



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de la
Technologie
كلية
التكنولوجيا
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane-MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme Master Académique

Filière : Génie Mécanique.

Spécialité : Génie des matériaux

Préparé par :

BARA Abdelghani

HAMMACHE Rabah

Thème

**Caractérisation mécanique d'un joint soudé obtenu par soudage
MIG, durant des cycles de chauffage-refroidissement.**

Soutenu le 28/10/2022 devant le jury composé de :

Pr. Bradai Md Amokrane

Président

Mr. AMARI. Djamel

Encadreur

Mr. IDIR Abdelhak

Examineur

Année : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord « Dieu » qui nous a donné la force et le courage nécessaires pour achever ce travail.

Nous remercions particulièrement notre encadrant Mr AMARI Djamel d'avoir été à nos coté durant toute l'année, pour les efforts qu'il a déployé et de nous avoir conseillé avec une très grande gentillesse.

Nous remercions également les membres de jury Pr Bradai et Dr IDIR.A qui nous ont fait honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Nos remerciements vont également a :

-Monsieur Yousfi Rachid le responsable du hall technologie.

-Monsieur le responsable du hall technologie à l'université Jijel.

-Monsieur le PDG DE l'ENMTP.

-Monsieur ATOUB Nourdine T.S au Labo.

-Monsieur OUADFEL Abdelah T.S au Labo.

-Monsieur OUSMANI professeur à l'université de Sétif.

-A nos chers parents, pour leurs conseils, leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de nos études.

DÉDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance je dédie ce modeste travail :

- *A mon cher père, tes conseils m'ont toujours été d'une grande aide dans tout ce que j'entreprends, ce travail est en quelque sorte une manière de te dire merci pour ton soutien, ton amour et ta bienveillance.*
- *A ma chère mère, source d'amour et de tendresse, tous les mots ne saurait exprimer ma gratitude, je te dédie ce travail comme fruit de ton dévouement et l'expression de mon profond amour.*
 - *A mon frère Tahar et ma sœur Zahra.*
- *A mes camarades de la promotion Génie des Matériaux 2021/2022*

RABAH

DÉDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance je dédie ce modeste travail :

A Mon cher père Et ma cher Mère.

A Mes frères et mes sœurs.

A Mon ami SAID.

ABDELGHANI

Tables de matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Généralités bibliographiques

Introduction	2
I.1 Bref historique sur le soudage.....	2
I.2 Définition et classification des différents procédés de soudage	3
I.2.1 Définition de soudage	3
I.2.2 Classification des procédés de soudage	4
I.2.3 Les procédés de soudage a l'arc.....	6
I.2.3.1 Soudage sous protection gazeuse.....	7
I.3 Transformation subits lors du soudage par fusion	8
I.4 Soudage MIG/MAG.....	9
I.4.1 Technologie du procédé	9
I.4.2 Les principaux modes de transfert de métal en MIG.....	10
I.5 Soudabilité de l'acier	12
I.5.1 Les acier	13
I.6 Les principaux défauts et risques liés au soudage	13
I.6.1 Les défauts de soudage	13
I.6.2 Les risques liés au soudage	17
I.7 Comportement mécanique	17
I.7.1 L'essai de dureté	17
I.7.2 Essai de résilience	18

I.7.2.1 Les éprouvettes de résilience	19
I.8 Traitement thermique des aciers	19
I.8.1 Le recuit	20
I.8.1.1 Types élémentaires de recuits	20
I.8.1.2 Processus	21
I.8.2 Le Revenu	21
I.8.2.1 Les types de revenu	21
I.8.2.2 Austénitisation	22

Chapitre II

Techniques Expérimentales

II Introduction	24
II.1 Présentation de l'acier utilisé	24
II.2 Réalisation des maquettes de liaison métalliques en acier S235	25
II.2.1 Préparation des plaques	25
II.2.2 Soudage des plaques	25
II.2.2.1 Présentation du fil électrode fusible	25
II.2.2.2 Présentation du poste à souder	26
II.3 Prélèvement des échantillons	26
II.3.2 Réalisation de l'entaille	27
II.4 Traitement thermique	28
II.4.1 Présentation du four utilisé	28
II.4.2 Réalisation des cycles chauffage-refroidissement	28
II.5 Polissage	29
II.6 Réalisation des essais mécaniques	30
II.6.1 Essai de dureté Rockwell	30
II.6.2 Essai de résilience	31

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Résultats dureté Rockwell	33
III.1.1 Examen de dureté HRC sans traitement thermique	33
III.1.2 Examen de dureté HRC avec traitement thermique	33
III.2 Résultats des essais de résiliences	35
Conclusion.....	39

Chapitre I

Généralité bibliographique

Figure (I-1) : Processus de soudage	3
Figure (I-2) : Joint de soudure.....	3
Figure (I-3) : Classification des procédés de soudage.....	5
Figure (I-4) : Circuit de soudage à l'arc	6
Figure (I-5) : Classification du procédé de soudage à l'arc	6
Figure (I-6) : Principe de soudage TIG	7
Figure (I-7) : Principe du soudage MIG/MAG	8
Figure (I-8) : Les différentes zones caractéristiques d'une soudure par fusion	8
Figure (I-9): Installation de soudage MIG	10
Figure (I-10): Transfert par court-circuit	11
Figure (I-11) : Mode de transfert.....	12
Figure (I-12) : Les fissures dans différentes zones de la pièce	14
Figure (I-13.1) : Fissuration à chaud.....	14
Figure (I-13.2) : Fissuration à froid.....	14
Figure (I-14) : Les différents types de soufflure	15
Figure (I-15) : Exemple de soufflures	16
Figure (I-16) : Exemple d'inclusion.....	16
Figure (I-17) : Déformations de soudage de joint V	16
Figure (I-18) : Essai de dureté Rockwell.....	18
Figure (I-19) : Mouton de Charpy.....	18
Figure (I-20) : Eprouvettes Charpy U et V	19

Figure (I-21) : Principaux étapes du traitement thermique 20

Figure (I-22) : l'apparition de l'austénitisation lors les opérations de soudage 23

Chapitre II

Techniques expérimentales

Figure (II-1) : L'acier utilisé S235 24

Figure (II-2) : Scie alternative sous lubrification 25

Figure (II-3) : Plaques métalliques avec chanfrein V 25

Figure (II-4) : Le poste à souder utilisé 26

Figure (II-5) : Maquettes de liaison métallique entre deux plaques 26

Figure (II-6) : Macro-tronçonneuse 27

Figure (II-7) : Eprouvette de résilience avec entaille en V 27

Figure (II-8) : Four à mufler à résistance électrique 28

Figure (II-9) : Courbe de chauffage-refroidissement 29

Figure (II-10) : Polisseuse utilisée 29

Figure (II-11) : Eprouvette avec une surface lisse 30

Figure (II-12) : Duromètre Rockwell 31

Figure (II-13) : Eprouvette normalisée 32

Figure (II-14) : Mouton pendule Charpy 32

Chapitre III

Résultats et discussions

Figure (III-1) : Evolution des valeurs des essais dureté HRC.....	35
Figure III-2 : Histogramme comparatif des résultats de la résilience Kcv.	36
Figure (III-3) : Faciès de rupture de l'éprouvette non traitée.	37
Figure (III-4) : Faciès de rupture de l'éprouvette chauffée à 250°C.....	38
Figure (III-5) : Faciès de rupture a l'éprouvette chauffée à 350°C.....	38
Figure (III-6) : Faciès de rupture pour l'éprouvette chauffée à 450°C.	38

Liste des tableaux

Tableau II-1: Les différents éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de l'acier 24

Tableau II-2 : Chauffage et Refroidissement des éprouvettes 28

Tableau III-1 : Résultats des essais de dureté de l'éprouvette soudée non traitées..... 33

Tableau III-2 : Résultats des essais de dureté des éprouvettes soudées avec traitement thermiques. 34

Le Tableau III-3 : les résultats des essais de résilience..... 36

INTRODUCTION

Introduction générale

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage occupe une place très importante dans tous les secteurs d'industrie, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, et cela se traduit par trois aspects : thermique, chimique, et thermomécanique.

L'objet de notre étude qui est inscrit dans ce cadre est la mise en évidence de l'effet des traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques d'un joint obtenu par l'assemblage par soudage de deux plaques en acier non allié de construction, et cela en évaluant leur tenue mécanique par la réalisation de profils de dureté et par des essais de résilience.

Le présent mémoire contient trois chapitres, dont le premier est consacré à une revue bibliographique ayant trait à des généralités sur le soudage et ces différents procédés.

Nous entamons le deuxième chapitre par une partie pratique en présentant les étapes et les techniques pour la mise en œuvre des analyses et des caractéristiques mécaniques à savoir la dureté et la résilience, après avoir effectué des cycles de chauffage-refroidissement sur les assemblages soudés.

Le dernier chapitre a pour objectif de mettre en évidence les résultats des analyses obtenus, et de mesurer la dureté et la résilience du joint de soudure avec les différents cycles de chauffage-refroidissement.

Enfin, on termine par une conclusion générale dans laquelle nous mettons en évidence les points essentiels de la présente étude.

Chapitre I

Généralités bibliographiques

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les généralités bibliographiques des travaux consacré à l'étude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure, de deux plaques en aciers S235 durant des cycles de chauffage-refroidissement, dans le but d'introduire le lecteur aux notions qui sont à la base de ce travail ainsi que pour situer notre travail par rapport a ceux de la littérature.

I Généralité bibliographiques

I.1 Bref historique sur le soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{ème} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux était réalisé principalement par forgeage. Les premières techniques de soudage utilisaient l'électricité comme source d'énergie, tel que le soudage à l'arc avec électrode enrobée, dont l'invention remonte à 1904, ou le soudage par résistance. Vers la même période, l'arrivée du soudage oxyacétylénique (soudage aux gaz), utilisant l'acétylène et l'oxygène pour produire une flamme dont la température atteint 3100°C, permettant de construire un joint entre les parties à assembler par mélange du métal a l'état liquide puis solidification.

En 1930, l'introduction de fils électrodes fusibles facilite l'automatisation de l'apport de métal. Et conduit au développement du procédé de soudage à l'arc submergé. Dès 1940, des scientifiques américains ont essayé de maintenir l'arc électrique, amorcé à l'aide d'une électrode non fusible en tungstène, au sein d'un gaz inerte afin de protéger le métal chauffé de l'oxydation. Ce qui conduit au développement du procédé TIG.

Le procédé MIG apparait quelques années plus tard, vers 1950. Il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible a dévidage continu et de l'argon ou de l'hélium comme gaz de protection. Le remplacement de ces gaz par du CO2 donne ensuite naissance au procédé MAG. L'invention du soudage par faisceau d'électron en 1985, permet de souder en une seule passe de fortes épaisseurs, grâce à la vaporisation localisée du métal qui permet de réaliser des joints étroits et profonds.

Avec l'introduction du procédé laser dans les années 1980, les opérations de soudage deviennent encore plus rapides. [1]

I.2 Définition et classification des différents procédés de soudage

I.2.1 Définition du soudage

Le soudage est une opération qui consiste à assembler deux ou plusieurs pièces rigides en utilisant une source d'énergie de manière à assurer une certaine continuité entre elles (figure I-1).

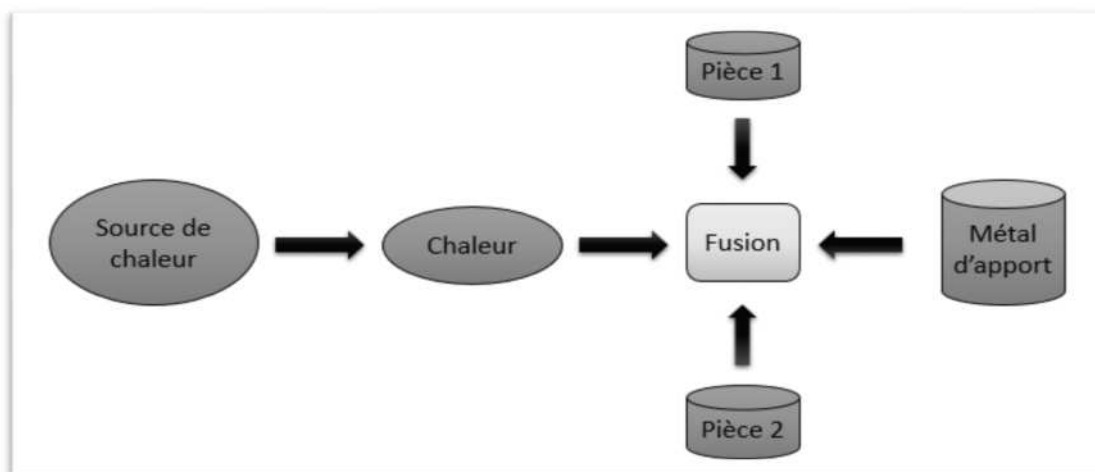


Figure (I.1) : Processus de soudage.

On obtient ainsi, après solidifications, un joint homogène aux caractéristiques plus au moins proches de celles du métal de base (figure I-2), ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. [1]



Figure (I-2) : Joint de soudure.

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 le plus courant des matériaux métalliques, on peut distinguer le soudage autogène, le soudage homogène et le soudage hétérogène :

- a. **Le soudage autogène** : Participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint. Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler.
- b. **Le soudage homogène** : Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé, le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport.
- c. **Le soudage hétérogène** : Le soudage est hétérogène lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler [2]

I.2.2 Classification des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces différents procédés (Figure I-3) peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie. Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression).

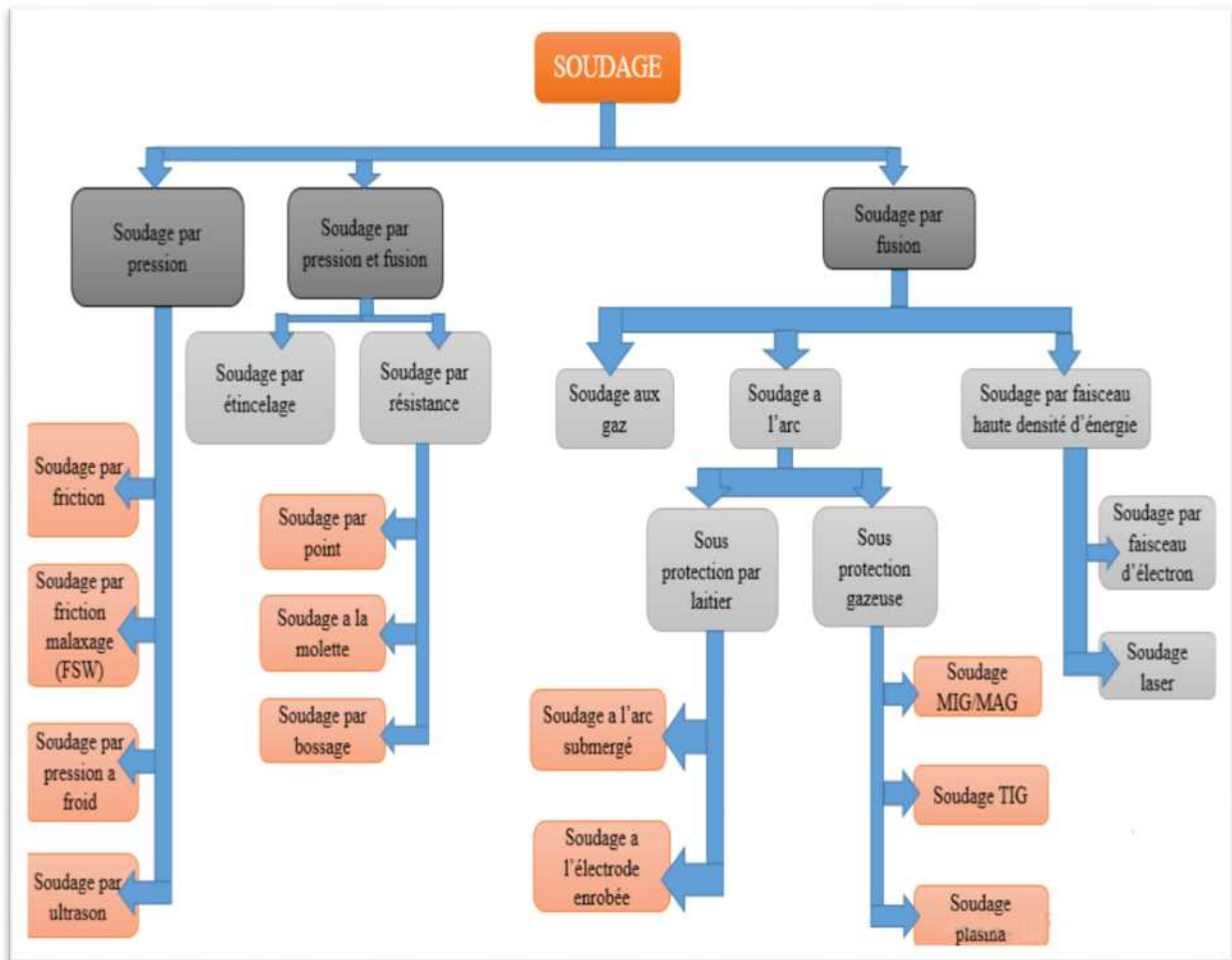


Figure (I-3) : Classification des procédés de soudage.

a. Soudage par pression

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure. [2]

b. Soudage par fusion

Il consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels que l'arc électrique, la flamme de gaz, la réaction chimique, l'énergie de rayons laser, le jet de plasma, etc. Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, qui après solidification constitue la soudure [2].

I.2.3 Les procédés de soudage à l'arc

Le terme soudage à l'arc définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3500 et 5550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion. Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode (figure I-4). Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage. [7]

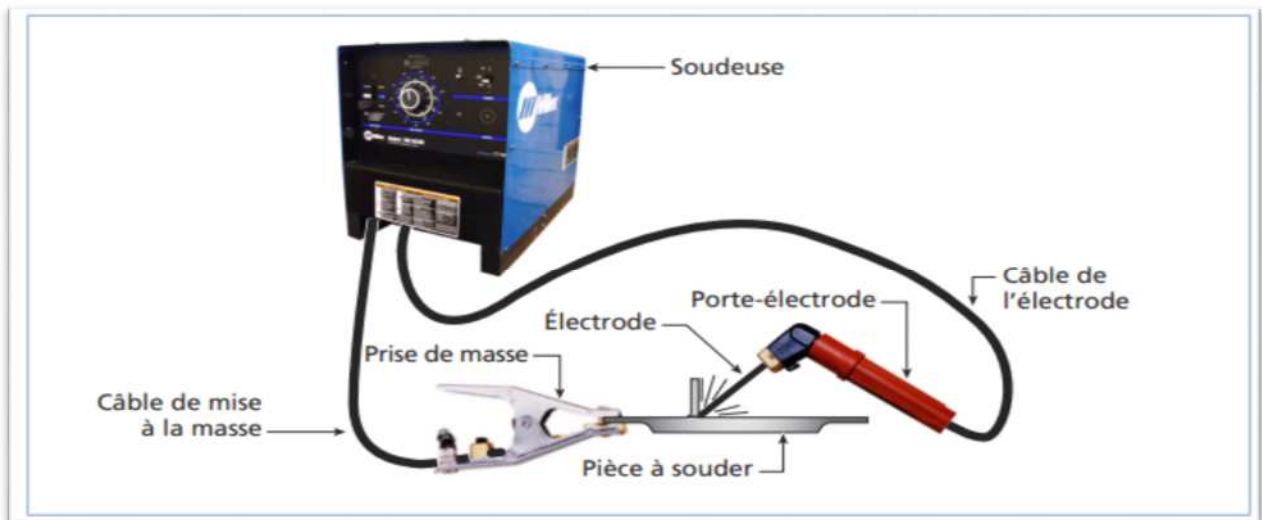


Figure (I-4) : Circuit de soudage à l'arc [7]

On peut classer des différents procédés du soudage à l'arc selon le type de protection soit par gaz plasmagène, soit par le laitier. Voir la figure (I-5).

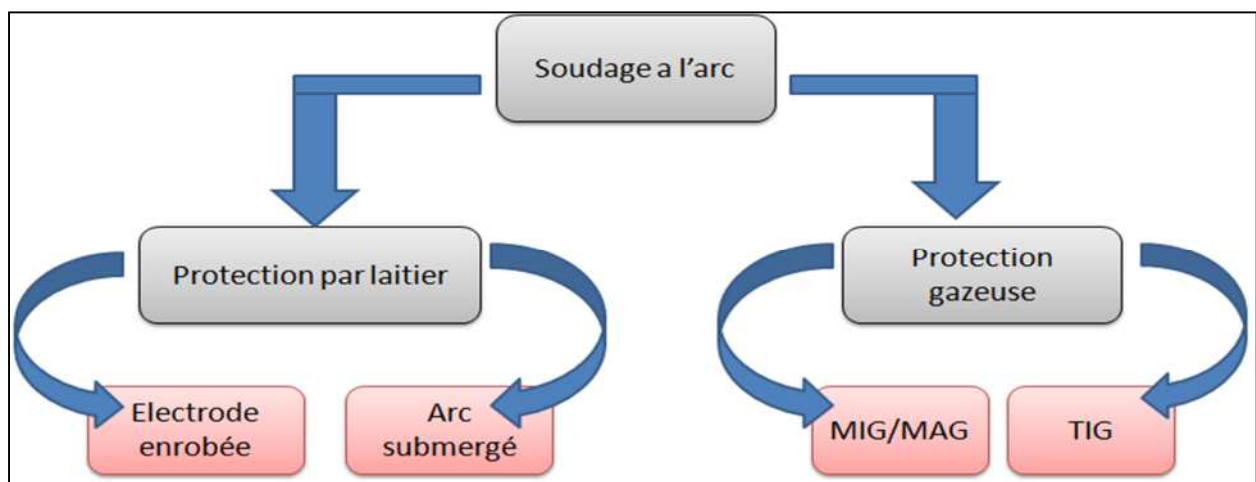


Figure (I-5) : Classification du procédé de soudage à l'arc.

I.2.3.1 Soudage sous protection gazeuse

C'est des procédés de soudage à l'arc au cours desquels un arc est allumé entre une électrode et la pièce, ce qui fait fondre la pièce ainsi qu'un autre matériau additionnel. On distingue plusieurs procédés. Parmi ceux-ci, le soudage TIG, et le soudage MIG/MAG qui sont les méthodes les plus utilisées.

- a. **Le soudage TIG :** Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin et un gaz plasmagène protecteur (figure I-6). L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou d'un mélange de gaz rares tels que l'argon et l'hélium [6].

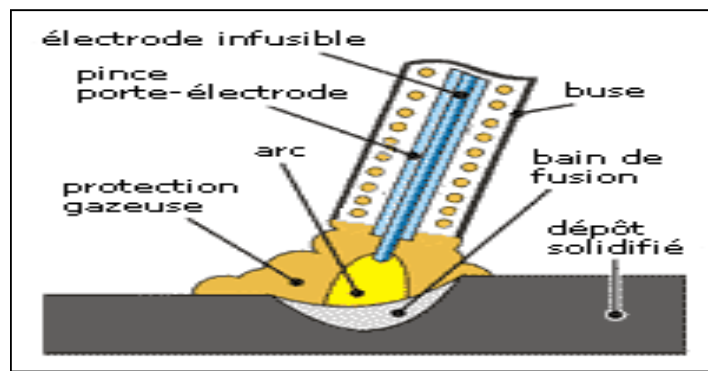


Figure (I-6) : Principe de soudage TIG.

- b. **Soudage (MIG/MAG) :** Le soudage MIG-MAG, ou encore GMAW selon les normes américaines, est un procédé de soudage semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l'énergie calorifique dégagée par un arc électrique qui éclate dans une atmosphère de protection entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler. La différence entre les deux procédés MIG et MAG tient à la composition du gaz (figure I-7). Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium), contrairement au procédé MAG (mélange d'argon avec du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en proportions variables selon les métaux à souder). [2]

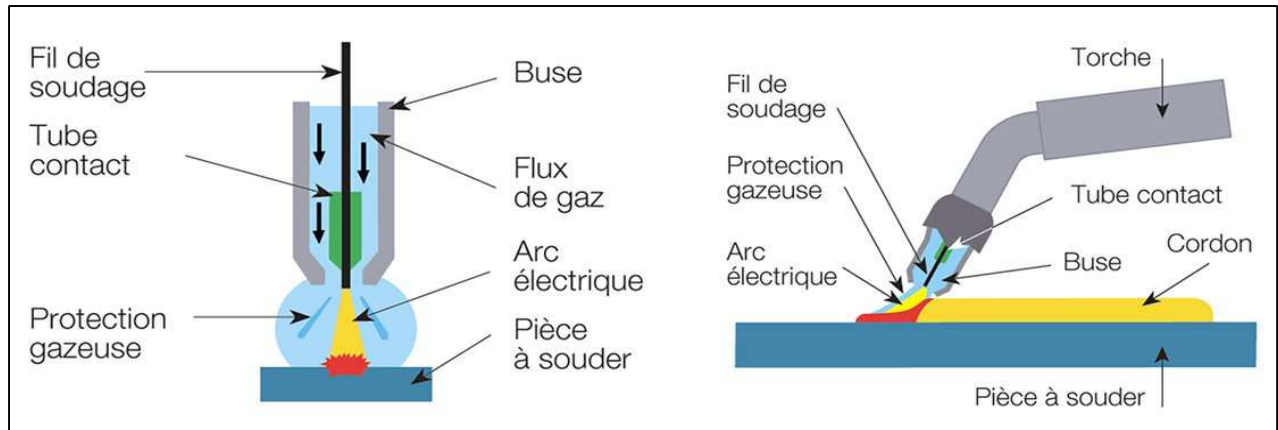


Figure (I-7) : Principe du soudage MIG/MAG.

I.3 Transformations subit lors du soudage par fusion

L'apport de chaleur étant très localisé avec la plupart des procédés de soudage par fusion, des gradients de température importants sont observés, et la température maximale atteinte diminue lorsque l'on s'éloigne de la zone centrale de la soudure. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure typique d'une soudure est composée de quatre zones principales [2].

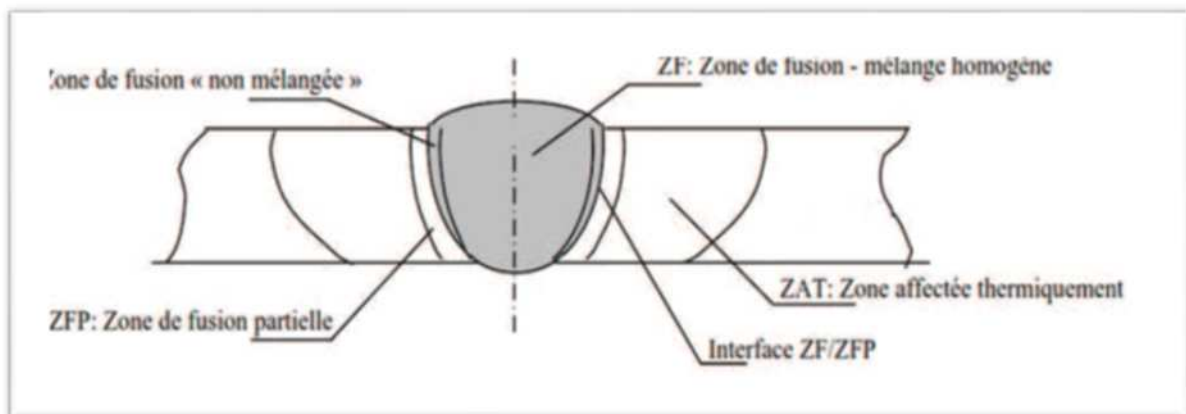


Figure (I-8) : Les différentes zones caractéristiques d'une soudure par fusion [9].

- a. **La zone fondue (ZF) :** La région centrale de l'assemblage, qui a été portée au-dessus de la température de liquidus du matériau, passe à l'état liquide puis se solidifie en refroidissant. Sa composition chimique après solidification dépend principalement des compositions des métaux de base et d'apport et du cycle thermique subit, qui favorise plus ou moins la fusion des matériaux de base. Du fait de cinétiques de solidification et de refroidissement généralement très rapides.
- b. **La zone de liaison ou zone de fusion partielle (ZFP) :** Cette zone directement adjacente à la zone fondue et chauffée jusqu'à une température comprise entre le liquidus et le

solidus du matériau, et est donc partiellement fondue. En raison des forts gradients thermiques, elle est généralement très étroite.

- c. **La zone affectée thermiquement (ZAT) :** Cette zone, de largeur très variable selon les matériaux et les conditions de soudage, a été portée à une température inférieure au solidus du matériau, mais suffisante pour produire un changement de structure ou de taille de grain.
- d. **Le métal de base :** En dessous d'une certaine température, le matériau de base ne subit aucune modification microstructurale, et n'est donc pas affecté par l'opération de soudage.

I.4 Soudage MIG/MAG

Dans la plupart des pays industrialisés, le soudage manuel à l'arc est concurrencé par le soudage à l'arc sous protection gazeuse. On parle de soudage MIG (soudage à l'arc sous protection gazeuse inerte) [1]

I.4.1 Technologie du procédé

Les principaux éléments constituant une installation de soudage MIG sont représentés sur la figure (I.9). La bobine de fil-électrode (3), qui constitue aussi le métal d'apport, est placée dans un dévidoir motorisé (4) entraînant le fil vers la sortie de la buse à gaz (11) de la torche à travers la gaine guide-fil jusqu'au tube contact (9), relié à l'une des bornes du générateur de soudage. Une alimentation en gaz de protection est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur. En configuration manuelle (on parle alors de soudage semi-automatique car le dévidage de fil d'apport est automatique), le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche, et le dévidage du fil-électrode commence jusqu'à ce qu'il entre en contact avec la pièce à souder, reliée à la seconde borne du générateur de soudage. Sous l'effet de la différence de potentiel imposée entre les bornes du générateur, un courant électrique traverse le fil électrode lorsqu'il entre en contact avec la pièce. Du fait de l'échauffement par effet joule, l'extrémité du fil fond puis se vaporise, produisant un plasma de vapeurs métalliques, remplacé par un plasma de gaz de soudage.

Une fois amorcé, l'arc électrique, constitué d'une colonne de gaz ionisé, doit être entretenu en maintenant un courant suffisant. On parle de polarité directe ou négative lorsque la torche est reliée à la borne négative (cathode) du générateur, et de polarité inverse ou positive lorsque l'électrode

est l'anode. C'est cette dernière polarité qui est le plus souvent utilisée en soudage MIG. La longueur de la partie terminale du fil (2) située entre le tube contact et l'extrémité de l'arc électrique, couramment désignée par le terme anglais "stick-out", doit être suffisante pour éviter un échauffement excessif du tube contact par l'arc électrique. Le soudage MIG présente l'avantage d'être facilement automatisable et utilisable en robotique.[7]

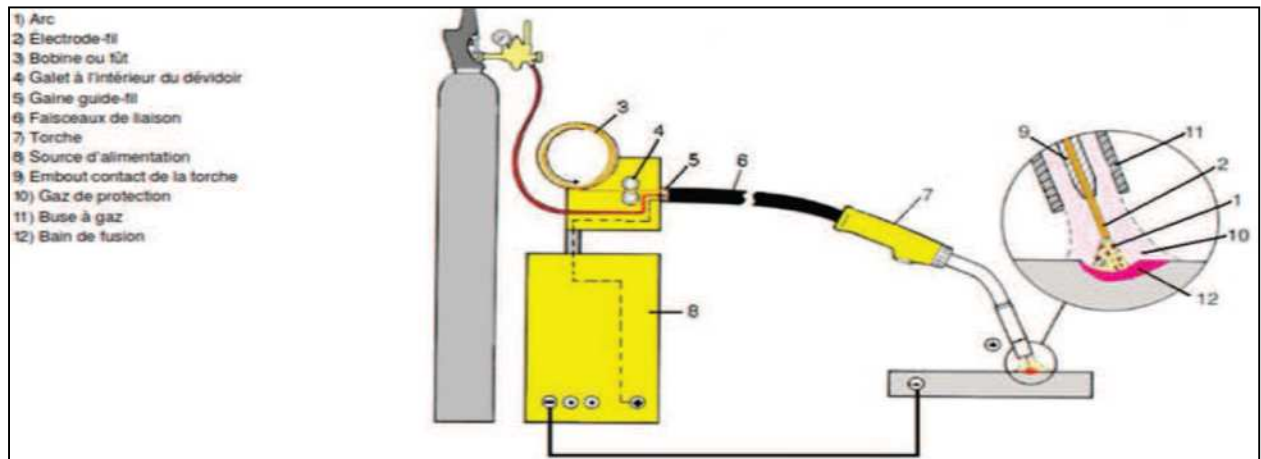


Figure (I-9): Installation de soudage MIG.

I.4.2 Les principaux modes de transfert de métal en MIG

En soudage MIG, le métal d'apport fond à l'extrémité du fil et est ensuite transféré dans le bain fondu de la soudure. Selon le niveau d'énergie (tension et intensité), les mécanismes de transfert du métal d'apport fondu diffèrent. On retrouve généralement deux principaux modes de transfert en courant lisse. [5]

- a. Transfert par court-circuit :** Pour de faibles intensités (50-200 A) et tensions (15-20 V) de soudage, l'arc formé est très court et le transfert de métal du fil électrode vers la pièce se fait de manière discontinue, par une succession très rapide de courts-circuits entre le fil et le bain de fusion (Figure I.10). La goutte formée sous l'effet du bombardement électronique de l'extrémité du fil et de l'échauffement par effet Joule de la partie terminale du fil grossit jusqu'à venir en contact avec le bain de fusion, produisant un court-circuit et l'extinction de l'arc. La tension chute alors, tandis que l'intensité augmente. Il convient donc bien pour souder les tôles minces et réduire les déformations dues à l'échauffement.



Figure (I-10): Transfert par court-circuit. [5]

b. Transfert par pulvérisation : Pour des énergies de soudage plus élevées (intensité supérieure à 200 A et tension comprise entre 20 et 40 V), l'arc devient plus long et stable, et l'extrémité du fil fondu prend une forme conique allongée (Figure I.11). Sous l'effet de l'augmentation des forces électromagnétiques, le métal fondu subit un fort pincement qui conduit au détachement de fines gouttelettes, de diamètre inférieur ou égal à celui du fil, qui est projeté à grande vitesse dans le bain de fusion en suivant l'axe du fil. On parle alors de transfert par pulvérisation axiale (Figure I.11a). Le cordon résultant est généralement plus large et plus pénétrant qu'en régime de transfert par court-circuit.

Si l'intensité du courant augmente encore, l'extrémité du fil-électrode peut prendre la forme d'une veine liquide droite orientée vers le bain de fusion, au bout de laquelle de fines gouttelettes se forment et se détachent à une fréquence supérieure à celle rencontrée en régime de transfert par pulvérisation axiale (Figure I.11b).

Pour de très fortes intensités, la veine liquide devient de plus en plus fine et les forces électromagnétiques, très importantes, induisent un mouvement de rotation de la veine liquide, produisant beaucoup de projections (Figure I.11c). On appelle ce régime le transfert par veine liquide rotative.

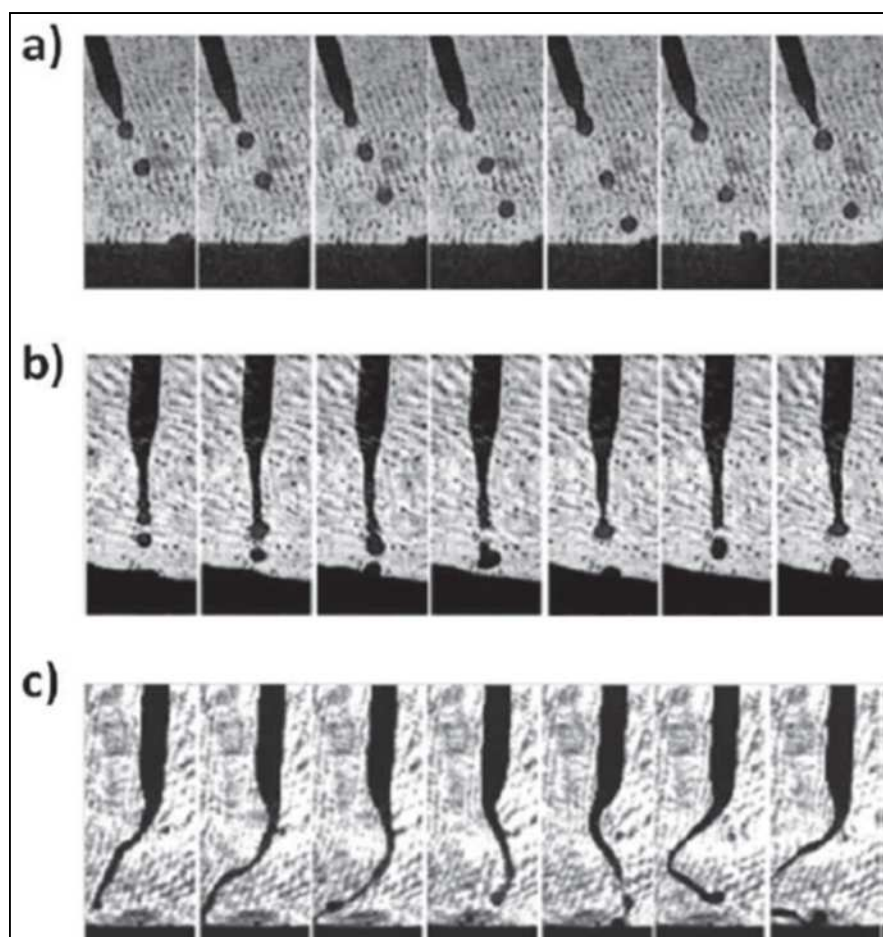


Figure (I-11) : Transferts de métal par pulvérisation [8] : (a) Transfert par pulvérisation axiale, (b) Transfert par veine liquide droite, (c) Transfert par veine liquide rotative.[5]

I.5 Soudabilité de l'acier

On considère le matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête moyennement les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une constitution entre les éléments de la quelle il est possible d'assurer la continuité métallique par constitution de joint soudé qui, par leur caractéristiques locales et les conséquences globale de leur présence satisfont aux propriétés requises.

On voit apparaitre la notion fondamentale de continuité de la nature de matériau assemblé et plus particulièrement de continuité métallique. Cette exigence implique la mise en jeu entre les éléments à assembler, de forces de liaisons interatomiques de type métalliques pour les métaux.

L'intervention de ces derniers exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constituer une barrière à leur action

I.5.1 Les aciers

L'acier est un alliage à base fer et carbone de proportion allant jusqu'à 2%. On distingue les aciers de construction contenant de 0,2% à 0,85% de carbone et les aciers à outil dont la teneur en carbone varie entre 0,65 à 1,4%. Les aciers de construction utilisent pour la construction des armatures de béton armé, ainsi que dans la construction mécanique ont une bonne plasticité et une basse fragilité. L'augmentation de la teneur en carbone dans les aciers à outils leur communique une haute dureté, mais en même temps les rend plus fragiles (Résistance à la chaleur, à l'usure par abrasion et à la corrosion) sont améliorées par l'addition du nickel, du chrome, du molybdène, du cuivre etc. Que l'on appelle éléments d'alliages et aciers alliés. Suivant les quantités d'addition on distingue les aciers à faible alliage contenant jusqu'à 2% d'éléments d'alliages, les aciers moyennement alliés contenant de 2% à 10% d'élément d'alliage et les aciers hautement alliés contiennent plus de 10%. Dans la construction on utilise largement les aciers à faible alliage. [1]

➤ Types d'aciers

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères : la composition et le niveau de qualité. Ainsi on distingue les aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage <5%) ou très alliés >5%. Sont en fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés en trois familles :

- Les aciers de construction mécaniques (peu ou non allié).
- Les aciers à outils (peu ou très allié).
- Les aciers inoxydables.

I.6 Les principaux défauts et risques liés au soudage

I.6.1 Les défauts de soudage

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Parmi ceux-ci on trouve : [10]

- Les fissures,
- Les soufflures,
- Les inclusions,
- Les déformations.

- **Les fissures :** Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :
 - ✓ Dans le métal fondu : elles dépendent de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
 - ✓ Dans le métal de base et dans la zone de liaison : ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

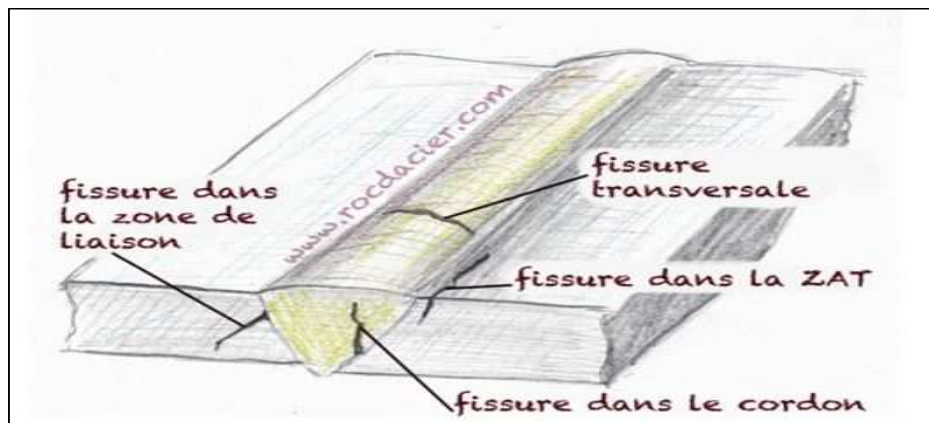


Figure (I-12) : Les fissures dans différentes zones de la pièce.

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

- ✓ La fissuration à chaud (figure I-13.1).
- ✓ La fissuration à froid (figure I-13.2).

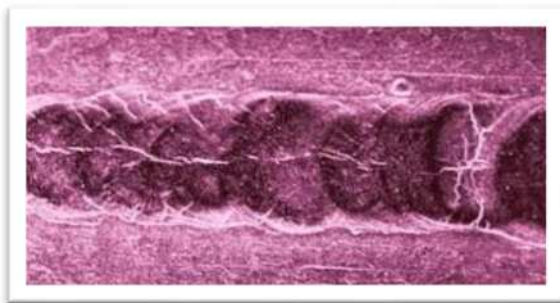


Figure (I-13.1) : Fissuration à chaud. [10]

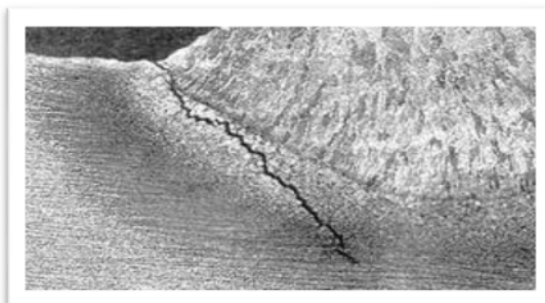


Figure (I-13.2) : Fissuration à froid. [10]

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). Quant à la fissuration à froid, elle intervient quand la soudure est pratiquement froide.

- **Les soufflures** : Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Elles sont appelées piqûres (figure I-14).

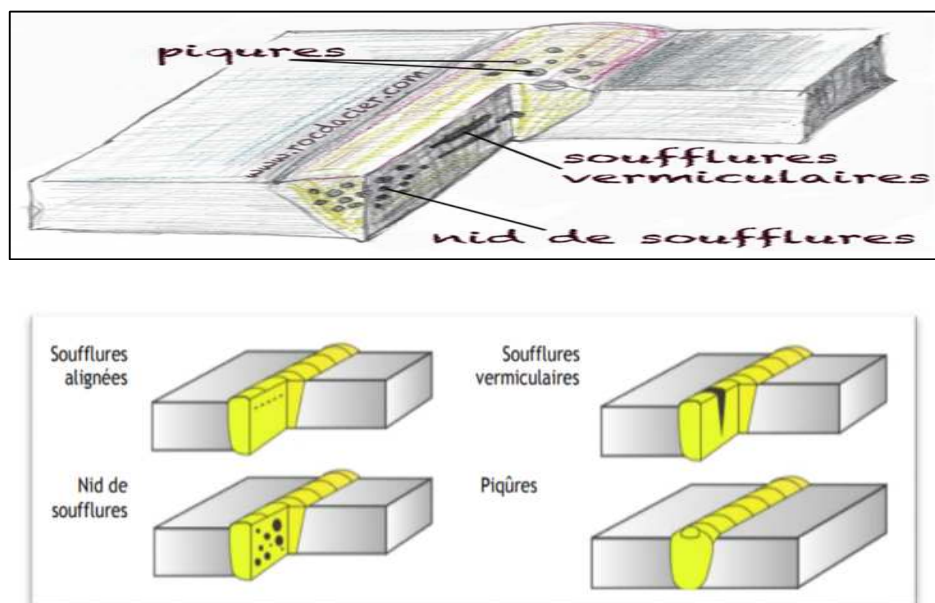


Figure (I-14) : Les différents types de soufflure. [10]

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint.

Pour les prévenir, 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 (figure I-15). Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

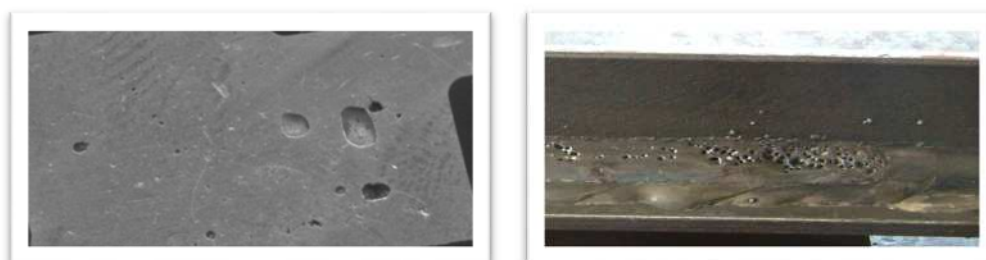


Figure (I-15) : Exemple de soufflures.

- **Les retassures et criques de solidification** : A la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. 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. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope.
- **Les inclusions** : Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (figure I-16). Il existe différents types d'inclusion :
 - Inclusion solide (poussières),
 - Inclusion de laitier,
 - Inclusion d'oxyde métallique,
 - Inclusion métallique (électrode)

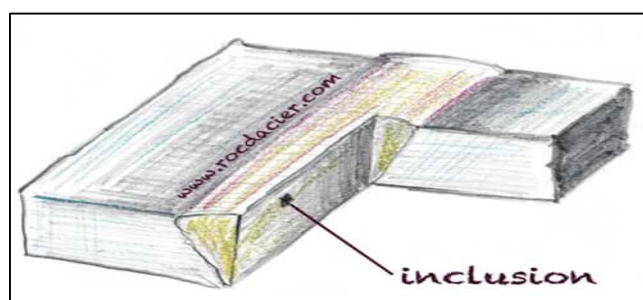


Figure (I-16) : Exemple d'inclusion.

- **Les déformations de soudage** : Les déformations liées au procédé de soudage sont fonction de type de soudure. On trouve par exemple les déformations lors du soudage d'un joint en V (figure I-17).

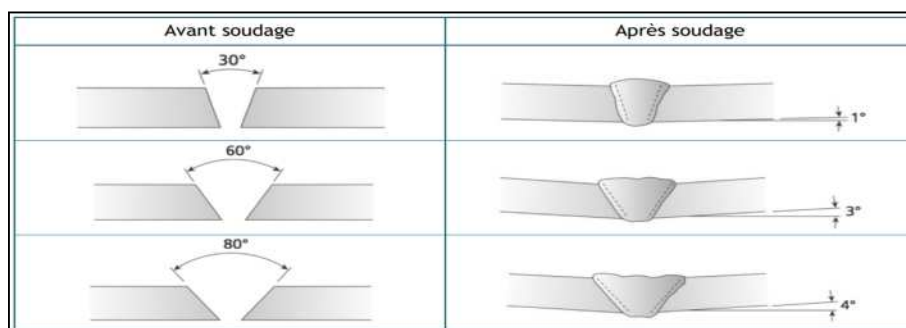


Figure (I-17) : Déformations de soudage de joint V.

Plusieurs méthodes existent pour éviter les déformations de soudage comme de prévoir une préparation adéquate des joints, une vitesse de soudage la plus rapide possible et une réduction du nombre de passes de soudage au minimum.

I.6.2 Les risques liés au soudage

L'opération de soudage comporte de nombreux risques, qui dépendent de la technique utilisée : [10]

- Risques liés aux fumées et aux gaz : la fusion des métaux donne naissance à des fumées et gaz toxiques,
- Risques d'incendie et d'explosion,
- Risques d'électrisation : danger présent lors de la création d'arc électrique,
- Risques pour la peau et les yeux : production d'UV nocifs.

I.7 Le comportement mécanique

I.7.1 L'essai de dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées duromètres, a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure. Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell. [9]

- **Essai de Rockwell** : L'essai de dureté Rockwell est une méthode par différence de profondeur, qui consiste à mesurer la profondeur de pénétration rémanente laissée par le pénétrateur. Elle diffère des méthodes optiques Brinell, qui consistent à mesurer la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur (figure I-18).

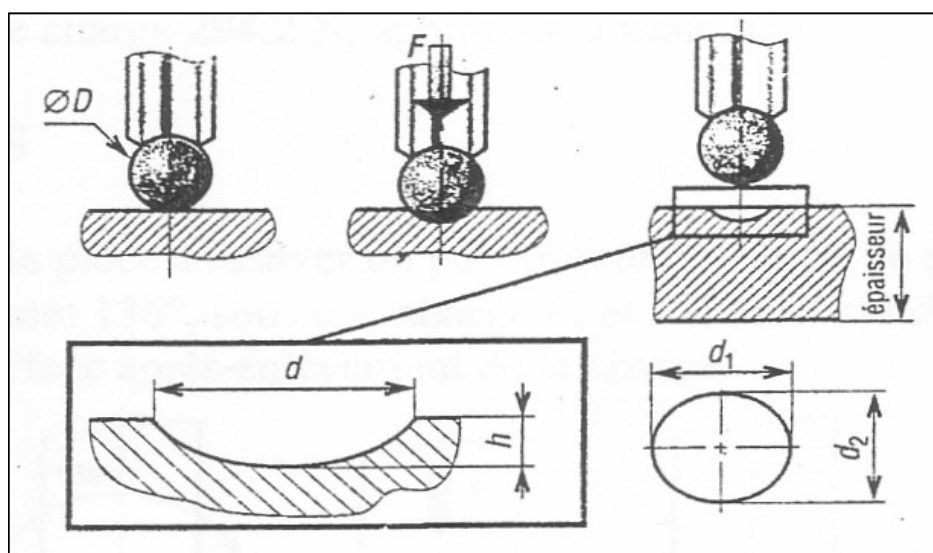


Figure (1-18) : Essai de dureté Rockwell.

I.7.2 Essai de résilience

L'essai de résilience a pour objectif de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture K_{cv} . Il consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée au milieu et à mesurer l'énergie W (Joule) absorbée à la rupture (figure I-19). La résilience est définie par la lettre K (Joule/cm²). L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. [9]

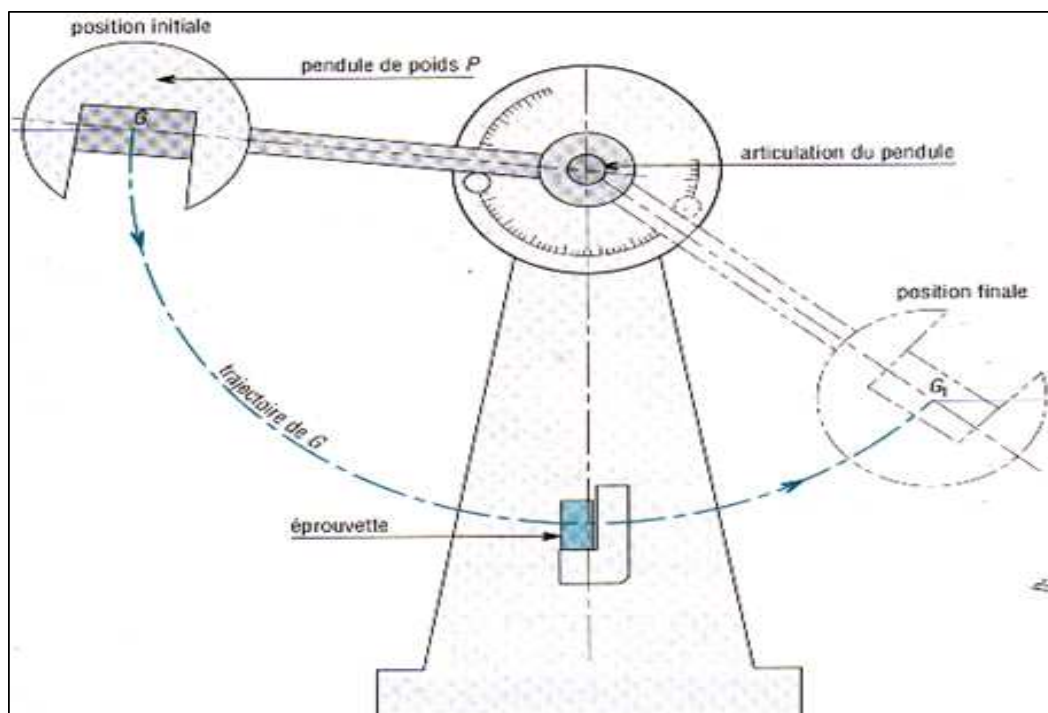


Figure (I-19) : Mouton de Charpy.

I.7.2.1 Les éprouvettes de résilience

- **Éprouvettes CHARPY U** : Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est de 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole K_{cu} .
- **Éprouvette CHARPY V** : Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy V. On précise par le symbole K_{cv} .

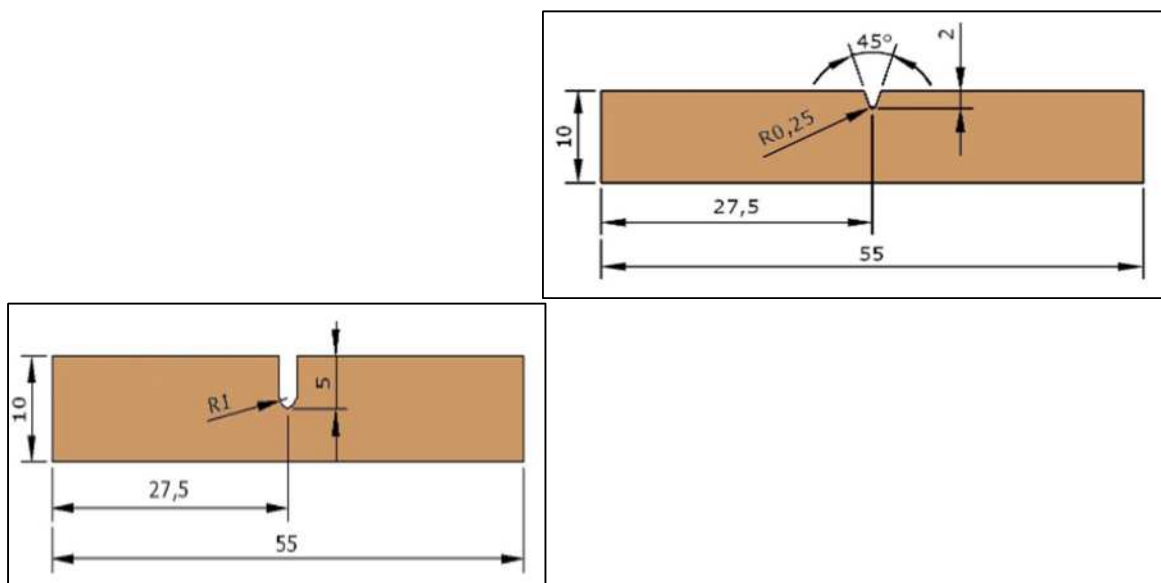


Figure (I-20) : Eprouvettes Charpy U et V.

I.8 Traitement thermique des aciers

Effectuer un traitement thermique sur une pièce en acier, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de trois zones voire la figure (I-22) : [12]

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée : - lente (dans le four, à l'air). - Assez rapide (dans l'huile). - Très rapide (dans l'eau).

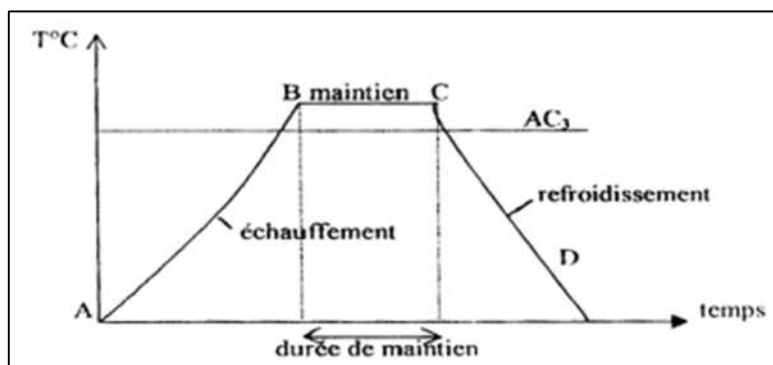


Figure (I-21) : Principaux étapes du traitement thermique.

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e ,

A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

I.8.1 Le recuit

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes [11].

I.8.1.1 Types élémentaires de recuits

- Le recuit d'adoucissement.
- Recuit de normalisation.
- Le recuit de détente.
- Recuit de régénération.

I.8.1.2 Processus

Le recuit est un terme générique et peut être classé en fonction de la température. Il est appliqué pour diverses raisons :

- Pour adoucir un métal afin de faciliter sa rectification.
- Pour libérer les contraintes internes induites par certains processus antérieurs (souvent afin de permettre un traitement ultérieur sans fracturation).
- Pour corriger une structure à gros grains.
- Pour amener des éléments d'alliage dans une solution.

I.8.2 Le Revenu

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre la

résistance maximale (R_m), et la résistance élastique (R_e), d'une part et l'allongement ($A\%$), et la résilience (K) d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal. Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en : Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$. Un maintien de durée t_R à T_R , un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement. Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre. [12]

I.8.2.1 Les types de revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- Revenu de relaxation : Il s'effectue entre 180°C et 220°C - 250°C . Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite-martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [12].
- Revenu de structure : Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques (la résilience et l'allongement), et une diminution plus importante de la dureté, la résistance maximale et la résistance élastique. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [12].
- Revenu de durcissement : Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [12].

I.8.2.2 Austénitisation

Avant d'effectuer une trempe, une mise en solution des composés chimiques est nécessaire. Cette mise en solution est obtenue par un chauffage à haute température puis un maintien pendant le temps nécessaire à la diffusion de ces éléments. Il faut en effet porter l'acier à une température telle que le fer ait acquis sa structure cubique face centrée (fer γ) qui peut dissoudre (en solution interstitielle) le carbone présent (contrairement au fer cubique centré – fer α – dans lequel le carbone est pratiquement insoluble). On transforme ainsi l'acier en solution solide de carbone dans le fer γ , l'austénite. L'opération s'appelle l'austénitisation. Le chauffage permet donc de passer de la structure cubique centrée (ferrite α) à une structure cubique à face centrée (austénite γ). [11]

L'austénitisation apparaît également lors des opérations de soudage. L'apport d'un alliage en fusion (métal d'apport) entraîne une élévation importante de la température du métal de base, provoquant des modifications microstructurales à la zone affectée thermiquement voir la figure (I-22) ci-dessus. [8]

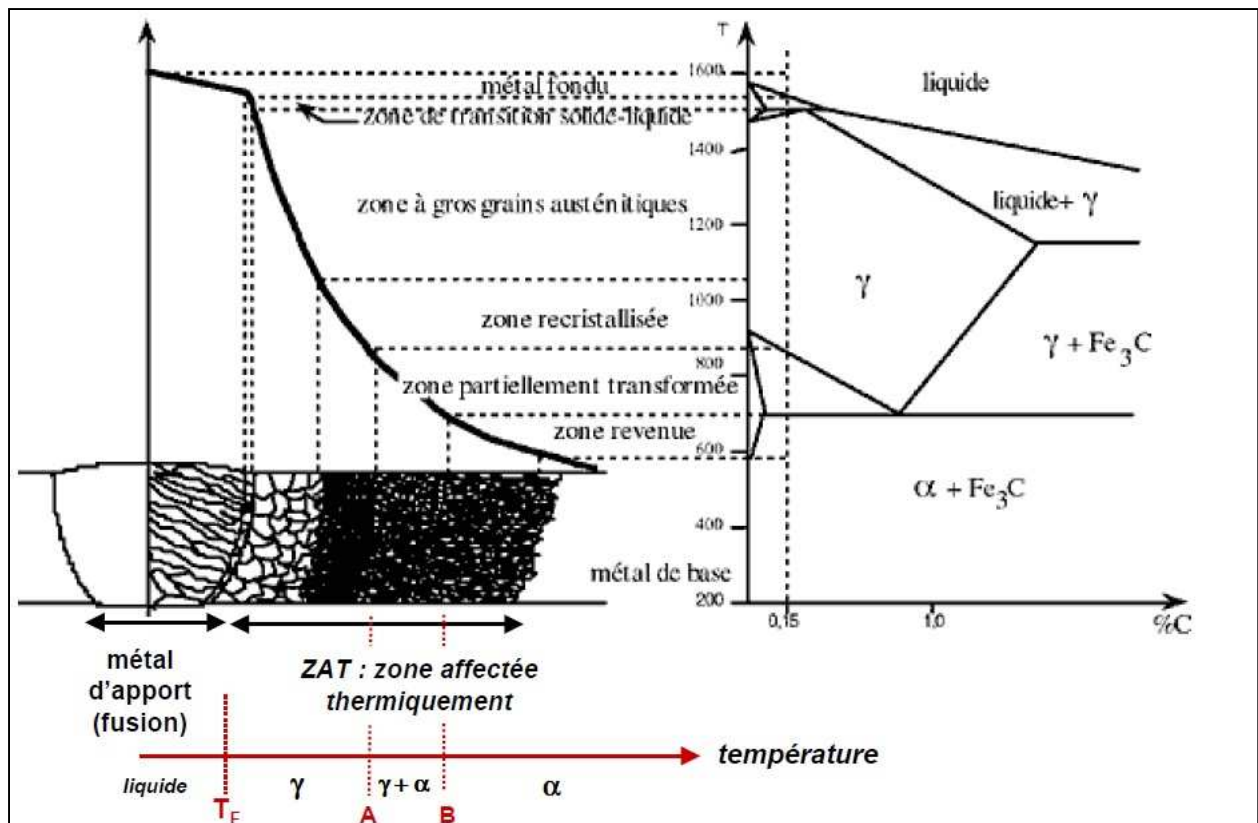


Figure (I-22) : l'apparition de l'austénitisation lors les opérations de soudage. [8]

Chapitre II

Techniques expérimentales

II Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériau utilisé, ces caractéristiques ainsi que les différentes techniques expérimentales, que nous avons utilisé pour caractériser l'effet de la température durant des cycles de chauffage-refroidissement, sur les propriétés mécaniques d'un joint soudé, à savoir la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc avec protection gazeuse (MIG). L'opération de soudage a été réalisée au sein de l'ENMTP.

II.1 Présentation de l'acier utilisé

L'acier S235 utilisé dans notre étude est fourni par l'université de Bejaia au niveau du hall technologie, (figure II-1).



Figure (II-1) : L'acier utilisé S235.

C'est un acier non allié de construction mécanique, dont la valeur maximale de la limite élastique ne dépasse pas 235 MPa. Selon l'ancienne norme, E24 dont (24) indique sa limite élastique minimale en daN/mm². C'est un acier avec de bonnes caractéristiques mécaniques telles que la plasticité, la ténacité et la soudabilité.

Tableau (II-1) : Les éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de l'acier.[4]

Limite élastique		Résistance mécanique Rr		Allongement a la	
Re (N/mm²)		(N/mm²)		rupture (A%)	
175 à 185		320 à 510		8 à 18	
Analyse chimique					
C	Si	Mn	P	S	Cr Ni Mo N Al
≤0.20	≤0.40	≤0.65	≤0.046	≤0.045	Trace

II.2 Réalisation des maquettes de liaison métalliques en acier S235

II.2.1 Préparation des plaques

L'acier S235 fourni par l'université de Bejaia est sous forme de tôle d'épaisseur (20 mm). Nous avons découpé 6 plaques de dimension (100 x 30) mm. A l'aide d'une scie alternative, (figure II-2).



Figure (II-2) : Scie alternative sous lubrification.

Pour l'exécution de l'assemblage des plaques par soudage, nous avons réalisé par fraisage un chanfrein de 45° d'inclinaison sur un coté de chaque plaque pour l'obtention de la forme V en reliant les deux plaques, (figure II-3).

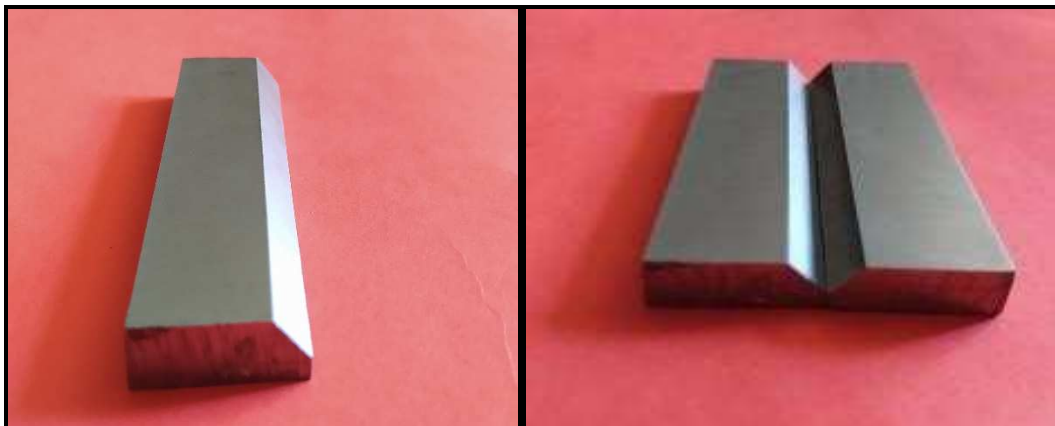


Figure (II-3) : Plaques métalliques avec chanfrein V.

II.2.2 Soudage des plaques

II.2.2.1 Présentation du fil électrode fusible

Le soudage utilisé dans notre travail est du type soudage MIG avec un fil électrode fusible de type rutile avec du dioxyde de titane de diamètre 1.2 mm.

Le dioxyde de Titane est un métal ayant une résistance mécanique importante et une bonne ductilité dans les conditions standards de température. Sa température de fusion est à partir de 1855°C.

II.2.2.2 Présentation du poste à souder

Nous avons utilisé un générateur de soudage de type Miller, avec une capacité d'ampérage de (20A à 500A), et une tension allant jusqu'à 450V (figure II-4).



Figure (II-4) : Le poste à souder utilisé.

II.3 Prélèvement des échantillons

Après avoir réalisé la liaison entre les plaques par soudage, on a obtenu trois maquettes avec des joints de soudure imposants et un mauvais état de surface comme le montre la figure (I-5)

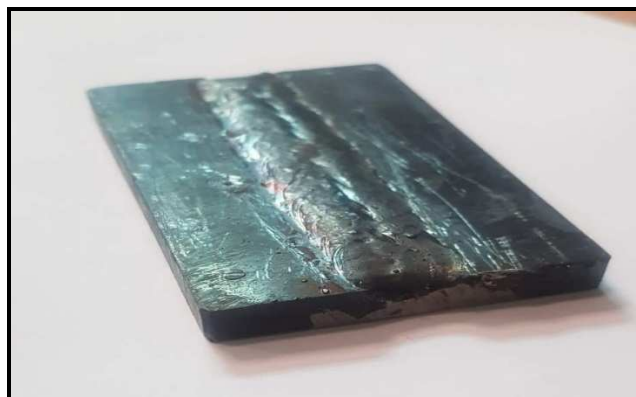


Figure (II-5) : Maquettes de liaison métallique entre deux plaques.

Les maquettes nécessitant un surfacage, sont alors soumises à l'opération de fraisage pour améliorer l'état de surface.

Ces maquettes seront ensuite découpées en parallélépipèdes de 10mm de largeur à l'aide d'une macro-tronçonneuse, (figure II-6).



Figure (II-6) : Macro-tronçonneuse.

II.3.1 Réalisation des éprouvettes de résilience

Après avoir découpé des échantillons dans chaque maquette, ces derniers sont soumis à l'opération de fraisage afin d'obtenir des éprouvettes normalisées pour l'essai de résilience (55mmx 10 mm x 10 mm).

II.3.2 Réalisation de l'entaille

L'essai de résilience nécessite de réaliser une entaille de forme V, avec un angle de 45° et une profondeur de 2 mm au milieu du joint soudé. L'entaille est réalisée sur une fraiseuse verticale à laquelle on a tourné le porte outil à 45°, (figure II-7).

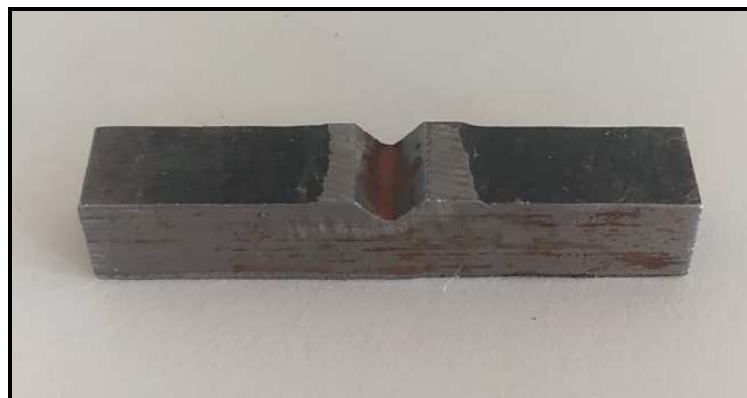


Figure (II-7) : Eprouvette de résilience avec entaille en V.

II.4 Traitement thermique

II.4.1 Présentation du four utilisé

Le four utilisé dans cette étude est du type four à moufle, à une résistance électrique alimenté sous une tension de 380V et de puissance 11Kw, allant jusqu'à 1200°C en température de chauffage, construit en tôle profilés robustes, il est isolé avec de la laine d'alumine pour la rendre plus légère et isolée thermiquement. Ces dimensions sont de 300mm de largeur utile, 250mm de hauteur utile et de 400mm de profondeur utile, (figure II-8).



Figure (II-8) : Four à moufle à résistance électrique.

II.4.2 Réalisation des cycles chauffage-refroidissement

Les éprouvettes normalisées de résilience sont soumises à des cycles de chauffage-refroidissement avec trois températures différentes comme le montre le tableau (II-2) et la courbe, (figure II-9) ci-dessous :

Tableau II-2 : Chauffage et Refroidissement des éprouvettes.

Eprouvettes	Cycle		
	Chauffage	Maintient	Refroidissement
1	250°C	1 heure	A l'air
2	350°C	1 heure	A l'air
3	450°C	1 heure	A l'air

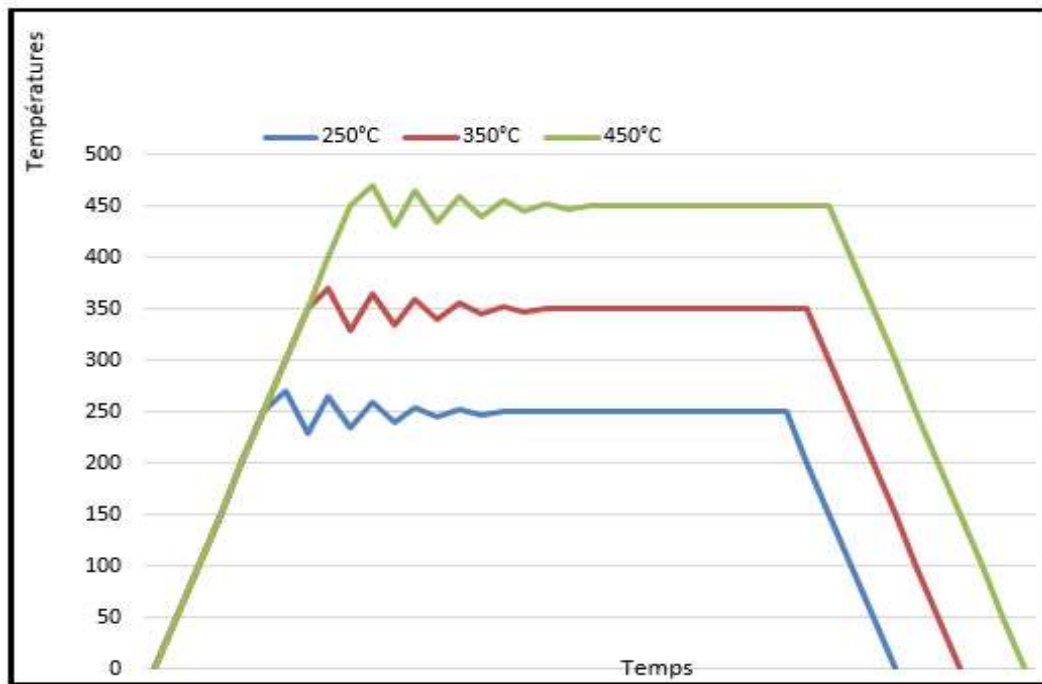


Figure (II-9) : Courbe de chauffage-refroidissement.

II.5 Polissage

Après refroidissement des éprouvettes, celle-ci seront soumises à l'opération de polissage par le biais d'une polisseuse, (figure II-10)



Figure (II-10) : Polisseuse utilisée.

Une éprouvette (témoin) et une éprouvette de chaque cycle à savoir : (250°C, 350°C, 450°C), avec des papiers vers allant de (P400 à P2000) pour obtenir des surfaces suffisamment lisses en éliminant les rayures, (figure II-11).



Figure (II-11) : Epreuve avec une surface lisse

II.6. Réalisation des essais mécaniques

II.6.1 Essai de dureté Rockwell

La mesure de dureté Rockwell a été réalisée au labo de l'université de Bejaia à l'aide d'un Duromètre (figure II-12), suivant ces étapes :

- 1) Le pénétrateur en forme conique est appliqué sur la surface des différentes pièces avec une charge F_0 .
- 2) Une surcharge $F_1=981\text{N}$ est ensuite appliquée pendant 8 secondes, pour atteindre la valeur de la charge totale d'essai $F=F_0 + F_1$ (le pénétrateur descend).
- 3) On retire ensuite la surcharge entraînant une légère remontée du pénétrateur, et la valeur de la dureté HRC s'affiche sur le duromètre.
- 4) La dureté Rockwell notée HRC est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100.



Figure (II-12) : Duromètre Rockwell.

II.6.2 Essai de résilience

La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm^2 , nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette. Son principe est le suivant :

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en V ou U.

On détermine alors l'énergie W absorbée par cette éprouvette après rupture.

Lors de l'essai, une force de poids P va tomber d'une certaine hauteur H , à ce moment on va enregistrer au niveau de l'éprouvette un certain travail que l'on va noter.

Lorsque l'éprouvette sera cassée, on aura enregistré un travail résiduel W_r , ce qui va nous permettre de déterminer le travail nécessaire pour briser l'éprouvette. (W_n).

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Travail nécessaire (énergie absorbée)}}{\text{Section au droit de l'entaille}}$$

- **L'énergie absorbée** : $W = (mgH_0 - mgH_1)$.
- **m** : la masse du marteau (g)
- **g** : la gravité qui est égale à $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$.
- **H0 et H1** : la différence de hauteur (cm).

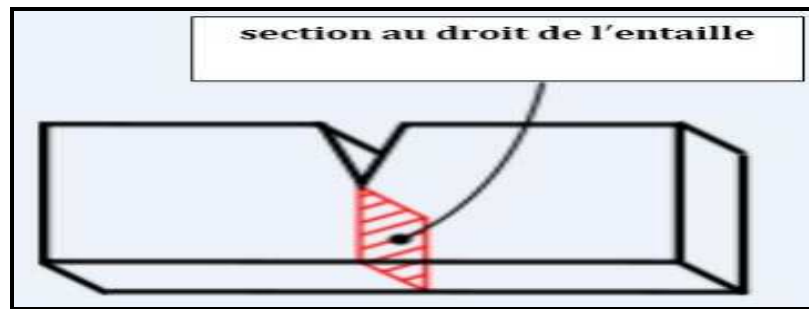


Figure (II-13) : Eprouvette normalisée.

➤ **Présentation de la machine de résilience**

Les essais de résilience ont été réalisés à l'université de Jijel au niveau du hall technologie, sur un mouton pendule Charpy de marque ZWICK (5111) (figure II-14), avec une énergie maximale du marteau allant jusqu'à 450J.

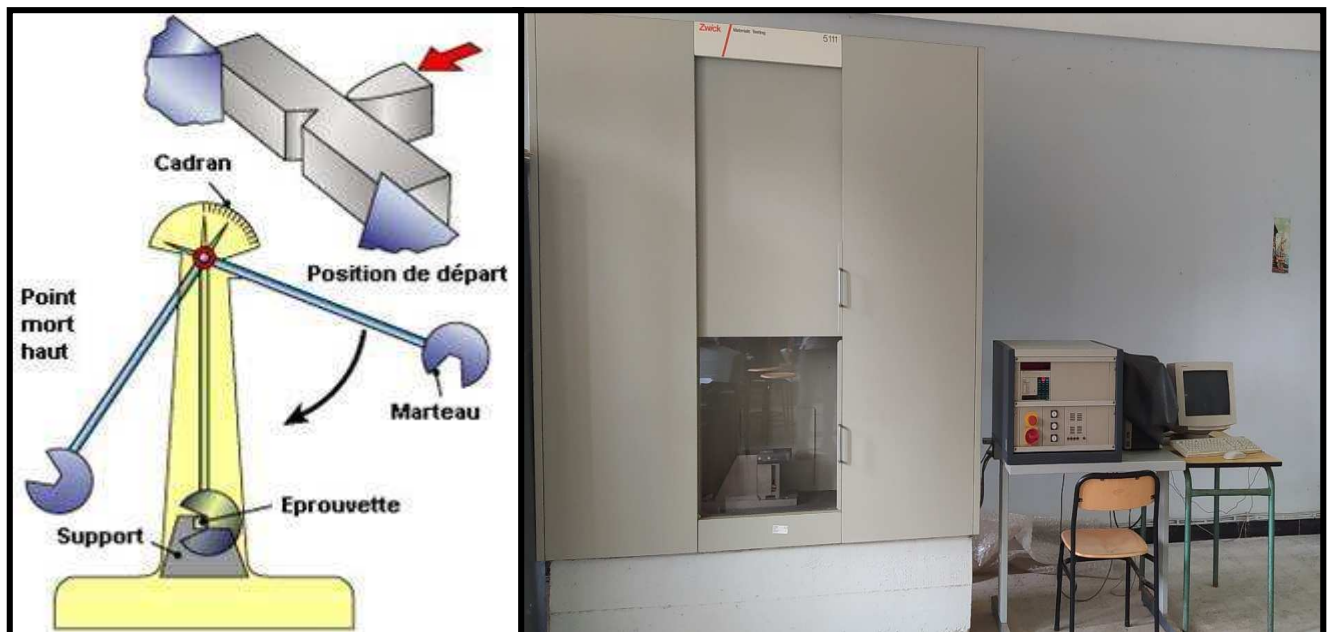


Figure (II-14) : Mouton pendule Charpy.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Résultats dureté Rockwell

Les résultats sont représentés dans les tableaux III-1, tableau III-2 et l'histogramme (figure III-1)

III.1.1 Dureté HRC sans traitement thermique

Les résultats obtenus par les essais de dureté HRC sur l'éprouvette soudée sans traitement thermique sont représentés dans le tableau III-1 ci-dessous :

Tableau III-1 : Résultats des essais de dureté de l'éprouvette soudée non traitées.

Eprouvette	Point	HRC Métal de base (zone gauche)	HRC Joint soudé	HRC Métal de base (zone droite)
Sans traitement	1	27	18	29
	2	28	16	25
	3	27	18	26
	Moyenne	27.33	17.33	26.66

Discussion des résultats

- **Métal de base** : Nous remarquons que les valeurs de dureté HRC de l'acier S235 est relativement proche et homogène dans la surface du métal de base avec une moyenne HRC= 27.
- **Joint soudé** : Nous remarquons que la dureté du joint soudé est moins importante par rapport à celle de l'acier S235. En effet le métal de base est plus dur que le joint soudé et cela est probablement du au fil électrode fusible a base du dioxyde de titane TiO₂ qui assure une très grande plasticité.

III.1.2 Dureté HRC avec traitement thermique

Les résultats des essais de dureté HRC montre l'influence des températures (250°C, 350°C et 450°C) sur les caractéristiques mécaniques du métal de base et du joint soudée sont représentés dans le tableau III-2 ci-dessous :

Tableau III-2 : Résultats des essais de dureté des éprouvettes soudées avec traitement thermiques.

Eprouvette	Point	HRC Métal de base (zone gauche)	HRC Joint soudé	HRC Métal de base (zone droite)
Chauffée à 250°C	1	25	20	28
	2	26	16	21
	3	27	18	25
	Moyenne	26	18	24.66
Chauffée à 350°C	1	21	20	19
	2	22	17	20
	3	17	17	19
	Moyenne	20	18	19.33
Chauffée à 450°C	1	19	16	18
	2	21	20	19
	3	20	23	18
	Moyenne	20	19.66	18.33

Discussion

- **Métal de base :** Nous remarquons une diminution importante de la dureté HRC de l'éprouvette traité à 350°C et 450°C par rapport à l'état initial, et une légère diminution de la dureté HRC de l'éprouvette traité à 250°C. Cette diminution est probablement due à l'absence des précipités de type carbure et manganèse.
- **Joint soudé :** Pour le joint soudé, nous remarquons une augmentation de la dureté HRC pour les températures 250°C, 350°C et 450°C cette augmentation est probablement due à

a la microstructure la zone de fusion (rutile) qui présente une forte porosité qui est une source de contraintes.

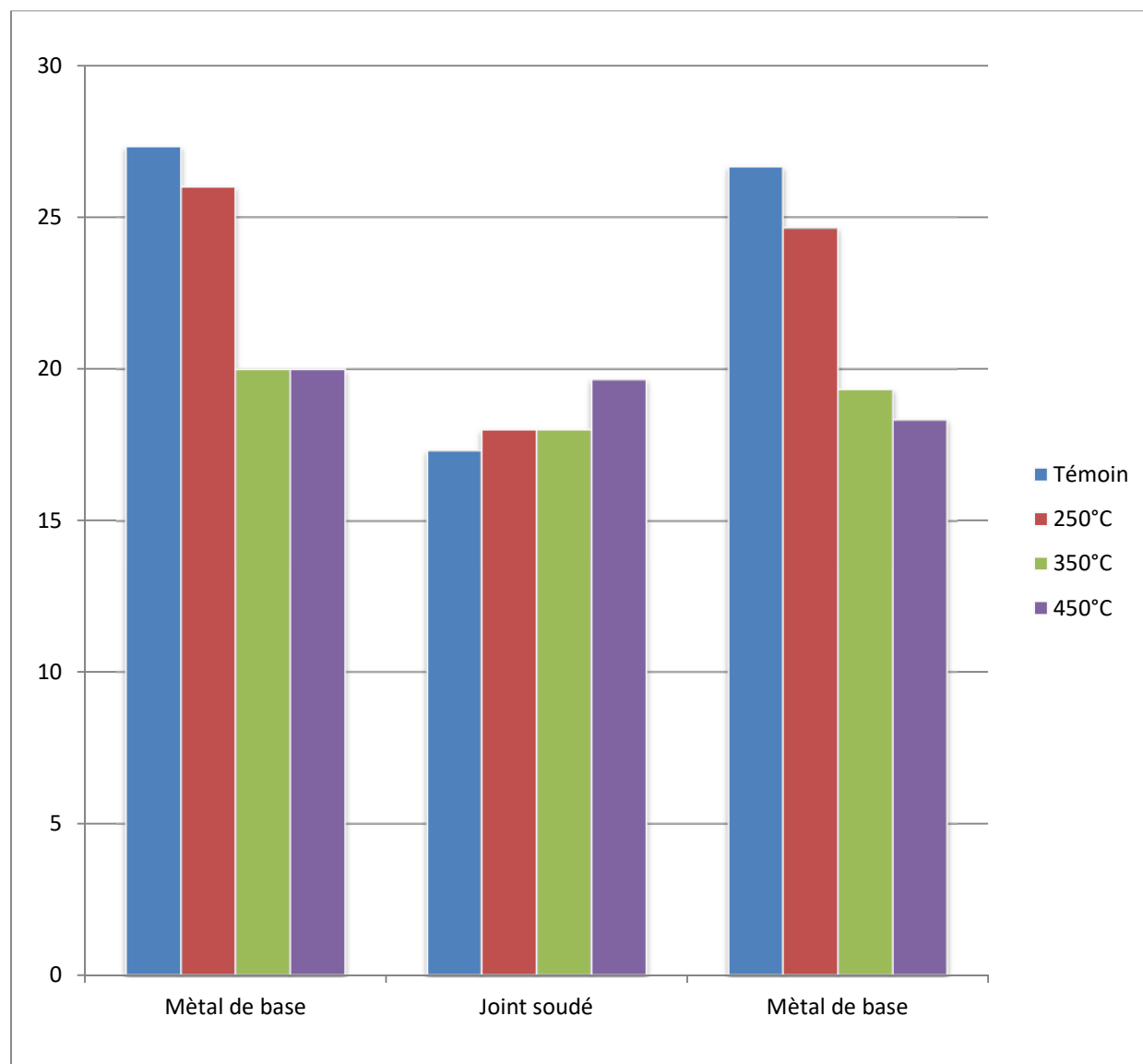


Figure (III-1) : Evolution des valeurs des essais dureté HRC.

III.2 Résultats des essais de résiliences

Les résultats obtenus lors des essais de résilience pour les éprouvettes soudées avant et après traitement thermique sont représentée dans le Tableau III-3 et l'histogramme (Figure III-2).

Le Tableau III-3 : les résultats des essais de résilience.

Eprouvette	Essai	Energie absorbée (J)	Section (cm ²)	Résilience (J/cm ²)	Moyenne (j /cm ²)
Sans traitement	1 ^{er} essai	80.40	0.73	110.14	106.53
	2 ^{eme} essai	74.10	0.72	102.92	
250°C	1 ^{er} essai	107.10	0.78	137.31	134.74
	2 ^{eme} essai	94.90	0.74	128.24	
	3 ^{eme} essai	104.80	0.75	138.67	
350°C	1 ^{er} essai	115.40	0.75	153.86	181.43
	2 ^{eme} essai	128.10	0.65	197.08	
	3 ^{eme} essai	143.10	0.74	193.37	
450°C	1 ^{er} essai	173.40	0.80	216.75	213.23
	2 ^{eme} essai	139.90	0.76	184.09	
	3 ^{eme} essai	188.70	0.79	238.86	

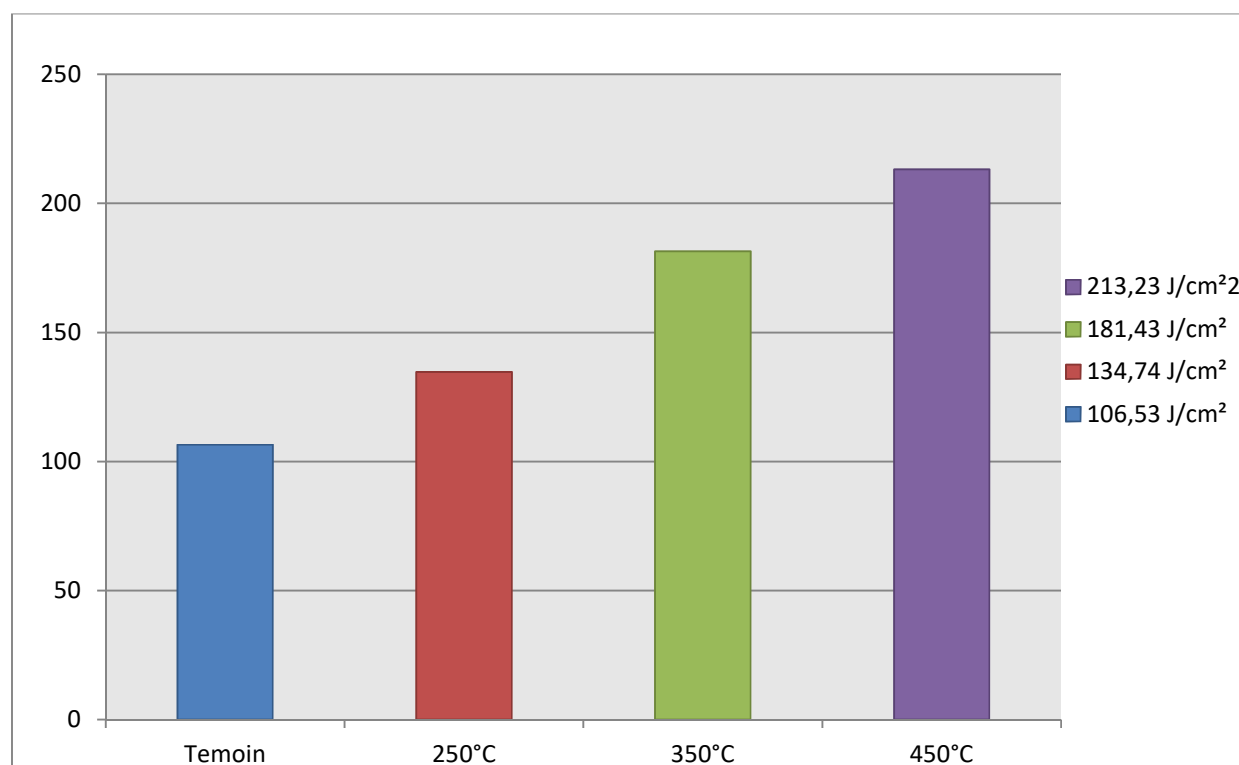


Figure III-2 : Histogramme comparatif des résultats de la résilience Kcv.

Discussion

Nous remarquons que la résilience augmente en fonction de la température pour atteindre une valeur de 213,23 J/cm². Cette augmentation de la résilience et donc de l'énergie absorbée après rupture de l'éprouvette, signifie que l'éprouvette résiste mieux au choc. Cette résistance est due à la diminution des contraintes résiduelles au niveau de la microstructure des joints soudés après les traitements thermiques.

En effet d'après les images des faciès de rupture des différentes éprouvettes ci-dessous on remarque :

- Les éprouvettes non traitées montrent des joints de soudures avec des faciès clairs et très brillants (figure III-3), ce qui indique que ces éprouvettes sont tenaces et présentent des ruptures fragiles, avec une moyenne $K_{cv}=106,53$ J/cm².
- Les éprouvettes traitées à 250°C montrent des joints de soudures avec des faciès clairs et moins brillants (figure III-4) que les éprouvettes non traitées, et cela explique l'augmentation de la résilience, avec une moyenne $K_{cv}=134,74$ J/cm².
- Les éprouvettes traitées à 350°C montrent des joints de soudures avec des faciès sombres et des traces de brillance (figure III-5), ce qui indique que ces éprouvettes sont moins tenaces et présentent une rupture ductile, avec une moyenne $K_{cv}=181,43$ J/cm².
- Les éprouvettes traitées à 450°C montrent des joints de soudures avec des reliefs sombres (figure III-6), ce qui indique que ces éprouvettes sont moins tenaces et présente une ductilité importante, avec une moyenne de résilience $K_{cv}=213,23$ J/cm².



Figure (III-3) : Faciès de rupture de l'éprouvette non traitée.



Figure (III-4) : Faciès de rupture de l'éprouvette chauffée à 250°C.



Figure (III-5) : Faciès de rupture a l'éprouvette chauffée à 350°C.



Figure (III-6) : Faciès de rupture pour l'éprouvette chauffée à 450°C.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude des caractéristiques mécanique d'un acier S235 contenant un joint de soudure, réalisé par le soudage semi-automatique sous protection gazeuse MIG, et l'influence de la température sur sa propriété de ductilité en observant son comportement face au choc à travers l'essai de résilience. Les essais de dureté ont pour but de mettre en évidence l'intensité de l'homogénéité de la microstructure dans le métal de base et du joint soudé à chaque cycle de chauffage-refroidissement avec les températures (250°C, 350°C et 450°C). Les résultats des essais se résument comme suit :

- L'acier S235 présente une dureté largement supérieure à celle du joint de soudure.
- La dureté du joint soudé augmente à chaque montée de température, inversement à la dureté du métal de base (l'acier S235) qui diminue.
- Le traitement thermique a apporté un effet bénéfique sur la ductilité du joint de soudure. En effet à la température 450°C le joint soudé présente une valeur de résilience d'une moyenne de 213,23 J/cm² qui est largement supérieure à celle du joint non traité qui est d'une moyenne de 106,53 J/cm².

D'une manière générale on peut conclure que les cycles de chauffage-refroidissement ont un effet positif au niveau de la résilience et de la dureté sur le joint de soudure réalisé par le soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG).

Référence bibliographique

- [1] Klas Weman : Procédés de soudage, Paris. Année 2012.
- [2] Bachir Mezrag. Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie). Année 2015.
- [3] LABED Mohamed Mohiédine : Réalisation d'un montage des soudages des métaux dissimilaires. Université de Biskra. Année 2018.
- [4] Association Française du soudage - <http://www.afs-asso.org/>
- [5] Klas Weman : Aide-mémoire (procédé de soudage). Année 2012.
- [6] Mounir FRIJA : Assemblage thermique par soudage. Cours.
- [7] Catalogue sur procédés de soudage PARIS. Année 2011.
- [8][http://www.soudeurs.com/site/les electrodes-enrobes-pour-le-soudage-leurs-caracteristiques-et-leurs choix](http://www.soudeurs.com/site/les-electrodes-enrobes-pour-le-soudage-leurs-caracteristiques-et-leurs-choix).
- [9] MAROUF Hanifa : Caractérisation structurale et mécanique de joint soudé de la liaison bimétallique acier ordinaire e36/acier anti usure NAXTRA 70 utilisé par ENMTP de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation, thèse. Université de Tizi Ouzou. Année 2012.
- [10] Bruce ANGLAD- Hélène HORSIN MOLINARO- Sylvain LAVERNHE : Les principaux défauts et risques liées au soudage. Université PARIS SACLAY. Année 2017.
- [11] SAID BENSAADA : Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes. Université de Biskra. Année 2012.
- [12] A. BERBITI, Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains, Université BADJI Mokhtar – Annaba. Année 2017.

Résumé

Dans ce mémoire de master, nous avons étudié les caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure obtenu par le soudage semi-automatique sous protection gazeuse MIG, ayant subi un traitement thermique de revenu avec les températures (250°C, 350°C, 450°C) et une durée de maintien d'une heure.

Des éprouvettes ont été réalisés afin d'effectuer des essais de résilience et de dureté. Les résultats obtenus ont montré que les cycles de chauffage-refroidissement ont eu un effet bénéfique sur la dureté et la résilience du joint soudé. En effet à 450°C le joint de soudure montre une ductilité très importante et une augmentation de la dureté HRC.

Mots clés : Résilience, Dureté, Traitement thermique, Soudage MIG.

Abstract

In this master thesis, we studied the mechanical characteristics of a weld joint obtained by semi-automatic welding under MIG gas protection, having undergone a heat treatment of tempering with temperatures (250°C, 350°C, 450°C) and a holding time of one hour.

Specimens were made in order to perform impact and hardness tests. The results obtained showed that the heating-cooling cycles had a beneficial effect on the hardness and impact strength of the welded joint. Indeed, at 450°C the weld joint shows a very important ductility and an increase of the HRC hardness.

Key Words : Impact strength, Hardness, Heat treatment, MIG welding.

المخلص

في الاطروحة للماجستير، قمنا بدراسة الخصائص الميكانيكية لمفصل اللحام الذي تم الحصول عليه عن طريق اللحام شبه الاوتوماتيكي تحت حماية الغاز، بعد ان خضعنا لمعاملات حرارية مع درجات حرارة (250 درجة مئوية، 350 درجة مئوية و450 درجة مئوية) وحبس وقت ساعة واحدة.

تم عمل عينات اختبار لأداء اختبارات المرونة والصلابة. اظهرت النتائج ان دورات التسخين والتبريد لها تأثير مفيدة على صلابة ومرونة الوصلة الملحومة. في الواقع عند درجة الحرارة 450 يظهر مفصل اللحام ليونة كبيرة جدا وزيادة في الصلابة.

الكلمات المفتاحية: المرونة، الصلابة، المعالجة الحرارية، اللحام.