

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

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 Productique

Présenté par :

HAFSI Said & BAHACHE Aymen

Thème

Contribution à l'étude des caractéristiques du soudage MIG

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MOUSSAI T	MAA	Président
ROUABHI Yousef	MCB	Encadreur
BENHAMADOUCH Lamia	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Les caractéristiques du soudage MIG a porté sur l'optimisation des paramètres de soudage tels que le courant, la tension, la vitesse d'avance du fil et le débit de gaz protecteur. J'ai examiné l'impact de ces paramètres sur la qualité de la soudure, en mettant l'accent sur la pénétration, la formation de défauts et la stabilité de l'arc. Également étudié les propriétés des différents gaz de protection utilisés et leur influence sur le processus de soudage.

Enfin, j'ai exploré les configurations d'équipement pour améliorer la maniabilité de la torche et assurer une alimentation régulière du fil-électrode. L'objectif de contribution était d'améliorer la qualité, la durabilité et l'efficacité du soudage MIG, en fournissant des informations précieuses pour les professionnels de l'industrie et en favorisant des applications plus fiables dans divers secteurs.

Abstract

The characteristics of MIG welding has focused on the optimization of welding parameters such as current, voltage, wire feed speed and protective gas flow. I examined the impact of these parameters on the weld quality, focusing on penetration, defect formation and arc stability. Also studied the properties of the various protective gases used and their influence on the welding process.

Finally, I explored equipment configurations to improve the handling of the torch and ensure a regular supply of the wire electrode. The objective of the contribution was to improve the quality, durability and efficiency of MIG welding, providing valuable information for industry professionals and promoting more reliable applications in various sectors.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

En premier lieu ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour notre éducation et notre bien-être à nos parents qui se sont sacrifiés pour nous prendre en charge tout au long de notre formation et qui sont l'origine de notre réussite que dieu les garde et les protèges.

Tous nos enseignants, notre équipe d'enseignement et tout le département de génie mécanique pour obtenir l'aide qu'ils ont toujours fournie aux étudiants.

Toute personne de près ou de loin a contribué à notre éducation.

BAHACHE Aymen.

Dédicaces

Ce travail modeste est dédié :

*A nos chers parents tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur*

Soutien et leurs prières tout au long de nos études.

*A nos chers frères et sœurs pour leurs appuis et leurs
encouragements.*

*A toute la famille pour leurs soutiens tout au long de nos
parcours Universitaire.*

*A tous nos proches, nos amis et nos collègues de l'Université
de M'SILA.*

*Et à tous ce qui nous ont enseignés tout le long de notre
parcours.*

Merci

HAFSI Said.

Remerciements

El hamdou li Allah

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la volonté, la santé, et la patience durant toutes ces années, pour accomplir ce travail. Nous remercions sincèrement Monsieur : **Rouabhi Yousef** pour ses aides, sa gentillesse, ses encouragements et ses conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce travail. Nous remercions également tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail. Nous remercions tous les enseignants du département mécanique de l'Université de M'SILA.*

Enfin, nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours été de notre côté au cours de la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

Liste d'abréviations	v
Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	vii
Introduction Générale	01

Chapitre I : Généralité sur le soudage

I.1 Introduction	03
I.2 Historique de Soudage	03
I.3 Procédés de Soudage	04
I.3.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique	04
I.3.1.1. Soudage à la flamme	05
I.3.1.2. Soudage à l'arc	06
a. Le soudage avec électrode enrobées	07
b. Le soudage avec électrode réfractaire TIG	08
c. Le soudage semi-automatique sous protection MIG;MAG	09
d. Soudage plasma	10
e. Le soudage vertical sous laitier.	11
I.3.1.3. Soudage aluminothermique	11
I.3.1.4. Soudage par faisceau à haute densité d'énergie	12
a. Soudage par faisceau d'électrons	12
b. Soudage par faisceau Laser	12
I.3.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique	13
I.3.2.1. Soudage par point	14
I.3.2.2. Soudage à la molette	15
I.3.2.3. Soudage par bossages	15
I.3.2.4. Soudage en bout par étincelage	16
I.3.3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique	17
I.3.3.1. Soudage par diffusion	17
I.3.3.2. Soudage par friction	18
I.3.4. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage	19
I.3.4.1. Soudage par ultrasons	19
I.3.4.2. Soudage par explosion	19
I.4. Avantages et inconvénients des procédés de soudage et domaine d'application	21

I.4.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique	21
I.4.1.1.Soudage à la flamme	21
I.4.1.2.Soudage à l'arc	21
I.4.1.3.Soudage aluminothermique	23
I.4.1.4.Procédés par faisceau à haute densité d'énergie	24
I.4.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique	25
I.4.3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique	26
I.4.4. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage	28
I.5. Conclusion	29

Chapitre II : Les matériaux pour soudage

II.1. Introduction	31
II.2. La soudure de l'acier	31
II.2.1. Définition de l'acier	31
II.2.2. Les composants des aciers	32
II.2.3. Fabrication de l'acier	32
II.2.4. Classification des aciers	33
II.2.4.1. Classification selon leur composition chimique	33
II.2.4.2. Classification par le mode d'emploi	35
II.2.5. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers	37
II.2.6. Traitements thermiques des aciers	38
II.2.6.1. Trempe, ou durcissement par trempe	38
II.2.6.2. Revenu	39
II.2.6.3. Recuit	40
II.3. La soudure en acier inoxydable	40
II.3.1. Définition de l'acier inoxydable	40
II.3.2. Composition et structure des aciers inoxydables	41
II.3.3. Fabrication des aciers inoxydables	41
II.3.4. Classification des aciers inoxydables	41
II.3.4.1. Acier ferritique	42
II.3.4.2. Acier austénitique	42
II.3.4.2. Acier martensitique	42
II.3.5. Propriétés et applications des aciers inoxydables	42

II.3.5.1 Propriétés mécaniques	43
II.3.5.2 Propriétés de mise en forme	43
II.3.6. Traitements thermiques des aciers inoxydables	43
II.4. La soudure l'aluminium	44
II.4.1. Définition de l'aluminium	44
II.4.2. Production de l'aluminium	45
II.4.3. Procédés de fabrication de l'aluminium	45
II.4.3.1. La Bauxite	46
II.4.3.2. L'alumine	46
II.4.3.3. L'aluminium	47
II.4.4. Propriétés de l'Aluminium	47
II.4.4.1 Propriétés mécaniques	47
II.4.4.2 Traitements thermiques	48
II.4.5. Les différents domaines d'utilisation	49
II.4.6. Alliages d'aluminium	49

Chapitre III : Les fondamentaux du soudage MIG

III.1. Introduction	51
III.2. Historique du soudage MIG	51
III.3. Terminologie	52
III.4. Définition du soudage MIG/MAG	53
III.5. Principes du procédé de soudage MIG/MAG	53
III.6. Le procédé de soudage MIG/MAG	54
III.6.1. Caractéristiques du soudage semi-automatique MIG/MAG	55
III.6.1.1. Métal d'apport	55
III.6.1.2. Protection gazeuse	56
III.6.1.3. Mise en œuvre	56
III.7. Avantages/Inconvénients du soudage MIG	57
III.8. Les paramètres opératoires du soudage MIG/MAG	57
III.9. Les régimes de transfert du métal dans l'arc	58
III.9.1. Le court-circuit ou short-arc	58
III.9.2. Transfert globulaire (grosse-goutte)	69
III.9.3. Transfert par pulvérisation axiale (spray-arc)	60

III.10. Installation d'un poste MIG-MAG	60
III.11. La torche de soudage	61
III.11.1. Angle de Torche	63
III.12. Domaines d'utilisation	64

Chapitre IV : Méthodes et techniques expérimentales

IV.1. Introduction	66
IV.2. Choix du matériau	66
IV.3. Identification des métaux de base utilisée	66
IV.3.1. Présentation de l'acier E24 (acier noir ST37)	66
IV.3.1.1. Composition chimique en %	67
IV.3.1.2. Les caractéristiques mécaniques	67
IV.3.2. Présentation de l'acier à haute résistance (Hardox 450)	68
IV.3.3. Présentation de l'acier inoxydable (310S)	69
IV.4. Présentation du métal d'apport (fils pour soudage MIG ER70S-6)	70
IV.5. Réalisation des plaques de liaisons acier E24 (acier noir ST37)/ acier à haute résistance (Hardox450) /acier inoxydable (310S)	71
IV.5.1. Préparation des éprouvettes pour le soudage	72
IV.6. Matériel de soudage	74
IV.7. Les paramètre de soudage	76
IV.7.1. Soudage deux parties du même matériau (soudage homogène)	76
IV.7.2. Soudage deux parties du différent matériau (soudage hétérogène)	80
IV.8. CONCLUSION GENERALE	81
RÉFÉRENCES	82

LISTE D'ABREVIATIONS

ZF	Zone Fondu
ZAT	Zone Affecté Thermiquement.
MB	Métal de Base
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternative
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soudage à l'arc avec électrode enrobée)
TIG	Tungsten Inert Gas
GTAW	Gas Tungsten arc welding (Soudage à l'arc avec électrode réfractaire)
GMAW	Gas Metal Arc Welding (Le soudage MIG-MAG)
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
CND	Contrôle Non-Destructif
CD	Contrôle Destructif
PT	Pénétrant Test
FT	Fluorescent Test
RT	Radiographies Test
Rm	Résistance mécanique
Re	Résistance élastique
A%	Allongement
C	Carbone
Si	Silicium
Mn	Manganèse
S	Soufre
P	Phosphore
N	Azote
Cu	Cuivre

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1	Transformateur de Thomson pour le soudage électrique par résistance.....	3
Figure I.2	Soudage oxyacétylénique [7].....	5
Figure I.3	Matériel propre au soudage oxyacétylénique [8]	6
Figure I.4	Zones de la flamme [9].....	6
Figure I.5	Soudage à l'arc avec électrode enrobé [11].....	7
Figure I.6	Electrode enrobée durant le soudage [12].....	8
Figure I.7	Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) [14].....	9
Figure I.8	Soudage MIG / MAG [16].....	9
Figure I.9	Soudage plasma [19].....	10
Figure I.10	Soudage vertical sous laitier [21].....	11
Figure I.11	Soudage par faisceau d'électron [22].....	12
Figure I.12	Soudage par faisceau Laser [24].....	13
Figure I.13	Soudage en bout par étincelage [26].....	14
Figure I.14	Soudage à la molette [27].....	15
Figure I.15	Soudage par bossage [28].....	16
Figure I.16	Soudage en bout par étincelage [30].....	17
Figure I.17	Soudage par friction en rotation [32].....	18
Figure I.18	Soudage par friction malaxage [33].....	19
Figure I.19	Soudage par explosion [35].....	20

Chapitre II

Figure II.1	Mailles élémentaires des structures cristallines : CC et C.F.C.....	32
Figure II.2	Principales classes d'acier.....	36
Figure II.3	Désignation des aciers.....	37
Figure II.4	Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier	39
Figure II.5	Schéma représentatif d'un acier inoxydable.....	41
Figure II.6	La forme cristalline de l'Aluminium.....	45
Figure II.7	Procédés de fabrication de l'aluminium.....	45
Figure II.8	Principale source de l'Aluminium : La bauxite.....	46
Figure II.9	Procédé Bayer pour l'obtention de l'alumine [56].....	46
Figure II.10	Schéma représentatif Fabrication de l'aluminium.....	47
Figure II.11	Cuve d'électrolyse.....	47

Chapitre III

Figure III.1	Présentation du soudage MIG.....	52
Figure III.2	Courbe de procédés de soudage en Europe de l'Ouest, entre 1975 et 2000.....	53
Figure III.3	Soudage MIG-MAG [5].....	54
Figure III.4	Principes du procédé MIG/MAG.....	55
Figure III.5	Installation de soudage MIG [8].....	56
Figure III.6	Bobines de file de soudage Mig-Mag [11].....	56
Figure III.7	Gaz utilisés pour le soudage Mig-Mag [13].....	57
Figure III.8	Transfert par court-circuit [17].....	60
Figure III.9	Cordon en court-circuit.....	60
Figure III.10	Transfert Grosse Goutte [17].....	60
Figure III.11	Cordon en transfert globulaire.....	61
Figure III.12	Transfert par pulvérisation axiale [17].....	61
Figure III.13	Cordon en pulvérisation axiale.....	61
Figure III.14	La torche de soudage Mig-Mag.....	62
Figure III.15	Buse de sortie de gaz.....	63
Figure III.16	Soudage en tirant ou poussant.....	64
Figure III.17	Angle de la torche.....	65

Chapitre IV

Figure IV.1	Métal d'apport	71
Figure IV.2	Matière première prélevé.	73
Figure IV.3	Métal de base en tôles découpes	73
Figure IV.4	Scie tronçonneuse	73
Figure IV.5	Le croquis du chanfrein	74
Figure IV.6	Réalisé par fraisage un chanfrein à 30°.....	74
Figure IV.7	Deux plaquettes acier inoxydable (310S)	74
Figure IV.8	Schéma de principe pour l'assemblage par soudage MIG des deux métaux de base sous forme de tôles fortes de 6 mm d'épaisseur	75
Figure IV.9	Matériel utilisé pour le soudage.....	76
Figure IV.10	Éprouvettes N°1 après soudage	78
Figure IV.11	Éprouvettes N°2 après soudage	79
Figure IV.12	Éprouvettes N°3 après soudage	80
Figure IV.13	La forme de la plaquette soudage différent métallique (après soudage).....	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Procédés du soudage selon ISO 4063.
Tableau II.1	Pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés.
Tableau II.2	Classification des aciers suivant la Teneur en carbone.
Tableau II.3	Composition variable suivant l'emploi.
Tableau II.4	Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables [51].
Tableau II.5	Propriétés mécaniques de l'aluminium coulé et recuit.
Tableau III.1	Les différents gaz de protection [73].
Tableau III.2	Avantages/Inconvénients du soudage MIG [75]
Tableau IV.1	Composition chimique de l'acier E24.
Tableau IV.2	Caractéristiques mécaniques de l'acier de base E24.
Tableau IV.3	Composition chimique de l'acier Hardox 450.
Tableau IV.4	Caractéristiques mécaniques d'acier à haute résistance (Hardox 450).
Tableau IV.5	Composition chimique d'acier inoxydable (310S).
Tableau IV.6	Caractéristiques mécaniques d'acier inoxydable (310S).
Tableau IV.7	Composition chimique du métal d'apport.
Tableau IV.8	Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon AFNOR).
Tableau IV.9	Paramètres de l'intensité soudage Mig en même type d'acier E24 (st37).
Tableau IV.10	Paramètres de l'intensité soudage Mig en même type d'acier Hardox 450.
Tableau IV.11	Paramètres de l'intensité soudage Mig en même type d'acier inoxydable (310S).
Tableau IV.12	Paramètres de l'intensité soudage Mig du Différent matériau.

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le soudage est un outil d'assemblage permanent non démontable. Aussi, c'est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre la partie à assembler. 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 [1].

Il fait partie de la construction mécanique, cela signifie qu'il est très vaste et que les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité. Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique, dans la majorité des cas, elle est obtenue par la fusion locale, par déformation ou par diffusion.

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant les caractéristiques des matériaux à assembler, différentes sources d'énergies sont utilisées pour réaliser la fusion des éléments à assembler ou du métal d'apport. L'un de ces procédés implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné.

Parmi les procédés de soudage les plus utilisés et les plus courants de notre époque : le soudage MIG-MAG sous protection contre les gaz inertes. Pour ce procédé, un arc électrique est créé entre le fil de soudage et le fil de remplissage. Lorsque l'arc est obtenu, ce fil d'entrée vire à vitesse constante dans le bain de fusion résultant de la forte énergie de cet arc. Le câble de soudage est obtenu en mélangeant le métal de remplissage avec le métal de base fondu. Ce procédé est effectué sous protection active ou inerte. Les paramètres affectant la perception du câble sont : intensité du courant; débit de gaz; diamètre du fil d'électrode; mode de soudage; matériaux à souder.

Le but de la contribution à l'étude des caractéristiques du soudage MIG est d'approfondir la compréhension de ce processus de soudage spécifique et d'identifier les facteurs clés qui influencent la qualité et les performances des soudures réalisées par cette méthode. En étudiant de manière approfondie les paramètres du soudage MIG tels que le courant, la tension, la vitesse d'alimentation du fil et le gaz de protection, l'objectif est d'établir des relations entre ces paramètres et les caractéristiques des soudures obtenues.

Notre mission est de maîtriser le processus de soudage MIG (Métal Inert Gas) et d'améliorer ces paramètres, ainsi que de caractériser l'association bimétallique néanmoins obtenue en variant les paramètres de soudage à chaque fois.

Ce travail de mémoire sera essentiellement structuré en quatre chapitres:

- ❖ **Chapitre I**, consacré à l'étude générale sur le soudage.
- ❖ **Chapitre II**, matériaux de soudage.
- ❖ **Chapitre III**, Étude approfondie des principes fondamentaux du soudage MIG.
- ❖ **Chapitre IV**, Méthodes et techniques expérimentales.

En fin de compte, il aura une conclusion, présentée à la fin du résumé, qui résumera la majeure partie des conclusions tirées au cours de ces travaux.

Chapitre I

Généralité sur le soudage

I.1. Introduction

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le Plus répondu dans la plupart des domaines industrielles (transporte, industrie pétrolier Et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.).

Le soudage est un assemblage permanent non démontable, son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables [2].

Dans ce chapitre présente des notions générales sur le soudage et explique les différents types d'assemblage et procédés.

I.2. Historique de Soudage

Le soudage est né à la fin du 19ème siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance.

D'autres procédés sont arrivés ensuite et le 20ème siècle a vu la naissance du soudage par Laser est aussi :

- Le soudage avec électrode de carbone: Bernardos ET Olszewski; Russie.
- Le soudage avec électrode fusible nue: Slavianov; Russie.
- Le soudage avec électrode enrobée: Kjell berg; Suède.
- Le soudage par résistance: Thompson; USA (Voir la figure I.1).
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard ; France.

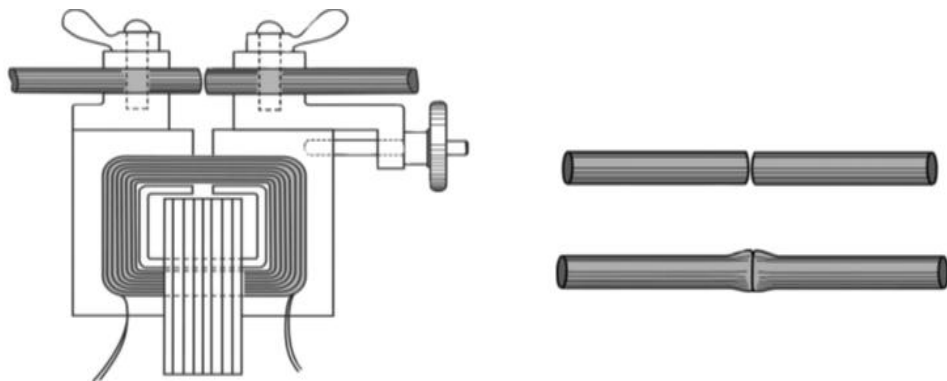


Fig.I.1 Transformateur de Thomson pour le soudage électrique par résistance.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre). L'introduction massive du Soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile. Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- Le soudage avec électrode de tungstène: 1924 – USA.
- Le soudage sous flux: 1935 – USA.
- Le soudage vertical sous laitier: 1950 – URSS.
- Le soudage sous la protection gazeuse: 1950 –1960.
- Le soudage avec fils fourrés: 1950 –1960.
- Le soudage par explosion: 1950-1960.
- Le soudage par bombardement électronique: 1956 – France.
- Le soudage par laser: 1965. [3].

I.3. Procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques.

Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont des types chimiques, électriques, ou mécaniques. [4].

Ces procédés sont classés ici selon [5] :

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

I.3.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique

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

- Le soudage à la flamme.
- Le soudage à l'arc.

- Le soudage aluminothermique.
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie.

I.3.1.1. Soudage à la flamme

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO 4063) est connue par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène O_2) et un gaz combustible (généralement l'acétylène C_2H_2), en créant une flamme qui peut atteindre une température situé entre $2850^{\circ}C$ et $3200^{\circ}C$ à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré [6].

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion. (Figure I.2).

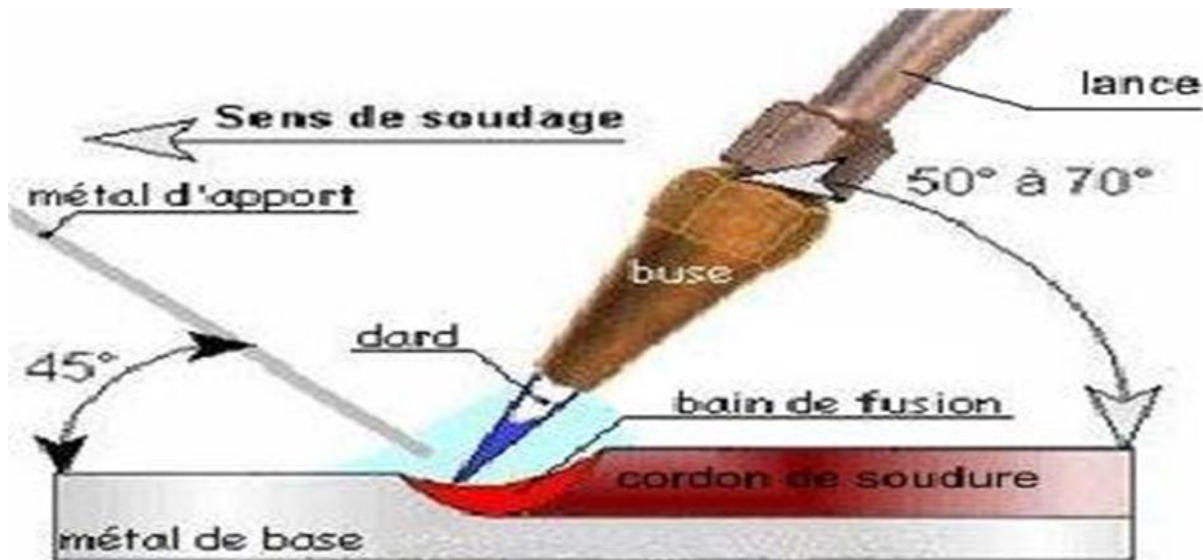


Fig.I.2 Soudage oxyacétylénique [7].

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement. Le soudage O.A est limitée pour les pièces de faible épaisseur environ de 5mm. Le détail du matériel mise en disposition pour effectuer ce type de soudage est illustré dans (la Figure I.3) :

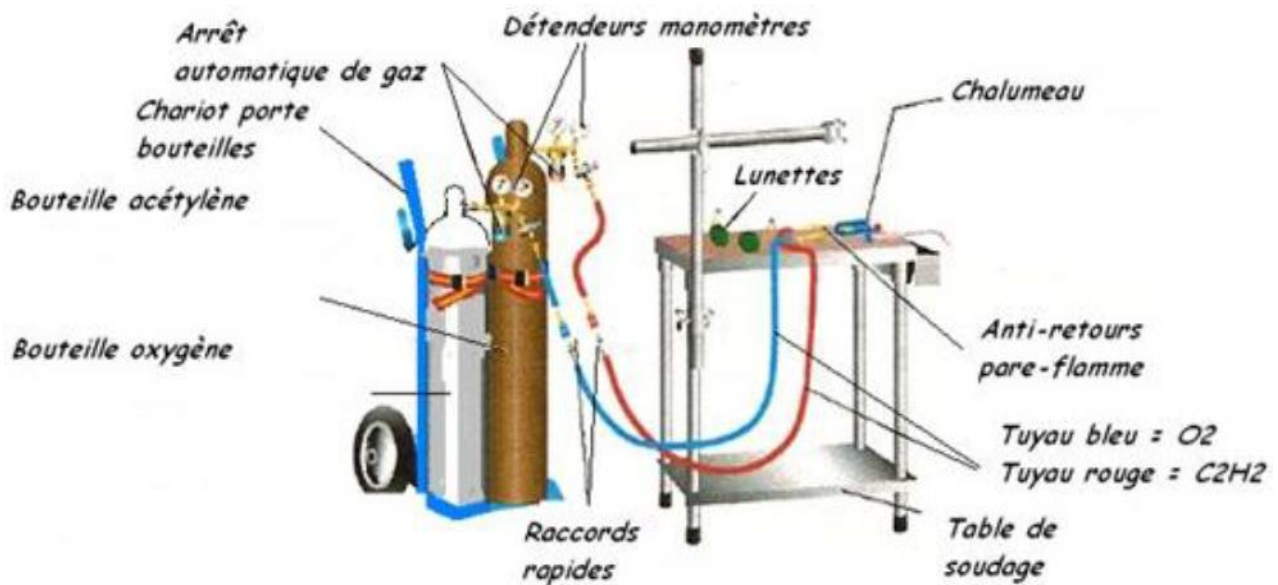


Fig.I.3 Matériel propre au soudage oxyacétylénique [8].

Après avoir le mélange entre l'acétylène et l'oxygène par l'intermédiaire du chalumeau, la flamme produite comporte trois zones consécutives (Voir la figure I.4) :

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

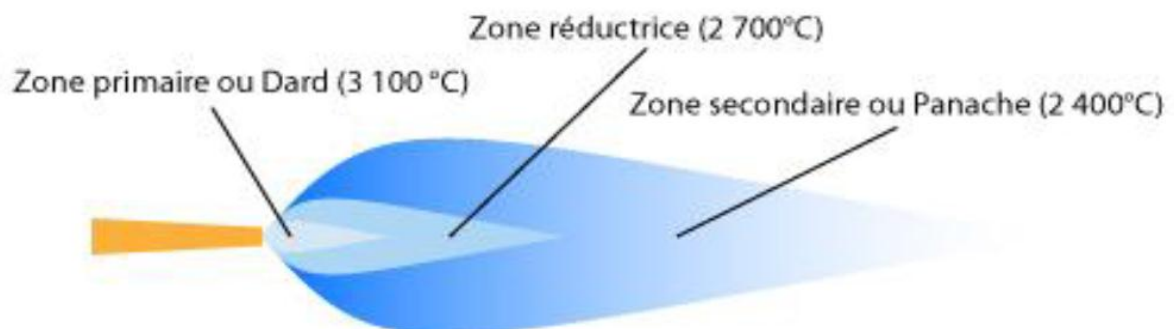


Fig.I.4 Zones de la flamme [9].

I.3.1.2. Soudage à l'arc

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

La formation du bain de métal fondu est assurée par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternatif qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques

Mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder, cette fusion assure la liaison après le refroidissement des éléments entre eux.

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

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

- a. Le soudage avec électrode enrobées;
- b. Le soudage avec électrode réfractaire TIG;
- c. Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG;
- d. Soudage plasma;
- e. Le soudage vertical sous laitier;

a. Soudage à l'arc avec électrode enrobé

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE) (procédé 111 selon l'ISO 4063) est réalisé à partir d'une source de chaleur engendrée par un arc électrique entre l'âme métallique de l'électrode [10], (où son diamètre est compris entre 1mm et 10mm et de longueur d'environ 400mm) et les pièces à souder (Voir la figure I.5).

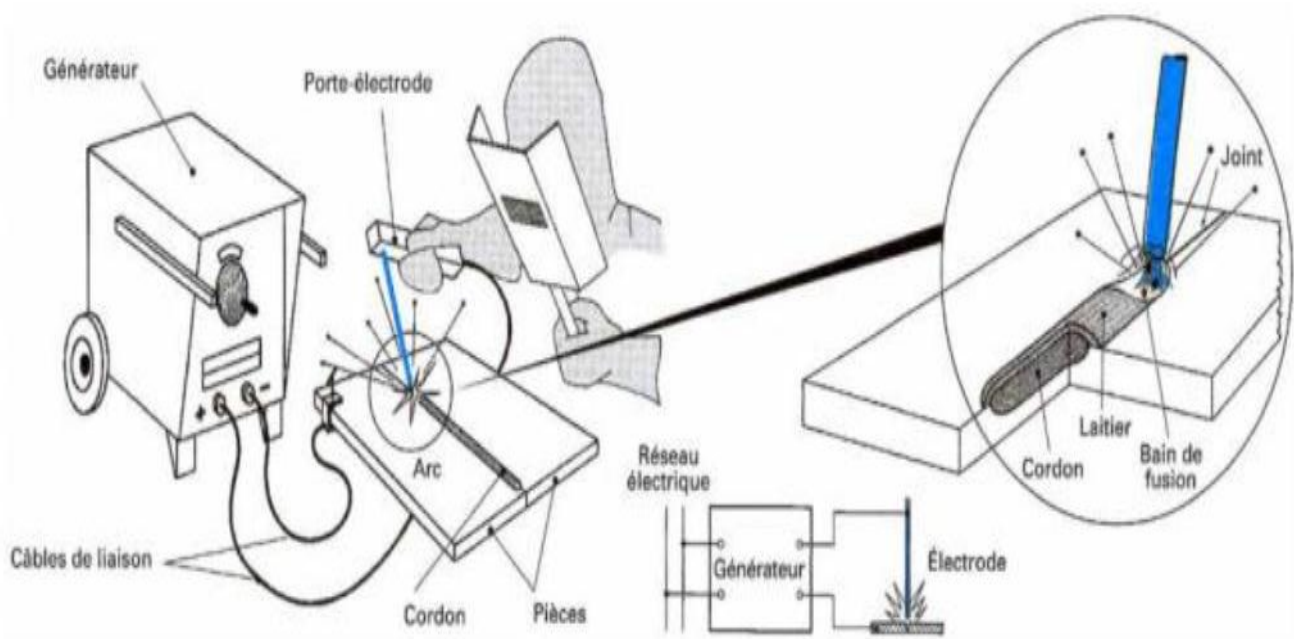


Fig.I.5 Soudage à l'arc avec électrode enrobé [11].

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

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

L'enrobage : partie extérieur adhérent à l'âme qui dépose lors de sa fusion un laitier protecteur contre l'action de l'air ambiant, son rôle est d'assurer la stabilité et la continuité de l'arc et d'apporter les éléments chimiques d'addition nécessaires pour la formation de bain du métal fondu. (Voir la figure I.6).

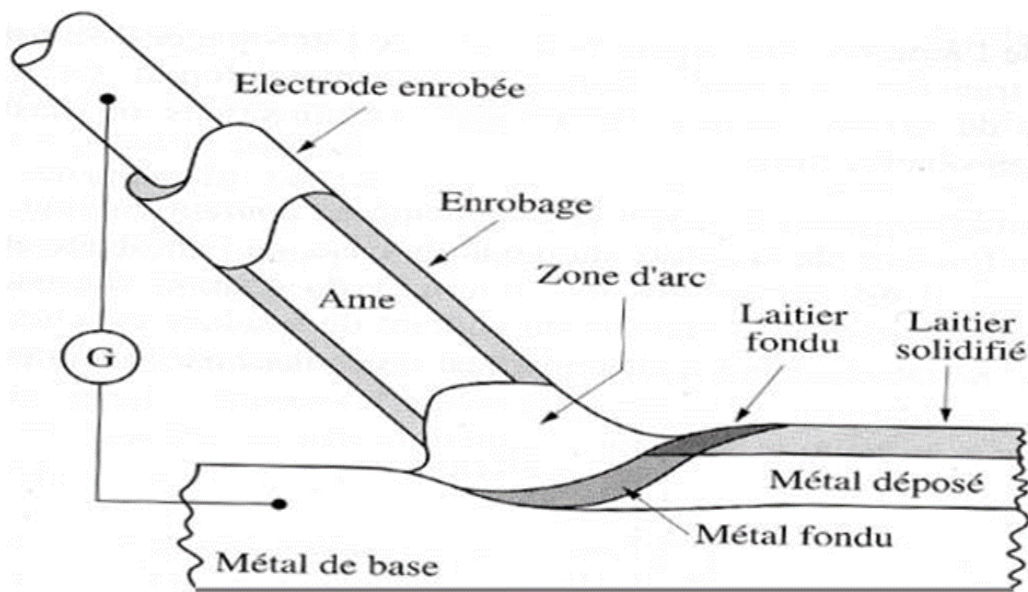


Fig.I.6 Electrode enrobée durant le soudage [12].

b. Soudage avec électrode réfractaire TIG

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

La fusion du métal d'apport à souder est obtenue par la formation d'un arc électrique entre une électrode inconsommable (diamètre ente 1mm et 4mm [13]) fabriquée à l'aide d'un métal à très haut point de fusion (le tungstène) et les pièces à souder avec la mise en place une protection gazeuse (soit l'argon ou l'hélium soit des mélanges entre eux), (Voir la figure I.7).

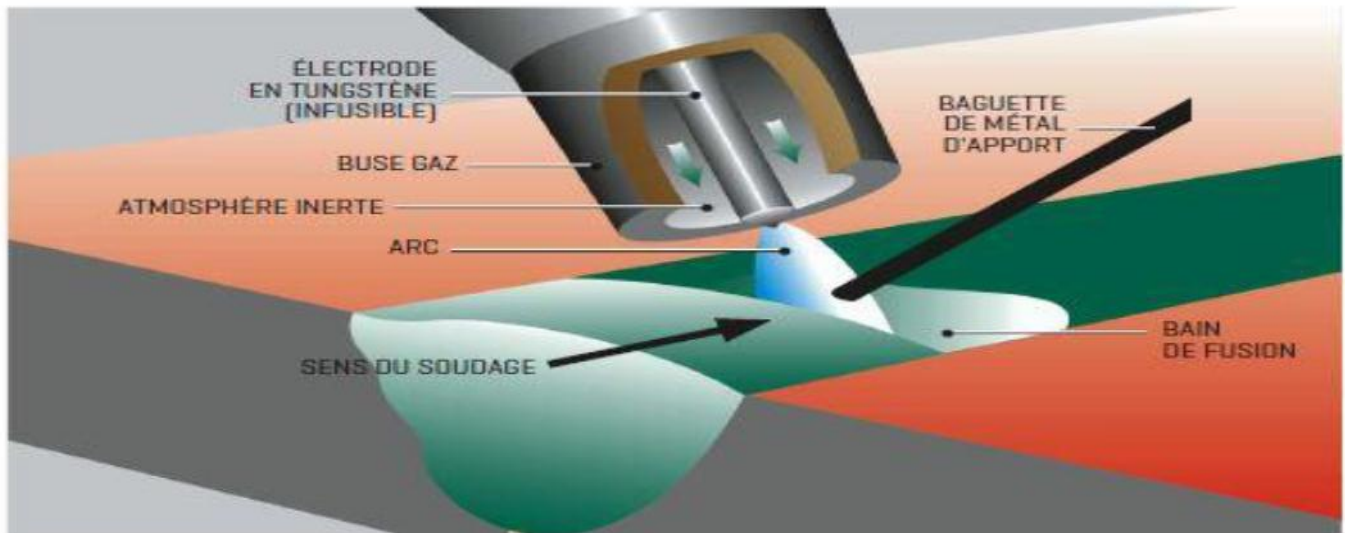


Fig.I.7 Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) [14].

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

Le procédé de soudage MIG/MAG (procédé 131/135 selon l'ISO 4063) consiste à créer un arc électrique en courant continu entre un fil fusible (environ 0.5mm à 2.4mm de diamètre [15]) provenant d'une bobine et les pièces à souder, tout en protégeant l'arc et le bain de fusion par une atmosphère protectrice gazeuse. Cette atmosphère peut être inerte (Argon) ou active (CO₂ ou un mélange Argon/CO₂) (Voir la figure I.8).

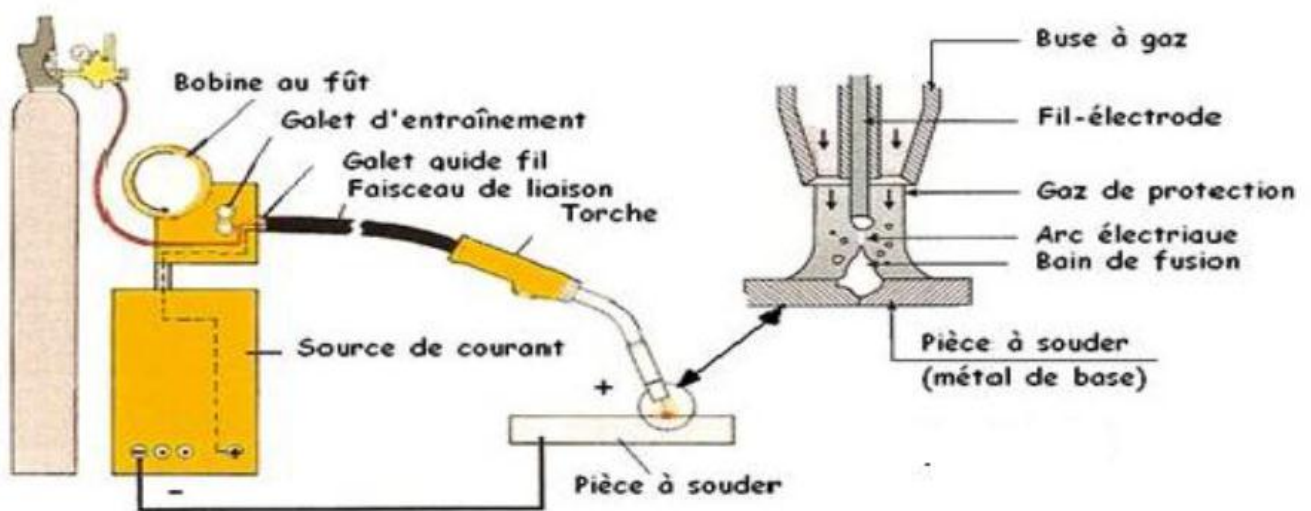


Fig.I.8 Soudage MIG / MAG [16].

d. Soudage plasma

Considéré comme une évolution du soudage TIG (Voir la figure I.9), destiné pour le soudage bord à bord des tôles et des tubes dont l'épaisseur est inférieur ou égale à 8mm (procédé 15 selon l'ISO 4063).

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

Un gaz additionnel protège le bain de fusion des influences atmosphériques. Le procédé plasma requiert un gaz plasmagène et un gaz de protection. Le plasma permet d'atteindre une température de 15000 °C et il est très fortement accéléré par le passage dans la tuyère. Le terme plasma est utilisé lorsque l'arc n'est plus composé d'atomes et de molécules, mais d'ions et d'électrons [17-18].

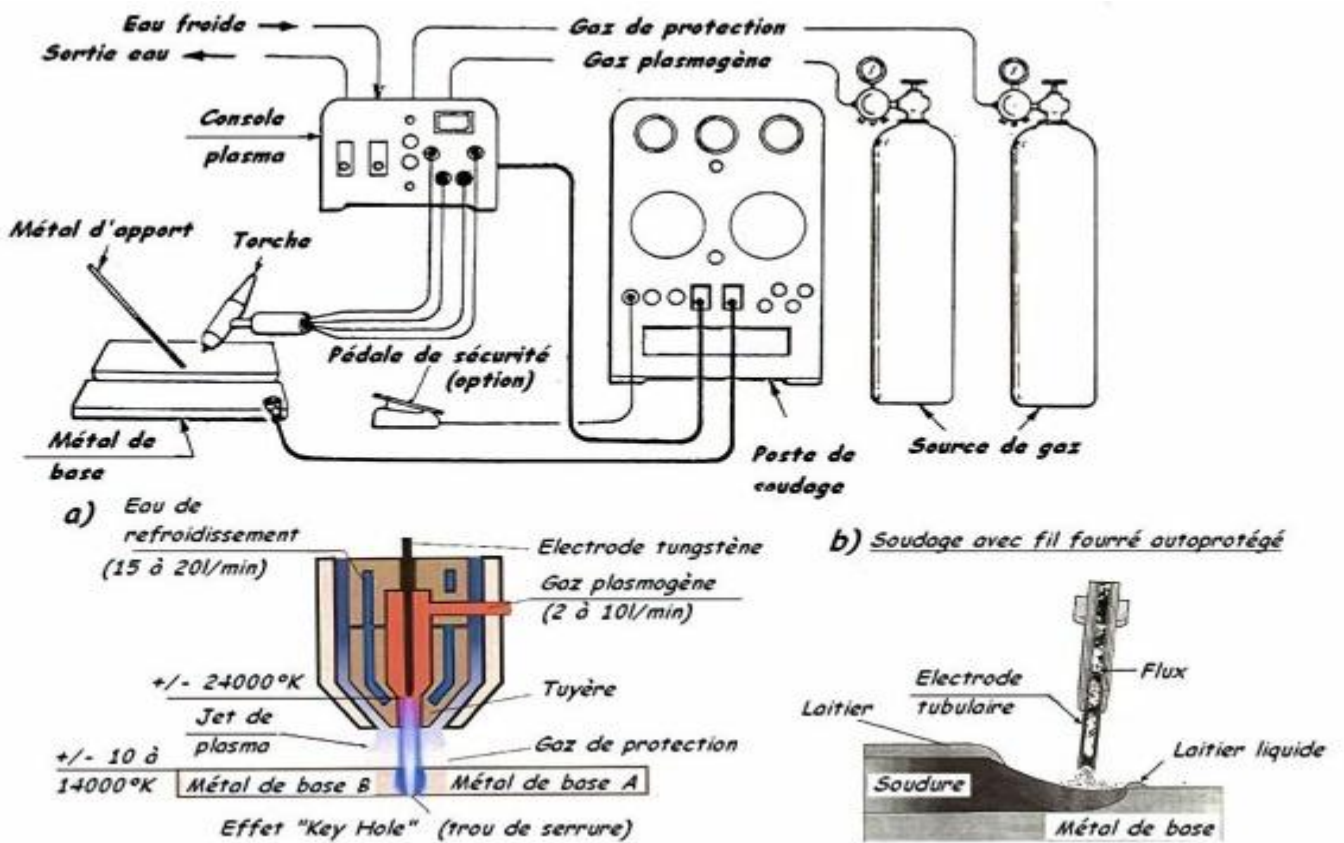


Fig.I.9 Soudage plasma [19].

e. Soudage vertical sous laitier

Dans ce procédé le bain de métal fondu est formé dans un moule parallélépipède vertical créé entre les deux pièces à souder dont leur épaisseur est supérieure à 25 mm et recouvert par deux patins en cuivre (refroidis par la circulation d'eau) [20].

Le soudage progresse verticalement de bas en haut par la fusion de métal d'apport (fil d'électrode fusible guidé) à partir de l'amorçage d'un arc électrique entre ce fil d'électrode et une latte qui ferme le bas du moule (Voir la figure I.10).

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

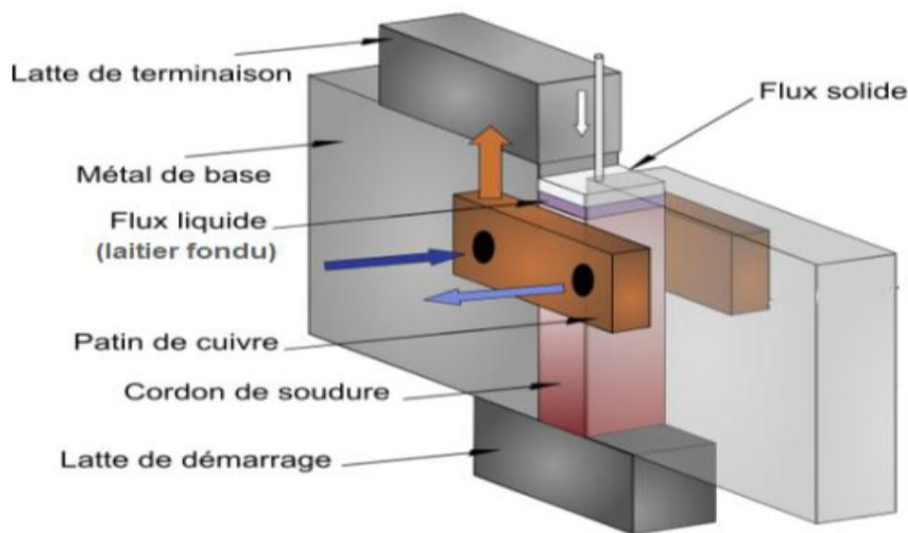


Fig.I.10 Soudage vertical sous laitier [21].

I.3.1.3. Soudage aluminothermique

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

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

I.3.1.4. Soudage par faisceau à haute densité d'énergie

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

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

a. Soudage par faisceau d'électrons

Est un procédé de soudage par fusion utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec les pièces à assembler où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis à forte vitesse et accélérés dans le vide par un canon à électrons. (Figure I.11).

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

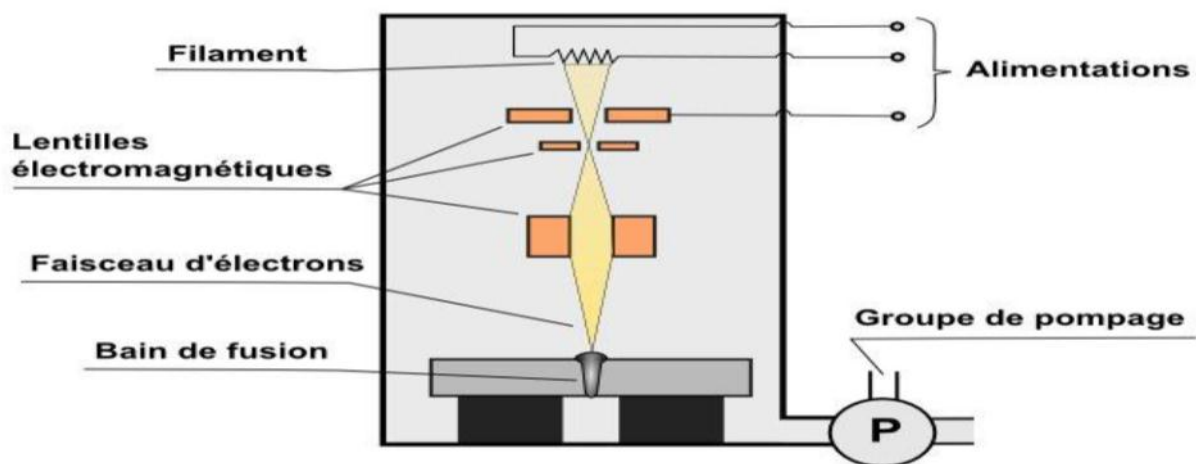


Fig.I.11 Soudage par faisceau d'électron [22].

b. Soudage par faisceau Laser

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

Une opération de soudage par laser (Figure I.12), se conduit au moyen d'une machine automatique ou d'un robot. La démarche est similaire à celle du soudage automatique par fusion à l'arc TIG/plasma ou par faisceau d'électrons avec les particularités suivantes [23]:

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

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

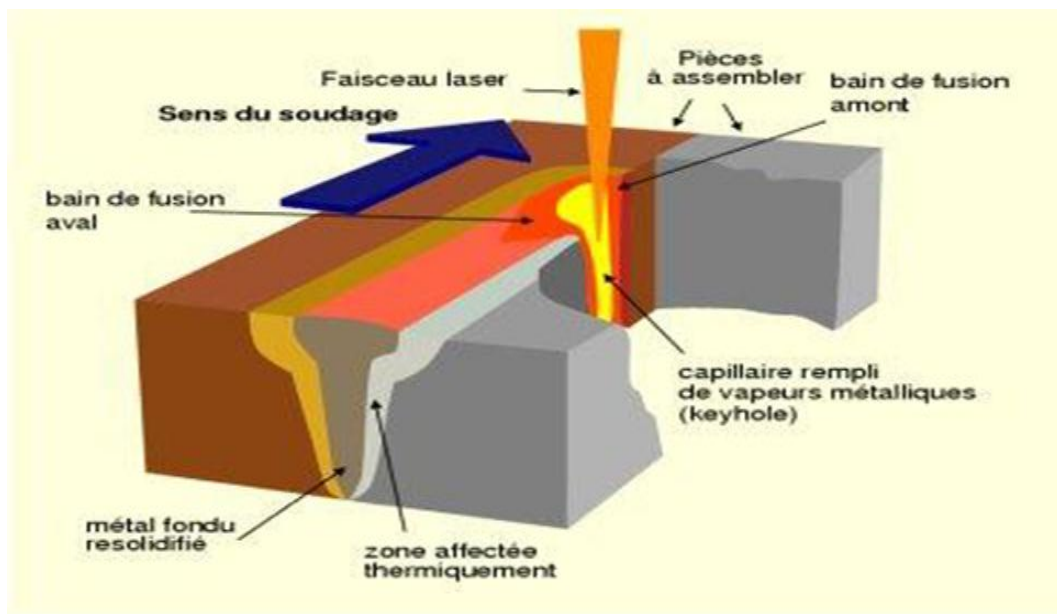


Fig.I.12 Soudage par faisceau Laser [24].

I.3.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique

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

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

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \dots\dots\dots (1.1)$$

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

R : la Résistance en Ohm.

I : intensité en ampère.

t : temps de soudage en millisecondes (très court).

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

Ces procédés sont :

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

I.3.2.1. Soudage par point

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

Les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine (voir la figure I.13). L'action d'une pédale liée à la machine de soudage déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes [25]:

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

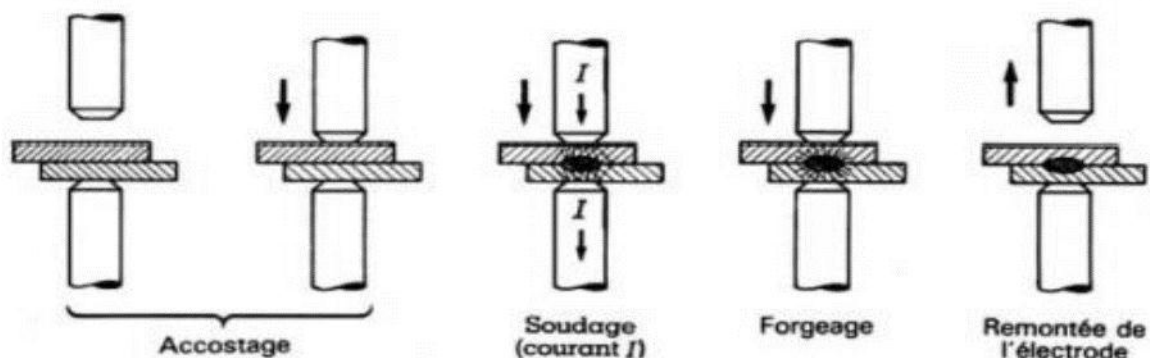


Fig.I.13 Soudage en bout par étincelage [26].

I.3.2.2. Soudage à la molette

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

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

Le cycle de soudage (Voir la figure I.14), comporte des phases similaires à celles du soudage par point :

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

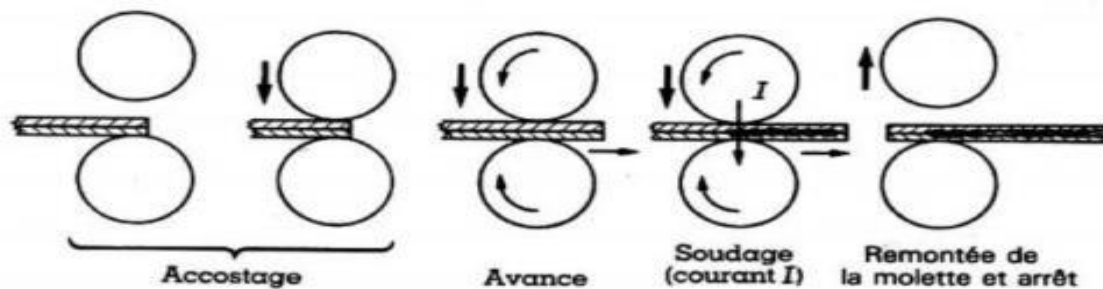


Fig.I.14 Soudage à la molette [27].

I.3.2.3. Soudage par bossages

Le soudage par bossages a le même principe de soudage par points, la différence entre eux c'est que le passage du courant électrique est localisé par des reliefs appelés bossages qui ont été créés sur une seule surface des deux pièces à souder (Figure I.15).

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

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

- **l'accostage** : les deux outillages se serrent sur les pièces préalablement positionnées.

- le soudage : le courant passe et s'accompagne de l'affaissement des bossages.
- le forgeage : à la fin duquel les outillages s'ouvrent.

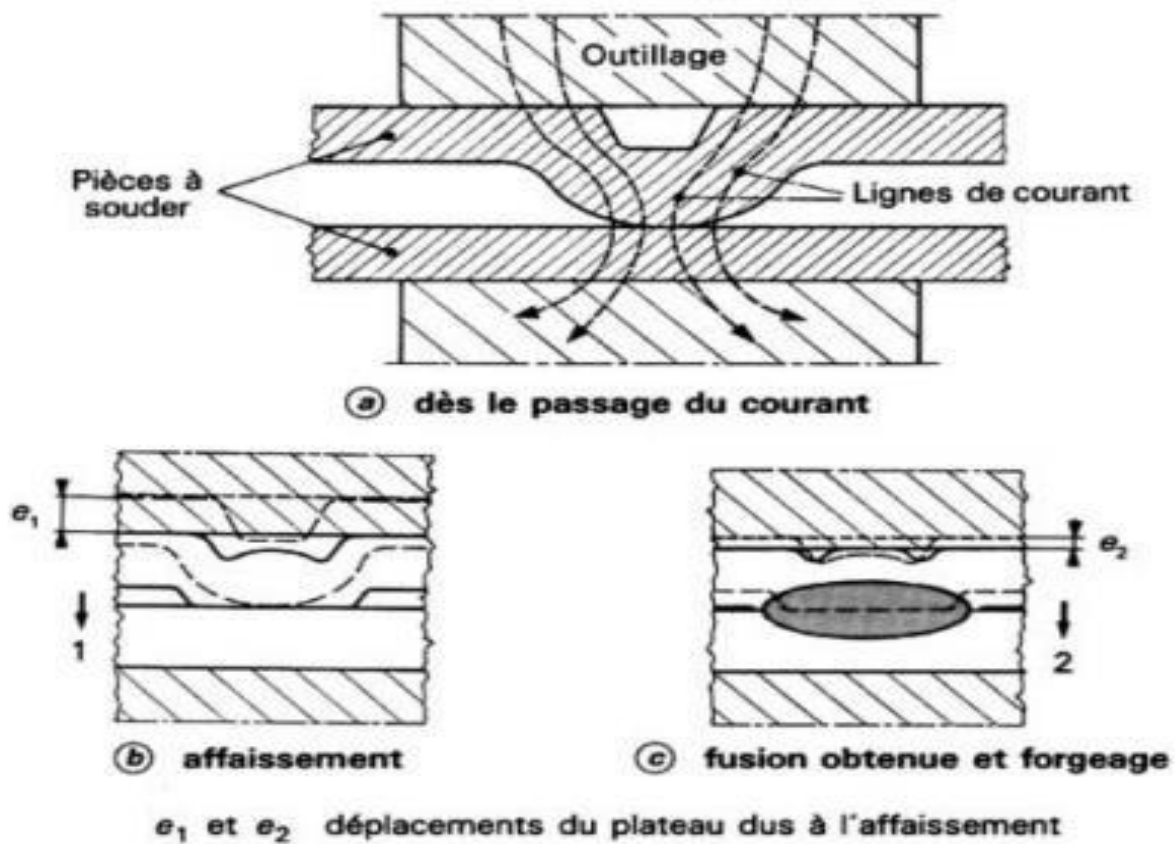


Fig.I.15 Soudage par bossage [28].

I.3.2.4. Soudage en bout par étincelage

Le soudage en bout par étincelage est utilisé pour assembler les pièces (barres, tubes ou autres produits...) où ils ont la même section droite. Les pièces à assembler sont placées en contact dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage (Voir la figure I.16).

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

Le cycle se déroule automatiquement de la façon suivante [29]:

- **avance et accostage** : le chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces qui viennent en contact sous un effort déterminé.

- **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire du circuit de puissance, et porte les parties en contact à la température de soudage.

- **forgeage ou maintien** : exercé par l'effort du chariot mobile et à la fin duquel les mâchoires s'ouvrent en permettant le retour au repos du chariot.

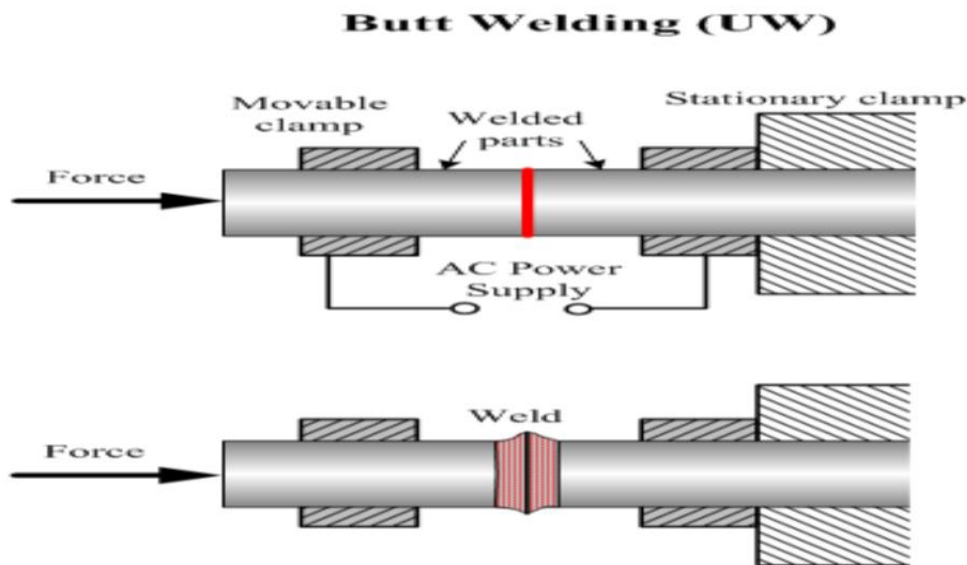


Fig.I.16 Soudage en bout par étincelage [30].

I.3.3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique

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

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques et elles regroupent [31]:

- Le soudage par diffusion.
- Le soudage par friction.

I.3.3.1. Soudage par diffusion

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

I.3.3.2. Soudage par friction

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

Dans le soudage par friction en rotation (Voir la figure I.17), une des deux pièces est en rotation relative par rapport à l'autre. L'application d'un effort axial assure le frottement et donc l'échauffement des extrémités des pièces à souder. Lorsque la température nécessaire est atteinte, la rotation est arrêtée et l'effort axial de forgeage est simultanément augmenté pour former la soudure.

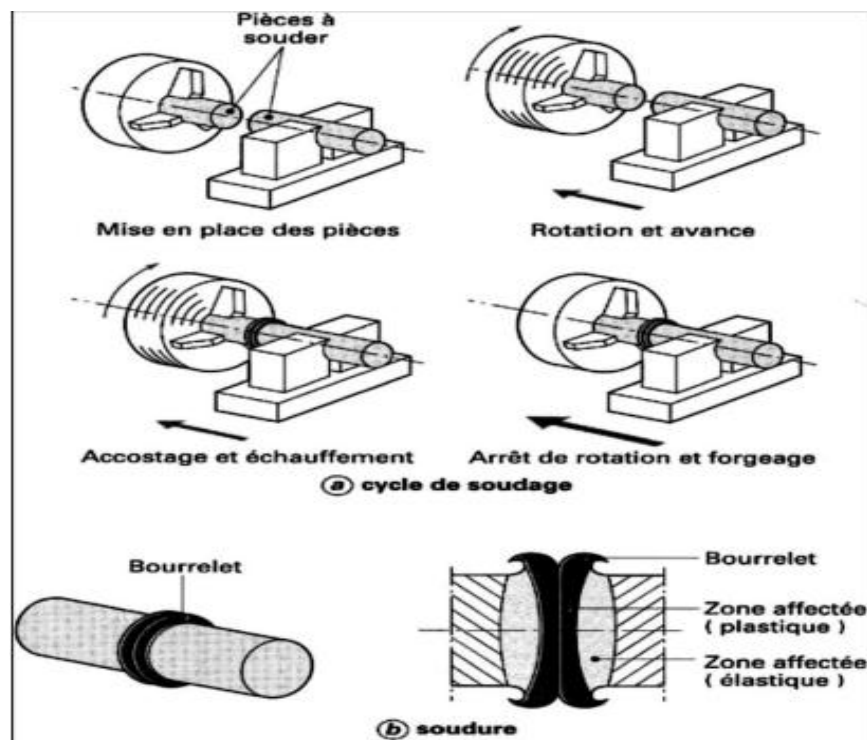


Fig.I.17 Soudage par friction en rotation [32].

Dans soudage par friction malaxage (Voir la figure I.18), un outil rotatif constitué d'une tige profilée et d'un épaulement est enfoncé dans le plan de joint jusqu'à l'épaulement touche les surfaces des deux pièces à souder. Le frottement engendré par la rotation de l'outil provoque un échauffement important et le mouvement de translation de l'outil assure la liaison entre ces deux pièces.

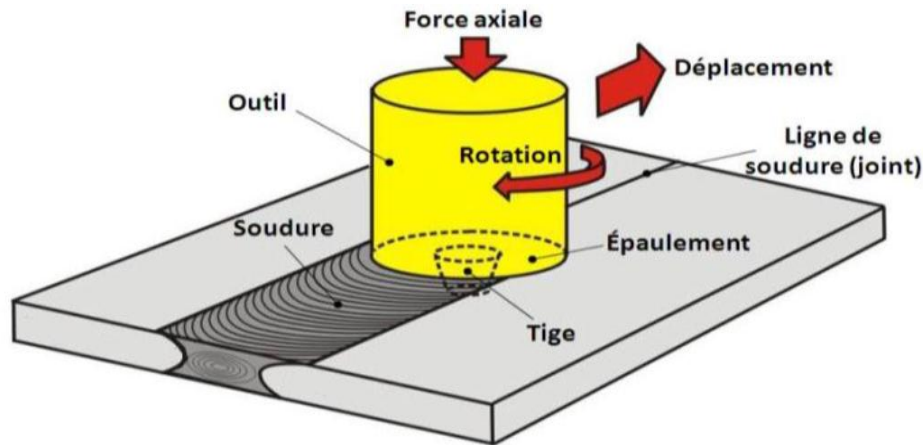


Fig.I.18 Soudage par friction malaxage [33].

I.3.4. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage

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

- Le soudage par ultrason.
- Le soudage par explosion.

I.3.4.1. Soudage par ultrasons

Un procédé voisin du soudage par friction, d'où les pièces à souder sont généralement de 2mm d'épaisseur qui sont placées en recouvrement sous une pression modérée entre une enclume et une sonotrode qui transmet à l'une d'elles des vibrations ultrasonores à haut fréquence (de 20 à 100 kHz) parallèles à la surface de contact [34].

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

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

I.3.4.2. Soudage par explosion

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

L'explosif est placé sur une plaque ou une tôle supérieure (métal de recouvrement) qui est elle-même placée à une certaine distance de la pièce de base sur laquelle la tôle va être soudée (Voir la

Figure I.19), lors de l'explosion (commander par un détendeur) l'onde de choc se propage à travers la tôle et provoque une injection violente de métal de recouvrement ce qui permet de établir la liaison dans toute la surface entre ces deux pièces (procédé 441 selon l'ISO 4063).

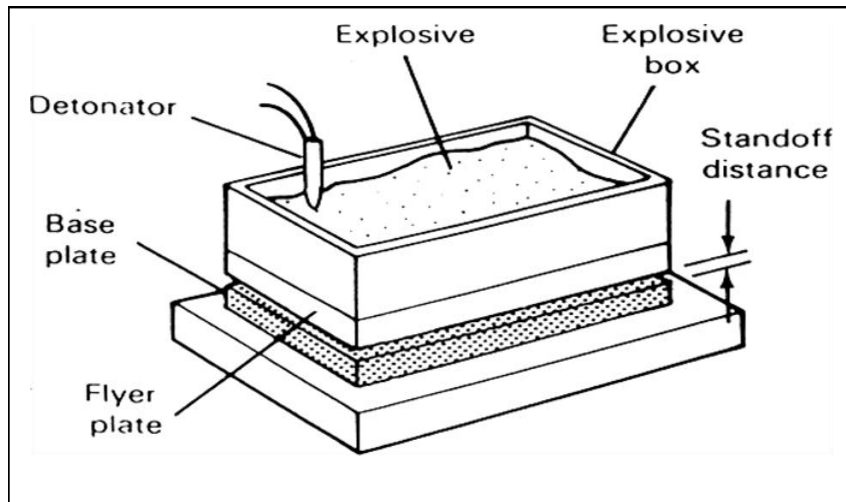


Fig.I.19 Soudage par explosion [35].

La numérotation des procédés de soudage pour la représentation symbolique des dessins est conforme à la norme ISO 4063 [36].

Tableau.I.1 procédés du soudage selon ISO 4063.

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

I.4. Avantages et inconvénients des procédés de soudage et domaine d'application

Il existe de nombreux procédés de soudage différents, nous allons mentionner certains des avantages et inconvénients des procédés de soudage les plus couramment utilisés :

I.4.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique

I.4.1.1. Soudage à la flamme

❖ Les avantages

- Procédé permettant de réaliser des soudures étanches sur tôles fines ou sur des tubulures de petits \emptyset .
- Le poste de soudage est autonome. (Avantage sur les chantiers).
- Par sa dispersion thermique, ce procédé évite un durcissement de la zone proche de la soudure.

❖ Les inconvénients

- Procédé très onéreux et lent, provoquant des déformations importantes.
- Il est très avantageusement remplacé par les procédés de soudage électrique (Electrodes enrobées; M.I.G-M.A.G; T.I.G sous atmosphère).

❖ Domaine d'application

Le soudage à la flamme peut être utilisé dans diverses industries telles que la construction, l'automobile, la fabrication de meubles métalliques, la production de navires et d'appareils ménagers. Cependant, cette méthode est plus adaptée aux pièces de faible épaisseur et pour des métaux comme l'acier, le cuivre, le bronze, le nickel et l'aluminium. Pour des pièces de plus grande épaisseur ou des matériaux plus résistants, d'autres techniques de soudage sont souvent préférées.

I.4.1.2. Soudage à l'arc

❖ Les avantages

- **Haute productivité** : Le soudage à l'arc électrique peut être effectué rapidement, ce qui en fait une méthode de soudage très productive.
- **Polyvalence** : Cette méthode de soudage peut être utilisée pour souder une grande variété de métaux et d'alliages, ce qui la rend très polyvalente.
- **Faible coût** : Comparé à d'autres méthodes de soudage, le soudage à l'arc électrique est relativement

Peu coûteux et nécessite un équipement moins complexe.

- **Contrôle précis** : Cette méthode de soudage permet un contrôle précis de la température, de la vitesse de soudage et de la quantité de métal déposée, ce qui peut aider à produire des soudures de haute qualité.
- **Pas de gaz d'échappement nocifs** : Le soudage à l'arc électrique ne produit pas de gaz d'échappement nocifs, ce qui le rend plus respectueux de l'environnement que d'autres méthodes de soudage.

❖ Les inconvénients

- **Équipement coûteux** : Bien que le soudage à l'arc électrique soit moins coûteux que d'autres méthodes de soudage, l'équipement lui-même peut être assez coûteux.
- **Haute température** : Le soudage à l'arc électrique nécessite des températures très élevées, ce qui peut provoquer la déformation ou la rupture des pièces soudées si elles ne sont pas correctement refroidies.
- **Risque d'éclaboussures** : Le soudage à l'arc électrique peut produire des éclaboussures, ce qui peut provoquer des brûlures ou des blessures si le soudeur n'est pas correctement protégé.
- **Fumées et émissions** : Bien que le soudage à l'arc électrique ne produise pas de gaz d'échappement nocifs, il peut produire des fumées et des émissions qui peuvent être dangereuses pour les travailleurs s'ils ne sont pas correctement protégés.
- **Qualité variable** : Si le soudage à l'arc électrique n'est pas effectué correctement, il peut produire des soudures de qualité variable qui peuvent être susceptibles de se rompre ou de se déformer au fil du temps.

❖ Domaine d'application

Le soudage à l'arc est une méthode de soudage qui utilise un arc électrique pour fondre les métaux à souder. Cette méthode de soudage est polyvalente et peut être utilisée dans de nombreuses industries telles que la construction, la fabrication de machines, l'automobile, la production d'équipements pétroliers et gaziers, la fabrication de structures métalliques et la production d'équipements de traitement chimique.

Le soudage à l'arc peut être utilisé pour souder différents types de métaux, y compris l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium, le cuivre, et le nickel. Cette méthode de soudage est particulièrement adaptée pour les pièces de grande épaisseur ou les métaux plus résistants.

Il existe différentes techniques de soudage à l'arc, telles que le soudage à l'arc électrique à la baguette (MMA), le soudage à l'arc sous gaz inerte (MIG/MAG) et le soudage TIG. Chacune de ces techniques a ses avantages et ses limites et est utilisée en fonction des exigences spécifiques de l'application de soudage.

I.4.1.3.Soudage aluminothermique

❖ Les avantages

- **Grande résistance** : Le soudage aluminothermique produit des soudures très résistantes qui peuvent supporter de fortes charges et de grandes contraintes
- **Qualité constante** : Cette méthode de soudage produit des soudures de haute qualité avec peu de défauts, ce qui peut aider à réduire les coûts de maintenance à long terme.
- **Peu de pièces d'usure** : Le soudage aluminothermique nécessite peu de pièces d'usure, ce qui réduit les coûts de maintenance à long terme.
- **Pas de risque de contamination** : Cette méthode de soudage n'utilise pas de gaz de soudage ou de flux, ce qui élimine le risque de contamination du métal.
- **Haute portabilité** : Le soudage aluminothermique peut être effectué dans des endroits difficiles d'accès, car il ne nécessite pas d'alimentation électrique ou de gaz de soudage.

❖ Les inconvénients

- **Coût initial élevé** : Le soudage aluminothermique peut être plus coûteux que d'autres méthodes de soudage en raison du coût élevé de l'équipement et des matériaux.
- **Risque d'incendie** : Le soudage aluminothermique produit de la chaleur intense, ce qui peut entraîner un risque d'incendie si les précautions nécessaires ne sont pas prises.
- **Risque de brûlures** : Le soudage aluminothermique peut produire des éclaboussures et de la chaleur intense, ce qui peut causer des brûlures aux travailleurs non protégés.
- **Formation de fumées et de gaz** : Le soudage aluminothermique peut produire des fumées et des gaz qui peuvent être dangereux pour les travailleurs si les précautions nécessaires ne sont pas prises.
- **Limitation de la taille de la pièce** : Cette méthode de soudage est limitée en termes de taille de la pièce soudée en raison de la taille des moules utilisés pour contenir le métal fondu pendant le processus de soudage.

❖ Domaine d'application

Le soudage aluminothermique, également connu sous le nom de soudage à la thermitte, est une méthode de soudage qui utilise une réaction chimique exothermique pour produire de la chaleur et fondre les métaux à souder. Cette technique de soudage est principalement utilisée pour les joints de rails ferroviaires et dans la réparation de structures en acier telles que les ponts, les gratte-ciels et les tours de transmission.

Le soudage aluminothermique peut également être utilisé dans des applications telles que la fabrication de pièces moulées en acier et la réparation de pièces en fonte. Cette méthode de soudage est particulièrement adaptée pour les pièces de grande taille et les joints de haute qualité.

I.4.1.4. Procédés par faisceau à haute densité d'énergie

❖ Les avantages

- **Haute précision** : Le soudage laser peut produire des soudures très précises avec peu ou pas de distorsion, ce qui est important pour la fabrication de produits électroniques et optiques.
- **Grande vitesse** : Le soudage laser est une méthode très rapide, ce qui peut être important pour la production en série.
- **Contrôle de la chaleur** : Le soudage laser permet de contrôler la chaleur plus précisément que les autres méthodes de soudage, ce qui peut être important pour éviter la déformation ou la fissuration des pièces.
- **Moins de déchets** : Le soudage laser peut réduire les pertes de matière en raison de sa précision et de son contrôle de la chaleur.
- **Pas de contact direct** : Le soudage laser n'implique pas de contact direct entre le faisceau laser et la pièce, ce qui peut réduire l'usure de l'outil et réduire les coûts de maintenance.

❖ Les inconvénients

- **Coût initial élevé**: Le coût initial de l'équipement pour le soudage laser peut être élevé, ce qui peut rendre cette méthode de soudage moins accessible pour les petites entreprises.
- **Complexité de la mise en place**: Le soudage laser nécessite une configuration complexe pour aligner et focaliser le faisceau, ce qui peut nécessiter un personnel hautement qualifié.
- **Sensibilité aux matériaux**: Le soudage laser est plus sensible aux matériaux que d'autres méthodes de soudage, ce qui peut rendre difficile la soudure de certains métaux.
- **Sensibilité à la surface**: Le soudage laser peut être affecté par la surface de la pièce à souder, ce qui peut nécessiter un nettoyage ou une préparation préalable avant la soudure.
- **Sécurité**: Le faisceau laser peut être dangereux pour les yeux et la peau, et nécessite une protection appropriée pour les travailleurs.

❖ Domaine d'application

Les procédés de soudage par faisceau à haute densité d'énergie, tels que le soudage par faisceau d'électrons et le soudage par faisceau laser, sont des techniques de soudage modernes et avancées qui

Sont utilisées dans des applications de haute technologie. Ces techniques de soudage offrent une précision élevée, une vitesse de soudage rapide et une zone thermiquement affectée réduite.

Le soudage par faisceau d'électrons est utilisé dans l'industrie aérospatiale pour souder des composants en titane, en acier inoxydable et en aluminium, tels que des fuselages d'avions, des pièces de moteurs et des panneaux solaires. Il est également utilisé dans la production d'équipements médicaux tels que les implants et les prothèses.

Le soudage par faisceau laser est utilisé dans l'industrie automobile pour souder des composants en acier et en aluminium, tels que les carrosseries et les châssis. Il est également utilisé dans l'industrie électronique pour souder des composants microscopiques tels que les circuits imprimés.

En somme, les procédés de soudage par faisceau à haute densité d'énergie sont souvent utilisés dans des industries de haute technologie où une grande précision et une productivité élevée sont requises.

I.4.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique

❖ Les avantages

- **Pas de matériau d'apport** : Ces procédés permettent de souder les matériaux sans ajouter de matériau supplémentaire, ce qui peut réduire les coûts et les déchets.
- **Haute résistance de la soudure** : La fusion locale avec action mécanique peut produire des soudures très résistantes, grâce à l'action mécanique qui améliore la qualité de la liaison.
- **Haute productivité** : Les procédés de soudage avec fusion locale et action mécanique peuvent être très rapides, ce qui peut augmenter la productivité.
- **Faible coût de maintenance** : Les procédés de soudage avec fusion locale et action mécanique sont souvent des processus simples, qui nécessitent moins d'entretien que d'autres méthodes de soudage.
- **Adaptabilité** : Ces procédés de soudage peuvent être adaptés pour souder différents types de matériaux, notamment les métaux légers, les alliages de titane et les métaux réfractaires.

❖ Les inconvénients

- **Coût initial élevé** : Les machines et les équipements utilisés pour les procédés de soudage avec fusion locale et action mécanique peuvent être coûteux.
- **Requiert une préparation préalable** : La surface des pièces à souder doit être préparée avant le soudage, ce qui peut nécessiter du temps et des coûts supplémentaires.
- **La qualité de la soudure dépend de l'opérateur** : Les procédés de soudage avec fusion locale et action

Mécanique nécessitent une compétence et une expertise élevées de la part de l'opérateur.

- **Les limites de la taille de la pièce :** Les procédés de soudage avec fusion locale et action mécanique ne sont pas adaptés pour souder des pièces de grande taille.
- **Sensibilité aux variations de la matière première :** Les variations de la matière première peuvent affecter la qualité de la soudure, ce qui peut nécessiter un contrôle qualité rigoureux et une préparation préalable.

❖ **Domaine d'application**

Les procédés de soudage impliquant une solubilité locale avec des travaux mécaniques, sont des techniques de soudage innovantes utilisées dans différentes applications industrielles.

Le soudage positionné est largement utilisé dans l'industrie automobile pour les pièces d'acier soudées, telles que les structures de corps et de cadre. Il est également utilisé dans l'industrie électronique pour souder des composants électroniques sur des cartes de circuit imprimé.

Le soudage rotatif est utilisé dans le soudage de matériaux légers tels que l'alliage d'aluminium et l'aluminium. Cette méthode est souvent utilisée dans la production de pièces de rechange pour l'industrie aérospatiale et l'équipement de transport.

Le soudage Leader est utilisé dans le soudage de pièces métalliques et de pièces de forme complexe. Cette méthode est souvent utilisée dans la production de carrosseries et d'enveloppes électriques.

Le soudage par étincelles est utilisé dans le soudage d'acier inoxydable, de cuivre, de tuyaux et de tuyaux en cuivre. Cette méthode est souvent utilisée dans les industries pétrochimiques, alimentaires et médicales.

Ces procédés de soudage par résistance offrent des avantages tels que la production rapide de joints soudés, la production facile de pièces en série et la possibilité de souder des matériaux de faible épaisseur.

I.4.3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique

❖ **Les avantages**

- **Pas de matériau d'apport :** Comme pour les procédés de fusion locale avec action mécanique, Ces procédés de soudage ne nécessitent pas l'utilisation de matériau d'apport, ce qui peut réduire les coûts et les déchets.

- **Haute productivité** : Les procédés de soudage sans fusion avec action mécanique peuvent être très rapides, ce qui peut augmenter la productivité.
- **Haute résistance de la soudure** : Les soudures réalisées avec ces procédés peuvent être très résistantes grâce à l'action mécanique qui favorise l'intégration des métaux.
- **Adaptable** : Ces procédés de soudage peuvent être adaptés pour souder différents types de matériaux, notamment les métaux légers, les alliages de titane et les métaux réfractaires.
- **Faible coût de maintenance** : Les procédés de soudage sans fusion avec action mécanique sont souvent des processus simples, qui nécessitent moins d'entretien que d'autres méthodes de soudage.

❖ Les inconvénients

- **La qualité de la soudure dépend de l'opérateur** : Comme pour les procédés de soudage avec fusion locale et action mécanique, ces procédés de soudage nécessitent une compétence et une expertise élevées de la part de l'opérateur.
- **La surface de la pièce doit être préparée** : Avant le soudage, la surface des pièces doit être préparée, ce qui peut nécessiter du temps et des coûts supplémentaires.
- **Sensibilité aux variations de la matière première** : Les variations de la matière première peuvent affecter la qualité de la soudure, ce qui peut nécessiter un contrôle qualité rigoureux et une préparation préalable.
- **Limites de la taille de la pièce** : Les procédés de soudage sans fusion avec action mécanique ne sont pas adaptés pour souder des pièces de grande taille.
- **Coûts initiaux élevés** : Les machines et les équipements utilisés pour ces procédés de soudage peuvent être coûteux.

❖ Domaine d'application

Les procédés de soudage faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique sont des techniques de soudage solide qui sont utilisées dans diverses applications industrielles.

Le soudage par friction est utilisé pour souder des matériaux tels que les métaux non ferreux, les alliages d'aluminium, les matériaux composites et les matériaux thermoplastiques. Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie aéronautique, l'industrie automobile et la production d'équipements de sport.

Le soudage par diffusion est utilisé pour souder des matériaux tels que les métaux, les céramiques et les matériaux composites. Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie aérospatiale, l'industrie médicale et la production d'outils et d'équipements de précision.

Ces procédés de soudage solide offrent des avantages tels que la production de joints soudés de haute qualité, la réduction de la zone thermiquement affectée, la possibilité de souder des matériaux de différents types et épaisseurs, et la résistance à la corrosion.

I.4.4. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage

❖ Les avantages

- **Pas de risque de distorsion** : Comme il n'y a pas de chauffage, il n'y a pas de risque de distorsion des pièces, ce qui peut être un avantage pour les pièces délicates ou complexes.
- **Pas de matériau d'apport** : Comme pour les procédés de soudage sans fusion avec action mécanique, ces procédés de soudage ne nécessitent pas l'utilisation de matériau d'apport, ce qui peut réduire les coûts et les déchets.
- **Haute résistance de la soudure** : Les soudures réalisées avec ces procédés peuvent être très résistantes grâce à l'action mécanique qui favorise l'intégration des métaux.
- **Haute productivité** : Les procédés de soudage sans chauffage avec action mécanique peuvent être très rapides, ce qui peut augmenter la productivité.
- **Moins d'énergie nécessaire** : Comme il n'y a pas de chauffage, ces procédés de soudage nécessitent moins d'énergie que les procédés de soudage traditionnels.

❖ Les inconvénients

- **La qualité de la soudure dépend de l'opérateur** : Comme pour les autres procédés de soudage, ces procédés de soudage nécessitent une compétence et une expertise élevées de la part de l'opérateur.
- **Limitations des matériaux** : Les procédés de soudage à froid ne peuvent être utilisés que sur certains types de matériaux, tels que les métaux tendres, les alliages d'aluminium et les composites.
- **Limitations de la taille des pièces** : Les procédés de soudage à froid sont souvent limités en termes de taille des pièces, ce qui peut limiter leur utilisation dans certains secteurs industriels.
- **Effets de la corrosion** : Les soudures réalisées avec ces procédés peuvent être plus sensibles à la corrosion que les soudures réalisées avec des procédés de soudage traditionnels.
- **Coûts élevés** : Les machines et les équipements utilisés pour ces procédés de soudage peuvent être coûteux, ce qui peut représenter un investissement important pour les entreprises.

❖ **Domaine d'application**

Les procédés de soudage faisant intervenir une action mécanique sans chauffage sont utilisés dans diverses applications industrielles.

Le soudage par ultrasons est utilisé pour souder des matériaux thermoplastiques tels que les plastiques et les composites. Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie alimentaire, l'industrie médicale, l'industrie électronique et la production d'équipements de sport. Les avantages du soudage par ultrasons comprennent des joints soudés étanches, une production rapide de pièces, une faible consommation d'énergie et une faible production de déchets.

Le soudage par explosion est utilisé pour souder des métaux qui ne peuvent pas être soudés par d'autres procédés de soudage. Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie de la défense, l'industrie nucléaire et l'industrie pétrolière et gazière. Les avantages du soudage par explosion comprennent des joints soudés très résistants, une grande vitesse de production, la possibilité de souder des matériaux de grandes épaisseurs et une faible déformation thermique.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents procédés de soudage pour les matériaux, d'aborder leur classification. Certaines directives concernant le choix d'un procédé de soudage pour une application donnée sont indiquées ainsi qu'un point important lié à la soudure qui est la santé et la sécurité des personnes.

Les avancées technologiques ont permis le développement de procédés de soudage plus avancés et plus efficaces, offrant des possibilités nouvelles et intéressantes dans l'industrie. Toutefois, il est important de souligner que le soudage ne doit jamais être pris à la légère, car il peut avoir des conséquences graves en cas de défauts ou de mauvaise exécution.

En conclusion, le soudage est un domaine important de l'industrie qui nécessite une expertise et une formation considérables pour être effectué de manière sûre et efficace. Les avantages du soudage sont évidents, mais il est important de comprendre les risques et de prendre les mesures nécessaires pour minimiser ces risques.

Chapitre II

Les matériaux pour soudage

II.1. Introduction

La soudure est une technique d'assemblage qui consiste à joindre deux ou plusieurs pièces métalliques en les chauffant jusqu'à ce qu'elles se fusionnent. Pour produire une soudure de haute qualité, il est essentiel de choisir les matériaux appropriés pour les pièces à souder. Les propriétés des matériaux, telles que la résistance, la ductilité, la conductivité thermique et la résistance à la corrosion, doivent être prises en compte pour garantir que la soudure sera solide, durable et résistante aux contraintes environnementales.

Il existe une grande variété de matériaux pour les pièces soudées, tels que l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium, le cuivre, le laiton, le bronze et le titane. Chacun de ces matériaux a des propriétés spécifiques qui les rendent adaptés à des applications particulières. Les soudeurs doivent donc avoir une connaissance approfondie des propriétés des matériaux pour choisir celui qui convient le mieux à leur projet [37].

Le choix des matériaux pour les pièces soudées est crucial pour garantir la qualité et la durabilité de la soudure. Les soudeurs doivent comprendre les propriétés des différents matériaux et les appliquer en fonction des besoins spécifiques de leur projet.

II.2. La soudure de l'acier

II.2.1. 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 (Voir la figure II.1) [38].

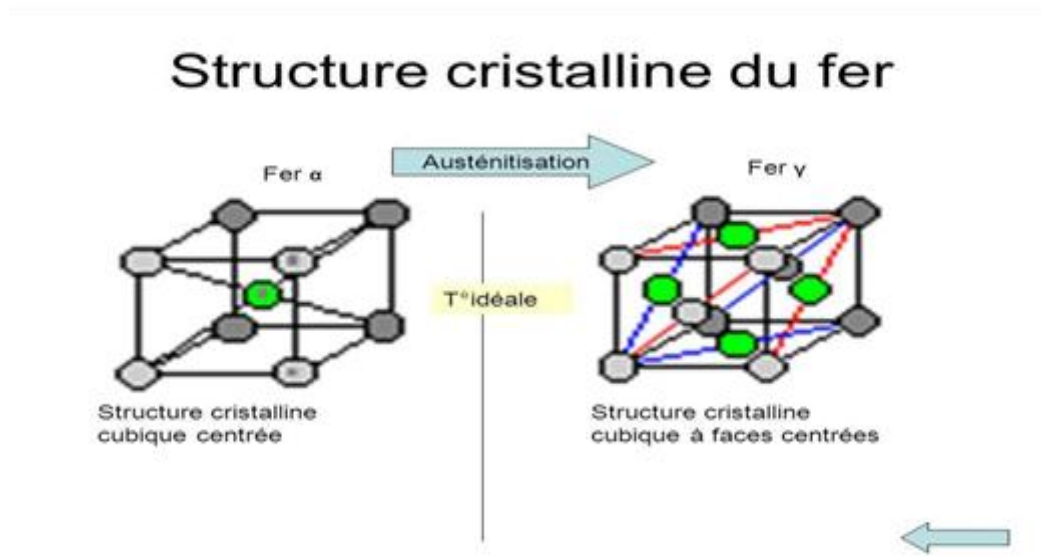


Fig.II.1 Mailles élémentaires des structures cristallines CC et C.F.C.

II.2.2. Les composants des aciers

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, et les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

a) Les impuretés : originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).

b) Les éléments d'additions : des éléments chimiques peuvent être ajoutés pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

c) Les éléments d'accompagnements : que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification [39].

II.2.3. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [40].

II.2.4. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

Les aciers sont classés en deux groupes :

- ❖ Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux, ...).
- ❖ Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés (voir le tableau II.1).

Tableau.II.1 Pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés.

% des éléments d'addition	Acier non allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3		> 0,3
B			> 0
Co	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4		> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5 à 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Pb	< 0,4		> 0,4
V	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3

II.2.4.1. Classification selon leur composition chimique

On a désigné des alliages de fer et de carbone sous le nom aciers non alliés ou aciers au carbone, des alliages de fer plus ou moins carburés et d'autres éléments, en général métalliques sous le nom d'acier alliés.

a- Aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois, improprement appelés aciers au carbone, ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur. Constituent environ 80 % de la production des aciers outre le carbone (tableau II.2).

Cet acier contient des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %), Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans cet acier [41].

Tableau.II.2 Classification des aciers suivant la Teneur en carbone.

Type d'acier	Pourcentage de carbone (C)	Résistance R_m (MPa) état recuit	Emplois
extra-doux	$C < 0,06$	330-420	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
doux	$0,06 < C < 0,20$	370-460	charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
demi-dur	$0,30 < C < 0,50$	550-650	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
dur*	$0,50 < C < 0,95$	650-750	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
extra-dur**	$0,95 < C < 2,11$	>750	outils d'usinage et découpe, câbles ressorts

* Les aciers non alliés dont la teneur en carbone dépasse 0,5 % ont généralement une soudabilité très faible Ou nulle ; ils permettent cependant de fabriquer de très bons outils.

** L'acier extra-dur à teneur en carbone supérieure à 1,7 % ne se trouve pratiquement pas sur le marché.

b- Aciers alliés

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d’alliage supplémentaires qui permettent d’obtenir des propriétés supérieures : augmenter leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur élasticité, leur résistance à l’usure, ou encore obtenir une augmentation de leur température critique (il s’agit de la température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés).

Composition variable suivant l’emploi, les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% [42].

Le tableau II.3 présente les éléments d’alliage les plus fréquemment utilisés, leurs effets sur aciers.

Tableau .II.3 Composition variable suivant l’emploi.

Elément allié	Ratio (%)	Observations
Carbone	0.2/0.7	
Silicium	0.1/0.7 2/4 (aciers spéciaux)	Ressorts tôlés de transfo
Magnésium	0.3/0.8 12/14 (aciers très durs)	Vois ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	<0.1	

Les propriétés mécaniques des aciers au carbone sont moindres que les aciers alliés (voir tableau suivante).

Nature de l'acier	Résistance à latraction (MPa)	Allongements (%)
acier au carbone	400 / 900	5 / 30
acier allié	700 / 1000	9 / 13

II.2.4.2. Classification par le mode d'emploi

- Les **aciers spéciaux** sont constitués de quatre familles suivantes :
 - ❖ Les **aciers de construction** utilisés en particulier en construction mécanique, pour la réalisation de Machines ou de mécanismes très variés ; ils peuvent être alliés ou non alliés ; à cette famille ont été associés les aciers pour appareils à pression.
 - ❖ Les **aciers à outils** choisis pour la fabrication de tous les outillages : usinage, mise en forme, ils sont non alliés ou alliés.
 - ❖ Les **aciers inoxydables** résistant à la corrosion et toujours très alliés ; leur ont été associés les aciers réfractaires ;
 - ❖ Les **aciers spéciaux divers** :
 - Les fontes sont classées uniquement selon leur structure micrographique et plus précisément. celle du carbone ou des carbures précipités : Fonte à graphite lamellaire, à graphite sphéroïdal, fontes blanches etc.

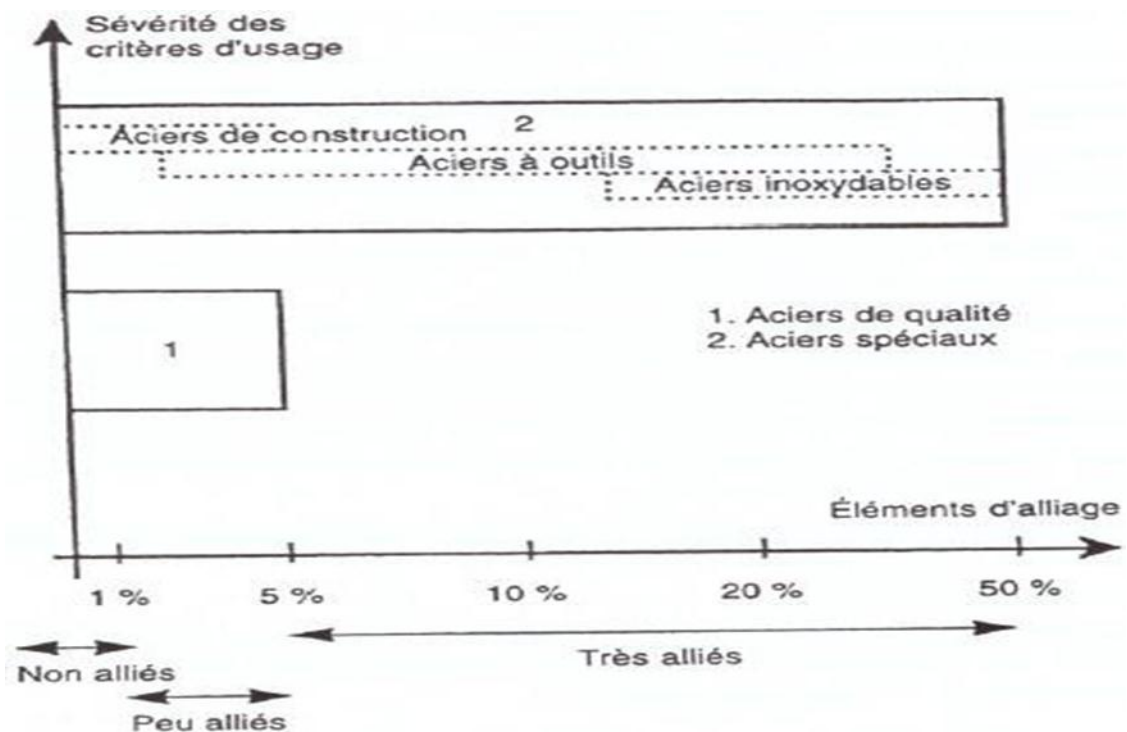


Fig.II.2 Principales classes d'acier.

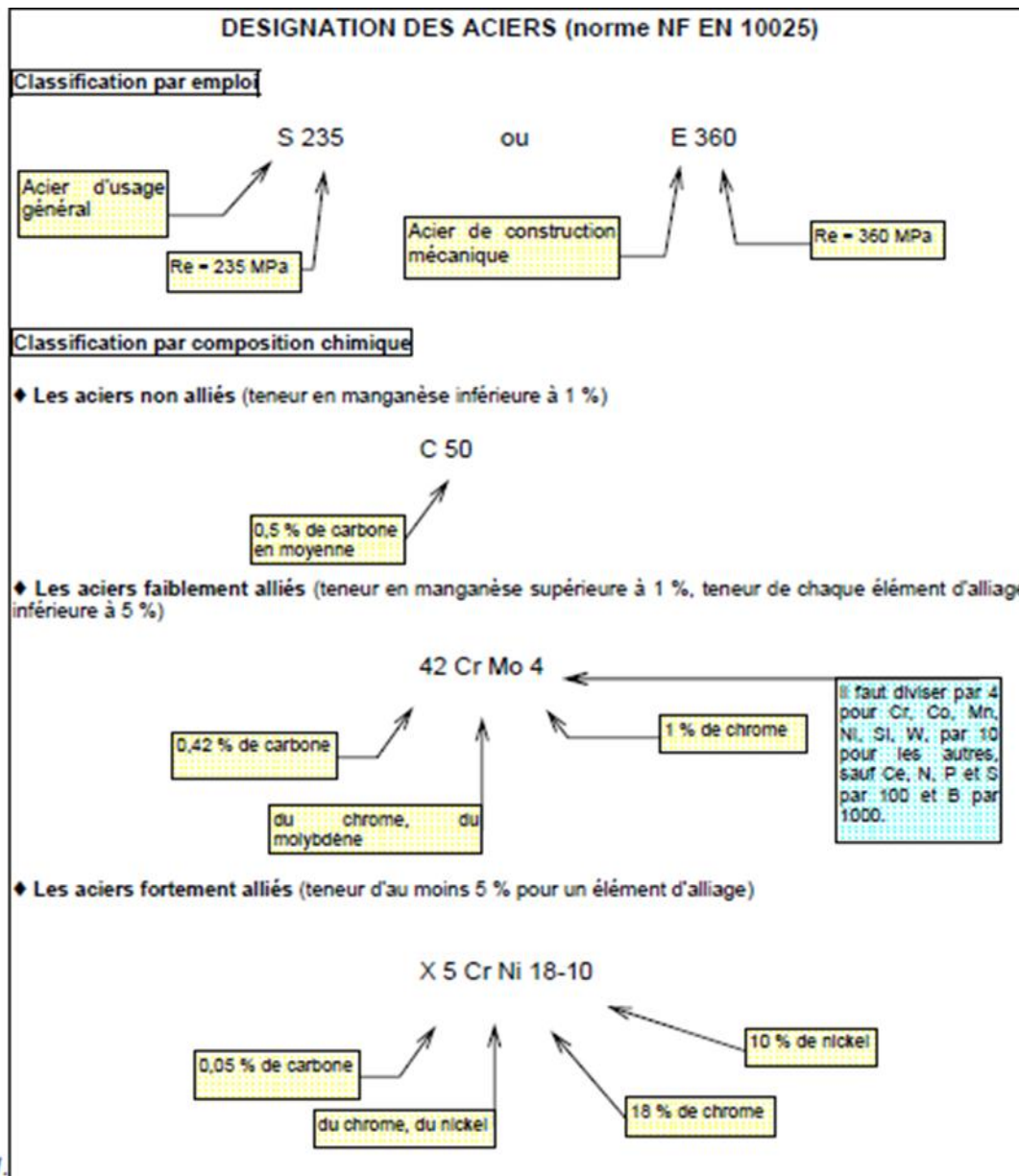


Fig.II.3 Désignation des aciers.

II.2.5. 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 inoxydable austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000MPa, 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 (Trempe, revenu...);
- ❖ D'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (Laminage, forgeage, tréfilage...).

Le traitement de surface consiste à modifier la composition chimique ou la structure d'une couche extérieure d'acier [43].

II.2.6. Traitements thermiques des aciers

La structure et les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H , $A\%$, K) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée.

Ce sont les traitements thermiques dans la masse trempés, revenus et recuits.

Les transformations sont effectuées près des lignes $A1$, $A3$ et A_{cm} du diagramme fer carbone [44].

II.2.6.1. Trempe, ou durcissement par trempe

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations décrites dans les paragraphes précédents n'ont plus le temps de se réaliser.

L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite, la solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, $HB = 750$, et très fragile, c'est le constituant de base des aciers trempés.

Procédé : on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénitisation suivi d'un maintien à température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (eau, huile...).

La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de est suffisamment rapide.

Dans le cas contraire il y a formation d'autres constituants plus tendres : bainite, perlite...

Propriétés : elle augmente R_r , R_e et H mais diminue K et $A\%$. Elle amène aussi l'apparition de tensions internes génératrices de criques et de déformations.

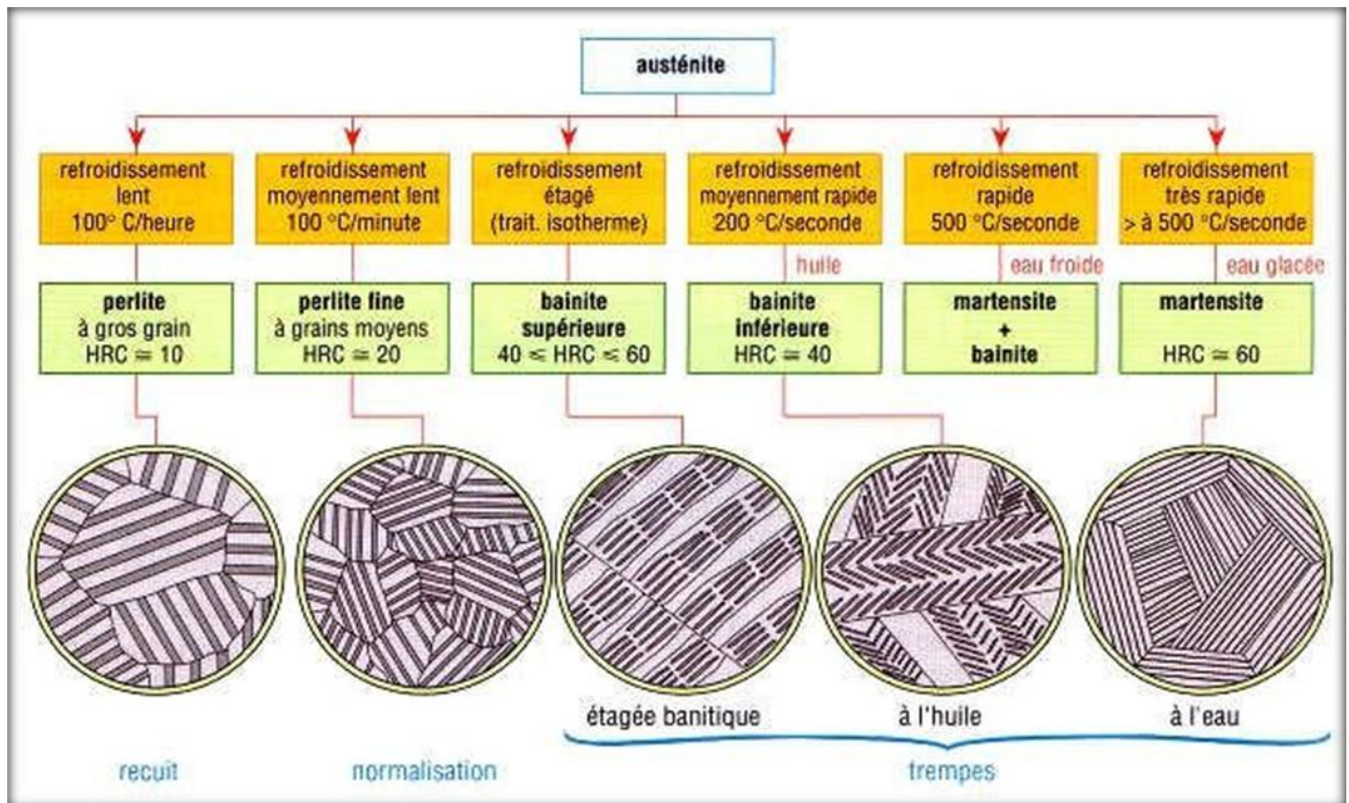


Fig.II.4 Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C.

II.2.6.2. Revenu

Après trempe, la martensite, très dure et très fragile, est pratiquement inutilisable dans cet état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques (R_r , R_e , H), on pratique un revenu.

Procédé : il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage, à température inférieure à 700 °C, suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent et contrôlé. Le traitement permet d'amener les caractéristiques mécaniques au niveau souhaité.

Propriétés : augmentation de K et de $A\%$; atténuation des contraintes internes.

Inconvénients : diminution de H , de R_r et R_e . Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.

Principaux revenus

- Un réchauffage jusqu'à 220 °C élimine les contraintes internes et est pratiquement sans effet sur la dureté.

- Un accroissement de la température amènera un adoucissement de plus en plus grand du métal, une dureté plus basse et une plus grande ductilité.
- Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre 500 et 675°C.

II.2.6.3. Recuit

Son effet est inverse de celui de la trempe. Le métal est amené au maximum de ses caractéristiques de ductilité : $A\%$ et K maximales, Rr et H minimales. La structure obtenue, perlite et ferrite, présente une meilleure usinabilité.

Procédé : Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénitisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

Différents recuits

- Recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée.
- Recuit de régénération il affine et uniformise le grain du métal.
- Recuit de détente il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage.
- Recuit de recristallisation : pour les aciers forgés ou écrouis.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en faisant disparaître les constituants les plus durs.

Sur le plan industriel une même opération de recuit peut englober les caractéristiques des cinq cas précédents.

II.3. La soudure en acier inoxydable

II.3.1. Définition de l'acier inoxydable

Les aciers inoxydables concernent un ensemble d'alliages ferreux résistant à un grand nombre de milieu corrosifs [45, 46].

L'élément principale dans la constitution d'un acier inoxydable est le chrome, à teneur suffisante, variable selon le cas, mais toujours supérieur à 12 % [46, 47].

La présence du chrome permet la formation en surface d'un film de passivation conférant à l'alliage son caractère d'in oxydabilité

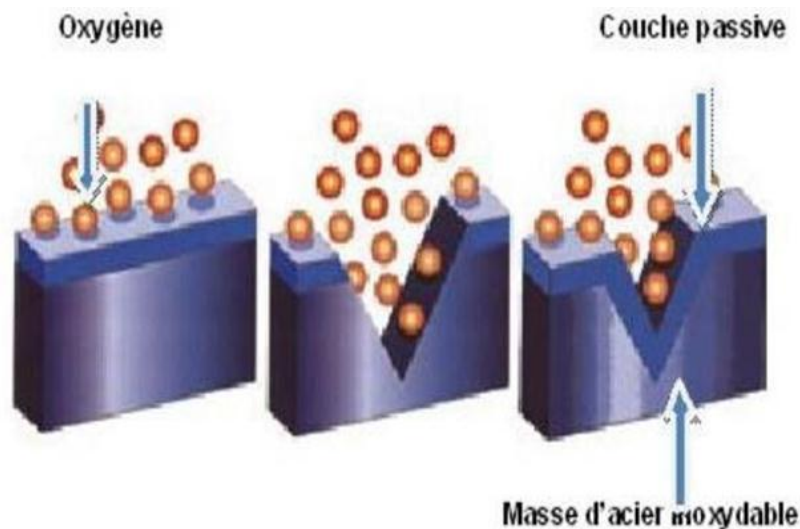


Fig.II.5 Schéma représentatif d'un acier inoxydable.

II.3.2. Composition et structure des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Comme les autres aciers, ce sont des alliages métalliques à base de fer (alliage : fer-carbone) à teneur en carbone variant de 0,02 à 1% (pour éviter la précipitation de carbures aux joints de grains) et qui doivent contenir au moins 10,5% de chrome et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliage soit de type interstitiel comme le carbone ou l'azote, soit de type métallique tels que le nickel, le molybdène, le titane... etc [48].

II.3.3. Fabrication des aciers inoxydables

La fabrication des aciers inoxydables comporte quatre étapes principales qui sont :

- ❖ L'élaboration qui comprend elle-même une phase de fusion dans un four à arc suivie d'une opération d'affinage ;
- ❖ la coulée soit sous forme de lingots, soit de plus en plus par coulée continue ;
- ❖ la transformation à chaud le plus souvent par laminage et plus rarement par forgeage ;
- ❖ la transformation à froid par laminage pour les produits plats et par tréfilage pour les produits longs ;

II.3.4. Classification des aciers inoxydables

On trouve différents types d'aciers inoxydables qui possèdent tous la caractéristique d'être très résistants à la corrosion.

Ce sont des aciers fortement alliés dont les éléments d'alliage constituent plus de 35 % du contenu.

On distingue généralement trois catégories d'aciers inoxydables : les aciers austénitiques, ferritique et martensitiques (tableau suivante) [49].

Type d'acier inoxydable	Composition des alliages
Austénitique	Chrome : 14 à 30 % Nickel : 6 à 36 %
Ferritique	Chrome : 11 à 27 % Carbone : 0,02 à 0,08 %
Martensitique	Chrome : 4 à 18 % Carbone : pas plus de 0,15 % Autres éléments d'alliage : jusqu'à 3 %

II.3.4.1. Acier ferritique

Ont une teneur en chrome est comprise entre 11 et 27 % et ne contiennent pas de nickel. Ils ne prennent pas la trempe, leur structure cristalline est la même que celle du fer à température ambiante et possèdent une teneur en carbone très faible (de l'ordre de 0,08 % de carbone).

II.3.4.2. Acier austénitique

Au chrome-nickel ont une structure cubique à faces centrées à température ambiante.

Ils sont très résistants à la corrosion grâce à la présence du chrome et aussi très ductiles.

Cette structure est amagnétique et peut être conservée à température ambiante grâce à des éléments d'alliage appropriés dont le plus connu est le nickel.

II.3.4.3. Acier martensitique

Peuvent prendre la trempe et sont susceptibles de donner des caractéristiques mécaniques variées suivant la teneur en carbone et le traitement thermique (trempe, revenu, recuit).

Toutefois, il faut noter que l'accroissement de caractéristiques par la trempe et le revenu est inévitablement associé à une augmentation de la sensibilité à la corrosion (supérieure à celles des aciers ferritique et austénitique).

II.3.5. Propriétés et applications des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques.

La principale propriété de ces aciers est leur excellente résistance à la corrosion, ce qui leur donne

Une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux.

A cette propriété fondamentale, s'ajoutent les caractéristiques mécaniques élevées à hautes comme à basses températures (résistance mécanique, ductilité, ténacité...).

En raison de leur résistance à la corrosion et de leurs finis de surface de tout premier rang, les aciers inoxydables jouent un rôle prépondérant dans l'industrie aéronautique, chimique, pharmaceutique et agroalimentaire, les cuisines professionnelles, l'architecture et même la bijouterie [50].

II.3.5.1 Propriétés mécaniques

Les aciers inoxydables représentent les propriétés mécaniques suivantes :

- ❖ La dureté, Rockwell B est : 79HRB ;
- ❖ La résistance à la traction est : 558Mpa ;
- ❖ L'allongement à la rupture est : 50% ;
- ❖ Le module de Young est : 2.105Mpa ;

II.3.5.2 Propriétés de mise en forme

Les aciers inoxydables peuvent être fabriqués et transformés en utilisant un large éventail de technologies et sont entièrement « recyclables » à la fin de leur vie utile. Son usinage est beaucoup plus difficile que celui de certains matériaux, d'où un coût considérablement plus élevé [50].

II.3.6. Traitements thermiques des aciers inoxydables

Tous les types de traitements sur les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion ont pour but de rendre la répartition en chrome du métal la plus homogène possible en évitant toute précipitation de phases riches en chrome et donc toute diminution de la teneur en chrome dans les zones avoisinantes.

Dans le tableau.II.4, nous présentons les principaux traitements types de traitements thermiques pour les aciers inoxydables.

Tableau.II.4 Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables [51].

Traitement thermique	Objectif	Processus métallurgique mis en œuvre
Homogénéisation	-diminuer l'ampleur des ségrégations. -obtenir une phase homogène.	Maintien à haute température (diffusion des éléments ségrégés, dissolution de précipités ou de phases intermétalliques).
Durcissement	Augmenter les caractéristiques mécaniques.	Austénitisation puis transformation martensitique. Durcissement secondaire par précipitation.
Adoucissement	-augmenter la ductilité. -diminuer la fragilité.	- Elimination des dislocations par restauration ou recristallisation. - Coalescence et globalisation des précipitées - Grossissement de grain. - Transformation de phase.
Détente	Eliminer une partie des contraintes résiduelles.	- Par abaissement de la limite d'élasticité avec la température. - Par relaxation des contraintes.
Traitements superficiels	Augmenter la dureté en surface.	Apport d'interstitiels.
désensibilisation	Supprimer la sensibilité à la corrosion inter granulaire due aux carbures de chrome	Homogénéisation de la teneur en chrome autour des carbures (diffusion)

II.4. La soudure l'aluminium

II.4.1. Définition de l'aluminium

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13.

C'est un métal malléable, de couleur argentée, Il est léger, robuste, facile à usiner, économique et résistant à la corrosion, il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité.

C'est le métal le plus répondu dans la nature (8% de l'écorce terrestre), il vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium.

L'aluminium est trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel : on le trouve au contraire sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, son minerai principal étant la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine.

Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite.

L'aluminium est un métal dont la structure cristalline est cubique à face centrée (CFC), a une arête à égale à 0,4049596 nm à 298 K. Sa coordinence est égale à 12 [52].

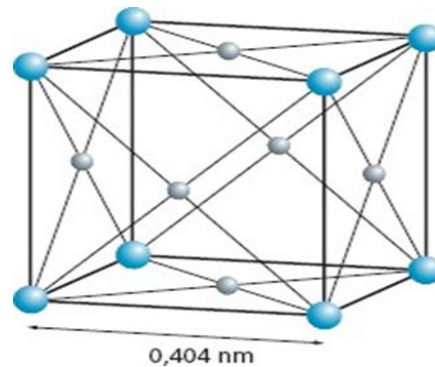


Fig.II.6 La forme cristalline de l'Aluminium [52].

II.4.2. Production de l'aluminium

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone représentant une cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de pour former l'monoxyde et le dioxyde de carbone. [53]

II.4.3. Procédés de fabrication de l'aluminium

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et être la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na^3ALF^6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone [54].

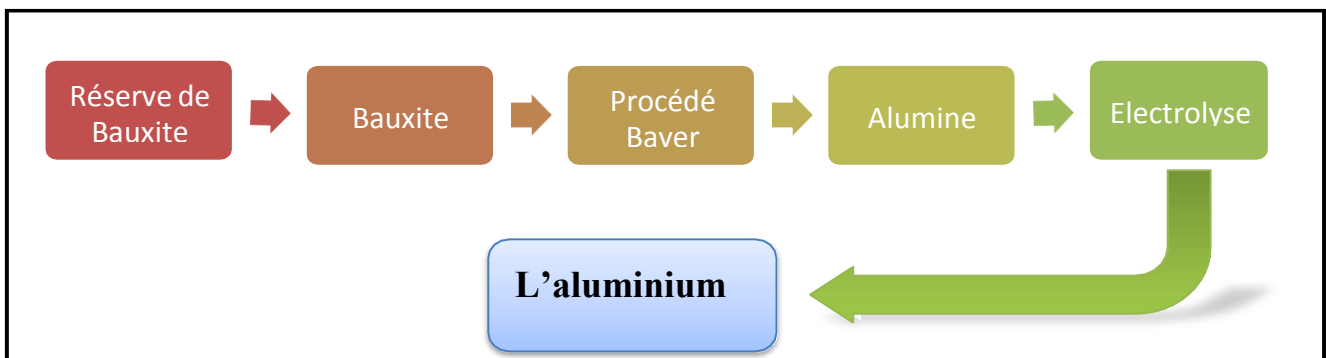


Fig.II.7 Procédés de fabrication de l'aluminium.

II.4.3.1. La Bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal. voir la figure.II.8 montre à quoi ressemble une bauxite.



Fig.II.8 Principale source de l'Aluminium : La bauxite.

II.4.3.2. L'alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine [55].

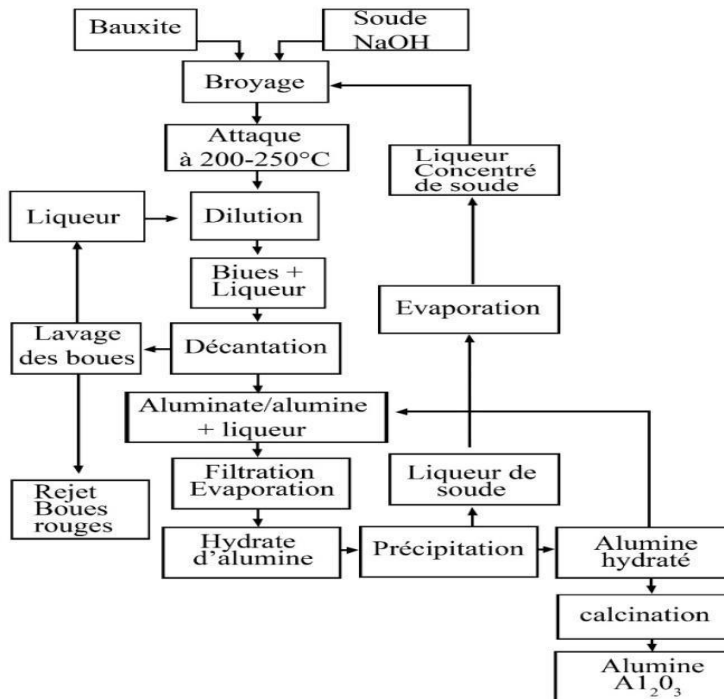


Fig.II.9 Procédé Bayer pour l'obtention de l'alumine [56].

II.4.3.3. L'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve [57]. Voir la figure.II.10 montre en schéma le principe de l'électrolyse.

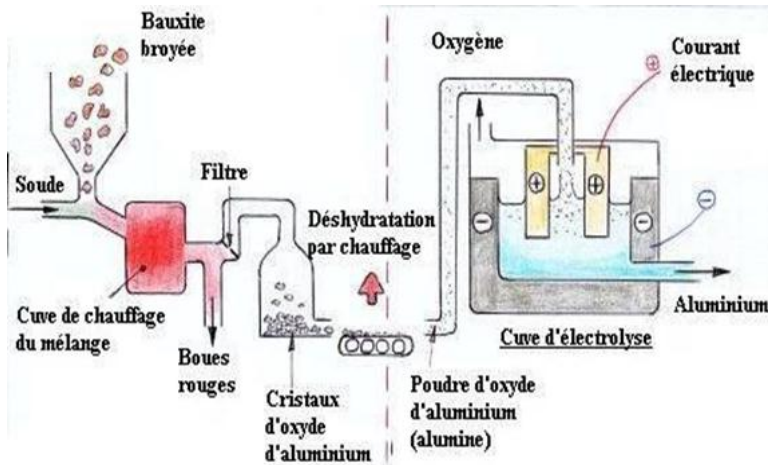


Fig.II.10 Schéma représentatif Fabrication de l'aluminium [58].



Fig.II.11 Cuve d'électrolyse.

II.4.4. Propriétés de l'Aluminium

II.4.4.1 Propriétés mécaniques [59], [57]

L'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, et cela grâce à structure CFC.

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium sont :

- Pour L'aluminium pur, le module d'élasticité est de 66.6 Gpa, autant que des impuretés en présence cette valeur augmente et les éléments d'addition.
- Le coefficient de poisson varie de 0,33 à 0,35.
- Le module de torsion est égale à 25Gpa pour l'aluminium pur tiré à 99.9%, et de 26 Gpa, pour l'aluminium commerciale.

Pour les **propriétés mécaniques** elles sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau II.5. Propriétés mécaniques de l'aluminium coulé et recuit.

	Aluminium coulé	Aluminium recuit
Résistance à la traction MPa	70 à 100	50
Limite élastique MPa	30 à 40	15
Allongement (%)	15 à 25	50
Module d'élasticité MPa	67500	71000
Dureté Brinell (HB)	15 à 25	15 à 25

II.4.4.2 Traitements thermiques

Lorsqu'on cherche à durcir un tel type de matériau, on a recours à un durcissement structural, ou/et au durcissement par l'écrouissage, ou bien durcissement par addition des éléments d'alliage. Le traitement de durcissement structural représente un traitement thermique constitué d'une trempe suivi d'un vieillissement.

a- Trempe

La trempe d'un aluminium n'est guère pareille à une trempe martensitique comportant les cycles suivants :

- Chauffage jusqu'à la température de dissolution des phases présentes en excès dans l'aluminium,
- Maintien à cette même température,
- Refroidissement assez rapide jusqu'à température ambiante,
- Maintien isotherme (vieillissement naturel) ou à une température supérieure (vieillissement artificiel).

b- Vieillissement

Une trempe est toujours suivie d'un vieillissement qui désigne un maintien de la température, on parle de maturation quand il s'agit d'un maintien à une température ambiante, ou d'un vieillissement artificiel lorsque il s'agit d'un maintien à une température supérieure à celle de l'ambiance.

c- Recuit

Ses conditions sont le recuit d'homogénéisation, de recristallisation et d'adoucissement. D'homogénéisation Pour un cycle thermique comportant un chauffage à température élevée (450°C à 520°C), un maintien de 4h à 40 heures puis un refroidissement lent ou dans le four même.

– Recuit de recristallisation

Pour ce cas, on chauffe l'alliage déformé pour supprimer l'érouissage¹ et obtenir un grain plus fin suite à une recristallisation.

– Recuit d'adoucissement

Pour une température variant entre 350°C et 450°C et un maintien de 1h à 2 heures de temps, celui-ci assure la décomposition et la coalescence des phases qui durcissent ainsi à la fin du procédé.

II.4.5. Les différents domaines d'utilisation

L'aluminium a l'avantage et la possibilité d'être recyclé infiniment d'où la multitude des domaines de son utilisation ; construction, transport, alimentation...

La faible masse volumique de ses alliages fait de lui un matériau en vogue employé dans presque tous les domaines comme par exemple son application dans la fabrication de chaudières et d'ustensiles de cuisine grâce à sa résistivité.

En raison de sa légèreté, de sa bonne résistance à la corrosion, de sa bonne conductibilité thermique et électrique, des excellentes propriétés mécaniques de ces alliages, l'aluminium est un métal très utilisé dans des nombreux domaines [60]:

- Comme pièces mécaniques dans l'industrie automobile et aéronautique.
- Tôles d'avions, automobiles et bateaux.
- Le papier d'aluminium extra mince, sert à l'emballage de denrées.
- La poudre de l'aluminium est utilisée pour les peintures résistantes à la chaleur et pour la confection des feux d'artifices.
- Menuiserie et charpente métallique, carrosserie, revêtement....etc.

II.4.6. Alliages d'aluminium

Alliages d'aluminium : Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Tous ces alliages sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes ensuite ils subissent des transformations mécaniques telles que le laminage, filage, profile et tube...) [61].

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont, (Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mn). A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques qui offrent à l'alliage sa fiabilité

Chapitre III

Les fondamentaux du soudage

MIG

III.1. Introduction

Le soudage à fil continu en atmosphère protégée est souvent désigné par les abréviations MIG. (Metal Inert Gas) ou, de façon générique, comme GMAW. (Gas Métal Arc Welding). Le soudage à fil continu est un procédé dans lequel la chaleur nécessaire à l'exécution du soudage est fournie par un arc électrique maintenu entre la pièce à souder et le fil-électrode.

La zone de soudage est constamment alimentée avec le matériau d'apport, le fil-électrode, grâce à la torche prévue permettant le débit de gaz ou de mélange de gaz pour protéger le fil-électrode, le bain de fusion, l'arc et les zones voisines du matériel de base de la contamination atmosphérique [62].

La présence dans le circuit de soudage d'une bouteille de gaz (gaz inerte), associée à l'utilisation de fils-électrodes pleins, caractérise le processus de soudage sous gaz de protection (M.I.G.), (voir la figure III.1) [63].

L'absence de bouteille de gaz sur le circuit de soudage associée à l'utilisation de fils-électrodes fourrés, caractérise le procédé de soudage sans gaz de protection (SELF SHIELDED WIRE, NO GAS ou FLUX); dans ce cas, la protection gazeuse est obtenue par l'action de la poudre incorporée dans l'âme du fil [64].

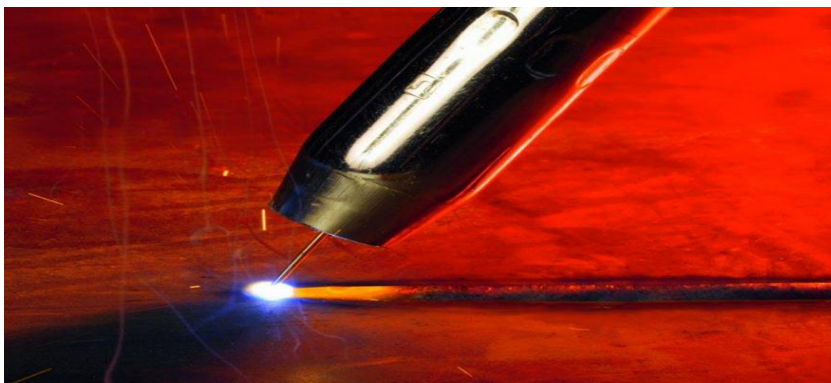


Fig.III.1. Présentation du soudage MIG.

III.2. 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 [65].

Cette courbe montre le taux d'utilisation des différents procédés de soudage en Europe de l'Ouest, entre 1975 et 2000 (Voir la figure.III.2):

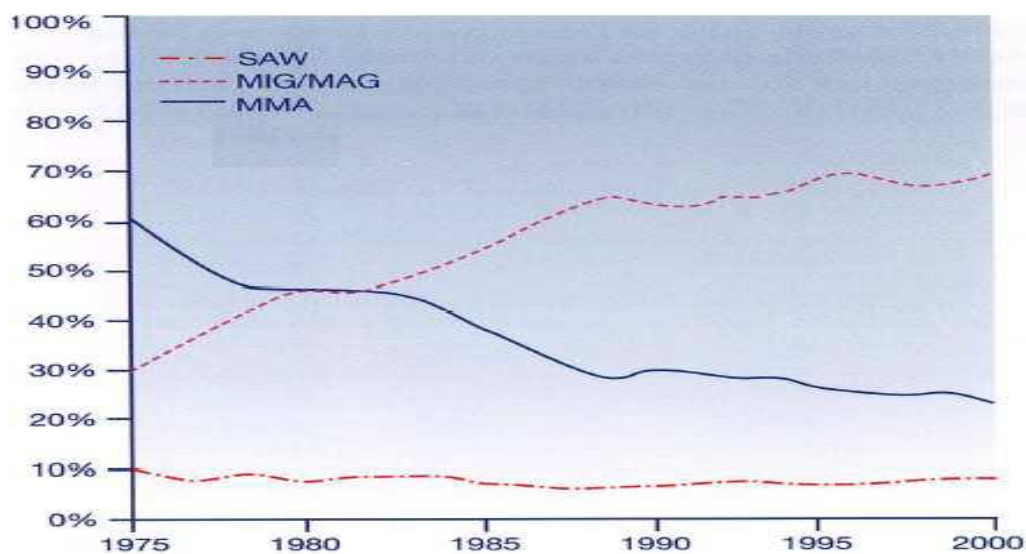


Fig.III.2. Courbe de procédés de soudage en Europe de l'Ouest, entre 1975 et 2000

- MIG/MAG (fils pleins et fils fourrés inclus).
- MMA (Manual Metal Arc welding).
- SAW (Submerged Arc Welding).

III.3. Terminologie

Europe:

MIG = Métal Incert Gas

- Gaz inertes: Hélium, Argon

MAG = Métal Active Gas

- Gaz actif: CO₂

USA:

GMAW = Gas Metal Arc Welding

III.4. Définition du soudage MIG/MAG

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 soudure MIG sous protection de gaz inerte est un procédé de soudage très utilisé de nos jours. Pour ce procédé, on crée un arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport (de \varnothing 0,6 à \varnothing 2,4 mm). Lorsque l'arc est obtenu, on dévide ce fil d'apport à vitesse constante et continu dans le bain de fusion généré par la puissante énergie de cet arc. On obtient un cordon de soudure par mélange du métal d'apport et du métal de base, en fusion pendant l'arc. Il est réalisé sous protection gazeuse (active pour le procédé de soudure MAG et inerte pour le procédé de soudure MIG) (Figure III.3) [66].

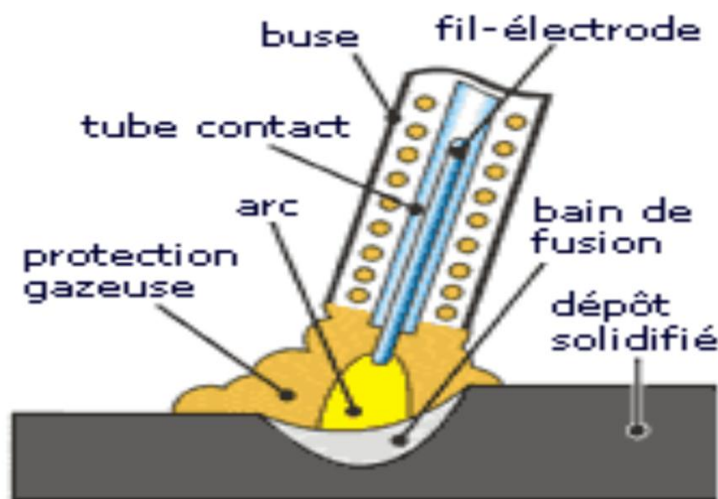


Fig.III.3 Soudage MIG-MAG [66].

III.5. 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 (Voir la figure III.4) [67].

III.5.1. Comment l'arc est-il généré en procédé MIG/MAG

- Le fil (2) entre en contact avec la pièce (5) et un arc se produit (1).
 - L'arc (1) engendre une fusion du métal à souder.
 - Le gaz (4) protège la zone de soudage ainsi que le fil de l'air environnant. En MAG, cela va aussi avoir une influence sur le soudage.
 - Le fil (2) arrive en continu, permettant ainsi de préserver l'arc et de remplir le joint.
- N.B.! Le fil constitue à la fois l'électrode et le métal d'apport.
- La torche est un élément essentiel. Le courant électrique est amené vers l'embout contact (3) et transféré vers le fil.

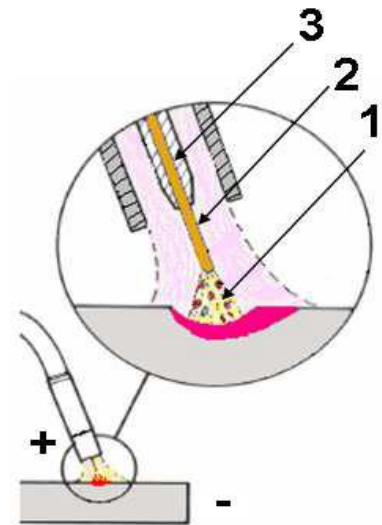


Fig.III.4 Principes du procédé MIG/MAG.

III.6. Le procédé 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 MIG = métal inerte gaz) ou actif (procédé MAG = 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 (Figure III.5) [68]:

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

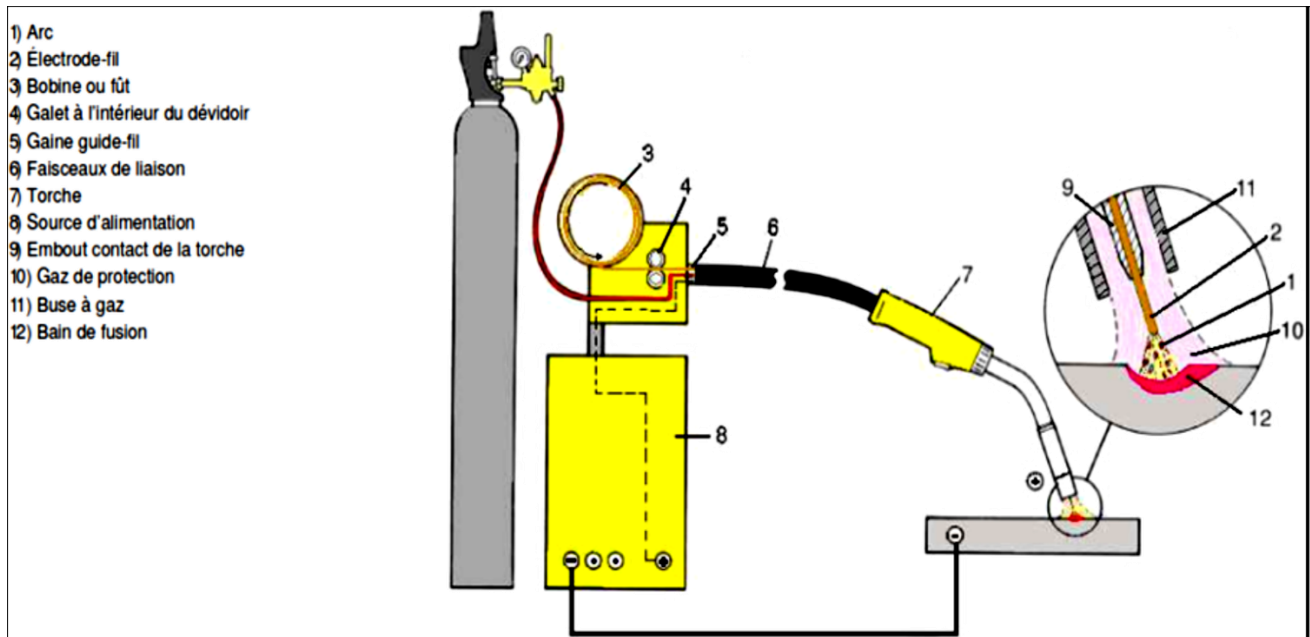


Fig.III.5 Installation de soudage MIG [69].

III.6.1. Caractéristiques du soudage semi-automatique MIG/MAG

III.6.1.1. Métal d'apport

Il se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0.5 et 3.2 mm, enroulé sur une bobine isolante. Le fil fourré est une électrode continue de section tubulaire, dont l'intérieur est rempli de composantes analogue à ceux d'un enrobage. Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique ayant pour rôle de faciliter l'arrivée du courant à son passage dans la torche. Il est évident que le choix du métal d'apport dépend de la nature du métal de base à souder, sa qualité est un facteur déterminant sur la vie du joint soudé (Figure III.6) [70,71].



Fig.III.6 Bobines de file de soudage Mig-Mag [72].

III.6.1.2. Protection gazeuse

Le gaz mis en œuvre est de l'Argon pur ou mélangé avec l'hélium (la figure III.7). Il peut être additionné d'une faible quantité d'oxygène pour fluidifier l'acier et faciliter son transfert dans l'arc, le (tableau 1) montre les différents gaz de protection et leurs applications.

Tableau.III.1 Les différents gaz de protection [73].

Procédé	Gaz	Application
Métal inerte Gaz MIG	Ar	Tous métaux
	He	Métaux légers
	Ar + He Ar + 1 – 2% O ₂	Métaux légers et Alliage de Nickel

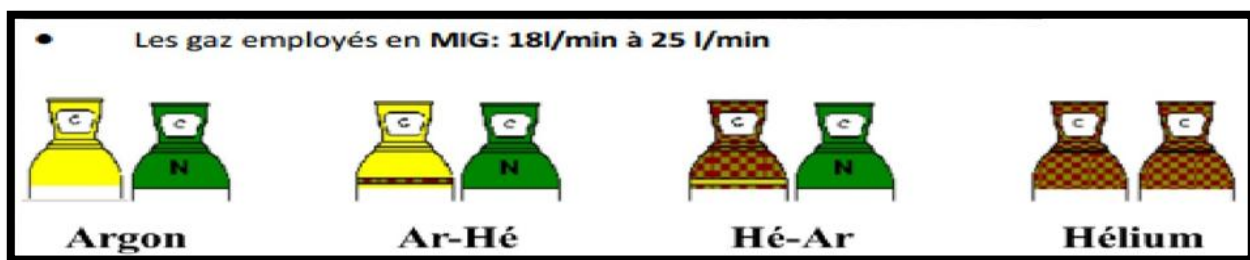


Fig.III.7 Gaz utilisés pour le soudage Mig-Mag [74].

Remarquons que la nature du gaz influe sur plusieurs caractéristiques:

- ✓ Potentiel d'ionisation (tension d'arc, énergie).
- ✓ Pression de l'arc.
- ✓ Echange thermique : capacité calorifique, conduction, convection, masse volumique.

III.6.1.3. Mise en œuvre

L'électrode est consommée à vitesse constante. Cette vitesse est choisie de manière à pouvoir souder avec l'intensité voulue. La longueur de l'arc varie avec la tension du courant. La source du courant est à caractéristique plate, la vitesse d'avance du fil est constante

Si l'arc raccourci, la tension de l'arc diminue, l'intensité de courant augmente et la vitesse de fusion s'accroît. Le refroidissement de la torche de soudage se fait par les gaz de protection pour les faibles intensités.

III.7. Avantages/Inconvénients du soudage MIG

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients (tableau 2).

Tableau.III.2 Avantages/Inconvénients du soudage MIG [75].

Avantages	Inconvénients
- Forte productivité.	-Entretien fréquent et minutieux.
- Grande vitesse de soudage (gain de temps).	- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratiques pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures.
- Taux de dépôt de métal important.	- Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate.
- Limitation des déformations.	En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite.
- Nombre de reprises de soudure limité.	
- Pas de laitier à enlever.	
- Large gamme d'épaisseur.	
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.	
- Soudage dans toutes les positions.	
-Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit	
- Aspect de cordon correct.	Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.
- Procédé automatisable.	
- Fatigue moindre du soudeur	

III.8. Les paramètres opératoires du soudage MIG/MAG

Pour le procédé de soudage MIG-MAG, différents paramètres opératoires peuvent être ajustés pour une optimisation des performances. Ces paramètres ont une influence sur la géométrie des cordons de soudure:

- **Vitesse de soudage** : l'augmentation de la vitesse de soudage à une intensité fixe conduit à des bains fondus moins pénétrés. En augmentant la vitesse de soudage, on diminue aussi la largeur du cordon, la surépaisseur et la dilution.
- **Courant** : l'augmentation du courant de soudage conduit à une élévation de la température à la surface de la pièce ce qui induit une influence sur les caractéristiques géométriques du cordon de soudure.
- **Tension** : l'augmentation de la tension de soudage entraîne une modification de la géométrie des cordons de soudure. On peut noter que la tension d'arc doit être maintenue constante et/ou régulée avec précision.
- **Matériau et diamètre du fil d'apport** : le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Le diamètre du fil est défini par la quantité de matière que l'on souhaite apporter.
- **Vitesse d'avance du fil d'apport** : la vitesse d'avance du fil d'apport définit la quantité de matière apportée.
- **Nature du gaz de protection et son débit** : le gaz de protection va permettre de définir les différentes phases de mode du détachement du fil (court-circuit, globulaire et spray). Par exemple, la composition du gaz va permettre de diminuer la phase de régime globulaire qui est un mode instable de l'arc. La composition du gaz joue aussi un rôle sur la protection du matériau à souder (éviter l'oxydation).
- **Angle d'inclinaison de la torche** : l'inclinaison de la torche de soudage influence essentiellement la géométrie de l'arc.
- **Distance entre la buse de sortie de fil et la pièce à souder** : cette distance définit la hauteur d'arc qui influe sur la répartition de l'arc.
- **Sens de déplacement de la torche** : tiré ou poussé [76].

III.9. Les régimes de transfert du métal dans l'arc [77]

III.9.1. Le court-circuit ou short-arc

L'intensité et la tension sont basses ($I < 200$ A et U entre 14 et 20 V), la pénétration est bonne. Le métal se dépose par gouttes dans le bain de fusion par une série de court-circuit (50 à 200 environ par seconde) entre le fil d'apport et le métal à souder.

Cette méthode de transfert (Voir les figures 8 et 9) permet une bonne précision dans les passes de pénétration. L'arc est cependant instable (peu régulier) et les projections de gouttes autour du cordon sont nombreuses. En passe de pénétration, le tube contact doit être sorti de 5 à 10 mm à l'extérieur de la buse. Il est placé au niveau de la buse pour les autres passes.

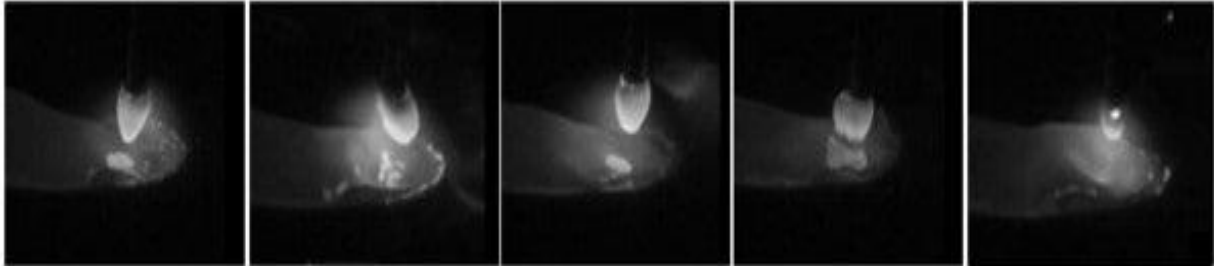


Fig.III.8 Transfert par court-circuit [78].



Fig.III.9 Cordon en court-circuit.

III.9.2. Transfert globulaire (grosse-goutte)

Il s'agit d'un régime intermédiaire entre le régime par court-circuit et le régime par pulvérisation axiale. Les projections sont difficiles à éviter. Les intensités et les tensions sont de valeurs moyennes. La pénétration est moins prononcée qu'en court-circuit. (Voir les figures 10 et 11).

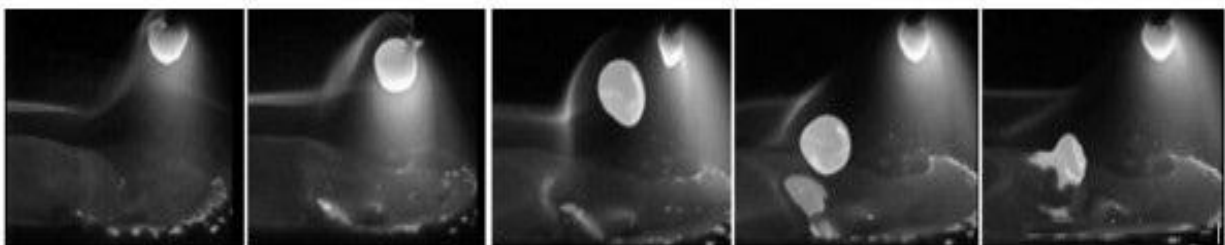


Fig.III.10 Transfert Grosse Goutte [78].

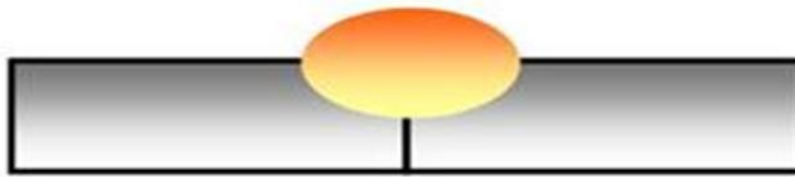


Fig.III.11 Cordon en transfert globulaire.

III.9.3. Transfert par pulvérisation axiale (spray-arc)

L'intensité et la tension sont élevées ($I > 200$ A et U entre 20 et 40 V). L'extrémité du fil fond en très fines gouttelettes projetées dans le bain de fusion. L'arc est long et stable et le taux de dépôt est important. On constate peu de projections sur les bords du cordon. Le tube contact est en retrait à l'intérieur de la buse. Ce transfert est illustré dans les figures 12 et 13

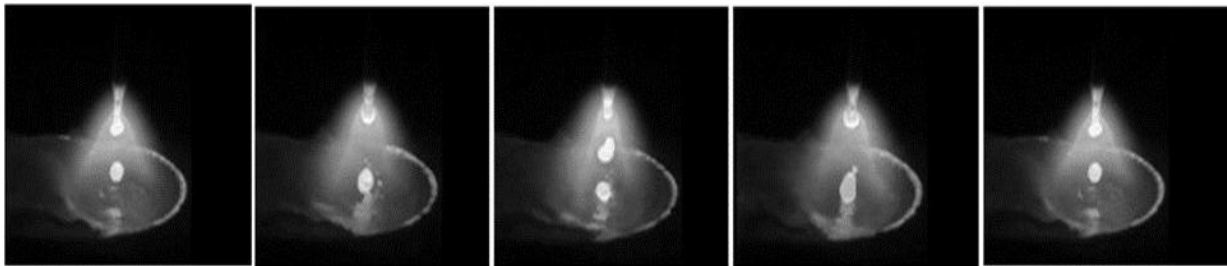


Fig.III.12 Transfert par pulvérisation axiale [78].



Fig.III.13 Cordon en pulvérisation axiale.

III.10. Installation d'un poste MIG-MAG

III.10.1. 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.10.1. 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.10.1. 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.

III.11. La torche de soudage

Les torches de soudage peuvent être refroidies par eau (Fig.III.14-a), soit refroidie par air pour $I_s < 350A$ (Fig.III.14-b) [79].

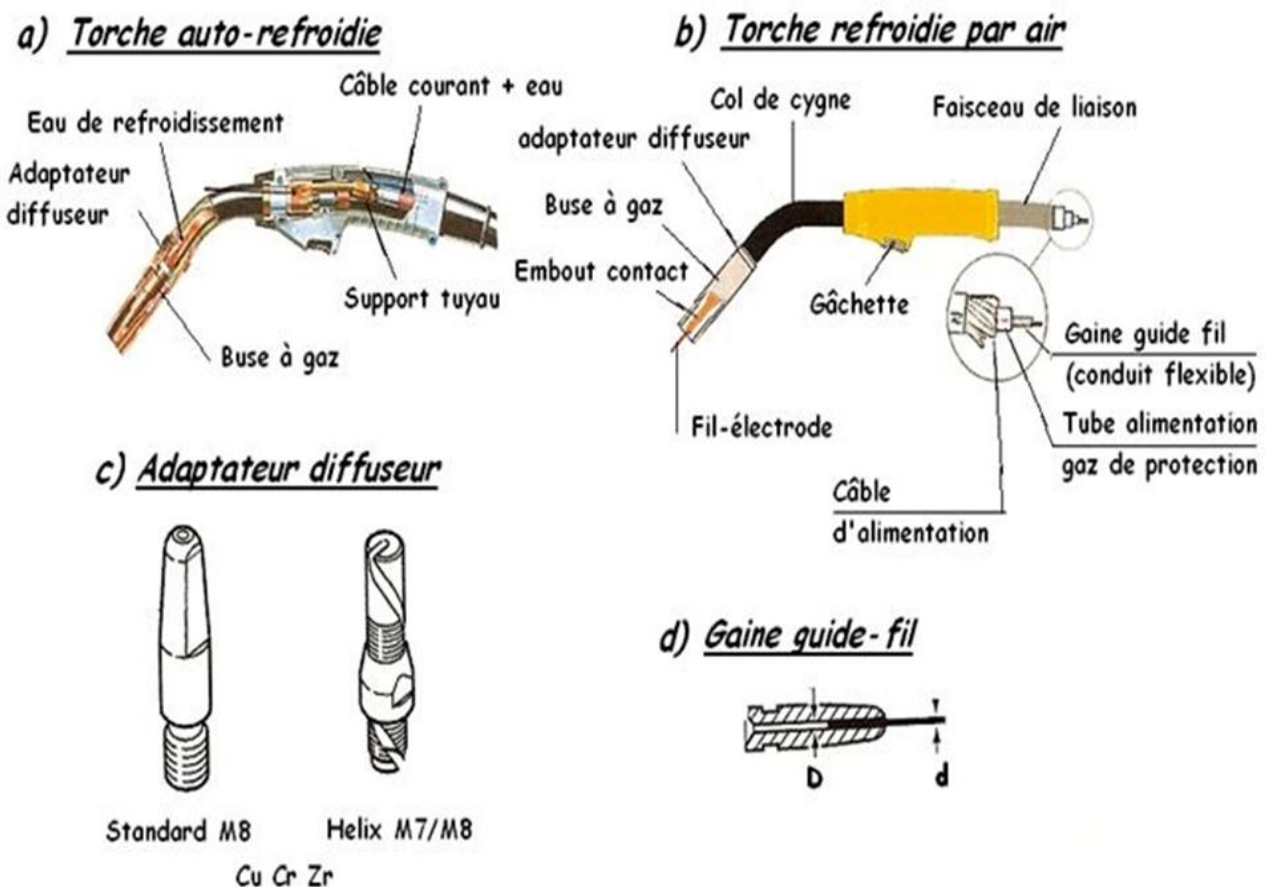


Fig.III.14 La torche de soudage Mig-Mag.

- ❖ 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, le type de soudage. Le type de matériau d'apport 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 jusque 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.III.14-c) permet le transfert de courant. Ils sont actuellement réalisés en 'Cu Cr Zn' 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.III.14-d).

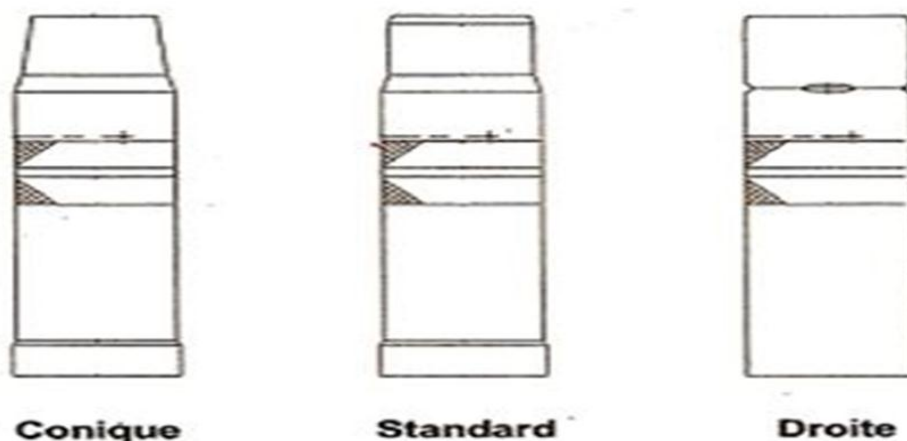


Fig.III.15 Buse de sortie de gaz.

- ❖ La buse à gaz (Fig.III.15) 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.11.1. Angle de Torche

a) En fonction des configurations de soudage

Un angle normal de soudage ne doit pas excéder 15° (Voir la figure III.16).

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

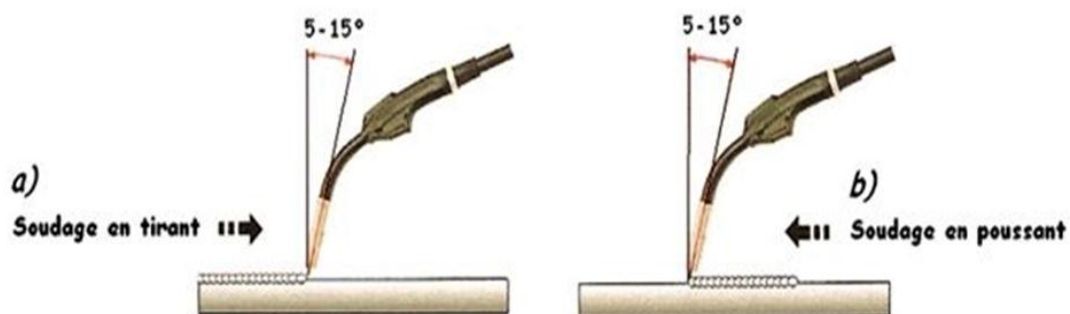


Fig.III.16 Soudage en tirant ou poussant.

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. (Voir la Figure III.17) 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.

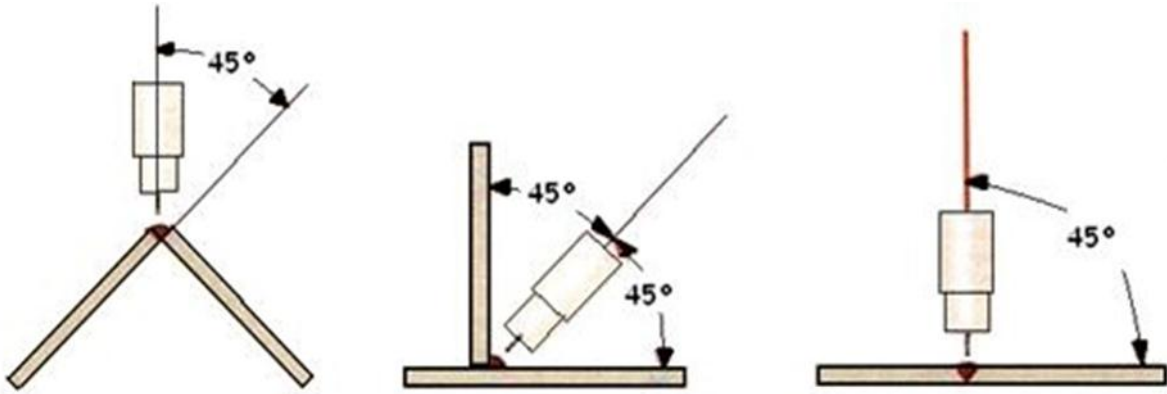


Fig.III.17 Angle de la torche.

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 mettre 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 [80].

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. Introduction

Dans la construction métallique les techniques d'assemblages sont en continuelle évolution car la qualité des soudures n'est pas toujours celle que l'on attend, la recherche est souvent orientée vers la découverte des méthodes permettant de diminuer les défauts présents dans une soudure en conciliant la technologie et l'économie puisque les opérations de soudage coutent souvent cher,

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

Dans cette partie nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des échantillons soudés (assemblage soudée), Dans ce qui suit nous présentons par ordre chronologique les différentes opérations concernant le soudage, ainsi que, les méthodes de caractérisation mécanique et métallurgique types des matériaux étudiées (acier doux et dur et acier inoxydable), Ceci est dans le but de maîtriser et d'améliorer la qualité et l'aspect des assemblages soudés par le procédé MIG (Métal Inerte Gaz).

IV.2. Choix du matériau

Pour notre étude, on a choisi une trois type différent d'acier : (E24) et (hardox450) et (Z 8 CN 25.20) selon la norme (AFNOR).

VI.3. Identification des métaux de base utilisée

Le sujet proposé est d'étudier trois type d'acier qui se présente sous forme des tôles, Dimensions 259 x 170 (mm x mm) et de 6 mm d'épaisseur, d'où les caractéristiques mécaniques et chimiques de chaque acier :

- 1ere matériaux, en acier ordinaire E24 (acier noir ST37)
- 2éme matériaux, en acier à haute résistance (Hardox 450).
- 3éme matériaux, en acier inoxydable (310S).

IV.3.1. Présentation de l'acier E24 (acier noir ST37)

L'acier E24 (acier noir ST37) de composition standard est généralement utilisé dans la construction chaudronnée, ce qui supprime une bonne partie du durcissement par vieillissement et ainsi permet de conserver au métal une bonne ductilité.

	AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027-1
acier ordinaire	E24	ST 37-2	A 570 Gr 33	S 235 JR

Remarque : l’acier E24 (acier noir ST37) présente une bonne soudabilité (pour acier non effervescent) Acier de construction non allié d’usage général, non destiné aux traitements thermiques.

Pièces mécaniques peu sollicitées et ne nécessitant pas de ténacité spéciale.

Pas de caractéristiques mécaniques garanties.

IV.3.1.1. Composition chimique en %

Le Tableau.IV.1 représente la composition chimique de l’acier de base E24 (acier noir ST37) selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.1 Composition chimique de l’acier E24 (acier noir ST37).

Les éléments chimiques %	Carbone C	Soufre S	Manganèse Mn	Phosphore P	Azote N
Composition selon AFNOR	0.17 Max	0.045 Max	1.40 Max	0.045 Max	0.009 Max

IV.3.1.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau.IV.2 représente les caractéristiques mécaniques de l’acier de base E24 selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.2 Caractéristiques mécaniques de l’acier de base E24 (acier noir ST37).

Nuance	Résistance à la traction Rm Mpa (N/mm ²)	Limite d'élasticité Re Mpa (N/mm ²)	Allongement A%	Dureté HB
E24(ST37)	340/510	175/235	17/26	390-780 Mpa (<235HB)

IV.3.2. Présentation de l'acier à haute résistance (Hardox 450)

Acier anti-abrasion trempé (acier à haute résistance 450) et revenu d'une dureté nominale de 450 HB Acier polyvalent, résistant à l'usure, aux chocs et à la déformation. Domaines d'utilisations, Bennes de camions TP, fonds de godets, cribles, alimentateurs, goulottes, lames d'usure, lames de bulls, cribles, tombereaux, camions...

	AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027-1
acier à haute résistance	Hardox 450	Hardox 450	Hardox 450	Hardox 450

IV.3.2.1. Composition chimique en %

Le tableau.IV.3 représente la composition chimique d'acier à haute résistance (Hardox 450) selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.3 Composition chimique de l'acier à haute résistance (Hardox 450).

Les éléments Chimiques %	Carbone C	Soufre S	Manganèse Mn	Phosphore P	Azote N
Composition selon AFNOR	0,19 Max	0,010 Max	1,60 Max	0,025 Max	-

Remarque : L'acier à haute résistance (Hardox 450) se soude très facilement sur d'autres aciers, ainsi offre en outre une excellente aptitude au soudage. Le métal d'apport doit avoir une faible teneur en hydrogène et sa limite d'élasticité doit être au moins équivalente à celle du matériel de base.

IV.3.2.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau.IV.4 représente les caractéristiques mécaniques d'acier à haute résistance (Hardox 450) selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.4 Caractéristiques mécaniques d'acier à haute résistance (Hardox 450).

Nuance	Résistance à la traction Rm Mpa (N/mm ²)	Limite d'élasticité Re Mpa (N/mm ²)	Allongement A%	Dureté HB
acier à haute résistance	1400	1250	10	425 – 475

IV.3.3. Présentation de l'acier inoxydable (310S)

Le matériel AISI 310S est un acier austénitique qui a une bonne résistance à la chaleur, et une bonne résistance aux températures élevées. La résistance au tartre dans l'air est de 1050 ° C. Cette nuance d'acier inoxydable est bien adaptée au soudage, au forgeage et au formage à froid.

Les domaines d'application typiques peuvent être trouvés dans l'ingénierie des appareils, la construction de fours ou l'industrie chimique.

	AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027-1
acier inoxydable	Z 8 CN 25.20	X 8 Cr Ni 25 21	310S	X 12 Cr Ni 25 21

IV.3.3.1. Composition chimique en %

Le Tableau.IV.5 représente la composition chimique d'acier inoxydable (310S) selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.5. Composition chimique d'acier inoxydable (310S).

Les éléments Chimiques %	Carbone C	Soufre S	Manganèse Mn	Phosphore P	Azote N
Composition selon AFNOR	0.10 Max	0.015 Max	2.0 Max	0.045 Max	0.11 Max

Remarque : une fois soudé, le matériau n'est pas résistant à la corrosion inter granulaire.

IV.3.3.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau.IV.6 représente les caractéristiques mécaniques aciers inoxydables (310S) selon la norme AFNOR standard.

Tableau.IV.6 Caractéristiques mécaniques d'acier inoxydable (310S).

Nuance	Résistance à la traction Rm Mpa (N/mm ²)	Limite d'élasticité Re Mpa (N/mm ²)	Allongement A%	Dureté HB
acier inoxydable	540-740	240 min	35/50	210 Max

IV.4. Présentation du métal d'apport (fils pour soudage MIG ER70S-6)

Le métal d'apport utilisé pour l'assemblage par soudage, bout à bout par le procédé MIG sous protection de mélange de gaz (Argon) dans notre étude est un fil en bobine de dénomination commerciale SG2, Sa composition chimique selon la fiche technique du fournisseur est présentée sur le tableau ci-dessous :

Le métal d'apport est un fil de soudure SG2 en bobine de 1,2 mm de diamètre et 15kg (ISO 14341-A(2008)) ou (AWS A5.18), présenté selon le producteur ; Fil cuivré alliage SG2 et Poids: 15 kg et épaisseur : 1, 2 mm et Dia.: 300mm.



Fig.IV.1 Métal d'apport.

IV.4.1. Composition chimique AWS: ER70S-6

Le tableau.IV.7 représente la composition chimique du métal d'apport selon la norme AFNOR.

Tableau.IV.7 Composition chimique du métal d'apport.

Matières des fils(%)	C	Mn	Si	P	S	Cu
	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035	≤0.50

IV.4.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Tableau.IV.8 Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon AFNOR).

Emballage	Taille	Bobine de fils		Poids net
	φ0.8~1.6 (mm)	D100mm, D200mm, D270mm, D300mm, K300mm		1kg, 5kg, 15kg, 18kg, 20kg
Facultés mécaniques du métal	Limite d'élasticité conventionnelle $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Résistance à la traction σ_b (Mpa)	Ratio d'étirage δ_5 (%)	Energie d'impact AKV (J)
	≥420	≥500	≥22	≥27 (-29)
Diamètre du fil (mm)	φ1.2			
Courant de soudage (AMP)	80 à 35			

IV.5. Réalisation des plaques de liaisons acier (E24)/acier à haute résistance (Hardox450)/acier inoxydable (310S)



Fig.IV.2 Matière première prélevé.

IV.5.1. Préparation des éprouvettes pour le soudage

IV.5.1.1. Etape coupe des tôles

Les trois aciers (E24, et hardox 450 et inox310S), sont importés par usine Lafarge, M'SILA. Sous forme de tôles, de dimension 1500 X 6000 X 10 mm ronds, de 180 X 6000 mm, pour chaque type de matière première, nous avons prélevé trois plaquettes de 200 mm de longueur, 100 mm de largeur et 6mm d'épaisseur. Cette opération est réalisée à l'aide d'une tronçonneuse de grand model type ULTRA de caractéristiques suivantes :

- ✓ Alimentation : 220/380 V et 12,5 A ;
- ✓ Puissance : 5KW ;
- ✓ Fréquence : 50 Hz ;



Fig.IV.3 Métal de base en tôles découpes.

Fig.IV.4 Scie tronçonneuse.

IV.5.1.2. Réalisation du chanfrein

Pour l'exécution des soudures, bout à bout de trois plaquettes acier E24 /acier Hardox/inox310S, nous avons réalisé par fraisage sur un côté de chaque plaquette un chanfrein à 30° d'inclinaison pour obtenir un « V » de 60° le long des plaquettes (figure 4 et 5).

- ✓ Ecartement des bords : 4mm.
- ✓ Angle du chanfrein : 30°.
- ✓ Talon : 1mm.

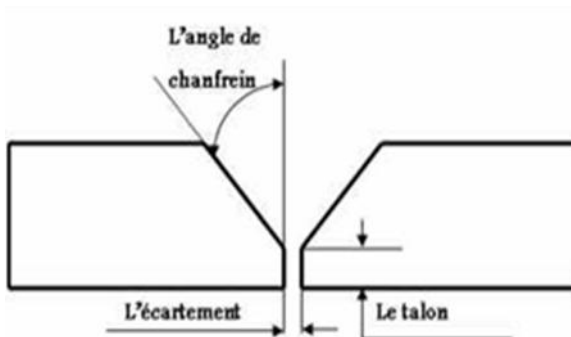


Fig.IV.5 Le croquis du chanfrein.



Fig.IV.6 Réalisé par fraisage un chanfrein à 30°.



Fig.IV.7 Deux plaquette acier inoxydable310S.

Pour la réalisation des assemblages, on a utilisé le procédé de soudage semi-automatique avec fil plein de diamètre 1.2 mm, procédé MIG (Métal Inerte Gaz), dont le poste à soudé est représenté ci-après :

- ✓ Alimentation primaire : 230 V / 240 V Triphasé.
- ✓ Consommation effective : 35,5 A / 20,5 A.

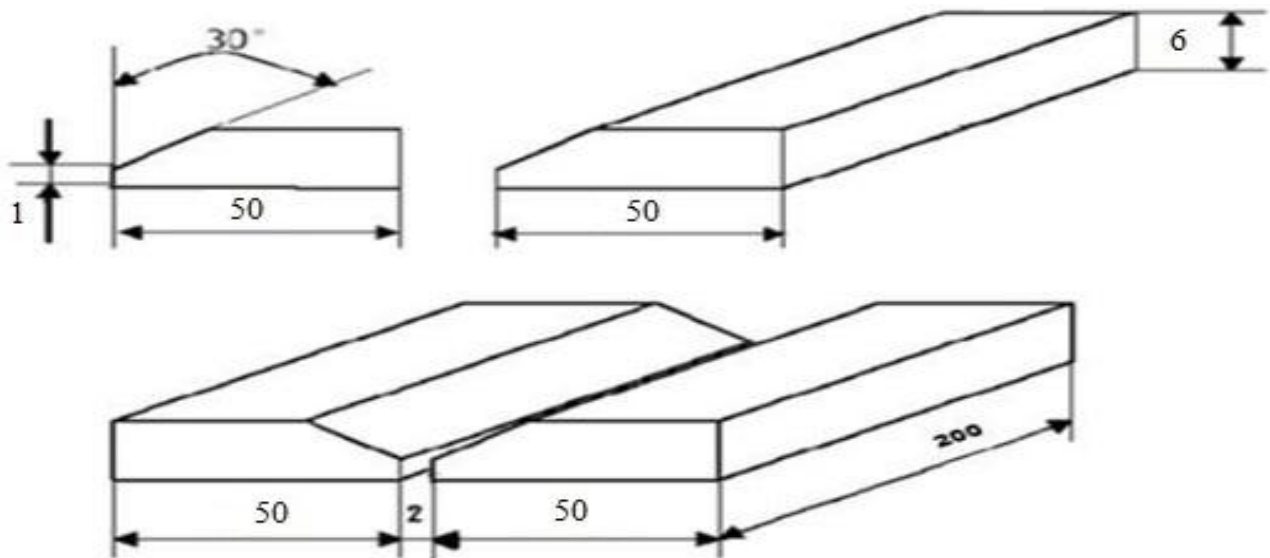


Fig.IV.8 Schéma de principe pour l'assemblage par soudage MIG des deux métaux de base sous forme de tôles fortes de 6 mm d'épaisseur.

IV.6. Matériel de soudage

Le poste de soudage utilisé pour la réalisation des cordons de soudure est un générateur **POWERTEC 425S** de LINCOLN ELECTRIC. C'est un générateur de courant de soudage continu à tension constante développant 420Ampères.

Il fonctionne à une alimentation triphasée, que ce soit avec les dévidoirs LF-22, LF- 24M ou LF-24MPRO, le générateur POWERTEC 425S est conçu pour le soudage MIG/MAG semi-automatique pour des applications lourdes sur acier, inox et Aluminium ainsi que l'utilisation de fil fourré sous mélange gazeux Argon/CO₂ ou avec 100% CO₂.

Il offre de nombreuses positions pour un réglage précis de la tension grâce au self de réglage pour un meilleur comportement de l'arc. Il est fabriqué conformément aux normes de sécurité et de fiabilité **IEC974-1 et CE**.



Fig.IV.9 Matériel utilisé pour le soudage.

IV.7. Les paramètres de soudage

Le choix des variables de soudage dépend du procédé de soudage et des exigences de l'ensemble soudé.

A chaque procédé de soudage correspond des variables qu'il faut respecter qui sont :

- ✓ Energie de soudage (courant et tension).
- ✓ Dimensions du fil de soudage $\varnothing = 1.2\text{mm}$.
- ✓ Vitesse de soudage. (Réglable selon le poste de soudage).
- ✓ Dimensions du cordon.

Nous avons préparé pour notre travail 3 plaquettes de différents métaux d'épaisseur égale 6mm. Nous divisons chaque plaque en deux parties égales et chaque partie en quatre parties de dimensions égales, et varions les conditions de soudage.

Nous insistons sur le fait de se rappeler que nous définissons les paramètres initiaux avant de commencer le soudage, mais la station dispose d'un système d'auto-réglage qui peut changer le courant et la tension pendant le soudage pour assurer un soudage parfait.

Notre objectif est de changer la tension et le courant et de surveiller les changements pendant le soudage.

La réalisation des soudures avec chanfrein ont nécessité une seule passe avec l'utilisation des paramètres consignés dans les tableaux suivantes.

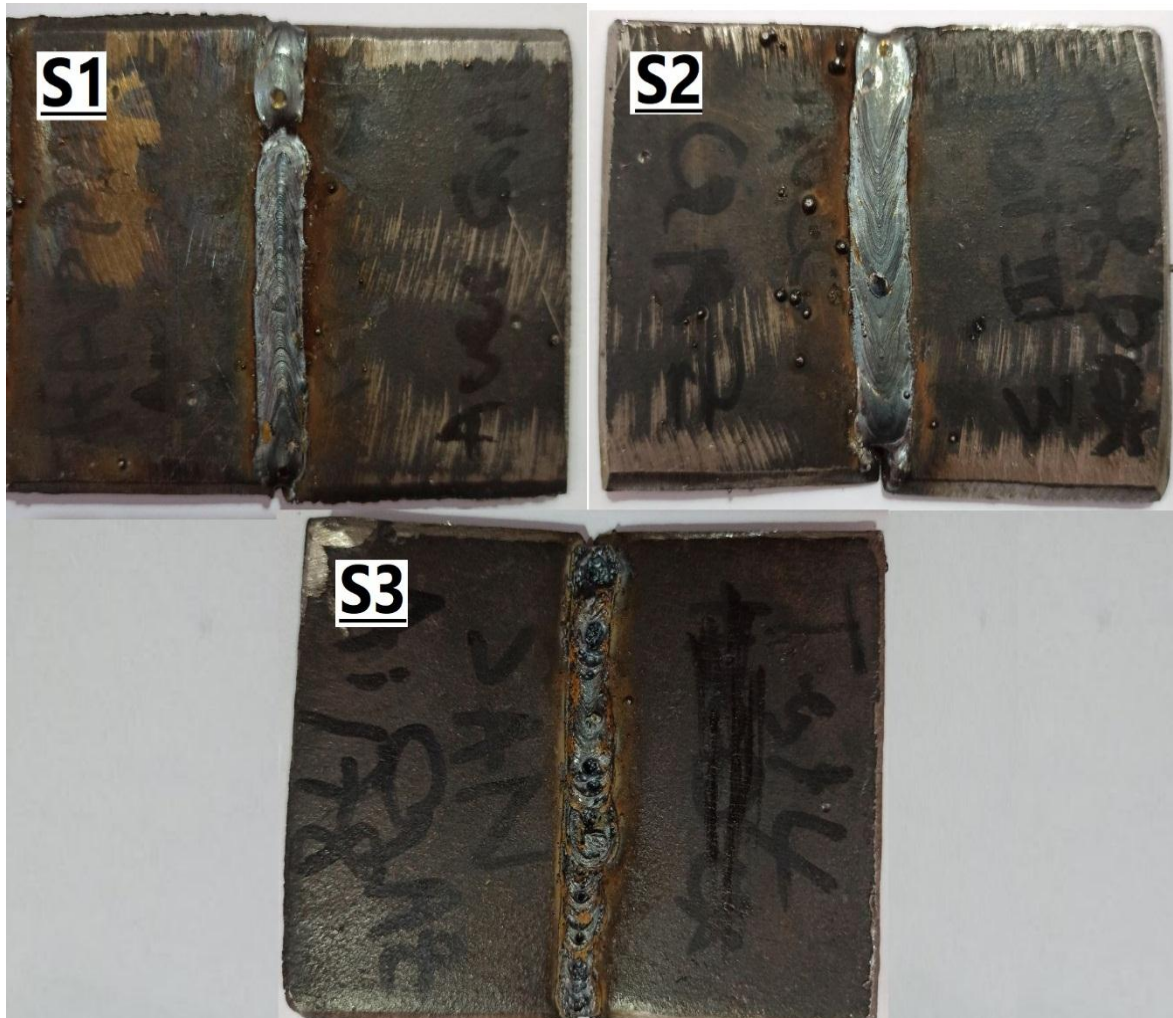
IV.7.1. Soudage deux parties du même matériau (soudage homogène)

Echantillon N°1 : en acier ordinaire E24 (acier noir ST37);

- **épaisseur de la tôle** : 6mm.
- **Vitesse du poste** : position B.
- **Vitesse de défilement du fil** : 4m/min.
- **Conditions initiales S1**: I=80A; U= 18V.

Tableau.IV.9 Paramètres d'intensité de soudage MIG en même type acier E24 (acier noir ST37).

Matériau : acier ordinaire E24 (noir ST37)/ acier ordinaire E24 (noirST37)				
Les soudures	Tension U (v)	Intensité du courant soudage I (A)	Présence GAZ de protection (Argon)	Type de transfert
S1	18V	Intensité Faible 80A	AVEC GAZ	Court circuit
S2	24V	Intensité Haut 197A	AVEC GAZ	Pulvérisation axiale
S3	20V	Intensité Moyenne 127A	SANS GAZ	Grosses gouttes

**Fig.IV.10** Éprouvettes N°1 après soudage.

Echantillon N°2 : en acier à haute résistance (**Hardox 450**);

- épaisseur de la tôle : 6mm.
- Vitesse du poste : position B.
- Vitesse de défilement du fil : 4m/min.
- Conditions initiales S1: I=172A; U= 20V.

Tableau.IV.10 Paramètres d'intensité de soudage Mig en même type de Hardox 450.

Matériau : acier à haute résistance (Hardox 450)/ acier à haute résistance (Hardox 450)				
Les soudures	Tension U (v)	Intensité du courant soudage I (A)	Présence GAZ de protection (Argon)	Type de transfert
S1	20V	Intensité Faible 172A	AVEC GAZ	Court circuit
S2	24V	Intensité Moyenne 210A	AVEC GAZ	Pulvérisation axiale
S3	26V	Intensité Haut 238A	AVEC GAZ	Pulvérisation axiale
S4	23V	Intensité Moyenne 210A	SANS GAZ	grosse gouttes

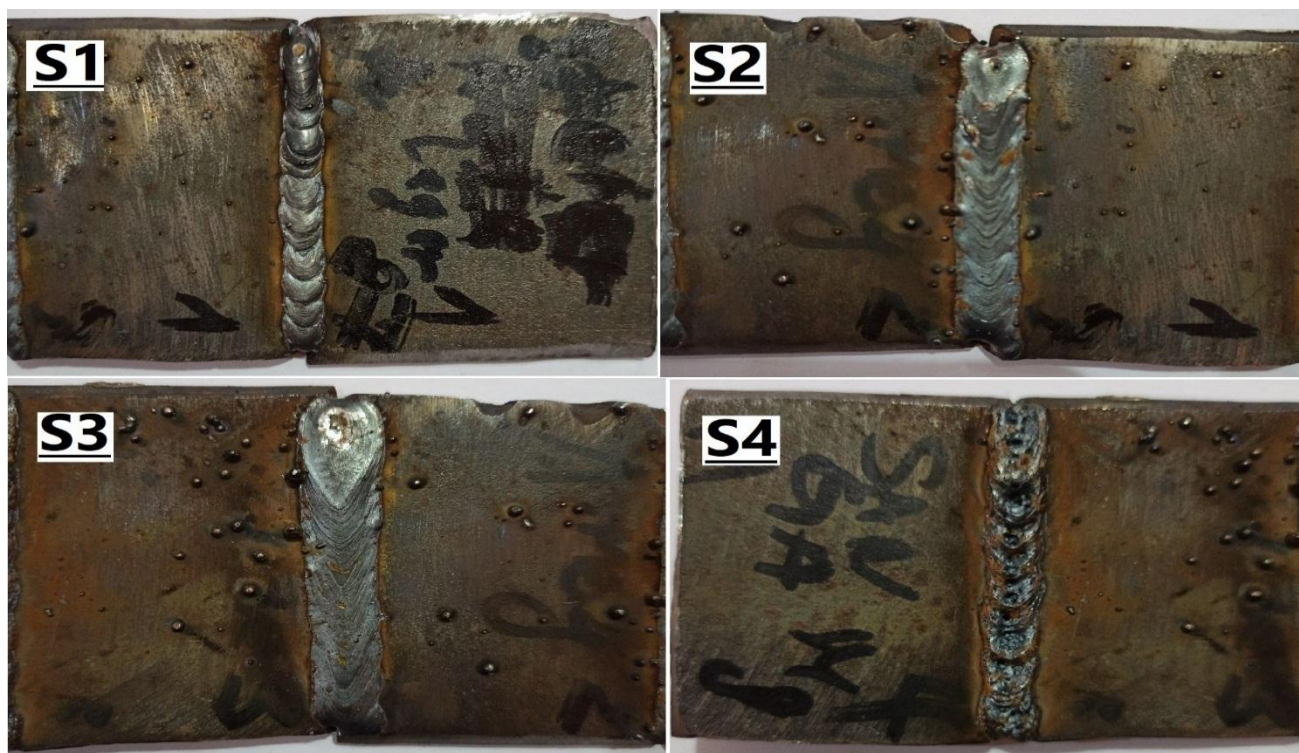


Fig.IV.11 Éprouvettes N°2 après soudage.

Echantillon N°3 : en acier inoxydable (310S);

- épaisseur de la tôle : 6mm.
- Vitesse du poste : position C.
- Vitesse de défilement du fil : 4m/min.
- Conditions initiales S1: I=130A; U= 20V.

Tableau. IV.11 Paramètres de l'intensité soudage Mig en même type d'acier inoxydable (310S).

Assemblage Matériau : acier inoxydable (310S)/ acier inoxydable (310S)				
Les soudures	Tension U (V)	Intensité du courant soudage I (A)	Présence GAZ de protection (Argon)	Type de transfert
S1	20V	Intensité Faible 130A	AVEC GAZ	Court circuit
S2	24V	Intensité Moyenne 205A	AVEC GAZ	Grosses gouttes
S3	25V	Intensité Haut 228A	AVEC GAZ	Pulvérisation axiale
S4	23V	Intensité Moyenne 190A	SANS GAZ	Grosses gouttes

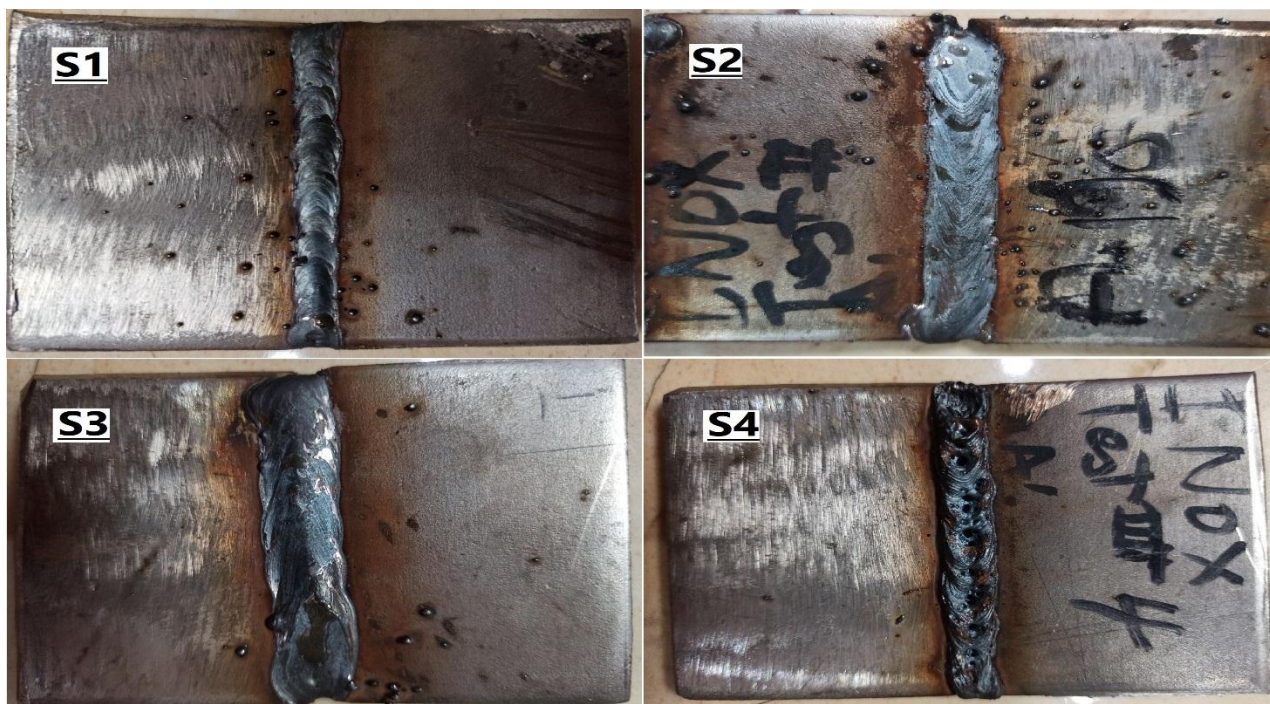


Fig.IV.12 Éprouvettes N°3 après soudage.

IV.7.2. Soudage deux parties du différent matériau (soudage hétérogène)

- épaisseur de la tôle : 6mm.
- Vitesse du poste : position A.
- Vitesse de défilement du fil : 3m/min.

Tableau.IV.12 Paramètres de l'intensité soudage Mig du Différent matériau.

Matériau : acier E24 (noirST37) / acier inoxydable (310S)				
Les soudures	Tension U (V)	Intensité du courant soudage I (A)	Présence GAZ de protection (Argon)	Type de transfert
S1	20V	Intensité Faible 120A	AVEC GAZ	Court circuit
S2	23V	Intensité Moyenne 180A	AVEC GAZ	Grosses gouttes
Matériau : acier E24 (noirST37) / acier à haute résistance (Hardox 450)				
S3	21V	Intensité Moyenne 153A	SANS GAZ	Grosses gouttes

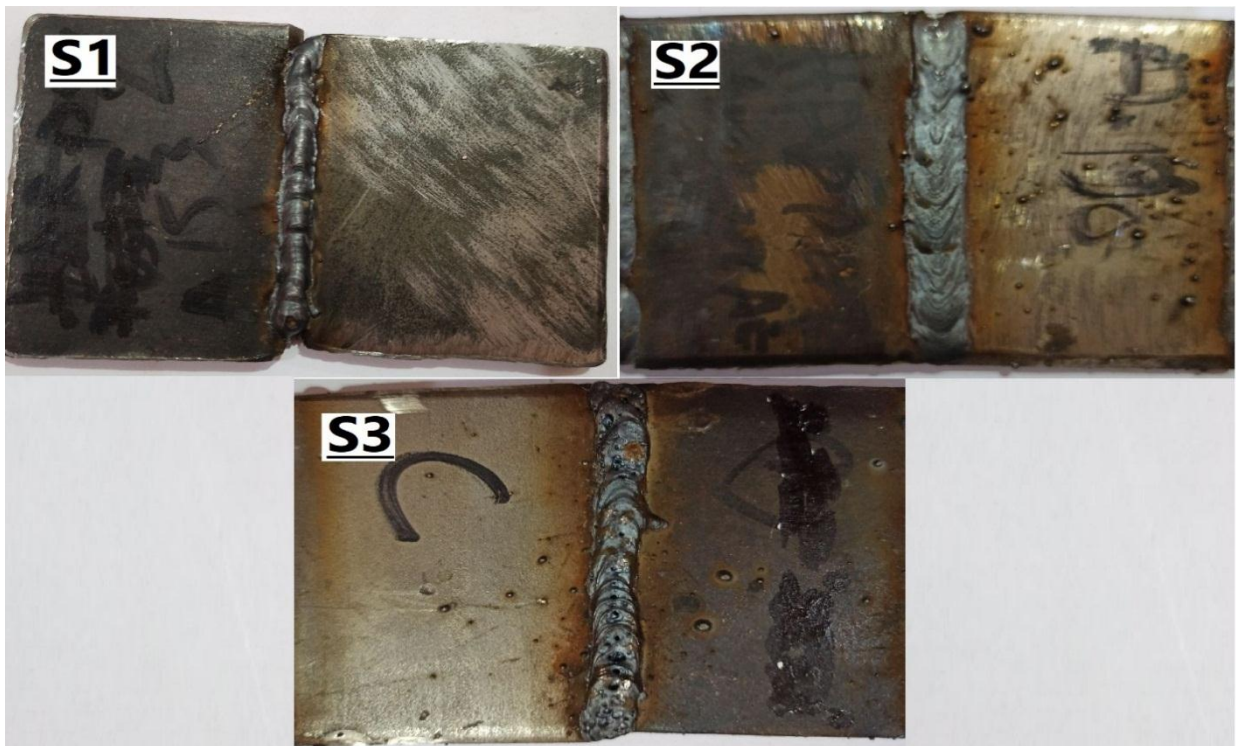


Fig.IV.13 La forme de la plaquette soudage différent métallique (après soudage).

IV.8. CONCLUSION GENERALE

Notre contribution à l'étude des propriétés de soudage MIG était liée à l'amélioration des paramètres de soudage tels que le courant, la tension, la vitesse d'alimentation des fils et le flux de gaz protecteur. Nous avons examiné l'impact de ces paramètres sur la qualité du soudage, en mettant l'accent sur la pénétration, la formation de défauts et la stabilité à l'arc.

Grâce à ces recherches, nous avons pu optimiser les réglages de soudage pour obtenir des soudures de haute qualité, avec une pénétration adéquate et une faible formation de défauts. Comprendre les propriétés des différents gaz de protection utilisés dans le soudage MIG nous a permis de choisir le gaz approprié pour répondre aux exigences spécifiques de chaque soudure.

En outre, nous avons étudié l'impact de divers gaz de blindage utilisés dans le soudage MIG, tels que l'argon, le dioxyde de carbone ou les mélanges de gaz, sur les propriétés de soudage. Chaque gaz a des propriétés spécifiques qui peuvent affecter la pénétration, la stabilité de l'arc et la tache (projection de métal fondu) pendant le soudage. Comprendre les performances de chaque gaz nous permet de choisir le gaz approprié en fonction des exigences de soudage.

En bref, notre contribution à l'étude des propriétés de soudage MIG était liée à l'amélioration des paramètres de soudage, à l'analyse des gaz de protection et à l'exploration des configurations des équipements, dans le but d'améliorer la qualité du soudage et le procédé de soudage pour diverses applications industrielles.

RÉFÉRENCES

- [1] S. BENSAADA.D. FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ». Office de publication universitaires.2e Edition.01-2009.
- [2] MOUSSAI A. TOUFIK « Thèse MAGISTER 2004 ».
- [3] Wikipédia l'encyclopédie libre / Procédés de soudage de pièces métalliques.
- [4 ; 5] Régis BLONDEAU. ‘ ‘ Métallurgies ET mécanique du soudage’ ’. Edition Lavoisier, paris .pp23.
- [6] Principaux procédés du soudage, description, démarche d’évaluation et prévention des risques.
- [7] <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/131-soudage-oxyacetylenique.html>.
- [8] <http://www.rocdacier.com/ressource.n.508/soudage-oxyacetylenique-chalumeau-0a-11.html>.
- [9] Principaux procédés du soudage, description, démarche d’évaluation et prévention des risques.
- [10 ; 11] Roland CAZES. ‘ ‘Soudage à l’arc’ ’ techniques d’ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7730.
- [12] Régis BLONDEAU. ‘ ‘Métallurgie et mécanique du soudage’ ’. Edition LAVOISIER, PARIS .pp31.
- [13] Régis BLONDEAU. ‘ ‘Métallurgie et mécanique du soudage’ ’. Edition LAVOISIER, PARIS .pp36.
- [14] <https://www.orexad.com/soudage-tig>.
- [15] Régis BLONDEAU. ‘ ‘Métallurgie et mécanique du soudage’ ’. Edition LAVOISIER, PARIS .pp34.
- [16] <http://www.rocdacier.com/ressource.n.541/le-soudage-mig-mag-semi-automatique-gmaw.html>.
- [17;18] <http://ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/137-le-soudage-plasma.Pdf?Type=raw>.
- [19] Le soudage par PLASMA. Cours technologie Par: Rocardier.
- [20 ; 21] Soudage vertical sous laitier. <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/141-le-soudage-vertical-sous-laitier.html>.

- [22] Soudage par faisceau d'électron, <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/139-le-soudage-par-faisceau-delectron.html>.
- [23] Roland CAZES. "Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d'électrons et laser" techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7740.
- [24] <http://www.a21-laser.com/index.php?page=soudure>.
- [25 ; 26] Roland CAZES. "Soudage par résistance", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp3.
- [27] Roland CAZES. "Soudage par résistance", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp8.
- [28] Roland CAZES. "Soudage par résistance", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp12.
- [29] Roland CAZES. "Soudage par résistance", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp16.
- [30] Dmitri Kopeliovich." Resistance Welding (RW)".
- [31] Régis BLONDEAU. "Métallurgie et mécanique du soudage". Edition LAVOISIER, PARIS. pp45.
- [32] Roland CAZES. "Soudage par friction", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage .Article B7745.
- [33] https://www.researchgate.net/figure/265125708_fig1_Figure-1-Illustration-du-principe-de-soudage-par-friction-malaxage-Ce-type-de-soudage. consulté le 27/03/2017.
- [34] Régis BLONDEAU. "Métallurgie et mécanique du soudage". Edition LAVOISIER, PARIS .pp47.
- [35] Amal BAHIJ - Hamza BENBOUBADDI, " SOUDAGE PAR EXPLOSION".
- [36] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4063, " Welding and allied processes -Nomenclature of processes and reference numbers ". Third edition 1998-09-01.
- [37] "Welding Metallurgy and Weldability" de John C. Lippold ET Damian J. Kotecki.

- [38] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " Livre de l'acier ", Ed. SOLLAC, 1996.
- [39] Mémoire de master (Caractérisations mécaniques et structurales d'un acier de construction des pipelines (API 5L X60)) d'Ahlam ACHOURI, Université de Biskra.
- [40] De 10 Em Edition Metals Handbook International American Society of Matériels, (1990).
- [41] A. BOUMARAF, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilisé Dans La Fabrication Des Bouteilles A Gaz », », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, (2015).
- [42] F. GHomari, Sciences Des Matériaux De Construction, Université Abubekr Belkaid.
- [44] matériaux et traitements (partie 1) document élaboré par : nica dorina, royaume du Maroc.
- [45] P. Lacombe, G. Béranger, Structures et Diagrammes d'Equilibre des Diverses Nuances d'Aciers Inoxydables Prévention de la Corrosion, Les éditions de physique, (1990), p 11-38.
- [46] O. Bletton, Les Aciers Inoxydables Martensitiques, Les éditions de physique, (1994), p 491-500.
- [47] M. Hansen, Constitution of Binary Alloys, and Edition Mc Graw Hill, New York.
- [48] J. Baralis & G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [49] Pierre-Jean CUNAT, « Aciers inoxydables : Critères de choix et structure», Technique de l'ingénieur ; M4540.
- [50] K.LO, C.H.shek, J.K.L.Lai: Recent development in stainless steels, Materials science and engineering R65 (2009).
- [51] Hervé SASSOULAS : Traitements thermiques des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur, M 1160.
- [52] Technique de l'ingénieur M 4661 par Christian Vargel.
- [53] M. Colombie et .Coll. Matériaux Industrie, Matériaux métalliques, édition, 2000.
- [54] www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin.
- [55] Claire König. FUTURA Science. L'Aluminium un métal d'exception. P 24. Avril, 2008.

- [56] Ce n'est pas sorcier –aluminium.<https://www.youtube.com/watch?v=xblulgnrfa> 15 mai 2016. 09h30.
- [57] Raymond Loewy, L'Aluminium. Série de technologie ,2009.
- [58] <http://www.sfrcegetel.fr/fabrication-aluminium-portail-en-aluminium-coulissant-8542/>.
- [59] I.Lakhtine. Métallographie et traitement thermiques des métaux, 2éme édition.
- [60] Effet de mode d'élaboration et des traitements sur la caractéristique mécanique et la microstructure d'un alliage de fonderie. 2008.
- [61] Vennekens, EWE- institue belge de la soudure. Cahier IBS. Classification des alliages d'aluminium.
- [62] R. Blondeau. Procédés et application industrielle du soudage. LAVOISIER Paris, 2001.
- [63] R. Varisellaz« SOUDAGE Eléments de conception et de réalisation », Bordas, Paris, 1982.
- [64] K. Weman. Aide mémoire : procédés de soudage. Dunod Paris, 2005.
- [65] Rocardier : Cours pour apprendre la soudure et la chaudronnerie ; [392] publié le 15 août 2017 par rocdacier [39 074 vues].
- [66] K. Weman et G. Linden, « Guide du soudage MIG » Editeur : Dunod, Octobre 2007.
- [67] Rocardier ; Cour Le soudage MIG MAG, semi-automatique GMAW.
- [68] K. KHELIL, « Soudage Des Pipelines », Mémoire D'ingénieur En Métallurgie, Université De Mohamed Kheider ; Biskra, (2010).
- [69] Bachir Mezrag. " Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT Matériaux.
- [70] J. Delair. "Rechargement utilisés dans les assemblages soudés". Applications industrielles, Matériaux et Techniques, n°3-4, pp. 49-56, 1998.
- [71] L. Devillers, D. Kaplan, A. Ribes, P. V. Riboud, Métallurgie et propriétés mécanique du métal fondu en soudage multipasse sous Fux d'acier au C- Mn micro-allié, Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, n°1, pp. 43-62, 1986.

- [72] USINOR. " Approche sur la soudabilité métallurgique des aciers", Rapport usinor-jpj- 09/85-438vl.
- [73] H. Granjon. "Bases métallurgique du soudage", 2eme édition Publication du soudage et de ses applications, 1995, 251p.
- [74] < service formation – qualification – assistance > < Le soudage Le procédé MIG MAG >.
- [75] R. Cazes. Procédés de soudage (principes généraux et critères de choix). Technique d'ingénieur, (B 7 700), 1995.
- [76] Emilie Le Guen. " Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique". Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, 2010.
- [77] « Guide du soudage MIG » par Klass Weman, Gunnar Lindén.
- [78] « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc » par Jean-Pierre Planckaert.
- [79] Roc acier : Cour Le soudage MIG MAG, semi-automatique GMAW ; [486] publié le 15 août 2017 par roc acier [80626 vues].
- [80] USINOR. " Approche sur la soudabilité métallurgique des aciers", RAPPORT USINOR-JPJ-09/85-438VL.