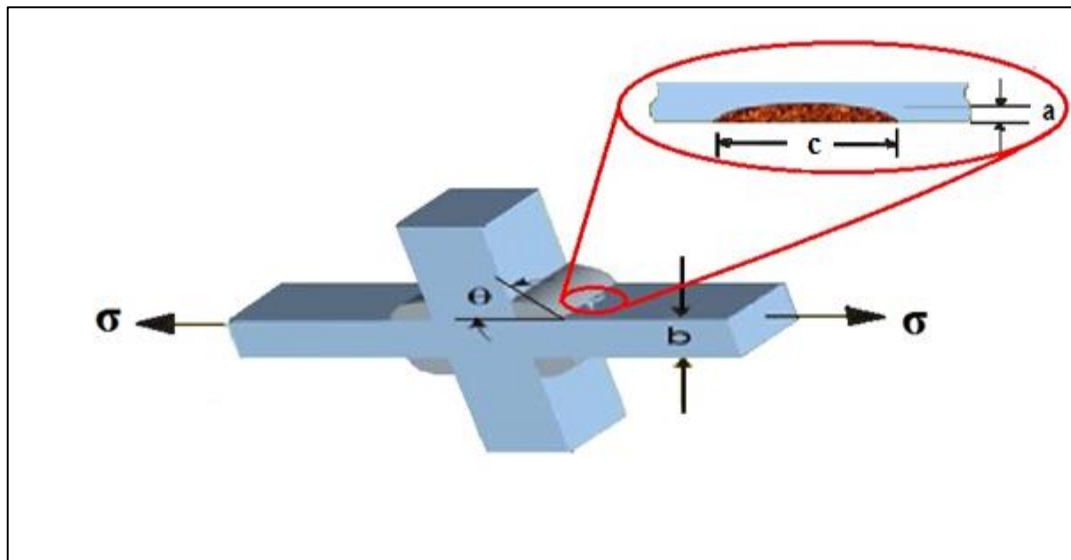


Figure 53 : Eprouvette en géométrie double filet

III.3 Paramètres de chargement

Les contraintes maximales appliquées " σ_{\max} " sont de 120 MPa et 180 MPa respectivement pour l'éprouvette soudé bout à bout (figure 52) et éprouvette soudée en croix (figure 53).

L'effet du rapport de charge peut être exprimé par l'effet de la contrainte moyenne. Le tableau 4 présente le niveau des contraintes moyennes des deux chargements appliqués pour les rapports de charge R (0.1 ; 0.2 et 0.4).

Contrainte maximale σ_{\max} (MPa)	R=0.1	R=0.2	R=0.4
	σ_{m1} (MPa)	σ_{m2} (MPa)	σ_{m3} (MPa)
120	66	72	84
180	99	108	126

Tableau 3: Evolution de la contrainte moyenne pour différents rapports de charge

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie on présente les résultats obtenus de la prédiction des durées de vies des joints soudés bout à bout et joints soudés en double filets. Les paramètres étudiés sont la taille initiale de la fissure, le rapport de charge, les angles du cordon de soudure et la nuance des matériaux étudiés.

IV.1 Soudure bout à bout

Pour cette géométrie (figure 52), nous examinons l'effet du rapport de charge sur le comportement du joint soudé en bout à bout sous un chargement maximal à amplitude constante ($\sigma_{\max} = 120$ MPa).

IV.1.1 Effet du rapport de charge R sur le comportement en fatigue de l'acier A316

Les figures 54 à 57 montrent l'évolution de la longueur de la fissure « a » en fonction du nombre de cycles N pour sous la variation du rapport de charge.

La figure 54, montre la propagation de la fissure à partir d'une taille initiale $a_0 = 0.5$ mm en fonction du nombre de cycle N jusqu'à une taille finale $a_f = 10$ mm, donc pour les rapports de charge $R = 0.1$ et $R = 0.2$ les nombres de cycles à rupture sont respectivement de 1.9×10^6 cycles et $N = 2.9 \times 10^6$ cycles. La différence en durée de vie est de 1.0×10^6 cycles ce qui représente un taux d'augmentation de 1.53 fois pour $R = 0.2$.

A " $a_0 = 1$ mm" la même tendance des courbes de fissuration sous la variation du rapport de charge de 0.1 à 0.4 (figure 55). Les taux d'augmentation en durée pour $R = 0.2$ et 0.4 sont respectivement 1.58 et 4.5

Pour un défaut de 2 mm (figure 56), on observe la diminution du nombre de cycles sous la diminution des rapports de charges. Cette diminution est due à l'augmentation de l'amplitude de chargement. A $R = 0.1$ le nombre de cycle à rupture est de l'ordre de 4.5×10^5 cycles. Pour $R = 0.2$ et 0.4 on observe respectivement une augmentation de en durée de vie de rupture d'un taux de 1.54 et 4.36 fois.

Par contre pour un défaut de 2.5 mm (figure 57), les taux d'augmentation en durée de vie respectivement pour $R=0.2$ et $R=0.4$ sont de l'ordre de 1.52 et 4.3.

L'analyse des résultats présentés sur les figures 54 à 57 montre que :

- l'augmentation de la taille initiale du défaut a_0 fait diminuer la durée de vie
- les taux d'augmentation en durée de vie sont dans le même ordre de grandeur quelques soit la taille initial du défaut.

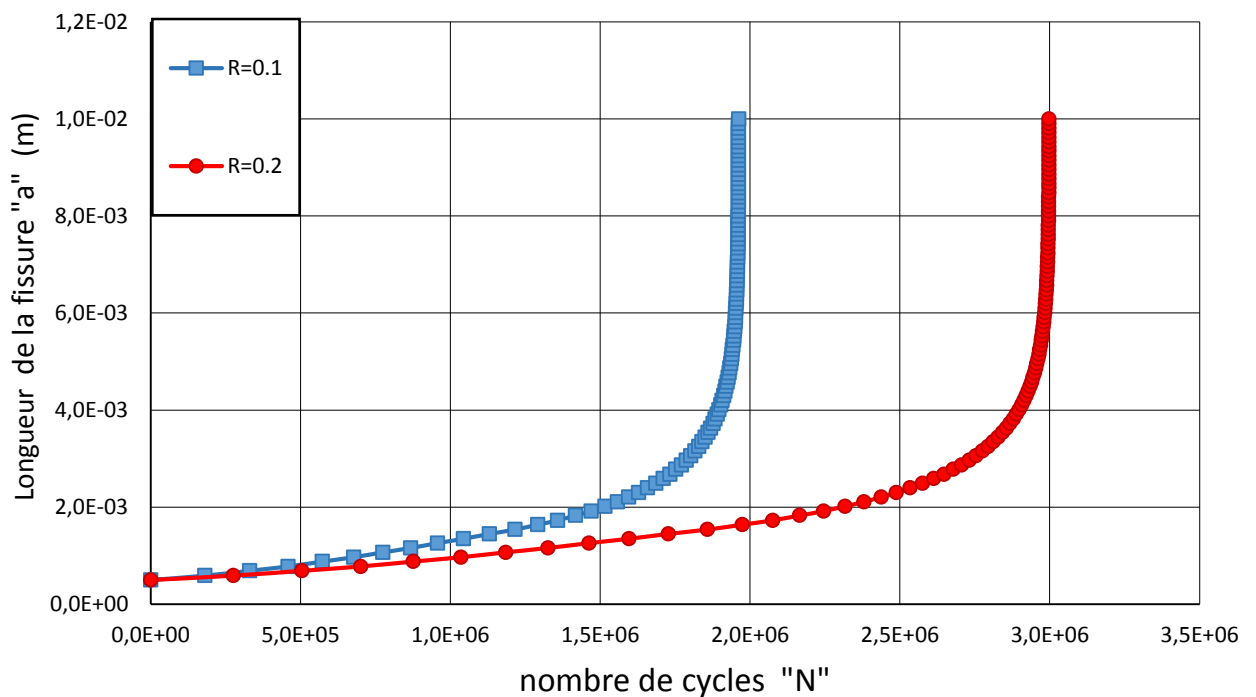


Figure 54: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=0.5\text{mm}$

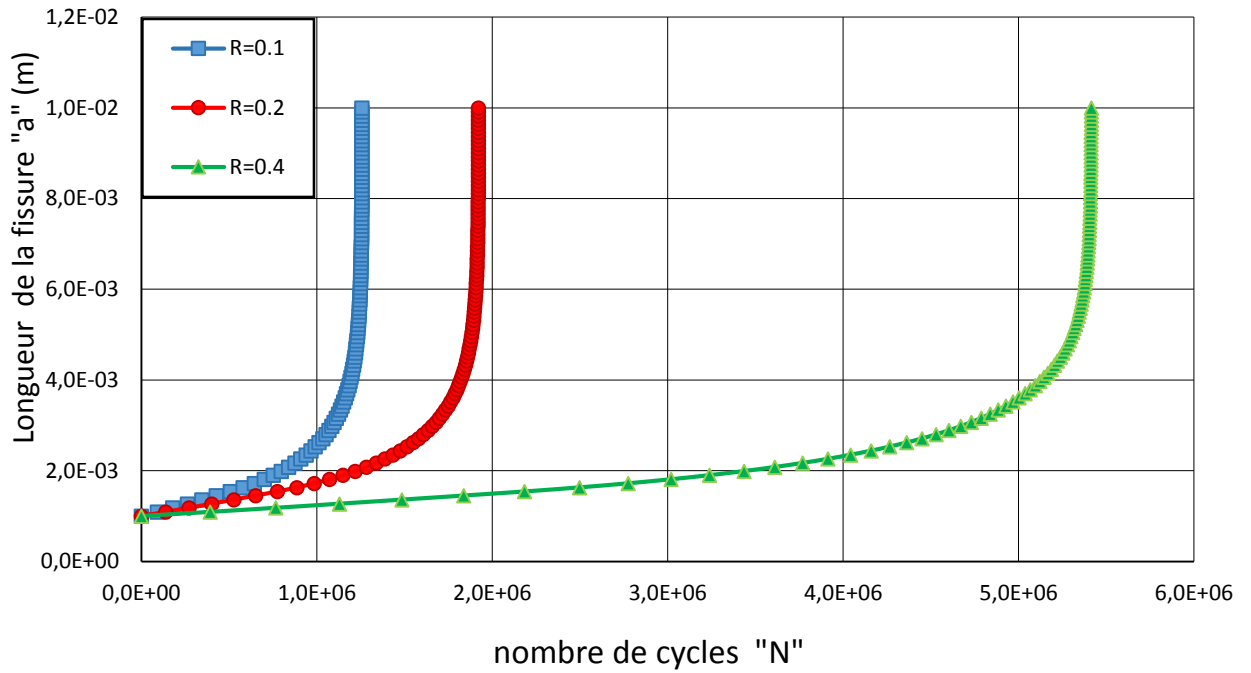


Figure 55: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$

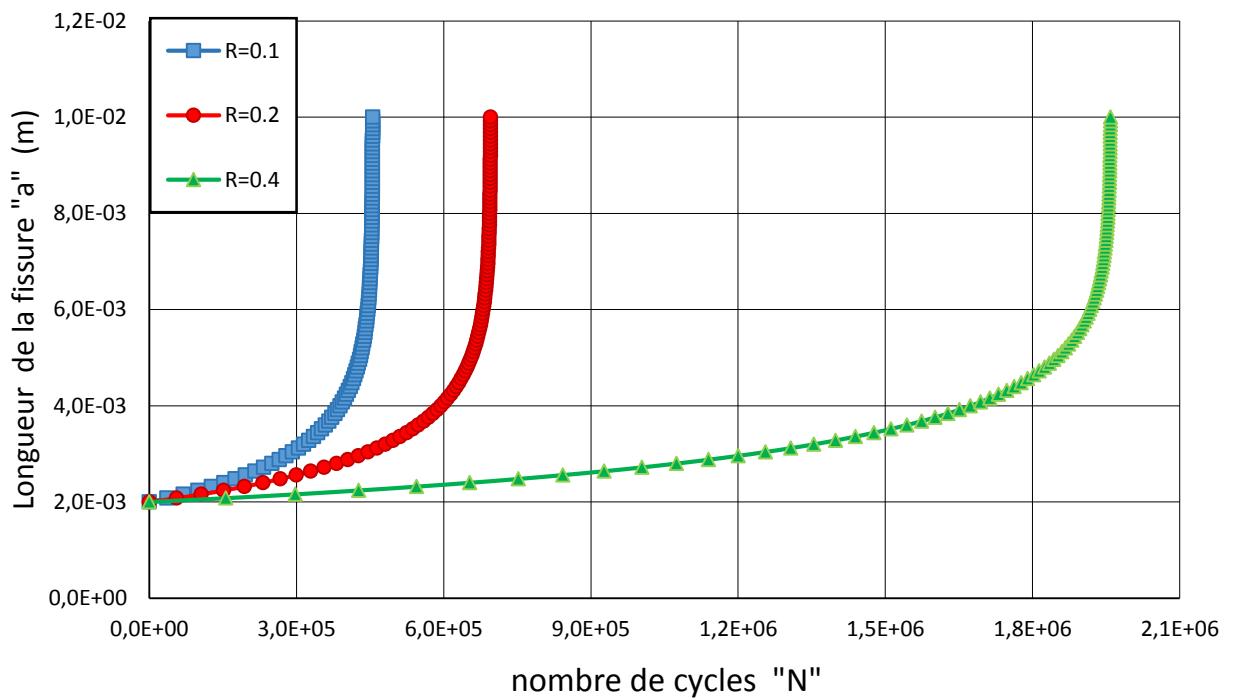


Figure 56: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$

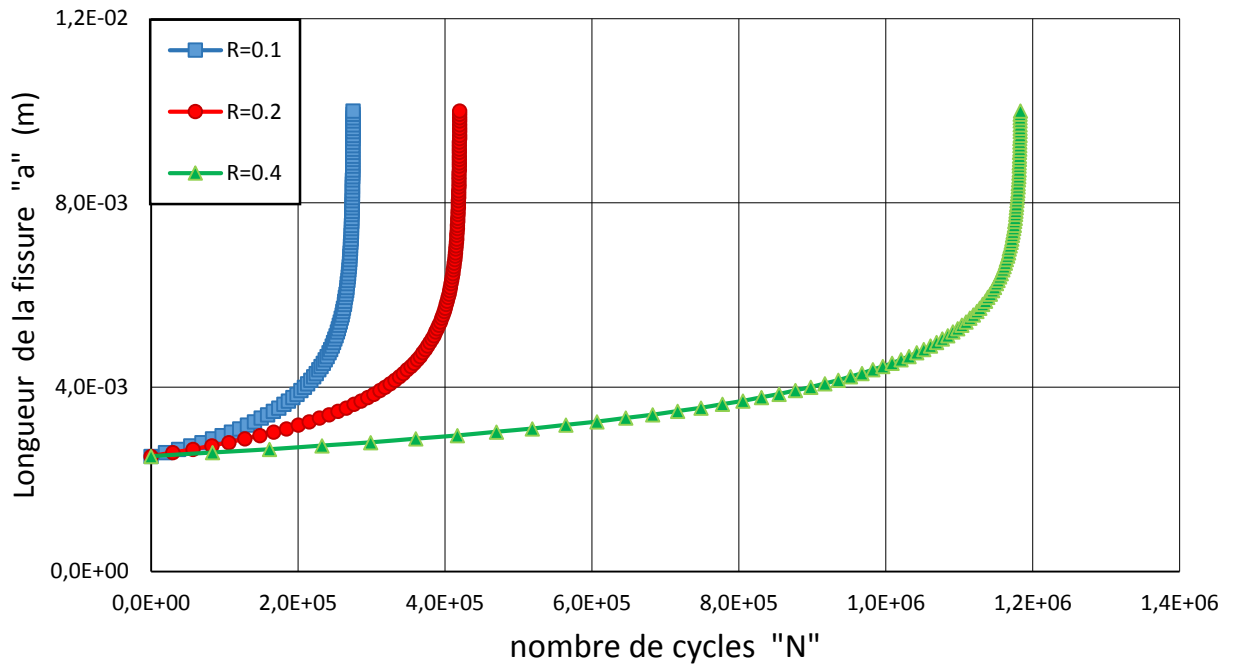


Figure 57: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A316 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$

IV.1.2 Effet du rapport de charge R sur le comportement en fatigue de l'acier A542

Les figures 58 à 60 montrent l'effet de la variation du rapport de charge R sur un joint soudé bout à bout en acier A542 sous le même chargement maximal ($\sigma_{\max} = 120$ MPa), à la présence d'une fissure de taille initiale a_0 varie de 1mm jusqu'à 2.5mm.

Pour la fissure de taille $a_0 = 1\text{mm}$ (figure 58), on remarque que la durée de vie dépasse 2.8×10^5 cycles et 4.0×10^5 cycles pour R=0.1 et R=0.2 respectivement.

Pour la fissure de taille $a_0 = 2\text{mm}$ (figure 59), la durée de vie à la rupture est égale à $1,21 \times 10^5$ cycles et $1,72 \times 10^5$ cycles pour les mêmes rapports de charge.

Et pour la fissure de taille $a_0 = 2.5\text{mm}$ (figure 60), la durée de vie diminue jusqu'à $7,97 \times 10^4$ cycles et $1,13 \times 10^5$ pour R=0.1 et R=0.2 respectivement par rapport des résultats précédents, de plus elle est de l'ordre de $2,69 \times 10^5$ cycles à R=0.4 (figure 60).

D'après cette analyse on peut déduire que :

- l'augmentation de la taille de la fissure fait réduire la durée de vie de la structure soudée et aussi, la proportionnalité du nombre des cycles avec le rapport de charge R pour le même défaut.

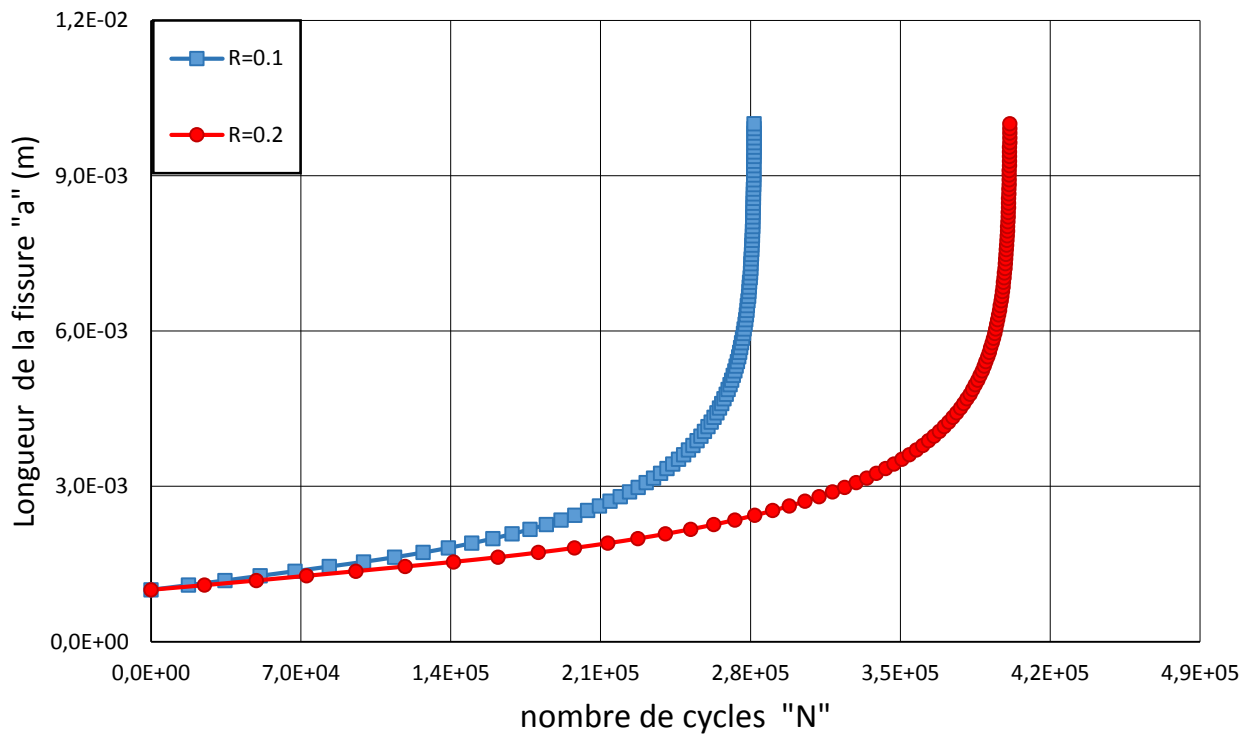


Figure 58: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$

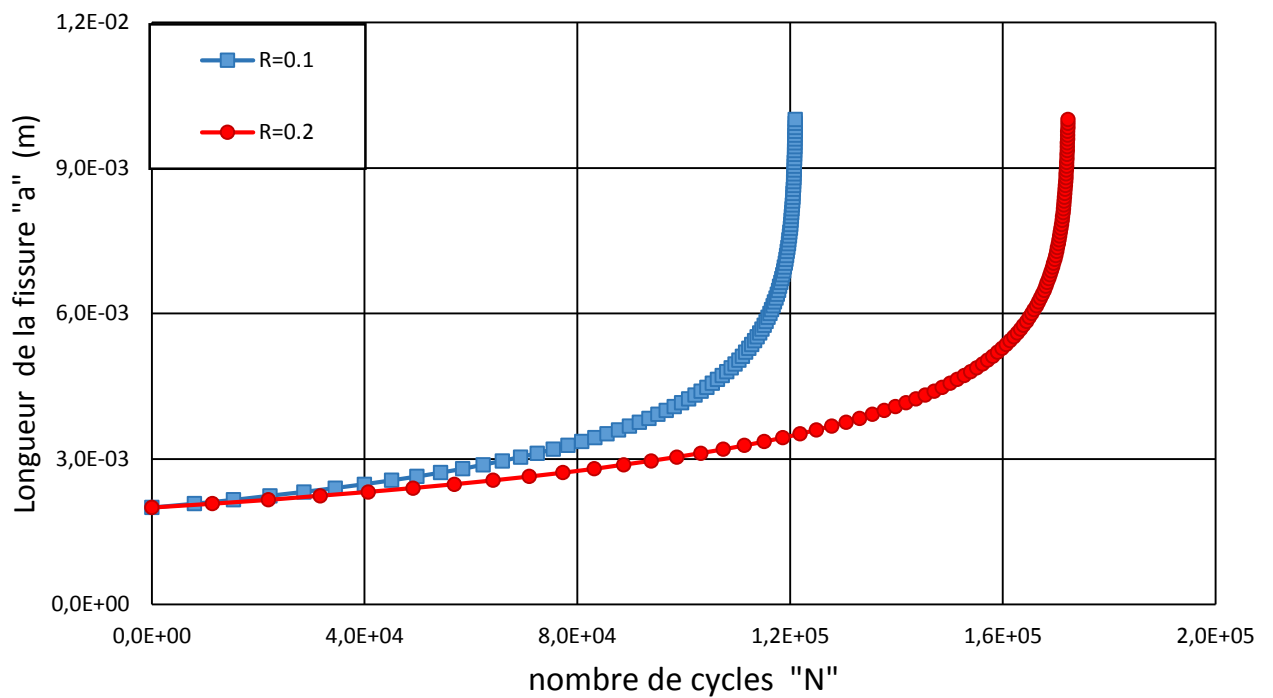


Figure 59: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$

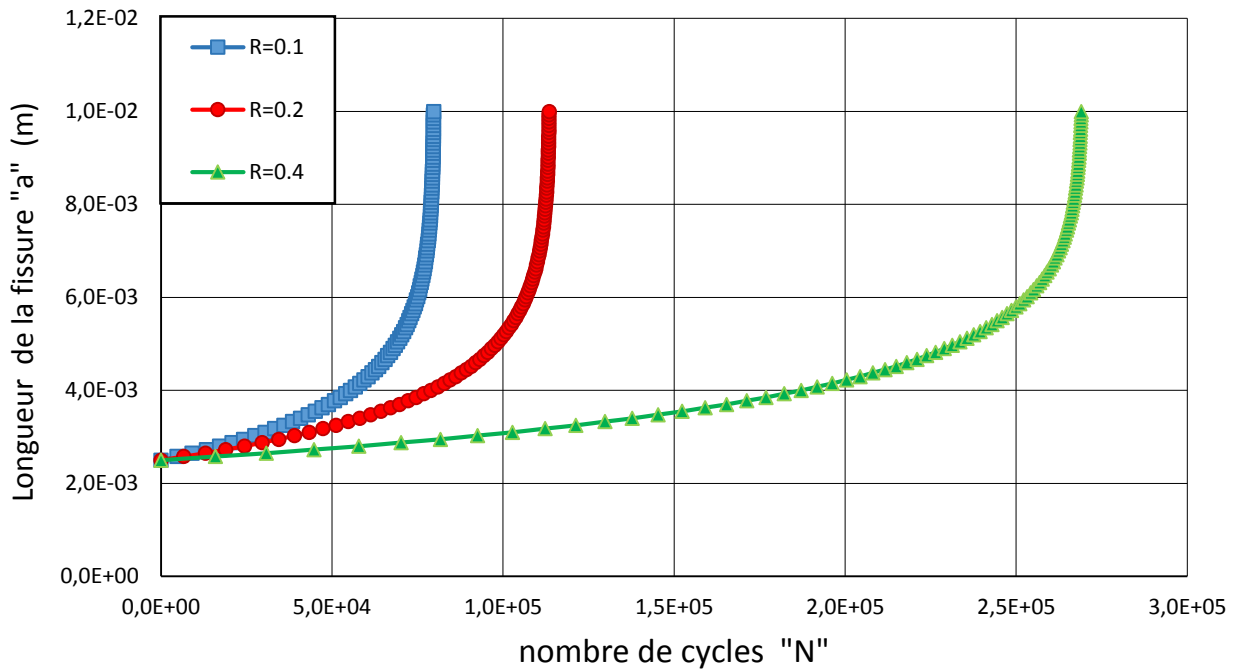


Figure 60: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A542 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$

IV.1.3 Effet du rapport de charge R sur le comportement en fatigue de l'acier A517

Les courbes montées dans les figures 61 à 64 reflètent l'effet de rapport de charge **R** sur l'évolution de la fissure en fatigue d'un joint soudé en acier A517 à partir d'une longueur initiale a_0 varie de 0.5mm à 2.5mm en fonction du nombre des cycles N.

La durée de vie égale est de l'ordre de $2,55 \times 10^5$ cycles pour $a_0=0.5\text{mm}$ (figure 61), et elle se progresse passant par $3,8 \times 10^5$ cycles pour jusqu'à $1,01 \times 10^6$ cycles pour un rapport de charge vari de 0.1 à 0.4 respectivement. Les taux de progression sont de 1.5 et 2.6 fois.

Concernant une taille de défaut égale à 1mm (figure 62), on observe que la durée de vie est de l'ordre de $1,67 \times 10^5$ cycles ; par contre elle est de l'ordre de $6,43 \times 10^4$ cycles pour une taille de défaut égale à 2mm (figure 63) ; et d'autre part elle est égale à $4,0 \times 10^4$ cycles pour $a_0=2.5\text{mm}$ (figure 64). Les taux de progression sont identiques à celle des résultats précédents.

On remarque que la progression du nombre des cycles est suivie la progression du rapport de charge R pour la même taille de défaut ainsi que la croissance de la taille initiale du défaut fait diminuer la durée de vie.

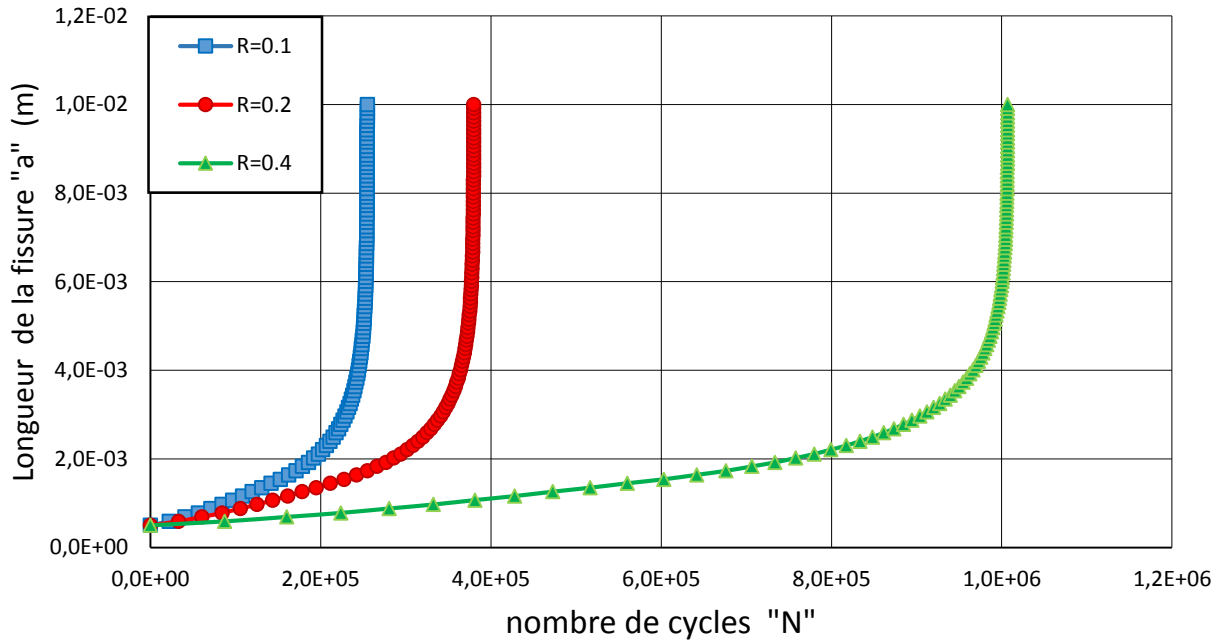


Figure 61: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=0,5\text{mm}$

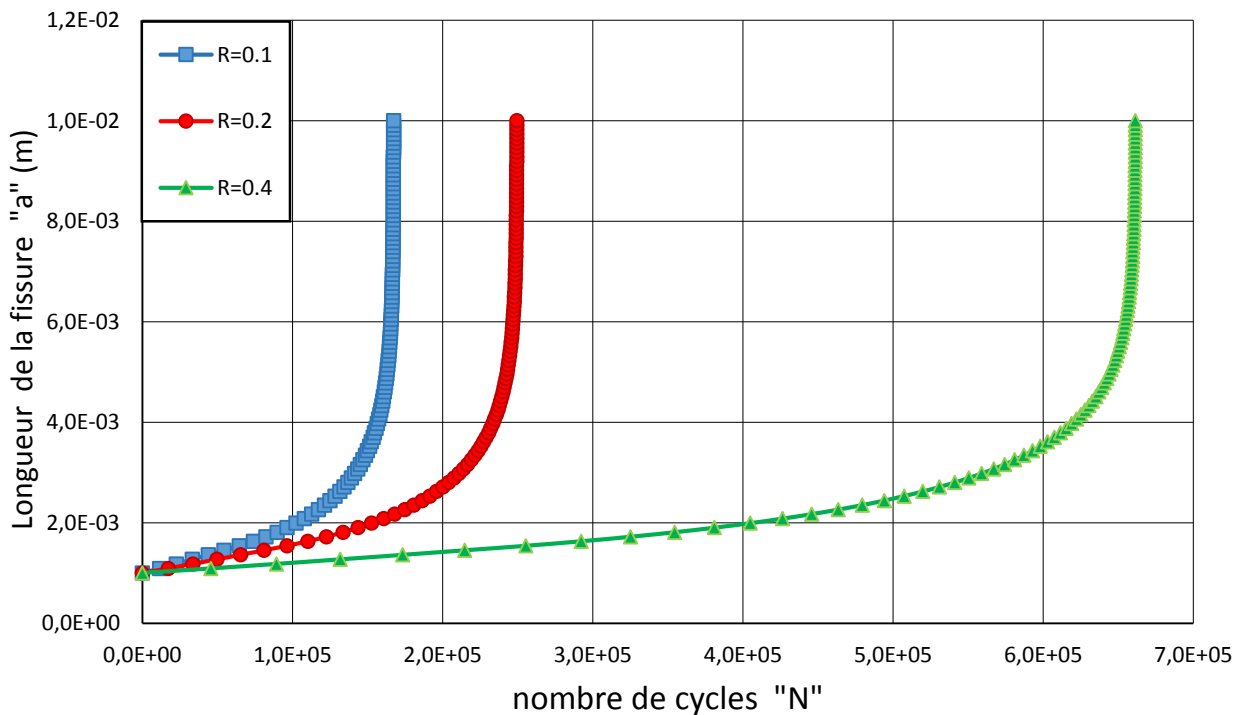


Figure 62: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=1\text{mm}$

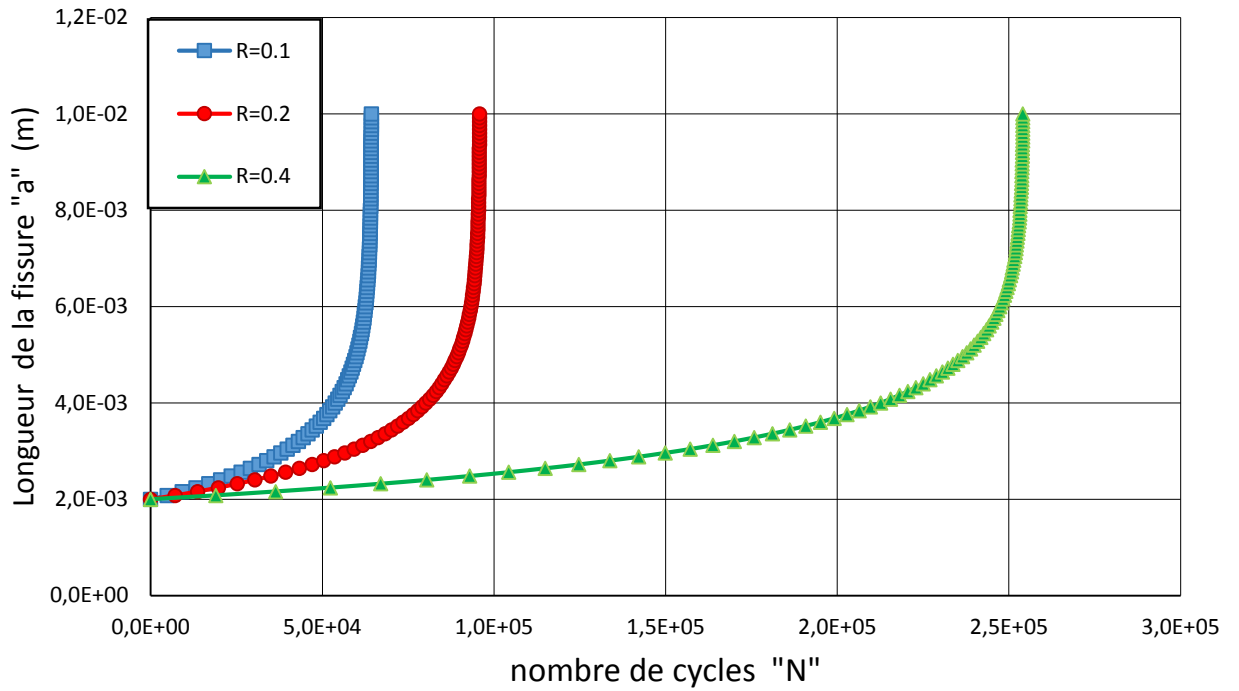


Figure 63: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=2\text{mm}$

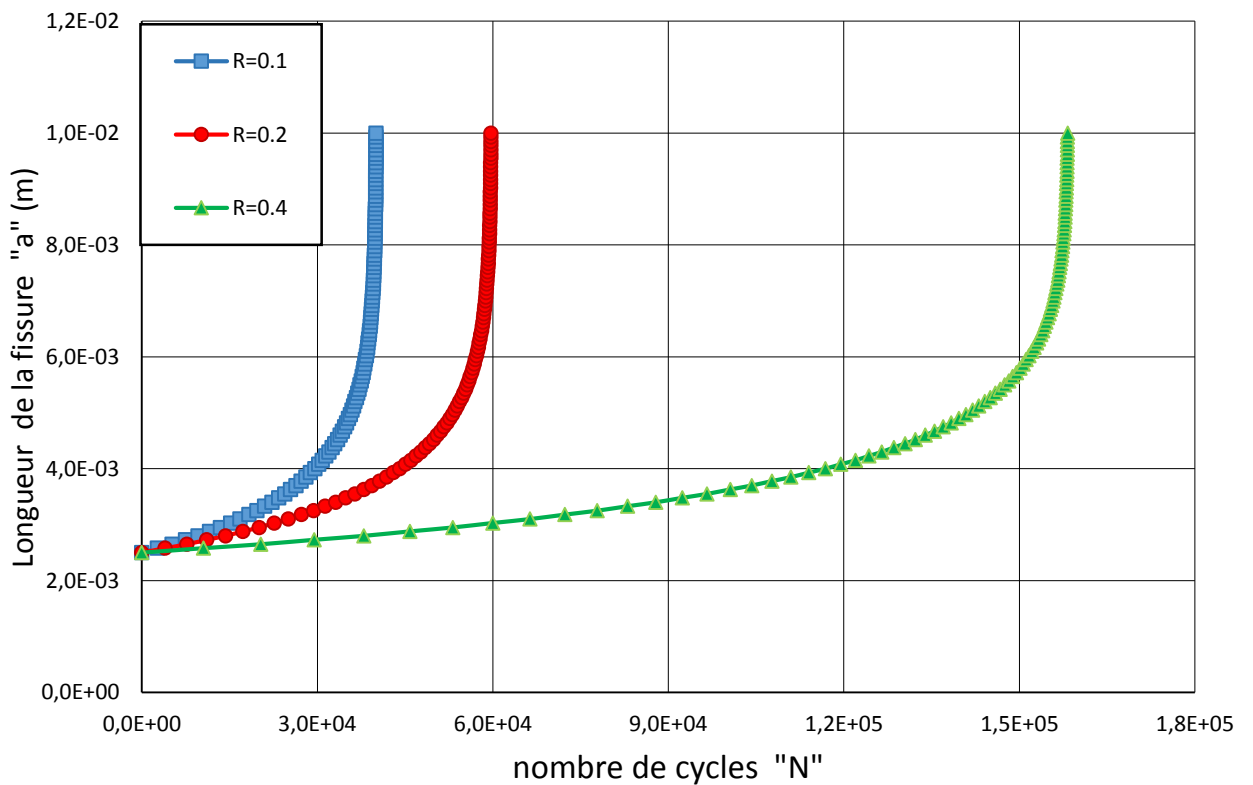


Figure 64: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'un joint soudé bout à bout en l'acier A517 pour un défaut $a_0=2,5\text{mm}$

IV.1.4 Etude comparative

La figure 65 montre l'influence de la variation de la taille initial du défaut qui varie de 0.5mm à 2.5 mm sur la durée de vie totale de l'assemblage soudée en bout à bout, sous l'effet du rapport de charge R constat à 0.2.

L'analyse des courbes qui caractérisent les durées de vie des aciers A316, A542 et A517, montrent une évolution décroissante des durées de vie sous l'augmentation de la taille du défaut initial (fissure initiale).

De plus on remarque que l'assemblage soudé en acier A316 présente une meilleure résistance à la fatigue comparativement aux aciers A542 et A517.

En effet, à $a_0=1.0$ mm, la durée de vie pour $R=0.2$ est de 1.9×10^6 cycles pour l'acier A316 et pour les aciers A542 et A517 les durée de vie sont respectivement 4×10^5 cycles et 2.5×10^5 cycles .

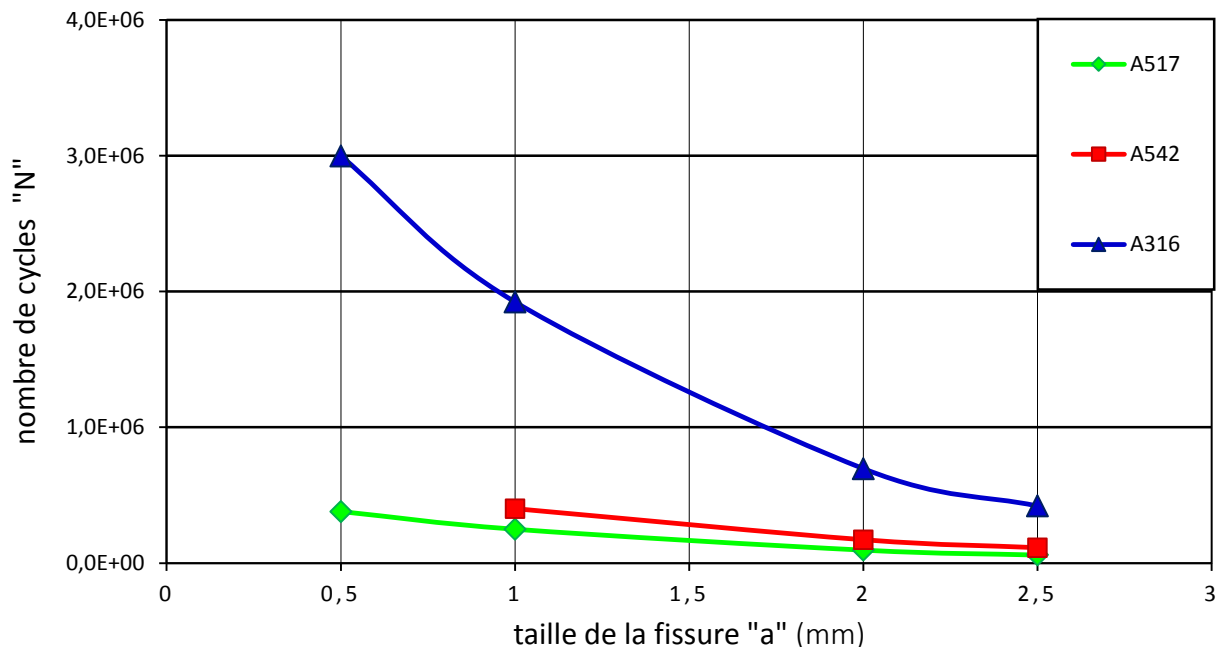


Figure 65: Effet de taille de la fissure dans les différents matériaux pour $R=0,2$

IV.2 Soudure à double fillet

La géométrie double fillet montrée par la figure 53 est sollicitée en traction sous l'effet d'une contraintes maximale appliquée " σ_{\max} " égale à 180 MPa.

Les figures (66 à 94) ci-dessous décrivent l'influence des plusieurs paramètres sur le nombre des cycles nécessaire pour que la fissure semi-elliptique puisse se propager du taille initiale $a_0=1\text{mm}$ jusqu'à la taille finale $a_f=10\text{mm}$.

IV.2.1 étude Comportement en fatigue de l'acier A316

a : Effet du rapport a/c

Dans les figures 66 à 68, il s'agit de la croissance proportionnelle du nombre des cycles en fatigue avec le rapport a/c (de 0.1 à 0.5) pour un rapport de charge fixe ($R=0.2$).

Pour l'angle du cordon de soudure $\theta=30^\circ$ (figure 66), le nombre de cycles à la rupture est $6,12 \times 10^5$ cycles pour un rapport $a/c=0.1$, et les pourcentages d'évolution sont 46% ,41%, 33% et 31% pour les rapports a/c varient de 0.2 à 0.5 respectivement.

On remarque les mêmes allures des courbes pour les angles $\theta=45^\circ$ et $\theta=60^\circ$, en effet la durée de vie pour un rapport $a/c=0.1$ est de 5.3×10^5 cycles (figure 67) et 5.03×10^5 cycles (figure 68), cette dernière augmente avec l'augmentation du rapport a/c avec des taux de 1.9 fois ,1.7 fois ,1.5 fois et 1.4 fois pour les rapports a/c varient de 0.2 à 0.5 respectivement.

L'étude des figure 66 à 68 montre que :

- L'augmentation la durée de vie de l'assemblage soudé est la conséquence de l'augmentation du rapport a/c ainsi que la diminution du l'angle du cordon de soudure θ .

Chapitre III : Résultats et discussion

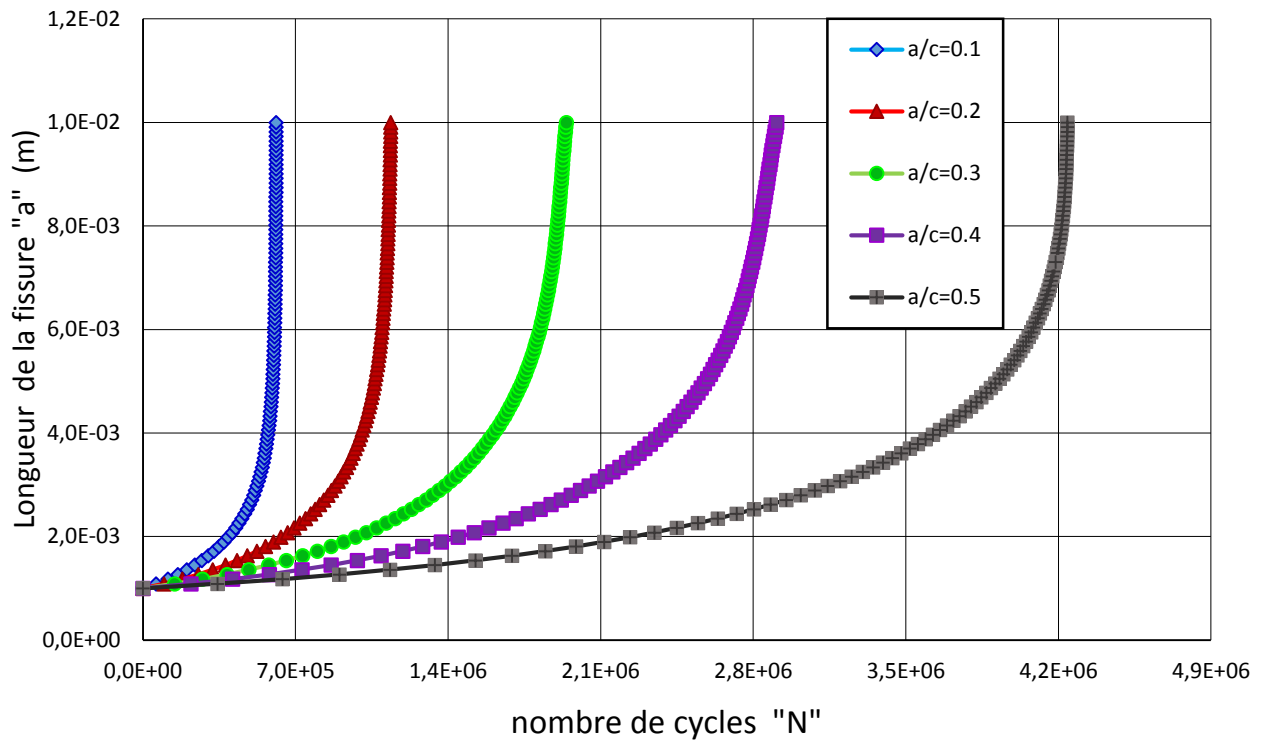


Figure 66: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=30^\circ$ et $R=0,2$

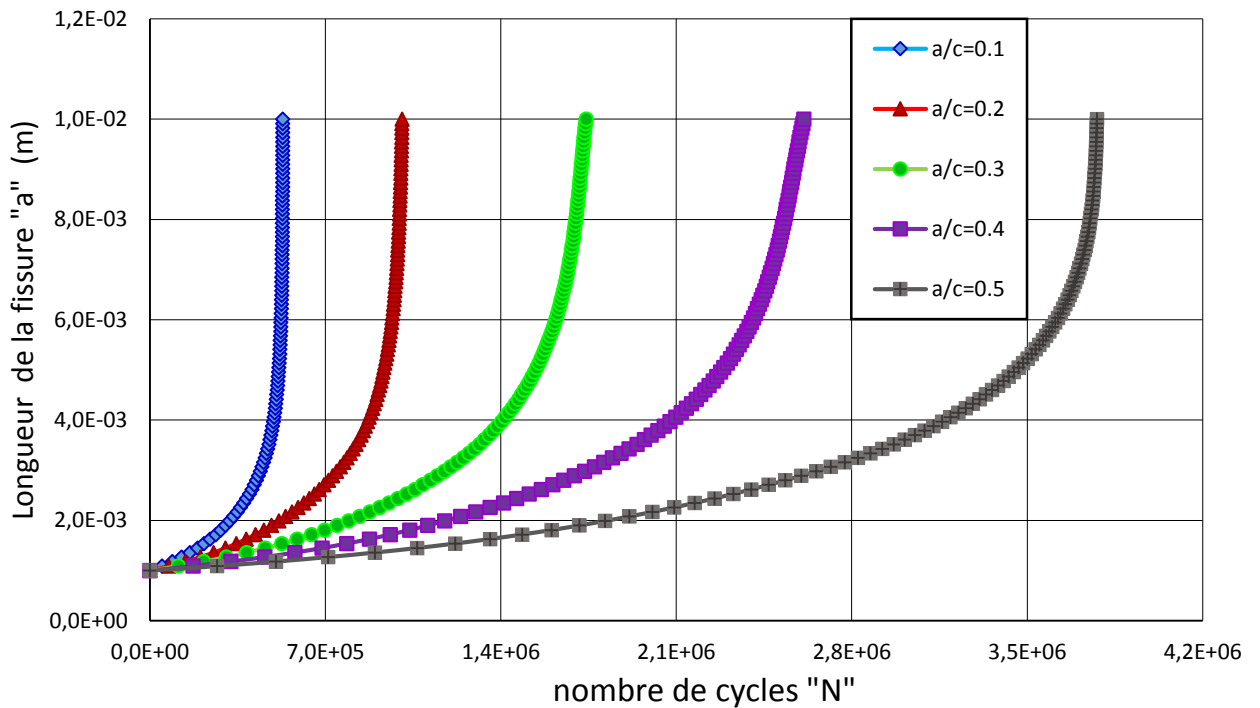


Figure 67: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=45^\circ$ et $R=0,2$

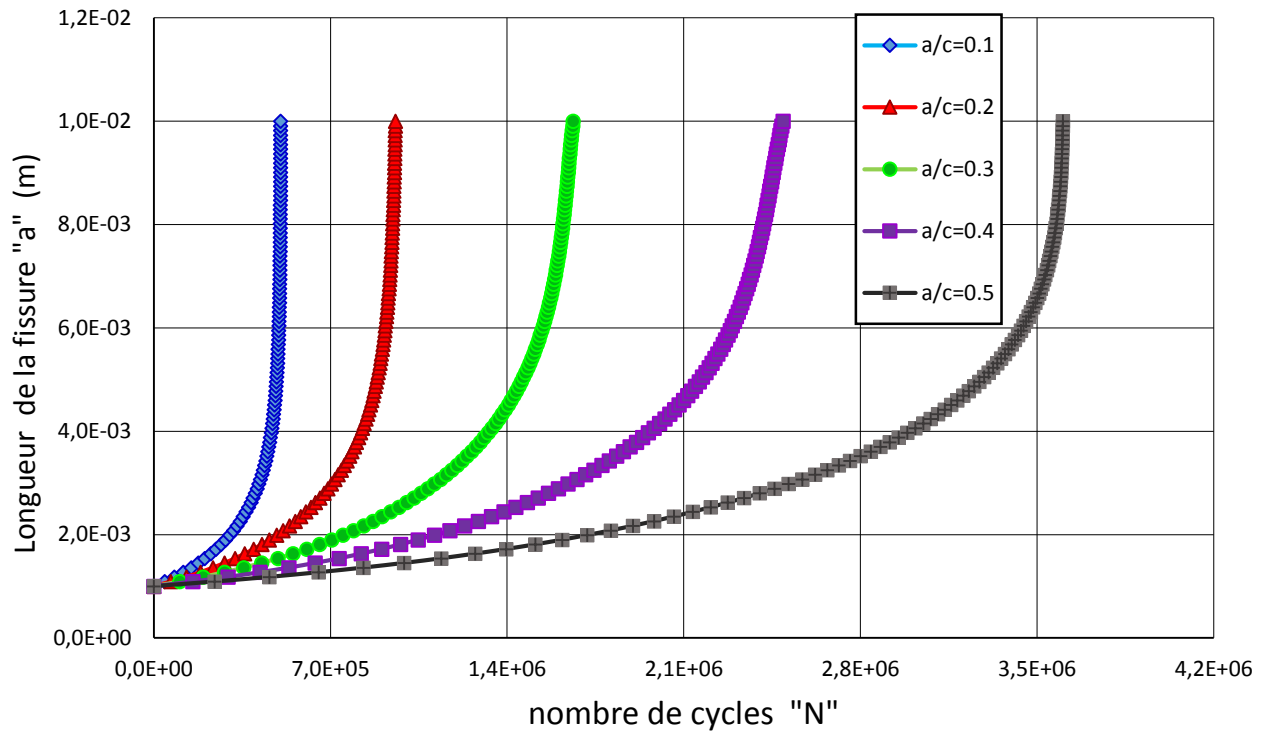


Figure 68: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double fillet en acier A316 pour $\theta=60^{\circ}$ et $R=0,2$

b : Effet de l'angle θ

L'effet de l'angle θ est exprimé dans les figures (69 à 71) pour un rapport de charge R constant à 0.2 et pour un rapport a/c qui prend les valeurs 0.2, 0.3 et 0.5.

Pour $a/c=0.2$ (figure 69), les durées de vie N sont de 9.58×10^5 cycles, 1.01×10^6 cycles et 1.14×10^6 cycles pour $\theta=60^{\circ}$, $\theta=45^{\circ}$ et $\theta=30^{\circ}$ respectivement, on observe l'augmentation du nombre de cycles avec la diminution de l'angle du cordon de soudure θ . D'autre part à $a/c=0.3$ (figure 70) le nombre de cycles N estimé pour que la fissure atteigne la taille finale se développe de 1.66×10^6 cycles pour $\theta=60^{\circ}$, à 1.74×10^6 cycles pour $\theta=45^{\circ}$ et 1.94×10^6 cycles pour $\theta=30^{\circ}$. Même chose pour un rapport $a/c=0.5$ (figure 71), la durée de vie pour $\theta=60^{\circ}$ est de 3.60×10^6 cycles et elle se développe avec une différence de 1.8×10^5 cycles pour $\theta=45^{\circ}$ et encore avec 4.5×10^5 cycles pour $\theta=30^{\circ}$.

Cette analyse nous montre que de l'augmentation de durée de vie en fatigue de l'assemblage est la conséquence de l'augmentation du rapport a/c ainsi que la diminution de l'angle θ du cordon de soudure.

Chapitre III : Résultats et discussion

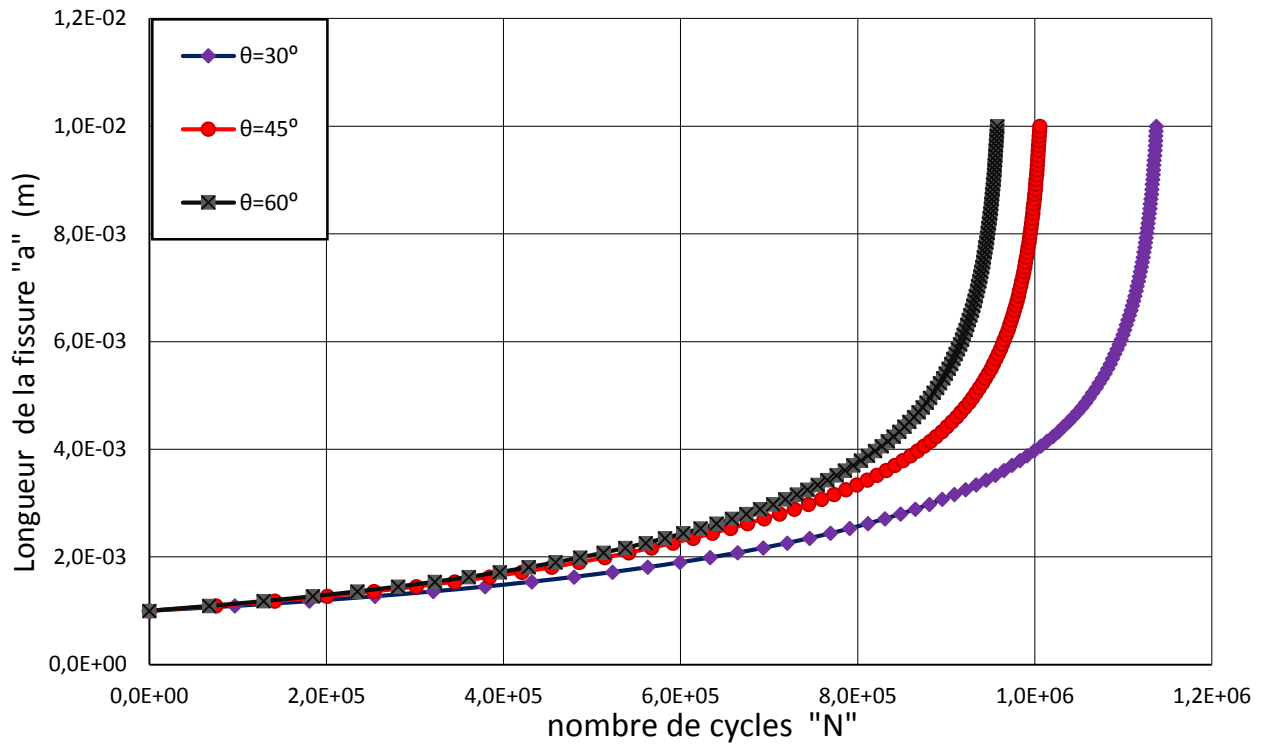


Figure 69: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$

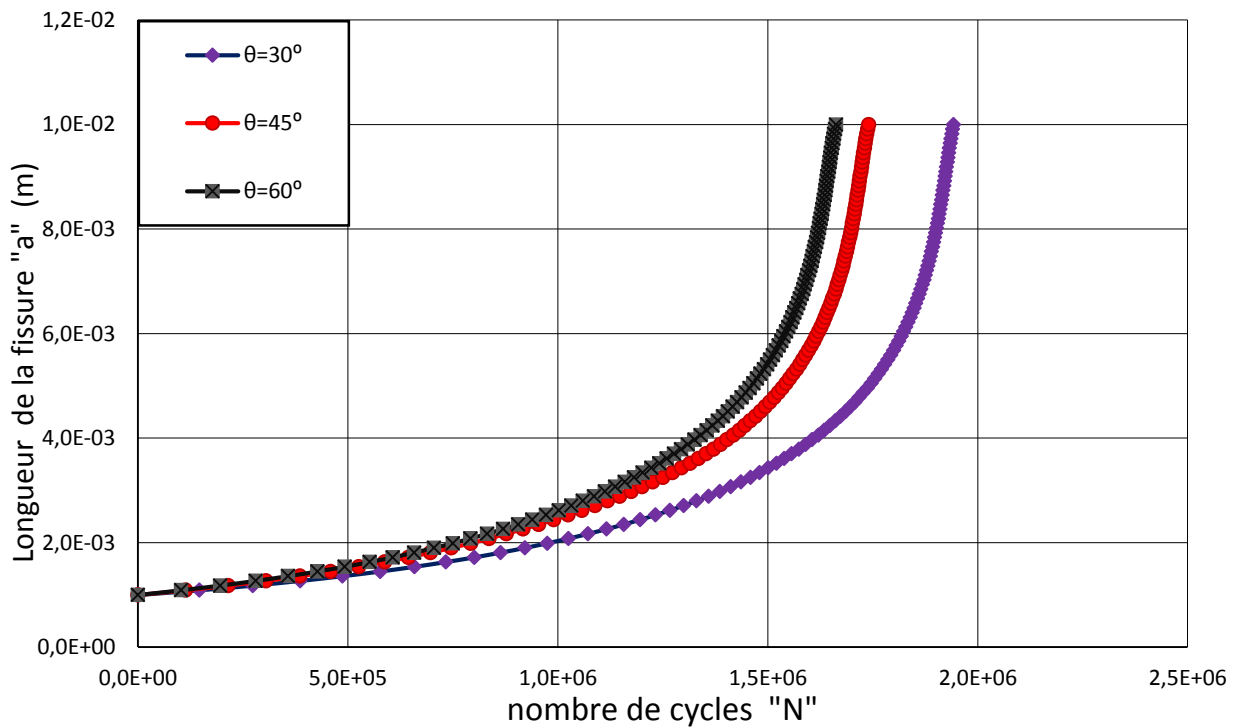


Figure 70: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$

Chapitre III : Résultats et discussion

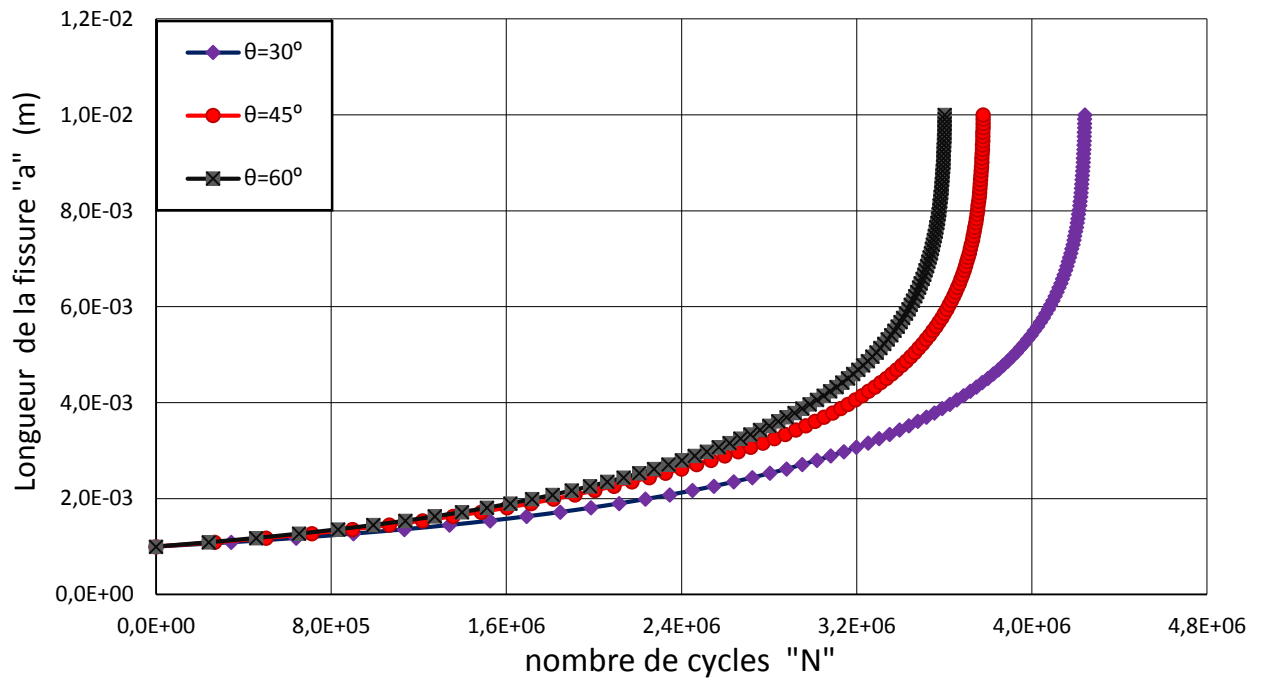


Figure 71: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $a/c=0,5$ et $R=0,2$

C : effet du rapport de charge R

L'effet de rapport de charge R sur le comportement en fatigue de l'assemblage est illustré dans les figures 72 à 74, pour un rapport a/c fixe à une valeur de 0.2 et un angle θ variable de 30° à 60° .

on remarque que l'augmentation du rapport de charge aboutit à l'augmentation de la durée de vie total. ceci est montré dans la figure 72, pour l'angle $\theta=30^\circ$ la durée de vie requis pour arriver au taille final a_f est de 7.44×10^5 cycles pour $R=0.1$; de 1.14×10^6 cycles pour $R=0.2$ et de 3.20×10^6 cycles pour $R=0.4$.

Et dans la figure 73, la durée de vie s'évolue de 6.58×10^5 cycles pour $R=0.1$ avec une différence de 3.52×10^5 cycles et 1.82×10^6 cycles pour $R=0.2$ et $R=0.4$ respectivement

Ainsi que la figure 74, la durée de vie aussi s'évolue de 6.27×10^5 cycles pour $R=0.1$ avec une différence de 3.31×10^5 cycles et 1.74×10^6 cycles pour $R=0.2$ et $R=0.4$.

Cette analyse nous montre que la durée de vie du joint soudé est proportionnelle avec le rapport de charge, par contre la diminution de cette durée de vie est le résultat de l'augmentation de l'angle du cordon de soudure θ .

Chapitre III : Résultats et discussion

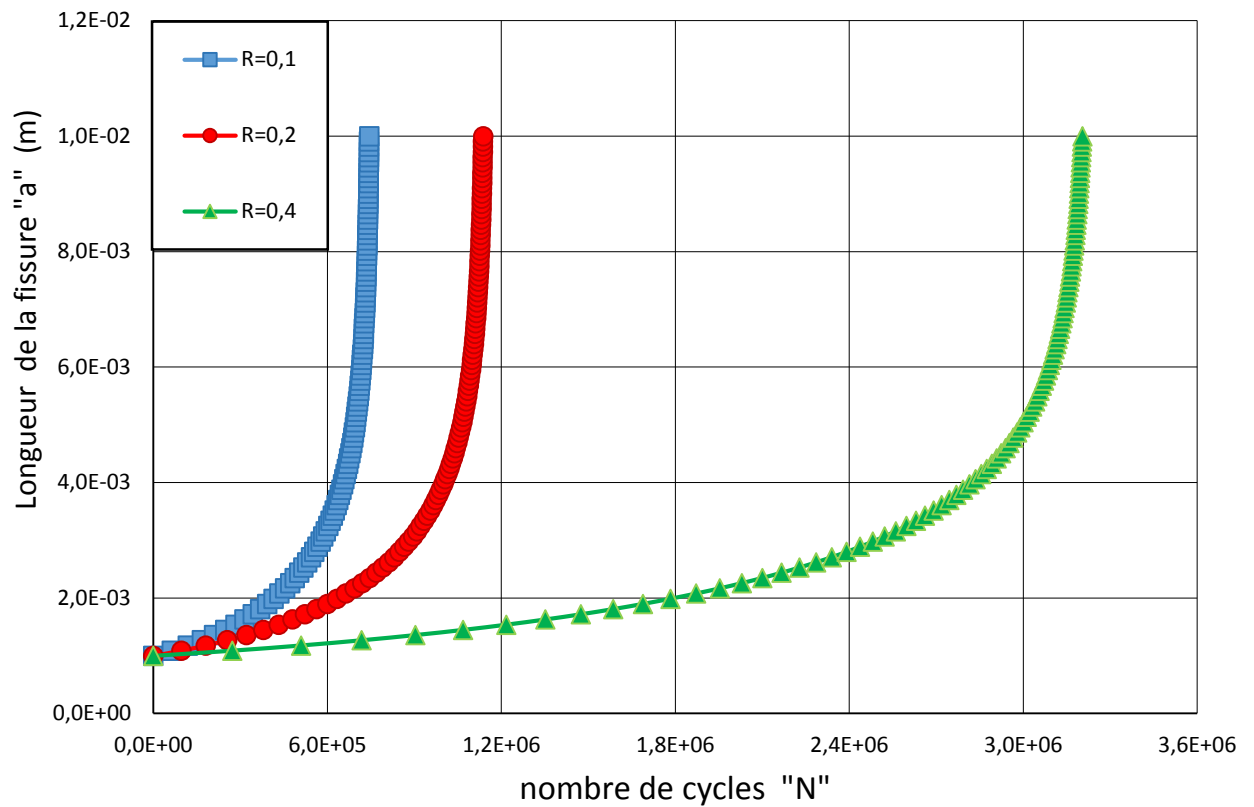


Figure 72: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=30^\circ$ et $a/c=0,2$

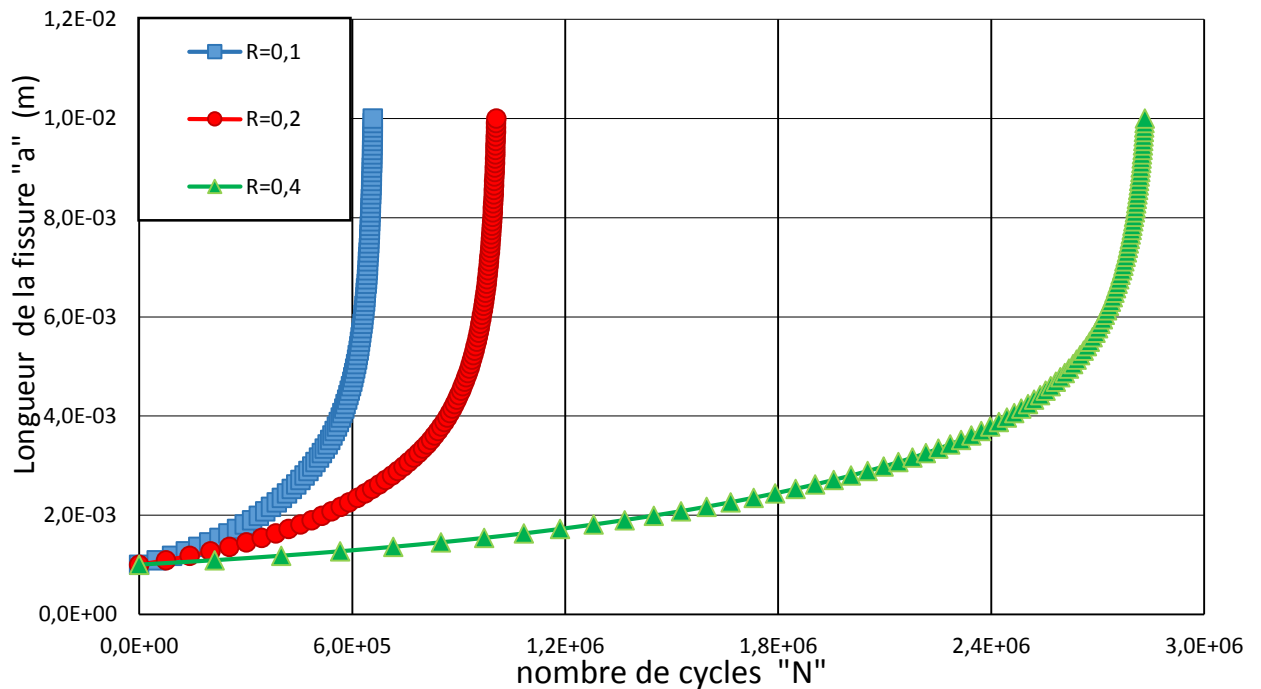


Figure 73 : Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=45^\circ$ et $a/c=0,2$

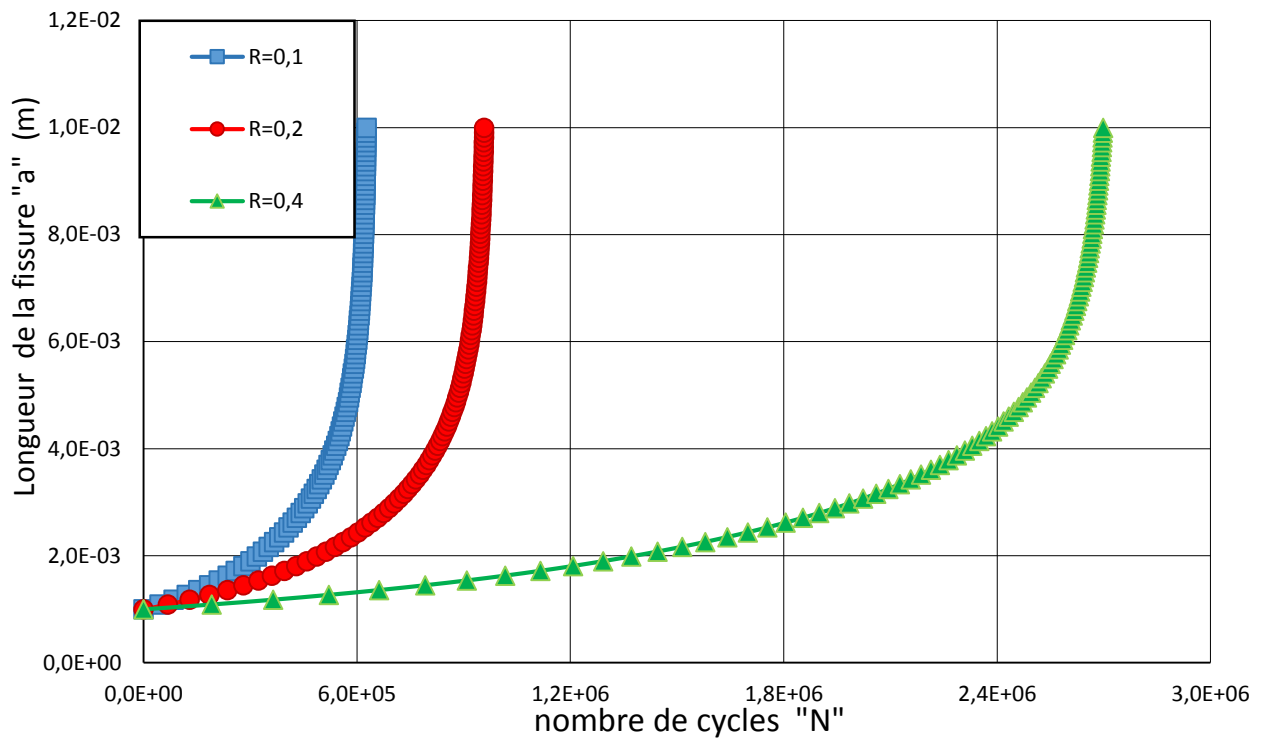


Figure 74: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A316 pour $\theta=60^{\circ}$ et $a/c=0,2$

IV.2.2 étude Comportement en fatigue de l'acier A542

a : Effet du rapport a/c

Les figures 75 à 77 montrent l'évolution de la longueur de la fissure « a » en fonction du nombre de cycles N pour un rapport de charge $R=0,2$, sous la variation du rapport a/c et l'angle du cordon de soudure θ .

La figure 75 présente la croissance du nombre des cycles N sous l'influence de l'augmentation du rapport a/c, donc pour le rapport a/c varie de 0.1 à 0.3, les durées de vie sont respectivement de 1.55×10^5 cycles, $N = 2.7 \times 10^5$ cycles et $N = 4.36 \times 10^5$ cycles d'où les taux d'augmentation sont donc 1.75 et 1.60.

Pour la figure 76, on remarque la même tendance des courbes sous la même variation de rapport a/c et avec une augmentation de l'angle de joint de soudure ($\theta=45^{\circ}$), or les durées de vie diminuent avec des taux de 1.16 fois, 1.09 fois et 1.8 fois par rapport aux résultats précédents.

Même chose pour un angle $\theta=60^\circ$ (figure 77), on observe l'augmentation des rapports a/c fait augmenter la durée de vie de l'assemblage, par contre cette dernière diminue inversement avec l'augmentation du l'angle θ .

D'après on conclue que la durée de vie de l'assemblage est proportionnelle avec le rapport a/c , et chaque augmentation du l'angle du cordon de soudure θ influe négativement sur ca comportement en fatigue.

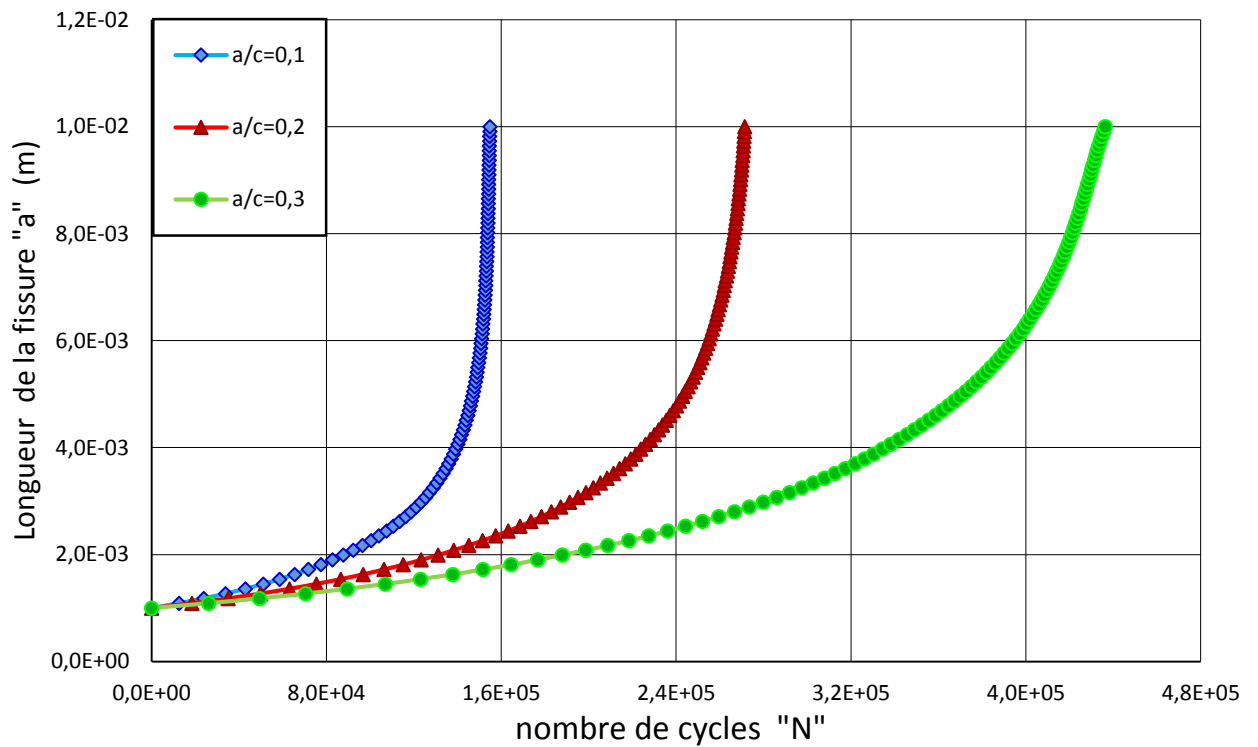


Figure 75: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=30^\circ$ et $R=0,2$

Chapitre III : Résultats et discussion

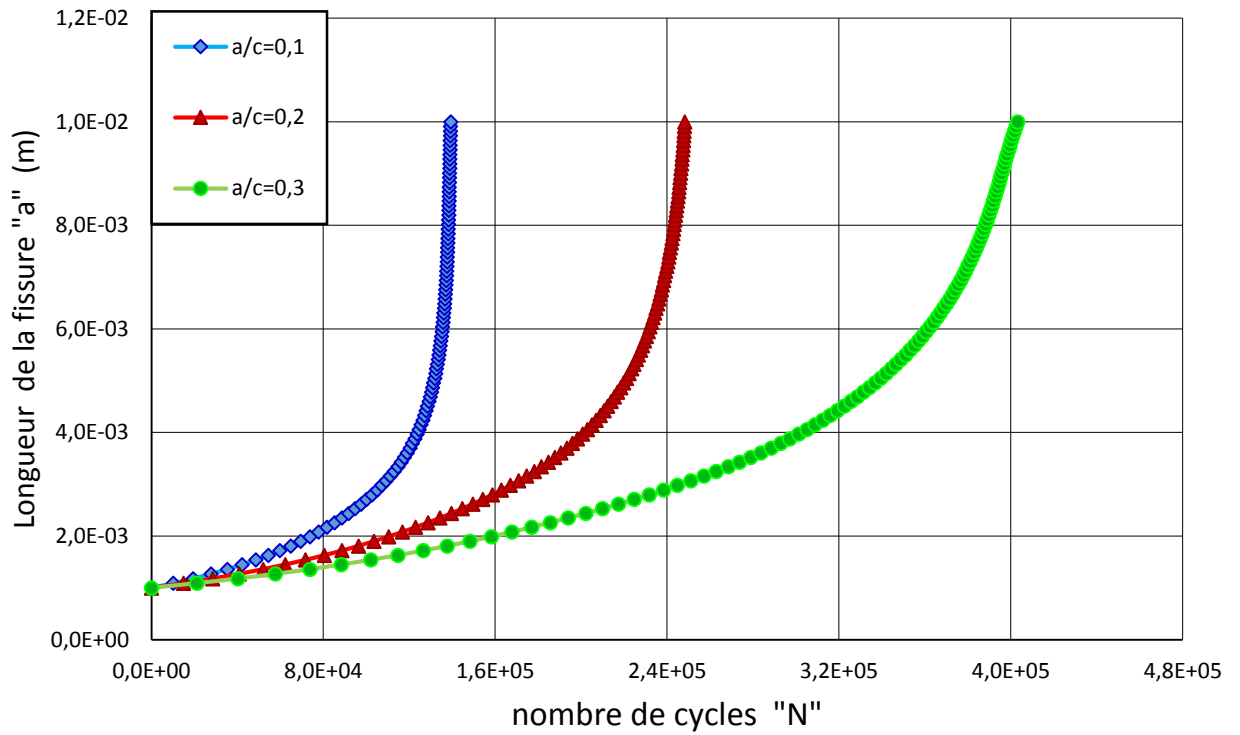


Figure 76: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=45^\circ$ et $R=0,2$

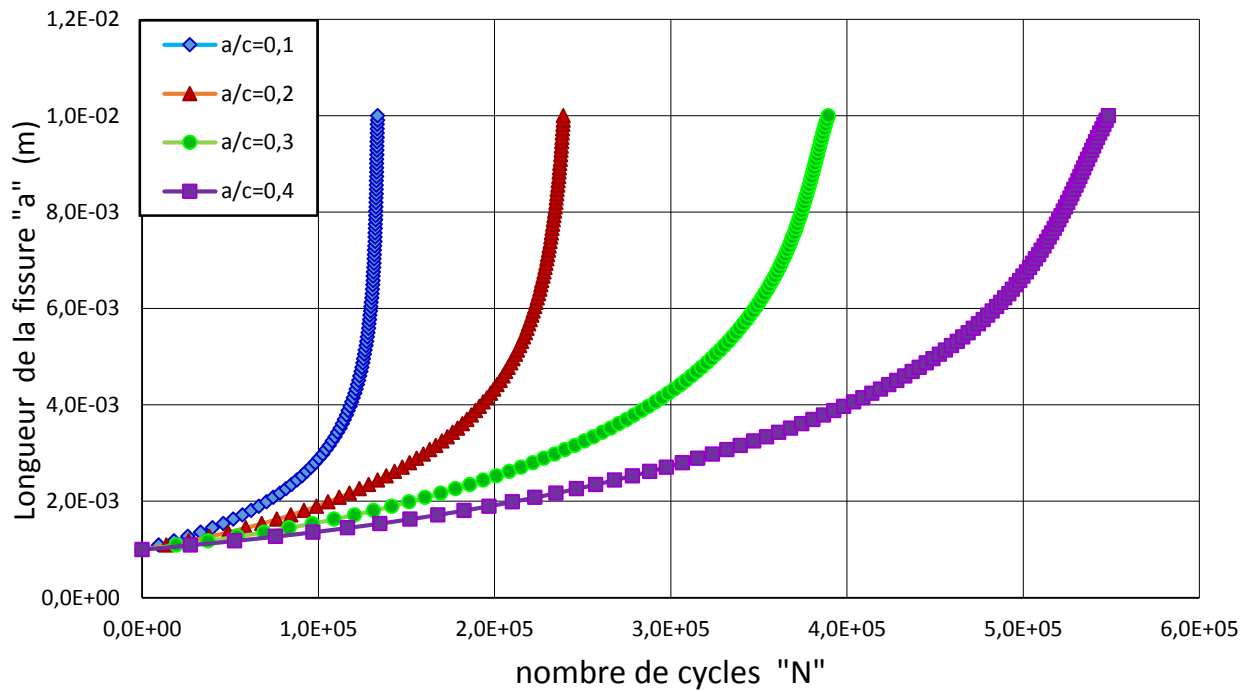


Figure 77: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=60^\circ$ et $R=0,2$

b : Effet de l'angle θ

Les figures 78 et 79 exposent l'effet de l'angle du cordon de soudure θ sur la tenue en fatigue du joint soudé selon la variation du rapport a/c de 0.2 et 0.3 respectivement.

On constate que la croissance du durée de vie est suivie la décroissance du l'angle θ , car pour les valeurs $\theta = 60^\circ$, $\theta = 45^\circ$, et $\theta = 30^\circ$ les nombres de cycles primordial pour que le défaut atteinte la taille finale a_f sont respectivement $N = 2.39 \times 10^5$ cycles, $N = 2.48 \times 10^5$ cycles et $N = 2.71 \times 10^5$ cycles (figure 78).

Et d'autre part, On constate aussi que la croissance du rapport a/c (figure 79) est causé de l'augmentation des durées de vie du joint et ils deviennent $N = 3.89 \times 10^5$ cycles, $N = 4.03 \times 10^5$ cycles et $N = 4.36 \times 10^5$ cycles pour les mêmes angles.

Donc l'analyse de ces résultats confirme que la croissance du l'angle du cordon de soudure θ réduit la durée de vie du joint soudé et pour augmenter cette dernière il faut augmenter le rapport a/c .

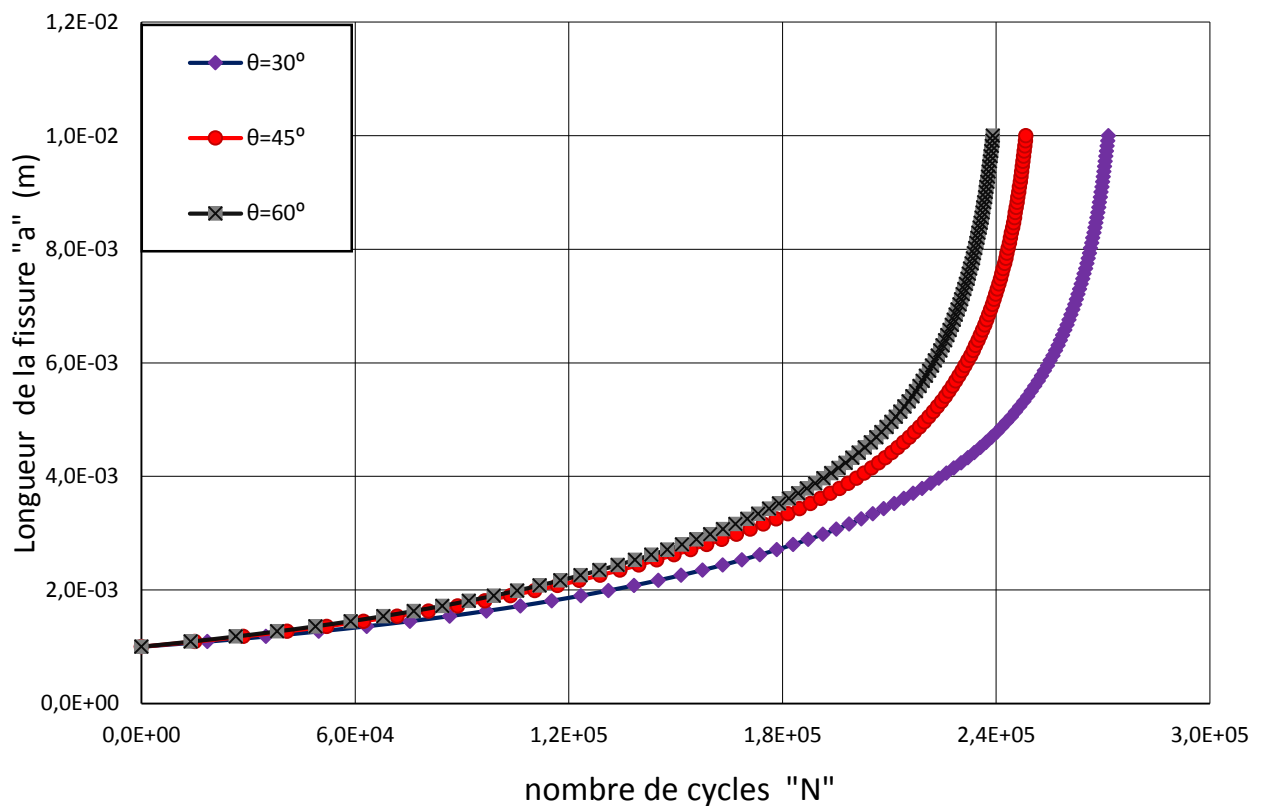


Figure 78: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$

Chapitre III : Résultats et discussion

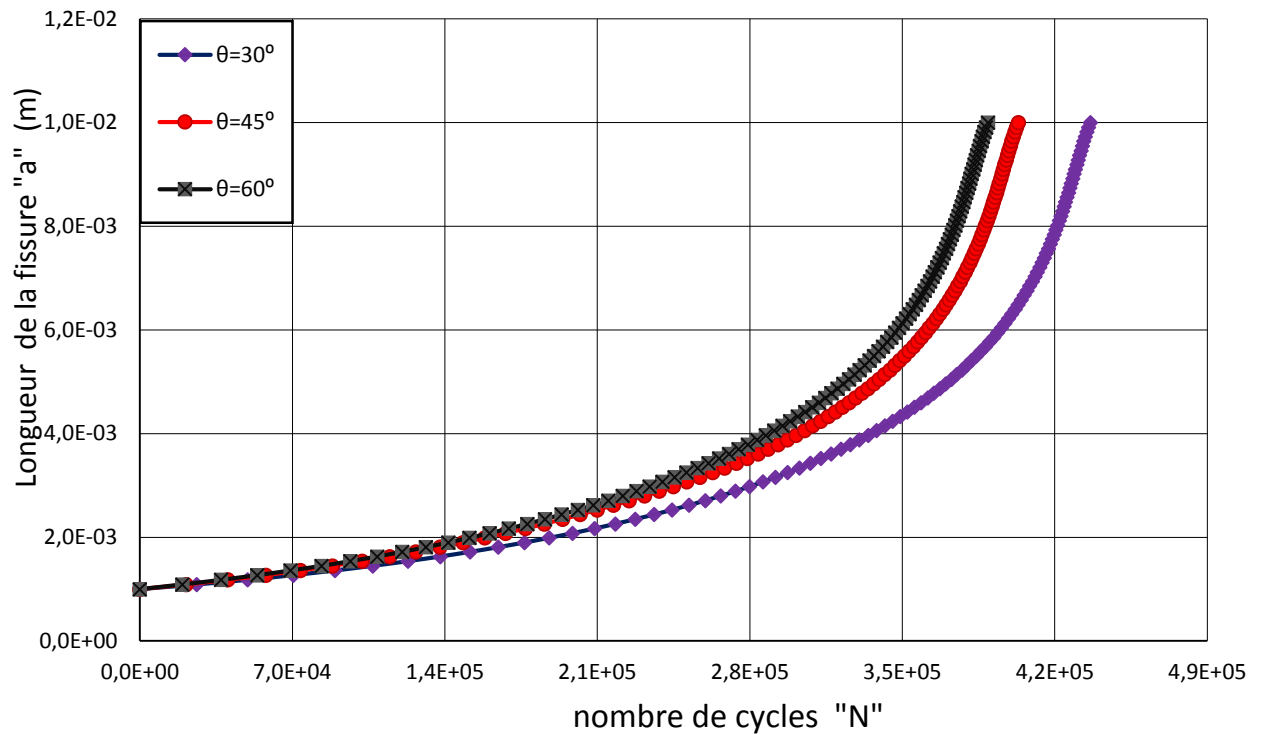


Figure 79: effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$

C : effet du rapport de charge R

Les figures 80 à 82 montrent l'effet du rapport de charge R sur la tenue en fatigue du joint soudé pour un rapport a/c fixe à 0.2 et l'angle du cordon θ varie entre 30° et 60° .

On observe la proportionnalité entre l'augmentation du rapport de charge et l'augmentation de la durée de vie.

En effet, pour $\theta=30^\circ$ (figure 80) les durées de vie à la rupture sont respectivement $N = 1.90 \times 10^5$ cycles et $N = 2.71 \times 10^5$ cycles pour $R=0.1$ et $R=0.2$.

D'où pour $\theta=45^\circ$ (figure 81), la durée de vie égale à 1.74×10^5 cycles pour $R=0.1$ et elle augmente avec un taux de 1.43 fois.

Et pour $\theta=60^\circ$ (figure 82), la durée de vie décroît avec la décroissance du rapport de charge

Chapitre III : Résultats et discussion

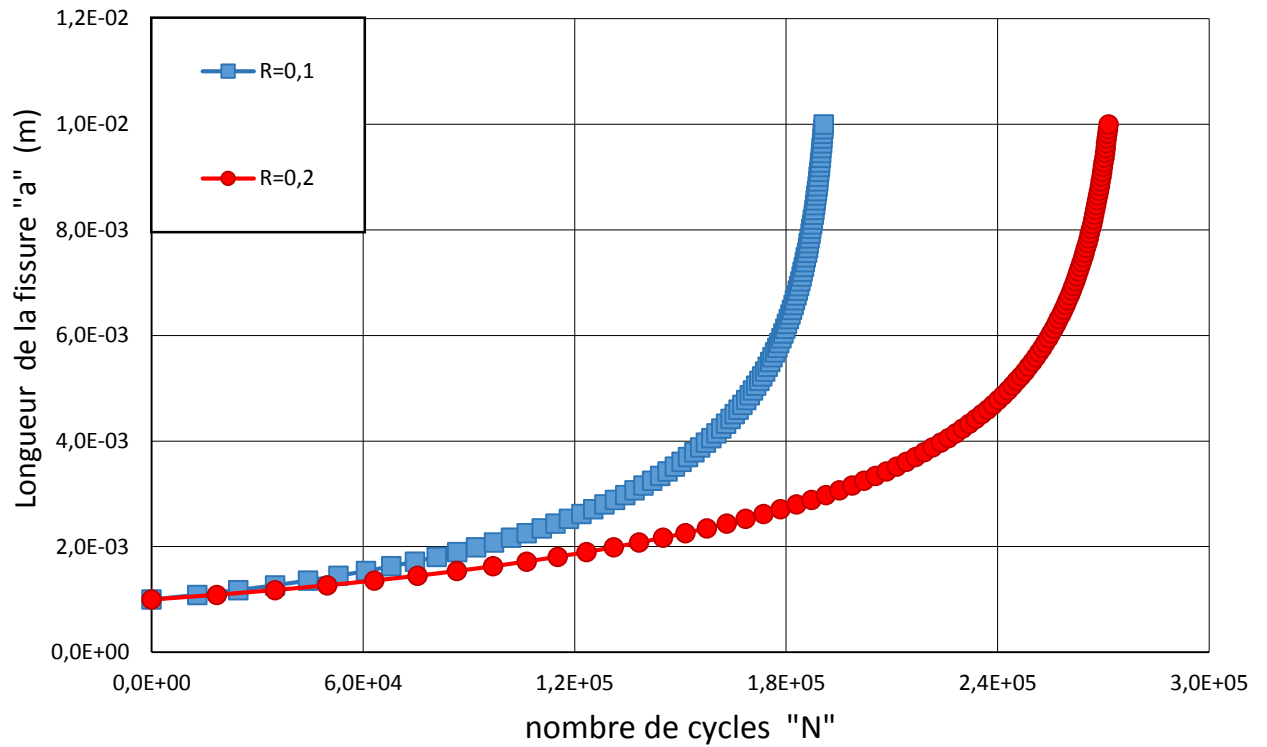


Figure 80: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=30^\circ$ et $a/c=0,2$

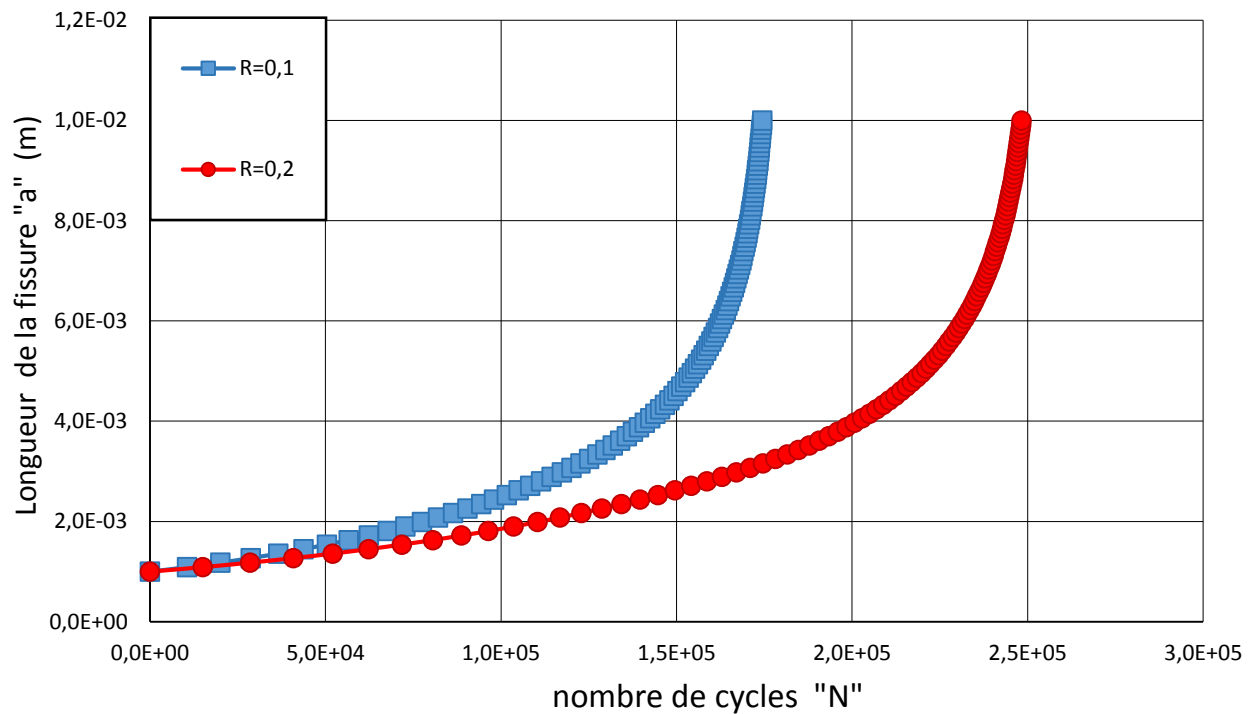


Figure 81: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=45^\circ$ et $a/c=0,2$

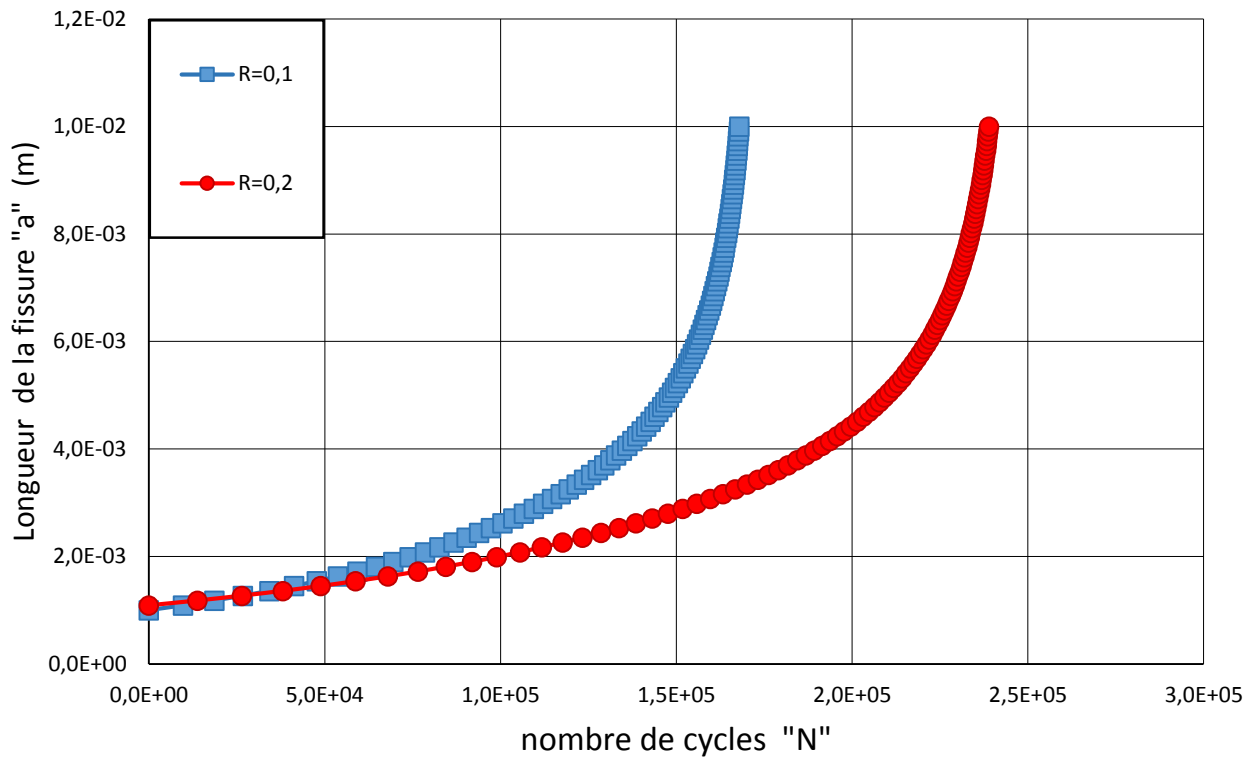


Figure 82: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A542 pour $\theta=60^0$ et $a/c=0,2$

IV.2.3 étude Comportement en fatigue de l'acier A517

a : Effet du rapport a/c

Les figures 83 à 85 illustrent la progression de la taille du défaut « a » en fonction du nombre des cycles N pour un rapport de charge $R=0.2$, sous l'effet du rapport a/c et l'angle du codon de soudure θ .

Pour un angle du cordon de 30^0 (figure 83), la progression de la durée de vie en fatigue suit la progression du rapport a/c ,d'ailleurs pour un rapport $a/c=0.1$,la durée de vie est de 8.50×10^4 cycles ,cette dernière augmente avec des pourcentages d'augmentation de 45% pour $a/c=0.2$ et de 40% pour $a/c=0.3$ et de 32% pour $a/c=0.4$ de 29% pour $a/c=0.5$.

Dans le cas où l'angle du cordon est de 45^0 (figure 84),on remarque aussi une augmentation de la durée avec l'augmentation avec l'augmentation du rapport a/c ; d'où pour une rapport $a/c = 0.1$, la durée de vie est 7.4×10^4 cycles et elle augmente avec des pourcentage de 46% , 41% , 32% ,et 29% pour rapport a/c de 0.2 à 0.5 respectivement.

Chapitre III : Résultats et discussion

Même chose pour l'angle $\theta=60^0$ (figure 85), on remarque la même tendance des courbes précédents, donc pour $a/c=0.1$ la durée de vie est à l'ordre de 7.0×10^4 cycles et les taux d'augmentation sont de 46% ,41% ,31% et 29% pour rapport a/c de 0.2 à 0.5 respectivement.

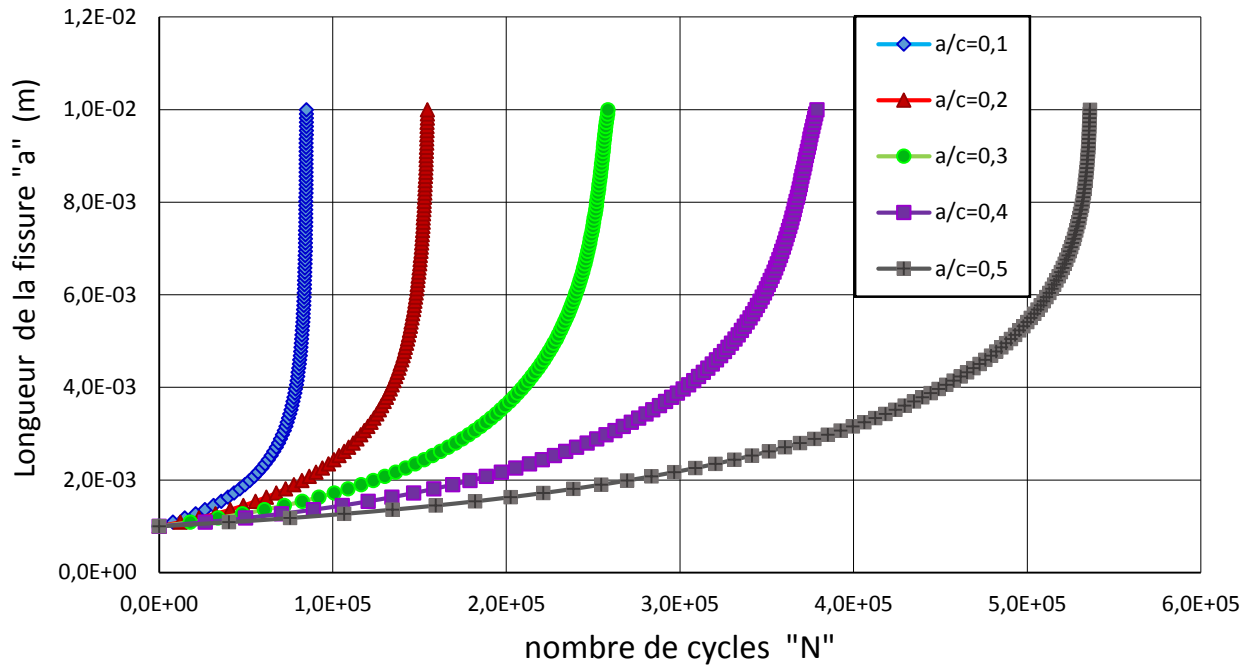


Figure 83: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=30^0$ et $R=0,2$

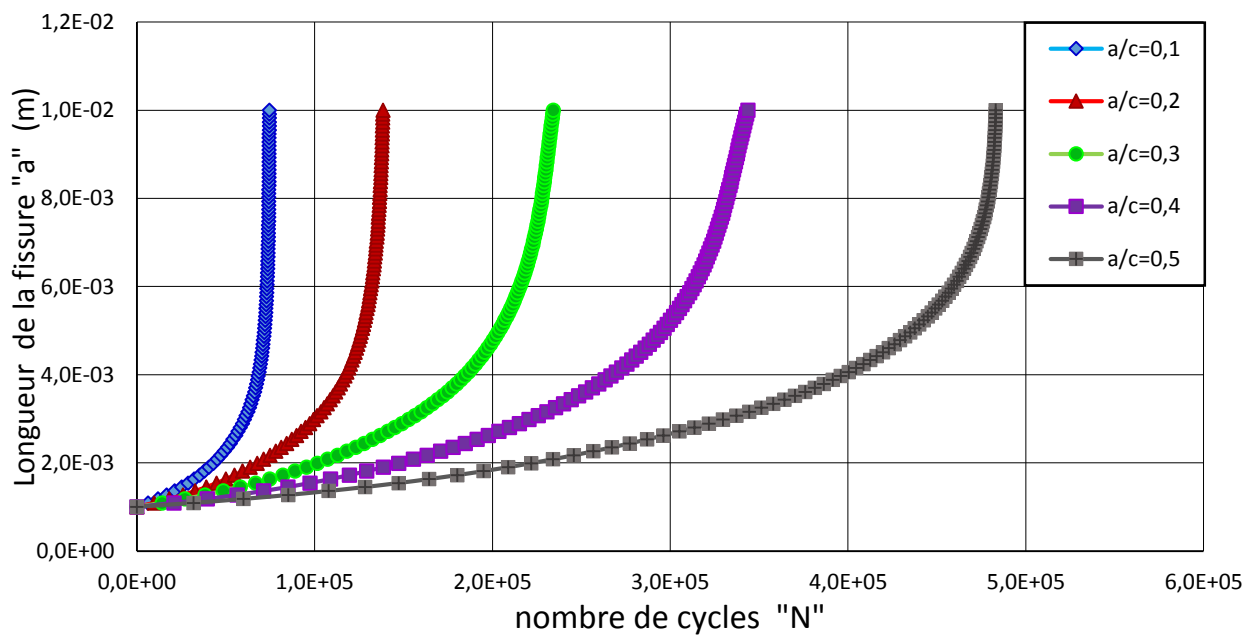


Figure 84: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=45^0$ et $R=0,2$

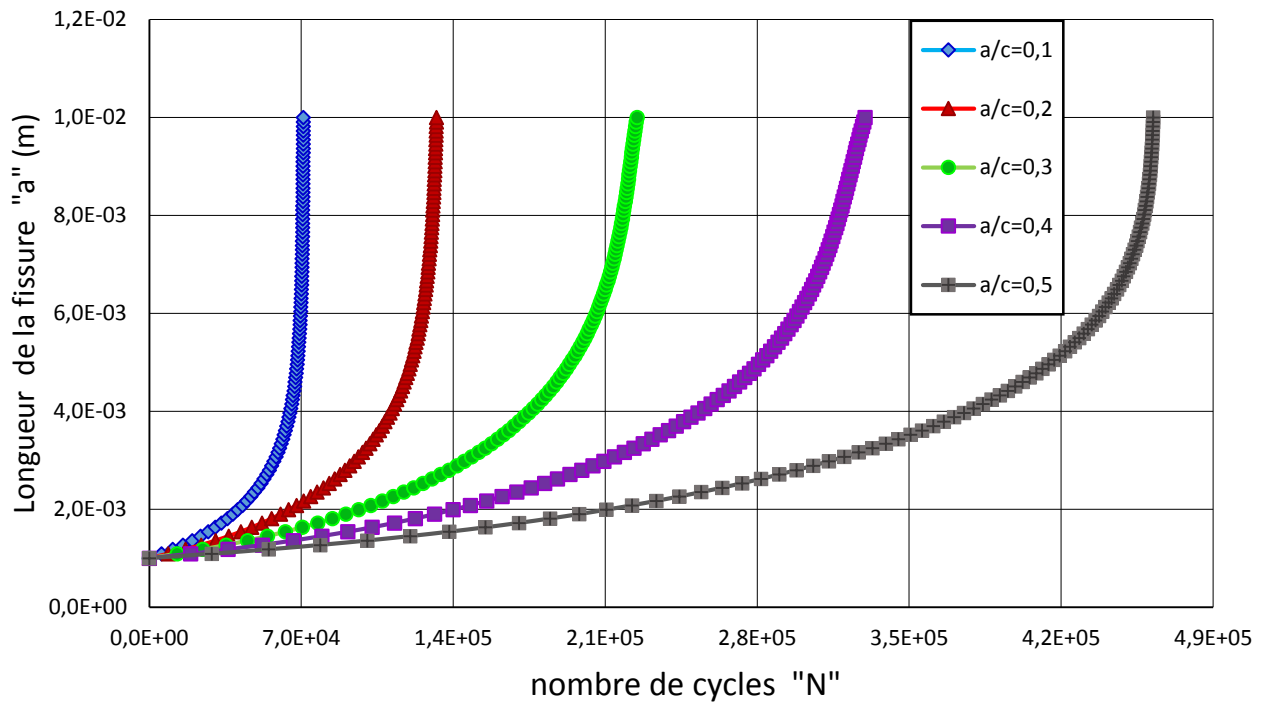


Figure 85: Effet du rapport a/c sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=60^{\circ}$ et $R=0,2$

b : Effet de l'angle θ

Dans les figures 86 à 88 l'effet de l'angle du cordon de la soudure θ est clairement exprimé sur la durabilité d'un joint soudé sous l'application d'un rapport de charge $R=0.2$ et à la variation du rapport a/c de 0.2 à 0.5.

Pour un rapport a/c=0.2 (figure 86), le nombre des cycles jusqu'à la rupture est environ de 1.32×10^5 cycles et 1.38×10^5 cycles pour $\theta=60^{\circ}$ et $\theta=45^{\circ}$ respectivement, et il arrive à 1.55×10^5 cycles pour $\theta=30^{\circ}$.

Dans le cas où a/c=0.3 (figure 87), la durée de vie est de l'ordre de 2.55×10^5 cycles pour $\theta=60^{\circ}$, elle augmente avec des pourcentages de 3.8% et 9.6 pour $\theta=45^{\circ}$ et $\theta=30^{\circ}$.

Finalement, pour a/c=0.5 (figure 88), les nombres des cycles sont encore en augmentation avec chaque diminution de l'angle θ , donc pour $\theta=60^{\circ}$ le nombre des cycles est 4.6×10^5 cycles, ce dernier augmente avec des taux de 4.4% et 10% pour $\theta=45^{\circ}$ et $\theta=30^{\circ}$ à la fois.

Chapitre III : Résultats et discussion

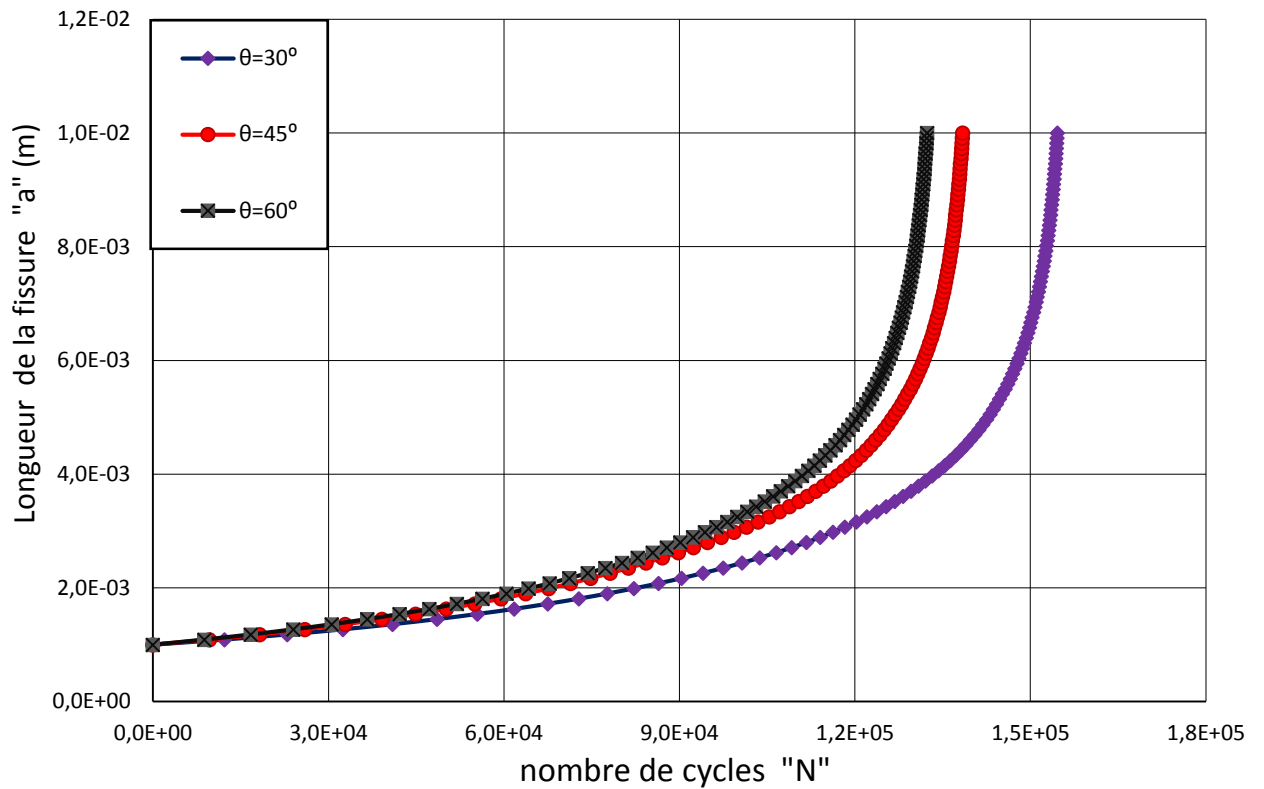


Figure 86 : Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,2$ et $R=0,2$

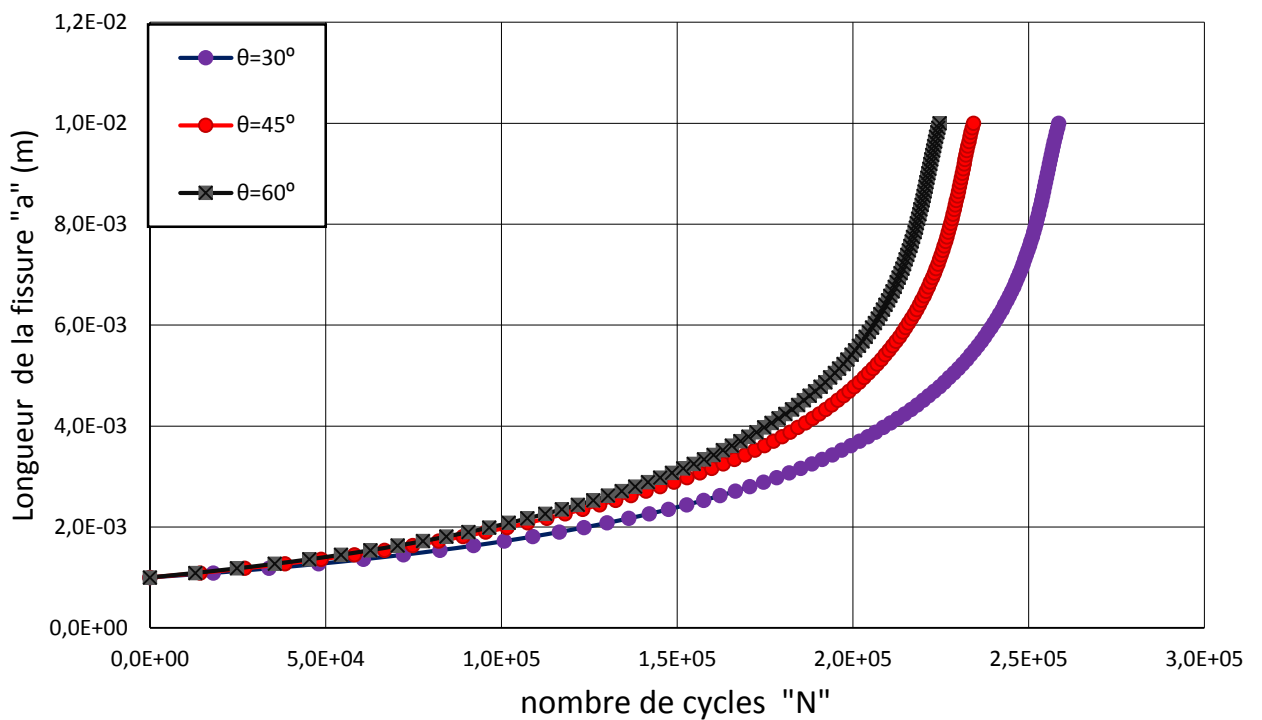


Figure 87: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,3$ et $R=0,2$

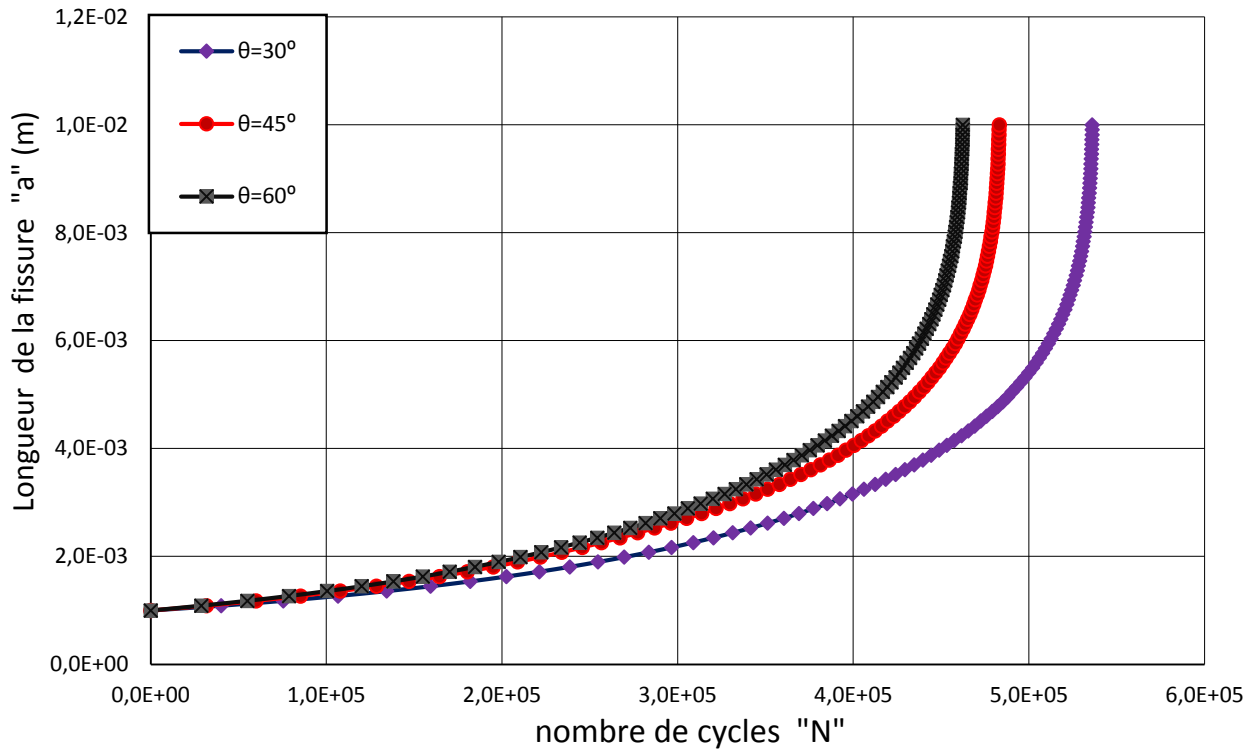


Figure 88: Effet de l'angle θ sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $a/c=0,5$ et $R=0,2$

C : effet du rapport de charge R

L'effet de rapport de charge R sur le joint soudé est montré dans les figure 89 à 91 sous l'application du rapport a/c constat à 0.2 et la variation de l'angle du cordon de la soudure θ qui prend les valeurs $30^0, 45^0, 60^0$.

Pour un angle $\theta=30^0$ (figure 89), la durée de vie du joint soudé est environ de 1.04×10^5 cycles pour un rapport de charge $R=0.1$, et on constate une évolution de 1.5 fois pour $R=0.2$ et aussi de 2.6 fois pour $R=0.4$.

De même manier, pour les angles $\theta=45^0$ et $\theta=60^0$ les durées de vie du joint soudé sont de 9.29×10^4 cycles (figure 90) et de 8.8×10^4 cycles (figure 91) pour $R=0.1$ et elles évoluent avec des taux de 1.45 fois et de 2.65 fois pour les rapports de charge $R=0.2$ et $R=0.4$ respectivement.

Donc cette analyse nous permette de dire que

- La croissance du rapport de charge conduit à la croissance de la durée de vie du joint soudé.

Chapitre III : Résultats et discussion

- La croissance de l'angle du cordon de soudure θ conduit à la décroissance de la durée de vie du joint soudé dans le cas où les rapports de charge sont les mêmes

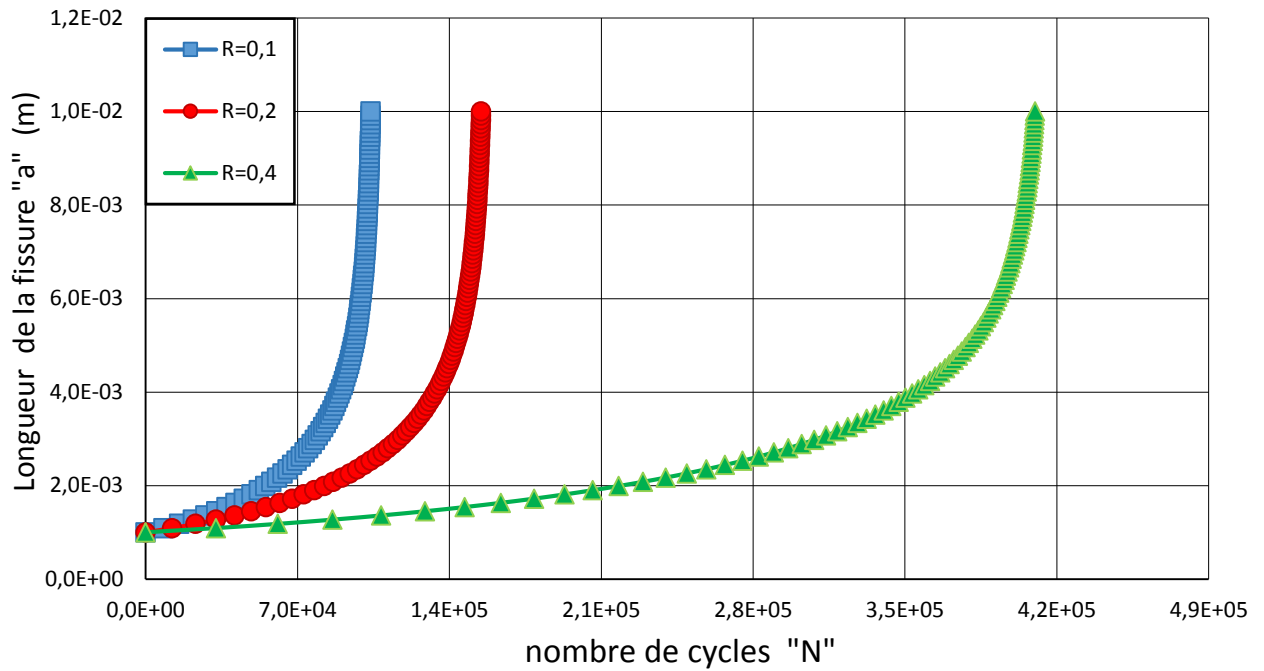


Figure 89: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=30^\circ$ et $a/c=0,2$

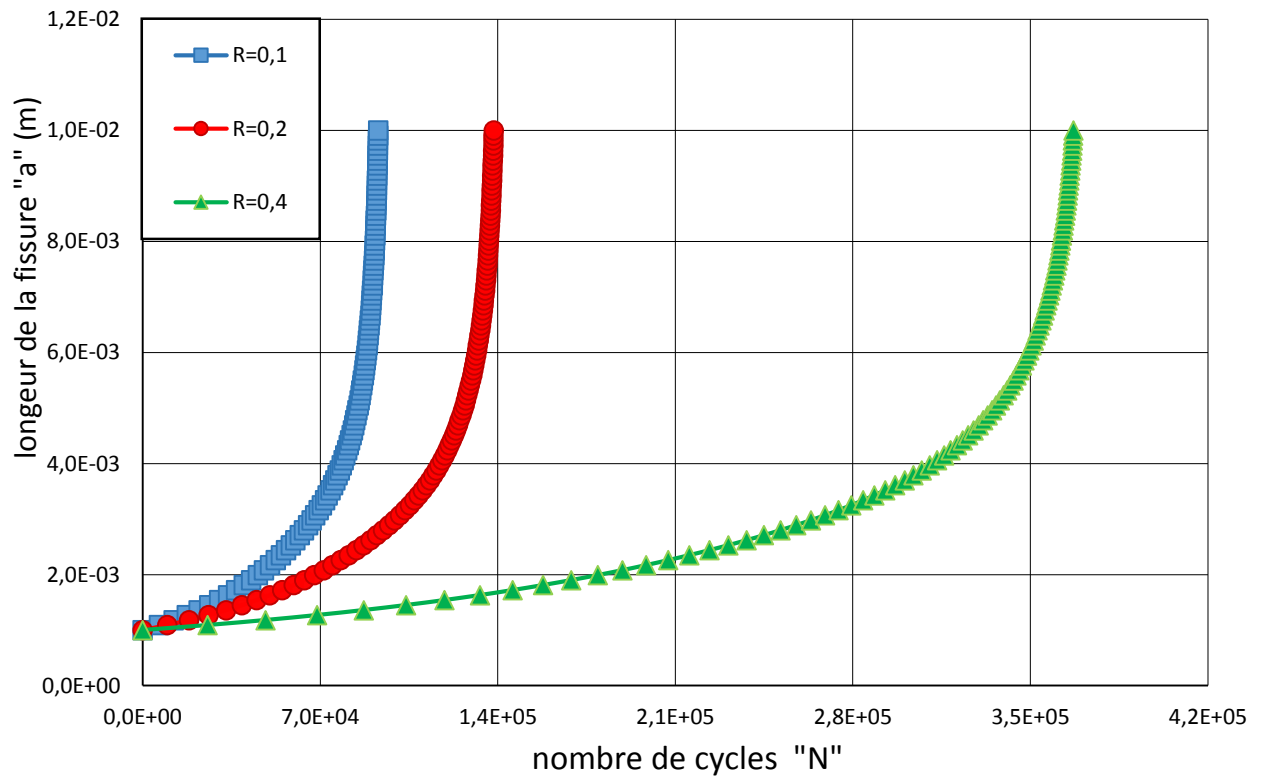


Figure 90: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=45^\circ$ et $a/c=0,2$

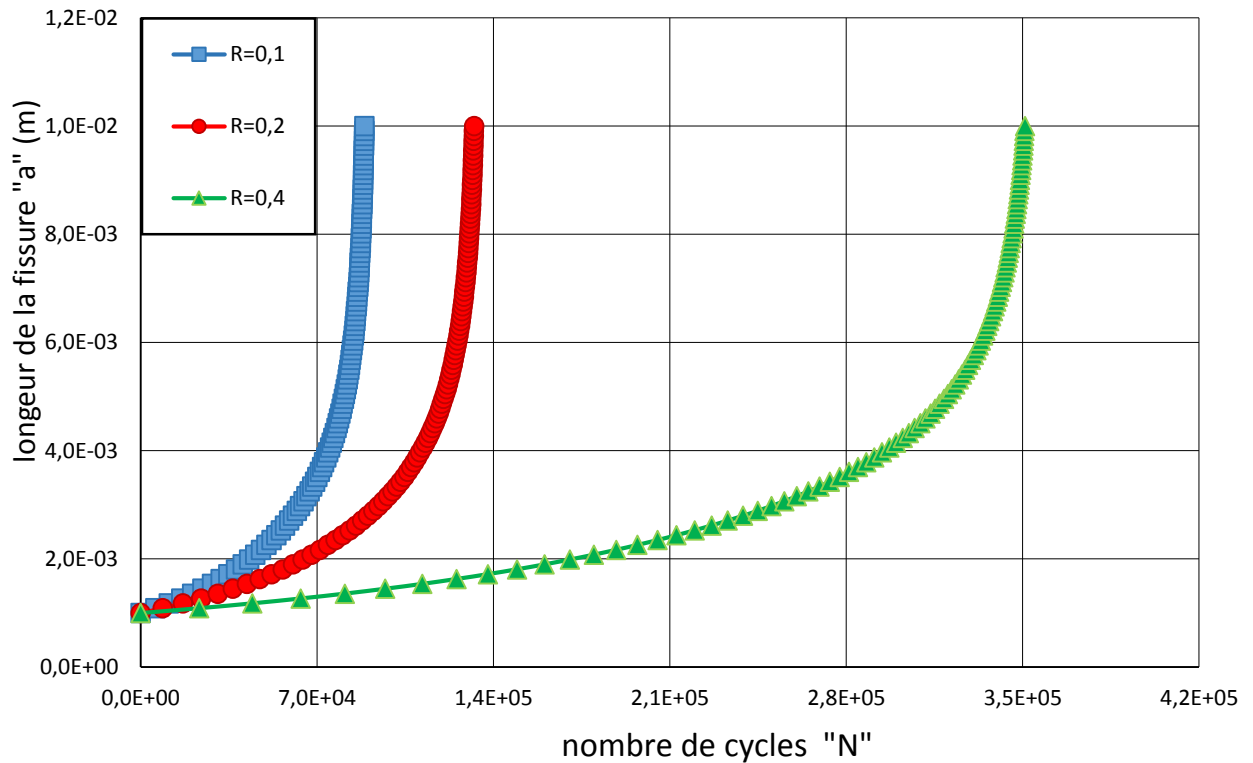


Figure 91: Effet de rapport de charge sur la durée de vie d'une soudure à double filet en acier A517 pour $\theta=60^{\circ}$ et $a/c=0,2$

D : Etude comparative

Les figures 92,93 et 94 reflètent la comparaison de l'évolution de la fissure par fatigue entre les aciers utilisés, afin de prédire la durée de vie de chaque un sous l'effet du rapport a/c (fixe à 0.2) et l'angle θ du cordon de soudure qui varie de 30° ; 45° et 60° .

On remarque que l'augmentation de l'angle θ influe sur le comportement des aciers en fatigue par la diminution de leur durée de vie.

Pour les angles $\theta=30^{\circ}$ et 45° (figure 92 et 93), l'acier A316 nécessite un très grand nombre des cycles (de l'ordre 10^6) pour que la fissure atteigne la taille finale. Par contre, les aciers A542 et A517 contenant la même fissure arrivent à la même taille finale après un nombre de cycles et environ $2,7 \times 10^5$ cycles et $2,4 \times 10^5$ cycles pour A542, et proche de $1,5 \times 10^5$ cycles et $1,4 \times 10^5$ cycles pour A517. D'autre part ces valeurs de nombre des cycles sont diminuées pour l'angle $\theta=60^{\circ}$ (figure 94) jusqu'à $5,58 \times 10^5$ cycles pour A316 et $2,39 \times 10^5$ cycles pour A542 et $1,32 \times 10^5$ cycles pour A517.

On peut dire que l'acier A316 est plus résistant à l'évolution de la fissure par rapport les autres aciers (A542 et A517) dans ces conditions.

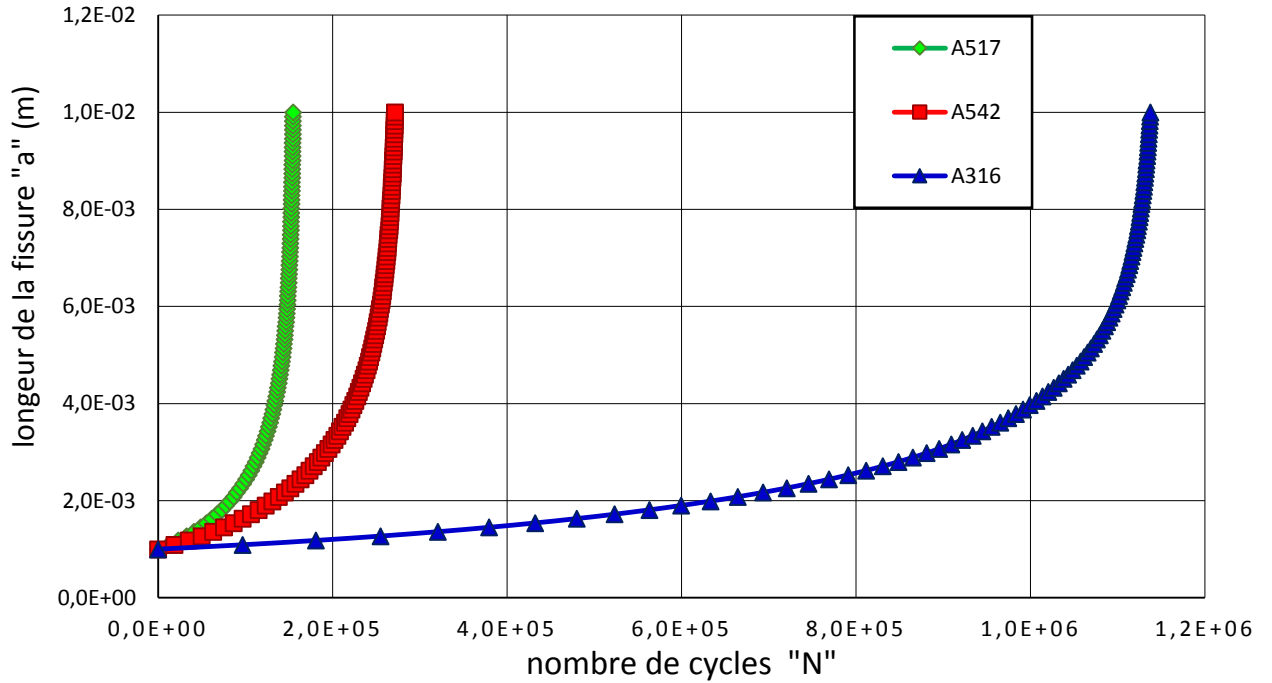


Figure 92: Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=30^{\circ}$

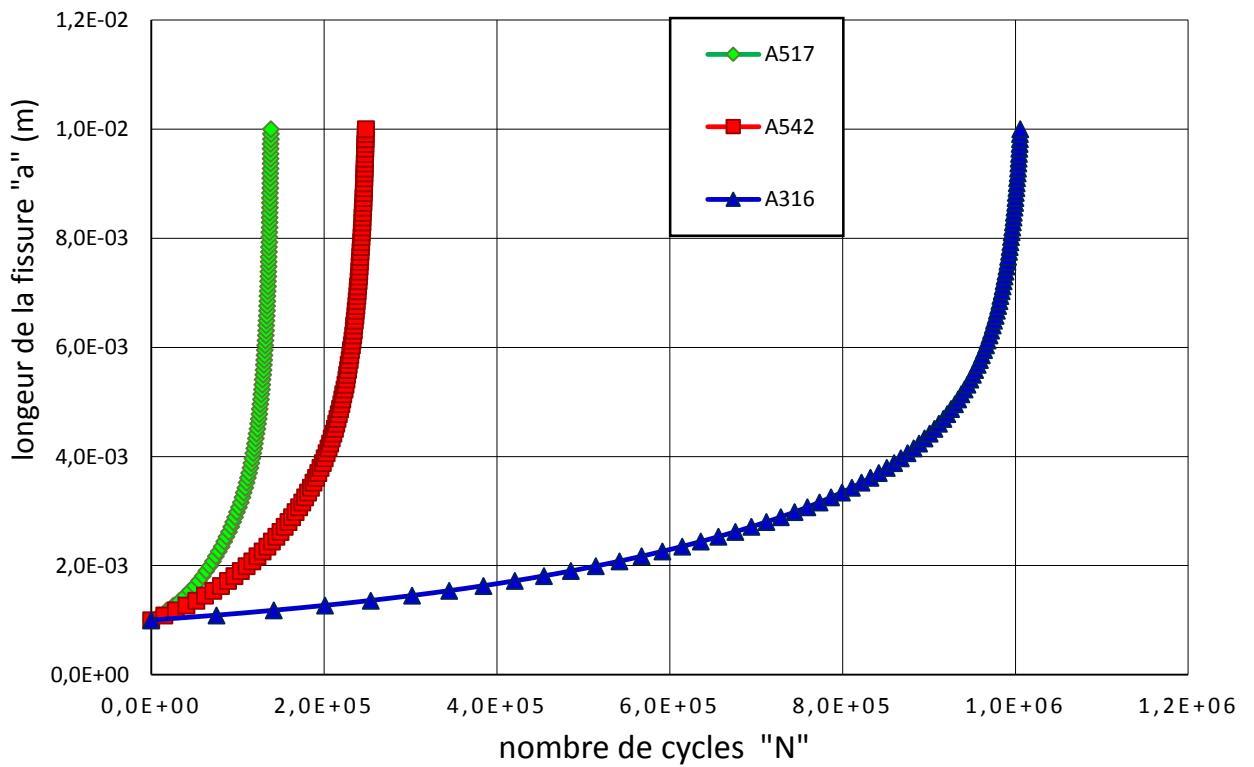


Figure 93: Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=45^{\circ}$

Chapitre III : Résultats et discussion

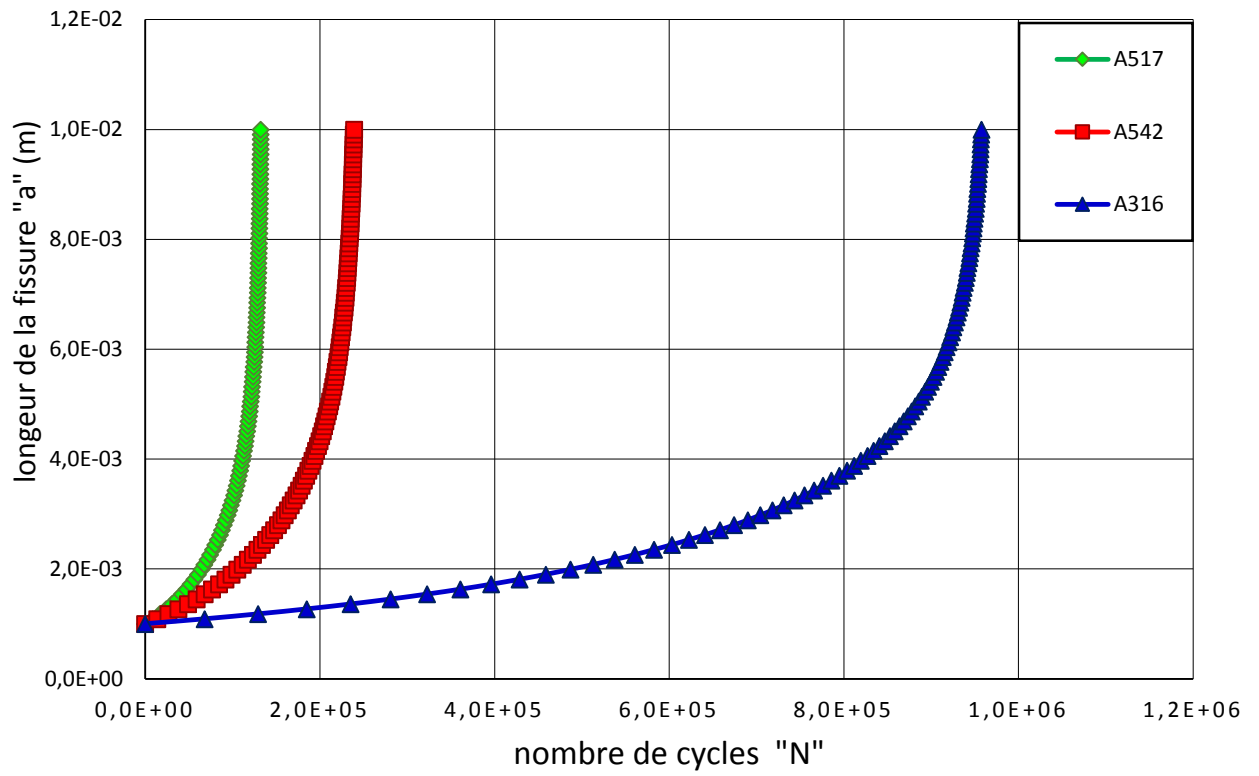


Figure 94: Evolution de la fissure par fatigue pour $a/c=0,2$ et $\theta=60^{\circ}$

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons mené, nous a permis d'étudier l'effet des défauts de soudage sur la propagation des fissures de fatigue dans les aciers inoxydables et les aciers de construction.

Une synthèse sur les défauts peuvent être générés lors d'une opération de soudage ont été présentés.

Afin d'investiguer les effets des défauts sur le comportement en fatigue, une étude empirique incorporée dans un code de fatigue est utilisée pour étudier les effets des défauts de soudage sur la fissuration par fatigue.

Deux types d'éprouvettes d'assemblage ont été utilisés à savoir le joint bout-à-bout et le joint à double filet.

Les résultats montrent que :

- L'augmentation de la taille du défaut conduit à la diminution de la durée de vie en fatigue.
- La durée de vie en fatigue dépend du rapport de charge i.e. amplitude de la contrainte.
- Pour un assemblage d'angles à double filet, le comportement en fatigue dépend de l'angle du cordon de soudure et de la taille du défaut elliptique (rapport a/c).

En perspective, une étude expérimentale sur les joints soudés s'avère nécessaire afin de quantifier le taux de propagation et d'identifier les mécanismes de rupture en présence des défauts.

Liste des références

- [1] Mostefa BENEDDEB . “ Étude les défauts de soudage des pipelines” mémoire de MASTER , Université Mohamed Khider Biskra . pp2.
- [2],[3] Jean MATON .Technologie de soudage .<http://www.rocdacier.com>, consulté le 04/03/2017.
- [4],[5] Abdulkader ZALT. “Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type Caisson” Thèse du DOCTORAT-Université de Lorraine. pp 34.35.
- [6] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp31
- [7],[8] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp23 .
- [9] Principaux procédés du soudage , description, démarche d’évaluation et prévention des risques .<https://www.slideshare.net/> consulté le 04/03/2017
- [10] <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/131-soudage-oxyacetylenique.html> .consulté le 04/03/2017.
- [11] <http://www.rocdacier.com/ressource.n.508/soudage-oxyacetylenique-chalumeau-oa-11.html>. consulté le 06/03/2017.
- [12] <https://jessaye.wordpress.com/2016/03/03/poste-a-souder-oxy-acetylenique-le-roxyflam-500l-de-rothenberger/>. consulté le 04/03/2017.
- [13] Said BENSAAIDA “Fonderie et soudage, les principes de bases de fonderie et du soudage” Editions Universitaires Européennes pp71 .
- [14] <http://www.rocdacier.com/ressource.n.207/cours-sur-le-soudage-chalumeau-soudage-oa-soudage-oxyacetylenique.html> . consulté le 04/03/2017.
- [15],[16] Roland CAZES. “Soudage à l’arc” techniques d’ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7730.
- [17] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp31.
- [18] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp36.
- [19] <https://www.orexad.com/soudage-tig>. consulté le 22/03/2017.
- [20] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp34.

- [21] <http://www.rocdacier.com/ressource.n.541/le-soudage-mig-mag-semi-automatique-gmaw.html> . consulté le 22/03/2017.
- [22-23] <http://ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/137-le-soudage-plasma.pdf?type=raw>. consulté le 22/03/2017.
- [24] Le soudage par PLASMA. Cours technologie Par: Rocardier Publiée le : 27/11/2015. <http://www.rocdacier.com/pdf.n.553/cours-pdf.pdf> .consulté le 22/03/2017.
- [25],[26] Soudage vertical sous laitier. <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/141-le-soudage-vertical-sous-laitier.html> . consulté le 25/03/2017.
- [27] Soudage par faisceau d'électron, <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/139-le-soudage-par-faisceau-delectron.html>. consulté le 25/03/2017
- [28] Roland CAZES. “ Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d'électrons et laser” techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7740.
- [29] <http://www.a2l-laser.com/index.php?page=soudure> . consulté le 25/03/2017
- [30-31] Roland CAZES .“Soudage par résistance” , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp3
- [32] Roland CAZES .“Soudage par résistance” , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp8
- [33] Roland CAZES .“Soudage par résistance” , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp12
- [34] Roland CAZES .“Soudage par résistance” , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp16
- [35] Dmitri Kopeliovich .” Resistance Welding (RW)”
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw.
consulté le 26/03/2017
- [36] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS . pp45
- [37] Roland CAZES . “Soudage par friction”, techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7745.
- [38] https://www.researchgate.net/figure/265125708_fig1_Figure-1-Illustration-du-principe-de-soudage-par-friction-malaxage-Ce-type-de-soudage. consulté le 27/03/2017
- [39] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp47

- [40] Amal BAHIJ - Hamza BENBOUBADDI, ‘‘ SOUDAGE PAR EXPLOSION’’,
<http://documents.tips/documents/soudage-par-explosion.html>.consulté le
 28/03/2017
- [41] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4063, ‘‘ Welding and allied processes -
 Nomenclature of processes and reference numbers ’’. Third edition 1998-09-01.
- [42],[43],[44] Comité sectoriel de la main-d’œuvre de la fabrication métallique
 industrielle, ‘‘Soudage et assemblage-soudage Guide d’auto-apprentissage’’
 ,Edition CSMOFMI, Québec. pp162,163
- [45] Redouane CHERAITIA, ‘‘ Etat de l’art sur les défauts dans les joints de soudure
 et leurs effets sur la fissuration par fatigue’’, mémoire de MASTER, Université
 Abou Bekr Belkaid – Tlemcen . pp36
- [46],[47] Christian Bonnet, ‘‘ Le Soudage Métallurgie et Produits’’, Air Liquide 2001.
 pp25
- [48],[49],[50] Comité sectoriel de la main-d’œuvre de la fabrication métallique
 industrielle, ‘‘Soudage et assemblage-soudage Guide d’auto-apprentissage’’
 ,Edition CSMOFMI, Québec. pp160, pp 164,pp167
- [51] Redouane CHERAITIA, ‘‘ Etat de l’art sur les défauts dans les joints de soudure
 et leurs effets sur la fissuration par fatigue’’, mémoire de MASTER, Université
 Abou Bekr Belkaid – Tlemcen . pp38
- [52] Soufyane BELHENINI, ‘‘ Analyse numérique des contraintes résiduelles dans
 les structures assemblées par soudage – cas des pipelines en acier à haut grade
 ’’thèse de MAGISTER , Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbés . pp 19.
- [53] Redouane CHERAITIA, ‘‘ Etat de l’art sur les défauts dans les joints de soudure
 et leurs effets sur la fissuration par fatigue’’, mémoire de MASTER, Université
 Abou Bekr Belkaid – Tlemcen . pp38
- [54] Naman RECHO, ‘‘mécanique de la rupture par fissuration, aspect théorique,
 conceptuel et numérique ’’.Edition LAVOISIER ,PARIS .pp23
- [55] Nadjia BENACHOUR, ‘‘ Influence des effets de la géométrie des entailles sur
 l’amorçage et la fermeture des fissures’’ thèse du Doctorat, Université Abou Bekr
 Belkaid – Tlemcen . pp3.
- [56] Guy Murry, ‘‘Aide-mémoire Métallurgie ,Métaux , Alliages , Propriétés’’,
 Dunod, Paris, 2^e édition. pp44.
- [57] J. BESSON, ‘‘ ENDOMMAGEMENT ET RUPTURE’’ .
http://mms2.ensmp.fr/mat_paris/duree/polycop/Ch_23_Endommagement.pdf,
 consulté le 13/04/2017.

- [58] Généralités sur la Mécanique de la rupture,
<https://fr.scribd.com/document/36683183/3-Chapitre-II-Generalites-sur-la-mecanique-de-la-rupture> . consulté le 13/04/2017.
- [59],[60] D.MIANNAY, ‘ ‘ Mécanique de la rupture’ ’ les éditions de physique. pp 10.
- [61,62] Didier DUPRAT, ‘ ‘ Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger’ ’ , techniques d’ingénieur, Fonctions et composants mécaniques, Article BM5052.
- [63] dégradation des matériaux : fatigue et fluage des matériaux .
https://cours.etsmtl.ca/mec200/documents/Notes_de_cours/2013/MEC200_Nicolas/MEC200_Cours_08_H2013_pourpdf.pdf. consulté le 13/04/2017.
- [64] Rappels sur la fatigue , http://h.karaouni.free.fr/these/pdf/thesehk_chap1.pdf .
consulté le 18/04/2017.
- [65] William D. Callister, Jr, ‘ ‘Fundamentals of Materials Science and Engineering’ ’ ,
5th Edition, Edition John Wiley & Sons, Inc. pp256.
- [66] David Lebaillif, ‘ ‘Fissuration en fatigue des structures mécano-soudées soumises à un environnement mécanique complexe’ ’ , thèse du Doctorat- Université BLAISE PASCAL – Clermont II. pp35.
- [52],[53] Henry PROUDHON, ‘ ‘ Identification des mécanismes de fissuration dans un alliage d’aluminium sollicité en fretting et en fatigue’ ’ , thèse du Doctorat Institut national des sciences appliquées de Lyon. pp 8,9
- [69-70] Nadjia BENACHOUR, ‘ ‘ Influence des effets de la géométrie des entailles sur l’amorçage et la fermeture des fissures’ ’ thèse du Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen . pp9.
- [71] S.J.MADDOX , ‘ ‘ Fatigue strength of welded structures’ ’ , abington publishing , 2nd edition. pp18.
- [72.73] Abdelkader BELMOKHTAR, ‘ ‘ Contribution au développement d’un modèle de propagation pour la prédiction de la durée de vie en fatigue’ ’ , thèse de MAGISTER, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. pp28.
- [74] D. François, A. Pineau, A. Zaoui, ‘ ‘Comportement mécanique des matériaux : viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique de contact’ ’. Editions. Hermes, Paris.
- [75] 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
- [76] <http://www.goodfellow.com/F/Acier-inoxydable-AISI-316.html>, consulté le 02/02/2017.

- [77] http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=ASTM_A542&show_prop=all&PageTitle=ASTM%20A542, consulté le 02/02/2017.
- [78] http://www.efunda.com/glossary/materials/alloys/materials--alloys--steel--alloy_steel--astm_a517_grade_f.cfm, consulté le 02/02/2017.