



République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de M'sila

Faculté de Technologie



N° d'ordre : GM/...../2021

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : **FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIVE**

Thème :

**Etude mécanique et microstructurale de structure
En acier ordinaire E36 soudée par 2 types de soudage
(MIG et électrode enrobée)**

Proposé et Dirigé par :

Dr. ZAOUI MOUSSA

Présenté et Réalisé par:

Djeddou Omar

BALBOUL Salah Eddine

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HOCINE Mostapha	MCB	PRESIDENT
BEDDA Abdelmalek	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

*Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de M'avoir donné les
Forces pour accomplir ce travail.*

*Je remercie profondément mes très chers parents qui se sont donnés
beaucoup de peine dans la vie pour ma réussite, je souhaite que Dieu les
protège et leur donne la santé et la vigueur.*

Donc dans ce cadre nous adressons nos remerciements :

*A monsieur Dr : ZAOUI MOUSSA, notre encadreur, pour ses remarques et conseils
qu'ils nous ont aidé énormément.*

*Je remercie du fond du cœur, tous les enseignants au sein de
génie mécanique qui ont contribué à mon département.
Membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu

A Ma Mère qui a été toujours à mes côtés

A Tous La Famille

A tous Mes amis Sans exception

A tous mes amis de Faculté de Technologie

Omar djeddou

BALBOUL Salah Eddine

ملخص :

خلال هذا العمل، قمنا بدراسة ومقارنة تأثير نوعين من اللحام على الحالة الميكانيكية والهيكلية لصلب الكربون E36 أهم هذه الأنواع (اللحام MIG واللحام بالقوس الكهربائي ، حيث استخدمنا عدة عمليات ، بما في ذلك طريقة الجر ، ثم لاحظنا تحت المجهر البصري التطورات الهيكلية للعينة

من بين نتائج هذه الدراسة، تحديد مناطق مختلفة على جانبي الوصلة الملحومة مثل المنطقة المنصهرة والمنطقة المتأثرة حرارياً التي تم إنشاؤها نتيجة لعملية اللحام. لوحظ ذلك بوضوح ، وأظهرت البنية المهجرية المختلفة في هذه المناطق حجم الحبوب واتجاهاتها المفضلة.

الكلمات الدالة : اللحام اليدوي، اللحام الأوتوماتيكي، صلب الكربون E36 ، المنطقة المتأثرة، المنطقة المصابة حرارياً.

Résumé :

Au cours de ce travail, nous avons étudié et comparé l'effet de deux types de soudage sur l'état mécanique et structurel de l'acier ordinaire E36 Le plus important de ces types (soudage MIG et soudage à l'arc électrique, où nous avons utilisé plusieurs procédés, dont la méthode de traction, puis observé au microscope optique les développements structurels de l'échantillon

Parmi les résultats de cette étude L'identification de différentes zones de part et d'autre du joint soudée telle que la Zone Fondue et la Zone Affectée Thermiquement créés suite au procédé de soudage. Il à été clairement remarqué et des différentes microstructures dans ces zones à révélé que la taille des grains, leurs orientations privilégiées.

Mots clés : soudage manuel, soudage automatique, l'acier ordinaire E36, Zone Fondue, Zone Affectée Thermiquement.

Abstract:

In the course of this work, we studied and compared the effect of two types of welding on the mechanical and structural state of carbon steel E36 The most important of these types (MIG welding and electric arc welding , where we used several methods, including the traction method, then observed the structural developments of the sample under an optical microscope

Among the results of this study, the identification of different areas on either side of the welded joint such as the Melted Zone and the Thermally Affected Zone created as a result of the welding process. It was clearly noticed and the different microstructures in these zones revealed the size of the grains, their preferred orientations.

Keywords: manual welding, automatic welding, carbon steel E36, Molten Zone, Affected Zone Thermally.

Liste de Figure

Chapitre I

Figure I.1 : Mailles élémentaires des structures cristallines: CC et C.F.C.....	1
Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone.	8
Figure I.3 : Structure ferritique (Fer Armco. Traitement : 950 °C (30 min) - four. Attaque Nital (3 %). Grossissement 180).....	9
Figure I.4 : Structure austénitique (avec précipités de carbures) Acier à 0.12 %C- 25 %Cr -20% Ni- 1.5%Mn- 1. %Si Traitement: I 125 °C(I h) -eau - 800 K (30 min)Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900.....	9
Figure I.5 : Structure perlitique Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900	10
Figure I.6 : traitement thermique	10
Figure I. 7 : Sens longitudinale et transversale de tube	13

Chapitre II

Figure II.1 : les zones de la soudure	14
Figure II.2 : Classification des procédés de soudage les plus répandus.	15
Figure II.3 : Installation de soudage OA.....	17
Figure II.4 : Soudage au chalumeau.	17
Figure II.5 : Schéma d'installation manuel pour soudage MIG-MAG.....	19
Figure II.6 : Transfert du métal.	19
Figure II.7 : soudage par résistance.	20
Figure II.8 : Cycle thermique de soudage par résistance.	21
Figure II.9 : Installation pour soudage à l'électrode enrobé.	22

Figure II.10 : soudage par faisceau laser.....	23
Figure II.11 : de procédée de Soudage laser.	24
Figure II.12: <i>soudage par faisceau laser</i>	26
Figure II.13: <i>Principe de procédée de Soudage laser</i>	26

Chapitre III

Figure III.1 : soudage l'arc électrique.	29
Figure III.2 : Principe du Soudage à l'électrode enrobée.	29
Figure III.3 : schéma du soudage à l'arc (électrode enrobée).	31
Figure III.4 : L'électrode enrobée.	31
Figure III.5 : Fusion des électrodes.	34
Figure III.6 : Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon.	37
Figure III.7 : Porte électrode.	38
Figure III.8 : Pince de masse pour poste à soudure.	38
Figure III.9 : Câble de souder 50 mm ²	39
Figure III.10 : Soudage MIG-MAG.	40
Figure III.11 : procédé de soudage MIG/MAG	41
Figure III.12 : Principe de la procédée du soudage MIG/MAG.	42
Figure III.13 : les 3 régimes de transfert du soudage Mig-Mag.....	45
Figure III.14 : Influence de la tension d arc et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG MAG.....	46
Figure III.15 : Le différent mode d'action sur le fil.	47
Figure III.16 : Gaz utilisés pour le soudage Mig- Mag.....	47
Figure III.17 : La torche de soudage Mig-Mag.....	48

Figure III.18 : Buse de sortie de gaz.....	49
Figure III.19 : Soudage en tirant ou poussant.	50
Figure III.20 : Angle de la torche.	50
Figure III.21 : bobines de file de soudage Mig- Mag.....	51

Chapitre : IV

Figure IV.1 : Couplage thermo métallurgique et mécanique au cours d'une opération de soudage....	54
Figure IV.2 : Cycle thermique: cas du soudage mono passe.....	55
Figure IV.3 : Cycle thermique pour le soudage multi passes.....	56
Figure IV.4 :Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.....	57
Figure IV.5 : Cordon de soudure	59
Figure IV.6 : Variation de la dureté dans un joint soudé	59
Figure IV.7 : Fissure à chaud (ou de solidification).	60
Figure IV.8 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.....	61
Figure IV.9 : <i>Fissure à froid (fissure d'hydrogène)</i>	62

Chapitre : V

Figure V.1 : <i>La macrographie des 4soudures : a) intensité 4 V, b) intensité de 6 V, C) intensité 9 V, d) soudure sans gaz de protection.....</i>	63
Figure V.2 : <i>Micrographie optique de la soudure S1</i>	64
Figure V.3 : <i>Micrographie optique de la soudure S2</i>	64
Figure V.4 : <i>Micrographie optique de la soudure S3</i>	64
Figure V.5 : <i>Micrographie optique de la soudure S4</i>	65
Figure V.6 : <i>La macrographie des 4 zones soudures.....</i>	65
Figure V.7 : <i>Microstructures de métal de base(MB) S235.....</i>	66

Figure V.8: <i>Microstructures de métal de base(MB) 316L</i>	67
Figure V.9: <i>Microstructure la ZAT de l'acier S235</i>	68
Figure V.10: <i>Microstructure la ZF de l'acier S235</i>	68
Figure V.11: <i>Rupture du métal de base (sans soudure) après l'essai de Traction</i>	69
Figure V.12: <i>Rupture des éprouvette S1, S2, S3, S4 après l'essai de traction indiquées par 1,2, 3, et sans CO2 respectivement</i>	70
Figure V.13: <i>Comparaison des limites élastiques</i>	70

Liste de Tableau

Chapitre : I

Tableau I.1 : <i>Récapitulatif des différents aciers non allie</i>	3
Tableau I.2 : <i>Récapitulatif des différents aciers fortement alliés</i>	5
Tableau I.3 : <i>. Caractéristique mécanique par (N/mm²) (Tubes de conduite PSL 1)</i>	13

Chapitre: II

Tableau II.1 : <i>Représentation graphique des déplacements du chalumeau</i>	18
Tableau II.2 : <i>Avantages et inconvénients MIG-MAG</i>	20
Tableau II.3 : <i>avantages et inconvénient de soudage TIG</i>	21
Tableau II.4: <i>Avantages et inconvénient du soudage par résistance</i>	23
Tableau II.5: <i>Avantages et inconvénients du soudage laser</i>	27

Chapitre: III

Tableau III.1: <i>Facteurs déterminant le choix de l'électrode</i>	33
Tableau III.2: <i>Consommation des électrodes en fonction du diamètre \emptyset</i>	36
Tableau III.3: <i>Intensité du courant de soudage</i>	37
Tableau III.4: <i>récapitulatif des modes de transfert du métal dans l'arc en fonction du gaz</i>	48
Tableau III.5: <i>le diamètre de file</i>	51
Tableau III.6: <i>Choix des tensions du titre indicatif</i>	52

Chapitre: V

Tableau V.1: <i>Paramètres de l'intensité de soudage</i>	63
Tableau V.2: <i>Résultats des courbes de traction</i>	69

Liste des symboles

SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG.

GTAW : Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG).

PAW : Soudage plasma.

RSW : Soudage par résistance par point.

ZAT : Zone affectée thermiquement.

MB : Métal de base.

ZF : Zone fondue.

ZL : zone de liaison.

α : Ferrite.

γ : Austénite.

A% : Allongement.

I : Intensité (A).

U : tension(V).

L : Longueur d'éprouvette (mm).

S : Section d'éprouvette (mm).

T : Température(Co).

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACES.....	
Résumé.....	
LISTE DE FIGURE	I
LISTE DE TABLEAU	V
LISTE DES SYMBOLES.....	VI
INTRODUCTION GENERALE.....	a

Chapitre I: les aciers

I.1: Introduction.....	1
I.2:Définition de l'acier.....	1
I.3:Classification des aciers.....	1
I.3.1: Les aciers au carbone.....	2
I. 3.1.1: Aciers à faible carbone.....	2
I.3.1.2:Les aciers à moyen carbone.....	2
I .3.1.3 : aciers à haute pourcentage de carbone.....	2
I .3.2 : Aciers alliés ou non alliés.....	2
I .3.2.1: Aciers non alliés.....	2
I .3.2.2: Aciers alliés.....	3
I.4 : Influence spécifique des éléments d'addition :	5
I.5: Diagrammes de phases fer – carbone.....	7
I.5.1: Les principales phases de diagramme de Phase.....	8
I.5.1.1: La ferrite.....	8
I.5.1.2: L'austénite.....	8
I.5.1.3: La cémentite.....	8
I.5.1.4: La perlite.....	9
I.5.1.5: Le point eutectoïde.....	9
I.6: TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS.....	10

1.6.1: Définition.....	10
1.6.2 : Les différents types de traitements thermiques.....	10
1.6.2.1 : Le recuit.....	10
1.6.2.2: La trempe.....	11
1.6.2.3: Le revenu.....	12
I.7: Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers.....	13

Chapitre II: Procèdes de Soudage

II.1:Introduction	14
II.2 : Définition de soudage	14
II.3 : procédés de soudage	15
II.3.1 : Procédé du Soudage oxyacétylénique:.....	16
II.3.1.1 : Définition.....	16
II.3.1.2 : Principe du procédé.....	16
II.3.1.2.1 : Brasage	16
II.3.1.2.2 : Souda-brasage	16
II.3.1.2 .3 : Soudage	16
II.3.1.2 .4 : Opérations de soudage.....	17
II.3.1.2 .5 : Domaine d’application.....	18
II.3.2 : Procédé de soudage MIG-MAG :	18
II.3.2 .1 : Définition	18
II.3.2.2 : Principe du procédé	19
II.3.2.3 : Avantages et inconvénients.....	20
II.3.2.4 : Domaine d’application.....	20
II.3.3 : Procédé de soudage TIG	20
II.3.3.1 : Définition	20
II.3.3.2 : Principe du procédé.....	21
II.3.3.3 : Avantages et inconvénient.....	21
II.3.3.4 : Domaine d’application.....	21

II.3.4 : Procédé de soudage par résistance	21
II.3.4.1 : Définition.....	22
II.3.4.2 : Principe du soudage.....	22
II.3.4.3 : Avantages et inconvénients.....	23
II.3.4.4 : Domaine d'application	23
II.3.5 : Procédé du soudage à l'arc électrique avec une électrode enrobée	23
II.3.5.1 : Définition.....	23
II.3.5.2 : principe du procédés	24
II.3.5.3 : Avantages et inconvénient.....	24
II.3.5.4 : Domaine d'application.....	25
II.3.6 : Procédé du Soudage Laser.....	25
II.3.6.1 : Définition	25
II.3.6.2 : principe du procédés	26
II.3.6.3 : Avantages et inconvénients.....	27
II.3.6.4 : Domaine d'application.....	27

Chapitre III: Soudage à l'arc électrique avec une électrode

Enrobé et Soudage MIG-MAG

III.1:Introduction	28
III.2 : Historique sur le soudage à l'arc électrique.....	28
III.3 : Définition	28
III.4 : Principe de soudage à l'arc électrique.....	29
III.5 : Le soudage avec électrodes enrobées.....	30
III.5.1 : Principe du procédé.....	30
III.5.2 : Les électrodes	31
III.5.3 : Réglage du poste	32
III.5.4 : Rôle de l'enrobage.....	32
III.5.5 : types d'enrobage.	32

III.5.6 : Choix des électrodes.....	33
III .5.7 : Étuvage des électrodes enrobées.....	33
III.5.8 : Fusion de l'électrode	34
III.5.9 : Principaux composants des enrobages.....	35
III.5.10 : Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire.....	35
III.5.11: Domaines d'applications.....	36
III.6: Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées	36
III.7 : Influence des paramètres de Soudage avec électrode enrobée	37
III.8 : Accessoires Pour Le Soudage A L'arc.....	37
III.8.1: Porte électrodes.....	37
III.8.2 : Pince de masse pour poste à souder.....	38
III.8.3 : Câble de souder.....	39

Soudage MIG

III.1 : Historique du soudage MIG.....	40
III.2:Définition.....	40
III.3 : Les procédés de soudage MIG/MAG.....	41
III .4 : Principes du procédé de soudage MIG/MAG.....	42
III.5 : Les Avantages et Les Inconvénients Du Procédé MIG/MAG	42
III .6 : Les régimes de transfert du métal dans l'arc:	43
III.7 : Installation d'un poste MIG-MAG.....	46
III.7.1 : Le générateur.....	46
III.7.2 : Le coffre de commande.....	46
III.7.3 : Le dévidoir.....	46
III.8: Les gaz de soudage	47
III.9 : La torche de soudage.....	48
III.9.1 : Angle de Torche.	49
III.10.La File de Soudage.....	50
III.11 : Le réglage des paramètres	51

III.12 : Domaines d'utilisation.....	53
---	-----------

Chapitre IV : La Métallurgie du soudage

IV.1 :Introduction.....	54
--------------------------------	-----------

IV.2 : Aspect thermique du soudage	54
---	-----------

IV.2.1 : Cycle thermique du soudage mono passe.....	55
--	-----------

IV.2.2 : Cycle thermique du soudage multi passes.....	56
--	-----------

IV.2.3 : Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage.....	57
---	-----------

IV.3 : Les défauts des soudages.....	59
---	-----------

IV.3.1 : Les fissures.....	59
-----------------------------------	-----------

IV.3.1.1 Fissure à chaud (ou de solidification)	60
--	-----------

IV.3.1.2 : Fissures à froid (fissures d'hydrogène)	61
---	-----------

Chapitre V : Partie expérimentale

V.1 : Introduction.....	63
--------------------------------	-----------

V.2 : Paramètres des soudures.....	63
---	-----------

V.3 : Observation macrographique des éprouvettes.....	63
--	-----------

V.4 : Observation microscopique des éprouvettes	64
--	-----------

V.5 : Caractérisation microstructurale	65
---	-----------

V.5.1 : Observation de macrographie de l'éprouvette.....	65
---	-----------

V.5.2 : Analyses métallographiques.....	66
--	-----------

V.5.2.1 : La micrographie du métal de base (MB).	66
---	-----------

V.5.2.2: La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT).	67
--	-----------

V.5.2.3 : La micrographie de la zone fondue (ZF).....	68
--	-----------

V. 6 : Caractéristiques mécaniques	69
---	-----------

V.6.1 : Essais de traction	69
---	-----------

conclusion generale :	b
------------------------------------	----------

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale :

L'acier présente une position particulière et prestigieuse entre les métaux et l'industrie métalliques à cause de leur flexibilité et leur caractéristiques : mécanique, chimique et physiqueetc.

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

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre dégradeur que celle du matériau de base .

Donc l'objectif actuel du travail etude des changements thermiques qui se produisent sur la pièce métallique pendant le soudage et dont la composition change dans les zones proches des points de soudage . L'assemblage des tôles en acier Ordinaire E36 réalisé à l'arc électrique et MIG

Après introduction générale, le mémoire est composé de cinq chapitres et conclusion générale :

- ❖ Le premier chapitre est généralités sur les aciers.
- ❖ Le deuxième chapitre traite les procédés de Soudage.
- ❖ Le troisième chapitre traite d'une étude sur le soudage à l'arc électrique avec une électrode enrobée et Soudage MIG-MAG.
- ❖ Le quatrième chapitre traite des Métallurgie de Soudage.
- ❖ Le cinquième chapitre est partie expérimentale.

A la fin de ce travail une conclusion général.

Chapitre 1 : Les aciers

I.1 Introduction

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. CE progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant l'addition d'éléments d'alliages états différents mécaniques, thermiques et chimiques. [1]

I.2 Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage: il est considéré alors comme un acier allié. [2]

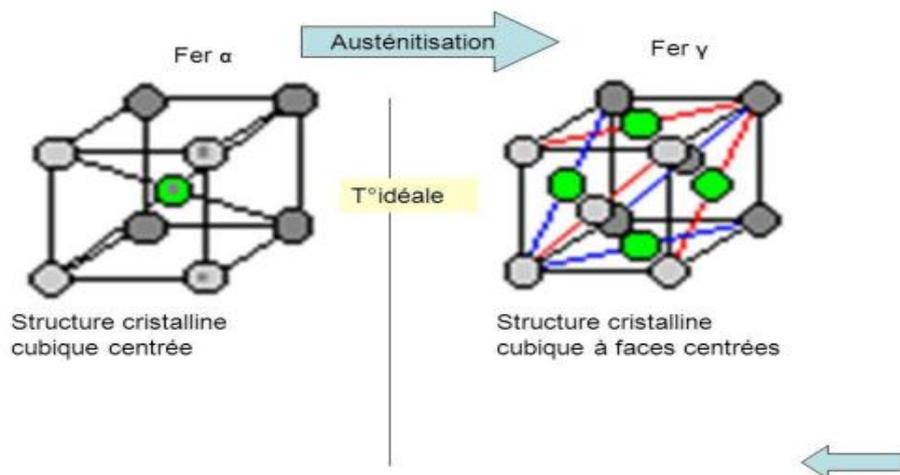


Figure. I.01 : Mailles élémentaires des structures cristallines: CC et C.F.C. [2]

I.3 Classification des aciers

Les aciers peuvent être classifiés selon :

- La composition, telle que le carbone, faiblement allié, ou les aciers inoxydables... ;
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique-La méthode de finition, telle que le laminage à chaud ou laminage à froid
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ou la forme structurale.
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé
- La microstructure, telle que de ferrite, perlitique, et martensitique.....

Chapitre I : Les aciers

-Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM

-Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique. Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement et sera soulignée comme suit. Plus on a de carbone, plus l'acier est dur. On a donc initialement classé l'acier en catégories. [3]

I. 3.1 Les aciers au carbone

I. 3.1.1 Aciers à faible carbone

Ce type d'aciers Contient jusqu'à 0,30% C. La catégorie la plus importante de cette classe d'acier est de produits plats laminés (feuille ou bande), habituellement dans l'état laminé à froid et recuite. La teneur en carbone de ces aciers qui sont à haute aptitude à la déformation est très faible, moins de 0,10% de C, jusqu'à 0,4% de Mn. Les utilisations typiques de cette classe sont dans les panneaux de carrosserie automobile, plaque d'étain, et les produits métalliques. Pour l'acier laminé à plaques structurelles et sections, la teneur en carbone peut être augmentée, environ de 0,30%, avec une plus grande teneur en manganèse jusqu'à 1,5%. Ces matériaux peuvent être utilisés pour les pièces embouties, pièces forgées, tubes sans soudure, et plaque de la chaudière.

I. 3.1.2 Les aciers à moyen carbone

Sont des aciers similaires à des aciers à faible teneur en carbone, sauf que le teneur en carbone et de 0,30 à 0,60% et le manganèse 0,60 à 1,65%. L'augmentation de la teneur en carbone à environ 0,5%, avec une augmentation concomitante de manganèse permet aux aciers au carbone d'être utilisés dans l'état trempé et revenu. Les utilisations des aciers au carbone manganèse moyennes comprennent des arbres, des essieux, des raccords et des pièces forgées. Aciers dans la gamme 0,40 à 0,60% de C sont également utilisés pour les rails, les roues de chemin de fer et les essieux ferroviaires. Les aciers carbone contiennent de 0,60 à 1,00% C avec des teneurs en manganèse allant de 0,30 à 0,90%.

I. 3.1.3 aciers à haute pourcentage de carbone

Sont des alliages expérimentaux contenant 1,25 à 2,0% C. Ces aciers sont thermomécanique traités pour produire des microstructures qui se composent des ultrafins grains équiaxes de particules sphériques et discontinues proeutectoïde carbures. [4]

I. 3.2 Aciers alliés ou non alliés

I. 3.2.1 Aciers non alliés

En faisant abstraction des impuretés, l'acier peut être considéré comme un alliage binaire fer - carbone (jusqu'à 1,7 % de carbone). Les mélanges hétérogènes fer - carbone sont caractérisés par la présence de grains de ferrite (solution solide fer - carbone) et de grains de perlite (agrégat perlite + cémentite (Fe₃C)). La cémentite est un composé dur et fragile qui se dispose en fines lamelles alternées sur les grains. A l'examen au microscope optique, ces lamelles de cémentite présentent un aspect nacré à l'origine du nom de cette structure particulière: la perlite. Au dessus de 0,85 % de carbone (eutectoïde), l'acier n'est plus composé que de perlite. De plus, la cémentite supplémentaire s'accumule aux joints de grains. On doit noter que ces structures correspondent à un état recuit (non

Chapitre I : Les aciers

trempe) de l'acier. Mais nous rappelons que la trempe des aciers consiste à faire subir au matériau un cycle particulier de variation de la température et surtout un refroidissement qui permet la création d'une nouvelle structure appelée martensite : ceci permet d'augmenter les caractéristiques de dureté, de limite élastique...etc. Les différentes structures des aciers en fonction de la température sont représentées dans le diagramme d'équilibre fer-carbone. Il traduit la composition de phases et la structure de l'alliage dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6.67%)

Les aciers non alliés (4) – Acier usuels				
Aciers au carbone				
Nuances normalisées	Rm (N/mm ²) MPa	Re (N/mm ²) MPa	A % (maxi)	K (daJ/cm ²)
	Traitements thermiques – forgeage			
C 25	460 à 690	285 à 370	18 à 21	
C 35	570 à 830	335 à 490	16 à 20	
C 40	620 à 880	355 à 520	14 à 19	
C 45	660 à 930	375 à 580	13 à 18	
C 50	700 à 980	395 à 600	12 à 17	
	Pour trempe superficielle			
C 40	Dureté de la couche trempée : 55 HRC			

Tableau I.1: Récapitulatif des différents aciers non alliés

I.3.2.2 Aciers alliés

Pour améliorer certaines propriétés d'un acier (limite élastique, résilience,...), on lui ajoute de faibles proportions d'éléments comme le chrome, le nickel, le vanadium, le zirconium,...etc. Un acier est faiblement allié si les teneurs en éléments d'addition restent inférieures à un certain seuil. Par contre pour une teneur supérieure à 5 % pour l'un quelconque des éléments d'addition, l'acier est dit fortement allié. Le rôle des éléments d'apport devient prépondérant et les propriétés des aciers fortement alliés sont nettement différentes de celles des aciers non alliés. La trempabilité est généralement supérieure et des structures martensitiques peuvent être obtenues par des trempes à l'huile ou à l'eau (aciers autotremnants). [5]

- **Les aciers microalliés**

Les aciers microalliés sont des aciers à haute résistance mécanique caractérisés par de faibles additions de niobium (Nb), de vanadium (V) et/ou de titane (Ti). Ces éléments de microalliage (-0.1 % massique) s'associent avec des éléments interstitiels (carbone, et/ou azote) pour former des précipités : nitrures. Carbures et/ou carbonitrures. Cette précipitation conduit à un accroissement des

Chapitre I : Les aciers

propriétés mécaniques par rapport aux aciers de base au carbone manganèse. Ces niveaux de propriétés mécaniques sont garantis par l'affinage des grains austénitiques et le durcissement structural induit par la précipitation de dispersives. Les effets spécifiques de telles additions peuvent être affectés par l'addition d'autres éléments d'alliage (B, Si, Cr, etc.) d'une part, et par la maîtrise des paramètres de traitements thermiques et et/ou thermomécaniques, d'autre part. Vers la fin des années soixante, les aciers microalliés occupaient une place importante parmi les aciers. Ils ont gagné rapidement l'intérêt des fabricants grâce à la possibilité d'utiliser des procédés de semi-calmage dans leur production, de par la faible affinité du niobium et du vanadium pour l'oxygène. Les aciers normalisés dans lesquels l'aluminium jouait le rôle d'agent d'affinage du grain, étaient produits en tant qu'aciers calmés à plus faibles rendements. Néanmoins, leur succès ne s'est confirmé que dans les années soixante-dix. Cet essor est dû, en grande partie, à des facteurs d'ordre économique voire géopolitique (avènement du 1er choc pétrolier). Ces aciers ont investi particulièrement les domaines industriels du bâtiment, du transport et de la pétrochimie. L'usage des aciers microalliés dans l'industrie du bâtiment a permis une réduction considérable de la section des produits, entraînant des économies dans la réalisation des ouvrages (grands projets d'urbanisation, ponts, etc.). L'usage des aciers microalliés dans l'industrie automobile a entraîné une réduction significative de la masse des véhicules conduisant à des économies aussi bien dans La fabrication que dans la mise en service, garantissant ainsi une réduction de la consommation énergétique. L'usage des aciers microalliés dans l'industrie pétrochimique a permis, entre autres, la réalisation de gazoducs et d'oléoducs, avec des diamètres toujours croissants, opérationnels dans des conditions extrêmes (Mer du Nord, Sibérie, etc.) La mise au point des aciers microalliés a été à l'origine de l'amélioration de la soudabilité des pièces, ce qui a favorisé la généralisation du soudage par fusion. Deux facteurs apparus récemment contribuèrent également au développement de nouvelles nuances d'aciers microalliés. Il s'agit de la sensibilisation de la société par les problèmes de la sécurité routière et du respect de l'environnement. Ces exigences sociétales ont conduit les différents législateurs à imposer des normes de plus en plus contraignantes (émissions de à effet de serre, économie de carburants, etc.). Parmi les nuances qui font l'objet des différents programmes de développement, on citer les aciers microalliés à moyen carbone destinés à la forge. [6]

- **Aciers fortement alliés**

On désigne par acier fortement allié un métal dans lequel un des éléments d'addition au moins a une teneur égale ou supérieure à 5 %. Il se distingue par une lettre majuscule Z, indiquant que ce métal est fortement allié, suivie de 100 fois la teneur en carbone suivie elle-même du symbole des éléments d'addition et des pourcentages exacts de ceux-ci. Dans les Acier fortement allié La teneur en molybdène n'est pas spécifiée, celui-ci entrant dans l'alliage à moins de 1 %.[7]

ACIERS FORTEMENT ALLIÉS			
Nuances usuelles*		Traitement de référence	
		R min**	Re min**
X 4 Cr Mo S 18	(Z 8 CF 17)	440	275
X 30 Cr 13	(Z 30 C 13)	HRC ≥ 51	
X 2 Cr Ni 19-11	(Z 3 CN 19-11)	460	175
X 5 Cr Ni 18-10	(Z 6 CN 18-09)	510	195
X 5 Cr Ni Mo 17-12	(Z 7 CND 17-12)	510	205
X 6 Cr Ni Ti 18-10	(Z 6 CNT 18-11)	490	195
X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12	(Z 6 CNDT 17-12)	540	215

Conversion entre la dureté et la résistance à la traction chapitre 71.

Tableau I.2: Récapitulatif des différents aciers fortement alliés [7]

- **Aciers Laminés à Structure Perlitique**

Ils sont un groupe spécial d'aciers dont l'augmentation des propriétés mécaniques (et dans quelques cas, la résistance à la corrosion atmosphérique) est obtenue par l'addition de quantités modérées d'un ou de plusieurs éléments autres que le carbone. D'autres aciers perlitique contiennent de petites quantités d'éléments alliés pour améliorer la soudabilité, la formabilité, la ténacité et la dureté. [8]

I.4 Influence spécifique des éléments d'addition :

Les principaux éléments d'addition du fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse. L'aluminium, le silicium, le titane, le niobium. L'azote... ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques. L'action des éléments d'addition dépend essentiellement des deux facteurs décrits ci-dessous :

- Modification du domaine de stabilité de l'austénite. Certains éléments, comme le carbone, le nickel et le manganèse élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformations. Avec des teneurs en nickel ou en manganèse suffisamment élevées, l'acier présente, même à la température ambiante, une structure austénitique (additions de plus de 20% de nickel ou de plus de 10 % de manganèse) Ces éléments sont dits gammagène. D'autres éléments, par contre dits alphagène rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformations on retrouve là, entre autres. Cr. Mo. Ti. W. V. Nb et Si.

- La tendance des éléments d'addition à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite Fe_3C (cas du manganèse) ou à former des carbures spécifiques (MC). Citons dans l'ordre croissant d'affinité pour le carbone : Cr. W. Mo. V. Ti, et Nb. Par contre Si et Ni ne forment pas de carbures et se retrouvent en solution dans la ferrite. La présence des carbures autres que la cémentite est souvent souhaitable dans les aciers, car ils augmentent la résistance à l'usure et la tenue à chaud. Toutefois, à cause de la stabilité de ces carbures à haute température, il est souvent difficile de les mettre

Chapitre I : Les aciers

entièrement en solution dans l'austénite sans provoquer un grossissement des grains, qui est toujours préjudiciable aux propriétés des pièces trempées.

Le carbone : Élément fortement gammagène (diagramme de Schaeffler), il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome $Cr_{23}CO_6$ inter granulaires qui diminuent la résistance à la corrosion inter granulaire.

Le chrome : Cet élément d'addition alphasène est particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier. Par la formation de carbures de types M_7C_3 (1400- 1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphasène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

Le nickel : Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

Le molybdène : Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M_6C -1500HV, M_2C -2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. De plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le molybdène, élément alphasène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques donc la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et les caractéristiques mécaniques. C'est le cas de l'alliage X2CrNiMo17-13-5. La composition chimique des précipités est fortement dépendante de celle de la matrice et n'est pas forcément stœchiométrique. Pour les nuances non stabilisées dont la teneur en carbone est de l'ordre de 0,05 %, il existe un risque de précipitation de carbures de type $M_{23}C_6$ ($Cr_{23}CO_6$) aux joints des grains après des maintiens de longue durée entre 500 et 800°C. Cette précipitation diminue nettement la résistance à la corrosion inter granulaire. Les aciers inoxydables de cette famille contiennent généralement entre 0,02 et 0,10 % de carbone, 17 à 20 % de chrome, 7 à 25 % de nickel et 2 à 5 % de molybdène.

Le silicium : Le silicium, autre élément alphasène. Améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M_2C ce qui abaisse la fragilité du métal. Comparativement au chrome et à l'aluminium, l'addition de silicium influe d'une manière plus importante sur la résistance à l'oxydation entre 500 et 700°C. L'effet du silicium dans les alliages Fe

Chapitre I : Les aciers

Al-Si. Est d'établir une couche d'oxyde riche en silicium au dessus de la couche d'oxyde d'aluminium. L'oxyde formé est plus protecteur que l'oxyde d'aluminium et renforce l'effet protecteur de la couche d'alumine

Le niobium : Est l'élément chimique de numéro atomique 41, de symbole **Nb**. Le corps simple est un métal de transition gris, rare, relativement mou et ductile. Pour la plus grande part (environ 90 %), le niobium est utilisé dans les aciers comme élément d'alliage. Le reste de la production mondiale passe dans l'élaboration de superalliages. Les aciers sont employés dans les pipelines, le domaine spatial et l'automobile (barres anti-intrusion). Les superalliages au niobium permettent de fabriquer certains aimants supraconducteurs.

Le titane : Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxydabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome.

Le manganèse : Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité. Permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite. Où il remplace une partie du fer.

Le cuivre : Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

Le soufre : Le soufre il diminue la résistance à la corrosion.

Le vanadium : Il affine le grain primaire donc la structure de coulée; puissant générateur de carbures, d'où accroissement de la résistance à l'usure, de la tenue en coupe et à la chaleur; de ce fait, utilisation privilégiée comme composant additionnel d'alliage dans les aciers rapides, de travail à chaud et résistant au fluage à température élevée. Amélioration substantielle de la résistance au revenu, réduction de la sensibilité à la surchauffe. V affinant le grain et inhibant la trempe à l'air suite à la formation de carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement. Suite à la constitution de carbures, accroissement de la résistance à l'hydrogène sous pression V rétrécit la zone γ et décale le point Curie en direction de températures plus élevées.

Le zirconium : Générateur de carbures; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation. Dénituration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure à la roue. [9]

I.5 Diagrammes de phases fer – carbone

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles. [10]

Chapitre I : Les aciers

La (Figure. I.02) Présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.

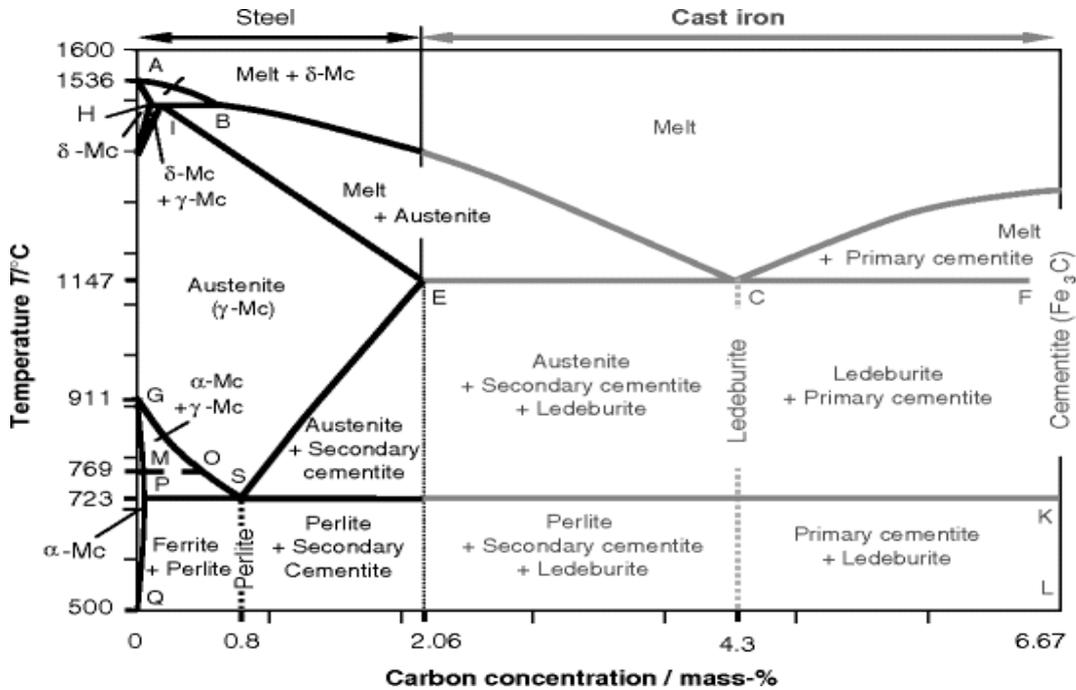


Figure. I.02 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [10]

I.5.1 Les principe de diagramme de Phase

I.5.1.1 La ferrite

Région marquée A, contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le ternie de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F). la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue. Tous les aciers et fontes contiennent de la ferrite. Cette phase comporte la même quantité de carbone, quelle que soit la teneur en carbone de l'acier ou de la fonte. La ferrite se forme seule dans les régions A et E. elle se forme conjointement à de la cémentite E. F et G. La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace.

I.5.1.2 L'austénite

L'austénite région C'est la dernière zone importante sur le diagramme fer-carbone. Cette phase est stable au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F). L'austénite peut contenir 1.86% de carbone. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est une région importante pour le traitement thermique des aciers. C'est une structure cubique faces centrées, qui est différente de la structure cubique centrée de la ferrite. L'austénite est également appelée fer gamma.

I.5.1.3 La cémentite

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe₃C. Elle contient 6.69% de carbone. A cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la Comme mentionné auparavant,

Chapitre I : Les aciers

une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer. Quel que soit l'endroit où la cémentite est présente dans le diagramme fer-carbone, elle contient toujours 6.69% de carbone. Dans la région K, entre les températures 1152°C (2106°F) et 727°C (1341°F), la cémentite est mélangée à de l'austénite. En dessous de 727°C (1341°F) on peut trouver de la cémentite seule (dans les régions F et G), ou combinée à de la ferrite sous forme de perlite (régions E, F, et G). Par conséquent, la cémentite se forme dans tous les aciers et fontes.

I.5.1.4 La perlite

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure 1.9. la perlite pure (ligne B) se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone, on trouve de perlite et de la ferrite, comme dans la région E, pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (régions F et G).

I.5.1.5 Le point eutectoïde

Le point eutectoïde D, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme. Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes (région E). La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes (région F). La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite. [11]

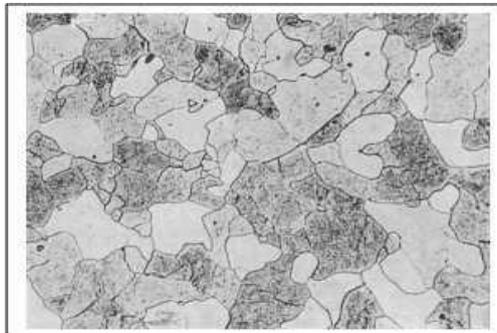


Figure. I.03 : Structure ferritique (Fer Arco. Traitement : 950 °C (30 min) - four. Attaque Nital (3 %). Grossissement 180) [11]

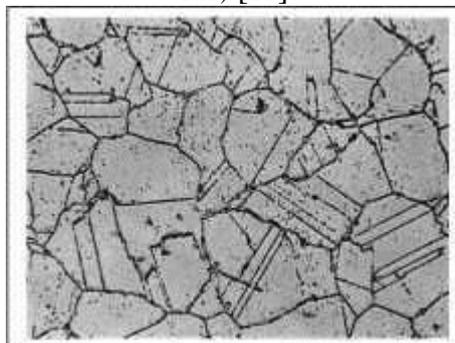


Figure I.04: Structure austénitique (avec précipités de carbures) Acier à 0.12 %C- 25 %Cr -20%Ni- 1.5%Mn- 1. %Si Traitement: 1 125 °C(1 h) -eau - 800 K (30 min)Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900. [11]



Figure I.05 : Structure perlitique Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Natal (3 %) Grossissement : 900. [11]

I.6 TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS

1.6.1 Définition

On désigne sous le nom de « traitement thermique » une opération au cours de laquelle une pièce de métal est tout d'abord portée de la température ordinaire à une certaine température plus élevée. Puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire.

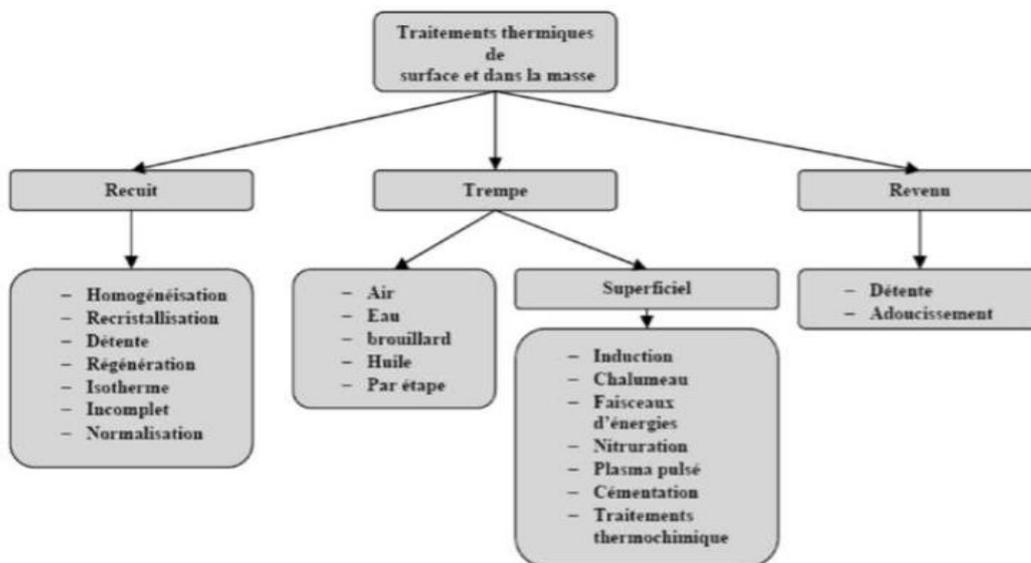


Figure I.06 : traitement thermique

1.6.2 Les différents types de traitements thermiques

1.6.2.1 Le recuit

Il a pour but de faire disparaître les états hors équilibre provenant des traitements antérieurs, thermique ou mécanique (tensions internes, écrouissages).

✓ **Principe :** Il consiste à :

- un chauffage de l'acier en général au-dessus de la température d'austénitisation. Selon le pourcentage de carbone et des éléments d'addition.
- un maintien isotherme
- un refroidissement lent très inférieur à la vitesse critique de trempe.

Chapitre I : Les aciers

✓ Résultats après recuit

L'état recuit correspond aux valeurs minimales de ténacité (H. R) et aux valeurs maximales de ductilité (A%. Z%) et sa structure est du type **ferrite - perlite**.

I.6.2.2 La trempe

Principe de la Trempe : C'est un Traitement Thermique qui consiste :

A chauffer l'acier à une température **d'austénitisation** égale à :

$A_3 + 50\text{ °C} < A_{c3}$ **pour les aciers** hypoeutectoides

$A_1 + 50\text{ °C} (A_{c1})$ **pour les aciers** hypereutectoides

à le maintenir un certain temps à cette température afin de permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse. à le refroidir suffisamment vite par immersion dans un fluide (eau, huile, bain de sel).

Pour un acier donné :

- ❖ La composition chimique
- ❖ La température de la trempe
- ❖ La loi de refroidissement est des facteurs essentiels dits facteurs de trempe

Objectif de la trempe : La trempe pour objectif d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour de puis la température d'austénitisation, jusqu'à la température ambiante et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce.

Trempabilité de l'acier : La Trempabilité d'un l'acier caractérise les possibilités de la réalisation de la structure,

- Plus la trempabilité d'un acier augment, plus est grande la section des acier des pièces dans la quelles, pour condition de refroidissement données, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur.
- Moins est nécessaire de refroidir rapidement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur. En fonction de la vitesse de refroidissement, l'austérite se transforme en martensite, bainite ou ferrite fine.

Martensite : c'est le constituant le plus dur de la trempe (HV = 800) mais il est fragile. C'est ne solution solide d'insertion saturée en carbone dans le fer.

Bainite : c'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite + cémentite) mais de structure particulièrement fine

Remarque : La plus petite vitesse de refroidissement correspondant à ne dureté de trempe acceptable est appelée vitesse critique de trempe. Si cette vitesse de refroidissement est inférieure à la vitesse critique de trempe, la trempe est dite douce et on obtient un constituant appelé troostite (moins dure que la bainite).

Après trempe, on obtient les modifications suivantes sur les caractéristiques mécaniques :

Chapitre I : Les aciers

- Rm, Re et H augmentent de valeur
- A%. K et Z% diminuent de valeur

Défaut de la trempe :

Le refroidissement brusque du métal chaud immergé dans un fluide de trempe est accompagné d'une contraction. L'extérieur de la pièce se refroidissant plus vite que le cœur, il se produit des tensions internes qui risquent d'entraîner sa rupture. Si la contrainte dépasse la résistance à la rupture, il se crée de fentes appelées tapures. Des déformations peuvent aussi apparaître sur les pièces trempées. Pour remédier à ces défauts, la trempe est obligatoirement suivie d'un autre traitement thermique appelé le revenu. Les aciers doux (%C inférieur à 0.25%) ne prennent pas la trempe.

I.6.2.3 Le revenu

Traitement thermique effectué sur un produit après durcissement par trempe modifications lui conférant les caractéristiques d'emploi désirées. Ce traitement provoque la formation d'une structure plus proche de l'état d'équilibre physicochimique celle obtenue lors de la trempe

❖ **Principe du Revenu** : Le cycle thermique comporte successivement

- Un réchauffage jusqu'à une température déterminée mais inférieure à celle de Ac1
- Un ou plusieurs maintiens à une plusieurs température déterminées.
- Un ou des refroidissements jusqu'à la température ambiante par un mode approprié ou suivant une loi fixe. On distingue les revenus à haute température et les revenus à basse température, la température Couramment atteinte pour un revenu après trempe martensitique est de 500 à 600°C. En règle générale, le revenu se traduit :

Soit par un adoucissement qui conduit à une amélioration des caractéristiques de ductilité, Soit par un durcissement secondaire. Au niveau de la microstructure, lorsqu'on effectue un revenu, les atomes de carbone qui sont dans la martensite sous forme de solution solide vont pouvoir diffuser car la cinétique à 500 à 600°C est beaucoup plus rapide qu'à température ambiante où elle est complètement négligeable. Ainsi, la propriété de résilience sera améliorée.

❖ **Différents types de revenu (après trempe) :**

- Le revenu dit de détente est généralement réalisé à une température comprise entre 180 et 220 °C. il ne fait intervenir que le premier stade du revenu et n'est donc appliqué qu'à une structure totalement martensitique. Il provoque une précipitation généralement incomplète (suivant la température) du carbone. Un tel revenu ne provoque qu'une faible baisse de la résistance à la traction et de la dureté, par contre, il augmente très sensiblement la limite d'élasticité et améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité.

- Le revenu que nous qualifions d'habituel ou de banal est réalisé à une température comprise entre 500 et 575 °C environ et provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite Le revenu de durcissement secondaire est réalisé à une température comprise entre 600 et

Chapitre I : Les aciers

675 °C environ et provoque, dans les aciers contenant des éléments d'alliage carburigène la précipitation complète du carbone sous forme de carbures spéciaux. Ce type de revenu est particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute température. [12]

I.7 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline. Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Le traitement thermomécanique est l'association:

- D'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage- refroidissement (trempé, revenu...);
- D'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (laminage, forgeage, tréfilage...).

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter de propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autre part, Ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers.

Les essais mécaniques sur les aciers sont réalisés dans les deux sens : Longitudinale et transversale (Figure I.7)

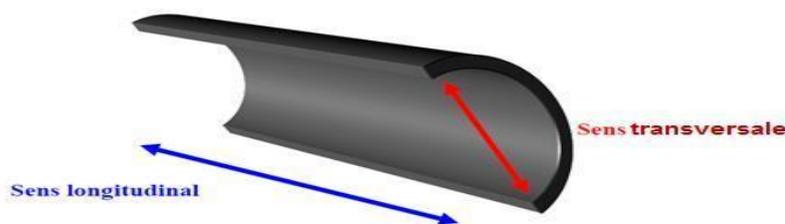


Figure I.7 : Sens longitudinale et transversale de tube. [13]

Le tableau suivant (Tableau. I.3) signifie les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5 Tubes de conduite PSL 1 et PSL 2 qui utilisé beaucoup dans l'industrie de tube de pipeline, remarque les valeurs de la résistance rupture et la limite élastique d'acier, cela est dû à résultats des essais expérimental. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont les suivantes:

API 5L - PSL1	A	B	X42	X52	X56	X60	X70
Résistance rupture N/mm ²	340	420	420	470	520	517	672

Tableau I.03 : Caractéristique mécanique par (N/mm²) (Tubes de conduite PSL 1). [13]

Chapitre II :

Procédés de soudage

II.1:Introduction :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.[14]

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.[15]

II.2 : Définition de soudage :

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assurer la continuité entre parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assembler la continuité entre les parties à assembler.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones voir la (Figure II.01). [16]

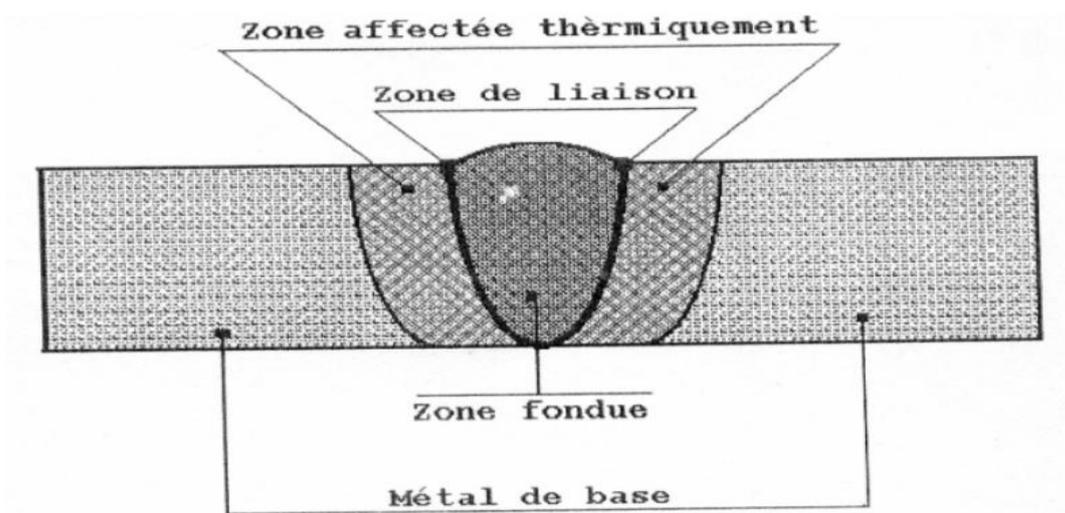


Figure II.01 : les zones de la soudure5 [16]

- ❖ **Métal de base (MB)** : Le métal de base, est la partie l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- ❖ **Zone affectée thermiquement (ZAT)** : La zone affectée thermiquement est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.
- ❖ **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.

Chapitre II : Les procédés de soudage

I.3 : procédés de soudage :

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

Le type d'énergie mise en œuvre.

Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur).

Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).

La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.[17]

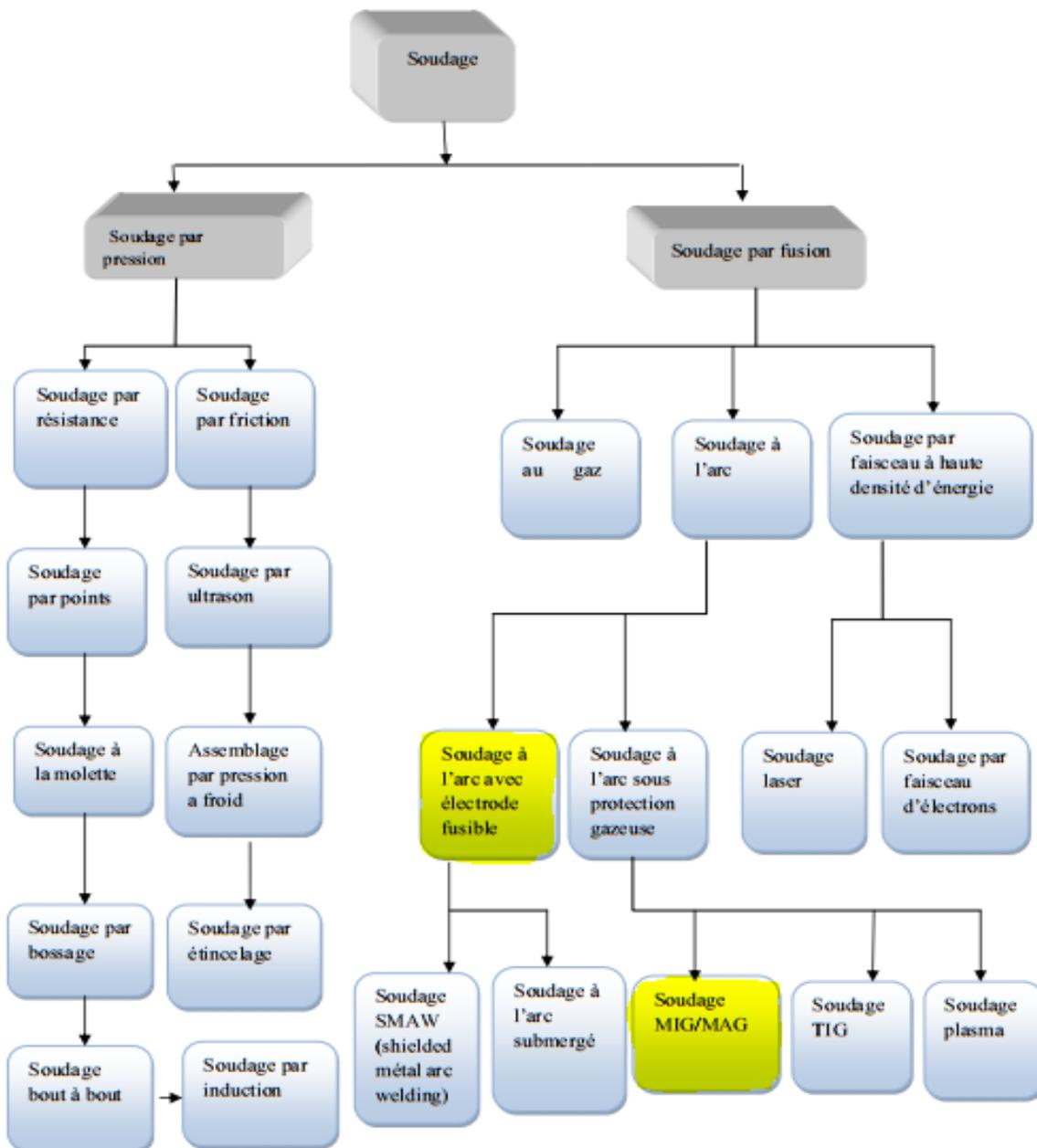


Figure II. 2: Classification des procédés de soudage les plus répandus [17]

Chapitre II : Les procédés de soudage

II.3.1 : Procédé du Soudage oxyacétylénique:

II.3.1.1 : Définition

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène -C₂H₂ avec un gaz comburant d'oxygène -O₂. La température de la flamme peut atteindre les 3200 ° Celsius, lorsque le mélange C₂H₂ et O₂ est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bord à bord ». L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

II.3.1.2 : Principe du procédé

II.3.1.2.1 : Brasage : Il s'agit d'une opération d'assemblage rendue possible par la présence d'un métal d'apport différent assemblage à partir des métaux de base. Le brasage s'effectue à la température de fusion du métal d'apport, laquelle est inférieure à celle du métal de base. La zone d'assemblage, ou dans certains cas les deux pièces à assembler, doivent atteindre cette température.

II.3.1.2.2 : Souda-brasage : Il s'agit d'une opération d'assemblage par étapes utilisant une procédure technique similaire à celle du soudage. Le métal d'apport, réalisé à partir de laiton, entre en fusion à une température comprise entre 800 et 930 °C (en fonction des alliages utilisés) : cette température est capable de limiter la déformation des plaques de fines épaisseurs, et ainsi de réduire l'évaporation du zinc lors de l'assemblage de pièces galvanisées. Il est nécessaire d'utiliser une bande de recouvrement afin de favoriser le mouillage du métal d'apport (à appliquer sous forme de poudre, de pâte ou directement sur la baguette).

II.3.1.2.3 : Soudage : Il s'agit d'une opération d'assemblage selon laquelle des pièces métalliques, appelées bases de métal, sont assemblées après fusion afin de former le « joint de soudure ». Après planage, le soudage s'effectue avec ou sans métal d'apport, généralement de type identique au métal de base. [18]

La figure.1.3 représente installation de soudage OA.

Chapitre II : Les procédés de soudage

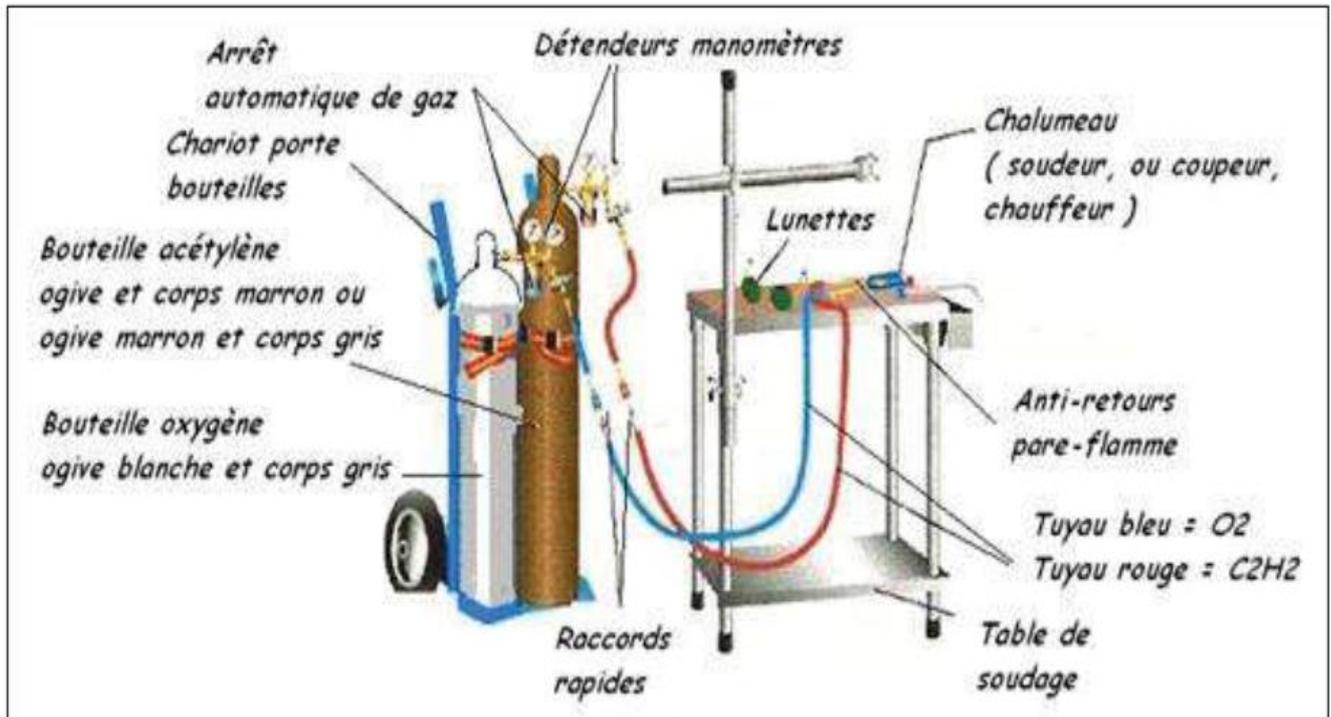


Figure II.3 : Installation de soudage OA [18]

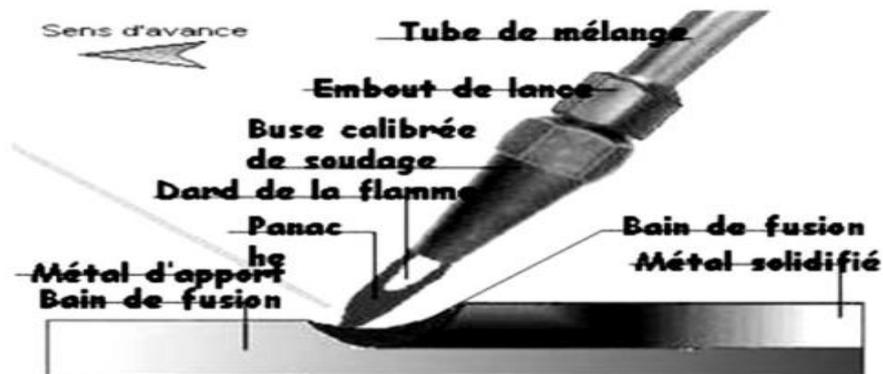


Figure II.4 : Soudage au chalumeau [18]

II.3.1.2 .4 : Opérations de soudage

Les deux sens de déplacement du chalumeau de soudage sont :

- Le soudage à gauche / en avant
- Le soudage à droite / en arrière

Le tableau. II.1 : Illustre le schéma graphique et les avantages et inconvénients des deux sens de déplacement

Chapitre II : Les procédés de soudage

LE SOUDAGE A GAUCHE / EN AVANT	
Représentation graphique	Avantages et inconvénients
<p>Le diagramme illustre le soudage à gauche. Le chalumeau est positionné à un angle de 50° à 70° par rapport à la ligne de soudage. Le fil de soudure est introduit à un angle de 45°. L'arc est dirigé vers l'arrière. Le sens de soudage est indiqué par une flèche pointant à gauche.</p> <p>http://www.chez.com/soudage2000</p>	<p>La méthode à gauche permet d'obtenir des cordons de très bel aspect. La pénétration est améliorée.</p>
LE SOUDAGE A DROITE / EN ARRIERE	
<p>Le diagramme illustre le soudage à droite. Le chalumeau est positionné à un angle de 45° par rapport à la ligne de soudage. Le fil de soudure est introduit à un angle de 45°. L'arc est dirigé vers l'avant. Le sens de soudage est indiqué par une flèche pointant à gauche.</p> <p>http://www.chez.com/soudage2000</p>	<p>La méthode à droite permet d'obtenir des vitesses de soudage plus importantes, une bonne maîtrise de la pénétration du cordon, un aspect des cordons satisfaisant.</p>

Tableau II.1 : Représentation graphique des déplacements du chalumeau. [19]

II.3.1.2 .5 : Domaine d'application

Ce procédé est aujourd'hui utilisé par les plombiers, les chauffagistes, les frigoristes, les fabricants de métaux, les serruriers et les bricoleurs. Il s'agit le plus souvent de brasage ou de saudo-brasage. Quant au coupage oxyde-flamme, il est notamment utilisé dans les industries de démolition d'ouvrages métalliques. Ce procédé fait appel à une flamme oxyde-combustible et à de l'oxygène pur comme jet de coupage pour séparer le métal. [19]

II.3.2 : Procédé de soudage MIG-MAG :

II.3.2 .1 : Définition : Le soudage MIG-MAG 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 figure .II.5 représente Schéma d'installation manuel pour soudage MIG-MAG

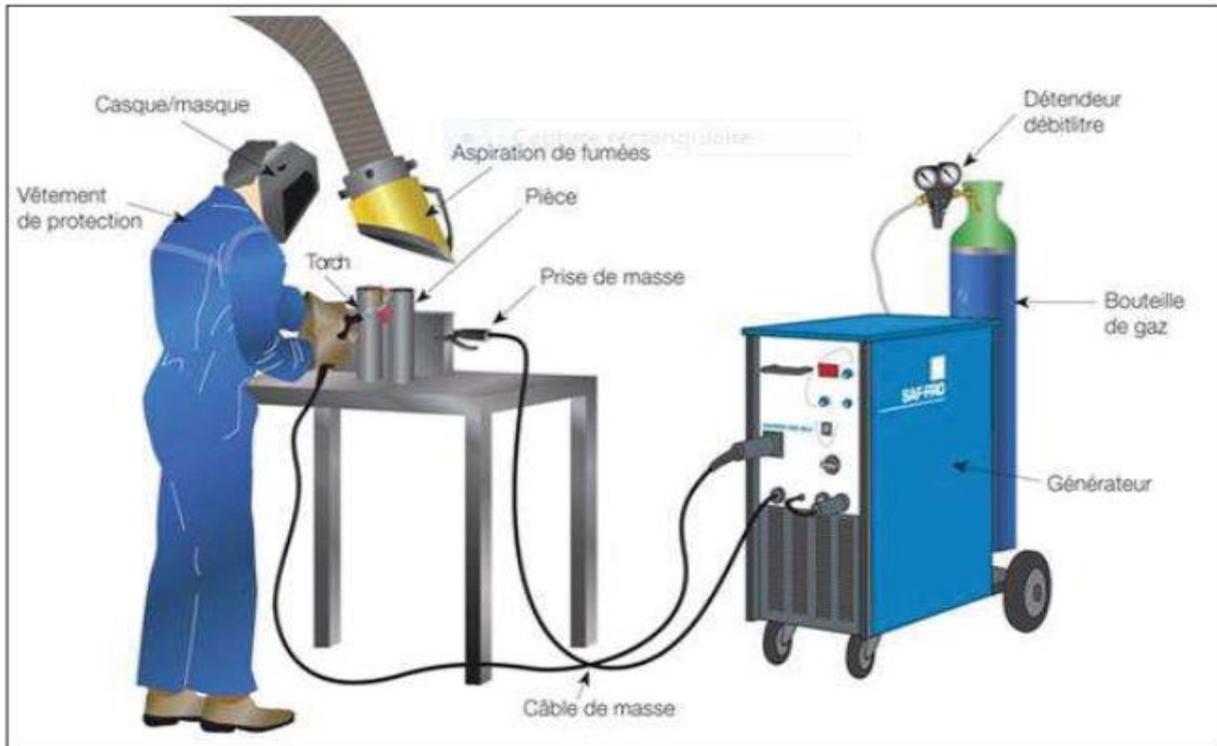


Figure II.5 : Schéma d'installation manuel pour soudage MIG-MAG [20]

II.3.2.2 : Principe du procédé

Ce procédé implique la fusion des métaux au moyen d'une chaleur intense générée par un arc électrique entre les métaux à assembler et un fil d'apport (massif ou fourré). Le fil entre progressivement en fusion selon une vitesse identique à sa vitesse d'apport depuis la tête de soudage, et contribue en partie à la formation du bain de fusion. L'arc et le bain de fusion sont protégés des agents contaminants présents dans l'atmosphère au moyen d'un gaz inerte (non réactif). [20]

La figure. II.6 représente Transfert métal de procédé MIG-MAG

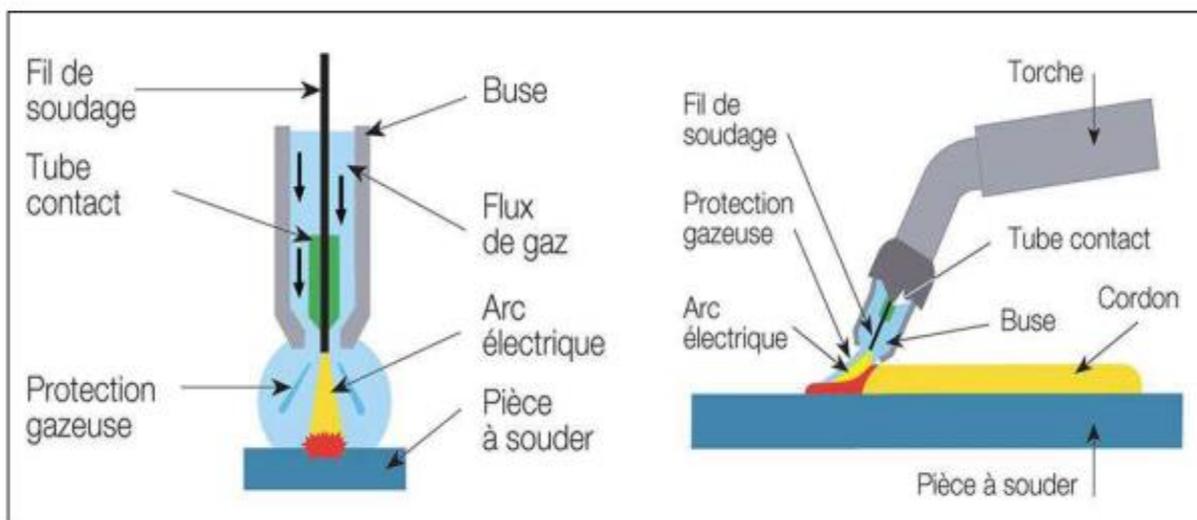


Figure II.6 : Transfert du métal [20]

Chapitre II : Les procédés de soudage

II.3.2.3 : Avantages et inconvénients

Le tableau II.2. Représente les avantages et les inconvénients du procédé MIG-MAG.

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Bobine de fil (soudage en continu) ;- Productivité importante ;- Peu de fumée ;	<ul style="list-style-type: none">- Bouteille de gaz de soudage- Soudage en intérieur (éviter les courants d'air)- Pénétration à maîtriser (sinon collage)

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients MIG-MAG [21]

II.3.2.4 : Domaine d'application

Le soudage MIG (sous gaz inerte) ou MAG (sous gaz actif) est un procédé semi-automatisé, largement répandu dans de nombreux secteurs industriels, notamment la construction de navires, de chemins de fer, ou encore la fabrication d'équipements lourds ou d'usine. [21]

II.3.3 : Procédé de soudage TIG :

II.3.3.1 : Définition : 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. TIG est un acronyme de Tungstène Inerte Gaz, où Tungstène (Tungstène) désigne l'électrode et Inerte Gaz (Gaz inerte) le type de gaz plasmagène utilisé. [22]

La figure. II.7 représente Installation manuelle pour soudage TIG

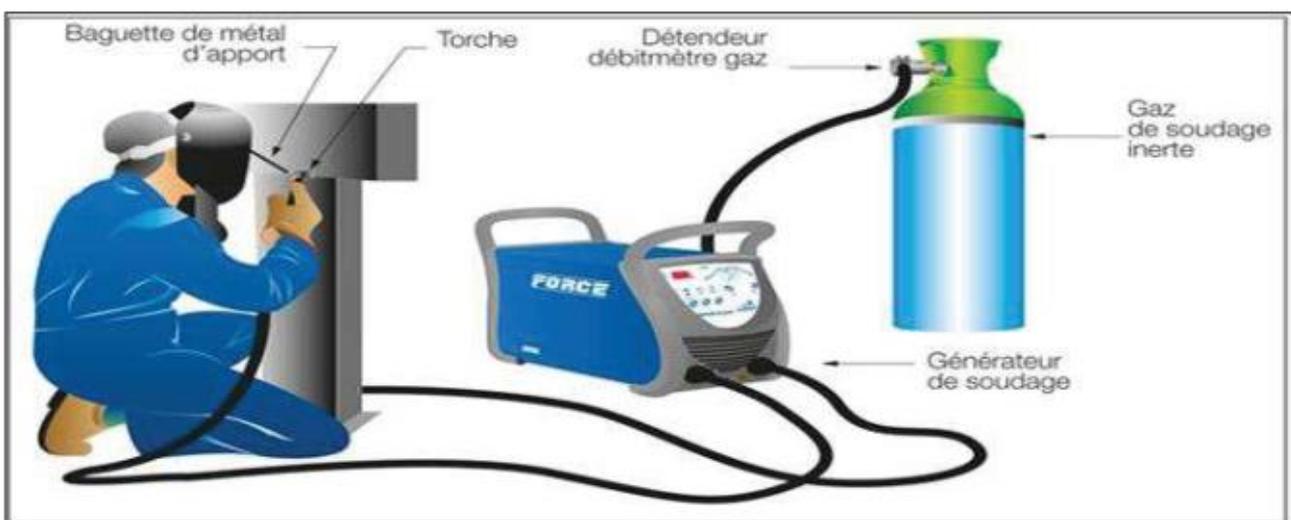


Figure II .7: Installation manuelle pour soudage TIG [22]

Chapitre II : Les procédés de soudage

II.3.3.2 : Principe du procédé

Le soudage TIG exploite la chaleur générée par un arc électrique entre les métaux à assembler et utilise une électrode tungstène, située au niveau de la torche de soudage. La zone de l'arc est ensuite entourée d'une enveloppe de gaz inerte afin de protéger le bain de fusion et l'électrode tungstène.

Le soudeur apporte directement à la main le métal d'apport, sous forme de baguette, dans le bain de fusion. Le soudage TIG est parfaitement adapté aux plaques métal d'une épaisseur comprise entre 8 et 10mm [23]

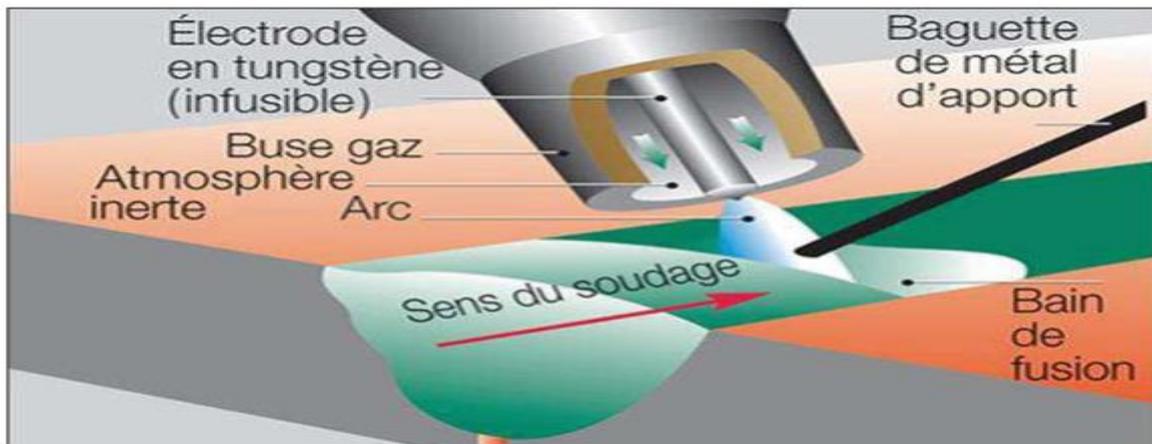


Figure. II.8 : Transfert du métal TIG [23]

II.3.3.3 : Avantages et inconvénient

Inconvénient	inconvénient
<ul style="list-style-type: none">-Travail fin et précis ;-Large gamme d'épaisseur ;- Très bonnes qualités de joint ;- Bonnes caractéristiques mécaniques ;- Soudage dans toutes les Positions ;-Aspect de cordon très correct ;- Procédé automatisable ;	<ul style="list-style-type: none">- Déconseillé avec les environnements poussiéreux et enfumés ;- Coût des équipements ;- Procédé de soudage lent ;- Préparation de joints à partir de 3 mm- Déformations des pièces soudées

Tableau II.3 : avantages et inconvénient de soudage TIG [22]

II.3.3.4 : Domaine d'application

Le procédé de soudage TIG permet d'obtenir des soudures de très haute qualité, et répond parfaitement aux besoins des applications les plus exigeantes, notamment la chaudronnerie, la pose de pipelines, ou la fabrication de réservoirs pour l'industrie agroalimentaire et l'aviation. [24]

II.3.4 : Procédé de soudage par résistance :

II.3.4.1 : Définition

Le soudage par résistance électrique est un moyen d'assemblage indémontable de tôles, entre elles, mais aussi d'écrous, vis, gougeons, sur une tôle, celles-ci peuvent être indifféremment d'acier, d'acier galvanisé ou électro-zingué, d'aluminium mais aussi de cuivre (faible épaisseur), laiton, zinc, nickel, or, argent, plomb. Ce mode d'assemblage est très répandu dans l'industrie automobile et aéronautique.

La figure. II.9 représente soudure par résistance.

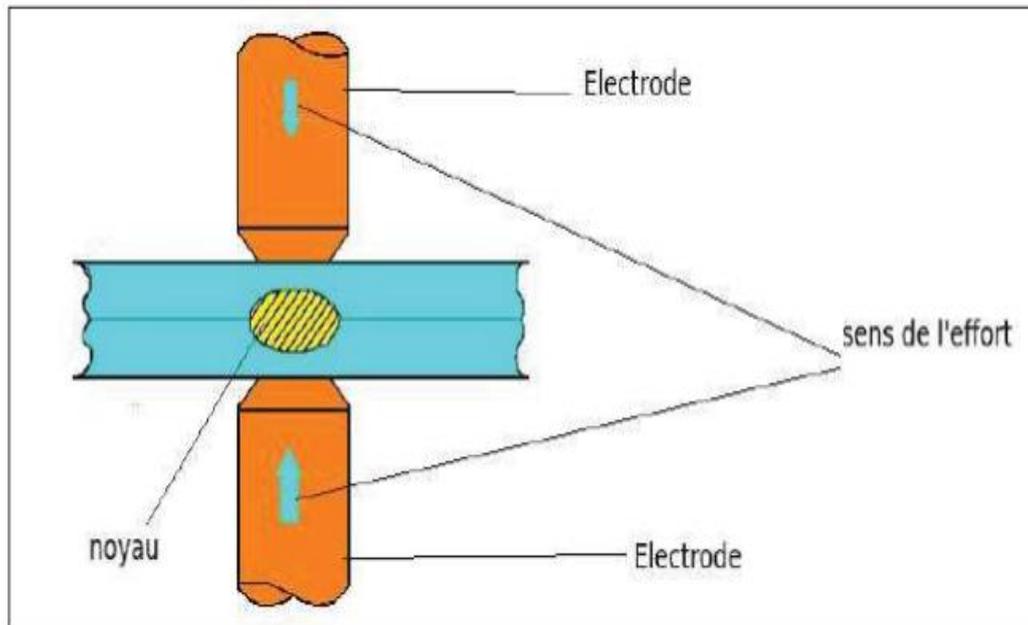


Figure II.9 : soudage par résistance [25]

II.3.4.2 : Principe du soudage

Le procédé de soudage est un procédé à chaud, sous pression et sans métal d'apport. Il consiste à échauffer localement les pièces par passage d'un courant électrique. La technique la plus utilisée est le soudage par résistance par points. Dans ce cas, les pièces à souder sont superposées et serrées localement entre deux électrodes et l'ensemble est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température. L'échauffement provoque la fusion localisée des deux pièces dans la zone située entre les deux électrodes, suivi de la formation d'un noyau de métal recristallisé. Il existe plusieurs procédés dérivés, on peut citer le soudage à la molette, le soudage par bossage ou le soudage en bout, procédés qui seront également abordés dans cet article. Le point commun de ces procédés est qu'ils utilisent l'effet Joule, c'est-à-dire qu'ils exploitent le phénomène de l'échauffement d'un conducteur parcouru par un courant électrique. Pour rappel, dans un circuit électrique, la chaleur dégagée par chaque élément est proportionnelle à $(R.I^2.T)$. [25]

La figure. II.10 représente cycle thermique de soudage par résistance.

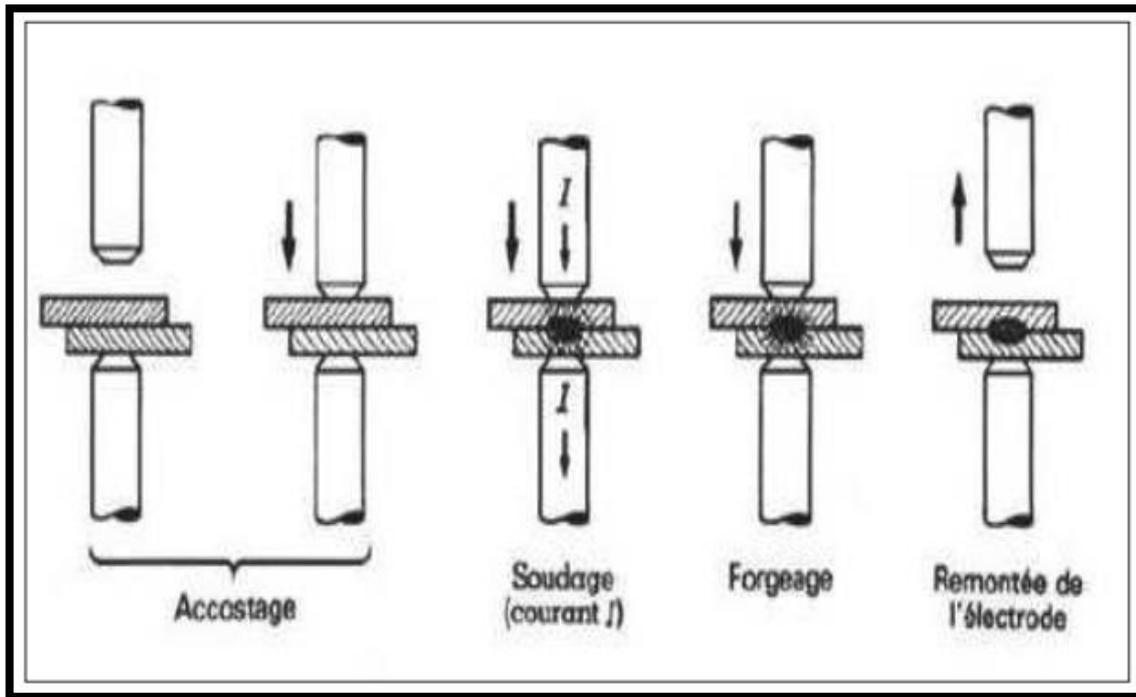


Figure II.10 : Cycle thermique de soudage par résistance [25]

II.3.4.3 : Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Soudure de très haute qualité ; - Pas de déformations des pièces soudées ; - Assure la continuité métallique et étanchéité ; - Rapide (5ms à 3 secondes), efficace, Peu polluant ; - Autogène, ne nécessite pas de produits d'apports ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Assemblage par recouvrement ; - Épaisseur limitée aux capacités machines ; - Cher, les applications sont limitées, en principe, un poste à souder ne peut réaliser qu'un seul type de soudage ; - Difficulté de contrôle de qualité des points soudés ;

Tableau II.4 : Avantages et inconvénient du soudage par résistance [26]

II.3.4.4 : Domaine d'application

Les domaines d'application sont essentiellement : automobile, Électronique, Industries (alimentaire, radiateur, armoire, grille, etc.) et micro-soudage. [27]

II.3.5 : Procédé du soudage à l'arc électrique avec une électrode enrobée :

II.3.5.1 : Définition

Chapitre II : Les procédés de soudage

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur (Où) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts.

II.3.5.2 : principe du procédés

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder. [28]

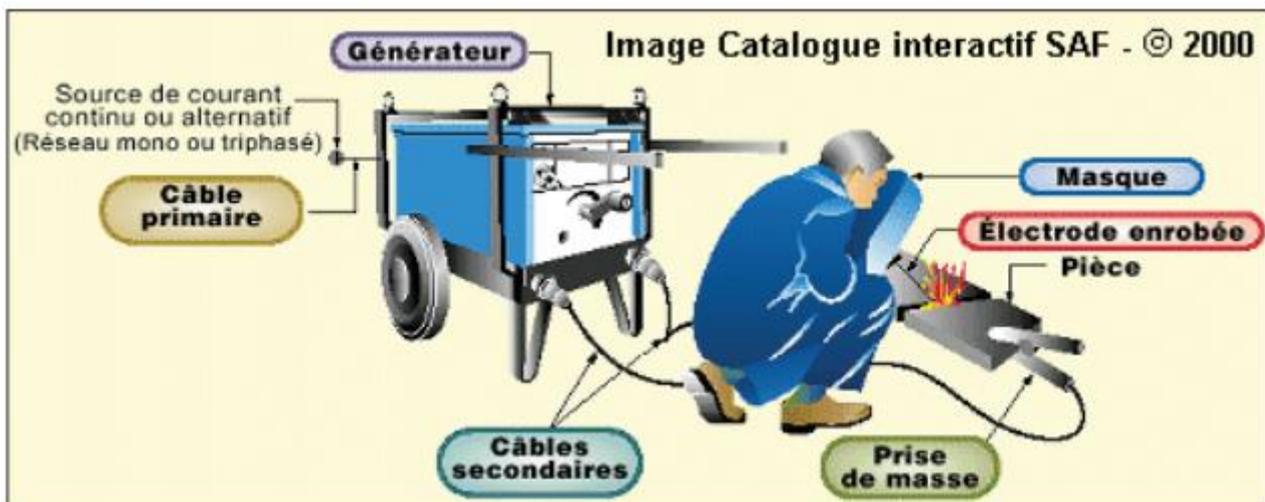


Figure II.11 : Installation pour soudage à l'électrode enrobé [28]

II.3.5.3 : Avantages et inconvénient

❖ Avantages

- Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée peut être utilisé aux espaces ouverts et clos ;
- Le soudage est possible à tous les points et positions accessibles ;
- Le soudage est possible aux zones étroites et limitées inaccessibles pour les autres méthodes de soudage ;
- Puisque les bouts de la source de puissance de la machine de soudage peuvent être étendus, le soudage aux longues distances est possible ;
- Les équipements de soudage sont légers et portables ;

Chapitre II : Les procédés de soudage

- Il existe plusieurs types d'électrode enrobée à répondre aux propriétés mécaniques et chimiques de plusieurs matériaux. Par conséquent, les joints soudés peuvent aussi avoir des mêmes propriétés que le matériau de base possède ;

❖ Inconvénient

- La vitesse et l'efficacité de déposition du métal du soudage à l'arc à l'électrode enrobée est plus faible que plusieurs méthodes de soudage à l'arc. Les électrodes sont de forme de bâton coupé à certaines longueurs, alors il faut arrêter le soudage quand une électrode est consommée ;
- Suivant chaque passe de soudage, il faut nettoyer la scorie formée sur le métal de soudage ;

II.3.5.4 : Domaine d'application

❖ Applications légères

- Maintenance industrielle légère ;
- Construction légère ;
- Réparation sur site ;
- Travaux en extérieur ;
- Bricolage ;

❖ Applications intensives

- Pipeline/tuyauterie ;
- Construction navale ;
- Fabrication intensive ;
- Rechargement ;
- Construction industrielle ;
- Industrie chimique ;
- Appareils à pression ;
- Grugeage arc-air ;
- Construction nucléaire ;[29]

III.3.6 : Procédé du Soudage Laser

III.3.6.1 : Définition

Le laser est une source de rayonnement lumineux, monochromatique et spatialement cohérent. Dans les machines de soudage, le rayonnement est focalisé pour obtenir de grandes densités de puissance, suffisantes pour le soudage industriel des alliages. Cette puissance permet de générer un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métallique de en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces (figure1). Le capillaire a un rôle très important en soudage laser car il permet un transfert de l'énergie directement au cœur du matériau. L'interaction du faisceau laser avec les vapeurs métalliques conduit à une ionisation partielle qui forme un plasma composé de vapeurs ionisées à l'intérieur du déchole et en surface du bain de fusion. Le plasma de surface constitue une seconde source de chaleur, elle est responsable de la morphologie de la partie supérieure du cordon. Ce plasma joue un rôle bénéfique pour l'échauffement du métal, mais peut absorber une part importante de l'énergie du faisceau laser Un flux de gaz inerte (Ar ou He) soufflé l'endroit de l'impact du laser permet de maîtriser ce plasma et protéger le métal de l'oxydation. [30]

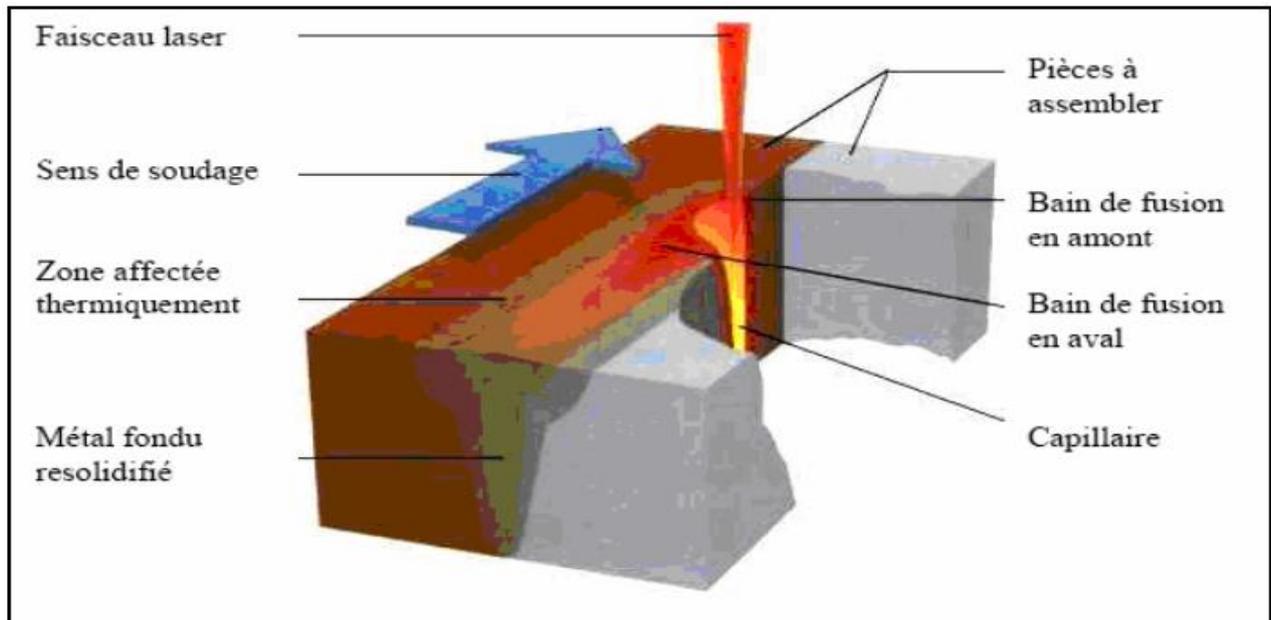


Figure II.12 : soudage par faisceau laser [31]

II.3.6.2 : principe du procédé

Dans le procédé de coupage et de soudage par faisceau laser, la chaleur générée par un faisceau de lumière cohérente très intense sert à réchauffer, à fondre ou à vaporiser un solide. Dans le cas du soudage, le faisceau laser est convenablement focalisé sur le joint à souder. Pour le coupage, on utilise la chaleur fournie par le faisceau laser, avec ou sans application d'un jet de gaz, pour augmenter la quantité de matière enlevée. Deux procédés sont couramment utilisés pour le coupage au laser, soit le coupage au CO₂ qui utilise un courant direct pouvant aller jusqu'à 10 000 volts et le coupage au YAG qui fonctionne avec un courant pulsé. La différence majeure entre ces deux procédés réside dans la façon de produire le rayon laser : pour le coupage au CO₂, c'est le gaz qui produit le rayon tandis que le coupage YAG utilise un cristal pour produire le rayon laser. On utilise également dans ces procédés un gaz de protection [32]

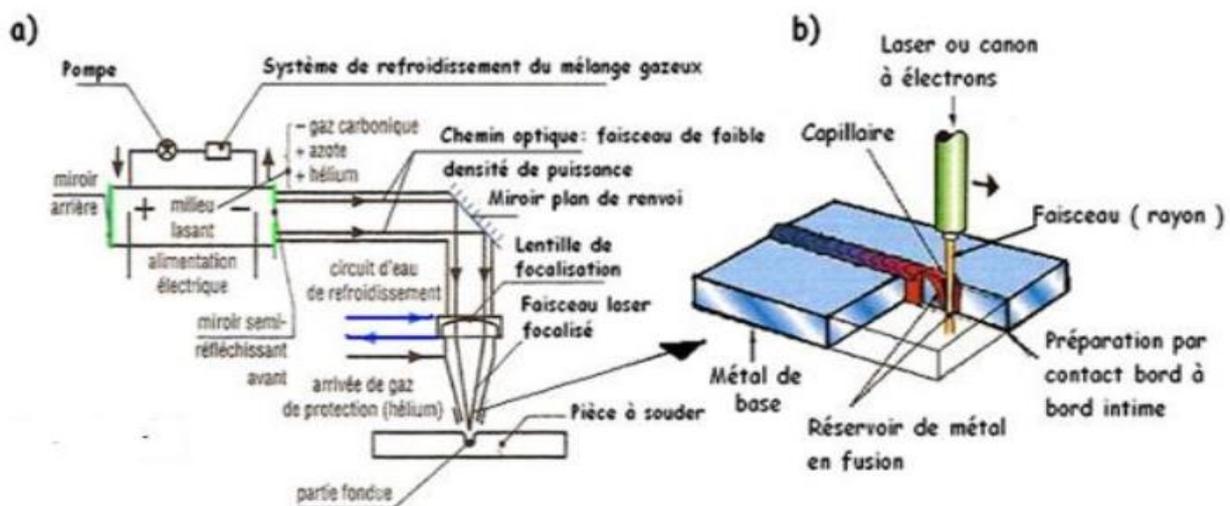


Figure II.13 : Principe de procédé de Soudage laser [32]

Chapitre II : Les procédés de soudage

III.3.6.3 : Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Rapidité du procédé, absence de métal d'apport- Précision et propreté- Possibilité de joindre des matériaux différents- Le peu d'espace requis pour l'accès du faisceau à la pièce- L'excellent contrôle de projections- Les déformations très limitées, ZAT réduite- La possibilité de souder par transparence- La possibilité de réaliser des joints parfaitement étanches- Bonne résistance mécanique du joint soudé	<ul style="list-style-type: none">- Coût d'acquisition et de maintenance très élevés- Niveau important de formation des opérateurs- Précision requises pour la préparation des joints- Aspects liés à la sécurité (faisceau invisible et énergétique) avec port de protections adaptées très coûteuses

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients du soudage laser [33]

III.3.6.4 : Domaine d'application

Le coupage par faisceau laser (LBC) est un procédé très efficace qui permet une très grande précision de coupe. Ce procédé très polyvalent permet de couper divers matériaux allant du tissu au métal. Encore peu répandu dans l'industrie, le soudage par faisceau laser (LBW) sert dans l'industrie automobile pour souder des pièces de précision avec une soudure très étanche, par exemple des composantes d'engrenages de transmission. Le soudage au laser à arc pulse (YAG ou yttrium aluminium garent) pourrait également remplacer le soudage par résistance par point pour certaines applications où les pièces soudées sont sensibles à la chaleur, par exemple les piles au lithium et les détonateurs pour coussins gonflables

Chapitre III :

Soudage à l'arc électrique avec une électrode
enrobée et Soudage MIG-MAG

III.1:Introduction :

Dans ce chapitre, nous menons une étude approfondie de deux types de soudage. Rencontré en milieu industriel: soudage à l'arc avec une électrode enrobée, Sous protection contre les gaz (avec une électrode thermique et Fusible), avec fil fourré, immergé, par jet de plasma, par résistance et Soudage MIG. (Gaz inerte métallique). Le soudage par fil continu est un processus dans lequel la chaleur requise pour effectuer le soudage est fournie par un arc électrique qui est maintenu entre la pièce à usiner et l'électrode du fil. Les principales caractéristiques sont passées en revue. Les caractéristiques associées à chaque procédé de soudage, son déroulement Les procédés ont également leurs avantages et leurs inconvénients Propriétés électriques liées à ces processus.

Les procédés de soudage sont classés en deux groupes principaux de procédés Soudage, c'est-à-dire auto-soudage et soudage hétérogène. [34]

Soudage autogène :

La famille de soudage autogène regroupe les procédés de soudage identifiés à la figure 1.1 (sauf les procédés de brasage). Le principe du soudage autogène consiste à unir des pièces métalliques de même nature en fusionnant leurs bords, et ce avec ou sans addition de métal d'apport lui-même généralement de même nature.

Soudage hétérogène :

La famille de soudage hétérogène regroupe les procédés de brasage. Ce procédé consiste à unir entre elles des pièces de nature identique ou différente, sans fusion intime de bords et avec une addition de métal d'apport complémentaire généralement de nature différente que les pièces à souder.

III.2 : Historique sur le soudage à l'arc électrique:

En 1885 à Saint Petersburg, deux russes BERNANOS et OLSZENSKI réalisent la fusion localisée du métal en faisant jaillir un arc électrique entre une électrode en charbon et une pièce métallique. En 1888, SLAVIANO, russe également, réalise la première soudure en faisant jaillir un arc électrique entre une pièce métallique et un simple fil de fer. Le soudage à l'arc était né mais les qualités de l'assemblage étaient médiocres du fait des dépôts exécutés à l'air libre. En 1907, le Suédois Oscar KJELLBERG enrobe l'électrode d'un produit réfractaire. Ce n'est qu'en 1925 que le soudage à l'arc avec électrode enrobée prit réellement son essor.[35]

III.3 : Définition

Le soudage à l'électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l'arc », il utilise des baguettes comme métal d'apport. La soudure autogène à l'électrode enrobée consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode). Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée,(3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un arc électrique qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense.[36]



Figure III.1 : soudage l'arc électrique [36]

III.4 : Principe de soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder (Fig.2.).[37]

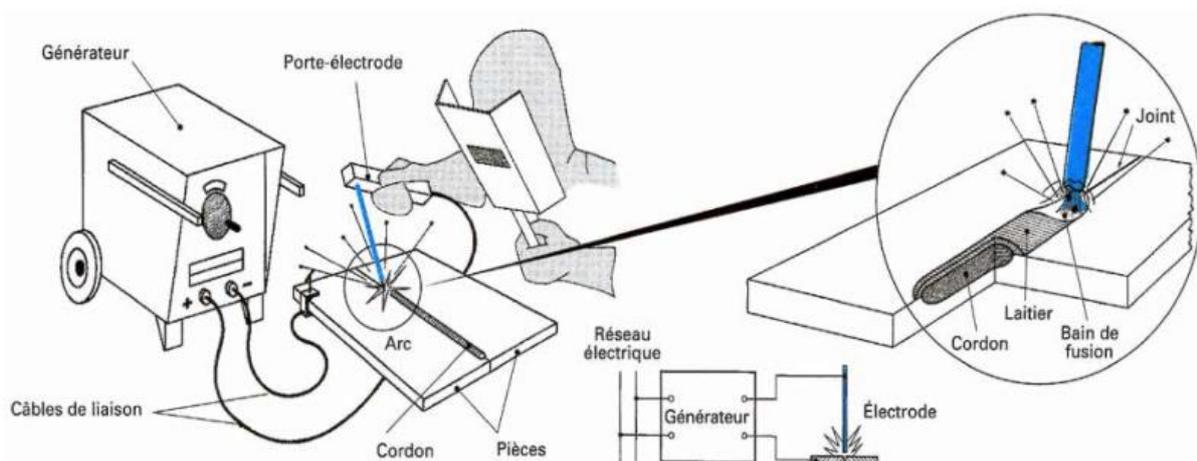


Figure III.2 : Principe du Soudage à l'électrode enrobée[37]

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcourt un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode. L'arc électrique est la source de chaleur à base de nombreux procédés de soudage, les raisons primordiales de se choisir sont :

- Les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est à l'arc court entre une électrode formant ainsi l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion.

➤ Les phénomènes de transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique.

Recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce. Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

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

III.5 : Le soudage avec électrodes enrobées

III.5.1 : Principe du procédé

Un arc électrique établi entre une électrode et les bords des pièces à assembler, provoque leur fusion et crée un bain de métal liquide reçoit les gouttes de métal de l'électrode (Fig.3.). L'arc résulte du passage d'un courant électrique intense à travers une atmosphère de gaz ou de vapeur, normalement non-conductrice. Les électrons circulent de la cathode (pôle négatif) vers l'anode (pôle positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violettes, ...).

La tâche anodique et surtout la tâche cathodique, où se présentent les ions positifs, fournissent ensemble l'essentiel de la chaleur. La tâche anodique, bombardée par les électrons est par contre à une température plus haute (3500°C) que celle de la tâche cathodique (2400°C). Cette situation est permanente en courant continu ; elle s'inverse à chaque alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice.

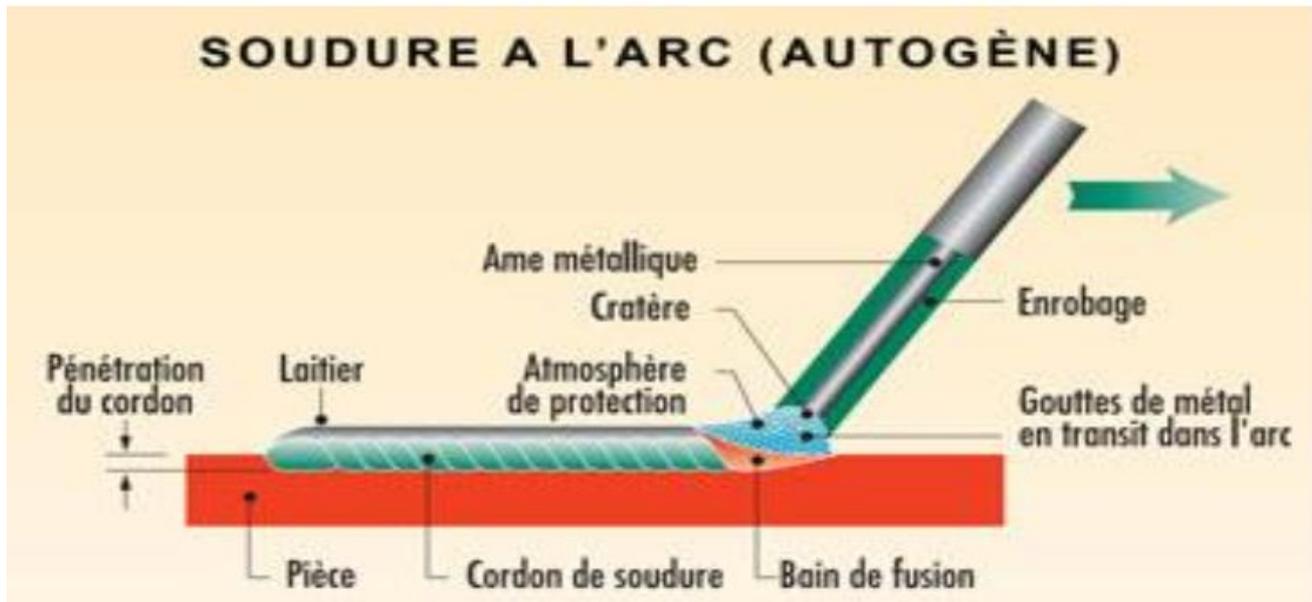


Figure III.3: schéma du soudage à l'arc (électrode enrobée) [38]

III.5.2 : Les électrodes

Les électrodes de soudages sont constituées par :

Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant est dont fusion forme le métal déposé.
Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :

- Stabilité électrique de l'arc ;
- Protection du métal en fusion ;
- Apport d'éléments dans le métal déposé :

❖ Protection de métal en fusion

L'atmosphère créée lors de la fusion de l'enrobage isole le métal liquide de l'oxygène et de l'azote de l'air. Chaque goutte de métal est entourée d'une protection de laitier qui viendra ensuite surnager sur le bain de fusion en format aussi le départ des gaz occlus

❖ Apport d'élément

Au cours de la fusion, certains constituants plus volatils ont tendance à disparaître, comme le manganèse, l'enrobage compense alors ces pertes. De surcroît, l'enrobage fournit des constituants nouveaux (molybdène, nickel...). Le laitier modifie également la tension superficielle du métal liquide, donnant au cordon une forme plus ou moins concave [38]

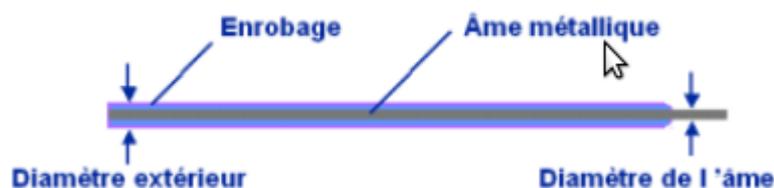
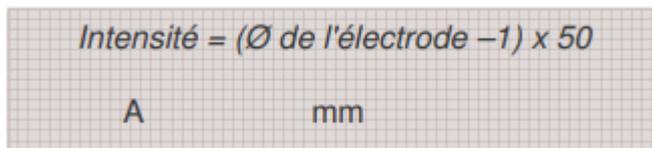


Figure III.4 : L'électrode enrobée. [38]

III.5.3 : Réglage du poste

C'est l'intensité du courant que l'on règle, elle est donnée par la formule : [39]


$$\text{Intensité} = (\text{\O de l'électrode} - 1) \times 50$$

A mm

Exemple : électrode Ø3, 15

$$I = (3,15 - 1) \times 50 = 107 \text{ A}$$

III.5.4 : Rôle de l'enrobage

L'enrobage de l'électrode remplit différents rôles:

- **Rôle électrique:** l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air.

- **Rôle physique:** l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique. Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.

- **Rôle mécanique:** l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage.

- **Rôle métallurgique:** Il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse, et ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure

III.5.5 : types d'enrobage.

- **Type A (acide):** oxydes de fer, de ferromanganèse, silicate...

- **Type O (oxydant):** oxyde de fer, silicate de fer, manganèse, ferroalliages...

- **Type B (basique):** carbonate de calcium, spath fluor, ferroalliages

- **Type C (cellulosique):** matières organiques et cellulose

- **Type R (rutile):** oxyde de titane (95%) ou mélange d'oxyde de titane (50%) et d'oxyde de fer (50%). Les enrobages les plus utilisés actuellement sont de type basique et rutile. Le diamètre de l'électrode enrobée varie de Ø 1,6 à Ø 8 mm. La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm. Certaines électrodes peuvent atteindre un mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique). Les électrodes à enrobage basique et rutile-basique doivent être étuvées dans un four à 300°C Celsius pendant 2 heures. Après étuvage, elles doivent être conservées à une température de 120°C dans des étuves portatives sur le lieu de soudage. Les autres types d'électrodes à enrobage rutile, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60% [40]

Facteur	Électrode rutile	Électrode acide	Électrode basique
Stabilité de l'arc	++	+	-
Aspect du cordon de soudure	+	++	-
Amorçage de l'arc	++	+	-
Solidité de la soudure	-	-	++
Différentes position de soudage	+	--	++
Risque d'inclusions de laitier	-	--	++
Résistance à la corrosion	+	+	-
Formation de fumée	++	+	-
Enlèvement du laitier	+	++	-
Inclusion d'hydrogène dans la soudure	-	-	++

Tableaux III.1: Facteurs déterminant le choix de l'électrode. [40]

III.5.6 : Choix des électrodes

Le choix des électrodes est conditionné par :

- La nature et les caractéristiques du métal à souder.
- Les facilités d'exécution du travail.
- Les propriétés d'enrobages.
- Les facteurs d'ordre économique.

Une fois la nature de l'acier fixée, le soudeur se trouve en présence d'une grande variété d'électrodes qui se distinguent par de nombreux facteurs dont les principaux peuvent être résumés ainsi : [41]

- Nature du courant (alternatif ou continu)
- Postes dont on dispose (tension à vide).
- Position de soudage.
- Faciliter d'amorçage.
- Pénétration.
- Forme du cordon
- Facilité d'enlèvement du laitier
- Caractéristiques du métal déposé

III .5.7 : Étuvage des électrodes enrobées

Les électrodes à enrobage basique et rutilo-basiques doivent être étuvées dans un four-étuve à 300° Celsius pendant 2 heures. Après étuvage, les électrodes à enrobage basique et rutilobasiques doivent être conservées à une température de 120° Celsius dans des étuves portatives sur le lieu de soudage. Les autres types d'électrodes à enrobage rutile, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60%. Un nouveau système de fabrication et

d'emballage sous vide permet d'obtenir des électrodes à enrobage basique à très faible taux d'humidité qui ne nécessitent aucun étuvage avant utilisation.

III.5.8 : Fusion de l'électrode

Bien qu'elles dépendent d'un grand nombre de facteurs, les caractéristiques de fusion de l'électrode répondent à des lois générales rappelées ci-après :

❖ Constante de fusion

La quantité de métal déposé par unité de temps dépend linéairement du courant d'arc (Fig.III.5). Le coefficient de proportionnalité qu'il est possible de relever varie d'un modèle d'électrode à l'autre et peut être considéré comme une caractéristique propre à chacun d'eux. On appelle ce coefficient constante de fusion, il s'exprime en $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{h})$. Sa connaissance permet d'établir le temps nécessaire pour réaliser un dépôt de poids donné, à une intensité fixée.

❖ Pertes de fusion

Elles sont dues aux projections qui se produisent pendant le soudage et pour diverses raisons (type d'enrobage, caractéristiques du générateur, type de transfert, température relative du métal apporté par rapport aux pièces, conditions opératoires, etc.). Selon le cas, ces pertes peuvent atteindre des proportions importantes, de l'ordre de 20 à 25 %. Signalons en outre que l'électrode n'est jamais complètement consommée, la longueur prise dans la pince étant inutilisable et représentant une perte supplémentaire de 5 % environ.

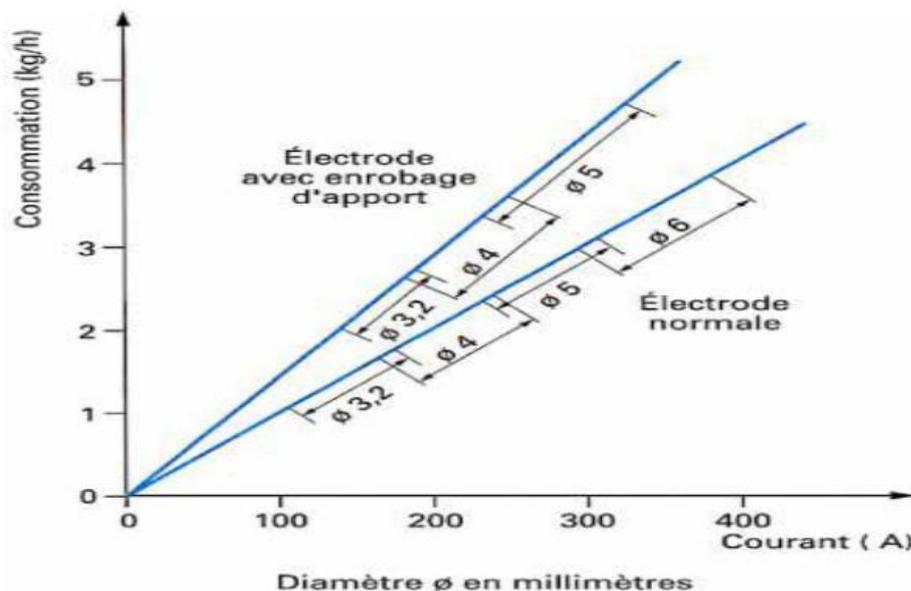


Figure III.5 : Fusion des électrodes [42]

❖ Rendement

Il est défini comme le rapport entre le poids du métal déposé et celui de l'âme effectivement fondue. Sachant que l'on peut effectuer un apport de métal par l'enrobage (Fig.III.5). Ce rendement de l'électrode enrobée exprime donc en définitive la proportion de cet apport dans l'apport total. On produit ainsi des électrodes ayant des rendements pouvant atteindre 200 % [42]

III.5.9 : Principaux composants des enrobages

Parmi les matériaux utilisés dans l'enrobage, il y a des substances organiques, des minéraux, des composés chimiques, de l'argile et des alliages ferreux.

La cellulose : c'est un produit dérivé de la pulpe de bois ou du papier recyclé. Elle produit en brûlant du CO₂ et de l'hydrogène qui fournissent une protection gazeuse au métal fondu et améliorent les caractéristiques de pénétration.

Le carbonate de calcium : on le rencontre dans la nature sous forme de pierre à chaux, de calcite ou de marbre. C'est un composant important des électrodes à basses teneur en hydrogène. Il se décompose dans l'arc pour produire du CO₂, qui protège le bain de fusion et abaisse la teneur en hydrogène dans l'atmosphère de l'arc. Le laitier aide à réduire au minimum la quantité d'oxygène présente dans le métal fondu, et contribue ainsi à produire un dépôt sain aux propriétés satisfaisantes.

Le spath-fluor : le spath-fluor (ou fluorine) est du fluorure de calcium naturel. On l'utilise pour contrôler la fluidité du laitier et permettre ainsi aux gaz de s'échapper. Il y en a habituellement dans l'enrobage des électrodes à basse teneur en hydrogène car il aide à réduire au minimum la quantité de gaz présente dans le métal fondu.

Le rutile : les minéraux qui, comme le rutile et l'ilménite (FeTiO₃) contiennent du dioxyde de titane (TiO₂) contribuent à stabiliser l'arc et donnent un laitier fluide qui solidifie rapidement. La surface de la soudure obtenue est belle et lisse.

Les composés du potassium : on peut employer plusieurs composés différents de potassium, tels que le feldspath de potassium et le titane de potassium, dans l'enrobage des électrodes. Le potassium favorise l'ionisation et aide ainsi à stabiliser l'arc et à faciliter son réamorçage. Les électrodes conçues essentiellement pour le soudage en courant alternatif en contiennent souvent dans leur enrobage.

Les ferro-alliages : lorsque des éléments ou des agents réducteurs sont requis, on les ajoute souvent sous forme de ferro-alliages. Le ferromanganèse et le Ferro-silicium sont ceux que l'on utilise le plus fréquemment car ils désoxydent le métal fondu et permettent de contrôler la résistance du dépôt.

Le silicate de sodium : il est également connu sous le nom d'ortho silicate. Il s'agit d'un liant liquide que l'on emploie pour garder agglomérés, les composants du flux pendant la cuisson de l'électrode.

L'oxyde de fer : il est inclus dans l'enrobage de certaines électrodes, sous forme de minerais comme la magnétite et l'hématite. Il sert principalement à former le laitier.

La poudre de fer : on peut employer la poudre de fer dans l'enrobage de certaines électrodes. Il arrive qu'elle constitue 50 % ou plus de la masse de l'enrobage. La poudre de fer sert surtout à augmenter le taux de dépôt de l'électrode car elle fond et s'ajoute au métal déposé provenant de l'âme. Elle peut également influencer sur l'aspect du cordon, et sur la formation, à la pointe de l'électrode, du cratère qui permet d'utiliser la technique de soudage par traînage.

III.5.10 : Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire

La pénétration et la vitesse de soudage dépendent non seulement de la nature de l'électrode mais aussi de ses conditions d'utilisation : nature du travail, position de soudage, intensité, etc. Du fait de l'apport de métal par longueurs discrètes, des arrêts séquentiels plus ou moins longs peuvent avoir une certaine importance dans l'exécution d'un assemblage complet. Par ailleurs, le changement de

position ou de place de l'opérateur peut également diminuer la vitesse d'exécution d'un travail compliqué en comparaison avec une utilisation plus simple. Le tableau suivant donne quelques consommations d'électrode (0s) [43]

	Fusion des électrodes ($\eta = 0,7$)	
	Nombre d électrode	
Diamètre \emptyset (mm)	Par Kg de métal déposé	Par heure
3,2	49	20 à 25
4	32	14 à 18
5	21	12 à 14

Tableaux III.2 : Consommation des électrodes en fonction du diamètre \emptyset . [43]

III.5.11 : Domaines d'applications

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une simplicité et une flexibilité inégalées grâce à :

- un équipement on ne peut plus simple ;
- une électrode enrobée qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en œuvre, principalement les métaux ferreux. Ces avantages sont à opposer aux inconvénients :
 - d'un fonctionnement cadencé ;
 - d'une capacité et d'une productivité limitée. C'est ainsi qu'il s'impose :
 - dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécano-soudure ;
 - sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique. Mieux que le chalumeau ou tout autre procédé (il n'a pas le problème des bouteilles de gaz sous pression), il est le moyen typique des petits travaux d'entretien ou d'amateur pour lesquels se sont développés des générateurs, ou postes, légers à faible facteur d'utilisation (30 à 40 %). On trouve des électrodes travaux courants chez tous les quincailliers. [43]

III.6 : Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées :

Lorsque l'intensité est faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder, la fusion est molle et la pénétration est faible, l'amorçage est difficile, une instabilité de l'arc et une mauvaise compacité du métal déposé (présence de défaut type soufflure et inclusion de laitier) Lorsque

l'intensité est trop forte, vous constatez des projections importantes aux abords du joint, des écoulements de métal lors du soudage en position[44]

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat				
Ø électrode	Enrobage mince	Enrobage semi-épais	Enrobage épais	Enrobage R% 110 / 130
Ø 1,6 mm	25 A	30 A	35 A	
Ø 2,0 mm	40 A	50 A	55 A	
Ø 2,5 mm	60 A	70 A	75 A	80 A
Ø 3,2 mm	90 A	100 A	110 A	115 A
Ø 4,0 mm	130 A	150 A	160 A	170 A
Ø 5,0 mm	170 A	190 A	200 A	220 A

Tableau III.3: Intensité du courant de soudage. [44]

III.7 : Influence des paramètres de Soudage avec électrode enrobée.

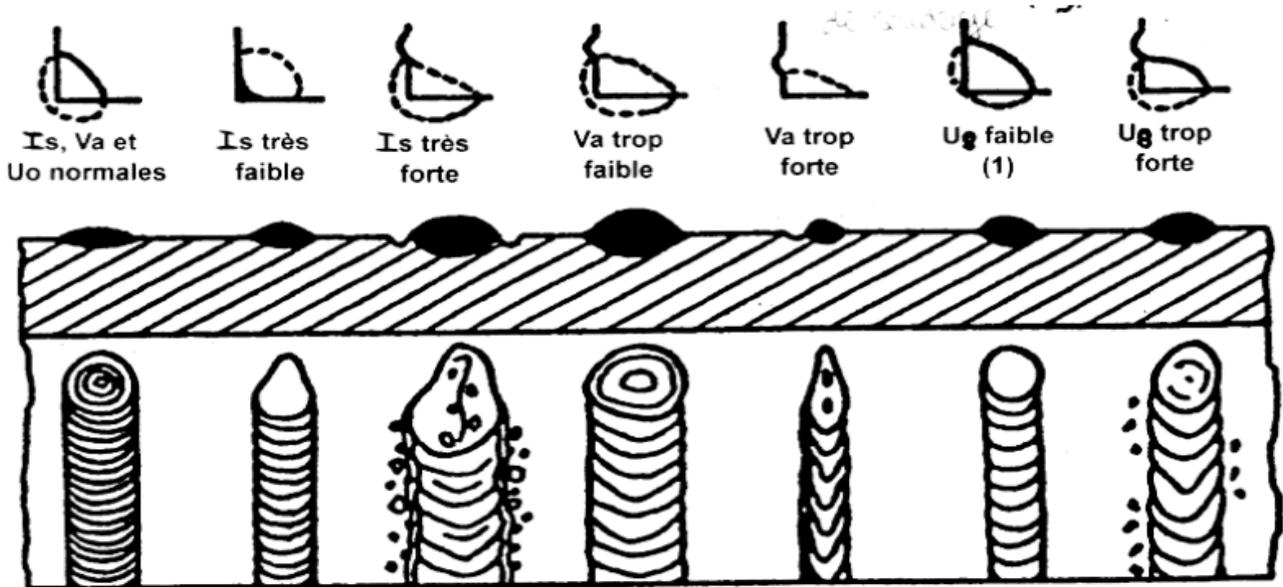


Figure III.6 : Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon [45]

III.8 : Accessoires Pour Le Soudage A L'arc

III.8.1 : Porte électrodes



Figure III.7 : Porte électrode [45]

Exemple : Porte électrodes à pince 200 A

Pour un rapport cyclique de 60% peut aller jusqu'à 150 A

Pour un rapport cyclique de 35% peut aller jusqu'à 200 A

Pour une électrode de diamètre de 1,6 à 4 mm

Pour câble de 25 à 35 mm²

Poids de la pince : 330 g

Norme CE EN60974.11

Serrage du câblage par cosse à œil M5

Modèle : PEC 200

III.8.2 : Pince de masse pour poste à souder

Pince de masse en tôle 300/400 A avec tresse



Figure III.8 : Pince de masse pour poste à soudure [46]

Pour un rapport cyclique de 60% peut aller jusqu'à 300 A

Pour un rapport cyclique de 35% peut aller jusqu'à 400 A

Pince en tôle emboutie zinguée

Tresse en cuivre

Contact par plaque de laiton

Pour câblage 16 à 70 mm²

Fixation par cosse M8

Longueur totale : 200 mm

Epaisseur : 23 mm

Poids de la pince : 270 g

III.8.3 : Câble de souder



Figure III.9 : Câble de souder 50 mm² [47]

Câble cuivre spécial souder 50mm²

Diamètre du câble : 10 mm

Diamètre extérieur de la gaine : 15 mm Normes : CE

La découpe est au mètre, Si vous souhaitez 2 mètres linéaire de câble,

Soudage MIG

III.1 : Historique du soudage MIG.

Le procédé GMAW comprend le procédé MIG (N° 131) qui est apparu aux Etats-Unis d'Amérique au cours des années 1940, pour le soudage des navires de guerre conçus en aluminium. L'argon (Ar) ou l'hélium (He) servant de gaz de protection sont des gaz inertes. Dès que le dioxyde de carbone (CO₂) a pu être utilisé comme gaz de protection actif, cela a donné naissance au procédé MAG (N° 135), qui a permis le soudage de l'acier.

Au début, le soudage était effectué afin de produire des soudures d'angle à plat, mais il impliquait de nombreuses projections de soudures. L'arrivée des sources d'alimentation, de fils d'apport plus fins et l'utilisation de mélange gazeux comme, par exemple, l'argon et le CO₂, ont permis de réduire ces projections et de souder dans quasiment toutes les positions. Cette percée sur le plan industriel s'est produite vers les années 1960 et s'est, depuis lors, fortement développée grâce à de nouveaux fils d'apport, à de meilleures sources d'alimentation et à des gaz de protection de grandes puretés.[48]

III.2. Définition.

Le soudage MIG-MAG (respectivement Métal Inerte Gas et Métal Active Gas ; ou 131,137, et 135 ou 136 suivant la norme EN ISO 4063), 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 [49]

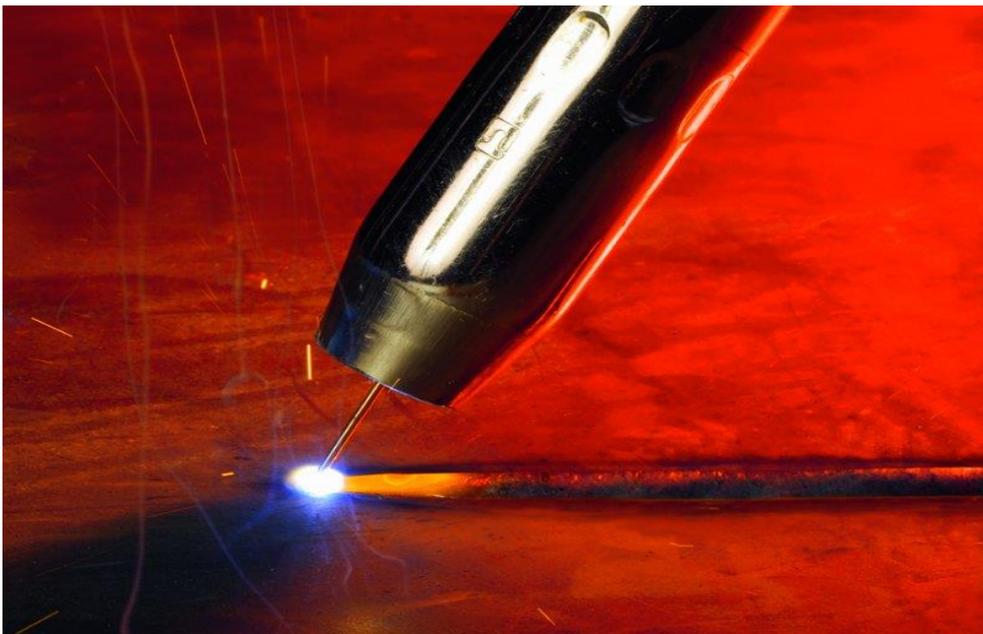


Figure III.10: Soudage MIG-MAG [49]

III.3 : Les procédés de soudage MIG/MAG

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inter (le procédé se dénomme alors M.I.G = métal inerte gaz) ou actif (procédé M.A.G = métal active gaz). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion. Ces différentes fonctions de protection et d'amenée de métal sont remplies par une installation qui comprend:[50]

- Le générateur de courant continu;
- Une source de gaz protecteur;
- Un système de refroidissement à la troche;
- La torche ou pistolet;

❖ **Fil d'apport et gaz de protection :**

On distingue les gaz internes et les gaz actifs :

- Les gaz internes à base d'argon, pur ou mélange à l'oxygène, ou d'hélium sont surtout utilisés pour les métaux légers et les aciers inoxydables
- Les gaz actifs servent au soudage des aciers au carbone ou faiblement alliés (acier à tube). Le gaz carbonique, parfois mélangé à l'oxygène, est le gaz actif le plus fréquemment utilisé. Il permet d'obtenir une pénétration plus importante et augmente la concavité du cordon.

La composition des fils dépend :

- La nature des matériaux à souder
- Des pertes d'éléments pendant le soudage

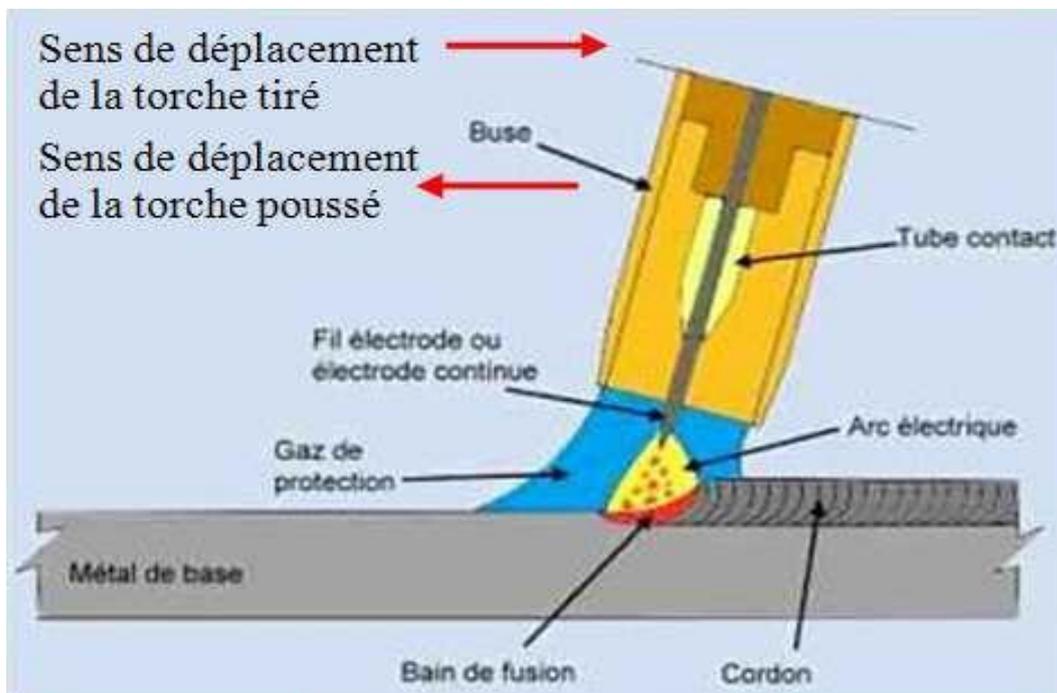


Figure III.11: procédé de soudage MIG/MAG [50]

III .4 : Principes du procédé de soudage MIG/MAG

Un fil métallique passe dans la torche et se trouve fondu dans l'arc. Le fil constitue à la fois un conducteur de courant et un métal d'apport. L'énergie électrique est fournie par une source d'alimentation de soudage. L'arc et le bain de fusion sont protégés par un gaz de protection soit inerte, soit actif [51]

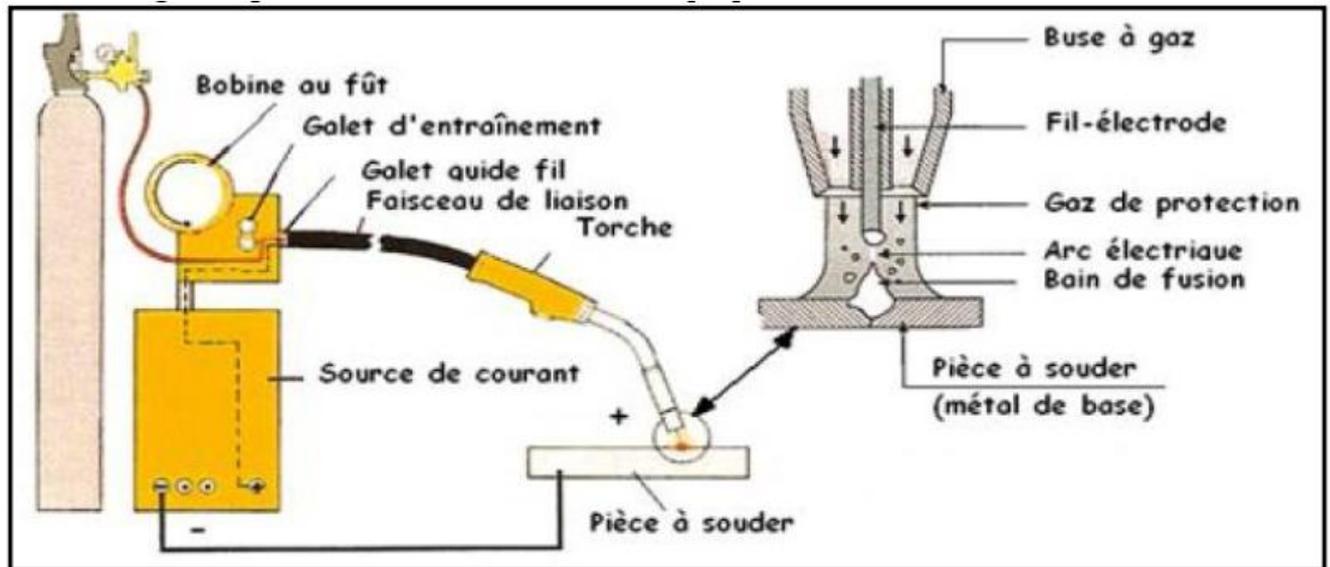


Figure III.12: Principe de la procédée du soudage MIG/MAG [51]

III.5 : Les Avantages et Les Inconvénients Du Procédé MIG/MAG

Les Avantages	Les Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - De hautes performances. - Un apport d'énergie vers la pièce relativement faible. - Une automatisation simple. - Pas de remplacement continu d'électrodes. - Pas de laitier à enlever, sauf sur certains fils fourrés. - Le taux de fusion est plus élevé, plus forte 	<ul style="list-style-type: none"> - Un équipement de soudage plus complexe, plus coûteux. - Les torches de soudage sont plus grandes. L'accessibilité au métal de base peut être plus limitée lors de certaines utilisations.

concentration de courant dans le fil).

III .6 : Les régimes de transfert du métal dans l'arc:

A : Le court-circuit ou short-arc

L'intensité (< 200 A) et la tension d'arc (14 à 20 V) sont faibles. L'arc est court et instable. Le métal est déposé par grosses gouttes dans le bain de fusion par une succession de court-circuit (de 50 à 200 par seconde) entre le fil et le bain de fusion. Cette méthode de transfert permet une bonne maîtrise des passes de pénétration. Il y a des projections de métal sur les abords des pièces soudées. Il est indispensable de disposer d'une self ou inductance (amortisseur électrique) pour favoriser la stabilité de l'arc et réduire les projections de gouttes de métal sur les abords des tôles à souder. Le bout du tube contact doit être sorti d'environ 5 à 10 mm à l'extérieur de la buse en passe de pénétration. Le tube contact est placé au niveau de la buse pour les autres passes (remplissage et finition).[52]

❖ Transfert par court-circuit (short arc)

- Utilisé pour les passes de pénétration
- Utilisé pour le soudage de tôles minces
- Utilisé pour le soudage en position

B : Le transfert globulaire :

L'intensité et la tension d'arc sont de valeurs moyennes. C'est le régime d'arc intermédiaire entre le court-circuit et la pulvérisation. Le fil double de volume et tombe comme une grosse masse dans le bain de fusion.

❖ Transfert en grosse gouttes (globulaire)

- Utilisé pour les passes de remplissage
- Utilisé pour le soudage de tôles épaisses
- Utilisé pour le soudage à plat

C : La pulvérisation axiale ou spray-arc :

L'intensité (> 200 A) et la tension d'arc (20 à 40 V) sont élevées. L'extrémité du fil fond en très fines gouttelettes projetées dans le bain de fusion. L'arc est long et très stable. Le taux de dépôt est important. Il n'y a pratiquement pas de projections sur les abords des pièces soudées. Le tube contacts placé en retrait à l'intérieur de la buse

❖ Transfert par pulvérisation axiale (spray arc):

- Utilisé pour les passes de remplissage et finition
- Utilisé pour le soudage de tôles épaisses
- Utilisé pour le soudage à plat

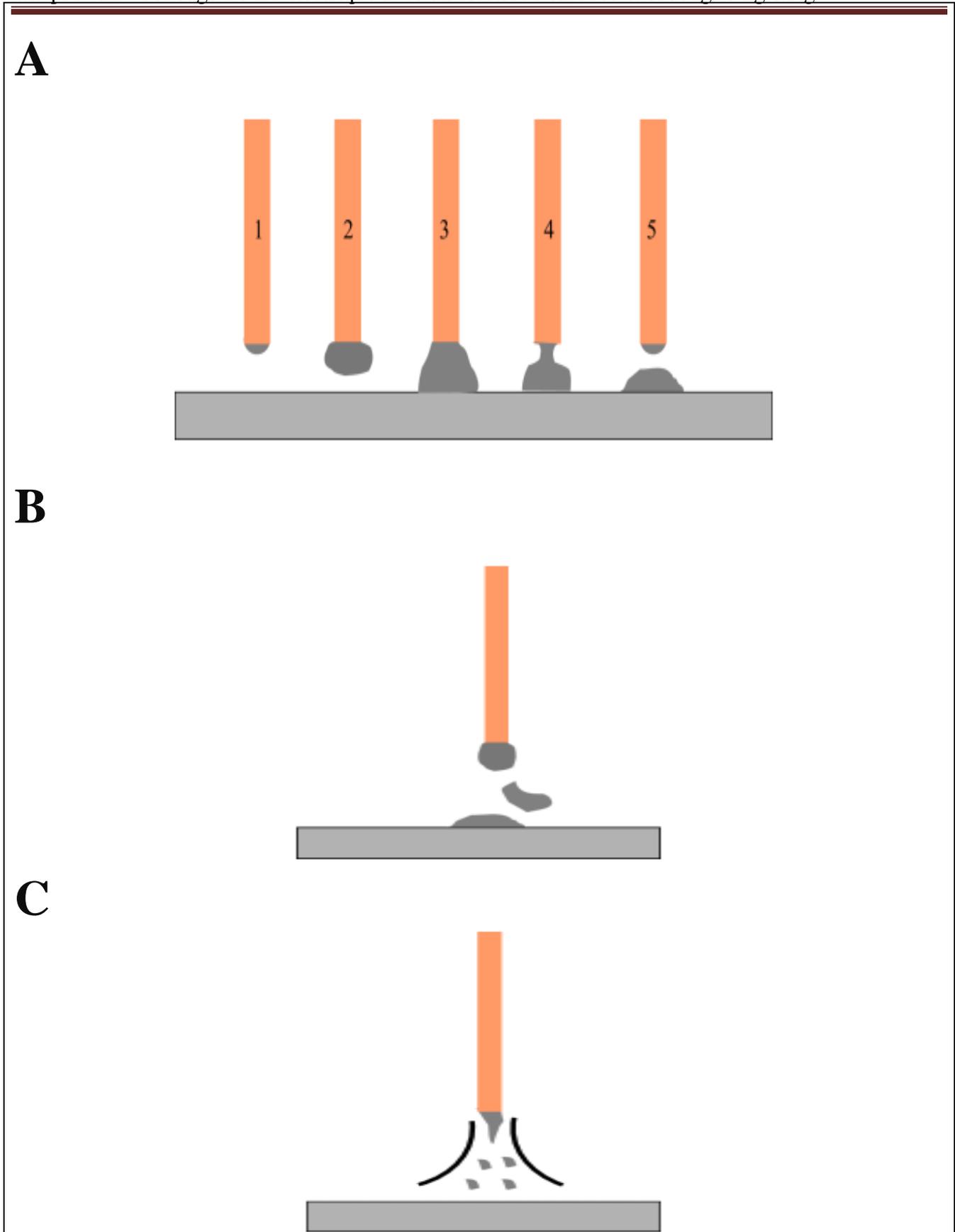


Figure III.13: les 3 régimes de transfert du soudage Mig-Mag [52]

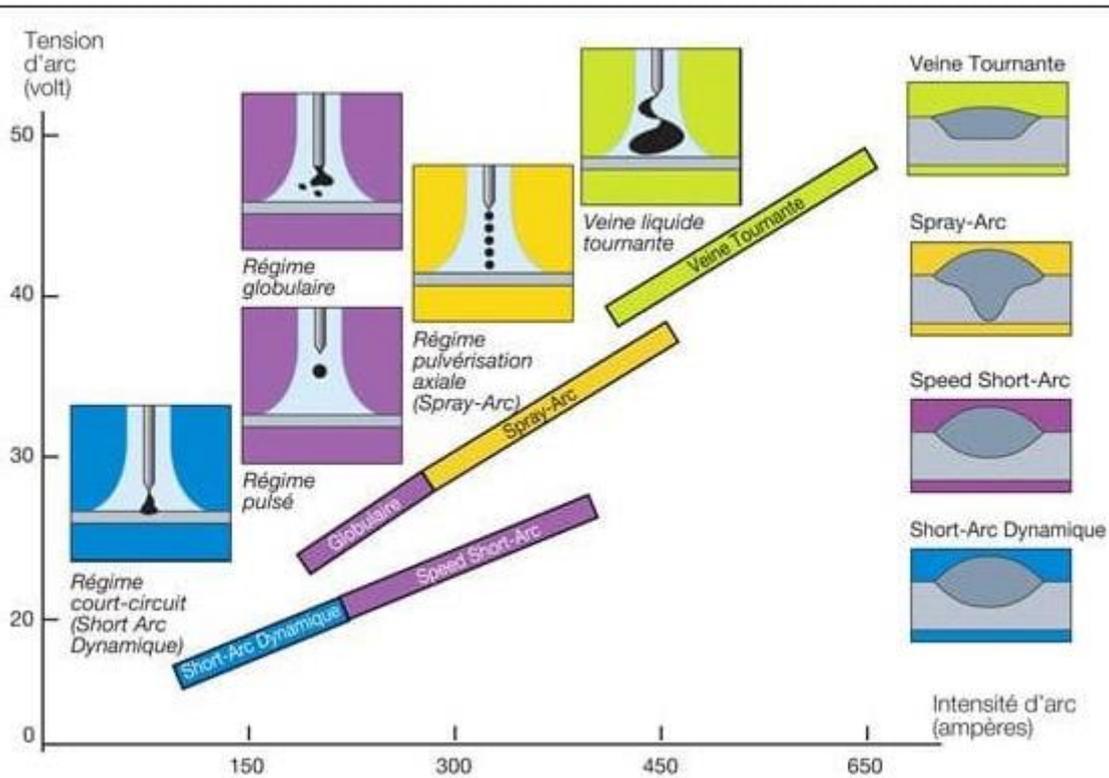


Figure III.14: Influence de la tension d'arc et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG MAG. [52]

III.7 : Installation d'un poste MIG-MAG

III.7.1 : Le générateur:

Ce sont des sources de courant continu. Elles doivent permettre le soudage en arc court comme en arc long. Ils doivent posséder une caractéristique plate.

III.7.2 : Le coffre de commande:

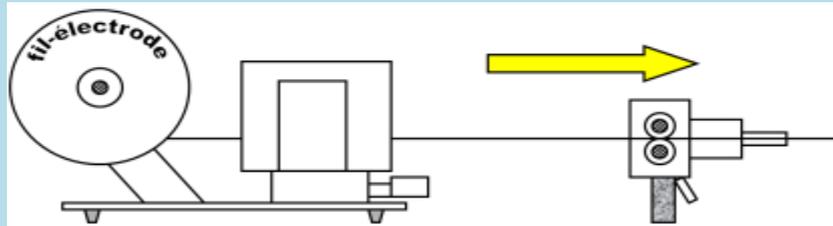
Le coffret de commande renferme tous les organes du générateur: électrovanne de gaz, contacteur pour le circuit de soudage, contacteur pour la commande du dévidoir. Ces organes de commandes sont enclenchés et déclenchés à partir de l'ordre donné par l'intermédiaire de la gâchette installée sur la torche. Ces circuits sont généralement alimentés en très basse tension

III.7.3 : Le dévidoir:

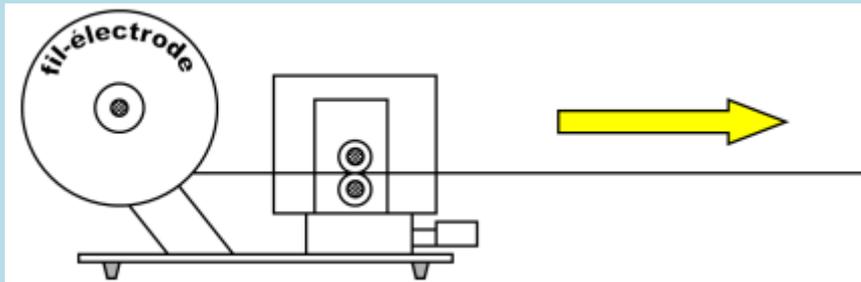
La vitesse du fil est facteur important au bon déroulement du soudage MIG-MAG. Il est donc nécessaire de porter une grande attention au dévidage du fil. Il s'agit donc de pousser (ou tirer) le fil dans une gaine qui n'est jamais droite; fil préalablement enroulé.

❖ Le différent mode d'action sur le fil:

A : Fil Tiré:



B : Fil poussé:



C : Fil tiré-poussé:

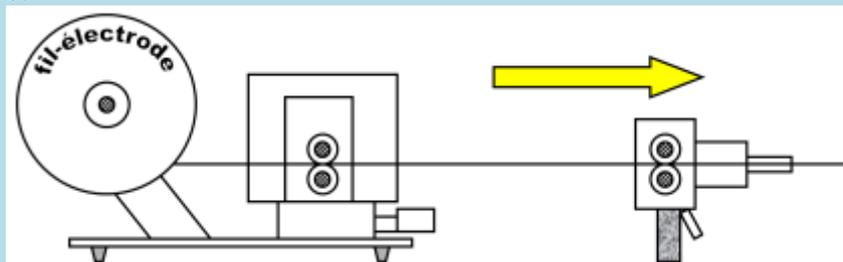


Figure III.15: Le différent mode d'action sur le fil [52]

III.8: Les gaz de soudage

- Les gaz employés en MIG: 18l/min à 25 l/min



Argon



Ar-Hé



Hé-Ar



Hélium

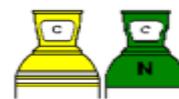
- Les gaz employés en MAG: 12 l/min à 18 l/min



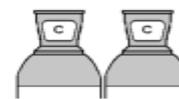
Ar-O2



Ar-CO2
(Activé)



Ar-CO2-O2
(Activé)



CO2
(Actif)

Figure III.16: Gaz utilisés pour le soudage Mig- Mag [52]

Voici un tableau récapitulatif des modes de transfert du métal dans l'arc en fonction du gaz

Regim /Gaz	CO2	Argon +CO2	Argon pur
Court-circuit	OUI	OUI	NON
Globulaire	OUI	OUI	OUI
Pulverisation	NON	OUI	OUI

Tableau III.4: récapitulatif des modes de transfert du métal dans l'arc en fonction du gaz [52]

III.9 : La torche de soudage:

Les torches de soudage peuvent être refroidies par eau (Fig. 8-a), soit refroidie par air pour Is <350A (Fig. 8-b).

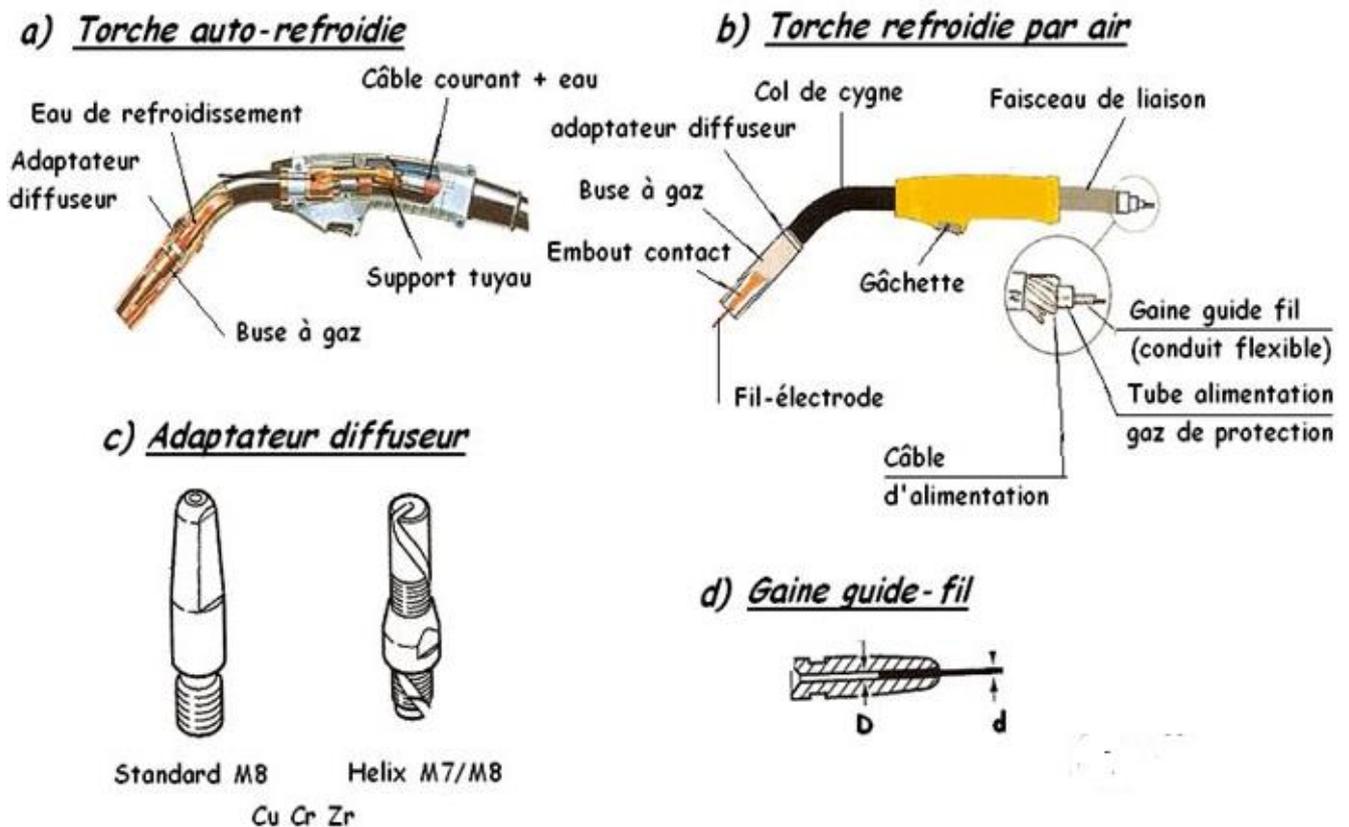


Figure III.17: La torche de soudage Mig-Mag [53]

❖ Une torche à air est uniquement refroidie par l'air qui l'entoure et par le débit du gaz de protection. Le refroidissement par eau est une méthode plus efficace. Le choix entre les deux modes dépend des facteurs tels que le courant de soudage, le type de gaz de protection, les DRF et le type de soudage. Le type de matériau d'appart joue aussi un rôle important.

❖ La gaine guide-fil permet de faire glisser le fil du dévidoir jusqu'à l'embout contact. La gaine doit se prolonger jusqu'à l'extrémité de l'adaptateur-diffuseur et qu'elle soit en contact avec le dévidoir. La gaine-fil est généralement fournie en acier, mais peut être remplacée par une gaine en

PTFE-céramique, ou avec insert en acier spiralé, pour le soudage de l'aluminium et de l'inox. La gaine guide-fil est normalement choisie en prenant le diamètre du fil $d \times 1,5$.

- ❖ Le col de cygne amène le fil vers la zone de soudage. Il faut choisir l'angle idéal en fonction de la pièce à souder.

- ❖ L'adaptateur-diffuseur permet de transférer l'énergie depuis le col de cygne jusque la buse à gaz. Il diffuse le gaz et protège le col de cygne de l'usure du filetage.

- ❖ L'embout-contact (Fig. 8-c) permet le transfert de courant. Ils sont actuellement réalisés en CuCrZn pour durer plus longtemps que ceux en Cu. Le trou de l'embout-contact jusqu'au fil doit être le plus réduit possible afin de transmettre la puissance avec un temps d'amorçage très court, sans limiter le transfert du fluide. La taille du trou est fonction du diamètre du fil, du type et du niveau de courant. En général, on adopte un diamètre égal à 0,2 mm plus grand que le fil (Fig. 8-d).

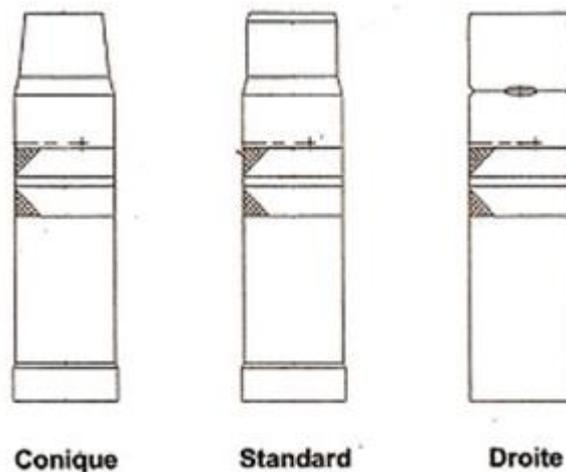


Figure III.18: Buse de sortie de gaz [53]

- ❖ La buse à gaz (Fig. III.18) permet de transférer le gaz de protection sur la zone à souder. Disponible dans plusieurs versions avec des ouvertures plus ou moins larges pour des débits de gaz plus ou moins élevés (\varnothing 15 à 20 mm) comme par exemple avec le fil fourré. Elles sont réalisées en matière très isolante.

- ❖ L'insert anti-projection inclus directement dans la buse à gaz permettant d'éviter un court circuit dans le col de cygne.

- ❖ La bague isolante créant une isolation entre le col de cygne et l'embout-contact.

- ❖ Le faisceau de liaison comprend une enveloppe extérieure incluant : La gaine guide-fil, le câble d'alimentation, le tuyau amenant le gaz de protection, ainsi que les tuyaux d'eau allé et retour. La longueur des faisceaux est généralement de 3 à 4,5 m maximums.

III.9.1 : Angle de Torche.

a) En fonction des configurations de soudage (Fig. III.19)

Un angle normal de soudage ne doit pas excéder 15° .

- **Soudage en tirant** : La torche est inclinée vers la soudure finale. Cela permet d'apporter une chaleur considérable au bain de fusion pour une plus grande pénétration avec moins de projections et une meilleure stabilité d'arc. C'est la méthode la plus utilisée pour le soudage des pièces épaisses ou moyennes en acier, par exemple.

- **Le soudage en poussant** : Utilisé pour le soudage de l'aluminium, il permet de combler les espaces séparant les tôles, d'obtenir des lignes de soudures plus larges et un bas niveau de pénétration comparé au soudage en tirant.



Figure III.19: Soudage en tirant ou poussant [53]

b) En fonction du métal à souder

L'angle de la torche de soudage par rapport au métal à souder a un effet déterminant sur la forme de la soudure et sur la profondeur de pénétration. (La Fig III .20) montre les angles de torche appropriés, perpendiculaires à la direction de la soudure, pour différents types de joints. Cette figure montre également la torche devrait être maintenue en fonction des types de joints à réaliser.

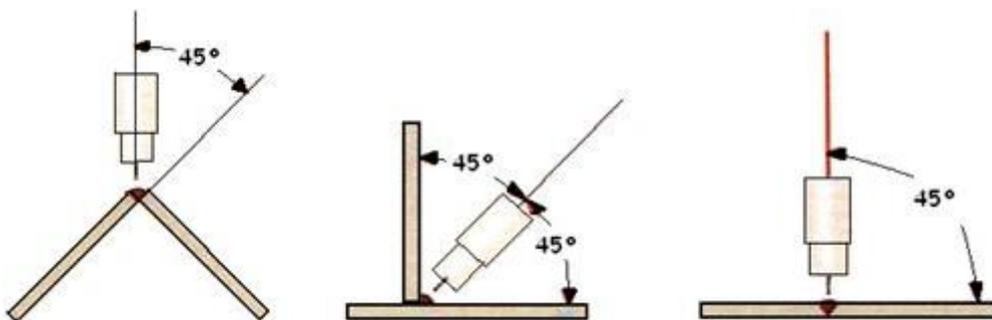


Figure III.20: Angle de la torche [53]

III.10.La File de Soudage

Pour chaque matériau, il existe donc un fil adapté. Les diamètres varient de 0,6 mm à 2,4mm. Les fils pour aciers carbone non alliés ou faiblement allié, par exemple, sont pleins, tréfilés et calibrés dans des diamètres de Ø 0,6 mm à Ø 2,4 mm. Ils sont conditionnés en bobine de 15 à 20 kilogrammes ou en fûts (pour la robotique). Ils sont recouverts d'une pellicule de cuivre pour éviter l'oxydation superficielle et permettre un bon passage électrique avec le tube contact de la torche lors du soudage. Ils sont composés principalement de carbone (C : 0,06 à 0,08 %), manganèse (Mn : 1,0 à 1,5 %), silicium (Si : 0,6 à 0,9 %), soufre (S : 0,025 %) et phosphore (P : 0,025 %).[54]

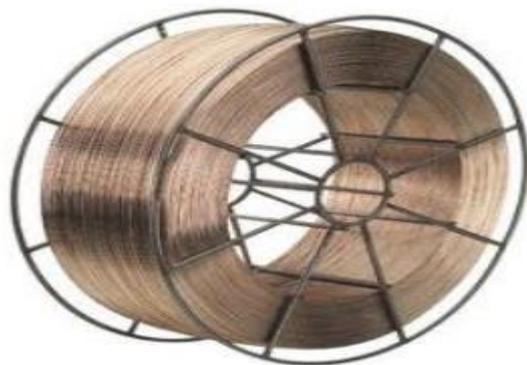


Figure III.21: bobines de file de soudage Mig- Mag [55]

III.11 : Le réglage des paramètres:

❖ **La chose essentielle** est de connaître parfaitement le réglage de la vitesse d'avance du fil et de la tension symbolisées ainsi sur la plupart des sources de courant

Il faut donc trouver le bon dosage afin d'avoir le bon mode de transfert en fonction du besoin. En résumé: Short Arc ou court circuit ; Vitesse de fil et tension Faible Globulaire ; Vitesse de fil faible et tension élevée Spray Arc ou pulvérisation axiale ; Vitesse de fil et tension élevées

❖ **Choix du diamètre de fil**

Diamètre de fil	Gamme d intensité	Type de Soudage
0.6mm	40 à 100A	Carrosserie automobile
0.8mm	60 à 180A	Tuyauterie faible épaisseur
1.0mm	100 à 300A	Toute position passe de pénétration
1.2mm	150 à 350A	A partir de 8mm d épaisseur
1.6mm	200 à 700A	A partir de 12mm d épaisseur

Tableau III.5: le diamètre de file [56]

❖ **Choix des tensions (à titre indicatif)**

Diamètre du fil en mm	Type de transfert	Valeur de tension en volte
0.6mm	Court circuit	16 à 17 volts
0.6mm	Grosses gouttes	17 à 21 volts
0.6mm	Pulvérisation axiale	21 à 24 volts
0.8mm	Court circuit	17 à 19 volts
0.8mm	Grosses gouttes	19 à 23 volts
0.8mm	Pulvérisation axiale	23 à 26 volts
1.0 mm	Court circuit	18 à 21 volts
1.0 mm	Grosses gouttes	21 à 26 volts
1.0 mm	Pulvérisation axiale	26 à 30 volts
1.2mm	Court circuit	21 à 24 volts
1.2mm	Grosses gouttes	24 à 29 volts
1.2mm	Pulvérisation axiale	29 à 35 volts
1.6mm	Court circuit	26 à 29 volts
1.6mm	Grosses gouttes	29 à 34 volts
1.6mm	Pulvérisation axiale	34 à 38 volts

Tableau III.6: Choix des tensions du titre indicatif [56]

❖ **Indication de réglage de l'intensité (à titre indicatif)**

Il existe une formule permettant de calculer l'intensité. Il est important de rappeler que nous réglons une vitesse de fil et non une intensité. L'intensité est fonction de la vitesse de fil. Cette formule est applicable surtout à la rédaction de documents de soudage tels que les DMOS-P (Descriptif de Modes Opératoires de soudage Préliminaire)

$$\text{Intensité} = (\text{Tension} - 14) * 20$$

$$\text{Tension} = 14 + (0.05 * \text{Intensité})$$

Formule approximative [56]

III.12 : Domaines d'utilisation

Le soudage MIG convient pour l'assemblage des métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous les types de joints en toutes positions et de mètre en œuvre des épaisseurs de 0,5 mm et plus pour le soudage à faible intensité, 6 mm et plus pour le soudage à haute intensité. Le soudage sous protection gazeuse avec fil plein est utilisé en tôlerie, en construction navale, pour le soudage des aciers métalliques et du matériel métallurgique, ainsi que pour la construction des ponts, des engins de levage, des pipelines et des réservoirs de stockage. Avec fil fourré, on l'utilise en charpentes, en construction navale, ainsi que pour la construction des ponts, des presses lourdes, des wagons et des châssis de camion. [57]

Chapitre IV :
La Métallurgie du
soudage

IV.1 : Introduction

Une opération de soudage consiste à assembler un ou plusieurs pièces en assurant une continuité métallique. Elle engendre des montées en température importantes au sein du métal de base ce qui conduit à des transformations structurales de l'acier. Celle-ci influe sur l'évolution thermique sous l'effet, entre autres, des caractéristiques thermiques et mécaniques fonctions de la composition métallurgique figure (01). [58]

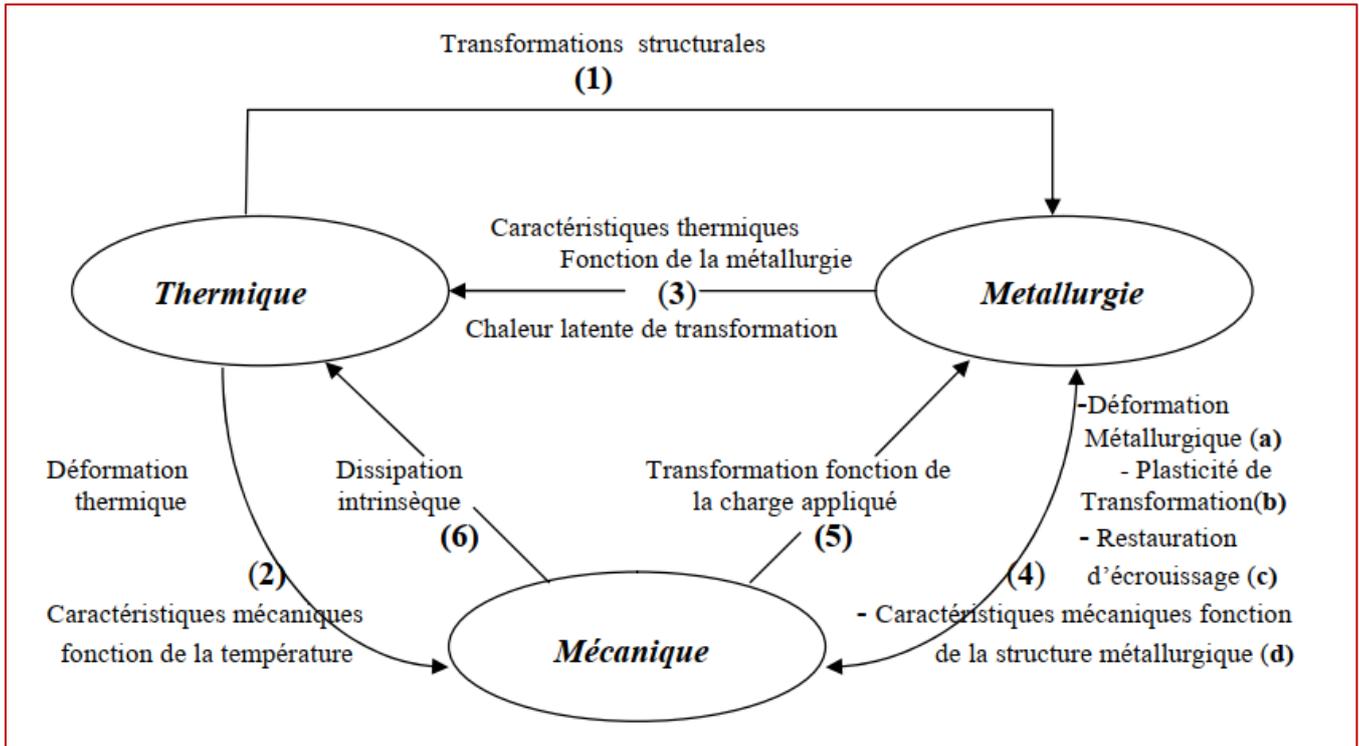


Figure IV.1: Couplage thermo métallurgique et mécanique au cours d'une opération de soudage [58]

IV.2 : Aspect thermique du soudage

Caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent en mouvement, parfois immobile (exemple : soudage par résistance) dont la nature et la puissance qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratiques d'utilisation.

Le soudage comporte, là où il intervient, des échauffements rapides, dans de nombreux cas plus rapides que ceux qui correspondent à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Si l'on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique du soudage, il est donc nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent.

L'effet de l'échauffement rapide est accentué par la brièveté du séjour à la température maximale, température qui avoisine la température de fusion. Le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en général élevée, elle-même fonction, pour chaque matériau, non seulement du procédé de soudage utilisé, mais aussi du mode

Chapitre IV : La métallurgie de soudage

opérateur pratiqué pour l'application de ce procédé. Pour ces raisons, toute analyse métallurgique des effets de l'opération du soudage doit être précédée et éclairée par une étude thermique approfondie [59]

IV.2.1 : Cycle thermique du soudage mono passe:

Le cycle thermique lors de l'opération de soudage mono passe se traduit par un chauffage rapide jusqu'à une température proche de la température de fusion et par une cinétique de refroidissement qui dépend des paramètres opératoires :

- Energie de soudage
- Te de procédé
- Epaisseur de la pièce

Pour caractériser la loi de refroidissement, plusieurs paramètres peuvent être adoptés :

- Vitesse moyenne = Vitesse à une température donnée : $(d\theta / dt)_{\theta} = \theta_1$
- Temps de passage entre deux températures : $\Delta t_{\theta_2\theta_1} = t_{\theta_1} - t_{\theta_2}$

Pour choisir un paramètre de refroidissement, il doit être indépendant de tout autre paramètre. (D'après l'Institut de Soudure I R S I D) :

- Le temps écoulé entre 800 C° et 500C°
- Le temps écoulé entre 700 C° et 300C°

Ces deux paramètres de refroidissement déterminent la microstructure fig. IV.2 Deux autres paramètres, la vitesse de refroidissement à partir de 300 et le temps écoulé entre 300 et 100 C° les Japonais prennent en considération les conditions d'hydrogénation des soudures, c'est à dire le comportement des soudures en fissuration à froid. Ces deux paramètres sont représentatifs des conditions de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite ils permettent d'apprécier la ZAT (siège de fissures).

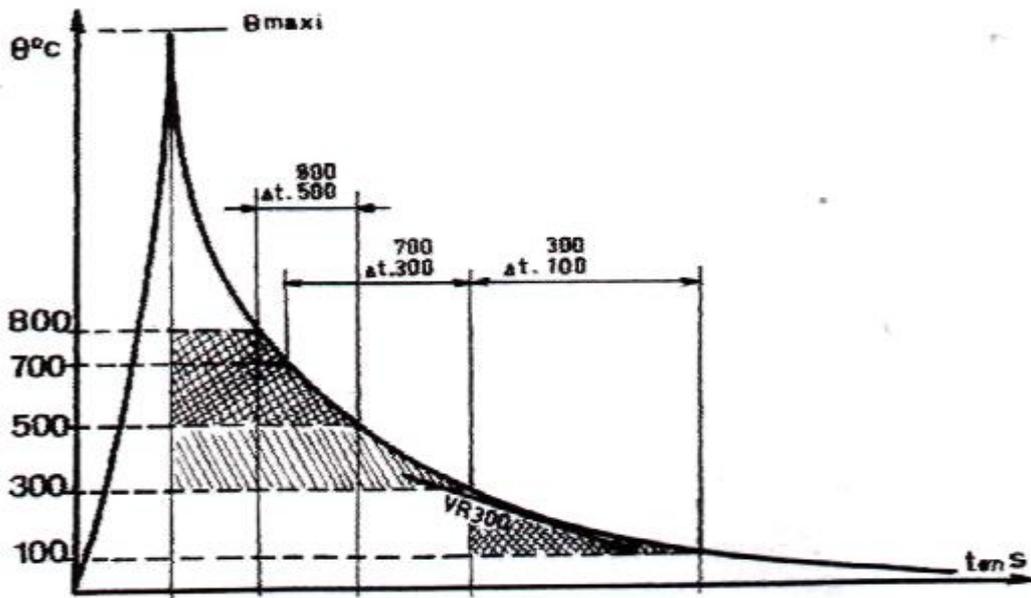


Figure IV.2 : Cycle thermique: cas du soudage mono passe. [60]

IV.2.2 : Cycle thermique du soudage multi passes :

Au voisinage de la première passe on observe les cycles thermiques les plus sévères, par rapport à la température maximale atteinte et la rapidité du refroidissement. Les passes suivantes provoquent à cet endroit des cycles de plus en plus atténués. Lorsque le temps entre les passes est inférieur à une certaine valeur qui dépend des conditions de soudage, fig. IV.3 la température minimale au point A augmente à chaque passe. Suivant la disposition des passes, une même température (exemple : A3 dans les aciers) peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finalement observée en cette région est le résultat de la succession des cycles correspondants. Le dépôt d'une passe modifie la structure de la passe précédente (ou des passes précédentes), en produisant sur celle-ci un recuit ou un revenu de la structure. Voir Fig. IV.4 représentant les modifications dues au cycle thermique pour le soudage multi passes. Cette observation vaut aussi bien pour la ZAT que pour le métal fondu, lui aussi réchauffé et, s'il y a lieu, transformé au cours des passes successives. La notion de pré et post chauffage, qui concerne essentiellement la première et la dernière passe, doit être complétée par la notion de température entre passes. Cette température est définie comme étant la température atteinte au refroidissement par le métal déposé avant le dépôt de la passe suivante. Elle est à la fois température de préchauffage pour la passe suivante et température minimale du post -chauffage pour les passes précédentes.[61]

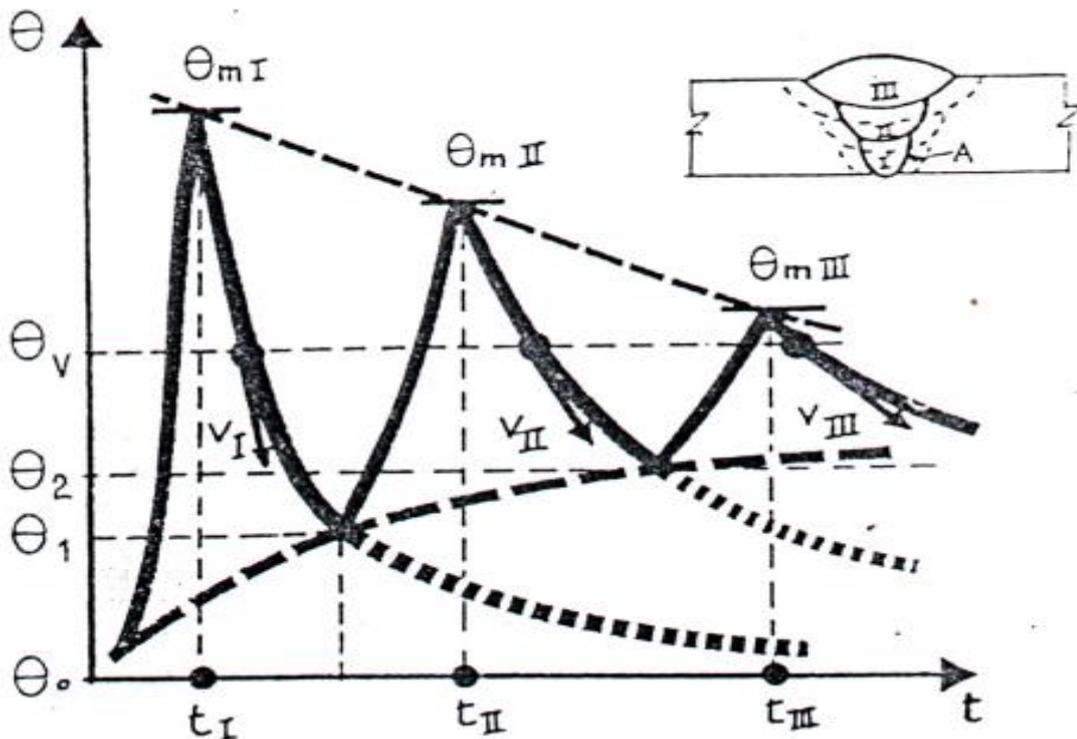


Figure IV.3 : Cycle thermique pour le soudage multi passes [61]

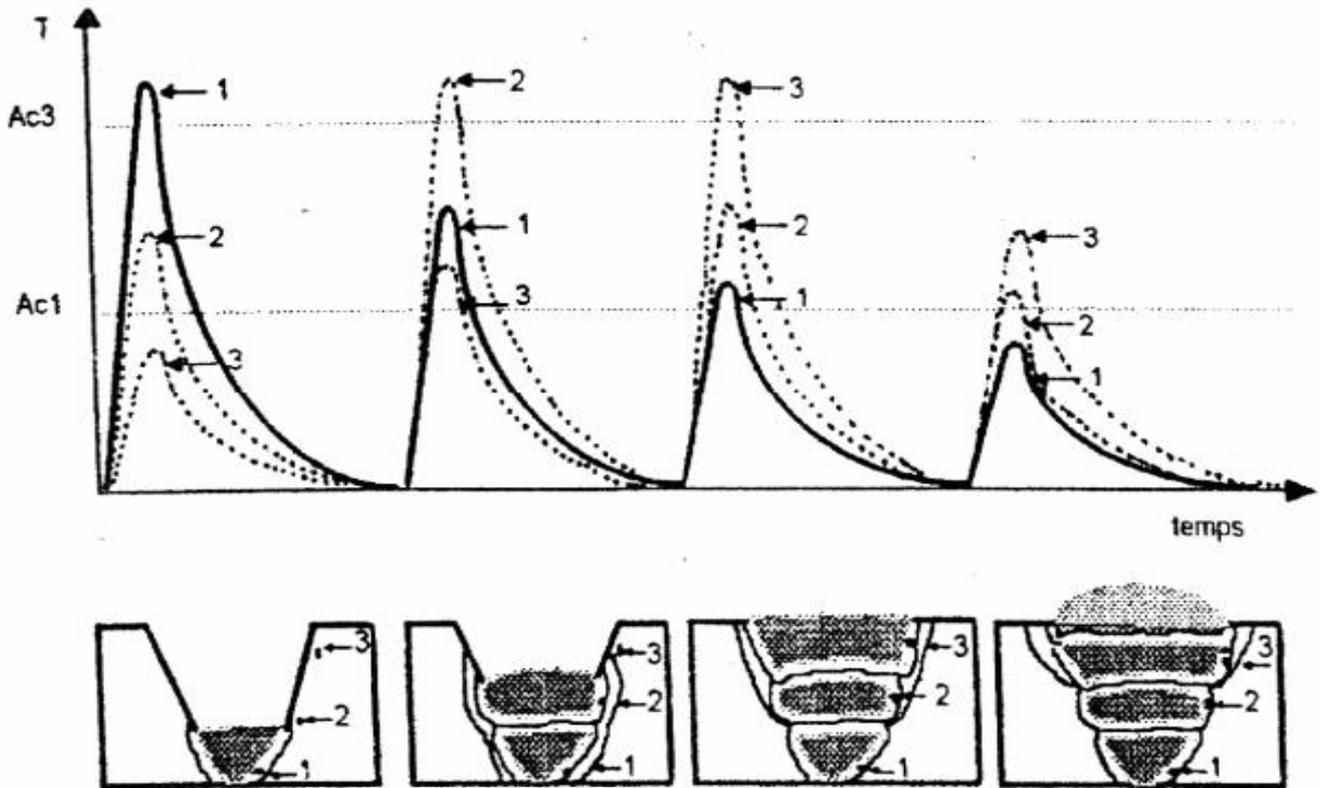


Figure IV.4 : Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes. [61]

IV.2.3 : Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage

Au cours d'un cycle thermique de soudage, un acier inoxydable austénitique ne subira une transformation structurale que si sa température a dépassé 1100 °C environ. Les propriétés mécaniques de la zone soudée sont très fortement liées à la structure métallurgique obtenue après l'opération de soudage.

Le déplacement du volume thermique provoque, perpendiculairement à la ligne de fusion, des changements microstructuraux dans le métal de base. Ces modifications dépendent de la température maximale atteinte et de la cinétique de refroidissement en ce point. On distingue dans une soudure d'acier inoxydable austénitique, après son retour à la température ambiante, et à partir de l'axe du cordon, successivement les zones suivantes [62]

a. Zone fondue (ZF)

C'est le volume qu'occupe le métal fondu après solidification dans les soudures par fusion [63] La zone fondue se solidifie à l'état austéno-ferritique ou totalement ferritique et sa transformation ferrite (δ) austénite n'est généralement pas complète par suite de la rapidité du refroidissement à haute température. Une certaine proportion de ferrite δ subsiste donc à la température ambiante.

Cette proportion est d'autant plus élevée que le refroidissement à haute température (> 1250 °C) a été plus rapide. Par suite des ségrégations issues de la solidification, cette ferrite δ est à la fois dans les espaces inter dendritiques et dans les axes des dendrites. L'austénite par ailleurs ne subit aucune transformation jusqu'à son retour à la température ambiante [64] Le métal fondu au cours du soudage a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles d'un même métal élaboré d'une manière classique.

Chapitre IV : La métallurgie de soudage

Ceci est dû aux déformations importantes auxquelles il est soumis et au refroidissement rapide du joint soudé.

b. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée par la chaleur ou thermiquement, ZAC ou ZAT (appelée aussi, en anglais « Heat Affected Zone »), est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur de soudage [65] Dans cette zone affectée par la chaleur, il apparaît de très forts gradients de température qui évoluent rapidement dans le temps. On peut distinguer :

- **Zone de surchauffe**

C'est la partie de la ZAT la plus proche de la zone fondue, elle est appelée ZAT surchauffée ou ZAT de haute température, la température dans cette zone a dépassé 1100 °c environ et le métal a subi plus ou moins partiellement la transformation austénite ferrite (δ) (La quantité de ferrite (δ) restant néanmoins toujours faible). La rapidité du refroidissement peut impliquer l'existence d'une certaine proportion de ferrite (δ). Cette zone devrait subir un grossissement exagéré des grains ce qui provoque une dégradation des propriétés mécaniques et ceci en fonction de la température et du temps de surchauffe. Mais il faut noter que l'existence d'une structure biphasée à haute température limite très sensiblement le grossissement des grains.[66]

- **Une partie voisine de la zone de surchauffe**

Dont la température atteinte au cours du cycle se situe entre 1100 °c et 850 °c environ. Dans cette zone, le métal a subi un nouveau traitement d'hypertrempe et subsiste donc dans un état austénitique comparable à celui du métal de base.

- **Une partie enfin dont la température maximale**

A été comprise entre 500 et 850 °c environ et dans laquelle les carbures de chrome ont pu précipiter aux joints des grains d'austénite. Les transformations microstructurales dans la ZAT sont contrôlées par les procédures de soudages et les compositions chimiques des alliages. Pour une composition donnée, la microstructure de la ZAT est contrôlée en imposant des cycles thermiques, des épaisseurs définies, et des températures d'interphases et de préchauffage.

Dans la ZAT surchauffée, pour certaines vitesses de refroidissement (ou de soudage), des réactions peuvent se produire telle que la formation des nitrures dans le cas où la formation de l'austénite est incomplète. Plus la vitesse de refroidissement sera lente, plus la transformation de la ferrite en austénite aura le temps de se réaliser. Pour des vitesses lentes, le risque de précipitation des carbures apparaîtra ; les principaux facteurs qui contrôlent la précipitation sont [67]

- ✓ La composition chimique de l'alliage.
- ✓ Les conditions de préchauffage
- ✓ Le temps de maintien aux hautes températures, et le cycle thermique total

Métal de base (MB)

C'est le métal des pièces à assembler, ou la partie qui n'a pas été affecté par la chaleur de soudage. Les figures IV.5 et IV.6 représentent les différentes zones d'un cordon de soudure et la variation de dureté dans un joint soudé respectivement [68]

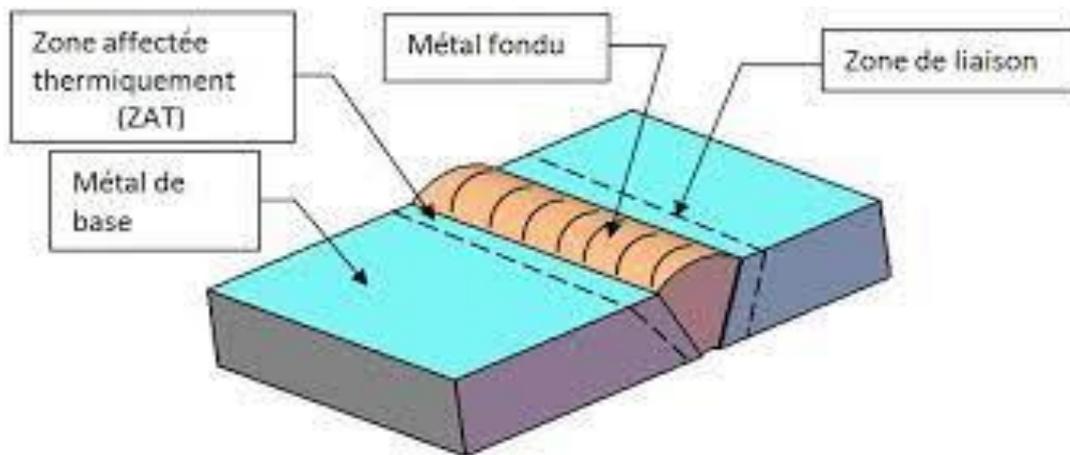


Figure IV.5 : Cordon de soudure

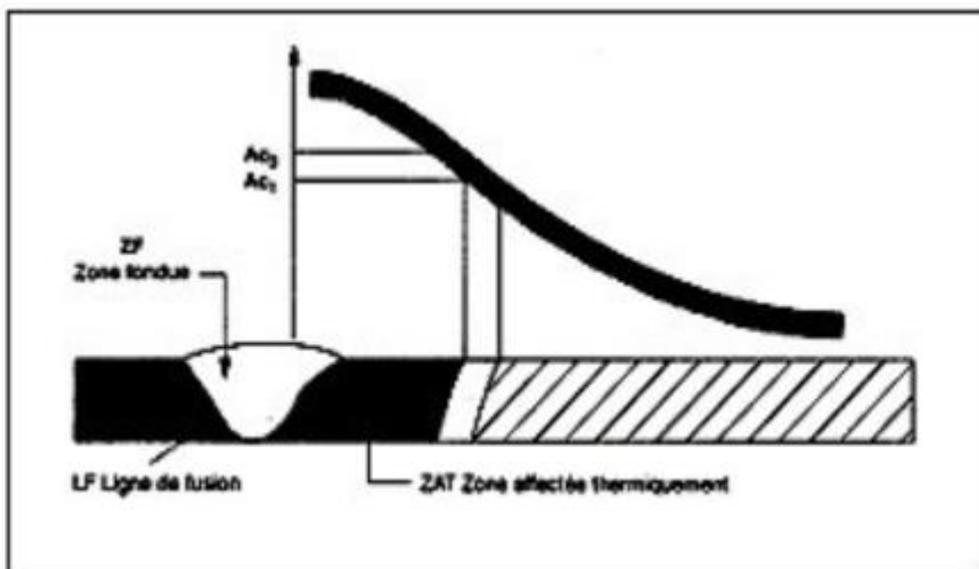


Figure IV.6 : Variation de la dureté dans un joint soudé

IV.3 : Les défauts des soudages

IV.3.1 : Les fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le Métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [69]

IV.3.1.1 Fissure à chaud (ou de solidification)

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Figure IV.7).

Fissure à chaud ou de solidification

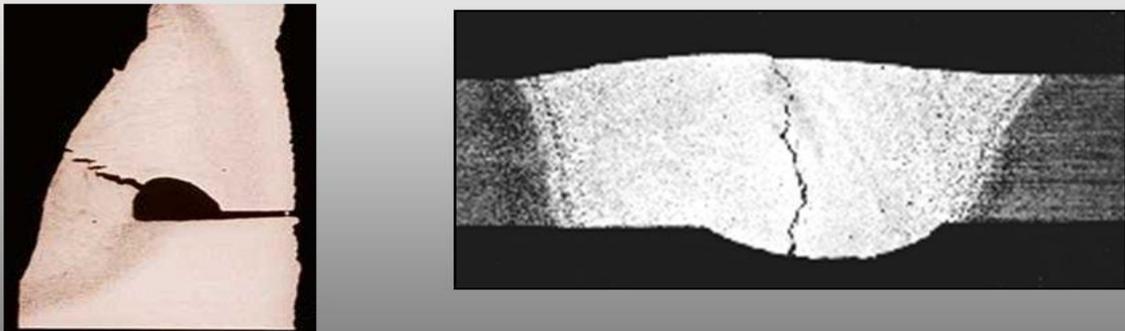


Figure IV.7 : Fissure à chaud (ou de solidification). [69]

✚ Causes possibles

Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/ largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).

➤ Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure VI.8). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.

➤ Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
➤ Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.

➤ Transformations allotropiques : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier ; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

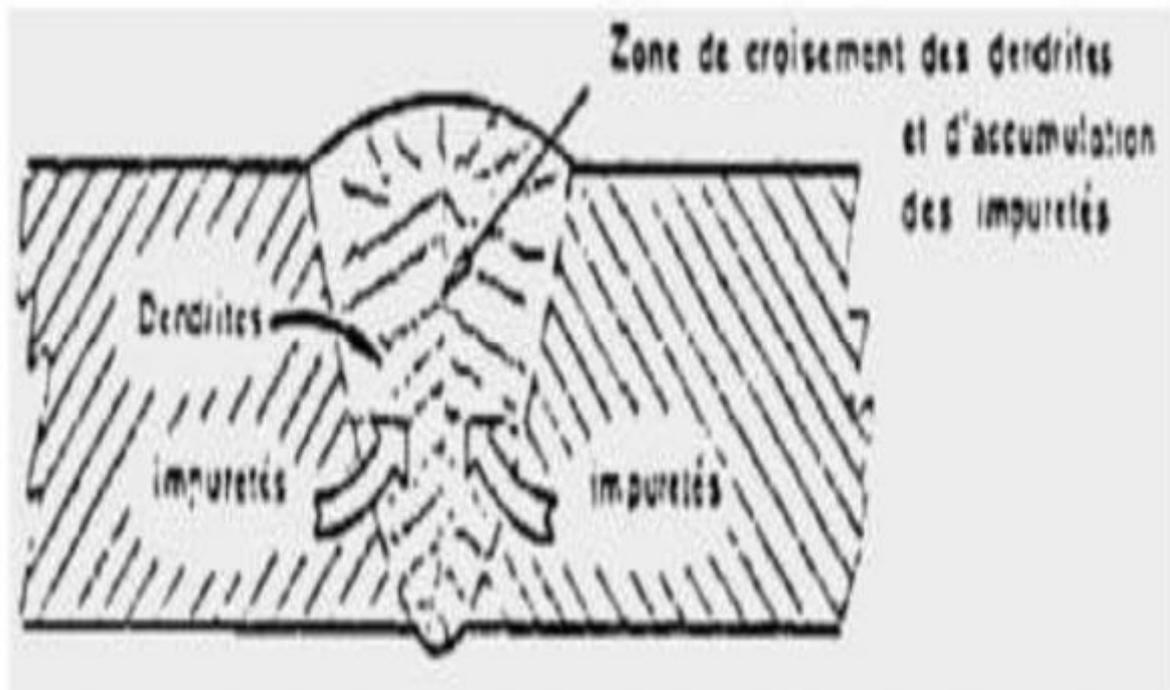


Figure IV.8 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement. [67]

▪ Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

▪ Méthode de réparation

Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

▪ Mesures préventives

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0.05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important. [67]

IV.3.1.2 : Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les Travaux de soudage (Figure IV.9)

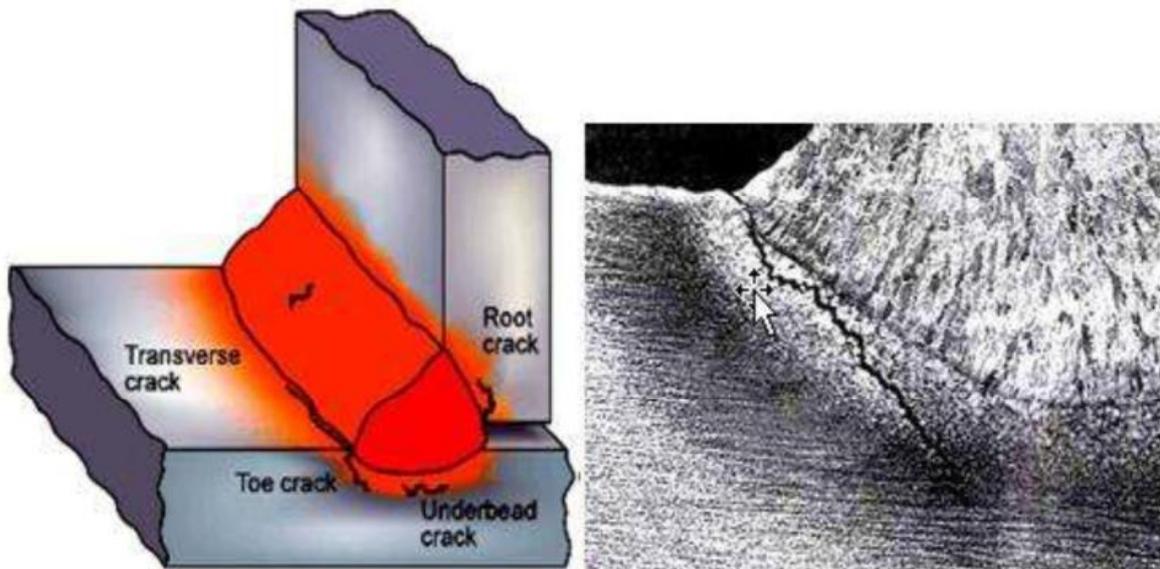


Figure IV.9: Fissure à froid (fissure d'hydrogène). [67]

➤ Causes possibles :

La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant. Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur. De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

a. Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

b. Méthode de réparation

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.

Mesures préventives :

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les Électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.

Chapitre V : Partie expérimentale

Chapitre V :partie expérimentale

V.1 : Introduction

Le chapitre (V) regroupe les résultats expérimentaux obtenus avec différentes techniques De caractérisation ainsi que leurs interprétations.

La première partie des résultats concerne l'analyse microstructurale des joints soudés de l'acier ordinaire E36 étudié é par la macro scopie et la microscopie optique indiquant l'évolution microstructurale dans les différents joints soudés

V.2 : Paramètres des soudures

La réalisation des soudures avec chanfrein ont nécessité une seule passe avec l'utilisation des paramètres consignés dans le tableau V.1. Les réglages des paramètres de la soudure S2 sont ceux utilisés habituellement par l'entreprise.

Les soudures	Intensité du courant de soudage (Volts)	Présence de gaz de protection
S1	Intensité = 4 Volts	Oui
S2	Intensité = 6 Volts	Oui
S3	Intensité = 9 Volts	Oui
S4	Intensité = 6 Volts	Oui

Tableau V.1 : Paramètres de l'intensité de soudage

V.3 : Observation macrographique des éprouvettes

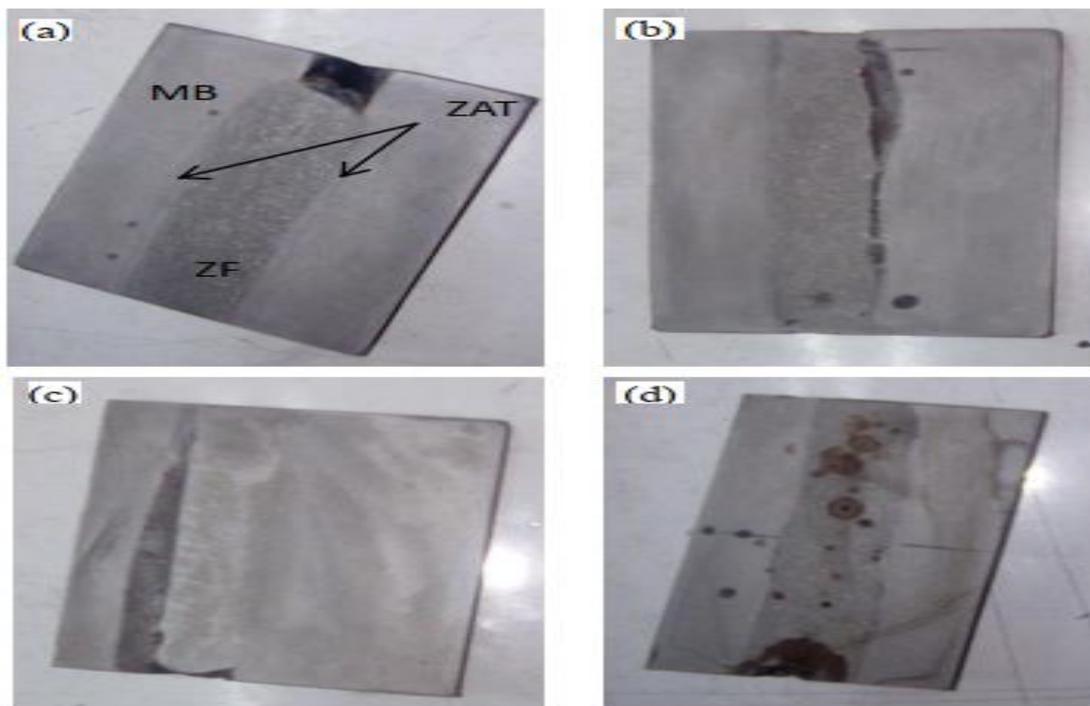


Figure V.1: La macrographique des 4 soudures : a) intensité 4 V, b) intensité de 6 V, C) intensité 9 V, d) soudure sans gaz de protection.

Chapitre V :partie expérimentale

Les différentes zones révélées par l'attaque chimique sont présentées dans la (figure V.1. A) :

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

V.4 : Observation microscopique des éprouvettes

Les figures V.2, V.3, V.4, V.5 présentent une observation micrographique des différentes zones du cordon de soudure : MB, ZAT, ZF pour les soudures S1, S2, S3 et S4 respectivement

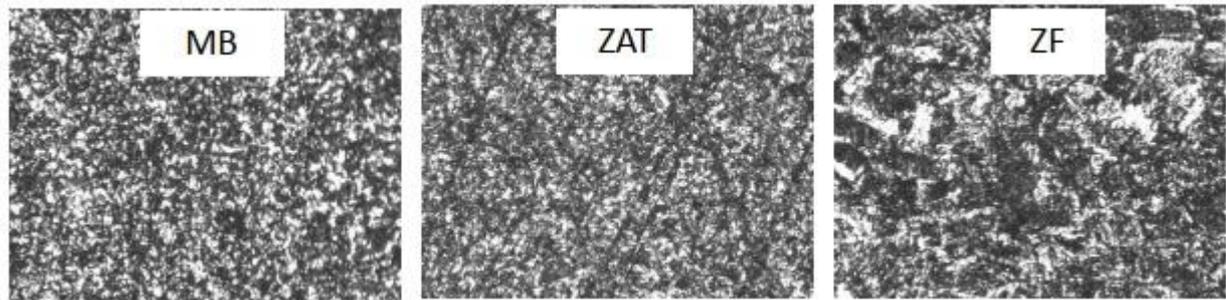


Figure V.2: Micrographie optique de la soudure S1.

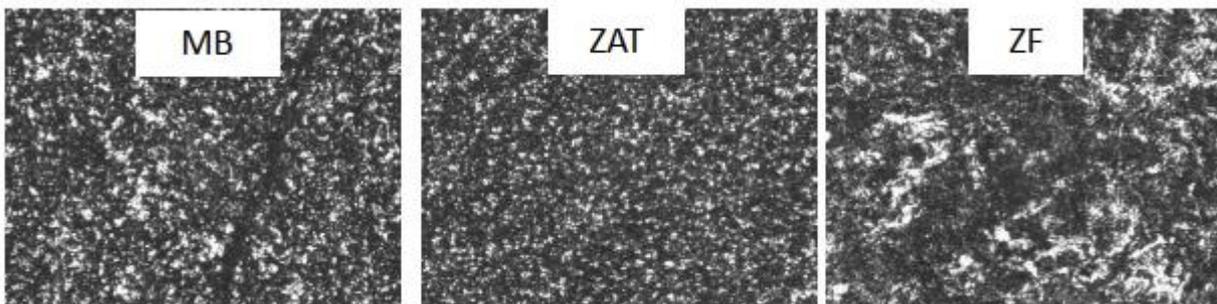


Figure V.3 : Micrographie optique de la soudure S2.

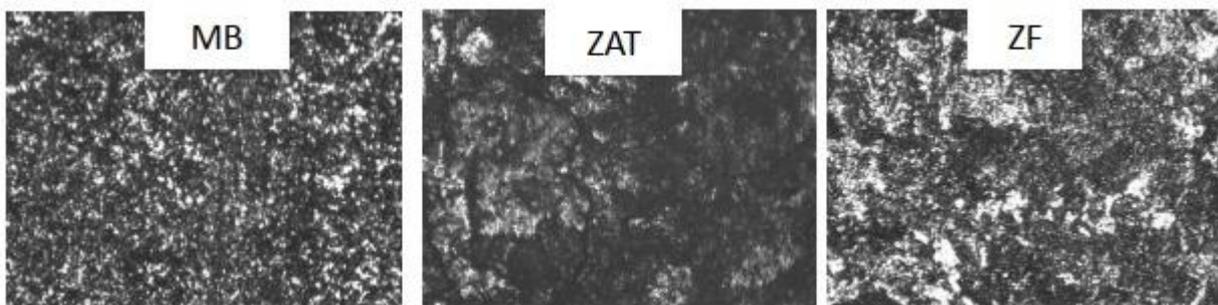


Figure V.4: Micrographie optique de la soudure S3.

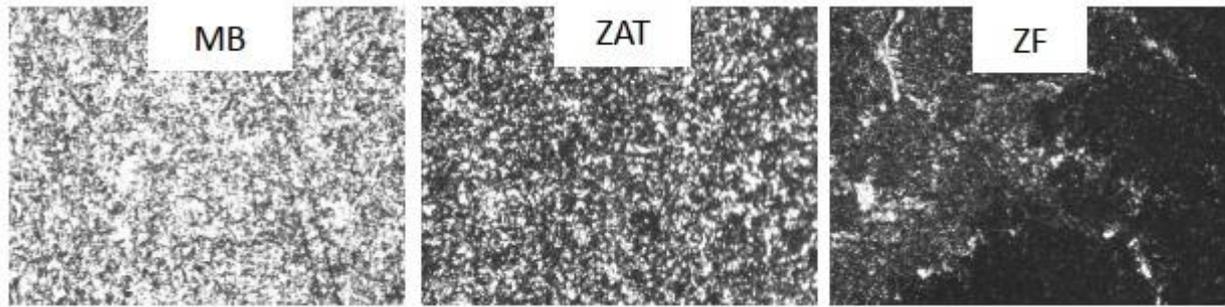


Figure V.5: Micrographie optique de la soudure S4.

Les sections micrographiques observées ont permis de conclure que les limites entre les zones de MB et la ZAT sont généralement difficiles à les différencier rigoureusement surtout dans le cas des aciers ordinaires en raison de la haute conductibilité de chaleur de ses derniers. Cependant on peut clairement voir une nette différence les microstructures des MB et la microstructure des ZF. Cette zone est caractérisée par le prolongement de « ramures ». Il peut probablement s'agir de ramification de ferrite

Le MB a une structure à grains fins ferritique : selon la bibliographie : il se peut qu'il y ait quelques grains de perlite qui n'apparaissent pas clairement sur la micrographie de la figure. La présence des carbures de type MC est également probable mais pas nettement visible.

V.5 : Caractérisation microstructurale.

V.5.1 : Observation de macrographie de l'éprouvette.

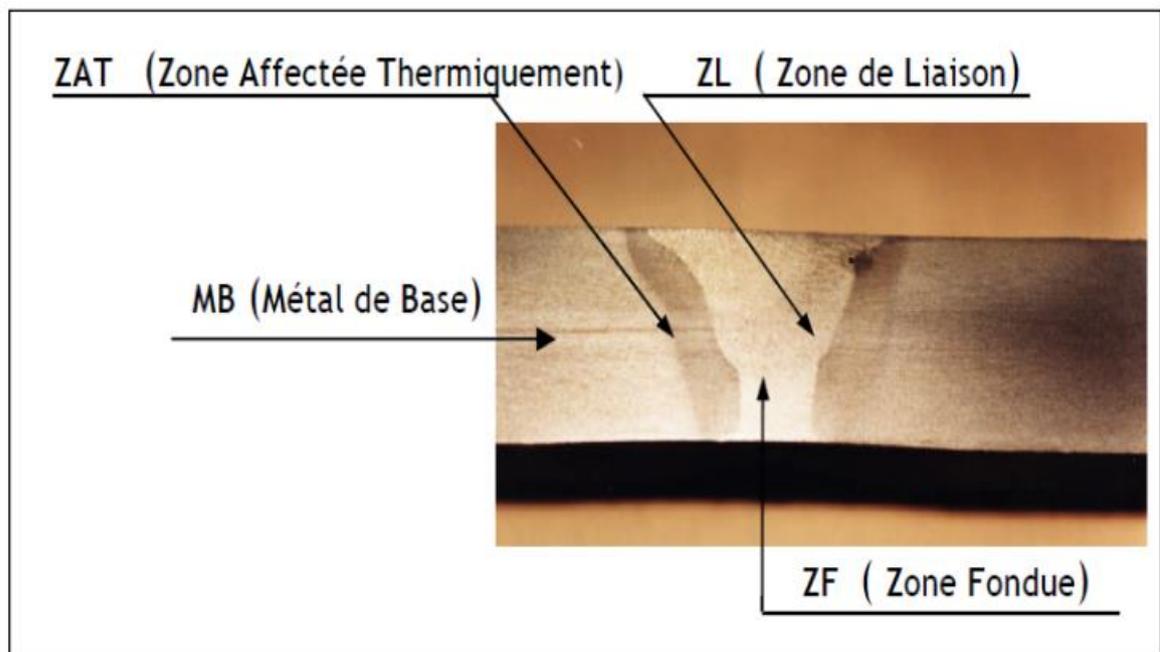


Figure V.6: La macrographie des 4 zones soudures

Chapitre V :partie expérimentale

Les différentes zones révélées par l'attaque chimique sont observées dans la (figure V.6) :

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

V .5.2 : Analyses métallographiques.

V.5.2.1 : La micrographie du métal de base (MB).

a- La micrographie du métal de base (MB) S235.

La Figure V.7 présente les microstructures de métal de base (MB) de l'acier S235.

La microstructure de métal de base (MB) présente une structure ferrite-perlitique Ferrite (la zone claire) et la perlite (la zone en noire)

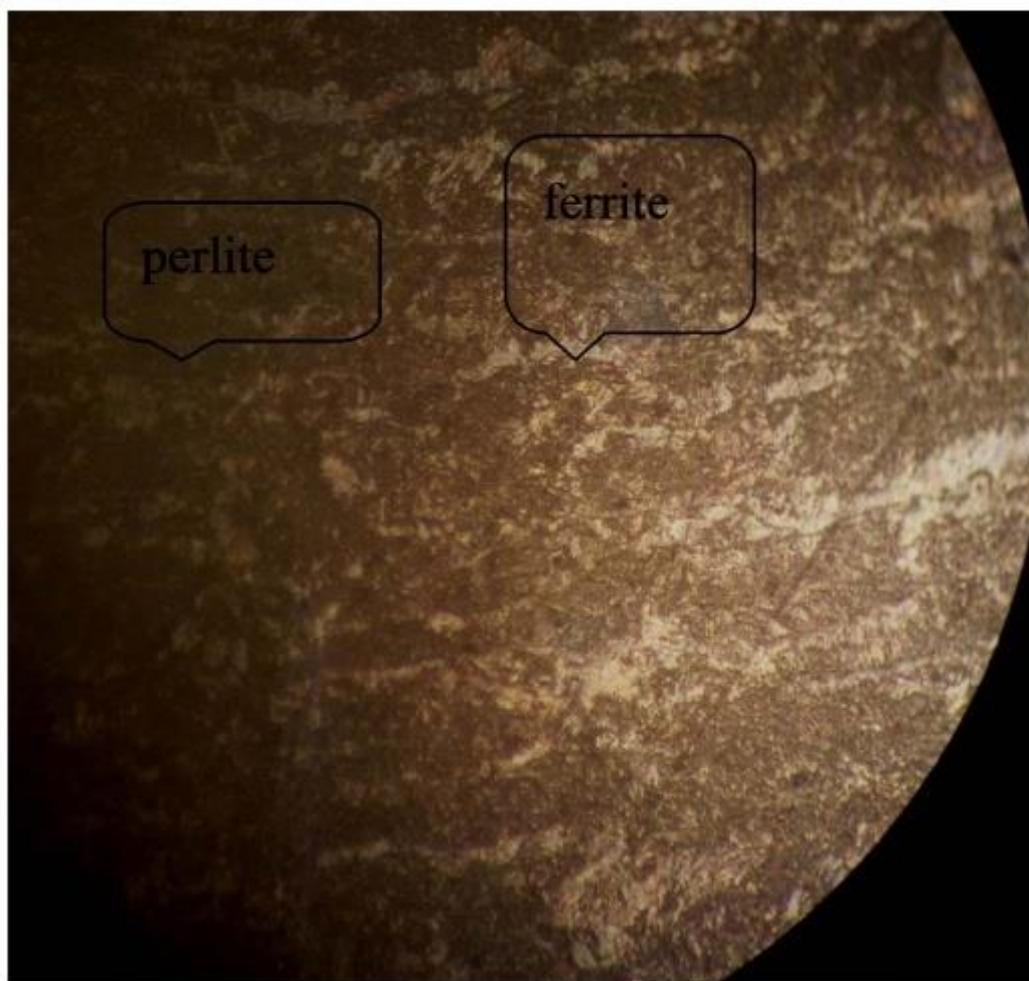


Figure V.7 : Microstructures de métal de base(MB) S235

Chapitre V :partie expérimentale

b-La micrographie du métal de base (MB) 316L.

La figure (V.8) montre les résultats d'observation optique de la microstructure de l'acier 316L. Ce micrographie montre une structure austénitique, avec une grand densité de macles, la distribution des grains est uniforme, leur forme et polygonale avec des joints de grains apparentes. On remarque aussi la présence de particule ronde répartie aléatoirement sur les coups, on distingue deux familles :

- Des particules lisses et de forme relativement ronde.
- Des particules déchaussées des formes complexes.

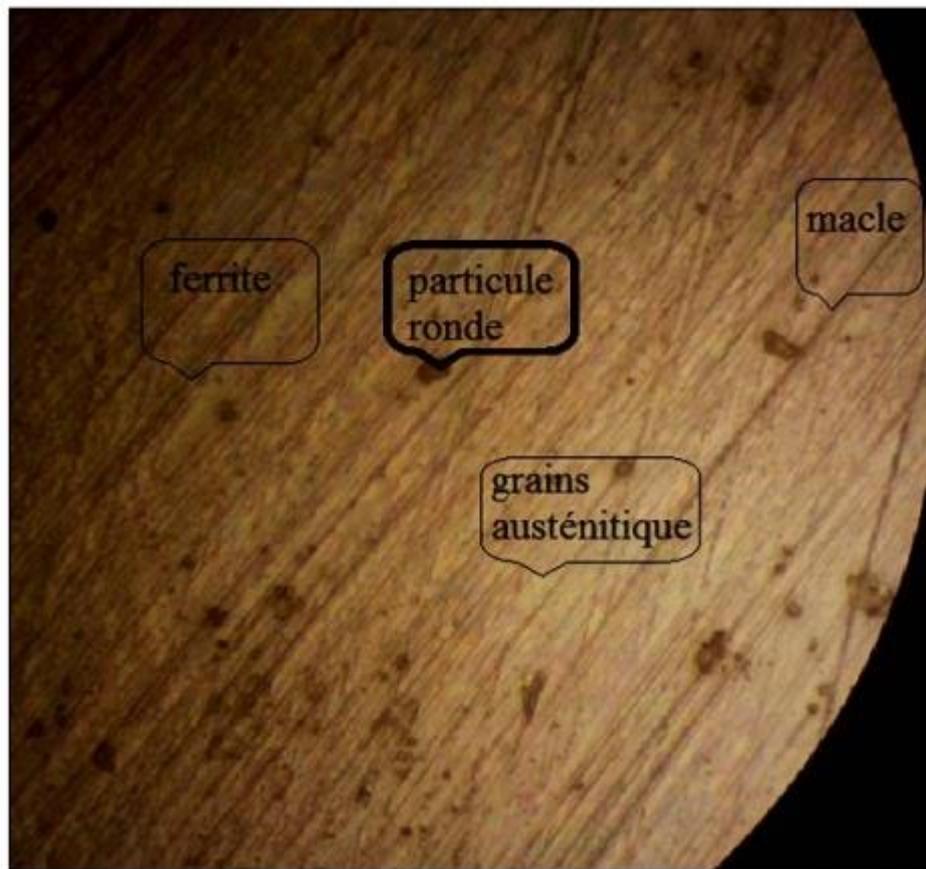


Figure V.8 : Microstructures de métal de base(MB) 316L

V. 5.2.2 : La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT).

A proximité de la zone fondue (la zone affectée par la température), la microstructure se révèle comme celle du métal de base, néanmoins la taille des grains a connu un grossissement très significatif sous l'influence de l'élévation de la température apportée par la source de chaleur lors de l'opération du soudage.

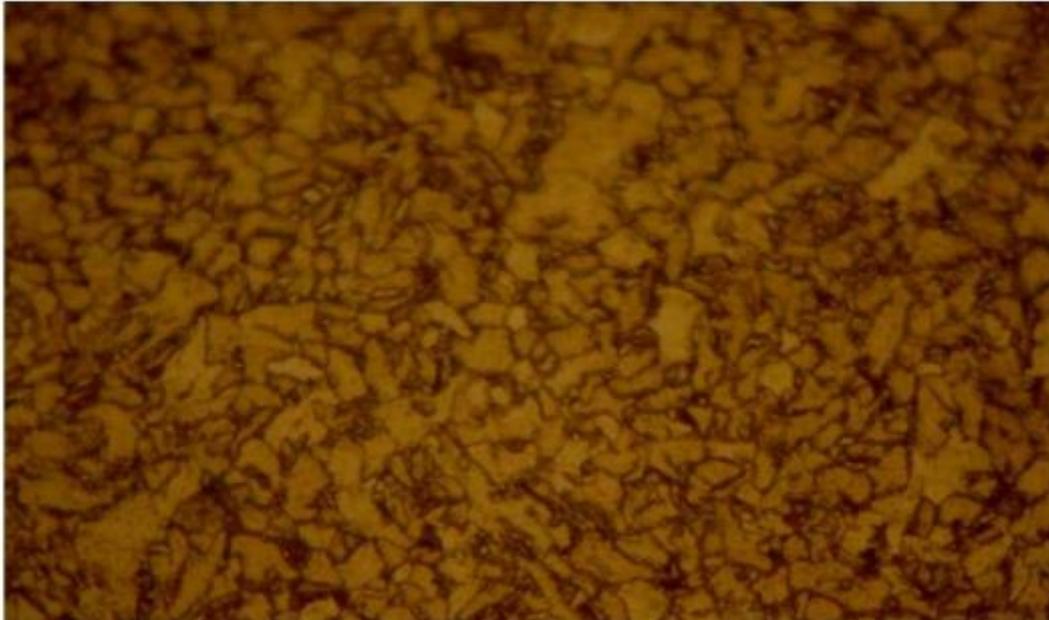


Figure V.9: Microstructure la ZAT de l'acier S235

V.5.2.3 : La micrographie de la zone fondue (ZF).

La ZF de la soudure de l'acier S235, présente une microstructure très fine par rapport à la structure de MB constituée de grains de ferrite et d'austénite équipages.

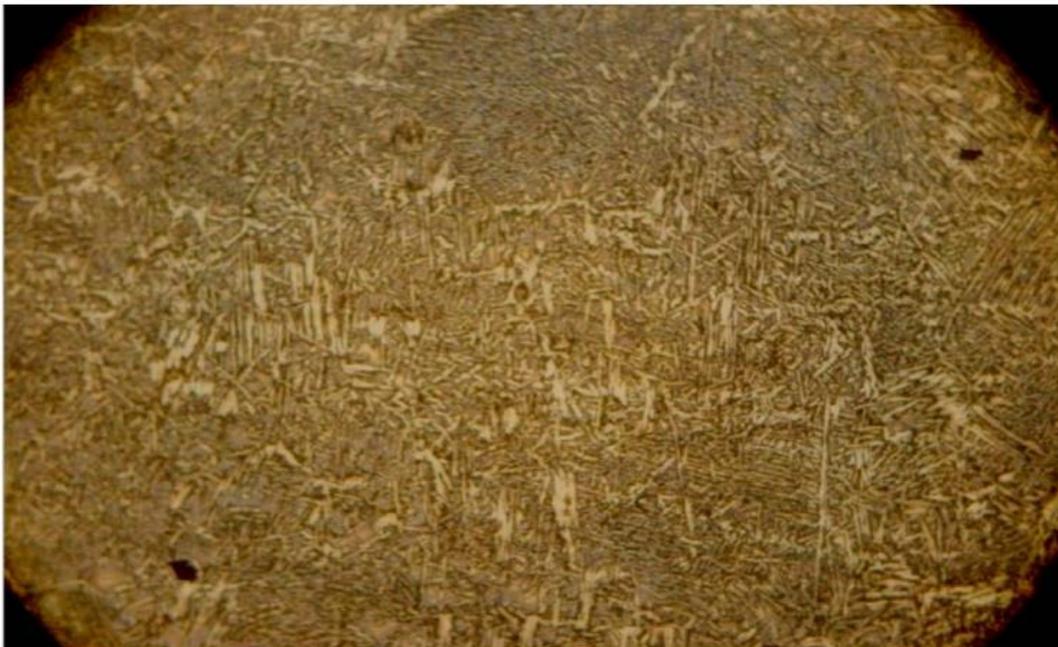


Figure V.10: Microstructure la ZF de l'acier S235.

Chapitre V :partie expérimentale

V.6 : Caractéristiques mécaniques

V.6.1 : Essais de traction

Les résultats dépouillés sur l'ensembles des courbes de traction concernent quatre caractéristiques rationnelles. il s'agit de la limite d'élasticité apparente $R_e (0.2)$, la résistance à la rupture R_m , l'allongement $A\%$ et le module de Young E .

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux :

N°=	Soudure	R_m (MPa)	Limite élastique $R_e (0.2)$ (MPa)	$A\%$	$(E)KN/mm^2$
01	Métal de base sans Soudure	554.5	303.0	13.8	186.96
02	S1 Intensité 4V	317.5	270.4	2.2	151.90
03	S2 Intensité 6V	428.5	272.2	15.1	118.79
04	S3 Intensité 9V	444.7	312.0	4.1	219.22
05	S4 Intensité Co_2	229.8	195.9	1.3	123.76

Tableau V.2 : Résultats des courbes de traction

La figure V.11 représente la rupture du métal de base sans soudure après l'essai de Traction



La figure V.11 : Rupture du métal de base (sans soudure) après l'essai de Traction



Figure V.12: Rupture des éprouvette S1, S2, S3, S4 après l'essai de traction indiquées par 1, 2, 3, et sans CO2 respectivement

On remarque que toutes les ruptures des éprouvettes soudées sont produites dans la zone fondue. Ce qui indique que cette zone est très fragile et que les propriétés mécaniques dans cette zone sont inférieurs au métal de base et à la zone affectée thermiquement.

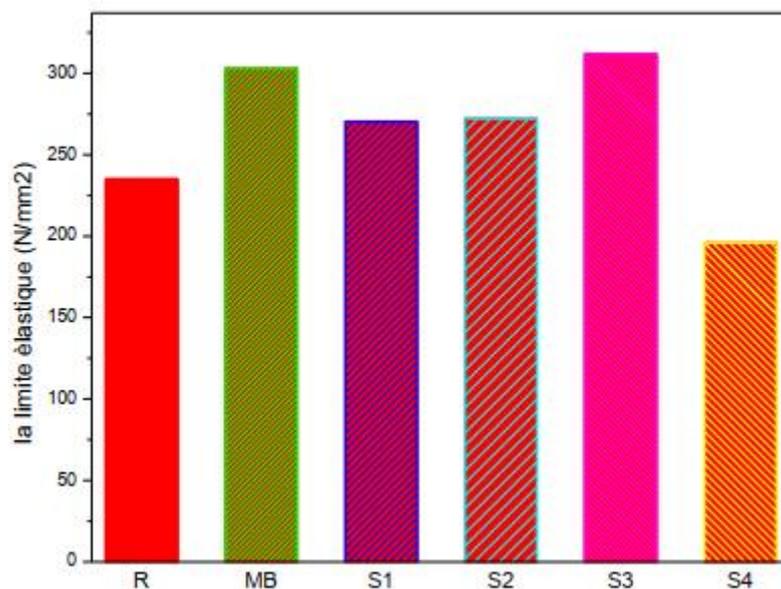


Figure V.13: Comparaison des limites élastiques

Chapitre V :partie expérimentale

Les valeurs de la limite d'élasticité pour tous les éprouvettes sont supérieures aux valeurs minimales nominale $Re \geq 235 \text{ N/mm}^2$ indiquées par la norme (figuré.13) sauf la soudure S4 qui effectuée sans le gaz de protection, alors en dit que le gaz de protection est indispensable pour la réalisation des soudure conforme à la norme.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Conclusion générale

Dans ce travail, nous étudions et comparons l'effet de différents types de soudage sur l'état mécanique et structurel de l'acier ordinaire E36. Parmi ces types de soudage figurent le soudage à l'arc et le soudage MIG.

Dans ce contexte, le procédé de mise en traction a été utilisé sur la pièce, ainsi que l'utilisation de techniques d'observation microscopique, et les résultats ont été les observations optiques réalisées montrent que les microstructures de métal de base(MB) et la zone affecté thermiquement(ZAT) de trois passes successives présentent des structures proches, constitués par une matrice ferritique avec des petites colonies de perlite, et qui montrent clairement plusieurs zone différentes de part et d'autre de la ZF avec des proportions de phases différentes dans les quelles nous constatons la présence des gros grains ferritique, des petites colonie de perlite, ferrite aciculaire, ferrite proeutectoïde et ferrite de widmstätten.

Référence

Références bibliographiques

[1] : G.BERANGER, «Génialité Dès L'acier», Epp 22. Sollac. (1996).

[2] : A. ROOS, «Précis De Métallurgie Appliquée». Edition Technisa Documentation Lavoisier (1982)

[3]: R.STEINER «Properties and Selection: Irons Steels And High Performance Alloys Volume

[4]: De 10 Em Edition Métaux Han book International American Society of Materials (1990).

Disponible En Ligne Sur Le Site : [Http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm](http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm)

[5] :A. BOUMARAF, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilise Dans La Fabrication Des Bouteilles A Gaz », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, (2015).

[6] : R.VILLEGAS, «Genèse De La Ferrite Aciculaire Dans Les Aciers A Moyen Carbone Microalliés Au Vanadium. Morphologie Fractale En Relation Avec Les Propriétés Mécaniques. », Thèse De Doctorat De Ltnpl (Institut National Polytechnique De Lorraine), (2007).

[7] : C.EDERFOUFE, « Cour De Technologie», 1er Année D'uea, (2005-2006).

[8] : M. Hakem , «Elaboration Et Etude De L'évolution Microstructurale D'un Acier A Haute Limite Elastique Au Molybdène Après Traitements Thermomécaniques Et Thermiques», Mémoire De Magister En Science Des Matériaux» ,Universités Saad Ahleb B Blida ,(2002).

[9] : H. MAROUF, « Caractérisation Structurale Et Mécanique Du Joint Soudé De La Liaison Bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier Anti-Usure Naxtra 70 Utilisé Par V Unité Grue De Bejaïa Dans L'assemblage De La Pelle Chargeuse Et Godet D'excavation», Mémoire De Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2012)

[10] : G.MURRY, «Généralités Sur Aciers», Techniques De L'ingénieur, Centre Français D'exploitation, (2002).

[11] : G.MURRY, « Transformations Dans Les Aciers », Techniques De L'ingénieur, MI 115, Centre Français D'exploitation (2002).

[12] : A. SAMIR, « Evaluation Des Paramètres Mécaniques Après Le Procédé De Soudage » Mémoire De Master, Université De Mohammed Kheider, Biskra, (2012).

[13] : M .ABDERRAHIM, «Etude Du Comportement En Fatigue Des Aciers Pour Pipelines », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université De Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, (2013).

[14] : D.BENSAIDA, « Feliachi » Technologie Office De Publication Universitaires 2eme Edition ; (2009).

[15] : Collection Terme Et Définition Utilise En Soudage Et Technique Connexes Publications De La Soudure Autogène, (1996)

Référence

- [16] :S. Bénissais "Le soudage", édition OPU (Figure I.01) [4] - R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979
- [17] : R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979
- [18] :LE SOUDAGE OXYACETYLENIQUE, << <https://docplayer.fr/20745807-Le-soudageoxyacetylenique.html>>>, mai 2019
- [19] : Klas Weman , <<PROCÉDÉS DE SOUDAGE >>, Dunod, Paris, 2012
- [20] : Différences entre les soudures TIG et MIG/MAG <<<http://www.sinoconcept.fr/blog/differences-entre-les-soudures-tig-et-migmag/>>>, avril 2019
- [21] : SOUDAGE<<<https://fr.wikibooks.org/wiki/Soudage/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s> >>, avril 2019
- [22] : Différences entre les soudures TIG et MIG/MAG<<<http://www.sinoconcept.fr/blog/differences-entre-les-soudures-tig-et-migmag/>>>, avril 2019
- [23] : Klas Weman , <<PROCÉDÉS DE SOUDAGE >>, Dunod, Paris, 2012
- [24] : LE SOUDAGE, <<<https://fr.wikibooks.org/wiki/Soudage/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s> >>, avril 2019
- [25] : «LES DIFFERENTS PROCEDES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE» centre d'étude wallon d'assemblage et du control des matériaux.
- [26] : Soudure par résistance << <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage-parresistance> >>, avril 2019
- [27] : SD Service <<SOUDAGE PAR RÉSISTANCE>>, édition 2016
- [28] : soudage à l'arc électrique << <http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.acstrasbourg.fr/HUMEZ/ASSEMBLAGE/Soudagearc.htm>>>, avril 2019
- [29] : Klas Weman , <<PROCÉDÉS DE SOUDAGE >>, Duodi, Paris, 2012
- [30] : D. Dangoise, D. Hennequin et V. Zahlé, "*Les laser*"; Duodi, Paris (2004)
- [31] : A. Belhadj; thèse de doctorat: "*Contribution é l'étude expérimentale et numérique du soudage laser: application aux alliages de magnésium*"; École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers France (2009)
- [32] : <http://www.sdservice.fr/Recapitulatif-procedes-soudage.pdf>
- [33] : <https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2018/11/guide-multipreventionsoudage-coupage.pdf>

Référence

[34] : < Monique Beausoleil, D.S.C. Maisonneuve-Roseront > FUWFES DE SOUDAGE: Juin 1988

[35] : < D.DAZINIÈRE><Formation au soudage à l'arc électrique à l'électrode enrobée>
< Exercice Pédagogique Soudage 111 – CFAI Aquitaine 2016
REPRODUCTION INTERDITE>

[36] : < Cours sur le soudage à l'arc électrode enrobée > <https://www.rocdacier.com/cours-soudage-arc-electrode-enrobee/>.

[37] : R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979

[38] : Site Internet :5

[http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+](http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+so)

[des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+so](http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+so)

[usager.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base &ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a](http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+so)Fichier pratique de scruté ED83 3E Edition.

Septembre2099

[39] : SAADALLAH MESSAUDA (Etude des assemblages soudés manuellement par procédé électrique tôles en acier) ; Université de M'sila 2013.

[41] : J. Kieffer, A. Iarozinsky ; « Méthode des unités d'effort de Production », Méthodes et Outils Informatiques pour la Valorisation des Temps en Coûts, Université de Marseille ,1994.

[42] : Roland Caze, 'Technique de l'ingénieur', traité génie mécanique, B7730

[43]: Prof. Dr. Sc. Techno. Peter Seyffarth: Warmausbeeitug brim Schweiben Wilhelm – Peck understaete Rostock 2 LEHRBRIEF.Ed 1980

[44] : Le guide des formations 2016 (institut de soudure industriel) Fiches de contrat. Procédé 111 : Arc manuel à l'électrode enrobée

[45] : La boutique du soudeur (porte-électrodes-pince-200amp-gays)

[46] : pince-pour-cable-de-demarrage-en-laiton-isolant-rouge-jusqu-a-700 ampereutiland

[47] : La boutique du soudeur (câble-soudure-50-mm-vendu-mètre)

[48] : Cours pour apprendre la soudure et la chaudronnerie

[392] PUBLIÉ LE 15 AOÛT 2017 PAR ROCDACIER [28 377 VUES]

<https://www.rocdacier.com/soudage-mig-mag-semi-automatique-gmaw/>

[49] : < soudure Mig Mag>

><http://mai.manosque.free.fr/Pages/Rendu/Soudage/Soudage%20MIG%20MAG/page%201.html>

Référence

- [50] : BARKAT YASSINE : Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines
Mémoire de mestre en Génie des Procédés ; Université Mohamed Khider – Biskra
- [51] : Rocdacier ; Cour Le soudage MIG MAG, semi-automatique GMAW ; www.rocdacier.com
- [52] : <SERVICE FORMATION-QULIFICATION-ASSISTANCE> <Le soudage Le procède MIG MAG
>www.sdservice.fr
- [53] : Roc acier : Cour Le soudage MIG MAG, semi-automatique GMAW ; www.rocdacier.com [486]
publié le 15 août 2017 par roc acier [80 626 vues]
- [54] : <SERVICE FORMATION-QULIFICATION-ASSISTANCE><Le soudage Le procède MIG MAG
>www.sdservice.fr
- [55] : <BRIGITTE REMACLE> < SOUDAG Electrode Enrobée Mig-MAG tige>FORMATION IFPM
- [56] : <SERVICE FORMATION-QULIFICATION-ASSISTANCE><Le soudage Le procède MIG MAG
>www.sdservice.fr
- [57] : USINOR. " Approche sur la soudabilité métallurgique des aciers", RAPPORT USINOR-JPJ-09/85-438VL.
- [58] : CAVALLO Nathalie "contribution a la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage thèse de doctorat Lyon 1998
- [59] : H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995. Granjon, H. (1995). Bases métallurgiques de soudage>>. 2ème édition. Publication du soudage et de ses applications. *Paris*.
- [60] : W.Kurz, J.P.Mercier, Introduction à la science des Matériaux, 1991
- [61] : [12/25] Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spéculs, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009)
- [62] : C.LEYMONIE, R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988 H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995
- [63] : R. VARISELLAZ. Soudage élément de conception et de réalisation, Dunda 1987
- [64] : P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988 H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [65] : Ramoulât, Thèse de Doctorat, ENSAM. Paris, (2007).

Référence

[66] : M. Beltsy, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Ellipses, (2006-2007). H.Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Bejaia, (2006).

[67] : Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spéculs, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009).

[68]: P. SMIGIELSKI, F. ALBE, B. DISCHLI, Progress in holographic and inteferometric endoscopy Holographic Int."2, London, 26-29 July, 1992. Procédions SPIE Vol. 1732

[69] : H.Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Bejaïa, (2006).

[12/25] Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spéculs, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009)