

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux

Par :

MEDJAHED Mohamed Salah

Sujet

Comportement des différentes zones d'un joint de soudure vis-à-vis à la résistance à la fatigue

Soutenu le 31 Aout 2020 devant le jury composé de :

Président :	KARA-ALI Djamel	MC	Université de Tlemcen
Encadreur :	ACHOUI Mohamed	MA « A »	Université de Tlemcen
Examineur :	SEBAA Féthi	MC	Université de Tlemcen

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

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

Le présent mémoire a été dirigé par Monsieur **Mr. ACHOUI Mohammed**, Maître Assistant « A » à l' université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. C' est grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j' ai pu le finaliser. J' exprime mes gratitude, mes reconnaissances et mes sincères remerciements.

Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury le Président **Mr. KARA-ALI Djamel** qui nous a fait l' honneur de présider le jury de notre soutenance ainsi qu' au **Mr. SEBAA Fehiti** d' avoir accepté d' examiner notre travail, Je tiens à remercier tous mes professeurs pour leurs connaissances qu' ils ont données tous les cinq ans sans ennui.

En fin, un très grand merci pour **Mr. ZIANI Belkheir** de m' avoir donné du courage et de ces expériences précédentes et de son aide pour continuer mon travail.

Merci à vous tous

Résumé

Généralement dans plusieurs structure et assemblages soudé les ruptures et les fissuration occur dans les joint de soudure donc pour cela nous avons mené notre recherche qui est consacré à l'étude des joints de soudure et des structures sollicitées en fatigue précisément sur le comportement des différents zone d'un joint de soudure vis-à-vis à la résistance à la fatigue. Cette thèse a pour but de révéler quelques principaux aspects du problème de la fatigue, et pour cela nous avons cite les trois facteurs fondamentaux pour cette expérience.

Tous d'abord nous allons voir des notions générales sur le soudage, ces différents types et sa contribution dans les fissure. Puis on citera le domaine de la fatigue et tous qui peut influencer sur la résistance à la fatigue. En avant-dernier lieu viendra l'étude sur la métallurgie du soudage très exactement sur les différentes zones d'un joint soudé et les ruptures en général et enfin on présentera quelques travaux réalisés sur la durée de vie en fatigue des assemblages soudés.

Absatract

Generally, in several welded structures and assemblies, failure and cracking occurs in the weld joints so for this, we have conducted our research, which is devoted to the study of weld joints and stress structures in fatigue precisely on the behavior of the different areas of a welded joint fatigue resistance. The purpose of this research is to reveal some key aspects of the fatigue problem, and for this, we have cited in our research the three fundamental factors for this research.

First, we will take a look at the general concept of the welding, its different types and its contribution in cracks. Then we will mention the field of the fatigue and all what can influence on the resistance to the fatigue. Next to last will come the study of the metallurgy of the welding very exactly on the different zones of a welded joint and the ruptures in general and finally we will present some work carried out on the fatigue life of the welded assemblies.

الملخص

بشكل عام، يحدث في العديد من الهياكل والتجمعات اللحامية فشل وتصدع في المفاصل الملحمة لذلك أجرينا أبحاثنا المخصصة في دراسة المفاصل الملحمة والهياكل الإجهاد في التعب بدقة على سلوك مختلف المناطق في المقاومة المشتركة المعسرة اللحام، فقد إستشهدنا في بحثنا على العوامل الثلاثة الأساسية، والهدف من هذه البحث هو الكشف عن بعض الجوانب الرئيسية لمشكلة التعب .

ولتعامل مع موضوعنا ، قمنا بتقسيم العمل إلى أربعة فصول ، الأول مخصص لدراسة المفاهيم العامة عن التلحيم وأنواعه المختلفة ومساهمته في التشققات. و في الفصل الثاني سوف نذكر مجال التعب و كل ما يمكن أن يؤثر على مقاومة التعب. و في الفصل الثالث سوف تأتي الدراسة عن المعادن في اللحام تماما في المناطق المختلفة من الوصلة الملحومة والتمزقات بشكل عام، وأخيرا سوف نقدم بعض الأعمال الذي تم تنفيذها على طول فترة حياة المجموعات الملحومة خلال التعب.

Listes des figures

Figure 1 : Cycle thermique du soudage.....	2
Figure 2 : Soudage à l'arc.....	3
Figure 3 : Soudage MIG/MAG.....	4
Figure 4 : Soudage TIG.....	4
Figure 5 : Soudure par résistance.....	5
Figure 6 : Types d'assemblages soudés.....	6
Figure 7 : Soufflures.....	7
Figure 8 : Inclusions.....	7
Figure 9 : Retassures.....	8
Figure 10 : Prosités.....	9
Figure 11 : Les 3 phases de la rupture par fatigue.....	12
Figure 12 : Soufflures et inclusions dans les soudures.....	14
Figure 13 : Répartition des contraintes résiduelles dans les joints soudés.....	15
Figure 14 : Définition des contraintes (maximale, globale et minimale).....	16
Figure 15 : Cycle de contrainte en fatigue.....	17
Figure 16 : Les différents paramètres caractérisant une boucle d'hystérésis.....	18
Figure 17 : Allure de la courbe de Wöhler.....	19
Figure 18 : Contrainte alternées symétrique.....	20
Figure 19 : Contrainte alternées dissymétrique.....	20
Figure 20 : Contrainte répétées.....	21
Figure 21 : Contrainte ondulées.....	21
Figure 22 : Présentation macrographique d'un joint soudé.....	22
Figure 23 : La zone affectée thermiquement.....	24
Figure 24 : Les différentes parties constitutives d'un joint soudé.....	25
Figure 25 : Diagramme TRC et courbe de dureté.....	26
Figure 26 : Faciès de la rupture [13].....	28
Figure 27 : Courbe $da/dN = f(\Delta K)$	29
Figure 28 : Exemple de la rupture ductile/fragile [15].....	30
Figure 29 : Les trois modes de fissuration.....	31
Figure 30 : Dimension de l'éprouvette utilisé dans l'essai statique [15].....	34
Figure 32 : Dimension de l'éprouvette soudée[15].....	35

Figure 33 : loi de comportement du métal de base et du joint soudé [15].....	36
Figure 34 : Schéma du caisson soudé [15].....	37
Figure 35 : Application de la charge de fatigue sur les caissons testés. [15]...	38
Figure 36 : Essai de fatigue (flexion 3 points) d'un caisson soudé [15].....	38
Figure 37 : Rupture des caissons testé [15].....	39
Figure 38 : courbe de Wöhler des caissons soudés en fatigue [15].....	39
Figure 39 : Etude numérique simple de caisson soudé [15].....	40
Figure 40 : Rupture loin du moment de flexion maximal [15].....	40
Figure 41 : influence d'un défaut superficiel dans la soudure [15].....	41
Figure 42 : Défaut à la racine de la soudure [15].....	41
Figure 45 : courbes expérimental des éprouvettes S355M [15].....	43
Figure 46 : Eprouvette avec l'extensomètre. [15].....	44
Figure 47 : Schéma d'éprouvette d'essai de fatigue oligocyclique. [15].....	44
Figure 48 : loi de comportement du matériau soudé [15].....	45
Figure 49 : Éprouvette CT50 utilisé pour les essais de fissuration. [25].....	47
Figure 50 : Schéma des différentes zones étudiées [25].....	47
Figure 51 : Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles [25]	49
Figure 52 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de ΔK [25].....	49
Figure 53 : Évolution de l'énergie hystérétique en fonction de ΔK [25].....	50
Figure 54 : les dimensions des éprouvettes dans la simulation [27]....	51
Figure 55 : lois de comportement de C48 [27].....	52
Figure 56 : Simulation de l'éprouvette [27].....	52
Figure 57 : Simulation des éprouvettes sollicité jusqu'à la rupture [27]	53
Figure 58 : Courbes de simulation des contraintes-nombres cycles (SN) [27]...	54
Figure 59 : Les résultats de simulations et les résultats expérimentaux [27]....	54
Figure 60 : Résultats de simulation numérique et expérimental [27].....	55
Figure 61 : Résultats de simulation numérique expérimental [27].....	55
Figure 62 : Figure des résultats dans intervalle de 100à 200000 cycle [27].....	56

Listes des tableaux

Tableau 1 : Types d'inclusions.....	8
Tableau 2 : Causes et moyens de prévention liés à la fissuration	9
Tableau 3 : Caractéristique mécanique de l'acier S355M [15].....	33
Tableau 4 : Composition chimique de l'acier S55M [15].....	33
Tableau 5 : caractéristique mécanique du S355M [15].....	35
Tableau 6 : Caractéristique mécanique de la soudure [15].....	35
Tableau 7 : Micro-dureté du joint soudé, mesuré en (Hv).....	36
Tableau 8 : caractéristique cyclique et statique du matériau soudé	45
Tableau 9 : Compositions chimiques de l'acier A48AP et du métal déposé.....	46
Tableau 10 : Propriétés mécaniques des trois zones.....	46
Tableau 11: Equations caractérisant la Loi de Paris	48
Tableau 12 : Caractéristiques Mécaniques Du Matériau C48.....	51

SOMMAIRE

Historique

Introduction général

Chapitre I

1.	Introduction.....	1
2.	Définition.....	1
3.	L'appareil de soudage.....	1
4.	Différence entre soudage et brasure.....	2
5.	Cycle thermique du soudage.....	2
6.	Les différentes techniques de soudage.....	2
6.1.	Le soudage MMA.....	3
6.2.	Le soudage MIG-MAG.....	3
6.3.	Le soudage TIG.....	4
6.4.	Le soudage au chalumeau.....	4
6.5.	Le soudage plasma.....	5
6.6.	Soudage par résistance.....	5
8.	Les différents types d'assemblages soudés.....	5
8.1.	Assemblage bout à bout.....	5
8.2.	Assemblage en coin (angle intérieur et angle extérieur)	5
8.3.	Assemblage à bords relevés	6
8.4.	Assemblage en T.....	6
8.5.	Assemblage à clin ou à recouvrement.....	6
8.6.	Assemblage avec couvre-joints.....	6
9.	défauts de soudure.....	7
9.1.	Soufflures	7
9.2.	Inclusions.....	7
9.3.	Retassures.....	8
9.4.	Porosités.....	9
10.	Fissurations.....	9
10.1.	Fissuration à chaud.....	10
10.2.	Fissuration à froid.....	10
11.	Contrôles des soudures.....	11
11.1.	Généralités.....	11
11.2.	Contrôles avant soudure.....	11
11.3.	Contrôles pendant le soudage.....	11
11.4.	Contrôle après le soudage.....	11

Chapitre II

1.	Introduction	12
2.	Définition	12

3.	Fatigue des assemblages soudés.....	13
4.	Durée de vie des assemblages soudés.....	13
5.	Fatigue du joint soudé en fonction de la forme du joint.....	13
6.	Influence des inclusions.....	14
7.	Influence de l'épaisseur des tôles.....	14
8.	Effet l'environnement sur la tenue en fatigue.....	14
9.	Effet des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue.....	15
10.	Contraintes appliquées.....	15
10.1.	Cycle de contrainte en fatigue.....	16
10.2.	Comportement sous sollicitation cyclique.....	17
11.	Courbe de Wöhler.....	18
12.	Essai de fatigue.....	19
12.1.	Type de sollicitation.....	20
12.1.1.	Contrainte alternées symétrique.....	20
12.1.2.	Contrainte alternées dissymétrique.....	20
12.1.3.	Contrainte répétées.....	21
12.1.4.	Contrainte ondulées.....	21

Chapitre III

1.	Notion de métallurgie de soudage.....	22
2.	Zone affectée thermiquement (ZAT).....	23
2.1.	Définition.....	23
2.2.	Les causes de la zone affectée thermiquement (ZAT).....	23
2.3.	Les différentes zones de la ZAT.....	23
2.4.	Transformations en ZAT lors du chauffage.....	24
2.5.	Transformations en ZAT lors du refroidissement.....	25
2.6.	Nature des risques métallurgiques.....	26
2.7.	Quels sont les effets des zones affectées par la chaleur.....	26
3.	Analyse des Fissures.....	27
3.1.	Amorçage des fissures.....	27
3.2.	Propagation des fissures.....	27
3.3.	Rupture finale.....	27
4.	Fissuration dans les joints soudés.....	28
5.	Mécanique de la rupture.....	29
6.	Types de rupture.....	30
6.1.	Mode de rupture.....	30

Chapitre IV

Introduction.....	32
Etude expérimental sur des expériences précédentes.....	33

I.	Etude 1.....	33
1.	Présentation générale du matériau.....	33
1.1.	Le matériau utilisé	33
2.	Essais de traction statique et de micro-dureté.....	34
2.1.	Essai de traction statique sur éprouvette non soudé.....	34
2.1.1.	Résultat de l'essai de traction statique sur le métal de base.....	34
2.2.	Essai statique sur éprouvette soudé.....	35
2.3.	Essai de micro dureté.....	36
3.	Essai de fatigue.....	36
3.1.	Essais de fatigue en flexion 3 points	37
3.2.	Remarque.....	39
4.	Mode de rupture du caisson soudés	39
5.	Essais de fatigue en traction uni-axial.....	41
5.1.	Résultat.....	43
6.	Essai de fatigue de traction oligocyclique.....	43
6.1.	Résultat.....	44
7.	Conclusion.....	45
II.	Etude 2.....	46
1.	Présentation générale du matériau.....	46
1.1.	Le matériau utilisé	46
1.2.	Propriétés mécaniques.....	46
2.	Essais de fissuration et mesures.....	46
2.1.	Le type d'éprouvette.....	46
2.2.	Lieu du test de fatigue et model de machine utilisé.....	47
2.3.	Paramètre du test de fatigue.....	47
3.	Résultats et discussion.....	47
3.1.	Vitesses de propagation.....	47
4-	Évolution de l'énergie Q en fonction de ΔK	49
	Conclusion.....	50
	Etude 3	51
1.	Présentation générale du matériau.....	51
1.1.	Le matériau utilisé.....	51
2.	Simulation.....	51
2.1.	Entré des données.....	51
2.2.	Résultat de simulation.....	53
3.	Comparaison des résultats expérimentale et les résultats de simulation... 54	
	Conclusion.....	56

Conclusion général

Bibliographie

Historique sur la rupture des matériaux

Dès le milieu du 19^{ème} siècle plusieurs structures réalisées ont connu des accidents importants et l'origine de ces accidents était la rupture inattendue de composants critiques de ces structures. L'un des premiers incidents enregistrés sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait environ à 200 par an. De nombreux accidents interviennent également sur des pipelines, des pétroliers, ou encore sur des avions. En 1950, deux avions se sont brisés à haute altitude à cause d'un problème de rupture par fatigue sur les trous des rivets près des hublots, lesquels étaient de forme carrée.

Les chercheurs étaient alors incapables d'expliquer le phénomène de rupture brusque sous des sollicitations bien inférieures à celles de la limite d'élasticité. Si Griffith est souvent cité comme le premier chercheur à avoir introduit la mécanique de la rupture (en tant que science), ces travaux restent basés sur des études antérieures. On peut notamment citer le travail de Wieghardt, paru en 1907 et récemment traduit en anglais, dans lequel l'existence de la singularité du champ des contraintes en pointe de fissure dans un matériau élastique linéaire fut reconnue. A partir de ces résultats, Griffith s'est intéressé en 1920 au problème de la rupture, dans un milieu élastique fissuré, d'un point de vue énergétique. Il a ainsi mis en évidence une variable appelée plus tard taux de restitution d'énergie caractérisant la rupture "G", et dont la valeur critique est une caractéristique du matériau. Vinrent ensuite les premiers développements théoriques d'analyse des champs de contraintes et de déformations au voisinage d'une fissure en élasticité.

Ces études, menées notamment par Sneddon en 1946, puis Irwin en 1957, ont permis de définir les facteurs d'intensité de contraintes, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit. Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux. De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple ceux de Rice et Bui qui introduisent la notion d'intégrales indépendantes du contour telles que l'intégrale J, dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure. C'est également à cette période que les premiers travaux concernant la mécanique de la rupture dans les matériaux multicouches sont réalisés. Tous les développements théoriques réalisés à cette époque ont permis de déterminer la forme exacte de la singularité, et des champs asymptotiques en pointe de fissure nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux. De plus, ils représentent une solution précise à de nombreux problèmes de géométries simples, et peuvent donc être utilisés comme solutions approchées pour des problèmes plus complexes.

L'apparition de la méthode des éléments finis a permis d'étudier la mécanique de la rupture d'un point de vue numérique, proposant ainsi des solutions plus précises à des problèmes plus complexes apparurent alors une multitude de méthodes permettant de calculer les facteurs d'intensité de contraintes, le taux de restitution d'énergie, ou encore de découpler les différents modes de rupture.

La rupture des matériaux est fortement liée au phénomène de fatigue dû aux sollicitations variables. La rupture peut avoir lieu sous un chargement ne dépassant pas la capacité statique du matériau (limite élastique). L'histoire de la fatigue depuis 1838 à 1996 est décrite en détail par Schutz. L'histoire de la fatigue a commencé par Albert. En 1837, il a publié les premiers

résultats des tests de fatigue sur les câbles. En 1842, Rankine a étudié la résistance à la fatigue des essieux des wagons. La période 1838 à 1858 a été caractérisée par les accidents dans les chemins de fer. La période 1858-1870 a connu la révolution dans les études de fatigue des essieux de locomotive de chemin de fer. Cette révolution de la recherche dans le domaine de la fatigue a été menée par Wöhler. Les travaux de Wöhler ont été commentés par le journal "English technical Journal Engineering". Un autre nom a mentionné c'est Bauschinger, professeur de mécanique à l'école polytechnique de Munich. Bauschinger est connu par ses travaux sur le changement de la limite élastique par des chargements cycliques souvent répétés et qui sont la base pour les hypothèses de Manson et Coffin. Le début du 20ème siècle a connu plus la domination des anglais et des américains dans le domaine de la recherche lié à la fatigue et la rupture par rapport aux allemands. Ce développement en recherche a été axé plus sur l'étude du comportement en fatigue des composantes des structures aéronautiques. Dans les années 60, le nombre des experts dans le domaine de la fatigue et publications dans le domaine n'a cessé d'augmenter. Cette évolution dans les experts et travaux dans le domaine a été attribué au développement rapide de la mécanique de la rupture, c.a.d la propagation des fissures de fatigue. Paris dans ses travaux publiés fût le premier chercheur développant un modèle de propagation connu sous le nom "modèle de Paris". Ce modèle est presque utilisé exclusivement encore aujourd'hui dans les bureaux des études. Actuellement, les études sur le comportement en fatigue ont connu plus de développement dû aux développements des outils informatiques et moyens de caractérisations expérimentaux dans différents domaines (transport, nucléaire, aéronautique, ...etc).

Introduction Générale

Le soudage nécessite une attention particulière pour préserver l'intégrité des structures. Les soudures peuvent constituer un point faible. Elles génèrent des modifications des états de surface (discontinuités géométriques et structurales) qui jouent un rôle important sur la tenue en service des structures.

L'observation de nombreuses ruptures en service des structures soudées présente le plus souvent la fatigue comme cause principale, pour connaître la tenue en fatigue des assemblages soudés, on étudie séparément l'endurance des différentes zones d'un joint de soudure.

Les facteurs d'endurance des assemblages soudés sont nombreux, le premier d'entre eux est la qualité de la soudure. En effet, la résistance à la fatigue des assemblages soudés est particulièrement sensible à la géométrie du cordon déposé ainsi qu'aux champs de contraintes introduits, soit par le procédé de soudage, soit par défauts microscopiques inclus dans le soudage.

Le matériau joue un rôle important vis-à-vis du comportement en fatigue d'une construction mécanique, mais la conception, le choix des méthodes d'assemblage, la position des soudures ainsi que leur qualité sont prépondérantes.

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

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

- Chapitre I : Notion général sur le soudage

Le premier chapitre présente les notions générales sur l'opération de soudage avec ces différents appareils, ces types d'assemblages et ces défauts dans les joints de soudure.

- Chapitre II : Etude théorique sur la fatigue

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique de la fatigue des assemblages et leurs durées de vies

- Chapitre III : Métallurgie de soudage et mécanique de la rupture

Le troisième chapitre décrit les différentes cristallographies qui existe dans un joint de soudure et les modes de rupture

- Chapitre IV : Etude de travaux réalisé

Le dernier chapitre résume quelque travail réalisé précédemment sur la fatigue des assemblages soudés et résulte des conclusions sur chaque étude

CHAPITRE I

Notion général sur le soudage

1. Introduction

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même. Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « les pièces à assembler participent à la construction du joint » du brasage dont « la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport ».

Le soudage est une opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

2. Définition

Opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. [1]

3. L'appareil de soudage

L'appareil de soudage est appelé poste à souder et consiste dans le principe à un dispositif capable d'amener une forte élévation de température contrôlée en un point précis des matériaux à souder. [2]

Selon la méthode pour élever la température de fusion des matériaux à souder, on distingue :

- **Le soudage à la flamme utilisant :**
 - La lampe à souder.
 - Le chalumeau oxygène acétylène.
 - Le poste à souder gaz.
- **Le soudage au fer chauffant :**
 - Le fer à souder.
 - La station soudage.
- **Le soudage à l'arc électrique :**
 - Le poste à souder à l'arc.
 - Le poste à souder MIG-MAG.
 - Le poste à souder TIG.

4. Différence entre soudage et brasure

Le soudage et la brasure servent tous les deux à assembler des pièces grâce à la fusion des métaux. Mais, la différence se fait dans les métaux assemblés.

En effet, le soudage permet d'assembler des pièces de métal identique (par exemple deux pièces en acier) à l'aide d'un métal d'apport qui permettra de relier ces deux pièces. Ce métal d'apport doit également être de la même matière que les pièces à assembler. Pour un soudage efficace, il faut d'abord une fusion des extrémités de chaque pièce avant de les assembler grâce au métal d'apport.

A l'inverse, la brasure assemble des pièces de métal différent à l'aide d'un métal d'apport dans une matière différente des deux pièces. Par exemple, on peut réunir une pièce en cuivre à une pièce en zinc à l'aide d'un métal de support en étain. Pour obtenir une brasure de qualité, il suffit de réaliser une fusion du métal d'apport, pas besoin de fusion pour les extrémités des pièces à assembler. [1]

5. Cycle thermique du soudage :

Pendant que la source de chaleur se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale puis se refroidit quand la source s'éloigne. La loi suivant laquelle la température varie, en un point de la pièce, en fonction du temps, porte le nom de "cycle thermique de soudage" [3].

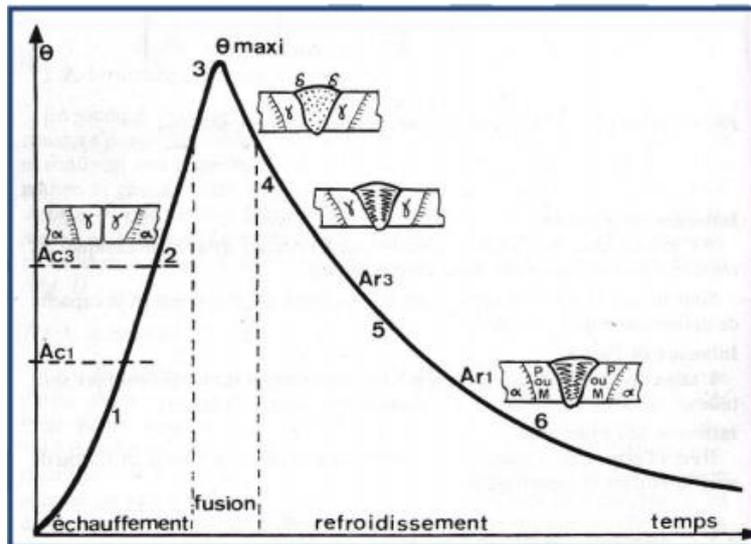


Figure 1 : Cycle thermique du soudage

- 1 – Dilatation Ac_1 : Détensionnement
- 2 – Ac_3 : austénisation (changement de maille).
- 3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.
- 4 – Solidification Ar_3 : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – Transformations allotropiques Ar_1 : trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

6. Les différentes techniques de soudage

Il existe différentes techniques de soudage que nous allons vous présenter.

6.1. Le soudage MMA

Le soudage MMA (Manual Metal Arc) est une technique de soudure à l'arc électrique. Le but est de créer un court-circuit qui provoque un arc électrique et un très grand dégagement de

chaleur (4000 voire 4500°C). C'est l'électrode qui sert de métal d'apport et qui permet donc de réaliser la soudure en fondant sur la pièce à souder. L'électrode peut être de trois types différents :

- Elle peut être rutile c'est-à-dire que l'enrobage est en oxyde de titane, en alliage ferreux et en silicate.
- Elle peut être basique avec un enrobage en carbonate de calcium, en alliage et en fondant (Fluorine) permettant d'abaisser la température de fusion.
- Elle peut être cellulosique avec un enrobage de cellulose et de matières organiques qui assure une abondance de gaz et permet une meilleure pénétration.

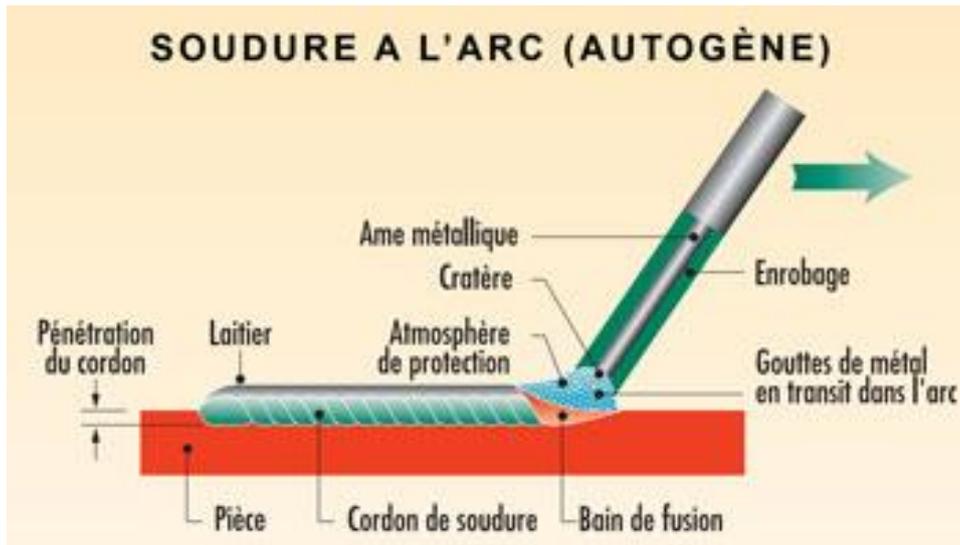


Figure 2 : soudage à l'arc

L'électrode détermine le choix de la polarité : une électrode rutile à une polarité directe (électrode au -) tandis qu'une électrode basique a une polarité inversée (électrode au +). Le soudage MMA est employé pour les soudures épaisses, les cordons larges et les gros efforts mécaniques.

6.2. Le soudage MIG-MAG

Le soudage MIG-MAG est une technique de soudure qui crée un arc électrique et qui mélange deux procédés : le procédé MIG (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection inerte et le procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz de protection actif. Avec cette technique, l'électrode sert de métal d'apport. Le gaz inerte (Argon ou Hélium) dans le procédé MIG et le gaz actif (Argon/CO₂ ou Argon/Oxygène) dans le procédé MAG permettent de protéger l'électrode, l'arc électrique et le bain de fusion. Cette technique de soudage est utilisée pour les soudures par points, épaisses ou rapides pour les matières suivantes : acier, inox, aluminium.

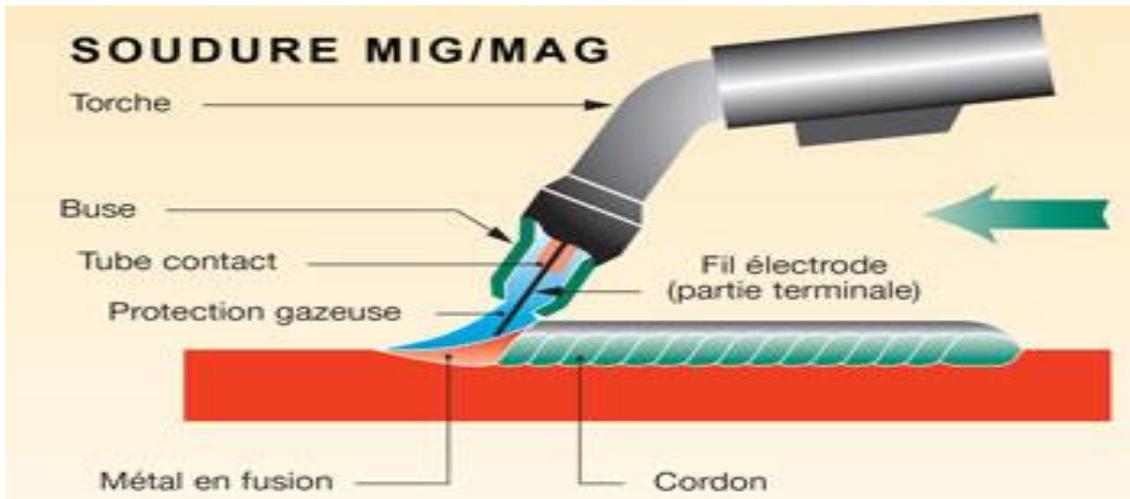


Figure 3 : soudage MIG/MAG

6.3. Le soudage TIG

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) est une technique de soudure utilisant un arc électrique, une électrode en tungstène et un gaz inerte (ou neutre). L'arc électrique est établi entre une électrode en tungstène et les pièces à souder. Un gaz neutre est projeté dans la zone de soudage pour protéger l'arc électrique, l'électrode, le métal d'apport et le bain de fusion de l'oxydation de l'air. Ce gaz neutre est généralement de l'argon car il peut protéger tous les métaux en fusion. Ce type de soudage est destiné à la réalisation de travaux fins requérant une qualité de soudure parfaite.

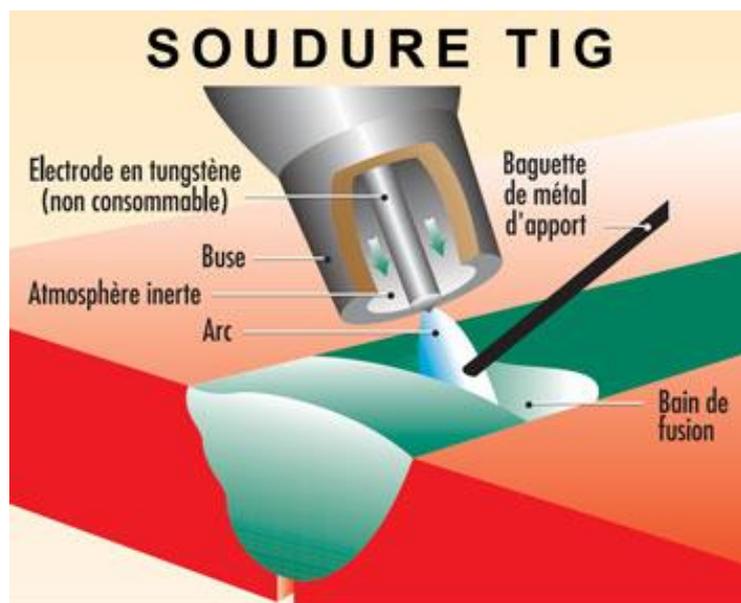


Figure 4 : soudage TIG

6.4. Le soudage au chalumeau

Le soudage au chalumeau, ou soudage flamme, est l'une des techniques de soudage les plus connues et les plus employées. Son principe est simple : il faut obtenir une flamme à l'aide du chalumeau et de deux types de gaz. Il faut un gaz carburant (comme l'acétylène, le propane, le butane ou le méthane) et un gaz comburant (principalement l'oxygène mais parfois l'hydrogène ou le gaz naturel).

La flamme est le plus souvent obtenue par un mélange d'oxygène et d'acétylène (nommé oxy-acétylène) ou par un mélange d'oxygène et de propane (nommé oxy-propane) parce que ces mélanges donnent de très hautes températures favorables à la fusion des métaux.

6.5. Le soudage plasma

Le soudage plasma est une technique utilisant un arc électrique et qui reprend les procédés du soudage TIG et du soudage MIG. Le jet plasma est obtenu après création d'un arc électrique entre une électrode non-fusible et la pièce à souder. Cette technique a besoin d'un gaz supplémentaire en plus du gaz principal (généralement de l'Argon), nommé gaz annulaire et qui est composé d'hydrogène ou d'hélium. L'électrode est protégée par une buse en cuivre qui est en permanence refroidie à l'eau pour éviter sa fusion.

6.6. Soudage par résistance

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (Soudage autogène). L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage. Pour souder, une pince plaque l'assemblage avec des embouts, ou des électrodes en cuivre, matière bonne conductrice de l'électricité et de la chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'en éviter la fusion, qui se trouve limitée à la zone de contact entre les deux feuilles à souder. [4]

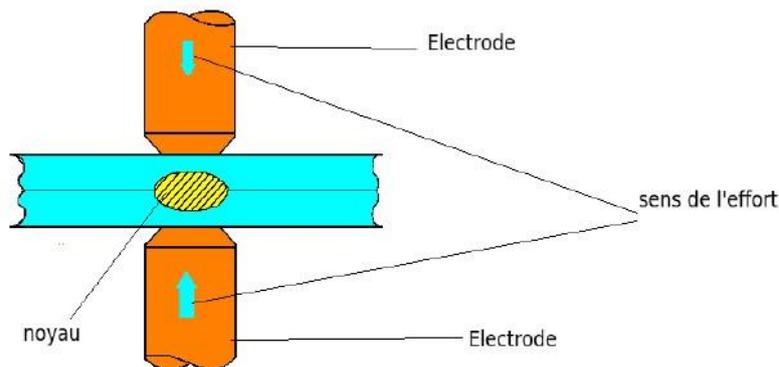


Figure 5 : Soudure par résistance

7. Les différents types d'assemblages soudés

L'assemblage soudé sert à transmettre des efforts entre des membrures ou des pièces jointes par soudage. Les forces et les tensions introduites en différents points d'une structure sont transmises aux surfaces, et aux membrures à travers la soudure. Le type de sollicitation en service a une influence sur la conception du joint soudé. [5]

7.1. Assemblage bout à bout

Un assemblage bout à bout correctement exécuté assure une parfaite continuité géométrique de la matière. Son comportement aux sollicitations de tous types est bon. La présentation des bords à assembler nécessite des soins particuliers pour assurer l'alignement et l'écartement des éléments, lors de la préparation des joints à souder, afin de permettre la bonne exécution de la soudure.

7.2. Assemblage en coin (angle intérieur et angle extérieur)

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

7.3. Assemblage à bords relevés

Cette préparation convient pour l'assemblage de tôles de faible épaisseur sans métal d'apport.

7.4. Assemblage en T

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

7.5. Assemblage à clin ou à recouvrement

Les tôles à assembler sont facilement accostées l'une sur l'autre.

7.6. Assemblage avec couvre-joints

Cette préparation convient pour l'assemblage des pièces peu sollicitées. L'accostage est facilité dans le cas des joints de chantier

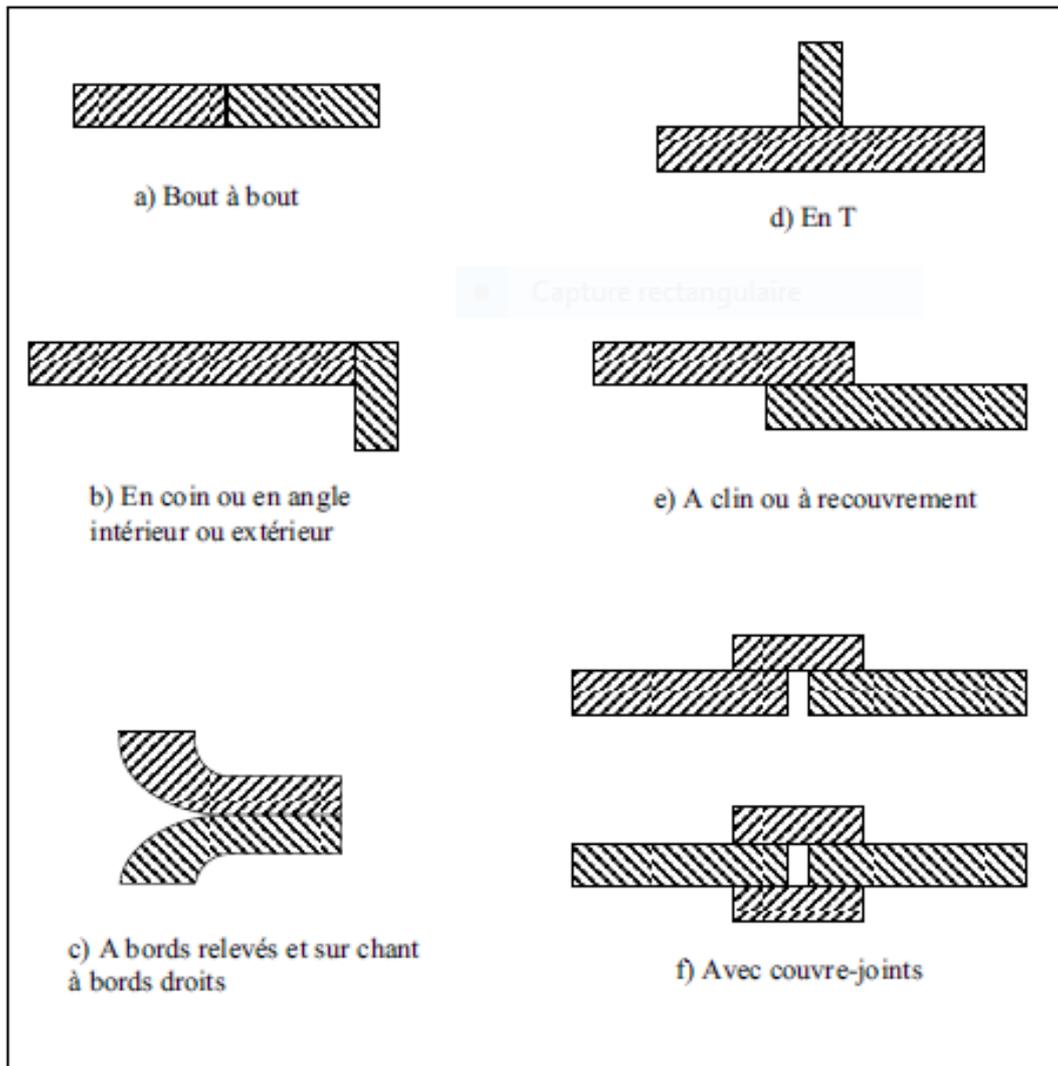


Figure 6 : Types d'assemblages soudés

8. Défauts de soudure :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. [6]

8.1. Soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (figure 7). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface).

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

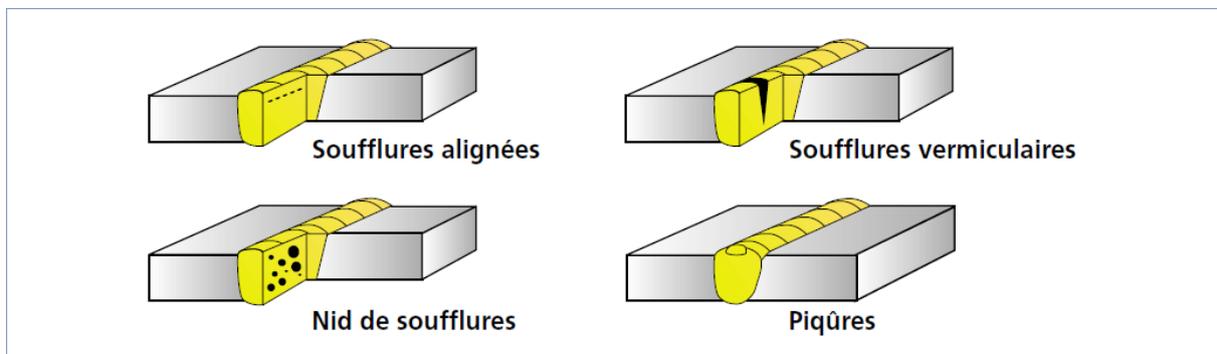


Figure 7 : Soufflures

8.2. Inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (figure 8). On distingue différents types d'inclusions dans le tableau 1.

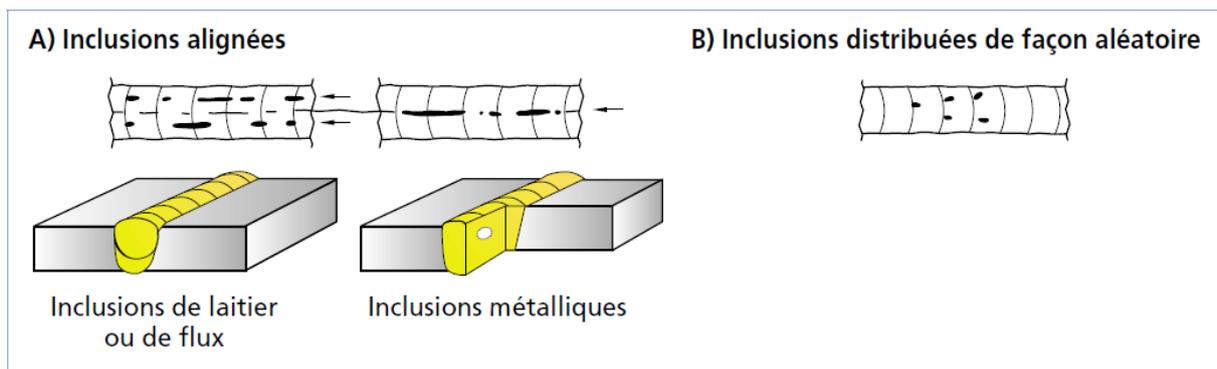


Figure 8 : Inclusions

Tableau 1 : Types d'inclusions

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
Inclusion de laitier	Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion de flux	Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

8.3. Retassures

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (figure 9). Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

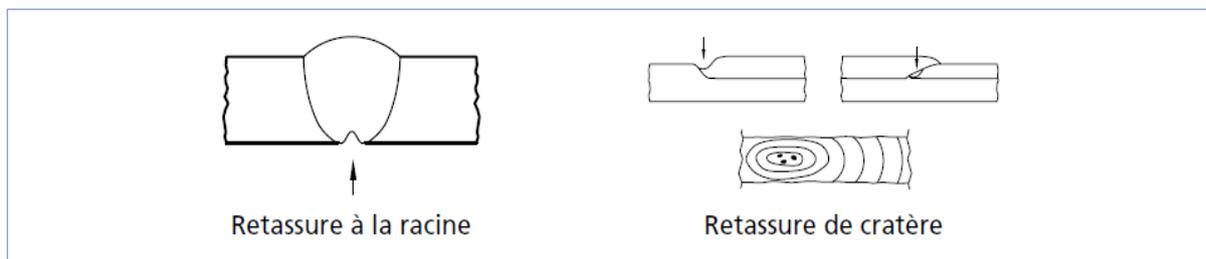


Figure 9 : Retassures

8.4. Porosités

Ce sont des petites bulles de gaz qui n'ont pu se dégager lorsque le bain de fusion était liquide (Flocons).

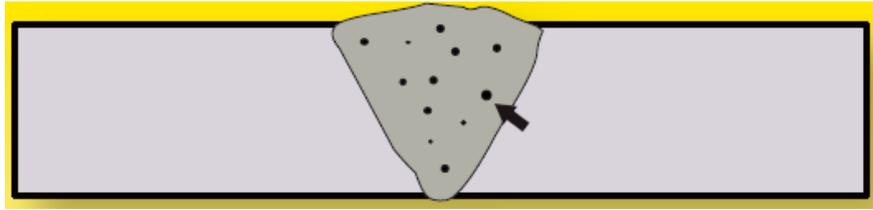


Figure 10 : Porosités

9. Fissurations

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

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.

Le tableau 2 présente les causes les plus fréquentes de fissurations à chaud et à froid, et les moyens de les prévenir. [7]

Tableau 2 : Causes et moyens de prévention liés à la fissuration

	CAUSES	MOYEN DE PREVENTION
FISSURATION A CHAUD	<ul style="list-style-type: none"> – Joints trop étroits – Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) – Métal d'apport incompatible avec le métal de base – Cordon trop petit – TROP de retrait durant ou après le soudage 	<ul style="list-style-type: none"> – Bonne mesure des angles des chanfreins – Préchauffage et chauffage en cours de soudure – Bon choix du métal d'apport – Refroidissement lent – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) – Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin

		<ul style="list-style-type: none"> – En cas de retrait, léger retour en arrière et ajustement de la procédure de soudage
FISSURATION A FROID	<ul style="list-style-type: none"> – Hydrogène coincé dans la soudure – Tensions internes résiduelles importantes 	<ul style="list-style-type: none"> – Préchauffage et chauffage en cours de soudage – Refroidissement lent – Utilisation d'électrodes basiques – Entreposage des électrodes dans un four, au chaud – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit)

9.1. Fissuration 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).

9.2. Fissuration à froid

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes.

10. Contrôles des soudures

10.1. Généralités

Les soudures sont contrôlées selon une procédure de soudage écrite ou une spécification de procédure de soudage (WPS : Welding Procedure Specification) qui est un document écrit dans lequel est indiqué les matériaux, la technique, l'ordre et les paramètres à appliquer pour réaliser une soudure.

Une soudure doit être contrôlée avant, pendant et après sa réalisation. [8]

10.2. Contrôles avant soudure

Afin de s'assurer des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du métal déposé et de la zone affectée thermiquement, il est nécessaire de vérifier que l'ensemble des paramètres de soudage conduit effectivement à la qualité attendue.

A cette fin, un mode opératoire préliminaire rassemblant tous les paramètres de soudage est qualifié. Des essais destructifs permettent de vérifier les caractéristiques mécaniques ; le métal d'apport doit aussi être qualifié à l'issue d'essais mécaniques réalisés sur des moules.

Enfin, la compétence du soudeur est l'un des facteurs les plus importants. Cette compétence n'est pas universelle : un soudeur compétent pour mettre en œuvre un procédé dans des conditions opératoires données peut ne plus l'être pour le même procédé dans des conditions opératoires différentes : les soudeurs sont donc soumis à des essais de qualification pour un mode opératoire bien défini.

10.3. Contrôles pendant le soudage

Après la qualification des conditions opératoires c'est-à-dire après un contrôle avant soudage, il est nécessaire d'effectuer un contrôle pendant l'exécution de la soudure qui a pour but de vérifier :

- La préparation des bords.
- L'accostage des tôles, le calage des tubes.
- Les paramètres électriques (intensité ; tension...)

10.4. Contrôle après le soudage

Les contrôles après soudure se répartissent en deux familles :

- les contrôles destructifs : des prélèvements de joints soudés peuvent permettre de s'assurer que le mode opératoire qualifié est appliqué et que les caractéristiques spécifiées sont obtenues

- les contrôles non-destructifs ; parmi lesquels on peut citer :

- Le contrôle radiographique ou gammagraphie.
- Le contrôle par ultrasons.
- Le ressuage.
- La magnétoscopie

CHAPITRE II

Etude théorique sur la fatigue

1. Introduction

Toute pièce mécanique est soumise, durant son fonctionnement normal, à un certain nombre de sollicitations de causes variables, se traduisant le plus souvent par des variations cycliques de contraintes.

L'endommagement par fatigue, mené jusqu'à la ruine, comprend trois périodes d'importance variable selon les matériaux et les caractéristiques de sollicitations :

- Période de germination ou période d'amorçage
- Période de propagation
- Rupture brutale

En fait, dans le matériau, des microfissures s'amorcent et se propagent de plus en plus vite (de 10⁻⁷ mm/cycle à 10⁻³ mm/cycle). Dès que la section résiduelle est trop faible par rapport à la sollicitation, la rupture brutale de la structure s'ensuit.

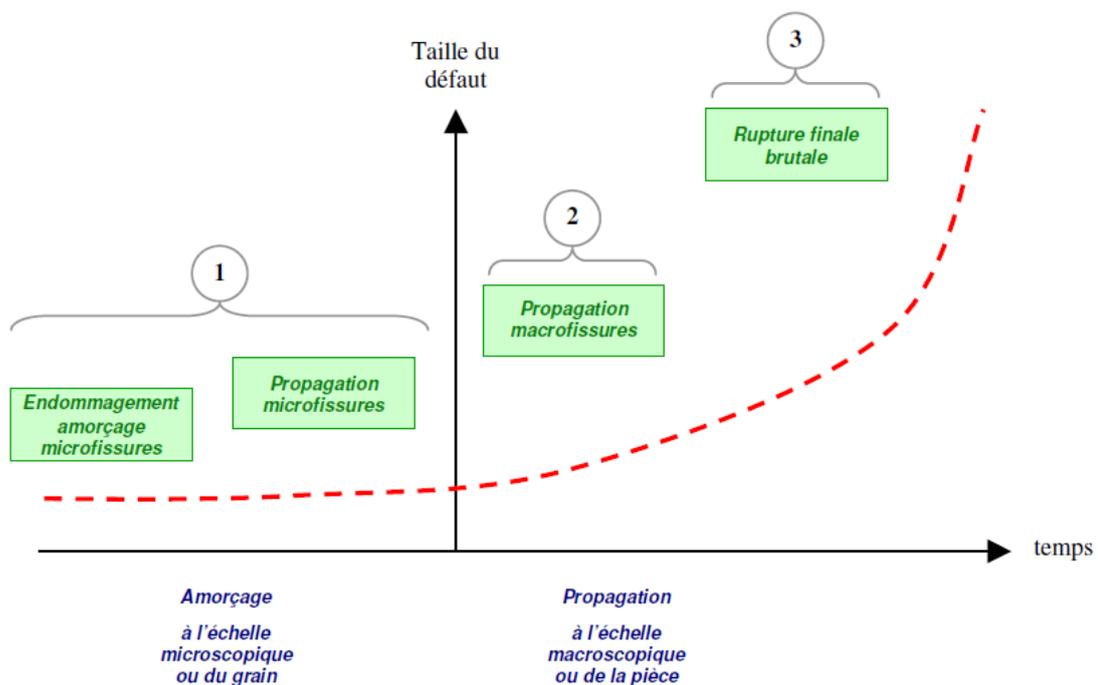


Figure 11 : Les 3 phases de la rupture par fatigue

2. Définition

Dans son sens le plus général, le terme « fatigue » s'applique aux altérations subies par les matériaux métalliques soumis à des sollicitations répétées ou ondulées ; habituellement, ce terme est employé en particulier pour désigner une certaine forme de rupture qui peut se produire à la suite de l'application de sollicitations de cette nature. La rupture par fatigue représente évidemment une altération critique de l'état d'un matériau métallique et constitue donc, du point de vue pratique, l'aspect le plus important du comportement à la fatigue. D'autres altérations se produisent également, mais leur relation avec l'avarie effective du matériau n'est pas aussi évidente. Le mécanisme aboutissant à la rupture finale résulte du cumul des cycles de charge ou de contrainte. Egalement, la rupture elle-même revêt une forme progressive et diffère en cela des autres types de rupture, en particulier de la rupture fragile par clivage qui est pratiquement instantanée. Dans de nombreux cas, la sollicitation par fatigue entraîne la formation d'une simple fissure, mais la réduction de section provoquée par cette

fissure ou la concentration de contraintes ou l'effet d'entaille qui en résulte peut entraîner la rupture complète, soit par déformation plastique et rupture ductile, soit par clivage. Les sollicitations qui conduisent à la rupture par fatigue peuvent être simples (traction, compression, flexion ou torsion) ou constituer une combinaison de sollicitations simples. Sauf dans les cas particuliers qui ne seront pas examinés ici (fatigue sous grand allongement), le niveau de sollicitation requis pour provoquer la rupture est inférieur à la limite d'élasticité du matériau ; autrement dit, appliqué une seule fois, il ne provoque ni une rupture ni même une déformation plastique. [9]

3. Fatigue des assemblages soudés

L'analyse des structures soudées ne dévie pas trop de celle des autres types de structures. Plusieurs mécanismes doivent être évités dans la conception appropriée, le choix de métal et les dimensions de structures. L'amorçage de fissures en fatigue débute et grandit à la proximité de la soudure pendant la vie en service. La résistance en fatigue de joint soudé n'est pas principalement gouvernée par la résistance du métal de base.

Les paramètres importants sont surtout les géométries globales et locales du joint soudé. [10]

4. Durée de vie des assemblages soudés

On n'a pas défini de méthode permettant d'évaluer la durée de vie des assemblages soudés en partant des résultats sur des éprouvettes sans soudure. Il y a pour cela plusieurs raisons :

- Les formes des cordons ne sont pas assez bien définies pour que l'on puisse estimer les contraintes aux zones critiques : les bords et la racine du cordon,
- Les contraintes résiduelles sont très élevées, de l'ordre de la limite d'élasticité, et il est difficile à calculer la contrainte moyenne,
- Au moment de la rupture, la proportion du nombre de cycles d'amorçage par rapport au nombre de cycles total est plus faible pour les assemblages soudés.

Pour estimer la durée de vie des assemblages soudés, on réalise des essais sur des éprouvettes soudées. Toutefois les essais doivent porter sur des assemblages représentatifs des structures étudiées : même type de matériau, conditions de réalisations comparables. Les essais de fatigue sur des assemblages soudés reprennent les principes généraux des essais de fatigue. Au bout d'un certain nombre de cycles, relativement faible pour les assemblages soudés, une fissure apparaît dans une zone où l'effet d'entaille est maximum : bord ou racine du cordon. En poursuivant l'essai, on provoque la propagation de la fissure. L'essai est arrêté à la rupture de l'éprouvette, ou au moment où elle ne supporte plus l'effort nominal. [10]

5. Fatigue du joint soudé en fonction de la forme du joint

La durée de vie en fatigue des joints soudés est fortement affectée par la présence en pied du cordon d'une concentration de contrainte liée à la géométrie de la soudure [11]. Les zones d'amorçage de la fissure sont soit l'effet géométrique du cordon, ou un défaut interne (manque de pénétration, soufflures) ou externe (caniveaux, inclusions de laitier). Différents paramètres affectent la tenue en fatigue des joints soudés.

6. Influence des inclusions

La nocivité des inclusions, dépend principalement de la présence d'hydrogène, dont le rôle, dans la diminution de l'endurance des joints soudés, en liaison avec la présence de porosité, [12]. L'influence des soufflures et inclusions de laitier sur les caractéristiques de fatigue provoquent évidemment des effets négatifs.

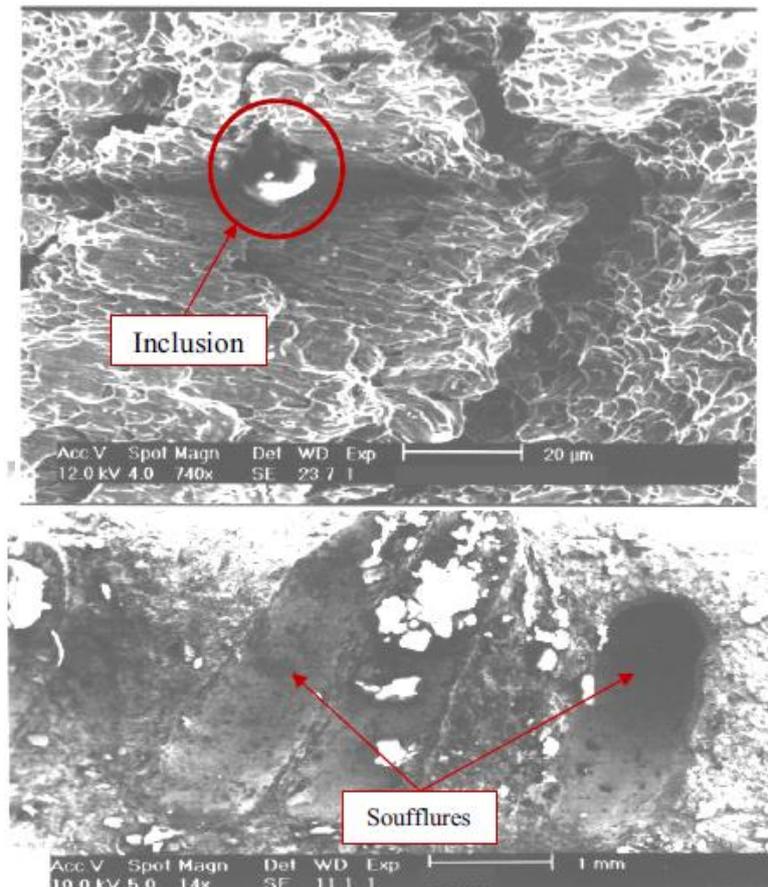


Figure 12 : Soufflures et inclusions dans les soudures

7. Influence de l'épaisseur des tôles

L'augmentation de l'épaisseur d'un matériau de base diminue la résistance à la fatigue lorsqu'une fissure se propage depuis le pied d'un joint soudé. Ceci est dû à une augmentation des concentrations de contraintes résiduelles dans les sections transversales de matériaux épais. [13]

8. Effet l'environnement sur la tenue en fatigue

L'environnement environnant peut avoir une incidence sur la durée de vie en fatigue d'un assemblage soudé, ce qui l'abaisse souvent. Les points tels que la température, l'humidité et l'emplacement géographique sont considérés comme faisant partie du milieu environnant. Les environnements qui contiennent de l'eau de mer peuvent voir leur durée de vie en fatigue diminuer en raison de l'augmentation des taux de croissance des fissures. [13]

9. Effet des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue

Le processus de soudage entraîne des niveaux élevés de contraintes résiduelles de traction dans et autour de la soudure à la suite de la contraction du métal après son refroidissement. Les contraintes résiduelles de traction approchent la limite d'élasticité du métal de base (figure 4), ce qui contribue à réduire la résistance à fatigue des composants et des structures soudées. [14]

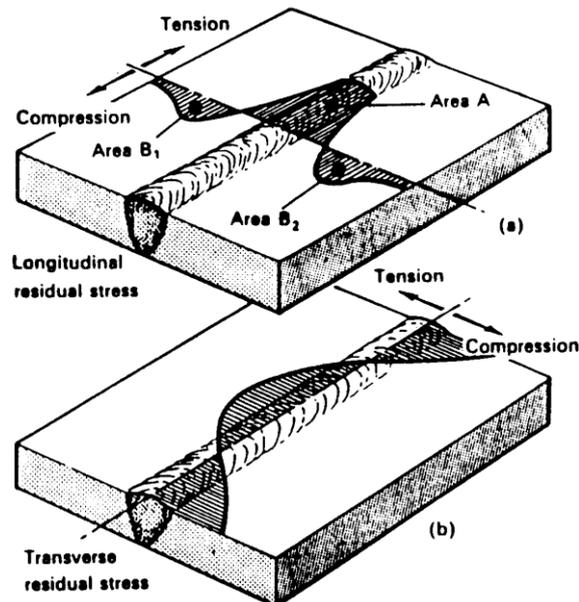


Figure 13 : Répartition des contraintes résiduelles dans les joints soudés

10. Contraintes appliquées

Généralement au cours de l'essai de fatigue, la contrainte appliquée, approximativement sinusoïdale, varie en fonction du temps, en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats.

La contrainte, prise en compte lors d'un essai de fatigue, est une contrainte globale (calculée par rapport à la section de la pièce d'après la résistance des matériaux et relativement au domaine élastique). Elle est exprimée en N/mm^2 ou en MPa, Figure 5. [15]

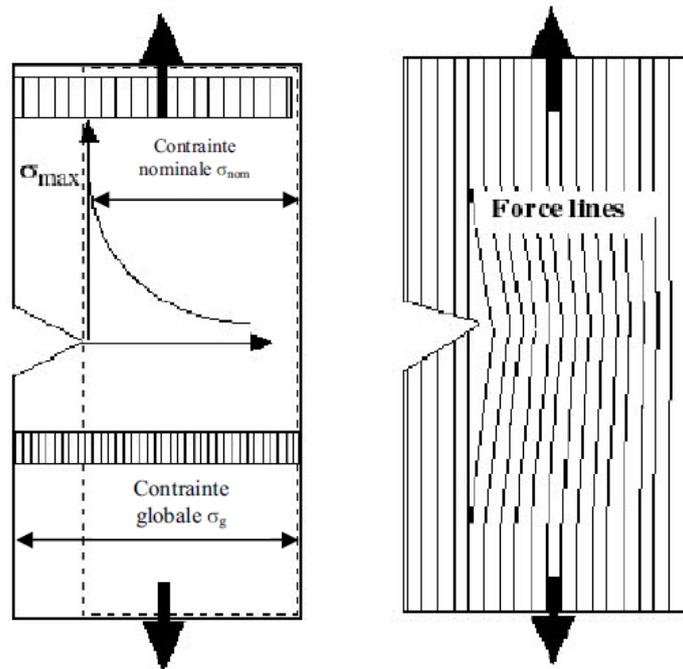


Figure 14 : Définition des contraintes (maximale, globale et minimale)

10.1. Cycle de contrainte en fatigue

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types :

- Traction – compression
- Flexion plane
- Flexion rotative
- Flexion trois points
- Torsion

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum σ_{max} et par un minimum σ_{min} . [15]

On en déduit :

- La contrainte moyenne :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

- L'amplitude de contrainte :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

- L'étendue de variation de contrainte

$$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2 \sigma_a$$

- Rapport de charge R

C'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale. $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Dans la Figure 6, nous présentons les termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte.

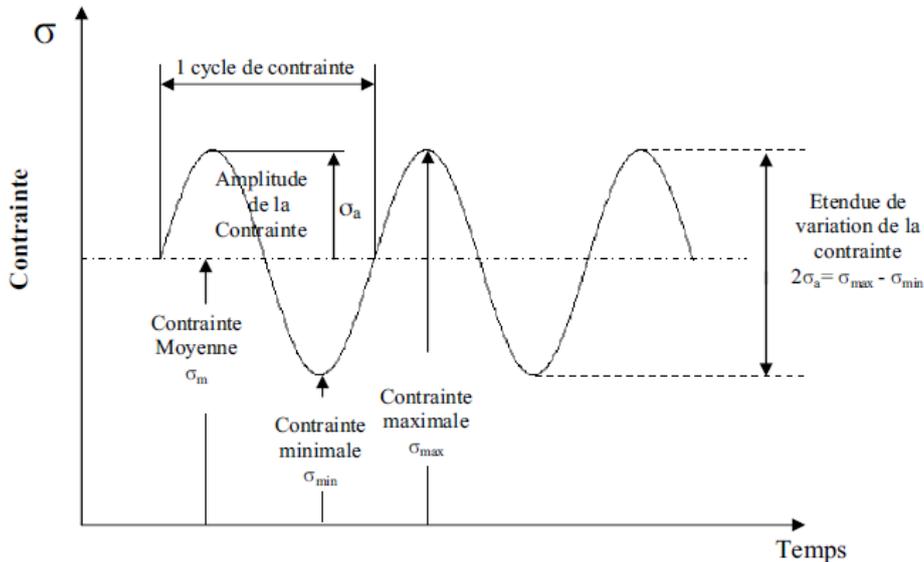


Figure 15 : Cycle de contrainte en fatigue.

10.2. Comportement sous sollicitation cyclique

L'enregistrement de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, appliquée au cours d'un cycle, conduit au tracé d'une boucle schématisée sur la Figure 7 et appelée boucle d'hystérésis.

La forme et la taille de ces boucles évoluent en fonction du nombre de cycles et éventuellement se stabilisent. [16]

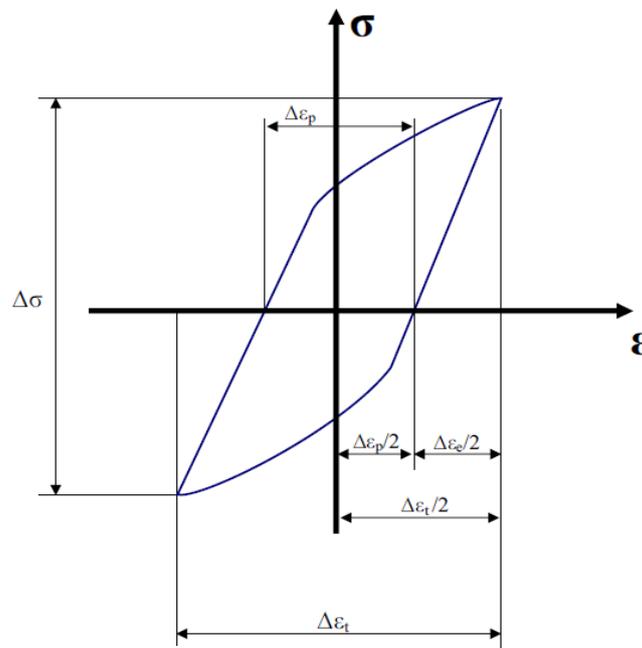


Figure 16 : définitions des différents paramètres caractérisant une boucle d'hystérésis

Pour caractériser le comportement cyclique d'un matériau, les paramètres suivants sont couramment utilisés :

- Etendue de variation de la contrainte : $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- Amplitude de contrainte : $\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{max} - \sigma_{min}) = \frac{\Delta \sigma}{2}$
- Contrainte moyenne : $\sigma_{moy} = \frac{1}{2} (\sigma_{max} + \sigma_{min})$
- Rapport de contrainte : $R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
- Etendue de variation de la déformation : $\Delta \epsilon = \epsilon_{max} - \epsilon_{min}$
- Amplitude de déformation : $\epsilon_a = \frac{1}{2} (\epsilon_{max} - \epsilon_{min}) = \frac{\Delta \epsilon}{2}$
- Déformation moyenne : $\epsilon_{moy} = \frac{1}{2} (\epsilon_{max} + \epsilon_{min})$
- Rapport de déformation : $R_\epsilon = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}}$

11. Courbe de Wöhler (courbe $\sigma - N$)

Cette courbe est appelée courbe S.N (Stresses- Number of cycles) dans les pays anglo-saxons. Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule courbe qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques N_R est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (σ_a, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure suivante [17] :

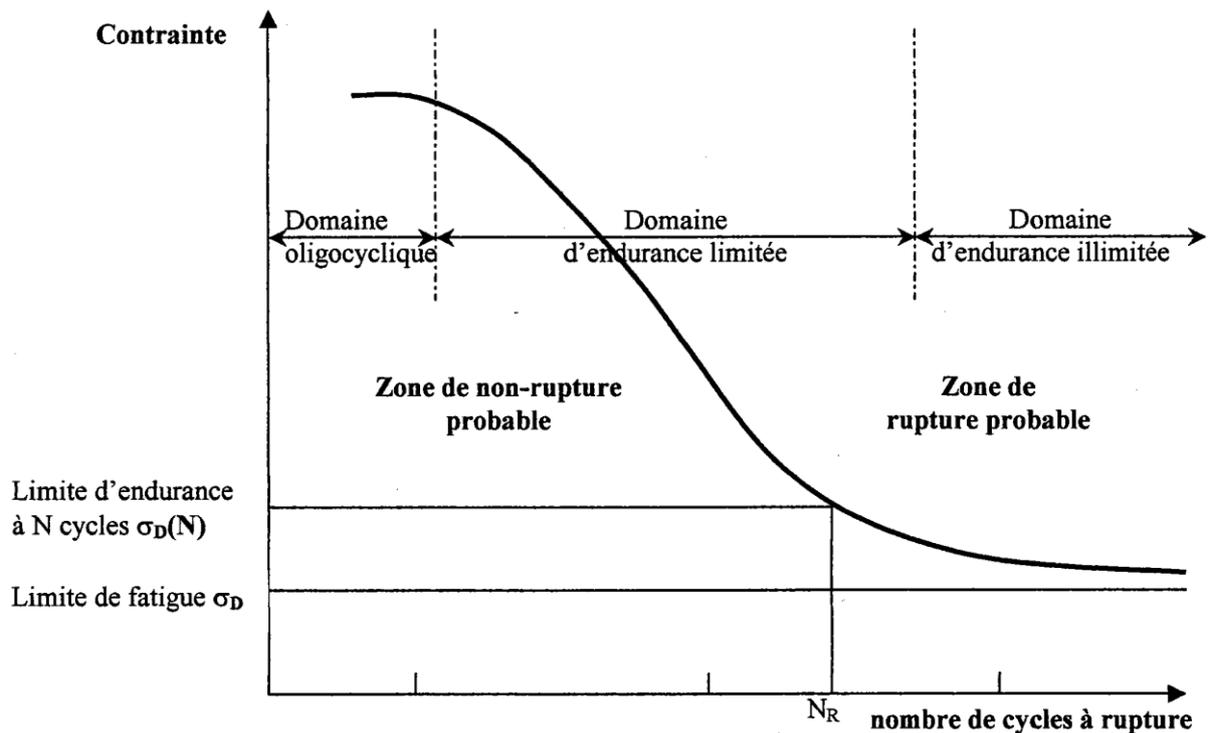


Figure 17 : Allure de la courbe de Wöhler

- Limite de fatigue

C'est la contrainte pour laquelle aucune rupture n'est observée après un nombre de cycle infini, Figure 8

- Limite d'endurance

La limite d'endurance correspond à la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte lorsque le nombre de cycles devient très grand.

Dans le cas des aciers, cette limite d'endurance peut être réellement approchée avec 10^7 cycles.

- Durée de vie

C'est le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette rompt.

12. Essai de fatigue

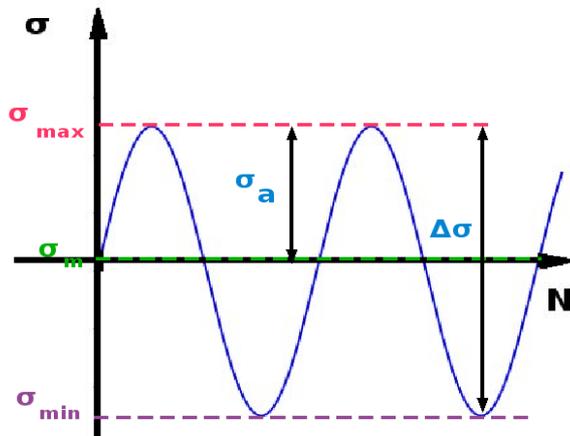
L'essai consiste à soumettre une série d'éprouvettes à des cycles répétitifs de sollicitations. Plusieurs types d'essais de fatigues peuvent être distingués selon le type de sollicitation à savoir :

- Fatigue en traction-compression
- Fatigue en torsions alternées
- Fatigue en flexion.

Généralement les sollicitations sont appliqués d'une façon sinusoïdale en fonction du temps. On définit N le nombre de cycles et N_f le nombre de cycles à la rupture.

12.1. Type de sollicitation

12.1.1. Contrainte alternées symétrique



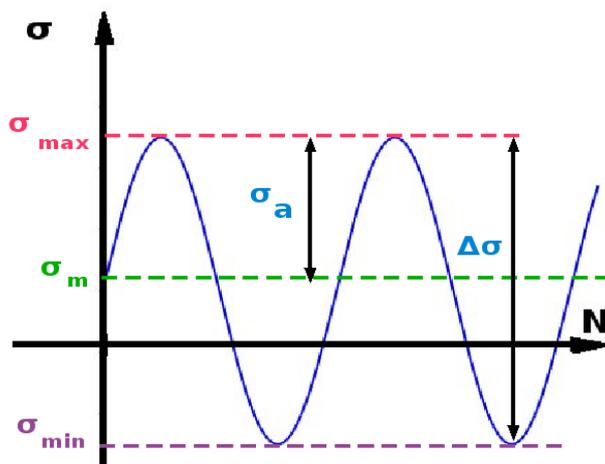
$$R\sigma = 1$$

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$$

$$\sigma_m = 0$$

Figure 18 : Contrainte alternées symétrique

12.1.2. Contrainte alternées dissymétrique



$$-1 < R\sigma < 0$$

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$$

$$0 < \sigma_m < \sigma_a$$

$$\sigma_{\min} < 0$$

Figure 19 : Contrainte alternées dissymétrique

12.1.3. Contrainte répétées

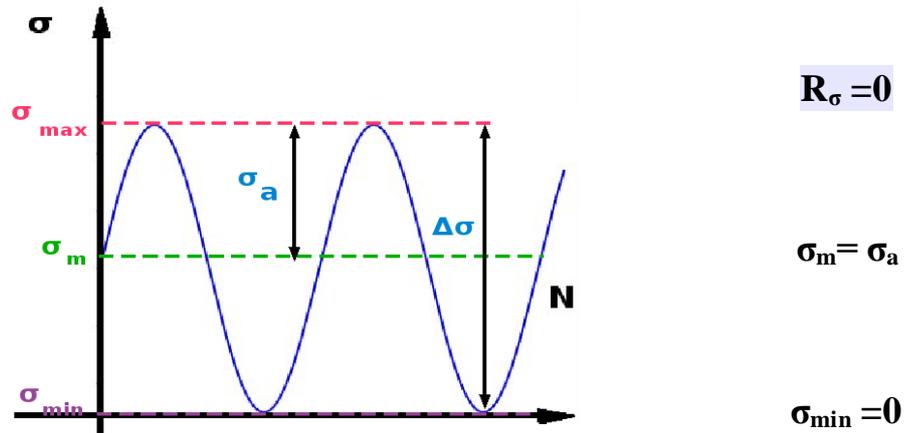


Figure 20 : Contrainte répétées

12.1.4. Contrainte ondulées

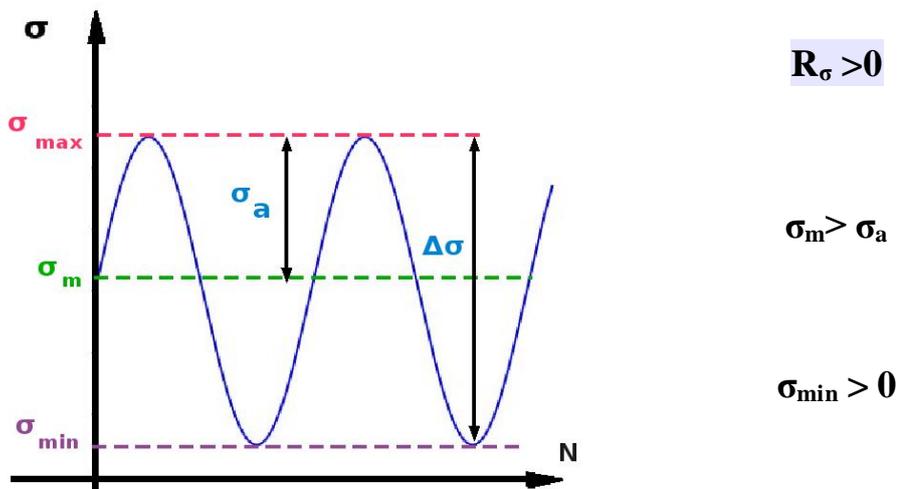


Figure 21 : Contrainte ondulées

CHAPITRE III

Métallurgie et mécanique de la
rupture

1. Notion de métallurgie de soudage

La métallurgie du soudage renseigne sur les caractéristiques d'un acier, qui sont fonction de sa structure, de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition de l'acier et du traitement thermique qu'il subit.

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage [18].

On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé (figure.1) :

- Le métal de base (MB)
- La zone affectée thermiquement (ZAT)
- La zone de liaison (ZL)
- La zone fondue (ZF)

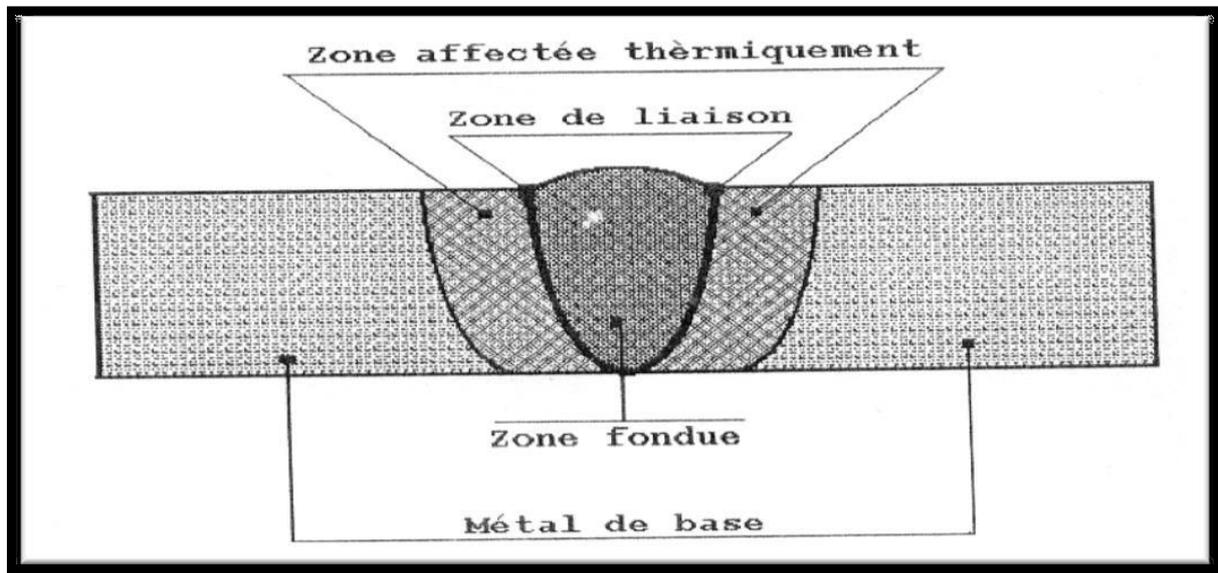


Figure 22: Présentation macrographique d'un joint soudé

- **Métal de base (MB)** : Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- **Zone affectée thermiquement (ZAT)**: La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage.
- **Zone de liaison (ZL)** : Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
- **Zone fondue (ZF)** : Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification.

2. Zone affectée thermiquement (ZAT)

2.1. Définition

La zone affectée par la chaleur (ZAT) est une zone de métal non fondue qui a subi des changements dans les propriétés des matériaux en raison de son exposition à des températures élevées. Ces changements dans la propriété du matériau sont généralement le résultat du soudage ou de la découpe à haute température. Le ZAT est la zone entre la soudure ou la coupe et la base, métal-mère.

La zone ZAT peut varier en gravité et en taille en fonction des propriétés des matériaux, de la concentration et de l'intensité de la chaleur et du procédé de soudage ou de découpe utilisé.

2.2. Les causes de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

La zone affectée par la chaleur est influencée par le niveau de diffusivité thermique, qui dépend de la conductivité thermique, de la densité et de la chaleur spécifique d'une substance.

Ces matériaux avec un haut niveau de diffusivité thermique sont capables de transférer plus rapidement les variations de chaleur, ce qui signifie qu'ils refroidissent plus rapidement et, par conséquent, la ZAT est réduit.

En revanche, les matériaux à coefficient plus faible retiennent la chaleur, ce qui signifie que la ZAT est plus large. De manière générale, l'extension de la ZAT dépend de la quantité de chaleur appliquée, de la durée d'exposition à la chaleur et des propriétés du matériau lui-même. Lorsqu'un matériau est exposé à de plus grandes quantités d'énergie pendant des périodes plus longues, la ZAT est plus grande.

En ce qui concerne les procédures de soudage, les processus avec des taux élevés d'apport calorifique se refroidiront plus rapidement, conduisant à un ZAT plus petit, tandis que des taux d'apport calorifiques plus lents auront un taux de refroidissement plus lent, conduisant à un ZAT plus important. De plus, la taille de la ZAT augmente également à mesure que la vitesse du processus de soudage diminue. La géométrie de la soudure est un autre facteur qui joue un rôle dans la taille ZAT [19].

2.3. Les différentes zones de la ZAT :

Alors que la ZAT se produit entre la zone de soudure et le métal de base non affecté, la ZAT elle-même a différentes zones en fonction de leur proximité avec l'endroit où la chaleur de soudage a été appliquée au matériau.

Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

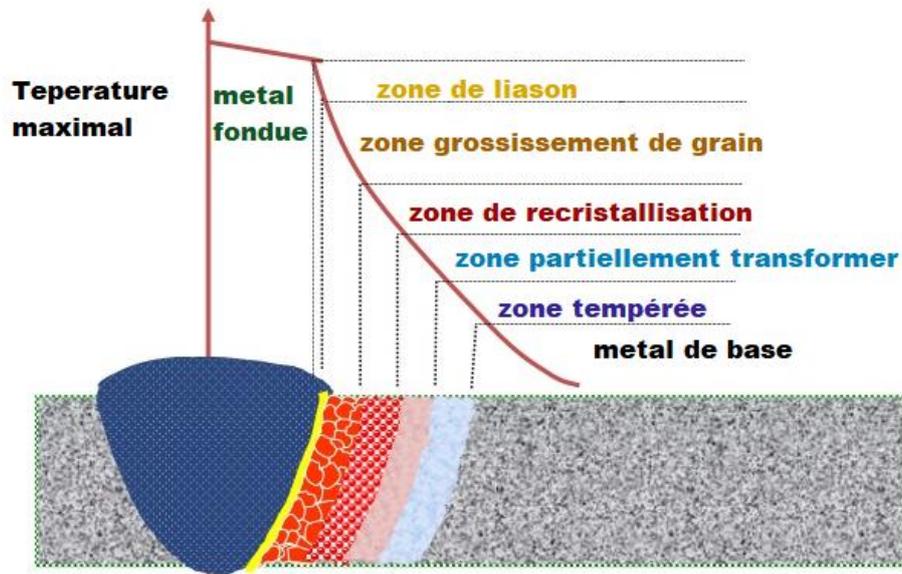


Figure 23: la zone affectée thermiquement

La zone de soudure est la région liquide où le processus lui-même a lieu et est contiguë à la zone de liaison. La zone de liaison est la frontière de la zone de fusion où coexistent les phases liquide et solide du métal. Plus loin de la zone de soudure se trouve la ZAT elle-même, où le métal de base non fondu a subi des modifications de la microstructure. La ZAT peut être décomposé en la zone de croissance des grains (la plus proche de la zone chauffée), la zone recristallisée, la zone partiellement transformée et la zone tempérée. En dehors de ces zones ZAT se trouve le matériau de base non affecté.

Les différentes zones ZAT sont formées par des températures différentes dans le métal de base plus loin de la soudure elle-même [19].

2.4. Transformations en ZAT lors du chauffage :

Au sens strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Easterling, il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales (voir figure 3). [20]

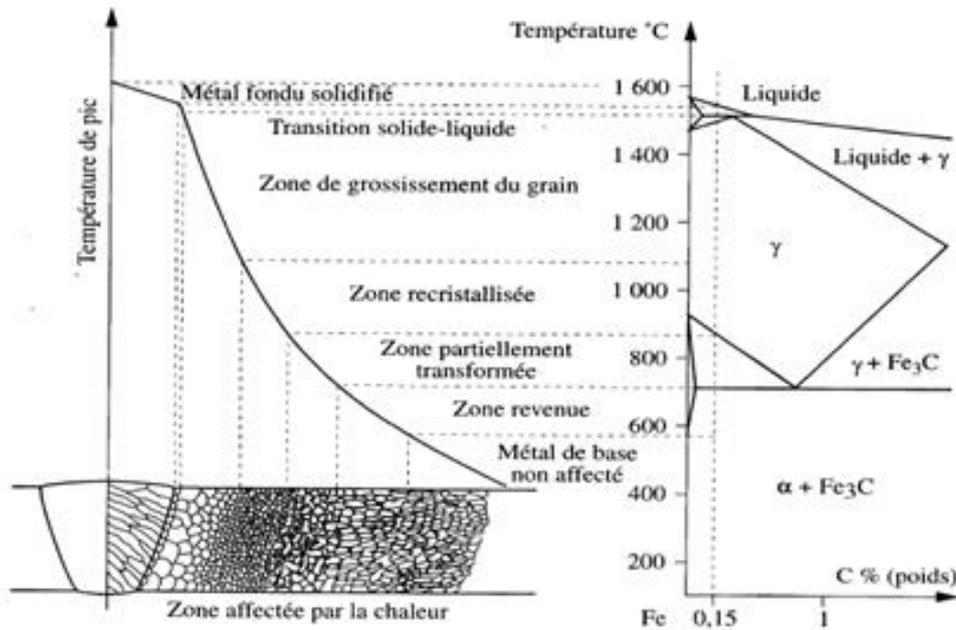


Figure 24 : présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé

En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes.

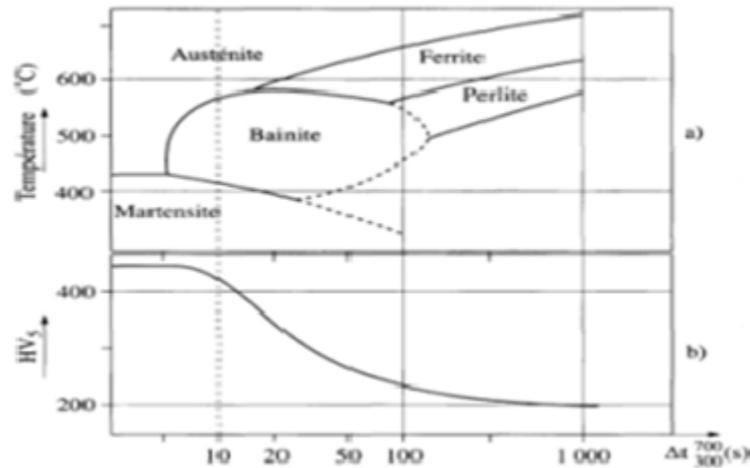
- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que revenu, globularisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone de transformation partielle (ou intercritique).
- A partir de la température A_3 et jusqu'à 1 495 °C environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain, la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide (δ) et une phase liquide.

2.5. Transformations en ZAT lors du refroidissement :

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures sont susceptibles de se former.

En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée ne permettent pas d'appréhender correctement les phénomènes métallurgiques qui apparaissent dans la zone thermiquement affectée. Ceci peut se faire au moyen du diagramme de refroidissement continu élaboré en condition de soudage [20] :

- Pour une vitesse de refroidissement lente, nous sommes en présence d'un phénomène de recuit ou normalisation. La structure finale est composée de ferrite-perlite (structure identique au métal de base)
- Pour une vitesse moyenne, nous avons un effet de trempe douce et nous obtenons une structure finale composée de bainite (ferrite et cémentite),



- Pour une vitesse de refroidissement rapide l'effet est alors dit de trempe dure. La structure finale est composée de martensite (forte déformation du réseau cristallin et apparition de cisaillements).

2.6. Nature des risques métallurgiques

La structure **martensitique** : risque de fissuration à froid

La structure **austénitique** : risque de fissuration à chaud

La structure **ferritique** : risque de fragilisation par grossissement de grains (faible ductilité)

La structure **austéno-ferritique** : risque de fragilisation par composés intermétalliques de phase sigma (Equivalent Cr > 25)

2.7. Quels sont les effets des zones affectées par la chaleur?

En raison de l'échauffement subi dans la ZAT, la microstructure et les propriétés dans cette région changent de sorte qu'elles diffèrent de celles du matériau de base. Ces changements sont généralement indésirables et conduisent à cette zone devenant plus faible que le métal de base. Cela peut, à son tour, entraîner des contraintes résiduelles, des soudures de fissures (fissuration à chaud et fissuration à froid), une fragilité accrue, une résistance réduite du matériau et une résistance réduite à la corrosion. En conséquence, la ZAT est souvent la zone où les défaillances se produisent.

De plus, dans les aciers inoxydables, la nitruration de surface peut entraîner une dureté accrue et une soudabilité réduite. La corrosion est un autre effet secondaire courant des températures élevées subies par la ZAT dans les aciers inoxydables. La chaleur produite dans la zone du cordon de soudure fait précipiter les carbures de chrome autour des joints de grains, ce qui fait chuter la teneur en chrome en dessous de 10,5%, point auquel l'acier perd la capacité de former un film passif et n'est plus inoxydable. Il en résulte une corrosion inter granulaire.

La fragilisation par l'hydrogène est un autre effet secondaire indésirable des températures élevées, par lequel le gaz diffuse à travers le métal de soudure, créant une pression à l'intérieur du réseau et réduisant la résistance à la traction et la ténacité du métal. À moins que l'hydrogène

gazeux ne soit éliminé, il peut provoquer un type de fissuration spontanée en seulement 24 heures après le chauffage.

Dans certains cas, le chauffage peut générer un durcissement localisé et les aciers inoxydables austénitiques peuvent devenir martensitiques, augmentant à la fois la dureté et la fragilité. Dans d'autres cas, le métal chauffé peut s'affaiblir. [19]

3. Analyse des Fissures

3.1. Amorçage des fissures

Cette période dépend de la nature, de l'état d'une pièce et des sites de sollicitations maximums. Le type de matériau, la présence d'irrégularités constructives (trou d'assemblage, rainure, soudures...) ou la présence de défauts internes ou de surface sont des variables influençant le mode d'initiation des fissures. En d'autres termes, les sites d'amorçage de fissures sont surtout influencés par la présence de défauts et de concentration de contraintes. Par exemple, un trou d'assemblage est un site de concentration de contraintes, de même qu'un trou de ver. Il s'y produit donc un décalage local de rigidité entre le matériau de base, ce qui encourage l'initiation des fissures. [21]

3.2. Propagation des fissures

Au cours des cycles de fatigue, la microfissure initiale devient grande par rapport à la taille du grain, et les différentes microfissures vont coalescer. Une macro-fissure apparaît ainsi et sa direction est généralement imposée par les contraintes d'ouverture, maximum des contraintes principales. [22]

3.3. Rupture finale

L'étape ultime est la rupture en fatigue. Elle survient lorsque le facteur K atteint son maximum et dépasse la résistance à la rupture du matériau. La propagation des fissures continue toujours, mais devient très rapide. [21]



Figure 26 : Faciès de la rupture [13]

4. Fissuration dans les joints soudés

Lors d'une sollicitation cyclique sous chargement élastique, des fissures peuvent s'amorcer et se propager jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. La fissure créée peut avoir différentes origines, comme des défauts d'usinage ou de fonderie, ou même des inclusions.

Pour mettre en évidence la propagation des fissures, il convient de représenter son avancée, par rapport à sa longueur initiale en fonction du nombre de cycles auxquels est soumise l'éprouvette. On peut déterminer, à partir des valeurs de la longueur de fissure a enregistrée, la vitesse de fissuration da/dN en fonction d'un paramètre qui caractérise le chargement.

Paris et al. [Paris et al., 1961] ont montré qu'il existe une relation entre la vitesse de propagation de fissure et le facteur d'intensité de contrainte KI qui est défini par l'équation suivante:

$$KI = Y \times \sigma \sqrt{\pi a}$$

Où Y est un facteur de forme dépendant de la géométrie de l'éprouvette et de la longueur de fissure a .

Le chargement appliqué étant cyclique, il existe une variation du facteur de concentration de contrainte. On définit alors la variation de K selon l'équation suivante:

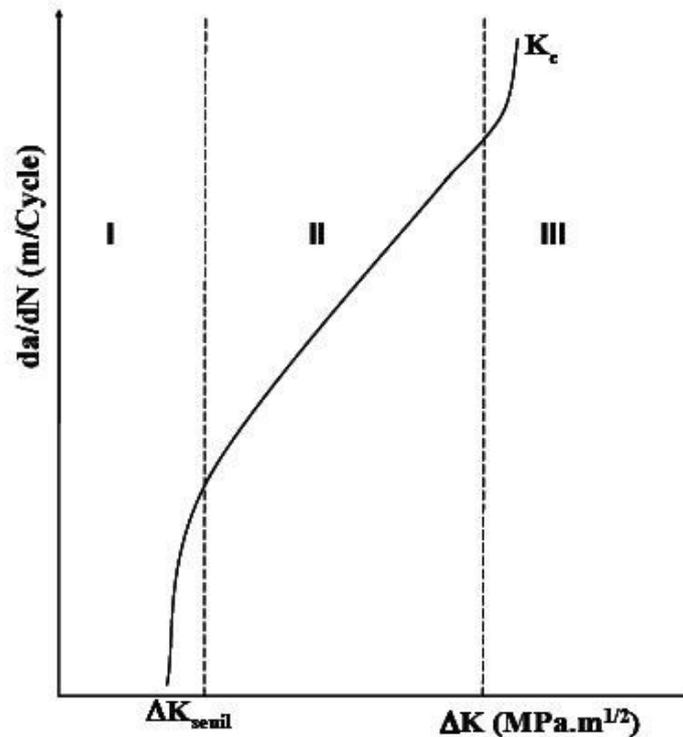
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

avec K_{\max} et K_{\min} les valeurs extrêmes de K pendant le cycle appliqué.

La Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER) a permis d'étudier les stades de propagation de fissures de fatigue (lente ou brutale) grâce à l'utilisation du facteur d'intensité de contrainte K . La Figure 4 illustre la variation de la vitesse de fissuration da/dN en fonction de ΔK en échelle bi-logarithmique :

La courbe de fissuration est caractérisée par trois domaines :

- **Domaine I** : il correspond à des faibles vitesses de fissuration et il définit le seuil de propagation. En effet, la vitesse tend vers zéro pour une valeur ΔK_{seuil} appelée seuil de propagation. Dans ce domaine, la vitesse de propagation de fissure dépend de la microstructure et de l'environnement ainsi que la contrainte moyenne.
- **Domaine II** : (ou domaine de Paris): il se caractérise par la variation suivant une loi puissance de la vitesse de propagation avec ΔK . C'est le domaine de validité de la loi de Paris. Dans ce stade, la vitesse de propagation est fortement dépendante de la microstructure, de la contrainte moyenne, de l'épaisseur de l'éprouvette d'essai et de l'environnement.
- **Domaine III** : ce domaine correspond à une accélération rapide de la vitesse de fissuration. Le facteur d'intensité de contraintes est proche de la valeur critique K_{IC} qui correspond à la rupture finale de la pièce. La vitesse de propagation dans ce domaine dépend peu de l'environnement mais reste dépendante de la microstructure et de la contrainte moyenne.

Figure 27 : Courbe $da/dN = f(\Delta K)$

5. Mécanique de la rupture

Une singularité peut exister dans le matériau, elle peut avoir deux origines :

- Un défaut initial de fabrication
- Un amorçage d'une fissure détectable dû à la fatigue.

On la caractérise par sa dimension a , et sa forme.

Cette fissure va se propager, donc a va augmenter si le chargement est variable jusqu'à la dimension critique a_c .

La loi de Paris est la loi la plus simple régissant sa propagation. Soient

- N le nombre de cycles ;
- ΔK la variation du facteur d'intensité de contrainte ;
- K , C et m des coefficients dépendant du matériau ;

On a :

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

Sa dimension critique a_c est liée à la caractéristique du matériau K_{IC} , la ténacité, elle entraîne la rupture fragile de la structure :

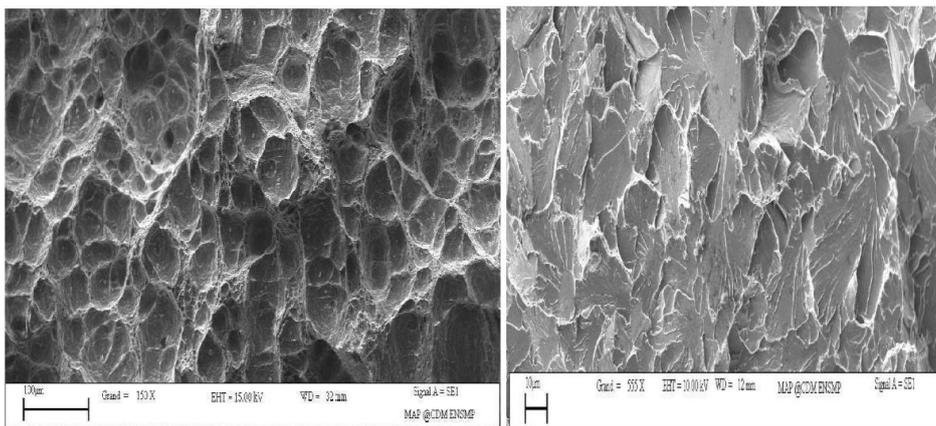
$$K_{IC} = F \times \sigma \times \sqrt{\pi \times a_c}$$

Où σ est une contrainte effective dans une direction normale à la fissure et F un facteur de forme.

6. Types de 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 [23] :

- 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 plastique. La fragilité d'un matériau est influencée par la température et la vitesse de chargement.



a : rupture ductile (acier X100)

b : rupture fragile dans les métaux

Figure 28 : Exemple de la rupture ductile/fragile [15]

7. Mode de rupture :

Il existe trois façons d'appliquer une force pour permettre à une fissure de se propager :

- Mode I - Une contrainte de traction normale au plan de fissure,
- Mode II - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure, et
- Mode III - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes. [24]

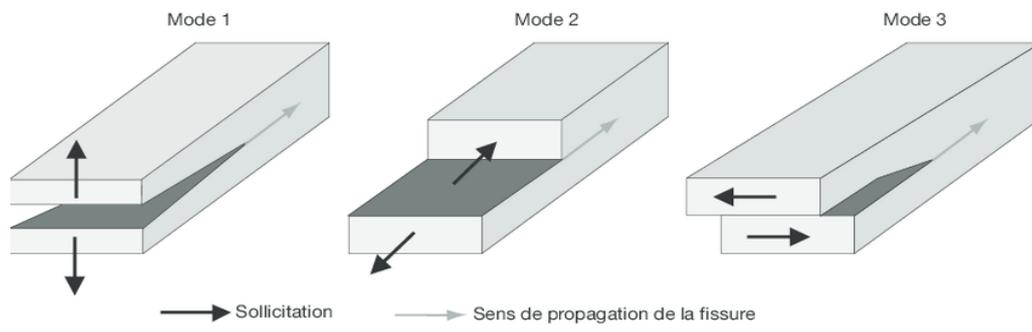


Figure 29 : Les trois modes de fissuration.

CHAPITRE IV

Etude de travaux réalisés

Introduction

De nos jours les tests de fatigues sur les matériaux de constructions et des assemblages mécanique sont devenues primordial pour déterminer la conformité, la sécurité et les durées de vie des matériaux et des structures assemblées. Parmi les divers méthodes d'assemblages connues on va s'intéressé aux assemblages faites avec une opération de soudage.

Le soudage entraîne un traitement thermique modifiant la microstructure du matériau et introduisant des contraintes résiduelles. Cette modification engendre un comportement différent de celui du matériau de base, surtout dans le cas de la tenue en fatigue.

L'utilisation très répandue des techniques de soudage en construction mécanique et particulièrement dans les domaines « sensibles » tels que l'aéronautique, les réservoirs sous pression et le nucléaire a rendu nécessaire, pour des impératifs de sécurité notamment, le développement des études touchant aux problèmes de ruptures de tels assemblages.

En effet, les joints soudés sont toujours des zones privilégiées d'amorçage des fissures, du fait d'un certain nombre de « défauts » inhérents à ce type de structure dont les principaux sont:

- La discontinuité géométrique pouvant provoquer des concentrations de contraintes.
- L'hétérogénéité mécanique liée à la juxtaposition de 3 matériaux (métal de base, métal fondu et zone affectée thermiquement) au moins, pouvant présenter des comportements mécaniques différents.
- L'hétérogénéité à l'échelle de la microstructure (dans la Z.A.T. principalement), résultant des cyclages thermiques induits par le processus de soudage.

Cependant la résistance à la fatigue des joints soudés ne dépend pas seulement des propriétés du métal de base et du métal d'apport employé, mais aussi de la présence de défauts géométriques de surface ou de défauts internes (soufflures, manques de pénétration). De nombreux travaux montrent qu'à partir de tels défauts le stade d'amorçage de la fissure de fatigue peut être réduit et qu'en conséquence une grande partie de la vie des assemblages soudés sollicités en fatigue se déroule en propagation.

De nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine des essais de fatigue. On présente dans ce qui suit une synthèse de quelques travaux réalisés ces dernières années.

Etude expérimental sur des expériences précédentes :

I. Etude 1

Dans cette expérience faite par le Dr. Abdulkader Zalt sur sa thèse « Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudé de type caisson, nous allons voir :

- 1- Les changements métallurgiques et des propriété mécanique causé par l'opération de soudage
- 2- L'impact des défauts de soudure sur la résistance à la fatigue

I. Présentation générale du matériau

1.1. Le matériau utilisé

Le matériau utilisé pour cette est expérience est le S355M qui est un acier de construction (S) qui est obtenue par laminage thermomécanique (M), sa limite d'élasticité minimal à température ambiante est de 355 MPa.

Les caractéristiques mécanique et la composition chimique sont présentée dans le Tableau 3 et 4.

Tableau 3 : Caractéristique mécanique de l'acier S355M [15]

Norme	Nuances	Limite d'élasticité minimale R_e pour une épaisseur nominale D 16mm MPa	Résistance à la traction R_m pour une épaisseur nominale D 40mm MPa	Allongement minimal A %	Essai de flexion par choc	
					Temp. °C	Energie absorbée min. J
EN 10025-4: 2004	S355M	355	450-630	22	-20	40

Tableau 4 : Composition chimique de l'acier S55M [15]

	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %	Nb %	V %	Ti %	N %	C_{eq} %
S355M	0.14	1.6	0.03	0.025	0.5	0.02	0.55	0.3	0.5	0.1	0.05	0.1	0.05	0.015	0.39

2. Essais de traction statique et de micro-dureté

Des essais de traction statique et des essais de micro-dureté ont été réalisés par l'auteur pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette soudée de l'acier S355M et la micro-dureté du métal de base (MB), ainsi que la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF).

2.1. Essai de traction statique sur éprouvette non soudée

Trois essais de traction statique ont été réalisés suivant la norme NF EN 10002 sur des éprouvettes non soudées de dimension montrée dans la (Figure 30)

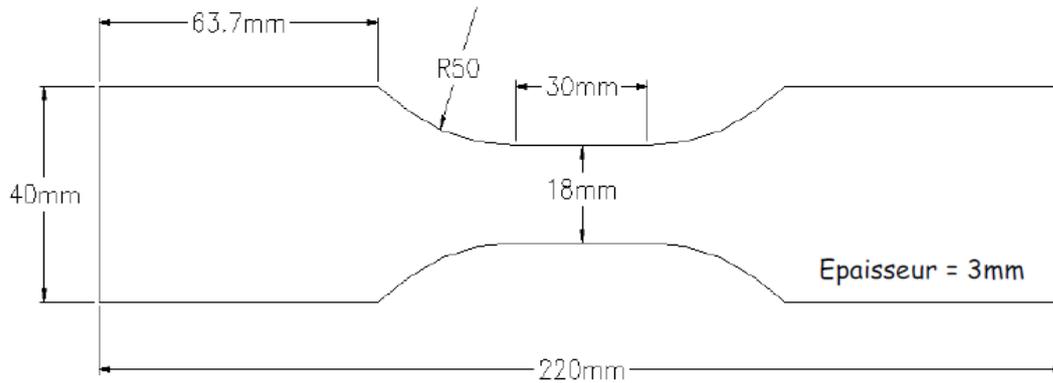


Figure 30 : Dimension de l'éprouvette utilisée dans l'essai statique [15]

2.1.1. Résultat de l'essai de traction statique sur le métal de base

La loi de comportement du matériau de base à la traction est montrée dans la (Figure 31) et les résultats sont reportés dans le tableau 5

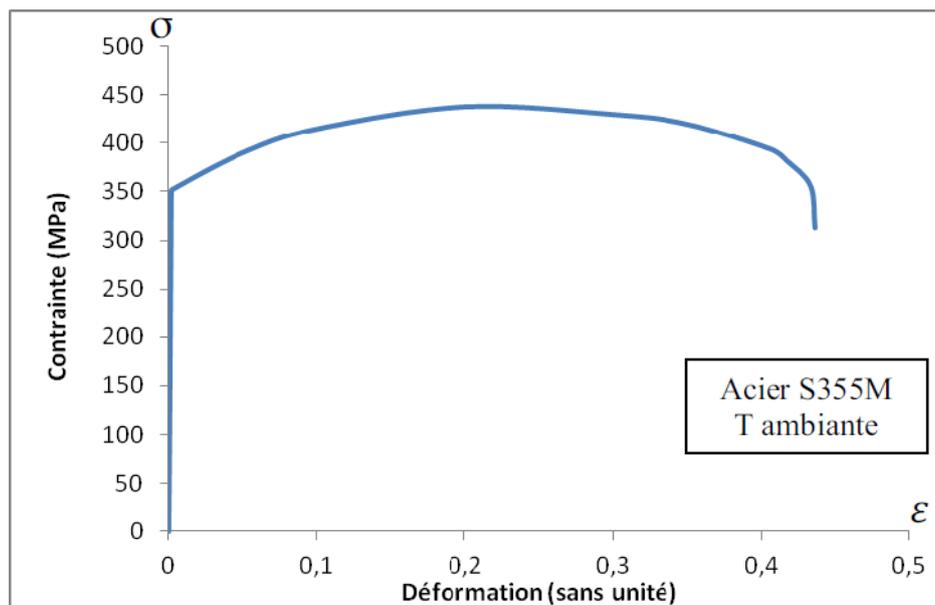


Figure 31 : loi de comportement statique du S355M [15]

Tableau 5 : caractéristique mécanique du S355M [15]

Module de Young E (MPa)	Limite d'élasticité e (MPa)	Résistance ultime $_{max}$ (MPa)	Allongement à rupture (%)
209480	350	440	42

Les résultats obtenus et les caractéristiques mécaniques fournies par le constructeur sont similaires.

2.2. Essai statique sur éprouvette soudé

Un essai de traction sur une éprouvette soudée selon la norme NF EN 10002, l'auteur n'a pas cité le type de soudage utilisé. La forme et les dimensions de cette éprouvette sont présentées dans la (Figure 32) :

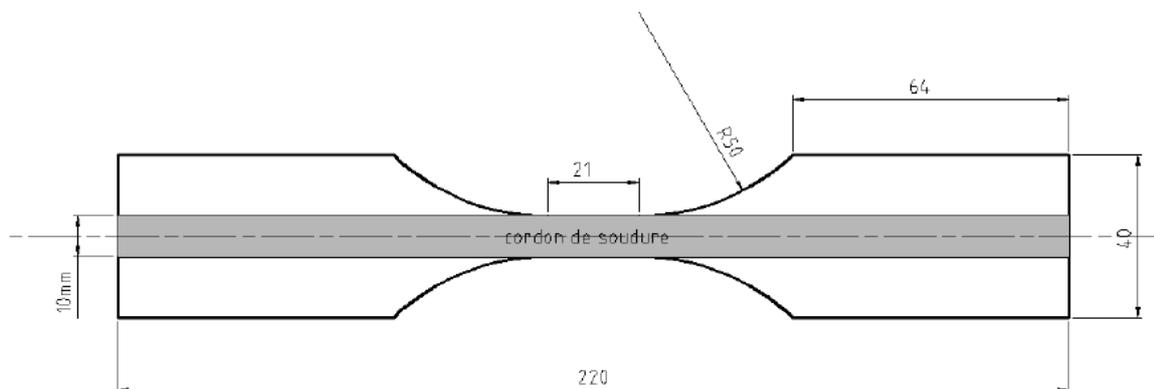


Figure 32 : Dimension de l'éprouvette de soudée de traction et de fatigue [15]

Les résultats obtenus par ces essais sont présentés dans le Tableau 6 la loi de comportement de l'éprouvette soudée est montrée dans la figure 33 :

Tableau 6 : Caractéristique mécanique de la soudure [15]

Module de Young E (MPa)	Limite d'élasticité e (MPa)	Résistance ultime $_{max}$ (MPa)	Allongement à rupture (%)
176819	390	485	15

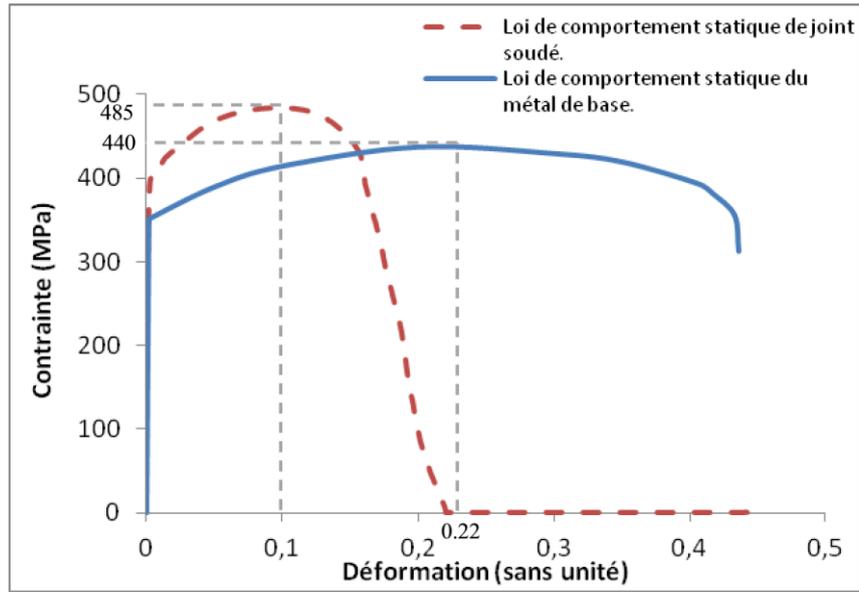


Figure 33 : loi de comportement du métal de base et du joint soudé [15]

Un durcissement est constaté dans le joint soudé par rapport au métal de base (résistance maximal plus élevé), qui est causé par le traitement thermique résultant de l'opération de soudage (la trempe).

2.3. Essai de micro dureté

La micro-dureté est mesuré dans chaque zone du joint soudés (MF), ZAT ainsi que le métal de base (MB).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Micro-dureté du joint soudé, mesuré en (Hv)

Métal de Base (MB)	Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	Métal fondu (MF)
166 Hv	220 Hv	228 Hv

Le durcissement constaté précédemment est confirmé par le test de micro-dureté.

3. Essai de fatigue

Les types d'essais de fatigue réalisé dans cette étude :

- 1- Fatigue en flexion 3 points sur des caissons soudés.
- 2- Fatigue en traction uni-axial sur des éprouvettes soudées arasées (éprouvette de référence).
- 3- Fatigue de traction oligocyclique sur l'éprouvette de référence.

3.1. Essais de fatigue en flexion 3 points

L'essai de fatigue a été réalisé sur des éprouvette en forme de caisson soudé de 1200mm de longueur et une section carrée (100X100mm), fabriquée à partir de tôles d'acier S355M (épaisseur de 3mm). Le procédé de soudage utilisé est le soudage TIG.

Le principe de l'essai consiste à appliquer une force axiale au milieu d'un caisson soudé porté par deux appuis séparés de 1000mm. La charge est appliquée dans le côté de quatre cordons de soudure, Figure 34.

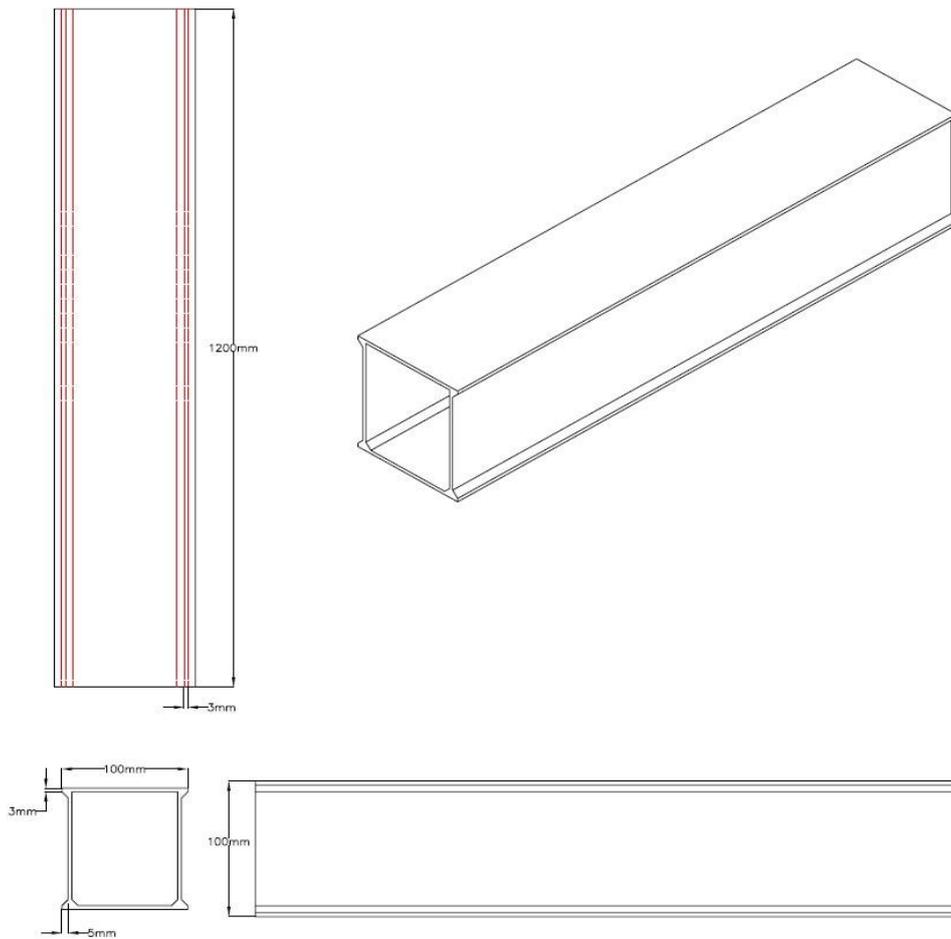


Figure 34 : Schéma du caisson soudé [15]

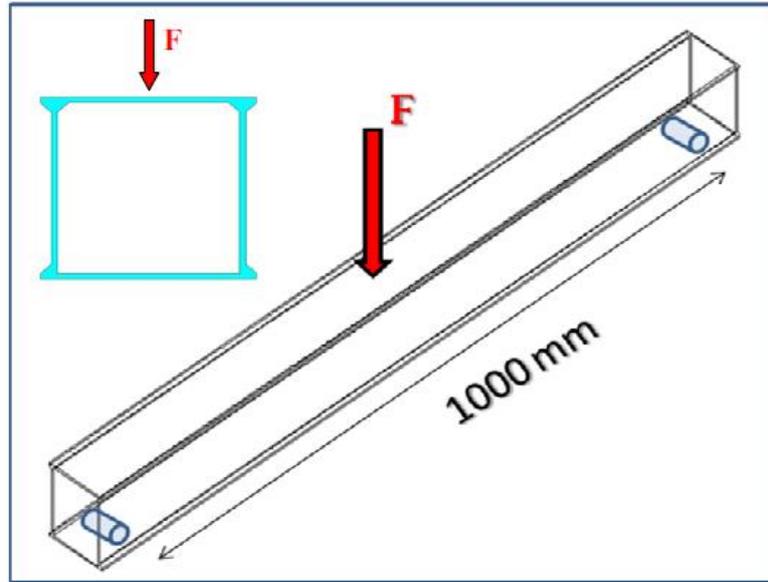
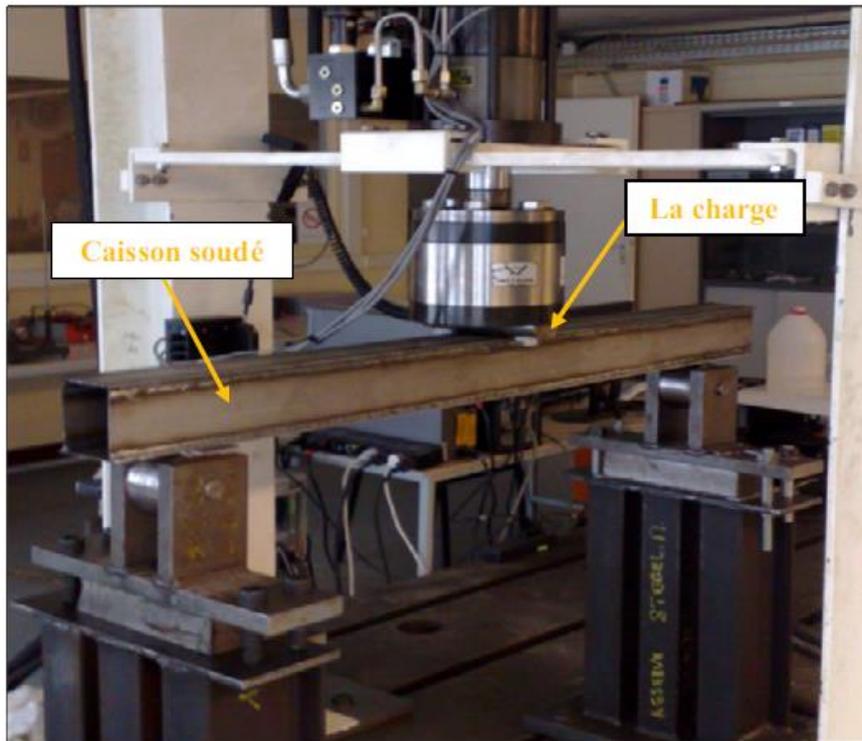


Figure 35 : Application de la charge de fatigue sur les caissons testés. [15]

Figure 36 : Essai de fatigue (flexion 3 points) d'un caisson soudé [15]



Les essais effectués jusqu'à la rupture des caissons sont présentés dans la figure 36, 11 éprouvettes ont été utilisé dans ce test. La courbe de Wöhler $\Delta\sigma = f(N_R)$ a été déterminée et présenté dans la figure 38.



Figure 37 : Rupture des caissons testé [15]

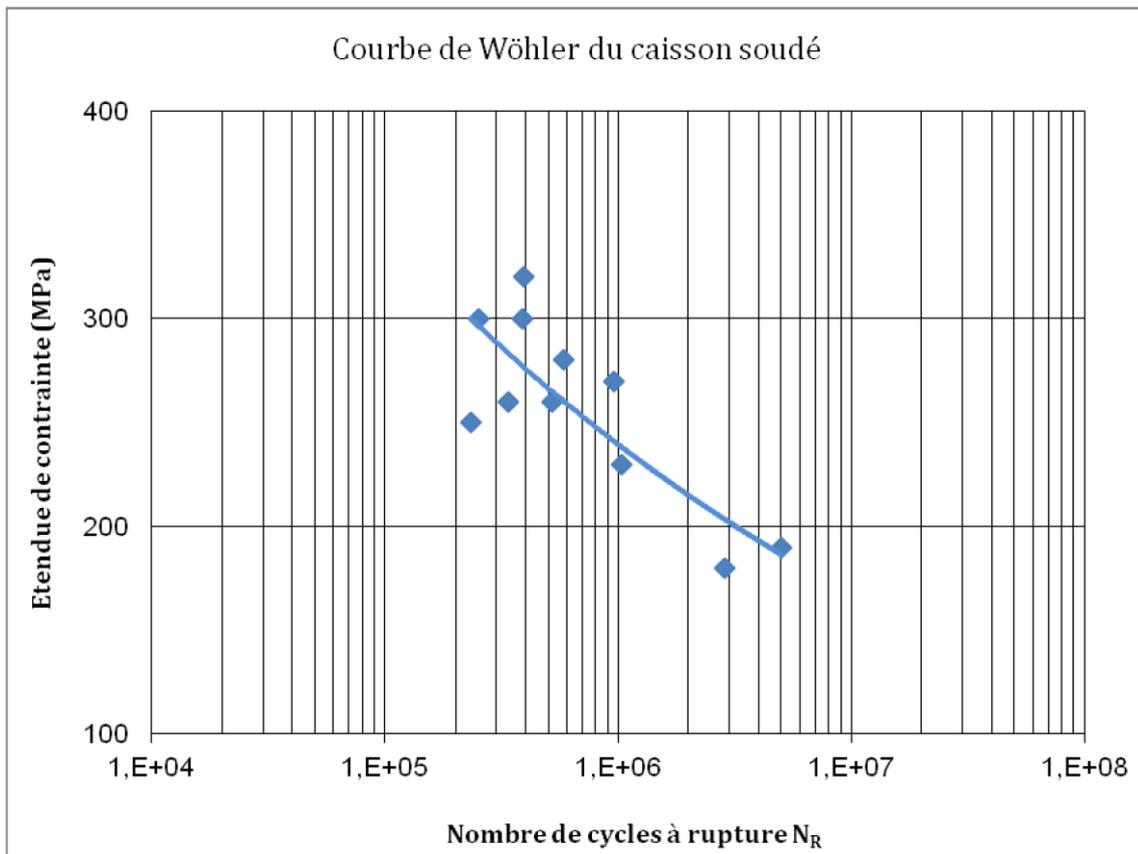


Figure 38 : courbe de Wöhler des caissons soudés en fatigue (flexion 3 points) [15]

3.2. Remarque

La dispersion des résultats est assez importante et cela est dû :

- Le soudage est manuel et brut, donc les cordons de soudure ne sont pas assez identiques.
- Les défauts introduits varient entre les caissons (manque de pénétration, caniveaux, fissures de solidification...etc.).
- Une présence de concentration de contraintes dans la zone de la soudure (pied de cordon) et près des défauts de soudage.

4. Mode de rupture du caisson soudés

L'auteur a cité que théoriquement la rupture aurait dû être au milieu du caisson chargé là où le moment de flexion est maximal et que la rupture devait subir dans le métal de base comme montré dans la (Figure 39).

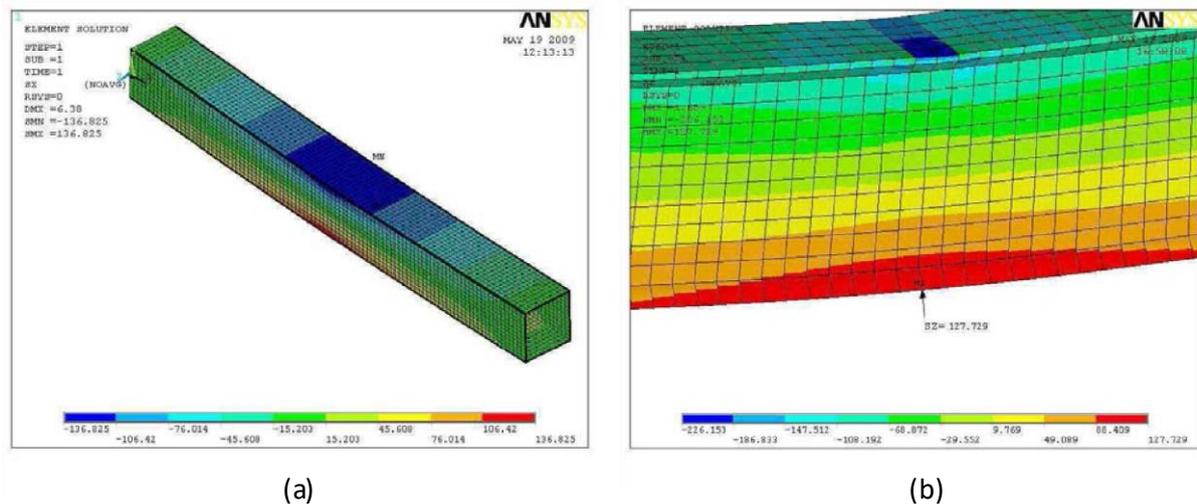


Figure 39 : Etude numérique simple (RdM) de caisson soudé en flexion 3 points. [15]

Après observation de la zone de rupture des caissons soudés, on constate que l'amorçage de la fissure n'est pas dans le métal de base mais dans la soudure.



Figure 40 : Rupture loin du moment de flexion maximal [15]

A partir d'une examinations des ruptures des caissons soudés nous pouvons citer ce qui suit

La majorité des cas, un défaut de soudure situé à la surface du cordon de soudure qui représente une reprise de soudage est la cause de la rupture. Dans les autres cas l'auteur a utilisé pour cause d'absence de défaut clair un microscope à balayage et a trouvé un deuxième type de défaut situé à la racine de la soudure, qui représente un manque de pénétration ou manque de fusion.

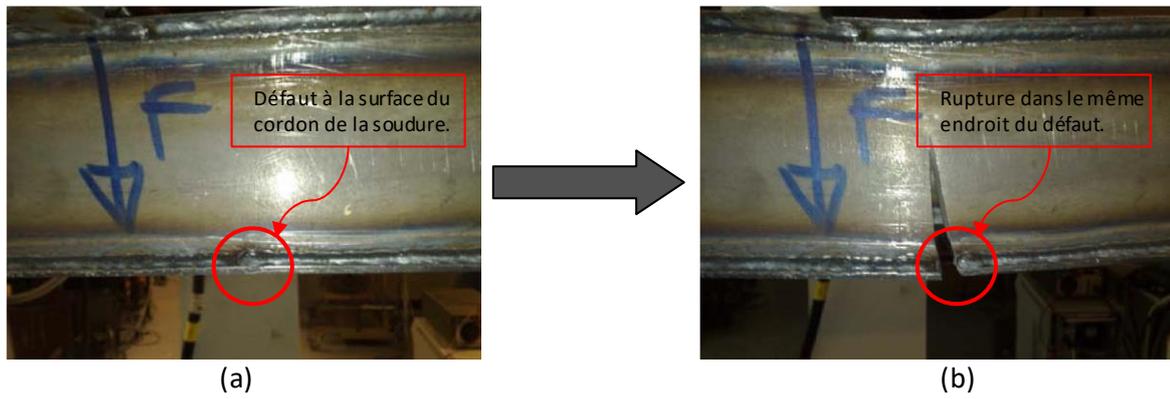


Figure 41 : influence d'un défaut superficiel dans la soudure [15]

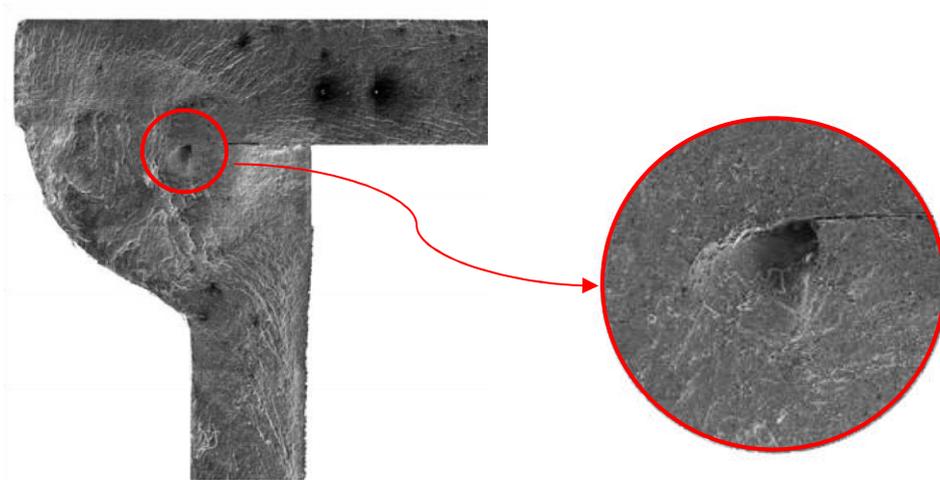


Figure 42 : Défaut à la racine de la soudure, observé par un microscope à balayage [15]

5. Essais de fatigue en traction uni-axial

Un essai de fatigue en traction uni-axial a été réalisé sur une éprouvette soudée (soudure longitudinale) et arasée afin de diminuer les défauts.

La cause de cet essai est que le cordon de soudure inférieur est soumis à une charge de traction. Là où la soudure est longitudinale, est aussi plus concordante avec cette étude.

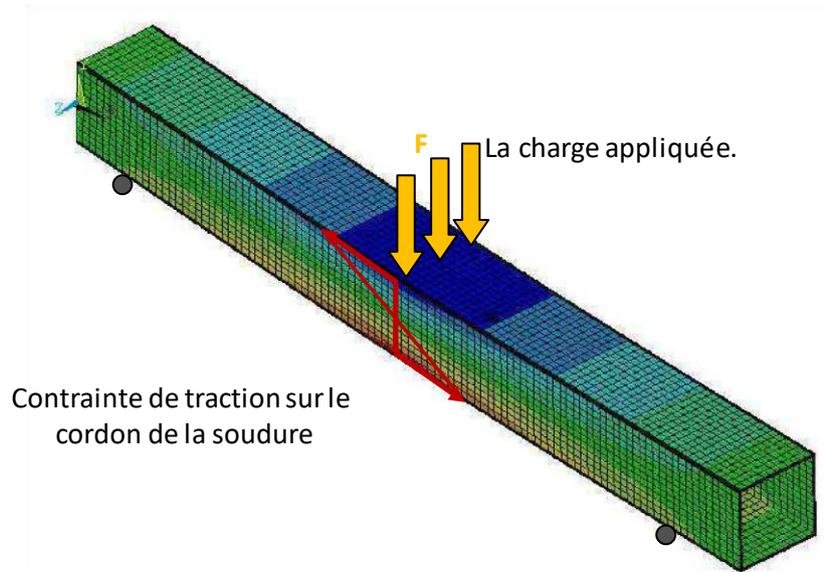


Figure 43 : mode de charge de caisson en flexion 3 points [15]

10 éprouvette soudé arasé sont utilisé dans cette essai, La forme et les dimensions de ces éprouvettes sont présentées dans la (Figure 44).

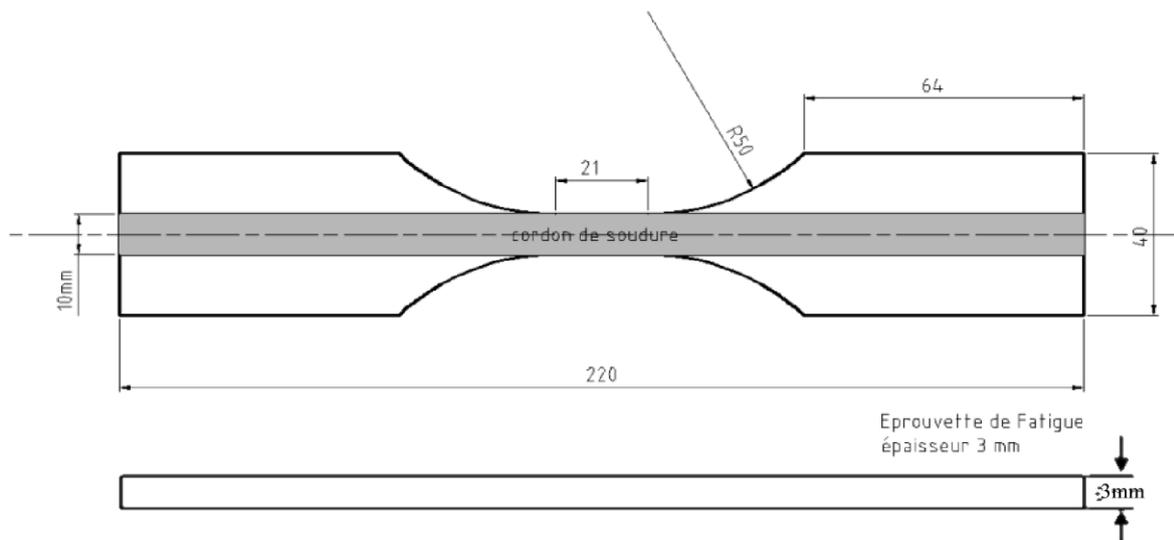


Figure 44 : éprouvette d'essai de fatigue en traction (éprouvettes de références) [15]

La variation de la charge est maintenue constante. Les essais sont effectués à une fréquence de 30 Hz avec un rapport de charge de 0.1 et à température ambiante. Le type de chargement est sinusoïdal à amplitude constante.

5.1. Résultat

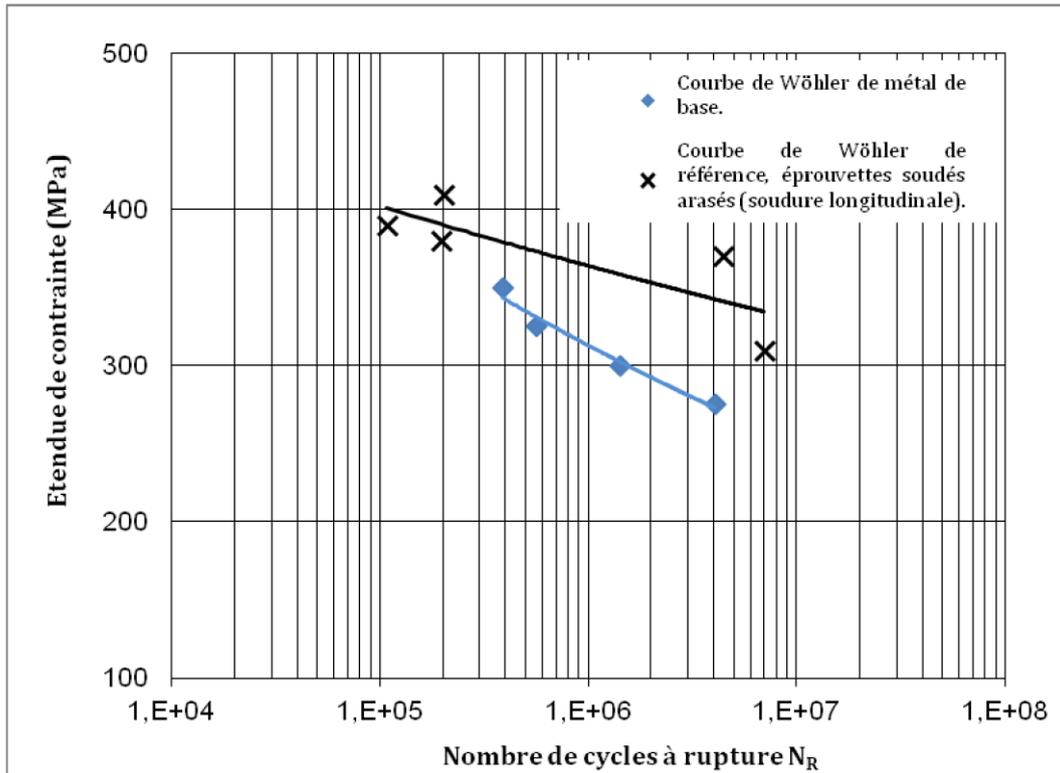


Figure 45 : courbes expérimentales des éprouvettes de référence et de métal de base S355M [15]

Nous remarquons que les éprouvettes soudées ont une tenue en fatigue plus importante que celle du métal de base, cela peut s'expliquer par l'augmentation de la limite d'élasticité et la résistance maximale dans le cas de joints soudés.

6. Essai de fatigue de traction oligocyclique

L'essai de fatigue oligocyclique en traction/compression, est réalisé à température ambiante. Il est piloté en déformation totale purement alternée imposée, contrôlée par un extensomètre. L'amplitude de déformation imposée varie entre (0.3% à 0.9%), à vitesse de déformation de 10^{-3} s^{-1} .

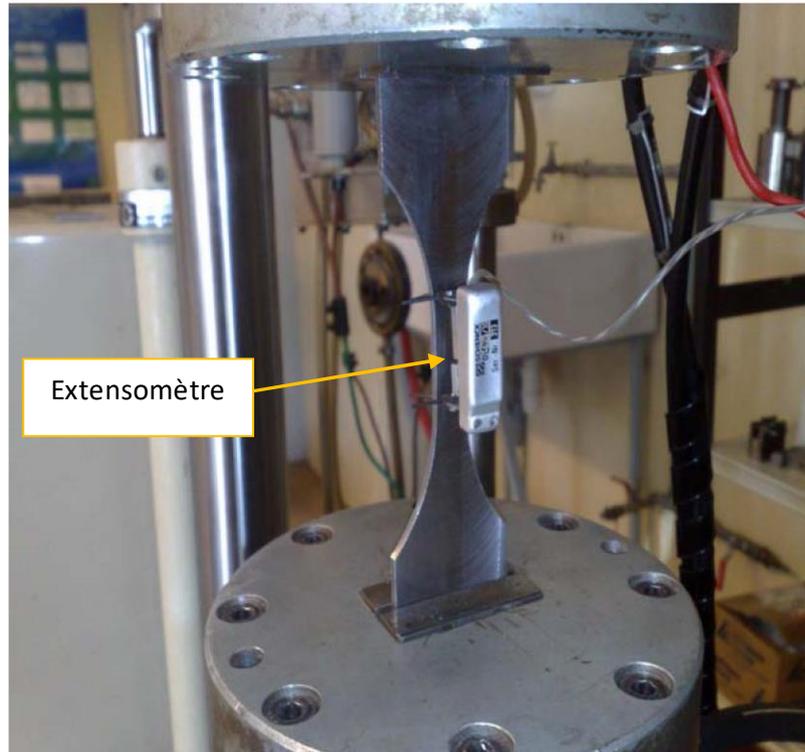


Figure 46 : Eprouvette avec l'extensomètre. [15]

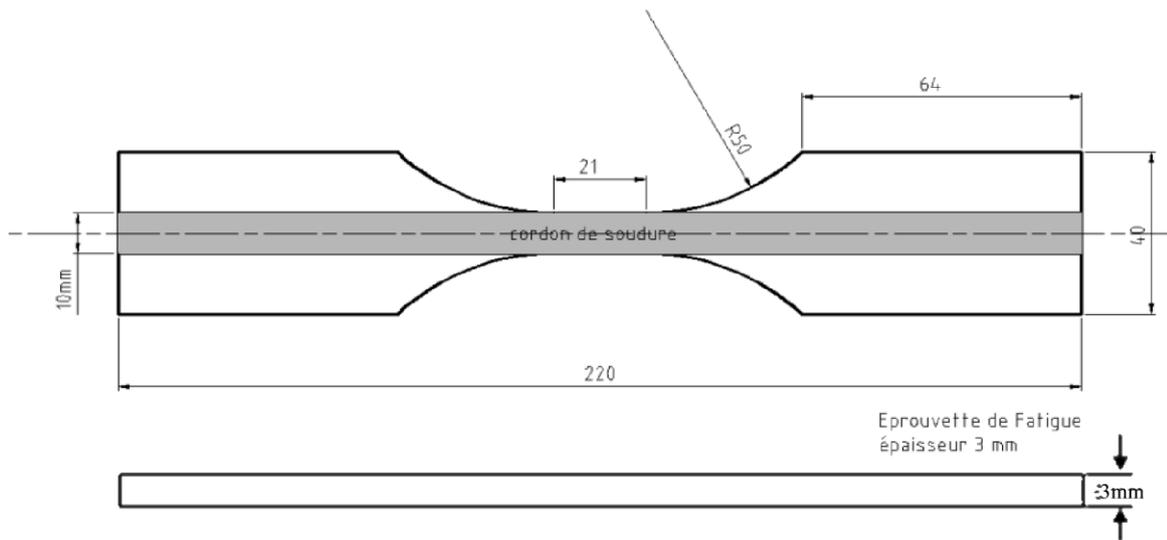


Figure 47 : Schéma d'éprouvette d'essai de fatigue oligocyclique. [15]

6.1. Résultat

La loi de comportement cyclique, du matériau soudé, obtenue est présentée sur la (Figure 48). Les caractéristiques mécaniques, cycliques et statiques du matériau soudé, sont rassemblées dans le Tableau 8.

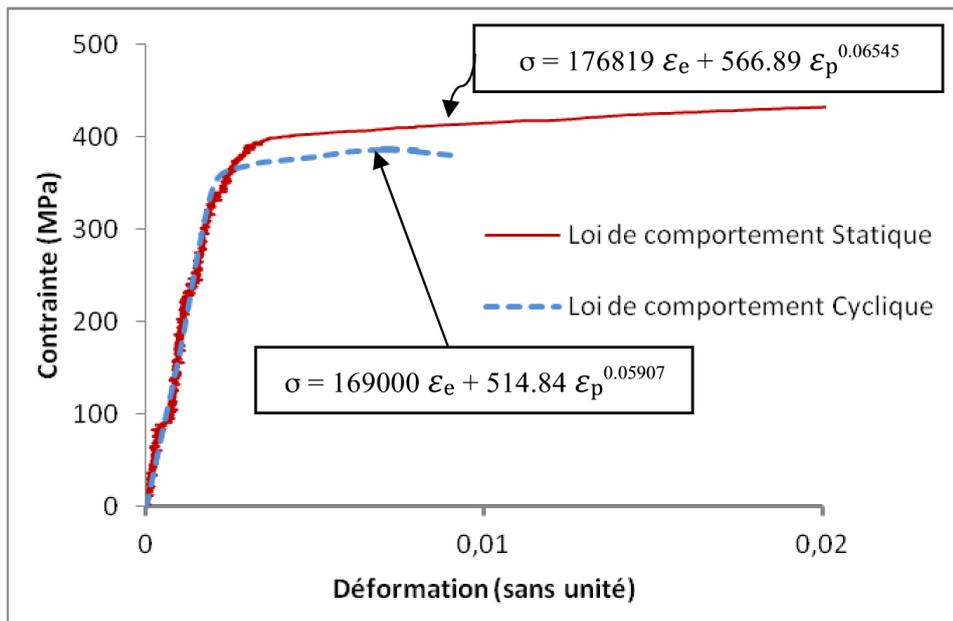


Figure 48 : loi de comportement cyclique et statique du matériau soudé [15]

Tableau 8 : caractéristique cyclique et statique du matériau soudé (éprouvette de référence)

	Module de Young E (MPa)	Limite d'élasticité R _e (MPa)
Traction Cyclique	169000	340
Traction Statique	176819	390

Un adoucissement cyclique du matériau en fatigue par rapport au cas statique est démontré dans ces résultats. Ces résultats démontrent que la fatigue est la cause principale de la plupart des cas de rupture des structures.

7. Conclusion

Nous pouvons en déduire de cette étude que :

- 1- La fatigue est la cause principale de la plupart des cas de rupture des structures.
- 2- L'initiation de la fissure est dans la plupart des cas dans la soudure, plus précisément dans les défauts de soudure soit à la surface de cordon ou à la racine de la soudure.
- 3- Le traitement thermique résultant de l'opération de soudage (Trempe) cause un changement de structure métallurgique et par ainsi un change de caractéristique mécanique qui est un durcissement de la ZAT et du métal fondue (MF) qui engendre une diminution sur la résistance à la fatigue.

II. Etude 2 :

Notre deuxième étude va se consacrer sur les travaux réalisés par [A. ALIOUA, B. BOUCHOUICHA, M. ZEMRI] [1] sur le comportement des différentes zones d'un joint de soudure vis-à-vis à la résistance à la fatigue

1- Présentation générale du matériau

1.1. Le matériau utilisé

Le test est réalisé sur l'acier A48AP choisit pour la fabrication des citernes à gaz et les circuits vapeur vive principal VVP. Le type de soudage utilisé est le soudage manuel à l'électrode enrobée (EE) et le soudage automatique à l'arc (FF).

Les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques de l'acier A48AP et celles du métal d'apport (Électrode enrobée) sont données dans les tableaux 9 et 10.

Tableau 9 - Compositions chimiques de l'acier A48AP et du métal déposé.

Élément (%)	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V
A48AP	0.198	0.021	0.01	0.207	0.77	0.135	0.09	0.03	0.27	0.023	0,02
Métal déposé	0.074	0.021	0.017	0.35	0.73	0.02	0.03	0.004	0.05	0.006	0,015

1.2. Propriétés mécaniques

Les résultats des essais de caractérisation (traction) sont représentés dans le tableau 10.

Tableau 10 - Propriétés mécaniques des trois zones

	Propriétés mécaniques				
	Re N/mm ²	Rm N/mm ²	A (%)	k	n
MB	325	400	20	980	0,401
ZAT	405	600	25	836	0,302
MF	350	531	15	1009	0,508

Une remarque citée sur la limite d'élasticité, qui est supérieure dans la ZAT à celle du métal de fondu (MF) qui est supérieure à celle du métal de base (MB).

2- Essais de fissuration et mesures

2.1. Le type d'éprouvette

L'éprouvette utilisé dans cette expérience est de type CT50 d'épaisseur 07 mm, conformément à la norme ASTM-E-647, (voir figure 49).

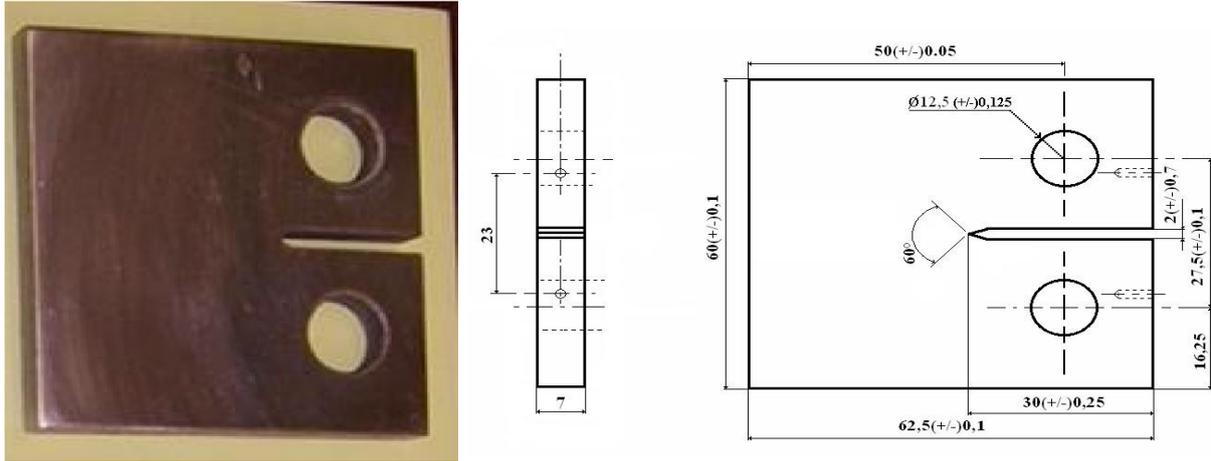


Figure 49 : Éprouvette CT50 utilisé pour les essais de fissuration. [25]

2.2. Lieu du test de fatigue et model de machine utilisé

Les essais de fissuration ont été effectués à l'université de Sidi Bel Abbés, sur une machine électrohydraulique asservie INSTRON de capacité 100 KN en statique et 50 KN en dynamique.

2.3. Paramètre du test de fatigue

Les essais ont été conduits à l'air ambiant et pour une même valeur de rapport de charge R à une fréquence nominale de 25 Hz dans les trois zones : métal de base, métal fondu et Zone affectée thermiquement ZAT (voir figure 50). Les éprouvettes utilisées ont été polies mécaniquement au papier et sollicitées dans le sens TL.

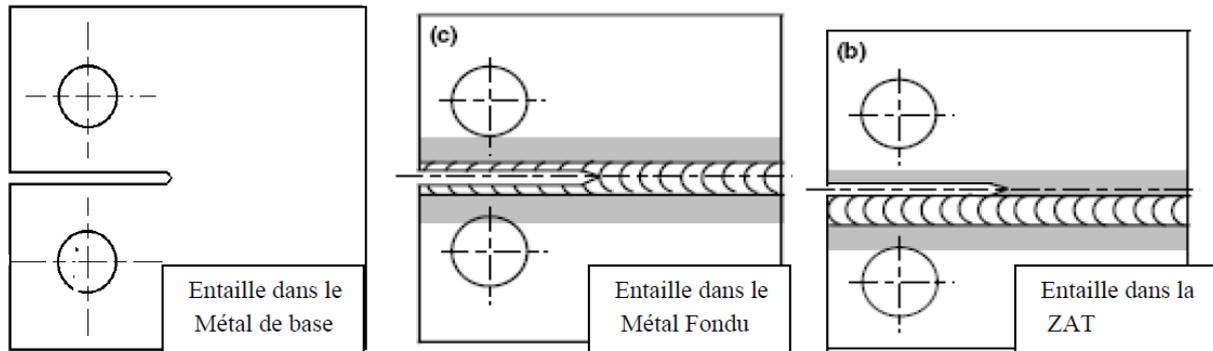


Figure 50 : Schéma des différentes zones étudiées [25]

3- Résultats et discussion

3.1. Vitesses de propagation

L'essai a été effectué sur le matériau avec une vitesse de fissuration comprises entre $4 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-2}$ mm/cycle à l'air ambiant et avec un rapport de charge ($R=0,1$) dans les trois zones qui constituent le joint de soudure. Les valeurs de ΔK varient dans chaque zone de soudage :

- 31 à 80 MPa m dans le métal de base (MB)

- 29 à 80 MPa m dans la zone affectée thermiquement (ZAT)
- 29 à 70 MPa m dans le métal fondu (MF)

Ils ont remarqué que les courbes présentent une allure quasi rectiligne sur une grande partie du domaine exploré, pouvant être présentée par une loi de PARIS de la forme :

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

L'exposant (m) est de l'ordre de 5. Les résultats des essais de fissuration obtenus dans les trois zones consignés dans le tableau 11

Tableau 11 - Equations caractérisant la Loi de Paris dans les différentes zones étudiées

Désignation	Loi de Paris	ΔK
MF	$da/dN=1,08e^{-12}\Delta K^{4.2}$	29 à 70 MPa.m ^{1/2}
MB	$da/dN=8,63e^{-11}\Delta K^{4.3}$	31 à 80 MPa.m ^{1/2}
ZAT	$da/dN=6,33e^{-11}\Delta K^{4.8}$	29 à 80 MPa.m ^{1/2}

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 51 et 52.

A même niveau de ΔK , on observe généralement une vitesse de fissuration da/dN inférieure dans la ZAT à celle du métal de base (MB) qui est à son tour inférieure à celle du métal fondu.

Observation des auteurs sur la vitesse de fissuration da/dN concernant les différentes éprouvettes dans les trois zones (MB – MF – ZAT) :

- A même niveau de ΔK , la vitesse de fissuration da/dN est inférieure dans la ZAT à celle du métal de base (MB) qui est à son tour inférieure à celle du métal fondu.
- L'écart des vitesses dans les trois zones diminue lorsque ΔK augmente.
- Aucune déviation de la fissure n'est de son axe de propagation n'est remarquée.

Ils ont cité que certains auteurs [26] ont montré qu'une déviation de la fissure de son plan initial vers le métal de base pouvait subir au-delà d'une certaine valeur de ΔK , cette déviation est causé par la différence de caractéristiques mécaniques entre les trois zones.

Dans ce test pour (acier au carbone A48AP) aucune déviation n'a été remarqué.

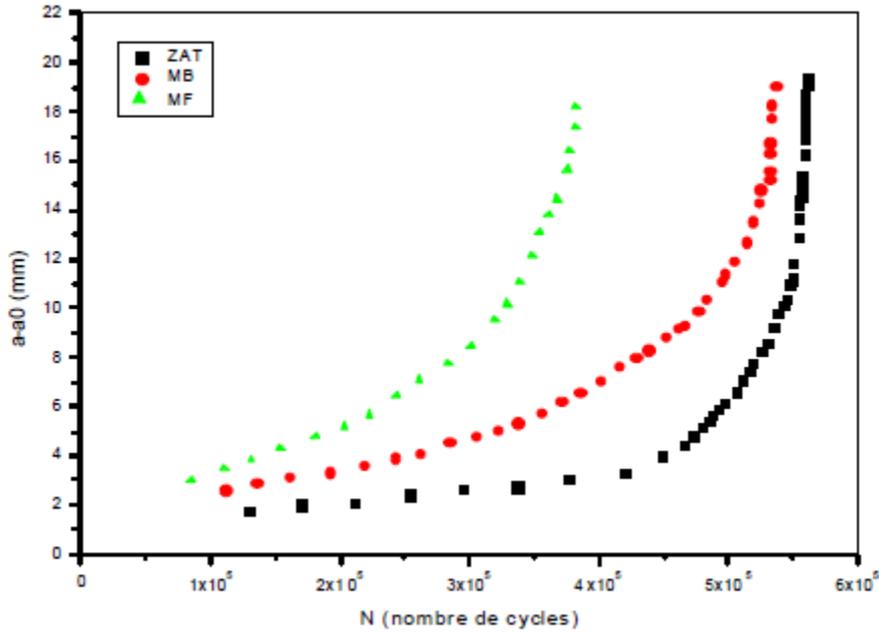


Figure 51 : Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les trois zones [25]

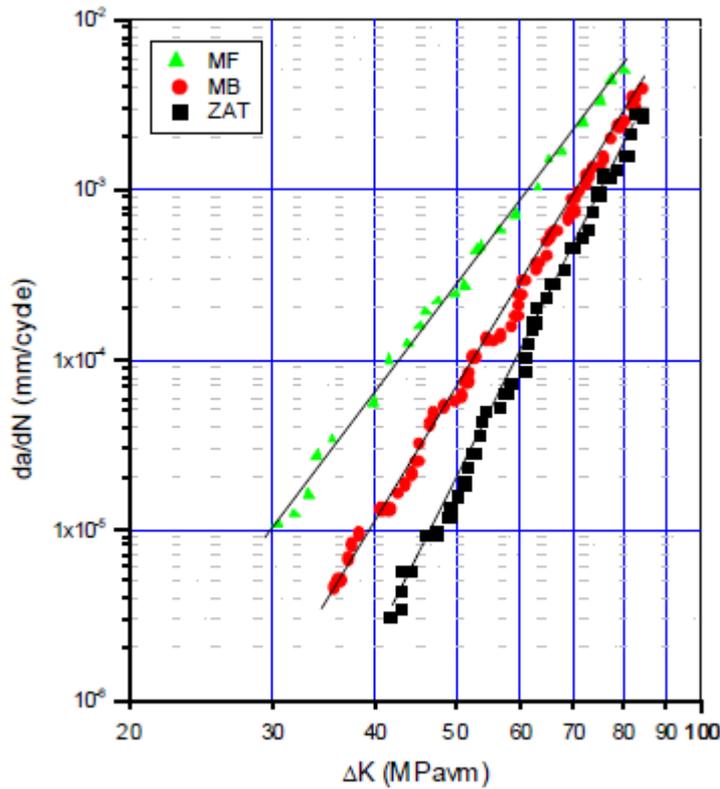


Figure 52 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de ΔK pour les trois zones [25]

4- Évolution de l'énergie Q en fonction de ΔK :

Pour pouvoir observer l'évolution de l'énergie hystérétique Q dissipée pendant un cycle en fonction de ΔK pour un rapport de charge $R=0,1$ dans les trois zones étudiées (MB – ZAT – MF), ils ont réduit la fréquence d'essai à 0.02 Hz en représentant l'ouverture de fissure δ en fonction de la charge P.

L'énergie Q est déterminée par une intégration numérique des cycles ($P-\delta$), l'expression de cette énergie est obtenue le programme de traitement LABVIEW qui calcule l'aire de cette boucle.

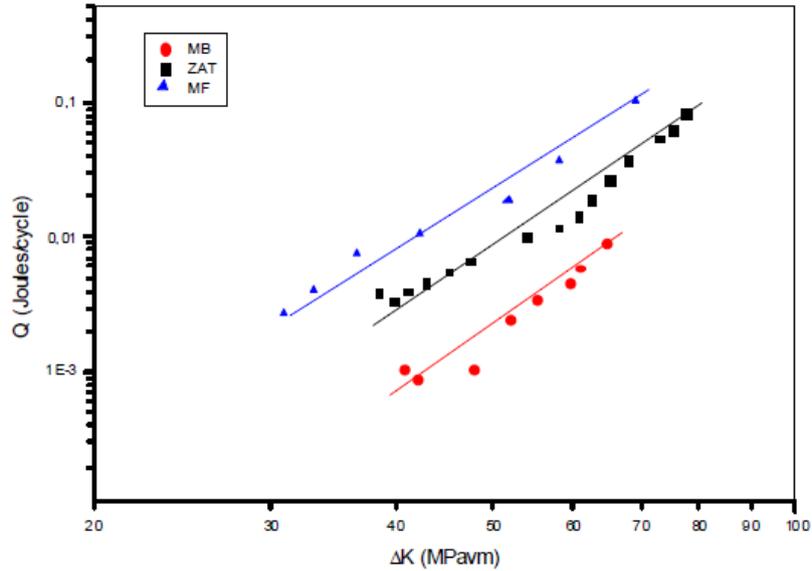


Figure 53 : Évolution de l'énergie hystérétique en fonction de ΔK [25]

La remarque obtenue est que l'augmentation de ΔK cause l'augmentation de Q pour les trois zones étudiées.

Conclusion

Ce que nous pouvons conclure de cette étude est le suivant :

- 1- La zone à celle d'une grande vitesse de fissuration est la ZAT et la plus basse vitesse de fissuration noté est celle du MF ceci dans un intervalle bas de ΔK ($\Delta K < 31 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).
- 2- Un bon soudage propre et sein diminue son influence sur le changement métallurgique qui en résultat ne fait pas dériver la trajectoire de la fissuration à cause des caractéristiques mécaniques presque identique.

Etude 3

Dans cette troisième expérience menée par F.Z. KETTAF, N.H. CHERIET, B. BOUCHOUICHA, intitulé « Étude Des Zones d'un Joint De Soudure d'une Eprouvette Sollicitée En Fatigue » dans la conférence internationale de soudage. A pour but de faire une simulation numérique sur le comportement des différentes zones d'un joint de soudure et de comparer les résultats avec les résultats obtenus expérimentalement.

Pour cela, l'auteur a utilisé le code de calcul des éléments finis ANSYS-WORKBENCH.

1. Présentation générale du matériau

1.1. Le matériau utilisé

Le matériau utilisé dans cette étude est le C48, les caractéristiques mécaniques sont citées dans le tableau 12

Tableau 12 : Caractéristiques Mécaniques Du Matériau C48

Matériaux	Propriétés mécaniques			
	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	k
Métal de Base (MB)	325	660	30	980
Zone affectée thermiquement (ZAT)	445	760	40	836
Métal fondu (MF)	420	720	35	1009

2. Simulation

2.1. Entrée des données

Pour débiter l'auteur a modélisé trois éprouvettes avec chacune son propre caractéristique mécanique :

- 1- Eprouvette avec des propriétés mécaniques de métal de base.
- 2- Eprouvette avec des propriétés mécaniques de métal fondu (MF).
- 3- Eprouvette avec des propriétés mécaniques de la zone affectée thermiquement (ZAT).

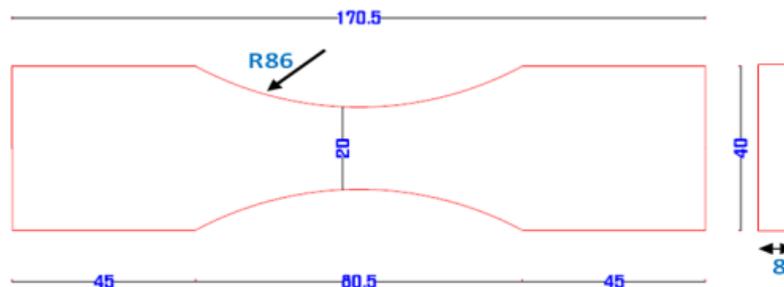


Figure 54 : les dimensions des éprouvettes utilisées pour notre simulation [27]

Les lois de comportement du matériau sont présentées dans la figure suivante

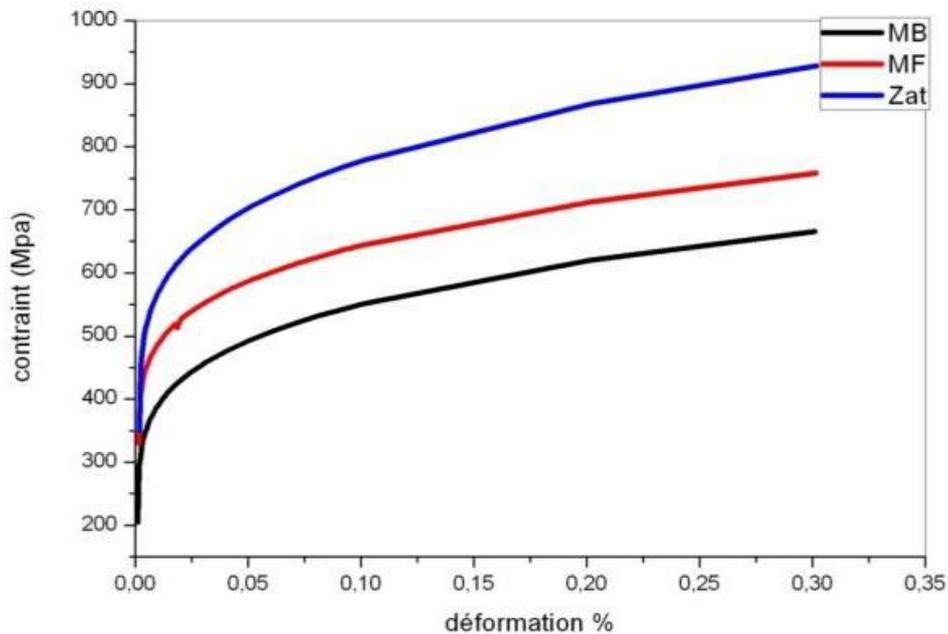


Figure 55 : lois de comportement de C48 [27]

Comme configuration pour l'analyse l'auteur a choisit d'entré le premier côté de l'éprouvette fixe et le deuxième côté qui doit être chargé par une force de 0.1 Newton comme charge initiale. Les données du nombre de cycle et de la charge sont importé partir du logiciel DELPHI.

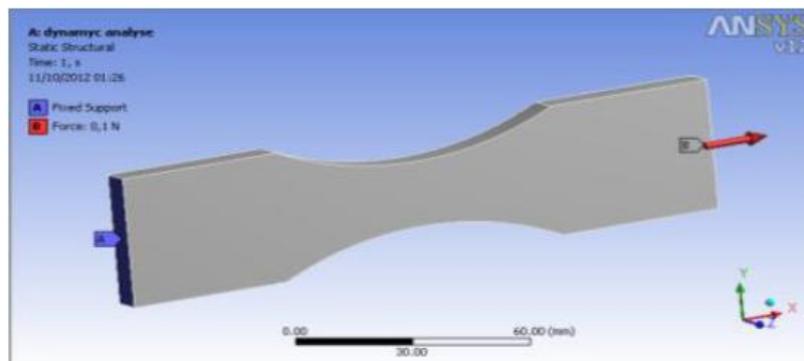
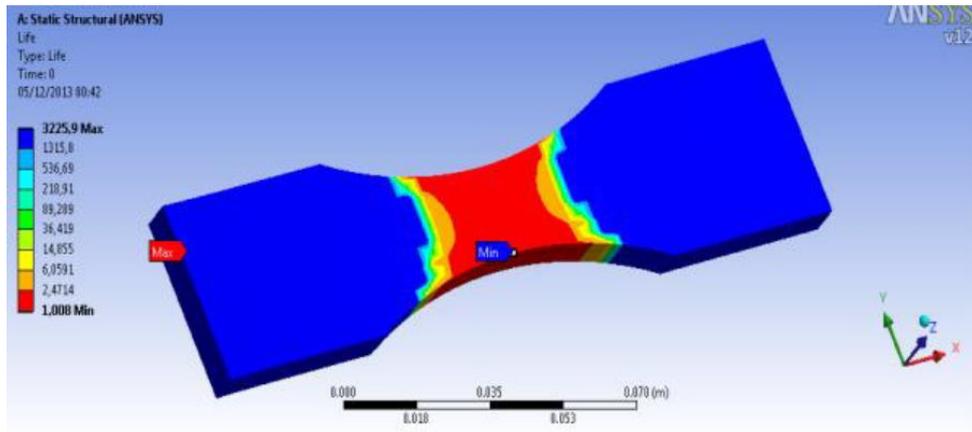


Figure 56 : Simulation de l'éprouvette [27]

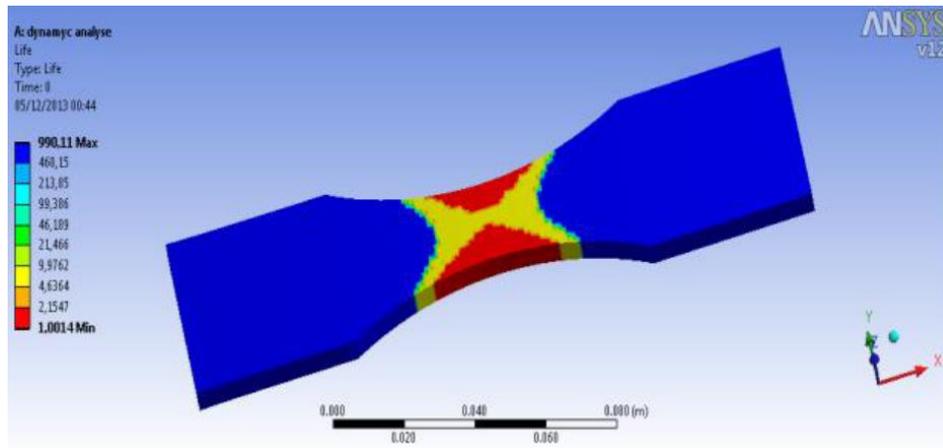
Pour le test l'auteur a fixé la force appliquée et a fait varier le nombre de cycle jusqu'à l'obtention de la valeur minimale de 1000 cycles qui est la valeur de la rupture de l'éprouvette au milieu.

2.2. Résultat de simulation

1)- éprouvette du métal de base (MB)



2)- éprouvette du métal fondue (MF)



3)- éprouvette de la ZAT

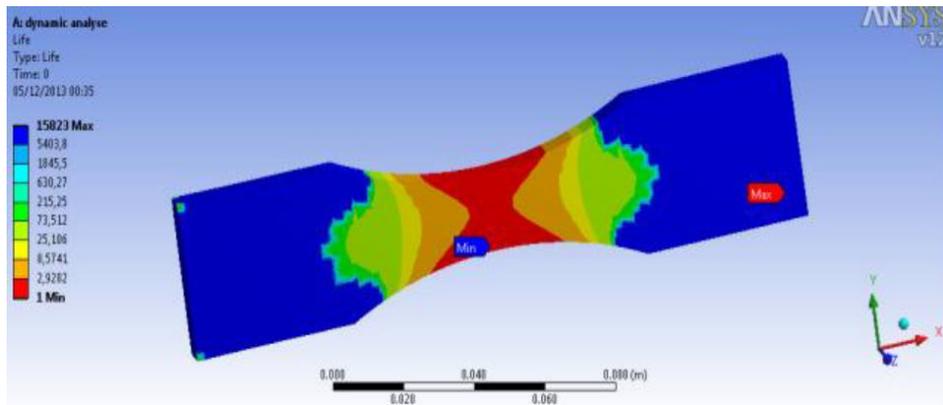


Figure 57 : Exemples de la simulation des éprouvettes sollicité jusqu'à la rupture [27]

Le graphe suivant présente les résultats obtenus :

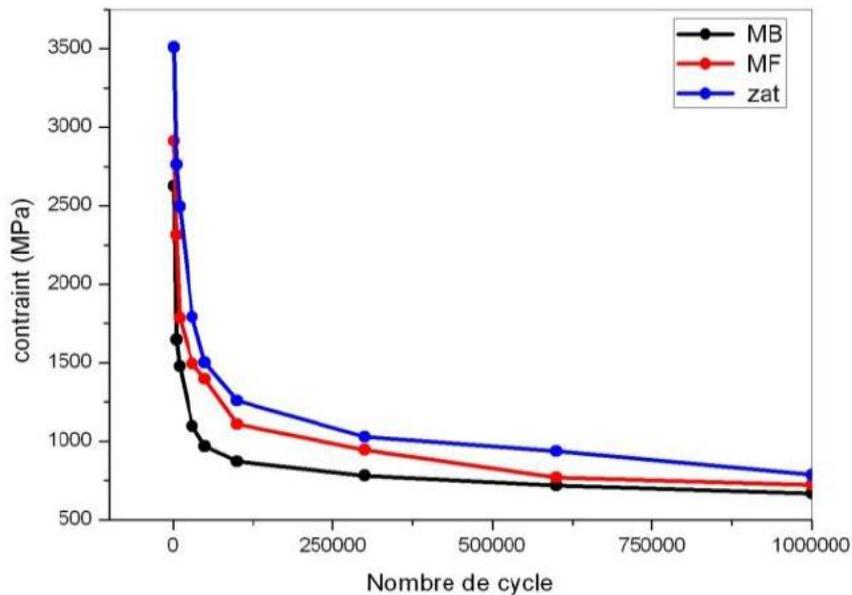


Figure 58 : Courbes de simulation des contraintes-nombres cycles (SN) [27]

A partir de la figure 58 on peut constater que :

- 1- L'éprouvette de la ZAT subit des valeurs maximales de contrainte.
- 2- Un écart entre 100 et 100000 cycles des trois matériaux dans le premier (domaine oligocyclique) qui décroît avec l'augmentation des cycles.

3. Comparaison des résultats expérimentale et les résultats de simulation

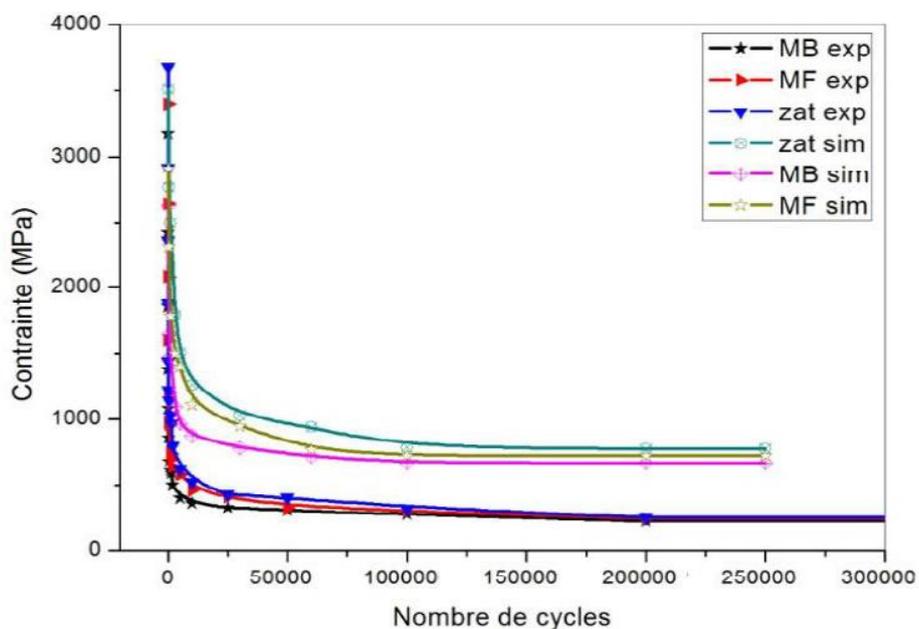


Figure 59 : Représentation comparative entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux. [27]

L'auteur a constaté que dans la figure les résultat expérimentaux et numériques présente la même allure mais avec un écart évalué de 13% de différence dans les contraintes appliquées.

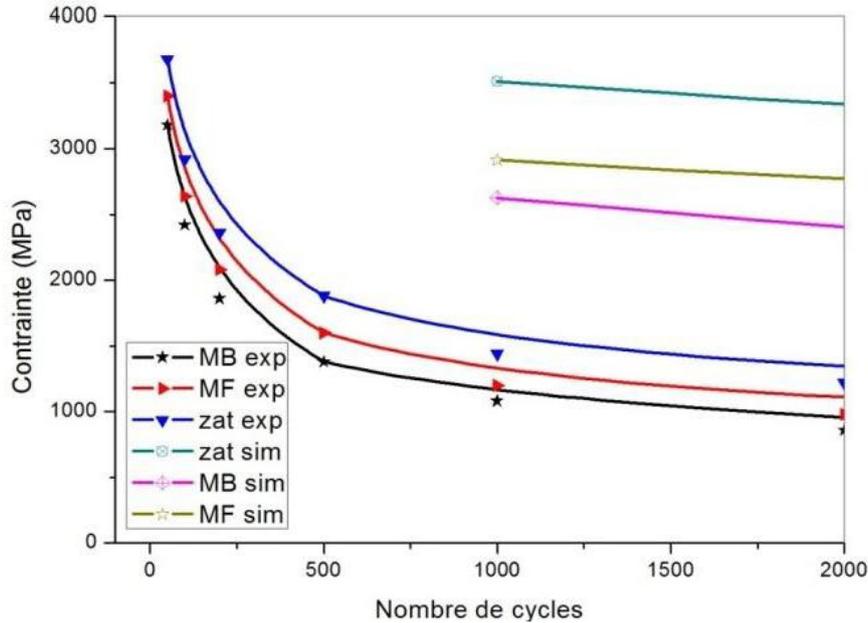


Figure 60 : étude comparative entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux d'intervalle de 100 à 2000 cycle. [27]

Pour un nombre de cycle entre 100 et 2000 l'auteur a cité que l'évolution des contraintes est très importantes dans les trois zones et qu'elle est de 6 fois l'ordre de la limite maximal (Figure 60). Tandis que numériquement cette évolution est négligeable jusqu'à 1000 cycles. Dans l'intervalle de 5000/20000 jusqu'à 200000 cycles les courbes vont présenter une allure identique avec une différence dans les contraintes appliquées (Figure 61), (Figure 62).

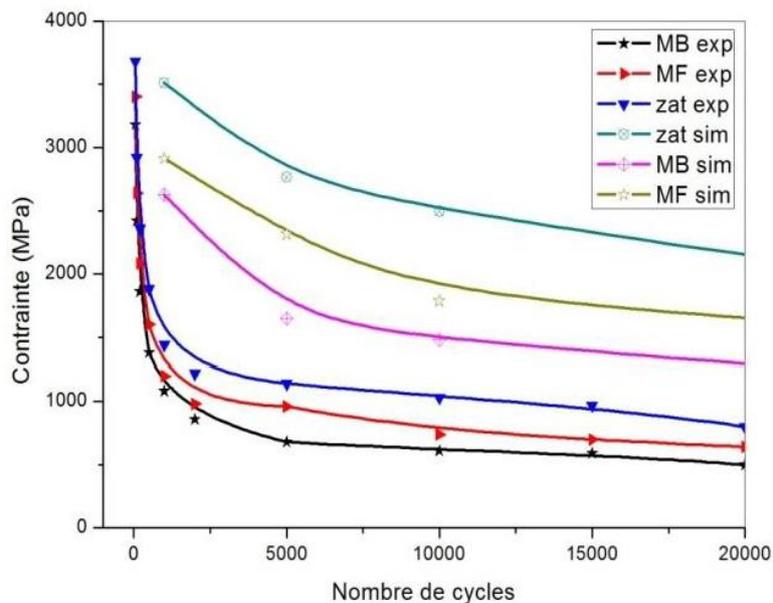


Figure 61 : étude comparative entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux d'intervalle de 100 à 20000 cycle. [27]

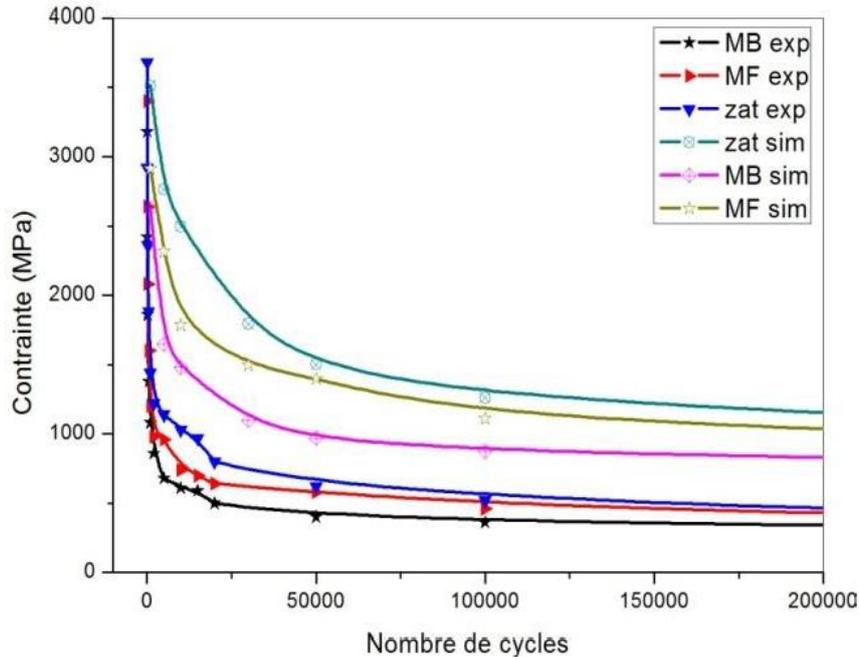


Figure 62 : étude comparative entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux d'intervalle de 100 à 200 000 cycle. [27]

Conclusion

Ce que nous pouvons conclure de cette expérience est comme suit :

- 1- Pour faire faire une simulation numérique de la durée de vie en fatigue des différentes zones d'un joint soudé il est nécessaire d'avoir les données des essais expérimentaux et les associer à l'essai numérique.
- 2- La marge de différence entre les deux résultats conclue par l'auteur est de 13% entre les résultats numériques et expérimentaux mais avec une même allure de durée de vie en fatigue.
- 3- Dans un nombre de cycles réduit, les résultats expérimentaux montrent que l'évolution des contraintes est très importante dans les trois zones, contrairement aux résultats numériques qui sont négligeables jusqu'à 1000 cycles.

Conclusion générale

Ce travail présente une étude sur le comportement des différentes zones d'un joint de soudure vis-à-vis de la résistance à la fatigue. Dans le premier chapitre nous avons vu les défauts qui peuvent se produire durant ou après une opération de soudage. Le deuxième chapitre cite les différentes propriétés qui peuvent influencer sur la résistance à la fatigue des assemblages soudés. En arrivant à l'avant dernier chapitre on constate la métallurgie des parties soudées et la mécanique des pièces soudées, et enfin les différentes expériences menées sur la fatigue des assemblages soudés.

En conclusion après une recherche sur les effets de l'opération de soudage dans le changement du comportement de la résistance à la fatigue des assemblages soudés on peut citer ce qui suit :

- La fatigue est la cause principale de la plupart des cas de rupture des structures soudées, même si les contraintes appliquées sont moins importantes que la limite d'élasticité du matériau.
- Les joints soudés sont toujours des zones privilégiées d'amorçage des fissures, du fait d'un certain nombre de « défauts » inhérents à ce type de structure.
- La résistance à la fatigue des joints soudés ne dépend pas seulement des propriétés du métal de base et du métal d'apport employé.
- L'épaisseur de la tôle l'environnement qui entoure la structure influe sur la résistance à la fatigue de l'assemblage soudé.
- Le durcissement situé dans le métal fondu et la ZAT dû à la transformation thermique causé par le soudage peut supporter une contrainte un peu plus élevée que celle du métal de base mais en conséquence diminue son élasticité ce qui implique une augmentation dans la vitesse de fissuration da/dN « une propagation rapide de la fissure » qui donc en conséquence se rompt plus rapidement et résiste moins à la fatigue.
- Pour prédire une durée de vie en fatigue d'un assemblage soudé, il est préférable d'accompagner les résultats de la simulation numérique des résultats des essais expérimentaux avec prise en compte de la marge de différence.

Références bibliographique et webographie

- [1] Définition du soudage, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/soudage/73591> , Consulter le 27/02/2020.
- [2] L'appareil de soudage, <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage>, Consulter le 27/02/2020.
- [3] Bases métallurgiques du soudage, H. Granjon, Publications du soudage et de ses applications pp 17-27, 1995.
- [4] « Livret Soudage par Resistance» SD sevice édition 2016 ; 85.
- [5] H. GRANJON. “ Bases métallurgiques de soudage “, 2^{ème} édition, publications de soudage et de ses applications Paris, (1995).
- [6] CSMOFMI, Soudage et assemblage-soudage, Guide d'auto-apprentissage, Bibliothèque et Archives Canada, 2010, 157 p
- [7] CEMEQ, Coupage de métaux ferreux et non ferreux, module 5, Soudage-montage (5195), Sherbrooke,2005, 158 p.
- [8] Dr. TOUALBIA Djamel, Soudage et rechargement, université mohamed cherif massaada souk ahra
- [9] H. Granjon, R.P. Newman, La fatigue des assemblages soudés, Institut International De La Soudure, Publication de la soudure autogène, boulevard de la chapelle, 75018 Paris
- [10] Mme MESSABIH Fatima Zohra. « Contribution à l'optimisation des paramètres de soudage des différentes zones soumises à des sollicitations cycliques de fatigue ».
- [11] G.PLUVINAGE. « L'effet d'entaille en fatigue et en rupture ». Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM). Metz, France. 2003.
- [12] H.ZEDIRA, A. B. Cracking of welded monoblocs of the mechanical shovels 9210. Third Mechanical and Industrial Engineering. Amman, Jordan: [s.n.]. 1999. p. 851-869.
- [13] Maddox, Stephen (janvier 2000). "Conception de fatigue régie pour les structures soudées". Progrès en ingénierie structurelle et matériaux.
- [14] WELD DETAIL FATIGUE LIFE IMPROVEMENT TECHNIQUES, SSC – 400, August 26, 1997
- [15] Abdulkader ZALT, Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type caisson, Metz le 18/10/2012 .
- [16] C.LALANNE. Dommage par fatigue. Vibration et chocs mécanique, Paris, 1999.
- [17] David Pigneaux. Effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés en aciers. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2002. Français.
- [18] R. VARISELLAZ Soudage : Eléments de conception de réalisation (Duodi 1987).
- [19] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-the-heat-affected-zone>, consulter le 07/06/2020
- [20] Karim Rabbaj. Metallurgie de soudage, academia 2020

[21] Anthony Fleury, Conception En Fatigue De Joints Soudés Par Friction Malaxage Dans Les Tabliers De Pont En Aluminium, Québec, Canada 2020.

[22] David Lebaillif. Fissuration en fatigue des structures mécano-soudées soumises à un environnement mécanique complexe. Matériaux. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2006.

[23] Guy Murry, ‘Aide-mémoire Métallurgie ,Métaux , Alliages , Propriétés’’, Dunod, Paris, 2^e édition.

[24] 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 06/07/2020.