

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -  
Université Abou Baker Belkaid - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En : Génie mécanique**

**Spécialité : Assemblages Soudés et Matériaux**

**Par : BENTAIBI YUCEF**

### Sujet

Essai de pliage de deux éprouvettes d'un même matériau soudée par deux métaux d'apport différents et leurs influences sur le joint de soudure : cas d'un acier API 5L X60.

Soutenu publiquement, le 19/06/2022, devant le jury composé de:

Mr. HADJOUI Abdelhamid	Prof	Univ. Tlemcen	Président
Mr. ACHOUI Mohammed	MAA	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr. GUENIFED Abdelhalim Farouk	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

## Remerciements

*Je remercie **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Le présent mémoire a été dirigé par Monsieur **ACHOUI Mohammed**, c'est grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser. Je lui exprime mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements. Et également, j'associe mes remerciements à Monsieur **BOUREBAA Abdallah** et Madame **BEKHTI Djamila** pour tous ces conseils, de m'avoir guidé ou long de cette étude.*

*Je remercie Monsieur **HADJOUI Abdelhamid** et le Monsieur **GUENIFED Abdelhalim Farouk** qui ont accepté d'évaluer et juger le présent travail.*

*Je remercie mon camarade **BOUREBAA Med EL Amine** pour ces efforts dans la période de travaille.*

*Je tiens remercier mon collègue **MEGUELLATNI Ikram** pour tous les efforts de correction de cette mémoire.*

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

## Dédicaces

*Je commence mes dédicaces les plus personnels à mes parentes.*

*Pour mon père et ma mère, la richesse d'une vie, mais aussi leurs patiences,  
merci pour eux.*

*Ainsi à :*

*Toute la famille BENTAIBI*

*Tous mes amis.*

*Toute la promotion de la deuxième année Master Assemblages Soudés et  
Matériaux 2021/2022.*

## Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Sommaire.....	III
Résumé.....	VIII
ملخص.....	IX
Abstract.....	X
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des abréviations.....	XIV
Introduction générale.....	1

### Chapitre 01. Généralités sur le soudage

1. Les différents types de procédés de soudage.....	5
1.1. Le procédé de soudage à l'ARC E.E. / MMA / SMAW / 111.....	5
1.1.1. Définition du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées.....	5
1.1.2. Principe du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées.....	6
1.1.3. Définition de l'électrode enrobée.....	6
1.1.4. Classification des enrobages des électrodes enrobées.....	7
1.1.5. Étuvage des électrodes enrobées.....	7
1.1.6. Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées.....	7
1.1.7. Formules de calcul pour déterminer les paramètres par diamètre des électrodes enrobées.....	9
1.1.8. Vitesse et énergie de soudage par diamètre des électrodes enrobées.....	9
1.1.9. La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension.....	10
1.1.10. La polarité de l'électrode enrobée.....	10
1.1.11. Les différents transferts du métal dans l'arc de soudage.....	11
1.1.12. Les différents types de générateurs de soudage.....	12
1.1.13. Matériels de soudage par fusion.....	12
1.1.14. Le croquis didactique du procédé de soudage 111.....	13
1.1.15. Quelques préparations de joints.....	13
1.2. Le procédé de soudage TIG / GTAW / 141.....	14
1.2.1. Définition du procédé TIG / 141 / GTAW.....	14
1.2.2. Principe du procédé de soudage.....	15
1.2.3. Avantages du procédé de soudage.....	15
1.2.4. Inconvénients du procédé de soudage.....	15
1.2.5. Matériels de soudage pour le soudage TIG / 141.....	16
1.2.6. L'affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG.....	17
1.2.7. Les gaz industriels de soudage en TIG / GTAW.....	17

1.2.8.	Préparations de joints pour le soudage TIG .....	19
1.3.	Le procédé de soudage arc plasma / PAW (procédé 15) .....	20
1.3.1.	Définition du procédé de soudage arc plasma .....	20
1.3.2.	Principe du procédé de soudage arc plasma .....	21
1.3.3.	Avantages du procédé de soudage arc plasma .....	22
1.3.4.	Différents types de procédés à l'arc plasma .....	22
1.3.5.	Températures d'un arc plasma .....	22
1.3.6.	Matériels de soudage ARC PLASMA .....	23
1.3.7.	Différents types d'électrodes infusibles pour le soudage ARC PLASMA .....	23
1.3.8.	L'affûtage de l'électrode infusible pour le plasma .....	23
1.3.9.	Les gaz de soudage utilisés en soudage plasma .....	24
1.3.10.	Préparations de joints et paramètres pour le soudage ARC PLASMA .....	25
1.4.	Le procédé de soudage MIG – MAG .....	25
1.4.1.	Les modes de transferts du procédé MIG/MAG .....	26
1.4.2.	Pistolet de soudage .....	27
1.4.3.	Composants de pistolet de Mig-Mag .....	28
1.4.4.	Les avantages du soudage MIG/MAG .....	28
2.	Les métaux d'apport .....	29
2.1.	Baguette enrobée cellulosique .....	29
2.1.1.	Signification de la baguette de soudage E6010 .....	29
2.1.2.	Type de couverture de l'électrode E6010 .....	30
2.1.3.	Electrode E6010 Spécification et classification .....	30
2.1.4.	Exigences Charpy V-Notch Impact (ténacité) pour l'électrode de type E6010.....	31
2.1.5.	Stockage et cuisson/reconditionnement de l'électrode E6010 .....	31
2.1.6.	Sélection du courant pour l'électrode E6010 .....	31
2.1.7.	Utilisations de la baguette de soudage E6010 .....	32
2.1.8.	Caractéristiques de l'électrode de type E6010 .....	32
2.2.	Baguette enrobée de base (basique) E7018 .....	32
2.2.1.	Caractéristiques .....	33
2.2.2.	Classification et désignations .....	34
2.2.3.	Techniques .....	35
2.2.4.	Emballage, stockage, manipulation et reconditionnement .....	35
2.3.	Baguette enrobée rutil (E6013) .....	36
2.3.1.	Signification de la baguette de soudage E6013 .....	36
2.3.2.	Type de couverture de l'électrode E6013 .....	36
2.3.3.	Différence entre E6012 et E6013 .....	37
2.3.4.	Electrode E6013 Spécification et classification .....	37

2.3.5.	Exigences Charpy V-Notch Impact (ténacité) pour l'électrode de type E6013.....	37
2.3.6.	Stockage et cuisson/reconditionnement de l'électrode E6013 .....	37
2.3.7.	Sélection du courant pour l'électrode E6013 .....	38
2.4.	Désignation d'électrodes .....	38
3.	Les risques des fumés .....	39
3.1.	Un risque majeur .....	39
3.2.	Effets sur la santé .....	39
3.3.	Effets des radiations sur les yeux et sur la peau .....	40
3.3.1.	Les types de radiations sont associés au soudage .....	40
3.3.2.	Les symptômes du « coup d'arc » .....	41
3.3.3.	L'effet de soudage aux yeux.....	41
3.3.4.	Les dangers des radiations produites lors du soudage présentent elles pour la peau.....	41

## **Chapitre 02: Défauts de soudage, et CND**

1.	Les principaux défauts de soudage.....	44
1.1.	Défauts de soufflures ou cavités .....	44
1.1.1.	Types de soufflures fréquentes .....	44
1.1.2.	Cause des soufflures .....	45
1.1.3.	Remèdes contre le défaut de soufflures .....	45
1.2.	Défauts de fissure .....	45
1.2.1.	Types de fissures fréquentes .....	45
1.2.2.	Causes des fissures .....	46
1.2.3.	Remèdes contre les fissures .....	46
1.3.	Défauts d'inclusion .....	47
1.3.1.	Types d'inclusions fréquentes .....	47
1.4.	Défaut de manque de fusion (collage) .....	47
1.4.1.	Types de manque de fusion .....	47
1.4.2.	Cause des défauts de collage .....	48
1.5.	Défauts de pénétrations .....	48
1.5.1.	Cause des défauts d'excès de pénétration .....	48
1.5.2.	Cause des défauts de manque de pénétration .....	49
1.6.	Défaut d'effondrement .....	49
1.6.1.	Types d'effondrements .....	50
1.7.	Défauts retassures et criques .....	50
1.8.	Morsures et Caniveau .....	51
1.9.	Défauts géométriques des cordons .....	51
1.9.1.	Défaut de convexité.....	51

1.9.2.	Défaut de concavité.....	52
1.9.3.	Défaut d'alignement .....	52
1.9.4.	Déformations angulaires .....	52
1.9.5.	Défauts du au recharge .....	53
2.	Contrôle Non Destructif (CND).....	54
2.1.	Utilisations du contrôle non destructif .....	54
2.2.	Technique de contrôle non destructif .....	54
2.2.1.	Avant soudage .....	54
2.2.2.	Pendant soudage .....	55
2.2.3.	Après soudage .....	55
2.2.3.1.	Les essais destructifs .....	55
2.2.3.2.	Les essais non destructifs .....	55
a)	Contrôle visuel .....	55
b)	Contrôle par ressuage .....	56
c)	Contrôle par magnétoscopie .....	57
d)	Contrôle par ultrasons .....	57
e)	Contrôle par radiographie .....	58

### **Chapitre 03: Etude expérimentale**

1.	Présentation du matériau (API 5L X60) .....	60
1.1.	Différences entre API 5L X60 PSL 1 et PSL 2.....	61
1.2.	Composition chimique et mécanique API 5L X60 .....	61
2.	Métaux d'apport .....	62
2.1.	Composition chimique.....	62
2.2.	Propriétés mécaniques .....	62
3.	Les dessins Techniques des pièces soudées .....	63
4.	Procédures .....	65
4.1.	Préparation de chanfrein .....	65
4.2.	Réglage les paramètres de soudage .....	66
4.3.	Positionnement des tubes par pointage .....	66
4.4.	L'opération de soudage .....	67
4.5.	Tubes à assemblés .....	67
5.	Contrôle du joint de soudure .....	68
5.1.	Contrôle Visuel .....	68
5.1.1.	Les moyennes à être en œuvre .....	68
5.1.2.	Résultats de contrôle visuel .....	68
5.1.2.1.	Constatations des joints soudé à l'électrode enrobée « B » .....	68
5.1.2.2.	Constatations des joints soudés à électrode enrobée « A » .....	69
5.2.	Essai de flexion .....	69

5.2.1.	Localisation des éprouvettes de pliage dans un joint soudé .....	70
5.2.2.	Les différents types de pliages .....	70
5.2.3.	Essai avec poinçon .....	70
5.2.3.1.	Eprouvette.....	70
5.2.4.	L'identification de l'éprouvette .....	71
5.2.4.1.	Les Paramètres d'essai de pliage .....	71
5.2.4.2.	Les éprouvettes avant pliage .....	71
5.2.4.3.	Les éprouvettes pendant le pliage .....	71
5.2.5.	Résultats d'essai de flexion .....	72
5.2.5.1.	Eprouvette soudé par électrode « A » .....	72
5.2.5.2.	Eprouvette soudé par électrode « B ».....	72
	Interprétations .....	73
	Conclusion générale.....	77



## Résumé

Le soudage consiste à créer une continuité métallique entre les pièces à assembler.

Pour la qualité de cordon de soudure, j'ai fait un Contrôle Visuel et un contrôle de flexion des pièces à soudées.

La nature de ces pièces soudées est un : « API 5L X60 » d'épaisseur (10 mm). Les pièces sont assemblées par l'électrode enrobée, à différentes métaux d'apport (cellulosique 6010 et rutile 6013).

Le contrôle visuel a révélé quelques défauts dans le tube soudé avec l'électrode enrobée rutile.

Le contrôle de flexion a révélé l'avantage de tube soudé avec l'électrode enrobée cellulosique que le tube soudé avec l'électrode enrobée rutile.

**Mots clés** : types d'électrodes enrobées ; enrobage des électrodes ; paramètres de soudage à l'arc électrique ; réglage du poste à souder ; transfert du bain de fusion ; API 5L X60.

## ملخص

يتكون اللحام من انشاء استمرارية معدنية بين الأجزاء المراد تجميعها،

بالنسبة لجودة اللحام ، أجريت فحصًا بصريًا وفحصًا للثني للأجزاء الملحومة.

طبيعة هذه الأجزاء الملحومة هي: "API 5L X60" بسمك (10 مم). يتم تجميع الأجزاء بواسطة اللحام

بالقوس الكهربائي ، بمعدن حشو مختلفة (السليولوز 6010 والروتيل 6013).

كشفت الفحص البصري عن بعض العيوب في الأنبوب الملحوم بالقطب الكهربائي المطلي بالروتيل.

كشفت التحكم في الانحناء عن ميزة الأنبوب الملحوم بالكترود مطلي بالسليولوز أكثر من الأنبوب الملحوم بالقطب الكهربائي المطلي بالروتيل.

**الكلمات المفتاحية:** أنواع الأقطاب الكهربائية، غلاف الأقطاب الكهربائية، إعدادات اللحام بالقوس الكهربائي؛

ضبط جهاز اللحام، تحويل اللحام المنصهر ; API 5L X60

## **Abstract**

Welding consists in creating metallic continuity between the parts to be assembled.

For the quality of the weld bead, I did a Visual Inspection and a bending inspection of the welded parts.

The nature of these welded parts is: "API 5L X60" thick (10 mm). The parts are assembled by the coated electrode, with different filler metals (cellulosic 6010 and rutil 6013).

This visual inspection revealed some defects in the tube welded with the rutile coated electrode.

The flexion contrôle revealed the advantage of tube welded with cellulosic coated electrode than tube welded with the rutile coated electrode.

**Key words.** types of coated electrodes; coating of electrodes; parameters of electric arc welding; adjustment of the welder; transfer of the weld pool; API 5L X60.

## Liste des figures

### Chapitre 01

Figure a: Organigramme de soudage .....	4
Figure I.1: soudage à l'arc à l'électrode enrobée .....	5
Figure I.2: Electrode enrobée .....	6
Figure I.3: Courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension .....	10
Figure I.4: Présentation de pénétration .....	10
Figure I.5: Présentation de Remplissage .....	11
Figure I.6: transfert court-circuit .....	11
Figure I.7: transfert vol libre .....	11
Figure I.8: transfert par pulvérisation .....	12
Figure I.9: Matériels de soudage 111 .....	13
Figure I.10: Principe de soudage TIG .....	14
Figure I.11: Matériels de soudage TIG .....	16
Figure I.12: Présentation de la torche de TIG .....	16
Figure I.13: Préparation de Tungsten .....	17
Figure I.14: Principe de procédé de soudage arc plasma .....	20
Figure I.15: Torche de soudage arc plasma .....	21
Figure I.16: Températures d'un arc plasma .....	22
Figure I.17: Affûtage de l'électrode .....	24
Figure I.18: équipement de soudage Mig-Mag .....	26
Figure I.19: Transfert du métal .....	27
Figure I.20: pistolet de soudage et gaine d'amenée du fil .....	27
Figure I.21: Électrode 6010 .....	30
Figure I.22: Baguette enrobée rutile .....	36
Figure I.23: Désignation des électrodes.....	38
Figure I.24: Fumés de soudage .....	40
Figure I.25: types de radiations sont associés au soudage .....	40

### Chapitre 02

Figure II.1: Soufflures et cavités .....	44
Figure II.2: Les fissures .....	46
Figure II.3: Fissure sur rail .....	46
Figure II.4: Inclusion .....	47
Figure II.5: Manque de fusion .....	48
Figure II.6: Excès de pénétration .....	48

Figure II.7: Manque de pénétration .....	49
Figure II.8: Effondrement en corniche .....	50
Figure II.9: Retassure de cratère .....	50
Figure II.10: Morsures et Caniveau .....	51
Figure II.11: Convexité .....	51
Figure II.12: Concavité .....	52
Figure II.13: Défaut d'alignement .....	52
Figure II.14: Déformation angulaire .....	53
Figure II.15: Défaut de rochage .....	53
Figure II.16: Essai de texture .....	55
Figure II.17: Etape de control visuel .....	56
Figure II.18: Les étapes de contrôle par ressuage .....	56
Figure II.19: Poudre magnétique de contrôle par magnétoscopie .....	57
Figure II.20: champ magnétique .....	57
Figure II.21: Principe d'ultrason .....	58
Figure II.22: Principe de contrôle par Radiographier .....	58

### **Chapitre 03**

Figure III.1: Tuyau API 5L X60.....	61
Figure III.2: Dessin de joint soudé d'E6010 .....	63
Figure III.3: Dessin de joint soudé d'E6013 .....	64
Figure III.4: a) Représentation du Chanfrein, b) Dessin pour représenté les passes .....	65
Figure III.5: Pièces chanfreinés .....	65
Figure III.6: Positionnement et pointage de tube .....	66
Figure III.7: l'opération de soudage .....	67
Figure III.8: Photo des pièces finies.....	67
Figure III.9: 1) Manque de fusion, 2) Manque de pénétration .....	69
Figure III.10: Principe de l'essai de pliage .....	69
Figure III.11: position d'éprouvette de pliage .....	70
Figure III.12: Eprouvette soudé avec 6013 .....	71
Figure III.13: Eprouvette soudé avec 6010 .....	71
Figure III.14: L'éprouvette pendant le pliage.....	71
Figure III.15: les éprouvettes après l'essai de pliage .....	72
Figure III.16: Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6010 .....	72
Figure III.17: Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6013 .....	73

## Liste des tableaux

### Chapitre 01

Tableau I.1: Intensité moyenne de soudage E.E pour la position à plat .....	8
Tableau I.2: Intensité moyenne de soudage pour la position à plat par rapport à l'épaisseur .....	8
Tableau I.3: Vitesse et énergie de soudage ou apport de chaleur pour la position à plat .....	9
Tableau I.4: Quelques préparations de joints .....	13
Tableau I.5: Gaz de protection endroit pour le soudage TIG .....	18
Tableau I.6: Quelques Préparations de joints pour le soudage TIG .....	19
Tableau I.7: Quelques préparations de joints .....	25
Tableau I.8: Modes Opératoires typiques .....	32
Tableau I.9: Modes Opératoires typiques .....	35
Tableau I.10: Le réglage de courant .....	38

### Chapitre 02

Tableau II.1: les zones d'ultrasons .....	57
---	----

### Chapitre 03

Tableau III.1: Différences entre API 5L X60 PSL1 et PSL2 .....	61
Tableau III.2: Analyse chimique et mécanique API 5L X60 PSL2 .....	61
Tableau III.3: Composition chimique des métaux d'apport .....	62
Tableau III.4: Propriétés mécaniques des métaux d'apport .....	62
Tableau III.5: Paramètres d'éprouvette .....	70
Tableau III.6: Paramètres d'essai de pliage .....	71
Tableau III.7: Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E60 10 .....	72
Tableau III.8: Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E60 13 .....	72

## Liste des abreviation

E.E : Electrode Enrobée  
MMA: Metal Manuel Arc  
SMAW: Shielded Metal Arc Welding  
111: Soudage à l'arc avec Electrode Enrobée  
 $U_0$  : La tension à vide de générateur  
 $\varnothing$  : Diamètre  
I : Intensité de soudage en Ampères (A)  
e : Diamètre de l'électrode  
U : Tension de soudage en Voltes (V)  
E : L'énergie de soudage (J/mm)  
 $V_s$  : Vitesse d'avance de l'arc électrique (mm/s)  
TIG: Soudage Tungsten Inert Gas  
GTAW: Gas Tungsten Arc Welding  
141: Soudage Tungsten Inert Gas  
PAW: Plasma Arc Welding  
PA: Position à Plat  
PC: Position à Courniche  
PF: Position à Montant  
M.I.G: Metal Inert Gas  
M.A.G: Metal Active Gas  
G.M.A.W: Gas Metal Arc Welding  
E6010: Electrode en Cellulose  
ASME: American Society of Mechanical Engineers  
AC: Courant Alternative  
DC: Courant Continue  
E7018: Electrode en Basique  
AWS: American Welding Society  
WPS: Welding Procedure Specification  
R: Resist L'humidité  
DCEP: Direct Courant Electrode Positive  
DCEN: Direct Courant Electrode Négative  
E6013: Electrode en Rutil  
U.V: Rayons Ultraviolet  
ZAT: Zone Affecté Thermiquement  
CND: Contrôle Non Destructif  
END : Essais Non Destructif

API : American Petroleum Institute

CPECC: China Petroleum Engineering Construction Corps

PAF: Profilé à Froid

PSL : Pipe Style Ligne



# Introduction générale

## Introduction générale

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

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

Parmi les procédés de soudage par chauffage, on trouve le soudage à l'arc électrique.

Cette technique est la plus utilisée pour assembler deux pièces en acier.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier un essai de pliage de deux éprouvettes d'un même matériau soudée par deux métaux d'apport différents et leurs influences sur le joint de soudure : cas d'un acier API 5L X60.

Le manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une généralité sur les différents types de procédé de soudage, et les métaux d'apport.

Le deuxième chapitre est réservé aux généralités sur les défauts de soudage, et le contrôle non destructif.

Le troisième chapitre est réservé aux :

- Présentation du matériau (API 5 L X60), et leur caractéristique mécanique et chimique.
- Dessin des pièces à souder et la préparation des chanfreins.
- Contrôles de la qualité des cordons de soudures.

Une conclusion générale.

# Chapitre 01

## Généralités sur le soudage

### Introduction :

Le soudage est un procédé par lequel on assemble des pièces métalliques ou des matières plastiques par chauffage et fusion des parties en contact de manière à réaliser un joint ayant les mêmes propriétés que le matériau constitutif des pièces assemblées.

À la base, trois éléments sont nécessaires pour réaliser une soudure :

- Une source de chaleur telle qu'un arc, une flamme, une pression ou une friction. Le plus souvent, cette chaleur provient d'un arc électrique. L'arc correspond à l'espace physique entre l'extrémité de l'électrode et le métal de base. Cet espace engendre de la chaleur en raison de la résistance liée au passage du courant et aux rayons de l'arc. L'arc fait fondre les métaux et permet leur fusion.
- Une protection, par l'utilisation d'un gaz ou d'une autre substance pour protéger la soudure de l'air au moment de sa réalisation. L'oxygène présent dans l'air rend les soudures fragiles et poreuses.
- Un matériau d'apport, qui correspond au matériau utilisé pour assembler les deux pièces.

Organigramme des procédés de soudage :

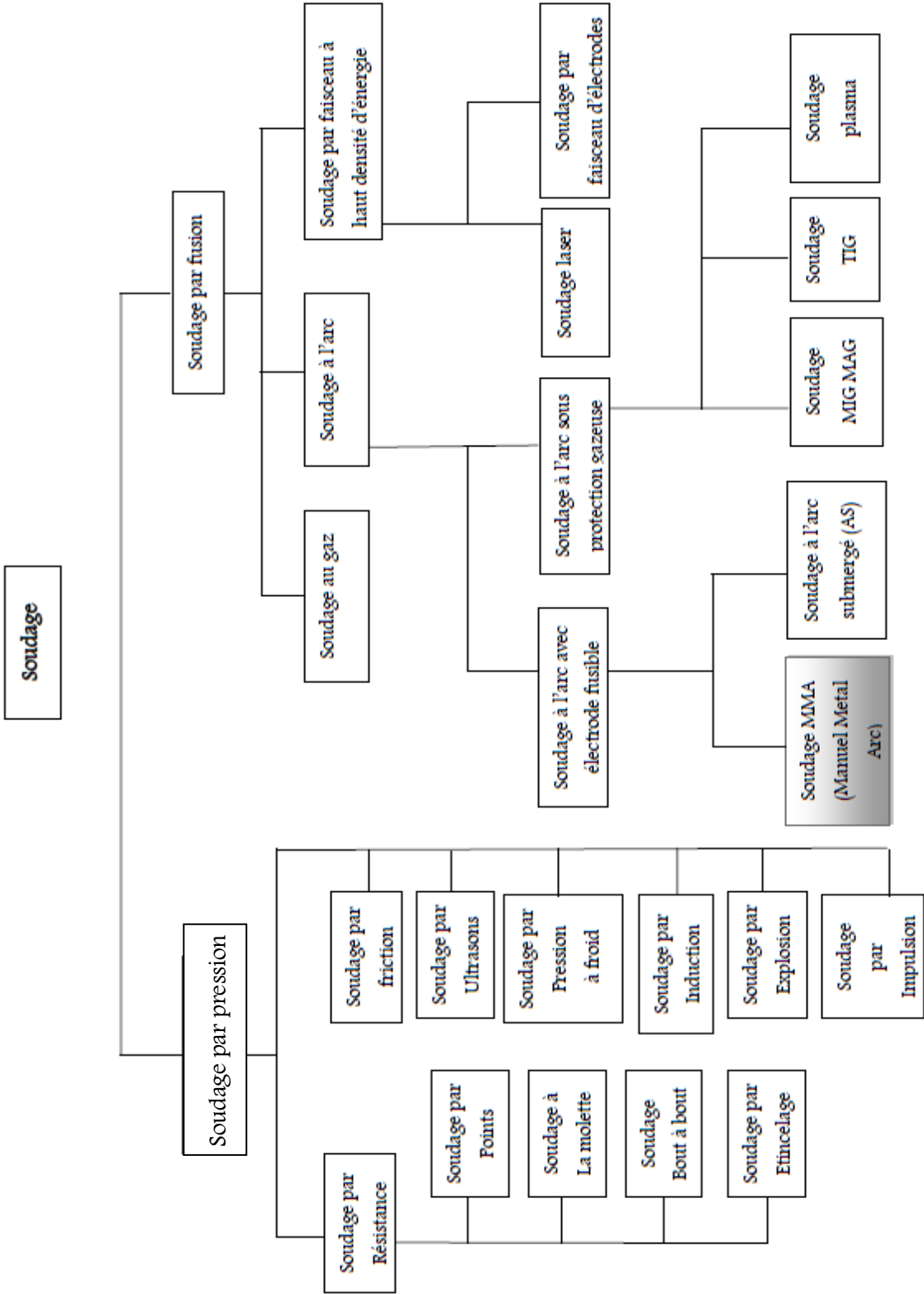


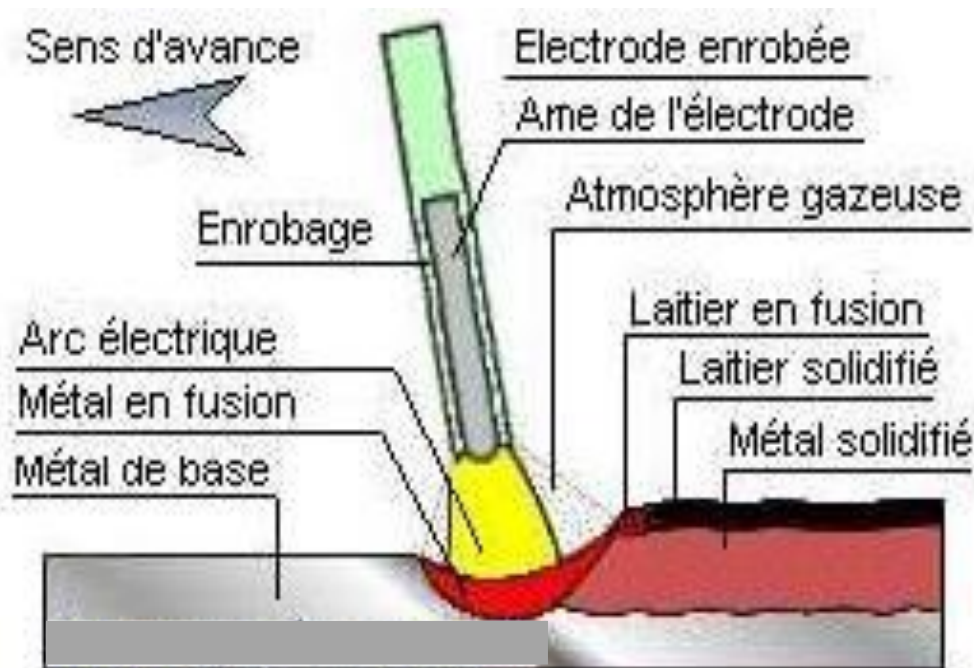
Figure a. Organigramme de soudage

### 1. Les différents types de procédés de soudage .

#### 1.1. Le procédé de soudage à l'ARC E.E. / MMA / SMAW / 111 .

Le procédé de soudage à l'arc à l'électrode enrobée (MMA (Metal Manuel Arc)) est l'un des procédés de soudage les plus utilisés pour les travaux de la maison par les particuliers, dans les ateliers et principalement sur les chantiers par les professionnels. [1]

##### 1.1.1. Définition du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées .



*Figure I 1. soudage à l'arc à l'électrode enrobée [1]*

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (MMA / SMAW / 111) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique (voir figure 1.1).

Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la

nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur ( $U_0$ ) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts.

### 1.1.2. Principe du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées .

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage.

Le connecteur de pièce est relié au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.

### 1.1.3. Définition de l'électrode enrobée .

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

**L'âme** : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.

**L'enrobage** : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. L'enrobage a un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe.



*Figure I 2. Electrode enrobée [1]*

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de  $\varnothing 1,6$  à  $\varnothing 8$  mm.

Plus le diamètre est faible et plus la difficulté de soudage est grande.

La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm. Certaines électrodes peuvent atteindre 1 mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique à l'arc électrique avec électrodes enrobées) (voir figure 1.2). [1]

### 1.1.4. Classification des enrobages des électrodes enrobées

- Acide (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages)
- Basique (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium)
- Cellulosique (à base de cellulose)
- Oxydant (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages)
- Rutile (à base d'oxyde de titane)
- Haut rendement (à base de poudre métallique)
- Spécial
- Les électrodes enrobées utilisées sont couramment :
- Rutils pour les travaux courants.
- Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression)
- Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position descendante

### 1.1.5. Étuvage des électrodes enrobées .

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

Un nouveau système de fabrication et d'emballage sous vide permet d'obtenir des électrodes à enrobage basique à très faible taux d'humidité qui ne nécessitent aucun étuvage avant utilisation (SAFDRY ou VACPAC). [1]

### 1.1.6. Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées .

Lorsque l'intensité est trop faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder, la fusion est molle et la pénétration est faible, l'amorçage est difficile, une instabilité de l'arc et une mauvaise compacité du métal déposé (présence de défaut type soufflure et inclusion de laitier). Voir tableau 1.1 et 1.2

Lorsque l'intensité est trop forte, vous constatez des projections importantes à l'abord du joint, des écoulements de métal lors du soudage en position.



*Tableau I 1. Intensité moyenne de soudage E.E pour la position à plat [1]*

Ø électrode	Enrobage mince	Enrobage semi-épais	Enrobage épais
Ø 1,6 mm	25 A	30 A	35 A
Ø 2,0 mm	40 A	50 A	55 A
Ø 2,5 mm	60 A	70 A	75 A
Ø 3,2 mm	90 A	100 A	110 A
Ø 4,0 mm	130 A	150 A	160 A
Ø 5,0 mm	170 A	190 A	200 A

Le réglage de l'intensité appliquée à l'électrode dépend :

- du diamètre de l'électrode (voir tableau ci-dessus)
- de la nature de l'âme de l'électrode
- de la nuance des pièces à assembler
- de la position de soudage
- du type d'assemblage rencontré
- de l'épaisseur des pièces à souder

*Tableau I 2. Intensité moyenne de soudage pour la position à plat par rapport à l'épaisseur*

Epaisseur	Ø 1,6 mm	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
2 mm	30 A	45 A				
3 mm		60 A	70 A	90 A		
4 mm			80 A	100 A	120 A	
5 mm			90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm			90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm			90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm				130 A	160 A	190 A
12 mm				130 A	170 A	190 A
15 mm				130 A	170 A	200 A
20 mm					190 A	220 A

1.1.7. Formules de calcul pour déterminer les paramètres par diamètre des électrodes enrobées :

➤ Calcul de l'intensité de soudage :

L'intensité de soudage est donnée par la formule suivante :

$$I = 50 * (e - 1) \quad (A) \quad \text{avec } e : \varnothing \text{ de l'électrode}$$

➤ Calcul de la tension de soudage :

La tension de soudage est donnée par la formule suivante :

$$U = 20 + (0.04 * I) \quad (V)$$

➤ Calcul de l'énergie de soudage :

L'énergie de soudage est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{60 * U * I}{1000 * V_s} \quad (J/mm) \quad \text{avec } V_s \text{ la vitesse d'avance}$$

1.1.8. Vitesse et énergie de soudage par diamètre des électrodes enrobées :

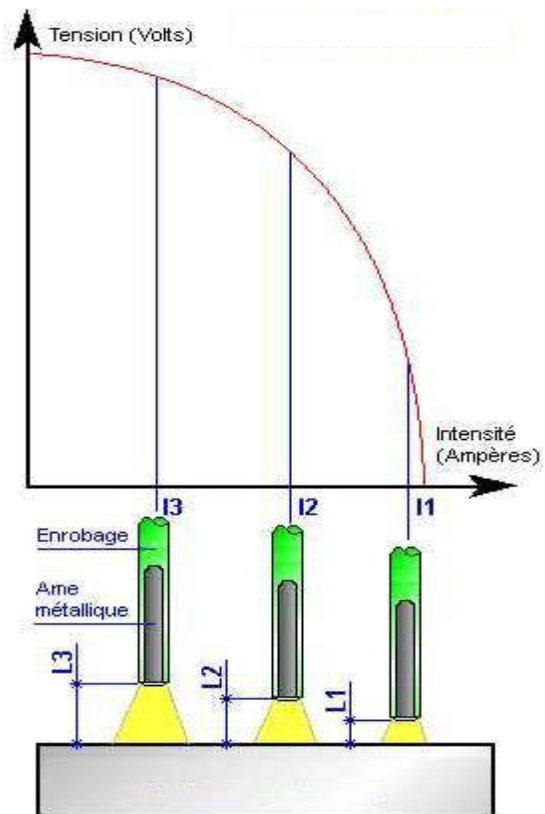
*Tableau I 3. Vitesse et énergie de soudage ou apport de chaleur pour la position à plat [1]*

Apport de chaleur	Ø 2,5 mm (80A x 22,5V)	Ø 3,2 mm (120A x 23V)	Ø 4,0 mm (160A x 24V)	Ø 5,0 mm (210A x 25V)
6 kJ / cm	18 cm/min			
8 kJ / cm	13,5 cm/min	20,7 cm/min		
10 kJ / cm	10,8 cm/min	16,6 cm/min	23 cm/min	
12 kJ / cm	9,0 cm/min	13,8 cm/min	19,2 cm/min	26,25 cm/min
14 kJ / cm	7,7 cm/min	11,8 cm/min	16,4 cm/min	22,5 cm/min
16 kJ / cm	6,75 cm / min	10,35 cm/min	14,4 cm/min	19,7 cm/min
18 kJ / cm		9,2 cm/min	12,8 cm/min	17,5 cm/min
20 kJ / cm			11,5 cm/min	15,75 cm/min
25 kJ / cm			9,2 cm/min	12,6 cm/min
30 kJ / cm				10,5 cm/min

### 1.1.9. La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension .

Les générateurs de soudage à l'arc à l'électrode enrobée sont à caractéristiques plongeantes, c'est à dire que lorsque la hauteur de l'arc électrique est modifiée (par le mouvement de l'électrode par le soudeur), l'intensité du courant est modifiée très faiblement. L'intensité du courant de soudage diminue lorsque la longueur d'arc augmente.

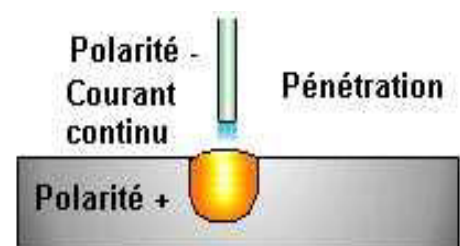
Inversement, lorsque la longueur d'arc diminue, l'intensité augmente. (Voir figure 1.3).



*Figure I 3. Courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension [1]*

### 1.1.10. La polarité de l'électrode enrobée .

Les passes de pénétration (non reprises à l'envers) réalisées à l'électrode enrobée à enrobage basique B avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité négative à la pince porte électrode. La polarité négative à l'électrode enrobée est souvent utilisée pour les enrobages de type rutilés quelque soit le type d'assemblage. Selon le type d'enrobage, la pénétration peut être plus importante que la polarité positive à l'électrode. (Voir figure 1.4).



*Figure I 4. Présentation de pénétration [1]*

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne(-)
- La fiche du câble de la pince de masse ou connecteur de pièce est raccordée à la borne (+)

Les passes de remplissage et de finition réalisées à l'électrode enrobée avec enrobage basique B avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité positive à l'électrode. (Voir figure 1.5).

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne(+)
- La fiche du câble de la pince de masse ou connecteur de pièce est raccordée à la borne (-)



Figure I 5: Présentation de remplissage [1]

### 1.1.11. Les différents transferts du métal dans l'arc de soudage .

Le transfert du métal dans l'arc est la manière dont les gouttes de métal à l'état liquide se détachent de l'âme de l'électrode pour aller plonger dans le bain de fusion.

Le transfert d'arc se fait toujours de l'électrode vers la pièce quel que soit la nature du courant (alternatif ou continu), la polarité de l'électrode en courant continu (positive ou négative), l'intensité appliquée et la position de soudage utilisée.

Nous pouvons distinguer trois types de transfert de métal dans l'arc suivant la nature de l'enrobage :

#### Le transfert par court-circuit .

La fusion est globulaire mais la goutte pendante touche le bain de fusion avant de se décrocher de l'âme de l'électrode produisant un écoulement du métal à l'état liquide. (Voir figure 1.6).

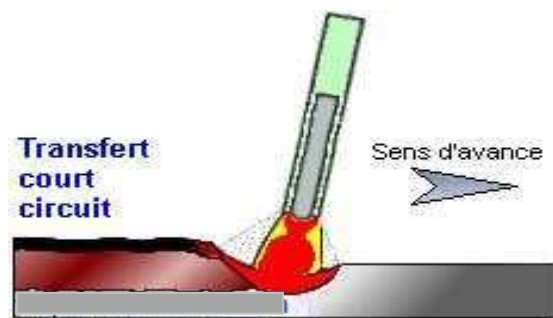


Figure I 6: Transfer court-circuit [1]

**Le transfert en vol libre** : Des gouttes de métal de diamètre équivalent à celui de l'âme de l'électrode se détachent de celle-ci et transitent suivant des trajectoires diverses vers le bain de fusion. (Voir figure 1.7).

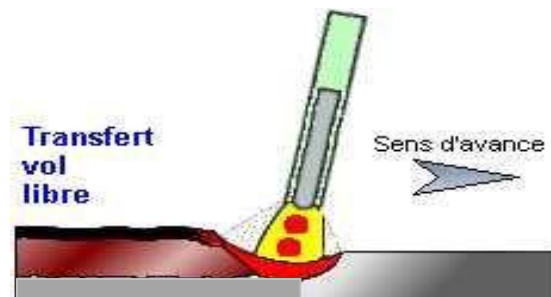
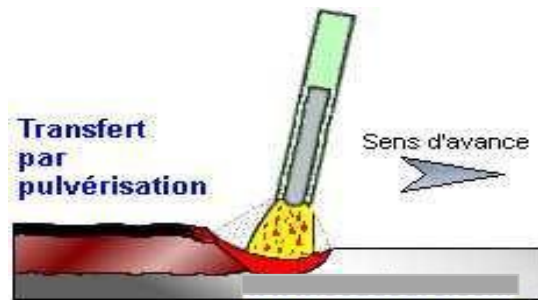


Figure I 7: transfert vol libre [1]

### Le transfert par pulvérisation .

De nombreuses gouttes, de diamètre varié, se détachent de l'électrode de manière désordonnée. (Voir figure 1.8).



*Figure I 8: transfert par pulvérisation [1]*

### 1.1.12. Les différents types de générateurs de soudage .

Les générateurs de soudage transforment le courant du réseau (tension élevée et faible intensité) en courant de soudage (tension relativement faible et intensité élevée). Ils permettent un réglage de l'intensité du courant de soudage.

Les différents types de postes de soudage ou générateurs sont :

- Les transformateurs statiques monophasés qui fournissent du courant alternatif à 50 hertz. Ces postes sont les plus économiques du marché et les plus simples.
- Les transformateurs statiques monophasés ou triphasés à redresseur (pont de diodes, thyristors ou transistors) qui fournissent du courant continu. Les bornes électriques de sortie sont repérées par les signes Conventionnels (+) et (-).
- Les groupes rotatifs à changeur de fréquence. Ils se composent d'un moteur entraînant une génératrice à courant alternatif de 150 à 450 Hertz.
- Les transformateurs rotatifs à redresseur qui fournissent un courant continu redressé.

### 1.1.13. Matériels de soudage par fusion .

- Un générateur de courant (poste de soudage)
- Une pince porte-électrode avec câble conducteur
- Une pince de masse ou connecteur de pièce avec câble conducteur
- Une étuve portative pour les électrodes basiques
- Un masque avec verres teintés spéciaux
- Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple
- Un marteau à piquer et une brosse métallique
- Une meuleuse d'angle électrique
- Des écrans ou rideaux de protection

1.1.14. Le croquis didactique du procédé de soudage 111 .

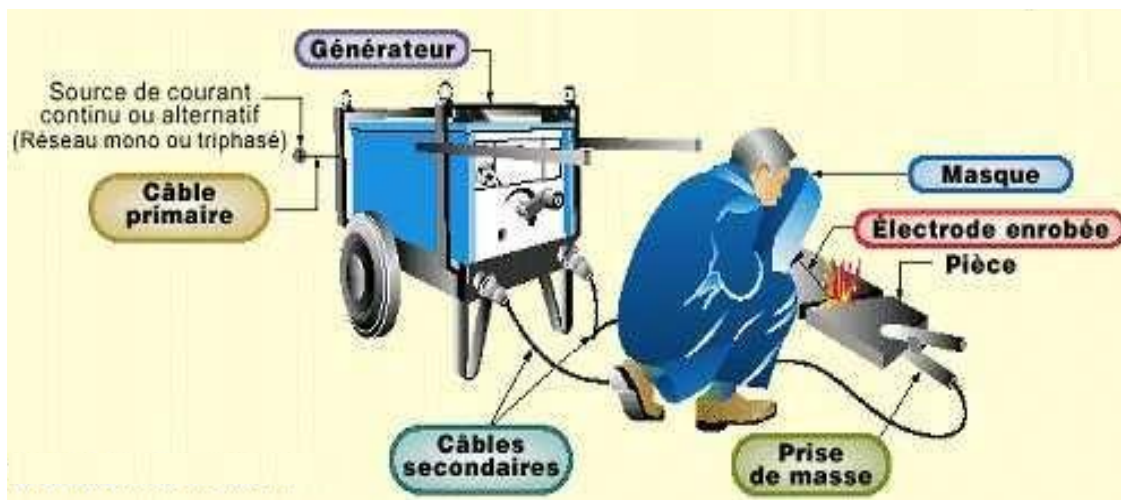


Figure I 9. Matériels de soudage 111 [1]

1.1.15. Quelques préparations de joints .

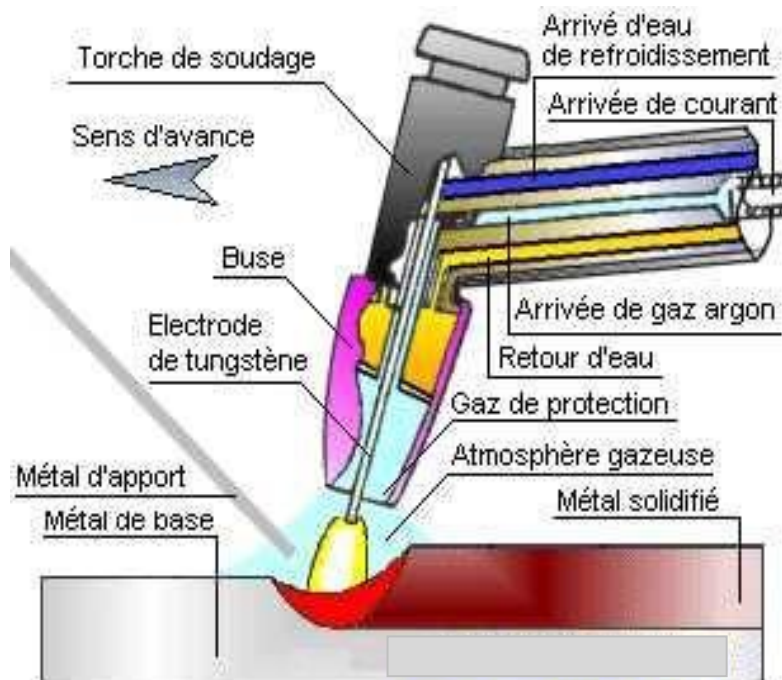
Tableau I 4. Quelques préparation de joints [1]

Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø électrode	Préparation
De 1,0 à 2,5 mm	30 à 60 ampères	Ø 1,6 mm	
De 2,0 à 4,0 mm	50 à 90 ampères	Ø 2,0 à 3,2 mm	
De 4,0 à 20 mm	60 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 4,0 à 20 mm	70 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 8,0 à 30 mm	80 à 200 ampères	Ø 3,2 à 5,0 mm	

### 1.2. Le procédé de soudage TIG / GTAW / 141

#### 1.2.1. Définition du procédé TIG / 141 / GTAW .

Le soudage électrique est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène (de  $\varnothing$  1,0 mm à  $\varnothing$  8,0 mm) et la pièce à souder. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de  $\varnothing$  0,8 mm à  $\varnothing$  4,0 mm) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de  $\varnothing$  0,8 mm à  $\varnothing$  2,0 mm) dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertage de gaz (de 5 à 25 litres/minute) de protection (Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H<sub>2</sub> pour les procédés automatiques). Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 5 à 300 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. Les sources de courant utilisées sont à caractéristiques plongeantes ou verticales. La polarité de l'électrode est toujours négative en courant continu (polarité directe). [2]



*Figure I 10. Principe de soudage TIG [2]*

### 1.2.2. Principe du procédé de soudage :

La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie négative du générateur de soudage à courant continu ou alternatif. La masse est reliée au générateur sur la borne positive et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Lorsque le poste n'est pas équipé d'un amorçage haute-fréquence, l'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe de l'électrode infusible touche superficiellement la pièce à souder en créant un court-circuit (avec le risque de créer des inclusions métalliques de tungstène). Avec un équipement d'amorçage par haute fréquence, l'arc de soudage est allumé par l'intermédiaire d'un étincelage d'arc électrique de plusieurs milliers de volts avec une fréquence de 1 à 2 MHz délivré entre l'électrode de tungstène et la pièce pendant un très court instant. [2]

### 1.2.3. Avantages du procédé de soudage :

- Simple d'emploi
- Travail fin et précis
- Large gamme d'épaisseur
- Très bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- Soudage dans toutes les positions
- Aspect de cordon très correct
- Procédé automatisable

### 1.2.4. Inconvénients du procédé de soudage :

- Exige une dextérité et coordination des deux mains
- Vitesse de soudage faible (2 à 20 cm/min)
- Taux de dépôt de métal assez faible
- Procédé coûteux pour l'assemblage des fortes épaisseurs
- Protection gazeuse indispensable à la torche
- Nettoyage indispensable des pièces avant soudage
- Risque de contamination de l'électrode infusible
- Perturbation de la protection gazeuse dans les courants d'air



### 1.2.5. Matériels de soudage pour le soudage TIG / 141 .

- Un générateur de courant continu ou alternatif (principalement pour l'aluminium).
- Un groupe réfrigérant à circuit fermé (lors d'utilisation à forte intensité)
- Une bouteille de gaz avec détendeur/débitmètre et boyaux d'alimentation
- Une torche de soudage (avec ou sans refroidissement) avec câble conducteur
- Une pince de masse avec câble conducteur
- Un masque avec verres teintés spéciaux
- Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple
- Une brosse métallique
- Une meuleuse d'angle électrique ou pneumatique pour les reprises.
- Des écrans ou rideaux de protection
- Une ventilation efficace dans les endroits confinés

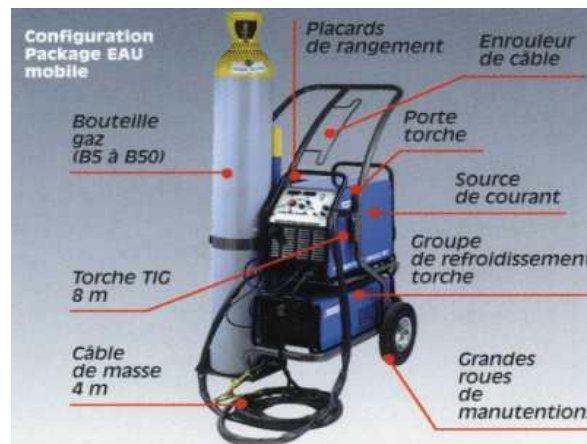


Figure I 11. Matériels de soudage TIG [2]

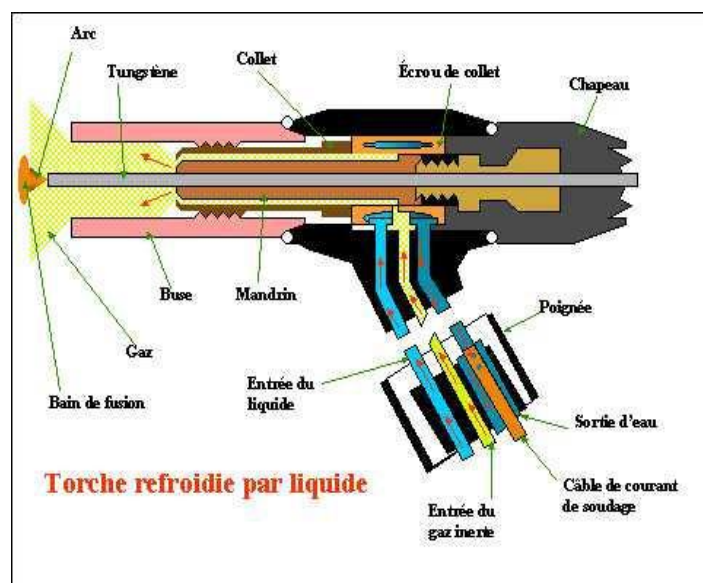


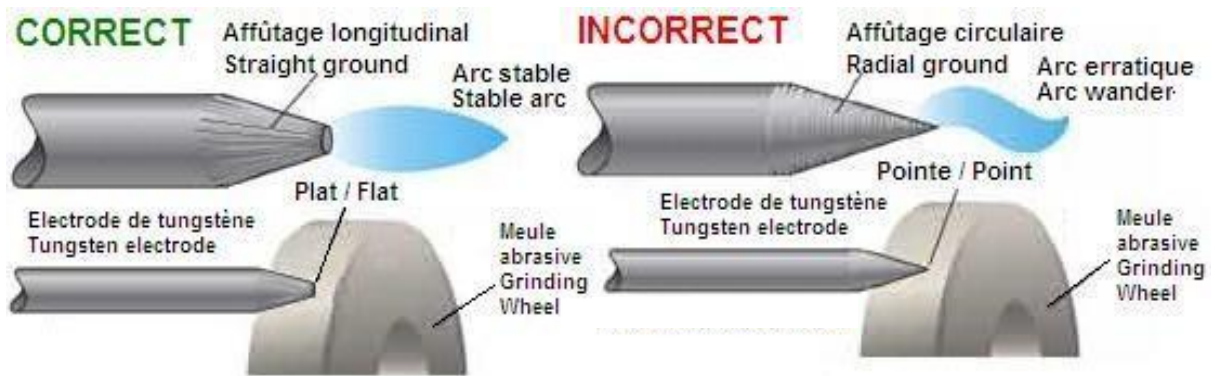
Figure I 12. Présentation de la torche de TIG [2]

### 1.2.6. L'affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG .

La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible est une variable importante en courant continu. L'affûtage est exécuté à l'aide d'une meuleuse à grain fin avec récupération des poussières. L'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30° et 60 degrés. Les stries d'usinage ou de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode. [2]

La meule du touret fixe est souvent constituée de carbures de silicium (meule carborundum) pour affûter le tungstène. Le grain de la meule est de l'ordre de 120.

La pointe d'extrémité du cône doit être adoucie pour supporter les densités de courant. Il ne faut pas appointer l'électrode de tungstène en courant alternatif. Le bout de l'électrode infusible prend une forme de boule en courant alternatif. (Voir figure 1.13).



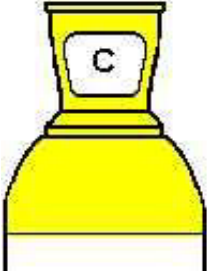
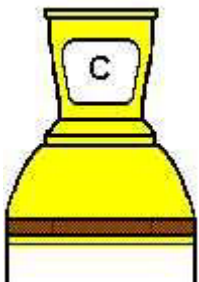


*Figure I 13. Préparation de Tungsten [2]*

### 1.2.7. Les gaz industriels de soudage en TIG / GTAW

Le débit de gaz de protection à appliquer à la torche de soudage est de 1 litre par millimètre de diamètre intérieur de buse.

Vous avez une buse TIG de Ø 10 mm, vous mettez un débit de 10 litres par minute à la torche. Bien entendu, cette méthode est mnémotechnique et vous permet d'estimer le débit de gaz à appliquer. Vous pouvez bien entendu réduire ou augmenter ce débit selon le type et la densité du gaz, le type d'assemblage, la configuration, la nuance du matériau et l'aspect de la soudure. (Voir tableau 1.5).

*Tableau I 5. Gaz de protection endroit pour le soudage TIG [2]*

Composition	Couleur d'ogive	Description
<b>GAZ PUR</b>		
<b>ARGON</b>		Utilisable dans la grande majorité des applications de soudage TIG.
<b>MÉLANGES BINAIRES</b>		
<b>ARGON + 20 % HELIUM</b>		Élévation de la température de l'arc. Vitesse de soudage plus importante. Polyvalence / Performance. Coût relativement important
<b>ARGON + 1 à 3 % AZOTE</b>		Utilisable sur les aciers duplex et super-duplex (austéno-ferritiques).
<b>ARGON + 2 à 10% HYDROGÈNE</b>		Utilisable en TIG automatique avec les inox austénitiques - Bain de fusion plus chaud - Meilleur mouillage - Vitesse d'avance plus élevée - Pénétration améliorée. A interdire sur les aciers inoxydables martensitiques et les matériaux sensibles à l'oxydation à chaud (titane, zirconium, tantale).


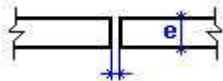
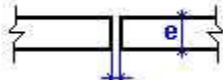
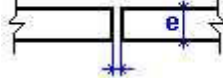


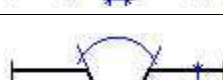
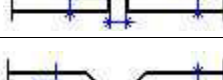
### Nota important .

L'utilisation d'un gaz de protection inerte à l'envers du bain de fusion est obligatoire et techniquement impérative sur les matériaux comme les aciers inoxydables, les bases nickel, le titane, le zirconium. (Rochage sur les inoxydables et pollution par les gaz H, O et N pour les matériaux très réactifs à l'air)

Les gaz utilisés en soudage ne sont pas toxiques. Toutefois à concentration élevée, ils n'entretiennent pas la vie. Ne travaillez jamais dans un local fermé non aéré ou une enceinte confinée non ventilée.

### 1.2.8. Préparations de joints pour le soudage TIG

*Tableau I 6. Quelques Préparations de joints pour le soudage TIG [2]*

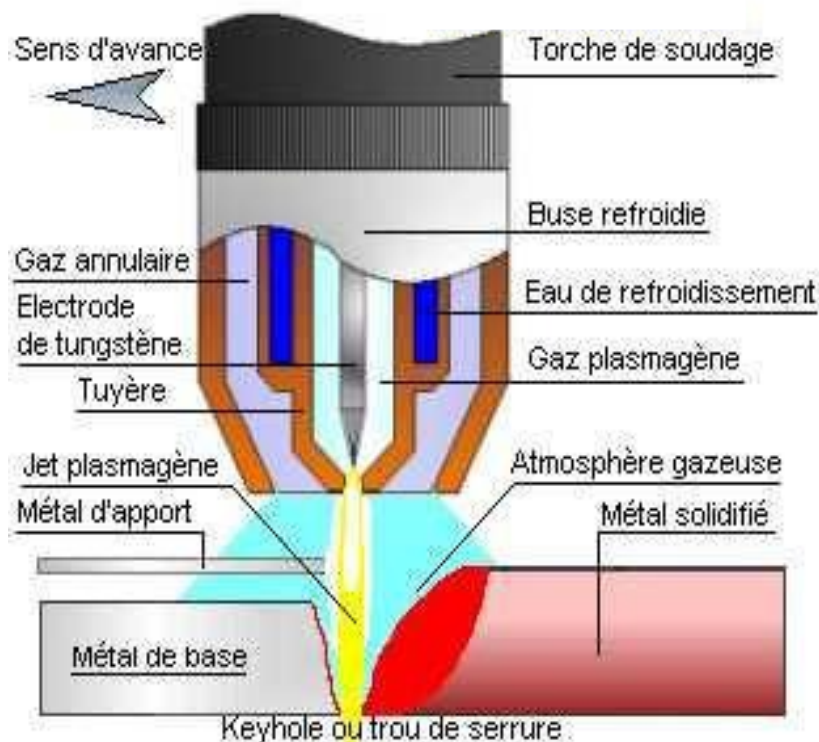
Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø métal d'apport	Préparation
De 0,5 à 0,8 mm	10 à 25 ampères	Sans	
De 0,5 à 0,8 mm	10 à 25 ampères	Sans	
De 0,8 à 1,0 mm	20 à 40 ampères	Sans ou Ø 1,0 mm	
De 1,5 à 2,0 mm	30 à 60 ampères	Ø 1,6 mm	
De 2,0 à 3,0 mm	45 à 80 ampères	Ø 1,6 à 2,0 mm	
De 2,5 à 4,0 mm	45 à 80 ampères	Ø 2,0 mm	
De 4,0 à 6,0 mm	60 à 100 ampères	Ø 2,0 mm	
De 8,0 à 12 mm	90 à 180 ampères	Ø 2,0 à 3,0 mm	
De 8,0 à 12 mm	90 à 180 ampères	Ø 2,0 à 3,0 mm	

### 1.3. Le procédé de soudage arc plasma / PAW (procédé 15) :

Le soudage plasma à arc transféré est le plus répandu pour le soudage des métaux.

C'est un arc électrique rigide et énergétique obtenu grâce à une tuyère spéciale et à une protection par un gaz auxiliaire. Le jet plasma est constricteur mécaniquement et pneumatiquement par la tuyère, ce qui permet d'obtenir une plus grande puissance spécifique de la colonne plasma, et donc des zones fondues très étroites. [3]

#### 1.3.1. Définition du procédé de soudage arc plasma :

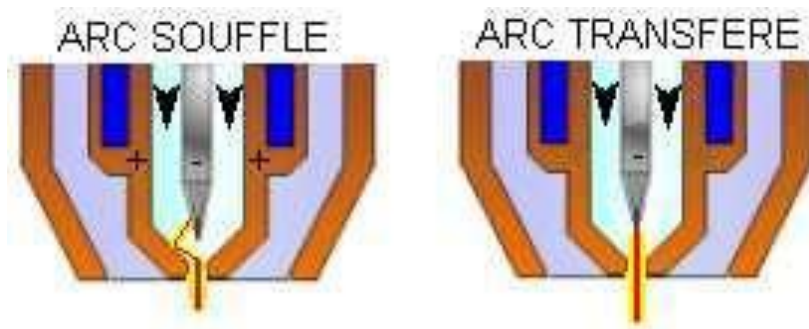


*Figure I 14. Principe de procédé de soudage arc plasma [3]*

Le soudage PLASMA (PAW) est un procédé à l'arc comparable au soudage TIG sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène). Le soudage est réalisé à l'aide d'une torche spéciale à plasma :

- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de  $\varnothing$  1,0 mm à  $\varnothing$  8,0 mm) et l'intérieur de la tuyère (arc non transféré ou soufflé)

- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de  $\varnothing$  1,0 mm à  $\varnothing$  8,0 mm) et la pièce à souder (arc transféré). Un arc pilote est utilisé pour l'amorçage d'un arc transféré.



*Figure I 15. Torche de soudage arc plasma [3]*

Un diaphragme dénommé tuyère permet la constriction ou l'étranglement mécanique de l'arc électrique à travers un orifice calibré dans une colonne de gaz central ou plasmagène (Argon ou Argon + H<sub>2</sub>) qui génère une énergie calorifique très élevée. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

Le métal d'apport est amené automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de  $\varnothing$  0,8 mm à  $\varnothing$  2,0 mm) dans le bain de fusion. L'électrode de tungstène est protégée par un courant de gaz appelé gaz plasmagène (débit de 0,5 à 8 litres/minute). Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertie de gaz annulaire (débit de 10 à 25 litres/minute) de protection (Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H<sub>2</sub> ou Azote + H<sub>2</sub>). Un générateur électrique fournit le courant continu avec une intensité variant de 0,1 à 15 ampères pour le micro plasma ou de 10 à 400 ampères pour le plasma en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. [3]

### 1.3.2. Principe du procédé de soudage arc plasma .

La torche de soudage plasma est reliée pour la partie électrode infusible sur la borne électrique de sortie négative et pour la partie tuyère sur la borne positive du générateur de soudage à courant continu (caractéristiques externes statiques verticales). La prise de masse est reliée au générateur sur la borne positive et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage plasmagène est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Une alimentation en gaz de soudage annulaire est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Un dispositif d'amorçage à haute fréquence permet l'amorçage de l'arc pilote à

l'intérieur de la tuyère (arc non transféré ou soufflé). Lorsque l'opérateur actionne le bouton de soudage, l'arc pilote est transféré de l'électrode vers la pièce à souder permettant l'amorçage de l'arc de soudage entre l'électrode et la pièce. [3]

### 1.3.3. Avantages du procédé de soudage arc plasma .

- Soudage de pièce de 3 à 8 mm en une seule passe sans préparation
- Soudage dans trois positions fondamentales possibles (à plat PA, corniche PC et montante PF)
- Travail rapide, fin et précis
- Très bonnes qualités de joint
- Très bonnes caractéristiques mécaniques
- Aspect de cordon très correct
- Largeur de cordon de pénétration faible
- Procédé automatisable

### 1.3.4. Différents types de procédés à l'arc plasma .

- Soudage micro plasma (0,1 à 45 ampères - 0,05 à 1,5 mm) utilisable en manuel ou en automatique.
- Soudage plasma (100 à 400 ampères - 2,0 à 10 mm) utilisable en automatique.

### 1.3.5. Températures d'un arc plasma .

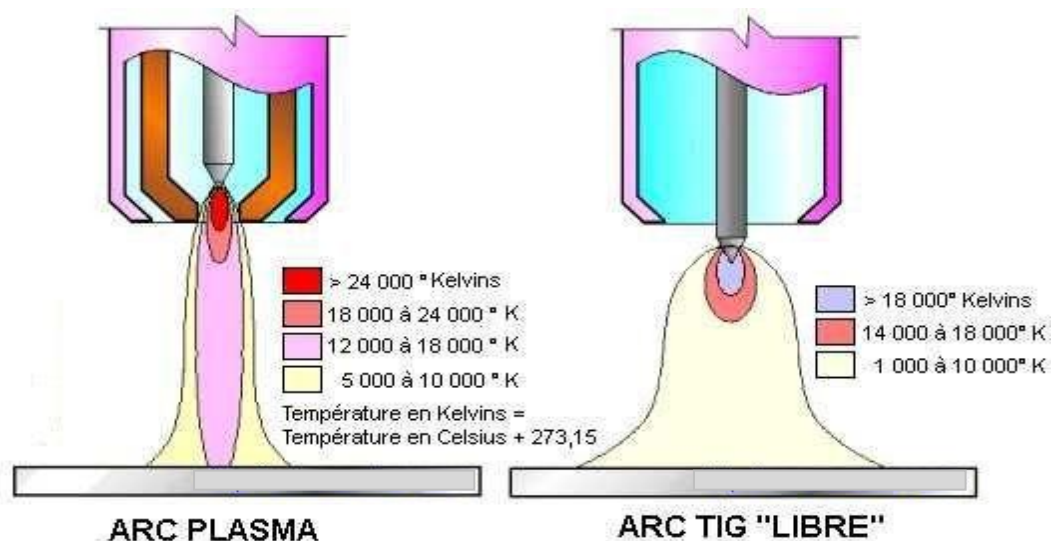


Figure I 16. Températures d'un arc plasma [3]

### 1.3.6. Matériels de soudage ARC PLASMA :

- Un générateur de courant continu (caractéristiques externes statiques verticales).
- Un coffret de commande ou automate pour les installations automatiques
- Une potence ou banc de rabotage pour les installations automatiques
- Une torche de soudage plasma (avec ou sans refroidissement) avec câbles conducteurs
- Une régulation de la tension d'arc pour les installations automatiques
- Un dispositif sophistiqué d'évanouissement d'arc
- Un groupe réfrigérant à circuit fermé (lors d'utilisation à forte intensité)
- Une bouteille de gaz plasmagène avec détendeur/débitmètre et boyaux d'alimentation
- Une bouteille de gaz annulaire avec détendeur/débitmètre et boyaux d'alimentation
- Une pince de masse avec câble conducteur
- Un masque avec verres teintés spéciaux
- Une brosse métallique
- Des écrans ou rideaux de protection
- Une ventilation efficace dans les endroits confinés

### 1.3.7. Différents types d'électrodes infusibles pour le soudage ARC PLASMA :

- Tungstène thorié (0,5 à 4 % thorium - couleur d'extrémité rouge)
- Tungstène cérié (0,5 à 4% cérium)

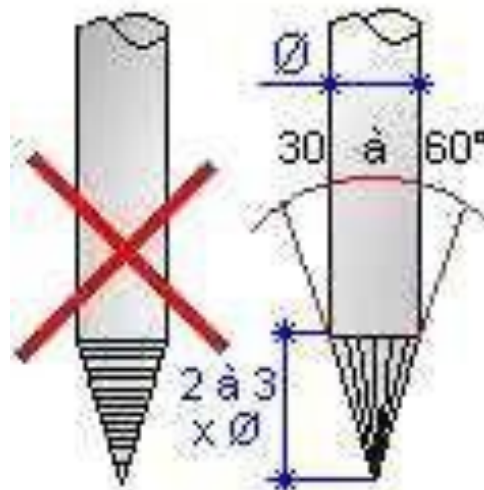
Le centrage de l'électrode de tungstène par rapport au trou central de la tuyère et le réglage de la hauteur d'enfoncement de l'électrode de tungstène par rapport à la tuyère sont des paramètres importants de réglage. Ces réglages influencent grandement la longévité de la tuyère, l'état physique du jet plasma, l'aspect et la pénétration du cordon de soudure. [3]

### 1.3.8. L'affûtage de l'électrode infusible pour le plasma :

La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible est une variable importante. L'affûtage est exécuté à l'aide d'une meuleuse à grain fin (réservé à cet usage) avec récupération des poussières. (Voir figure 1.17).

L'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30 et 60 degrés. Les stries d'usinage ou de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode. La pointe d'extrémité du cône doit être adoucie pour supporter les densités de courant.





*Figure I 17. Affûtage de l'électrode [3]*

### 1.3.9. Les gaz de soudage utilisés en soudage plasma :

- Argon
- Argon + 20% Helium
- ARGON + 1 à 3 % AZOTE
- ARGON + 2 à 10% HYDROGÈNE

#### Nota important :

L'utilisation d'un gaz de protection inerte à l'envers du bain de fusion est obligatoire et techniquement impérative sur les matériaux comme les aciers inoxydables, les bases nickel, le titane, le zirconium. (Rochage sur les inoxydables et pollution par les gaz H, O et N pour les matériaux très réactifs à l'air)

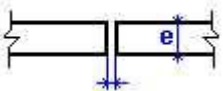
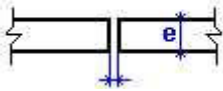
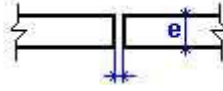
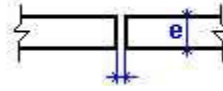
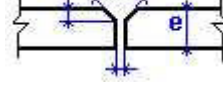
Les gaz utilisés en soudage ne sont pas toxiques.

Toutefois à concentration élevée, ils n'entretiennent pas la vie.

Ne travaillez jamais dans un local fermé ou une enceinte confinée non ventilée.

1.3.10. Préparations de joints et paramètres pour le soudage ARC PLASMA :

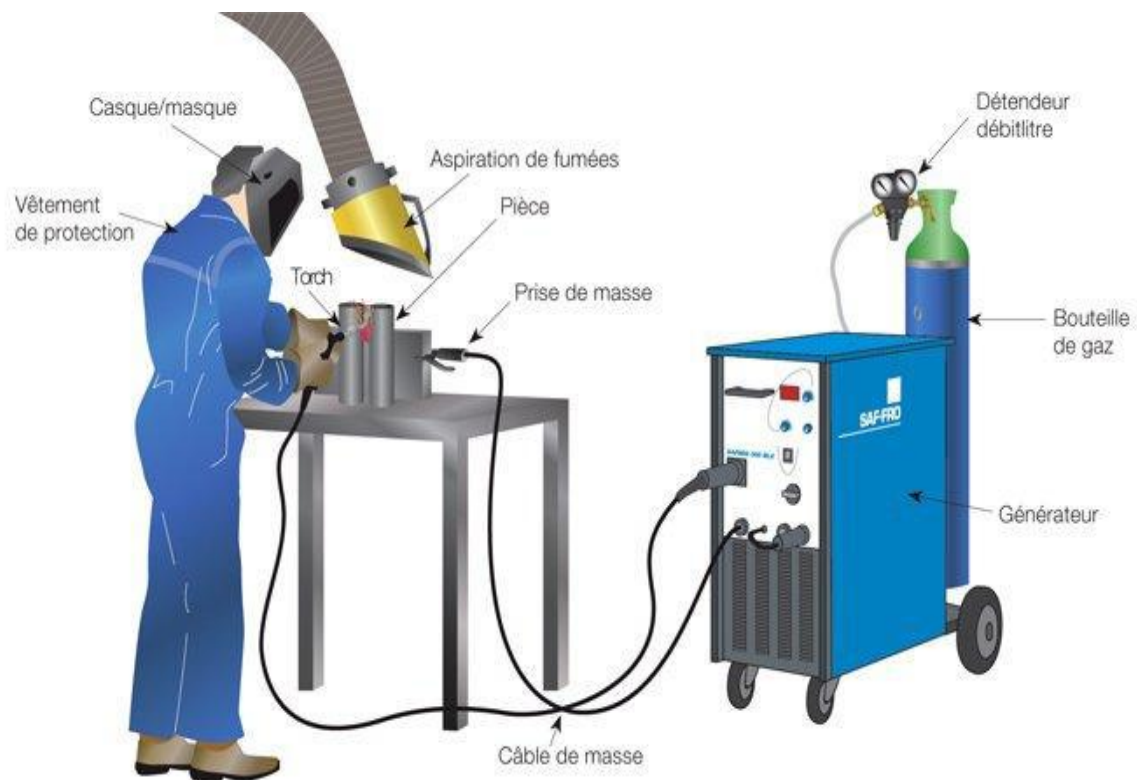
Tableau I 7: Quelques préparations de joints [3]

Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø métal d'apport	Préparation
De 2,0 à 3,0 mm	90 à 130 ampères	Ø 1,0 mm	
De 3 à 4,0 mm	120 à 160 ampères	Ø 1,0 mm	
De 4,0 à 6,0 mm	140 à 180 ampères	Ø 1,2 mm	
De 6,0 à 8,0 mm	160 à 280 ampères	Ø 1,2 mm	
De 8,0 à 15 mm	180 à 280 ampères	Ø 1,2 mm	

1.4. Le procédé de soudage MIG – MAG

Le soudage à fil continu en atmosphère protégée est souvent désigné par les abréviations M.I.G. (Metal Inert Gas) et M.A.G. (Metal Active Gas) ou, de façon générique, comme G.M.A.W. (Gas Metal 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. La présence dans le circuit de soudage d'une bouteille de gaz (gaz inerte, actif ou mélanges), associée à l'utilisation de fils-électrodes pleins, caractérise le processus de soudage sous gaz de protection (M.I.G. ou M.A.G.).

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. (Voir figure 1.18). [17]



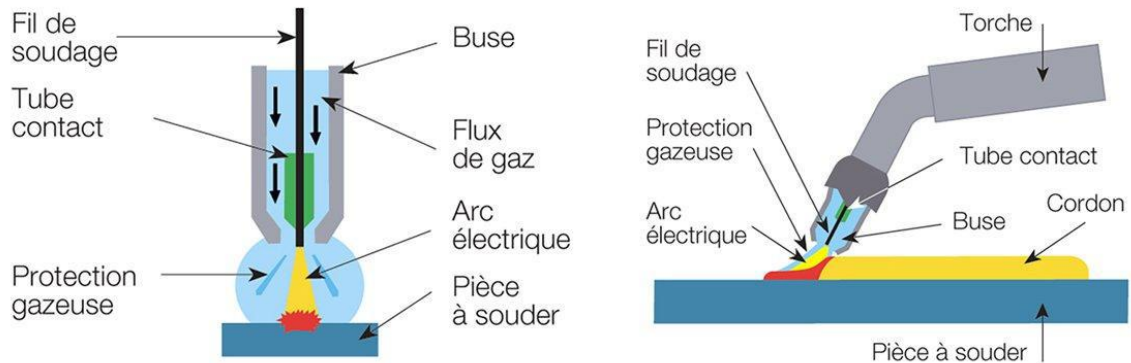
*Figure I 18. équipement de soudage Mig-Mag [17]*

### 1.4.1. Les modes de transferts du procédé MIG/MAG

Il existe plusieurs modes transferts de métal en MIG/MAG pour décrire la façon dont les gouttes sont transférées de l'extrémité du fil au bain de fusion, qui dépendent entre autres du niveau d'énergie électrique délivrée par le générateur. (Voir figure 1.19). [18]

- **Court circuit.** à faible énergie, l'extrémité du fil entre en contact avec le bain pour transférer la goutte réamorçant ainsi l'arc électrique.
- **Globulaire.** mode de transfert transitoire où le transfert de goutte est erratique, tantôt par court-circuit, tantôt en vol libre quelques fois à côté du bain de fusion. Ce mode se situe à des niveaux d'énergie intermédiaire et cause souvent un maximum de projections.
- **Pulvérisation axiale.** A plus haute énergie, un chapelet de goutte est projeté par les forces électromagnétiques directement dans le bain.

- **Transfert pulsé.** des pics de courant sont contrôlés par le générateur pour obtenir suffisamment de force électromagnétique pour détacher une, et une seule, goutte dans le bain par pic de pulsation de courant.

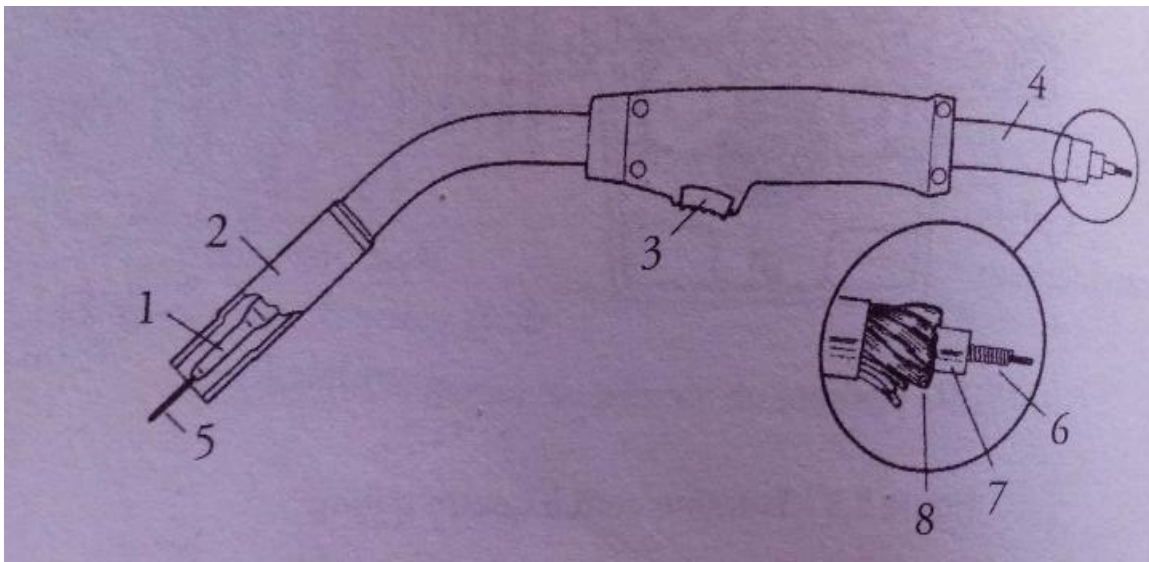


*Figure I 19. Transfert du métal [17]*

### 1.4.2. Pistolet de soudage :

Le pistolet de soudage et la gaine d'amenée de fil forment l'équipement de base (Figure I.20). Ils alimentent l'arc en courant électrique, en fil d'apport et en gaz de protection.

Le pistolet doit être particulièrement robuste et capable de résister à des conditions et à des environnements de fonctionnement particulièrement rudes tout en étant suffisamment petit et léger pour permettre le soudage dans des lieux confinés. [20]



*Figure I 20. pistolet de soudage et gaine d'amenée du fil [20]*

### 1.4.3. Composants de pistolet de Mig–Mag :

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. Tube contact.                | 5. Electrode.                             |
| 2. Amenée du gaz de protection. | 6. Tuyau flexible.                        |
| 3. Commutateur.                 | 7. Buse d'injection du gaz de protection. |
| 4. Gaine d'amenée du fil.       | 8. Câble d'alimentation.                  |

Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut respecter quelques règles et précautions de maintenance simple :

- Sélectionner soigneusement le modèle de pistolet et les paramètres de soudage. La taille du pistolet de soudage doit être choisie avec soin pour éviter toute surcharge thermique.
- Eliminer systématiquement les projections. Les projections ont tendance à se fixer sur les surfaces portées à haut température.
- Au besoin, utiliser un pistolet refroidi par eau.
- Choisir un câble de rallonge approprié. Si le câble de rallonge est trop court, il y aura risque d'effondrement et de surcharge thermique.
- Prévoir un jeu suffisant entre le diamètre du fil et celui du guide-fil afin d'éviter les blocages (diamètre du fil trop important par rapport au guide-fil) ou, inversement, les irrégularités de débit (diamètre du fil trop faible par rapport au guide-fil).

### 1.4.4. Les avantages du soudage MIG/MAG :

- Forte productivité par rapport à l'ARC E.E. et le TIG
- Grande vitesse de soudage
- Taux de dépôt de métal important
- Limitation des déformations
- Soudage dans toutes les positions
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit
- Aspect de cordon correct
- Procédé automatisable et utilisable en robotique

### 2. Les métaux d'apport :

L'opération de soudage nécessite de l'énergie pour mettre en fusion les pièces à assembler. Il nécessite également un apport de métal afin d'assurer les bonnes performances mécaniques. La fusion du métal d'apport est donc indispensable dans la majorité des constructions d'assemblage. [4]

Le métal d'apport diffère en fonction des procédés et applications de soudage utilisés et de l'application.

- **Electrode enrobée.** une baguette métallique entourée de flux qui va protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

Types d'électrodes et leurs caractéristiques spéciales :

Les types d'électrodes sont généralement classés en fonction de la composition chimique de l'enrobage et du noyau de l'électrode. Lorsque les exigences relatives au comportement de l'arc et aux paramètres du poste à souder sont prises en compte en plus de la composition chimique. [4]

#### 2.1. Baguette enrobée cellulosique .

##### 2.1.1. Signification de la baguette de soudage E6010 .

L'électrode SMAW E6010 ou également appelée électrodes en cellulose selon AWS SFA 5.1 ou E4310 selon CSA W48 est l'électrode de soudage à la baguette la plus largement utilisée pour le soudage à la racine dans la tuyauterie. C'est également l'électrode principale pour que les soudeurs commencent à apprendre le soudage avec les types E7018 . Les électrodes E6010 sont caractérisées par un arc de pulvérisation de force élevée et profondément pénétrant et des scories friables facilement amovibles, très minces à négligeables. Le laitier semble ne pas recouvrir complètement le cordon de soudure d'un point de vue visuel.

Les soudures d'angle soudées avec E6010 ont généralement une face de soudure relativement plate et ont une ondulation plutôt grossière et inégalement espacée. L'utilisation d'E6010 sur le bouchage et la passe de remplissage nécessite le maintien de la température de préchauffage au-dessus de 100°C pour assurer l'élimination de l'hydrogène de la soudure. [5]

La cellulose est un « composé organique », qui implique de l'hydrogène. Nous sommes tous d'accord pour dire que l'hydrogène peut faire de mauvaises choses dans le soudage de

l'acier, comme le craquage à froid, cependant, lorsqu'il est utilisé à bon escient, l'hydrogène peut être un ami. Pour des raisons qui ne sont pas tout à fait bien comprises, l'hydrogène provoque un arc beaucoup plus concentré, et c'est la raison pour laquelle E6010 et E6011 ont un arc rigide avec un grand pouvoir de pénétration... c'est la raison pour laquelle ils peuvent pénétrer à travers la peinture et la rouille, et si vous les augmentez à « 11 », ils deviennent des torches coupantes ! Non seulement E6010 et E6011 utilisent l'hydrogène à leur avantage, mais il est également utilisé occasionnellement dans des superpositions de plasma de très haute technologie pour avoir un arc plus chaud et plus concentré. (Voir figure 1.21).



*Figure I 21. Electrode 6010 [5]*

### **2.1.2. Type de couverture de l'électrode E6010 .**

Les revêtements d'E6010 sont principalement de type très cellulosique (principalement de la pâte à papier), dépassant généralement 30 % en poids. Les autres matériaux généralement ajoutés au revêtement comprennent le dioxyde de titane (fonctionne comme élément stabilisateur d'arc), les désoxydants métalliques tels que le ferromanganèse, divers types de silicates de magnésium ou d'aluminium (pour éliminer les effets néfastes du soufre ou des éléments d'oxydation dans la soudure) et le sodium liquide. Silicate comme liant pour maintenir le revêtement sur le fil nu d'acier doux. En raison de leur composition de revêtement, ces électrodes sont généralement décrites comme des électrodes bâtons de type sodium à haute teneur en cellulose. Pendant la combustion du revêtement, le revêtement de flux d'E6010 créera principalement de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. [5]

### **2.1.3. Electrode E6010 Spécification et classification .**

Les électrodes E6010 sont classées selon ASME Section IIC, 5.1 Spécification des électrodes en acier au carbone pour le soudage à l'arc métallique Schilde ou E4310 selon CSA W48 ou SFA 5.1M.

Semblable à d'autres électrodes de soudage, chaque chiffre de l'électrode E6010 a sa propre signification. Ces chiffres donnent des informations très précieuses sur cette électrode comme indiqué ci-dessous :

- E signifie électrodes pour soudage SMAW ou à la baguette.
- Les deux chiffres suivants, c'est-à-dire 60, indiquent que la résistance à la traction du dépôt de soudure est de 60 mpa.
- Le chiffre suivant 1 indique qu'il s'agit de toutes les positions d'électrode, ce qui signifie les positions F, V, OH, H. Où F = plat, H = horizontal, H-congé = congé horizontal, V = vertical et OH signifie la position au-dessus de la tête.
- Le dernier chiffre 0 indique qu'il s'agit d'un sodium à haute teneur en cellulose et ne peut être utilisé qu'avec la polarité DCEP

### **2.1.4. Exigences Charpy V-Notch Impact (ténacité) pour l'électrode de type E6010 .**

E6010 exige que l'électrode de soudage Stick ait des valeurs de ténacité minimales en V de 20 °C à 30 °C.

E6010 Electrode de soudage Polarité : Les électrodes E6010 peuvent être utilisées avec le DCEP (électrode positive) uniquement et conçues uniquement pour le DCEP. Le soudage avec AC ou DC entraînera un arc instable et une mauvaise finition de soudage pour les cordons de soudure.

### **2.1.5. Stockage et cuisson/reconditionnement de l'électrode E6010 .**

Les revêtements cellulosiques pour les électrodes E6010 [E4310] nécessitent des niveaux d'humidité d'environ 3 % à 7 % pour un fonctionnement correct ; par conséquent, un stockage ou un conditionnement au-dessus de la température ambiante peut trop les sécher et nuire à leur fonctionnement.

Après avoir ouvert l'emballage de l'électrode E6010, rangez l'électrode au sec à température ambiante et à l'écart de la source de chaleur. Le reconditionnement n'est pas recommandé car il asséchera l'humidité essentielle du revêtement qui est nécessaire pour générer de l'hydrogène gazeux pour les caractéristiques de l'électrode. [5]

### **2.1.6. Sélection du courant pour l'électrode E6010 .**

Le réglage correct de l'ampérage (courant) de soudage dépend principalement du diamètre de l'électrode utilisée. Par exemple, une tige E6010 de 2.5mm fonctionne bien de 70 à 130 ampères, tandis qu'une tige E6010 de 3.2mm soude à des courants allant jusqu'à 225 ampères.



## Chapitre 01 : Généralités sur le soudage

---

Ces électrodes ont été conçues pour être utilisées avec le DCEP (électrode positive). L'ampérage maximum qui peut généralement être utilisé avec les plus grandes tailles de ces électrodes est limité par rapport à celui d'autres classifications en raison de la perte de projections élevée qui se produit avec un ampérage élevé. (Voir tableau 1.8). [5]

*Tableau 1.8: Modes Opératoires typiques [5]*

Courant						
Polarité	(2.4 mm)	(3.2 mm)	(4.0 mm)	(4.8 mm)	(5.6 mm)	(6.4 mm)
DC+	40 - 70	75 - 130	90 - 175	140 - 225	200 - 275	230 - 350

### 2.1.7. Utilisations de la baguette de soudage E6010 :

- Applications multipasse dans les positions de soudage verticales et aériennes et où des soudures de bonne solidité sont requises.
- Pour raccorder des tuyaux et sont généralement capables de souder en position verticale avec une progression en montée ou en descente.
- Utilisé dans la construction navale, les bâtiments, les ponts, les réservoirs de stockage, la tuyauterie et les raccords de récipients sous pression.

### 2.1.8. Caractéristiques de l'électrode de type E6010 :

- Toutes positions, particulièrement bonnes pour la verticale et au-dessus.
- Scories légers avec peu d'interférences de scories pour un contrôle facile de l'arc.
- Pénétration profonde avec un maximum de mélange.
- Capable de soudures de qualité radiographique, hors de position

## 2.2. Baguette enrobée de base (basique) E7018:

Pour de nombreux entrepreneurs, le soudage à la baguette est au cœur de leur activité. Au fil des ans, les matériaux utilisés pour les applications structurelles ont continué à se prêter facilement au processus, faisant de l'utilisation de métaux d'apport comme les électrodes enrobées AWS (American Welding Society) E7018 un choix de premier plan. Ces électrodes enrobées offrent les propriétés chimiques nécessaires aux applications, ainsi que les faibles niveaux d'hydrogène nécessaires pour éviter des problèmes tels que la fissuration. Ils

fournissent également les propriétés mécaniques appropriées pour ces travaux – la plupart des aciers utilisés pour les applications structurelles (A514, par exemple) nécessitent des métaux d'apport offrant une résistance à la traction de 70 mpa. Les électrodes enrobées E7018 répondent à ces spécifications. Comme pour toute partie du processus de soudage, connaître les bases des électrodes enrobées à faible teneur en hydrogène E7018 peut être utile pour comprendre leur fonctionnement, leurs performances et les soudures qui en résultent. Pour vous aider en cours de route, tenez compte de ces détails. [6]

### 2.2.1. Caractéristiques :

En règle générale, les électrodes enrobées E7018 sont un bon choix pour les applications d'aciers de construction en raison de leur arc lisse, stable et silencieux et de leurs faibles niveaux de projections. Étant donné que ces applications nécessitent également une attention particulière à l'apport de chaleur et sont généralement soumises à des délais stricts, il est important d'avoir un métal d'apport qui donne à l'opérateur de soudage un bon contrôle sur l'arc et qui minimisera le besoin de nettoyage après soudage – tout temps passé retravailler ou nettoyer les soudures signifie moins de temps consacré à gagner en productivité. Ces électrodes enrobées offrent également une bonne pénétration (généralement appelée « pénétration moyenne ») de sorte que les opérateurs de soudage, avec la bonne technique, peuvent généralement éviter les défauts de soudure comme le manque de fusion. Ils offrent également de bons taux de dépôt, permettant aux opérateurs de soudage d'ajouter plus de métal de soudure dans le joint en un temps relativement court. Cette caractéristique est rendue possible par l'ajout de poudre de fer au revêtement de l'électrode enrobée. D'autres éléments comme le manganèse et le silicium (qui doivent tous deux être présents à des niveaux spécifiques dans toutes les électrodes enrobées E7018) offrent également des avantages distincts à ces produits. En particulier, les éléments fonctionnent ensemble comme des désoxydants pour aider à souder à travers certains niveaux de saleté, de débris ou de calamine que l'on trouve couramment sur les applications d'acier de construction. Enfin, les électrodes enrobées E7018 offrent de bons démarrages et redémarrages d'arc, ce qui aide à éliminer les problèmes tels que la porosité au début ou à la fin de la soudure. Si le réamorçage est autorisé, il est nécessaire d'enlever le dépôt de silicium qui se forme à l'extrémité de l'électrode enrobée pour amorcer à nouveau un arc. Notez cependant que certains codes de soudage ou procédures WPS ne permettent pas le réamorçage des électrodes enrobées. Consultez toujours les spécifications du travail au préalable. [6]

### 2.2.2. Classification et désignations :

Comme pour tout métal d'apport, les électrodes enrobées E7018 sont classées par l'American Welding Society (AWS). Dans leur nomenclature, le « E » indique que le produit est une électrode enrobée ; le « 70 » indique que le métal d'apport fournit une résistance à la traction de 70 mpa ; le « 1 » indique qu'il peut être utilisé dans toutes les positions de soudage ; et le « 8 » fait référence au revêtement à faible teneur en hydrogène sur l'électrode, ainsi qu'à la pénétration moyenne qu'il fournit et aux types de courant dont il a besoin pour fonctionner (voir la section suivante). En plus de la classification AWS standard, les électrodes enrobées E7018 peuvent également avoir des désignateurs supplémentaires tels que H4 ou H8. Ces désignations font référence à la quantité d'hydrogène diffusible que l'électrode enrobée dépose dans la soudure. Par exemple, H4 indique que le produit contient 4 ml ou moins d'hydrogène diffusible par 100 g de soudure. De même, le désignateur H8 indique que l'électrode enrobée contient 8 ml ou moins d'hydrogène diffusible par 100 g de soudure. Certaines électrodes enrobées E7018 auront une désignation « R » supplémentaire (par exemple, E7018 H4R). Le « R » indique que le produit a subi des tests spécifiques et que le fabricant du métal d'apport l'a jugé résistant à l'humidité. Plus précisément, pour obtenir cette désignation, le produit doit être capable de résister à l'humidité (dans une plage donnée) après avoir été exposé à une température de 80 degrés Fahrenheit et à une humidité relative de 80 % pendant neuf heures. L'ajout d'un "-1" sur une électrode enrobée E7018 (par exemple, E7018-1) signifie que le produit offre des valeurs d'impact supplémentaires pour résister à la fissuration à des températures plus basses. Les produits classés comme tels offrent des valeurs d'impact de 20 à 50 °C par rapport à une électrode enrobée standard E7018 qui fournit des valeurs d'impact de 20 à 30 °C. Fonctionnement Les électrodes enrobées E7018 sont conçues pour fonctionner avec une source d'alimentation qui fournit un courant alternatif ou continu (électrode positive-EP ou électrode négative-EN). [6]

Pendant le soudage AC, les stabilisateurs d'arc supplémentaires et/ou la poudre de fer présent dans le revêtement de ces métaux d'apport permettent de maintenir un arc stable même lorsque la source d'alimentation passe par les courants alternatifs (jusqu'à 120 fois par seconde). Cependant, les soudures créées avec une électrode enrobée E7018 peuvent ne pas être aussi lisses en raison des changements continus de direction du courant. À l'inverse, le soudage avec un courant DCEP peut faciliter le contrôle de l'arc et obtenir un cordon de soudure plus attrayant car la direction du flux de courant est constante. Pour obtenir les meilleurs résultats, il est toujours important de suivre les recommandations du fabricant concernant les paramètres de fonctionnement pour le diamètre d'électrode enrobée E7018 donné. (Voir tableau 1.9).

*Tableau I 9. Modes Opératoires typiques [6]*

Courant						
Polarité	(2.4 mm)	(3.2 mm)	(4.0 mm)	(4.8 mm)	(5.6 mm)	(6.4 mm)
DC+	80 - 100	90 - 150	110 - 230	150 - 300	220 - 350	270 - 380

### 2.2.3. Techniques .

Une technique appropriée est toujours importante pendant le soudage et l'utilisation d'une électrode enrobée E7018 ne fait pas exception. Pour une électrode enrobée E7018, maintenez un bon angle d'attaque et "faites glisser" l'électrode enrobée le long du joint de soudure. Un angle de 3 à 5 degrés est idéal pour le soudage vertical vers le haut, et l'utilisation d'une légère technique de tissage fonctionne également bien dans cette position. Dans les positions à plat et horizontale, maintenez une longueur d'arc serrée, idéalement, en gardant l'électrode enrobée presque au-dessus du bain de fusion. Cela permet de minimiser les risques de porosité. Une bonne règle empirique consiste à maintenir une largeur de cordon de soudure d'environ deux fois et demie le diamètre du fil central à l'intérieur de l'électrode enrobée pour les applications de soudage à plat et horizontales. Pour le soudage vertical vers le haut, essayez de créer une largeur de cordon de soudure d'environ deux fois et demie à trois fois la taille du fil central. Des cordons de soudure plus larges que ces recommandations augmentent le risque d'inclusions de laitier, qui compromettent l'intégrité d'une soudure structurelle. [6]

### 2.2.4. Emballage, stockage, manipulation et reconditionnement .

En raison de la désignation à faible teneur en hydrogène des électrodes enrobées E7018, ces produits sont généralement expédiés par le fabricant du remplisseur dans un emballage hermétiquement scellé. Pour se protéger des dommages causés par l'humidité, il est important de conserver cet emballage intact jusqu'à ce que les produits soient prêts à l'emploi. Il est également important de conserver les électrodes enrobées dans une zone de stockage sèche. Une fois ouvertes, les soudeuses doivent manipuler les électrodes enrobées avec des gants propres et secs pour empêcher la saleté et les débris d'adhérer au revêtement des produits et pour éliminer la possibilité d'absorption d'humidité par la sueur ou les huiles sur leurs mains. Ces produits doivent également être conservés dans une étuve aux températures recommandées par le fabricant de métal d'apport après ouverture. Dans certains cas, certains codes de travail peuvent dicter la durée pendant laquelle un emballage d'électrodes enrobées peut rester ouvert sur un chantier et la fréquence à laquelle le produit peut être reconditionné dans un four de maintien - un reconditionnement fréquent peut

dégrader le revêtement extérieur et réduire la durée de conservation du produit. Consultez toujours les spécifications et les codes pour connaître les exigences de chaque travail. [6]

### 2.3. Baguette enrobée rutile (E6013) :

#### 2.3.1. Signification de la baguette de soudage E6013 :

L'électrode SMAW/Stick E6013 selon AWS SFA 5.1 ou E4313 selon SFA 5.1M ou CSA W48 est l'électrode de soudage bâton la plus largement utilisée pour les travaux de tôlerie, de fabrication générale et de soudage structurel. Les électrodes E6013 [E4313] sont très similaires aux électrodes E6012 [E4312] mais E6013 présente des différences distinctes dans le revêtement, la formation de scories et la polarité de soudage. [7]

Les électrodes E6013 ont un faible pouvoir de pénétration, un laitier à congélation rapide, ce qui peut entraîner une pénétration incomplète dans les joints soudés d'angle.

L'arc des électrodes E6013 [E4313] est plus silencieux et la surface du cordon est plus lisse avec un profil d'ondulation plus fin. Les caractéristiques d'utilisation des électrodes E6013 [E4313] varient légèrement d'une marque à l'autre. Certaines marques sont recommandées pour les applications de tôlerie où leur capacité à souder de manière satisfaisante en position de soudage vertical avec progression vers le bas est un avantage. (Voir figure 1.22).



*Figure 1.22. Baguette enrobée rutile [7]*

#### 2.3.2. Type de couverture de l'électrode E6013 :

Le revêtement de flux d'électrode E6013 contient du rutile, de la cellulose, du ferromanganèse, du silicate de potassium comme liant et d'autres matériaux siliceux. Les composés de potassium permettent aux électrodes de fonctionner en courant alternatif à de faibles ampérages et de faibles tensions en circuit ouvert. Pendant la combustion du revêtement, le revêtement de flux d'E6013 créera principalement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). [7]

### 2.3.3. Différence entre E6012 et E6013 :

La principale différence entre les électrodes E6012 et E6013 est que le revêtement E6012 contient du sodium, tandis que le revêtement E6013 contient du potassium. Les E6012 et E6013 fonctionnent tous deux en courant continu (DC+), mais seul le E6013 est adapté pour fonctionner en courant alternatif (AC) et DCEN. Il est recommandé de travailler avec un courant constant pour contrebalancer l'instabilité de la main du soudeur.

### 2.3.4. Electrode E6013 Spécification et classification :

Les électrodes E6013 sont classées selon ASME Section IIC, 5.1 Spécification des électrodes en acier au carbone pour le soudage à l'arc métallique Schilde ou E4313 selon CSA W48 ou SFA 5.1M.

Semblable à d'autres électrodes de soudage, chaque chiffre de l'électrode E6013 a sa propre signification. Ces chiffres donnent des informations très précieuses sur cette électrode comme indiqué ci-dessous :

- E signifie électrodes pour soudage SMAW ou à la baguette.
- Les deux chiffres suivants, c'est-à-dire 60, indiquent que la résistance à la traction du dépôt de soudure est de 60 mpa.
- Le chiffre suivant 1 indique qu'il s'agit de toutes les positions d'électrode, ce qui signifie les positions F, V, OH, H. Où F = plat, H = horizontal, H-congé = congé horizontal, V = vertical et OH signifie la position au-dessus de la tête.
- Le dernier chiffre 3 indique qu'il s'agit d'un potassium à haute teneur en oxyde de titane et ne peut être utilisé qu'avec les polarités DCEP, DCEN et AC.

### 2.3.5. Exigences Charpy V-Notch Impact (ténacité) pour l'électrode de type E6013 :

Les exigences Charpy V-Notch ou de ténacité ne sont pas spécifiées pour les électrodes de type E6013 dans la section IIC de l'ASME. Ainsi, aucune exigence ne peut être imposée au fabricant d'électrodes et ces électrodes ne sont pas conçues pour des applications à basse température. [7]

E6013 Electrode de soudage Polarité : Les électrodes E6013 peuvent être utilisées avec les polarités DCEP (Direct Courant Electrode Positive), DCEN (Direct Courant Electrode Négative) et AC (Courant Alternative).

### 2.3.6. Stockage et cuisson/reconditionnement de l'électrode E6013 :

Après avoir ouvert l'emballage de l'électrode E6013, stockez les électrodes à 60 à 100 °C et à moins de 50 % d'humidité relative ou dans un four de maintien 100 à 120 °C température

ambiante. Les électrodes de type E6013 doivent être cuites/reconditionnées à une température de  $[135^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}]$  pendant 1 heure. [7]

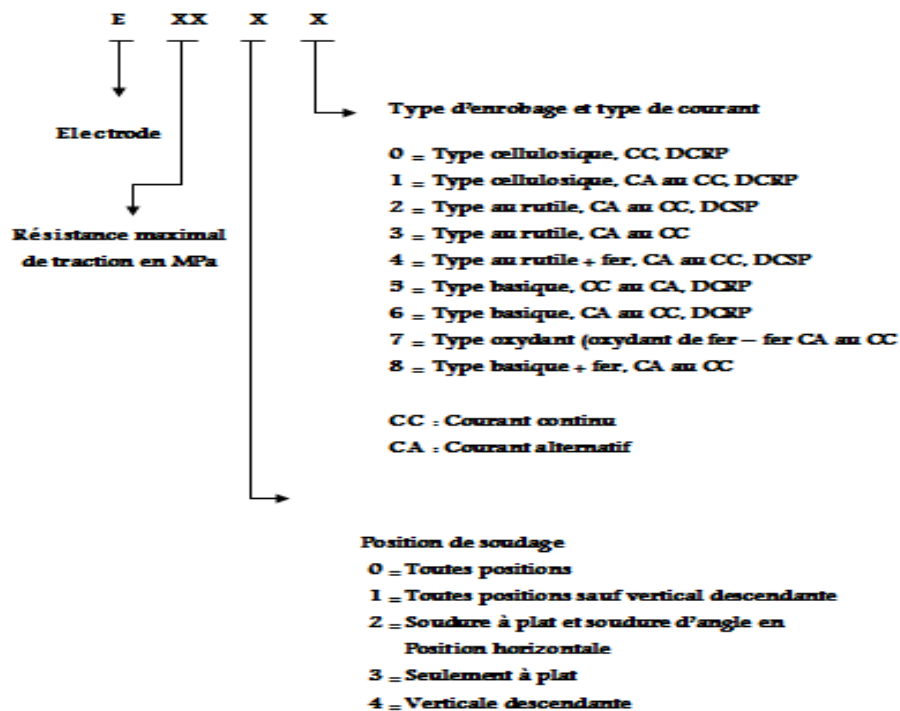
**2.3.7. Sélection du courant pour l'électrode E6013 :**

Le réglage correct de l'ampérage (courant) de soudage dépend principalement du diamètre de l'électrode utilisée. Le tableau ci-dessous donne l'ampérage de soudage recommandé pour les diamètres d'électrode.

*Tableau I 10. Le réglage de courant [7]*

diamètre	Courant	ampérage	Intervalle d'ampérage	Intervalle de voltage
(2.4 mm)	DCEP, AC, ou DCEN	70	40 – 80	19 – 24
(3.2 mm)	DCEP, AC, ou DCEN	100	70 – 120	18.5 – 22.5
(4.0 mm)	DCEP, AC, ou DCEN	150	130 – 160	20 – 24
(4.8 mm)	DCEP, AC, ou DCEN	190	140 -220	20 – 22.5

**2.4. Désignation d'électrodes :**



*Figure I 23. Désignation des électrodes*

### 3. Les risques des fumés :

#### 3.1. Un risque majeur :

Les fumées de soudage de métaux peuvent selon leur composition, leur concentration et la durée d'exposition, présenter des effets néfastes pour la santé et être à l'origine de pathologies professionnelles. Les risques concernent les soudeurs mais également les personnes qui travaillent à proximité. Leur prévention repose sur la mise en œuvre de dispositifs de protection collective qui peuvent être complétés par le port d'équipements de protection individuelle. [8]

#### 3.2. Effets sur la santé :

Du fait des hautes températures atteintes au point de fusion, tous les procédés de soudage émettent des fumées potentiellement nocives qui peuvent être inhalées par les soudeurs et les personnes travaillant à proximité. Ces fumées, mélangées à de l'air chaud, sont formées, en proportions variables suivant le procédé, de gaz et de poussières dont les dimensions sont en quasi-totalité inférieures au micromètre. Du fait de leur très petite taille, ces poussières sont susceptibles d'atteindre la région alvéolaire de l'appareil respiratoire.

Les fumées de soudage peuvent être à l'origine d'intoxications entraînant la survenue de pathologies aiguës ou chroniques. [8]

Parmi les principaux polluants contenus dans les fumées, on peut citer :

- le chrome VI, le nickel, l'aldéhyde formique, le cobalt ou le béryllium : potentialité cancérigène.
- le cobalt et le béryllium : fibrose pulmonaire.
- l'aluminium, l'antimoine, le baryum, le béryllium, le chrome, le cuivre, les fluorures, le magnésium, le manganèse, le molybdène, le nickel, le plomb, le titane, le vanadium, le zinc et le zirconium : irritants, toxiques ou allergisants.
- l'aluminium, la silice amorphe, le titane, le fer ou l'étain : surcharge pulmonaire.
- le monoxyde de carbone, le monoxyde d'azote, le cyanure d'hydrogène : toxiques.
- l'ozone, le dioxyde d'azote, l'aldéhyde formique et le phosgène : irritants.

Le soudage des métaux présente de multiples risques pour la santé et la sécurité des salariés. Il peut ainsi provoquer des blessures, des maladies aiguës et chroniques mais également des accidents parfois graves tels que l'électrocution chez les soudeurs ainsi que chez les personnes travaillant à proximité. Outre l'exposition aux fumées de soudage, les principaux risques sont l'asphyxie-anoxie (appauvrissement de l'atmosphère en oxygène lié à l'utilisation de procédés de soudage sous protection gazeuse), les brûlures de la peau (par contact, par projection, etc.), les lésions oculaires et auditives, l'électrisation, les troubles



musculosquelettiques, etc. Certains risques existent quel que soit le procédé employé, d'autres varient en fonction de la technique et des matériaux de base et d'apport utilisés. [8]

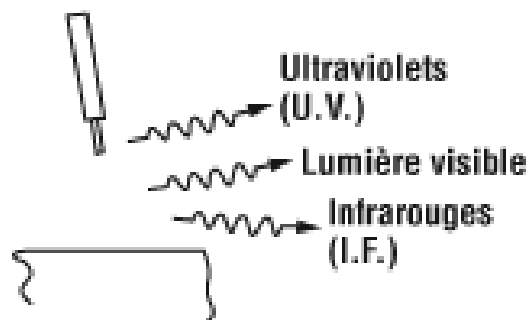


*Figure I 24. Fumés de soudage [8]*

### 3.3. Effets des radiations sur les yeux et sur la peau :

#### 3.3.1. Les types de radiations sont associés au soudage

Un arc de soudage émet un rayonnement couvrant une gamme étendue de longueurs d'onde, soit de 200 à 1 400 nanomètres [nm] (ou 0,2 à 1,4 micromètre ( $\mu\text{m}$ )). Ce spectre comprend les domaines de l'ultraviolet (U.V.) (200 à 400 nm), de la lumière visible (400 à 700 nm) et de l'infrarouge (700 à 1 400 nm). (Voir figure 1.25). [9]



*Figure I 25. types de radiations sont associés au soudage [9]*

Le domaine des ultraviolets se subdivise en trois sous-domaines : les rayons UV-A (315 à 400 nm), les rayons UV-B (280 à 315 nm) et les rayons UV-C (100 à 280 nm). Tous les rayons UV-C et la plupart des rayons UV-B sont absorbés par la cornée de l'œil. Les rayons UV-A traversent la cornée et sont absorbés par le cristallin.

Une partie des rayons ultraviolets, des rayons visibles et des rayons infrarouges peut atteindre la rétine.

### **3.3.2. Les symptômes du « coup d'arc »**

Certains rayons U.V. peuvent endommager la surface et la membrane muqueuse (conjonctive) de l'œil; c'est ce qu'on appelle communément le « coup d'arc ». Il s'agit d'une conjonctivite, ou inflammation de la membrane muqueuse recouvrant le devant de l'œil, dont les symptômes sont les suivants :

- douleur pouvant aller d'une légère sensation de pression dans l'œil jusqu'à une douleur intense.
- larmoiement et rougeur de l'œil et des membranes qui l'entourent (œil injecté de sang).
- sensation de sable dans les yeux.
- sensibilité anormale à la lumière.
- tendance à se protéger de la lumière (photophobie).

La durée d'exposition susceptible de produire ces effets dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'intensité des radiations, de la distance entre l'arc électrique et l'œil, de l'angle d'incidence des rayons sur l'œil et du type de protection oculaire que porte le soudeur tout aussi bien que la personne travaillant à proximité. Toutefois, quelques secondes d'exposition à un rayonnement U.V. intense suffisent pour provoquer ce trouble. Il est possible que les symptômes ne soient ressentis que plusieurs heures après l'exposition.

### **3.3.3. L'effet de soudage aux yeux**

Les radiations U.V. peuvent à long terme causer des cataractes chez certains sujets. L'exposition de longue durée à la lumière infrarouge peut échauffer le cristallin et causer la formation de cataractes.

La lumière visible produite lors du soudage est si vive que l'iris de l'œil peut éprouver des difficultés à se contracter suffisamment ou assez rapidement pour réduire la quantité de lumière parvenant à la rétine. Il en résulte des éblouissements temporaires et une fatigue oculaire. [9]

### **3.3.4. Les dangers des radiations produites lors du soudage présentent elles pour la peau**

L'arc ou la flamme de soudage émet une lumière intense composée de rayons ultraviolets, visibles et infrarouges.

- Les rayons U.V. produits par l'arc peuvent causer des brûlures cutanées tout comme les rayons U.V. du soleil, qu'il s'agisse des rayons directs ou des rayons réfléchis par les surfaces métalliques, les murs et le plafond. Certains types de revêtements de finition et certaines couleurs sont moins propices à la réflexion des rayons U.V.
- L'exposition aux rayons U.V. peut à long terme causer le cancer de la peau.
- Les infrarouges et la lumière visible ne présentent en général aucun danger pour la peau.

## **Chapitre 02**

### **Défauts de soudage, et CND**

### Introduction :

Dans le domaine de soudage, il existe plusieurs types des défauts de soudure ainsi que différentes pour les prévenir et les corriger.

Pour détecter les défauts de soudure, nous devons faire le Contrôle Non Destructif (CND).

Ce chapitre vise à identifier et à décrire les opérations de Contrôle Non Destructif (CND) et les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé.

### 1. Les principaux défauts de soudage

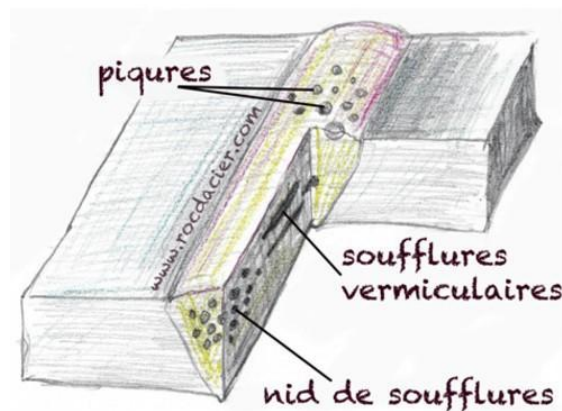
Fréquemment, les soudeurs doivent affronter des défauts sur le matériel de soudage et y remédier. Ces défauts ne sont pas toujours faciles à détecter par un simple coup d'œil. Air Liquide, spécialiste en consommables de soudage, vous explique en détail les principaux défauts de matériel de soudage en soudage de métaux, et comment les éviter en atelier. [10]

#### 1.1. Défauts de soufflures ou cavités :

Les soufflures (cavités) sont des défauts fréquents en soudage. Ce sont souvent des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure. Les piqures sont des soufflures débouchantes, donc visibles en surface. [11]

##### 1.1.1. Types de soufflures fréquentes :

- Nid de soufflures
- Soufflures vermiculaires
- Piqures



*Figure II 1. Soufflures et cavités [11]*

### 1.1.2. Cause des soufflures :

Les soufflures peuvent être dues :

- à des courants d'air
- un manque de gaz de protection
- un débit de ce gaz trop faible
- la présence de graisse ou d'huile sur le métal de base ou le métal d'apport.
- une buse encrassée
- un mauvais angle de soudage qui entraîne une mauvaise protection gazeuse
- des impuretés dans le joint à souder.

### 1.1.3. Remèdes contre le défaut de soufflures .

Pour limiter le risque de soufflures :

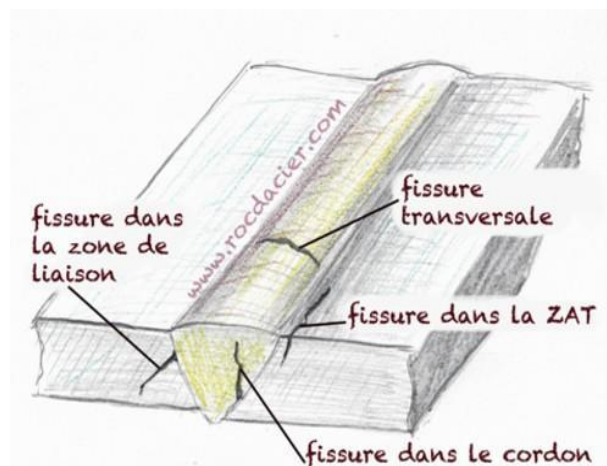
- s'assurer que la surface du métal de base et d'apport est propre et non gras.
- vérifier la protection gazeuse
- une intensité de courant trop faible et une vitesse de soudage trop élevée peut entraîner ce défaut
- les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

## 1.2. Défauts de fissure .

Les fissures sont des ruptures du matériau. Elles sont orientées selon le type de défaut. Ces fissures peuvent se trouver aussi bien dans le métal de base que dans le cordon de soudure, dans la zone affectée thermiquement ou la zone de liaison. [11]

### 1.2.1. Types de fissures fréquentes .

- Fissure longitudinale
- Fissure transversale
- Fissure de cratère
- Fissure sous cordon débouchant
- Fissure sous cordon non débouchant



*Figure II 2: Les fissures [11]*

### 1.2.2. Causes des fissures .

Les fissures peuvent être dues :

- à des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...)
- volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite...)
- arrêt trop brutal de la soudure
- arrêt prématuré de la protection gazeuse en TIG.

### 1.2.3. Remèdes contre les fissures :

Pour éviter les fissures :

- Choisir un métal d'apport approprié
- Adopter un préchauffage approprié
- Effectuer une bonne préparation des joints



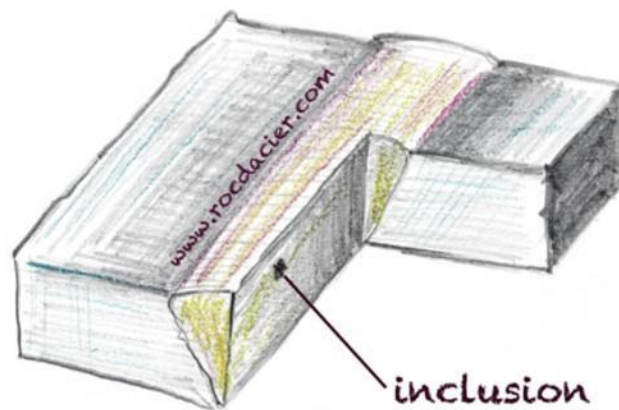
*Figure II 3: Fissure sur rail [11]*

### 1.3. Défauts d'inclusion :

En soudage, les inclusions désignent des corps étrangers présents au cœur du cordon. [11]

#### 1.3.1. Types d'inclusions fréquentes :

- Inclusion solide : corps étranger inclus dans le cordon de soudure.
- Inclusion de laitier : morceau de laitier inclus dans le cordon de soudure.
- Inclusion de flux : morceau de flux inclus dans le cordon de soudure.
- Inclusion d'oxyde : oxyde métallique emprisonné dans la soudure.
- Inclusion métallique : particule métallique de composition différente au cordon emprisonnée (souvent tungstène en TIG)



*Figure II 4. Inclusion [11]*

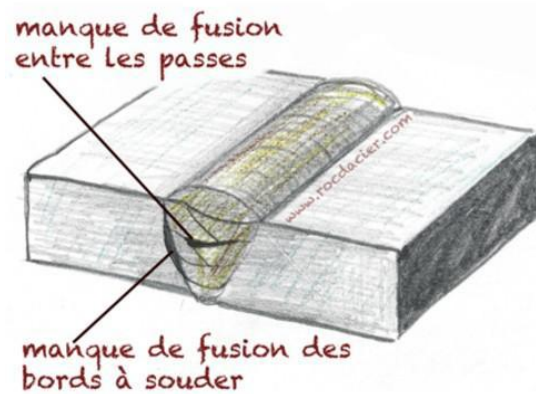
### 1.4. Défaut de manque de fusion (collage) :

Concernant le manque de fusion, il s'agit d'une mauvaise continuité métallurgique entre les métaux à assembler. Il peut aussi s'agir de manque de fusion des passes les unes avec les autres. [11]

#### 1.4.1. Types de manque de fusion :

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





*Figure II 5. Manque de fusion [11]*

#### 1.4.2. Cause des défauts de collage :

Ces défauts sont fréquents en soudage MAG et surviennent généralement quand :

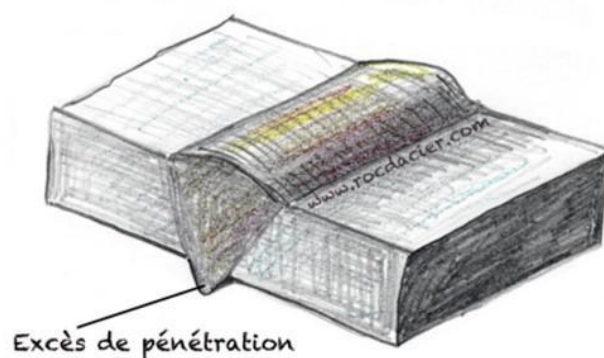
- Angle du chanfrein trop étroit
- Mauvaise orientation des électrodes
- Intensité trop faible

#### 1.5. Défauts de pénétrations .

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration. L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente. [11]

##### 1.5.1. Cause des défauts d'excès de pénétration .

- Jeu de soudage trop grand
- Vitesse d'avance trop lente
- Intensité trop élevée
- Distance électrode/pièce trop courte



*Figure II 6. Excès de pénétration [11]*

### Remèdes

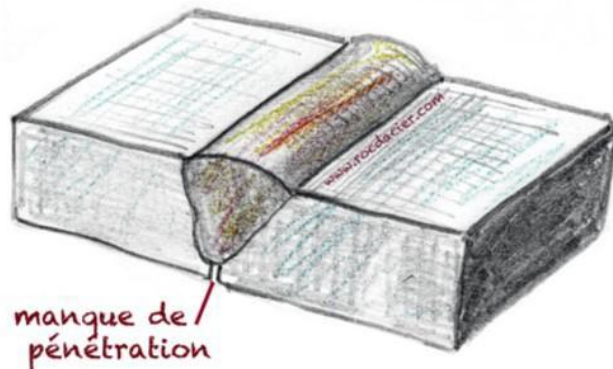
- Réduire le jeu de soudage
- Souder plus vite
- Réduire l'intensité
- Rapprocher la torche de la pièce pendant le soudage

### 1.5.2. Cause des défauts de manque de pénétration .

- Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées)
- Vitesse d'avance trop élevée
- Intensité trop faible
- Métal de base trop froid

### Remèdes :

- Agrandir l'écart des pièces à souder
- Souder plus doucement
- Augmenter l'intensité
- Préchauffer les pièces



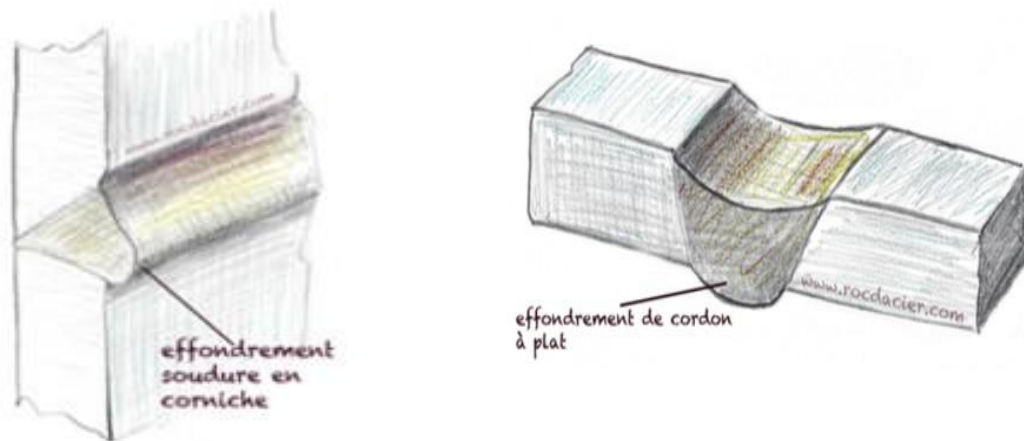
*Figure II 7. Manque de pénétration [11]*

### 1.6. Défaut d'effondrement :

Lorsque l'énergie de soudage est trop importante, on peut avoir un effondrement du métal pendant la fusion. [11]

1.6.1. Types d'effondrements.

- Effondrement à plat
- Effondrement en angle
- Effondrement en corniche



*Figure II 8: Effondrement en corniche [11]*

1.7. Défauts retassures et criques .

Lorsque le métal se refroidit, il est possible que le cordon ne se referme pas de façon uniforme en fin de soudure. Le creux formé est appelé retassure. Les retassures de cratère sont des défauts dus à une mauvaise reprise de passes ou à un arrêt trop brusque de l'arc électrique. Les criques sont défauts non visibles. [11]



*Figure II 9: Retassure de cratère [11]*

### 1.8. Morsures et Caniveau .

Le caniveau est un défaut du à une trop grande énergie apportée pendant la soudure. Ce qui entraine un creux sur une grande partie de la longueur de la soudure. Les caniveaux peuvent être en surface, entre le cordon et le métal de base (y compris entre les passes, si plusieurs passes). Ils peuvent aussi être à la racine.

Les morsures sont des défauts locaux (ponctuels).

On veillera à réduire l'énergie de soudage pour éviter ce défaut (réduire intensité, augmenter la vitesse d'avance, augmenter la longueur d'arc,...) [11]

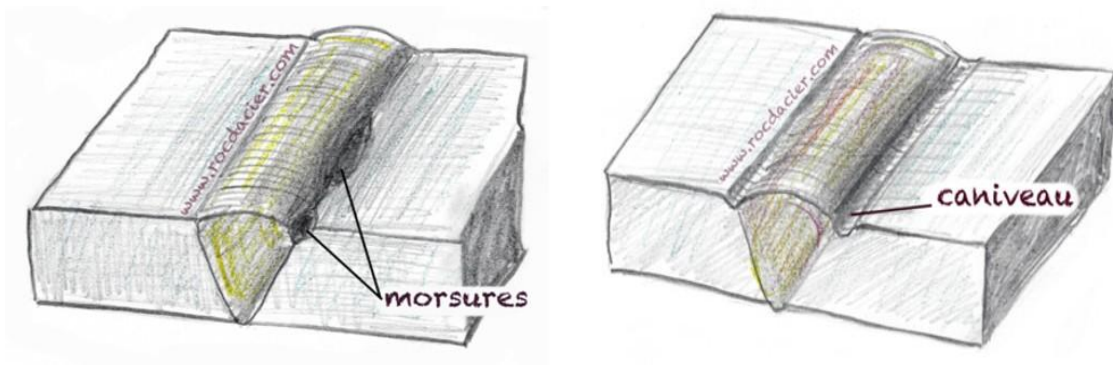


Figure II 10. Morsures et Caniveau [11]

### 1.9. Défauts géométriques des cordons .

#### 1.9.1. Défaut de convexité.

Il s'agit d'un excès de matière sur la longueur de la soudure, ou localisé. Les normes imposent des limites d'épaisseur pour le cordon. Si le cordon est trop bombé et dépasse ces limites, alors il y a défaut de convexité. [11]

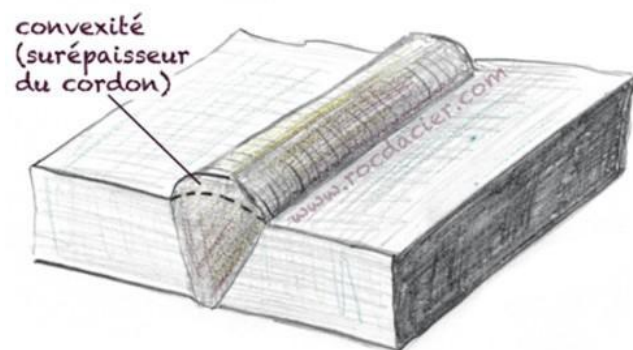
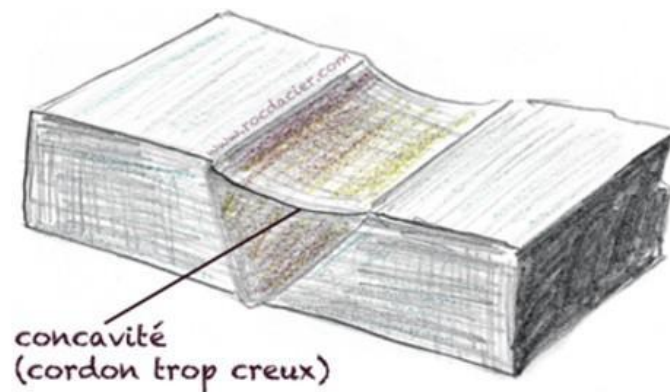


Figure II 11. Convexité [11]

### 1.9.2. Défaut de concavité.

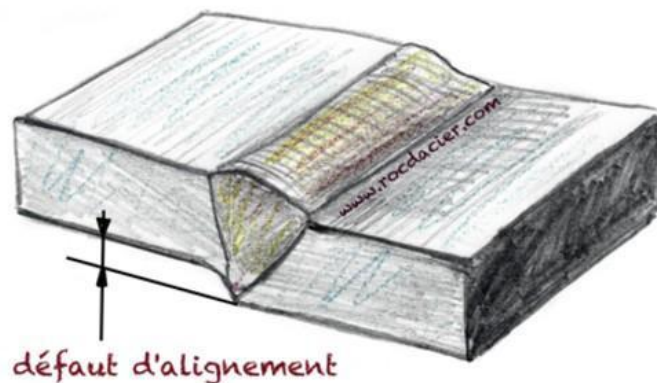
Il s'agit d'un manque de matière sur la longueur de la soudure, ou localisé. Si le cordon est trop creux et dépasse les limites des normes, alors il y a défaut de concavité. [11]



*Figure II 12. Concavité [11]*

### 1.9.3. Défaut d'alignement .

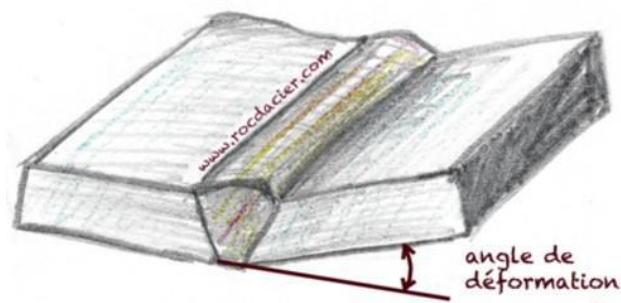
Lorsque les pièces sont mal bridées et/ou le pointage insuffisant, on peut avoir un défaut d'alignement. [11]



*Figure II 13. Défaut d'alignement [11]*

### 1.9.4. Déformations angulaires .

Les déformations importantes de l'opération de soudage peuvent aussi entraîner un défaut angulaire. Les pièces assemblées ne respectent pas la forme souhaitée. [11]



*Figure II 14. Déformation angulaire [11]*

#### 1.9.5. Défauts du au recharge :

Le rochage est souvent rencontré lors du soudage des aciers inoxydables (TIG ou MIG). Si la protection gazeuse est mauvaise, le bain de fusion s'oxyde est créé ce défaut. Le défaut de rochage est souvent rencontré à l'envers du cordon, ou la protection n'est pas toujours bien assurée. [11]



*Figure II 15. Défaut de rochage [11]*

### 2. Contrôle Non Destructif (CND):

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'«Essais Non Destructifs » (END) ou d'«Examens Non Destructifs». [12]

#### 2.1. Utilisations du contrôle non destructif

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs),
- l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs),
- l'industrie navale (contrôle des coques),
- l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, ..),
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage..),
- le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies),
- l'inspection alimentaire...

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...),
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (nucléaire, canalisation de gaz...). [12]

#### 2.2. Technique de contrôle non destructif.

Il doit s'effectuer suivant 3 stades bien distincts :

- Avant soudage
- Pendant soudage
- Après soudage

##### 2.2.1. Avant soudage :

- Choix du matériau et de la matière (nature, composition chimique)
- Choix des électrodes (nature, type, composition chimique)
- Préparation des bords (type et dimensions des chanfreins)

- Conception des séquences de soudage (bridage des pièces, répartition des passes)
- Qualification du soudeur (suivant la norme)

### 2.2.2. Pendant soudage :

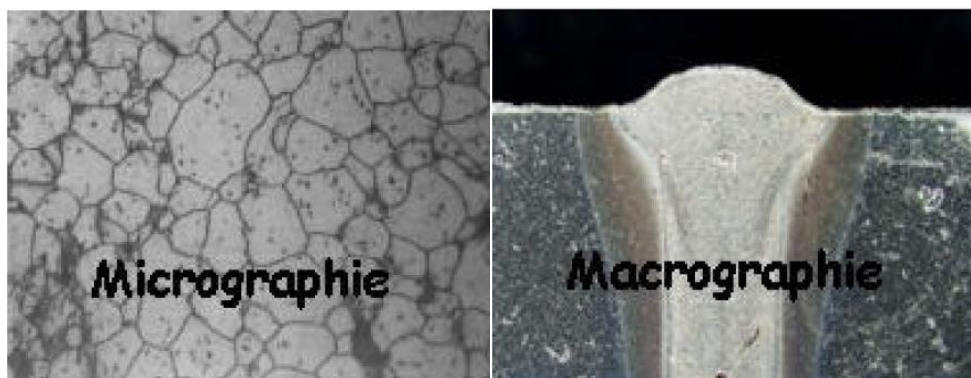
- Température de préchauffage
- Nature du courant son intensité
- Disposition des passes dimensions et vitesse de soudage

### 2.2.3. Après soudage :

Le contrôle après soudage peut être groupé en 3 catégories. [13]

#### 2.2.3.1. Les essais destructifs :

- Essais de traction, de dureté, de résilience
- Essais d'emboutissage, de pliage
- Essai hydraulique jusqu'à éclatement de la pièce.
- Essai de texture (micrographie, macrographie)



*Figure II 16.* Essai de texture [13]

#### 2.2.3.2. Les essais non destructifs :

##### a) Contrôle visuel :

Le type le plus courant d'essai non destructif et le contrôle visuel permet de vérifier la dimension, la forme et la position des soudures. Ce type d'examen est destiné à détecter les défauts suivants : [21]

- des défauts évidents (comme des cassures, de la corrosion, fissures, ...)
- des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. [14]



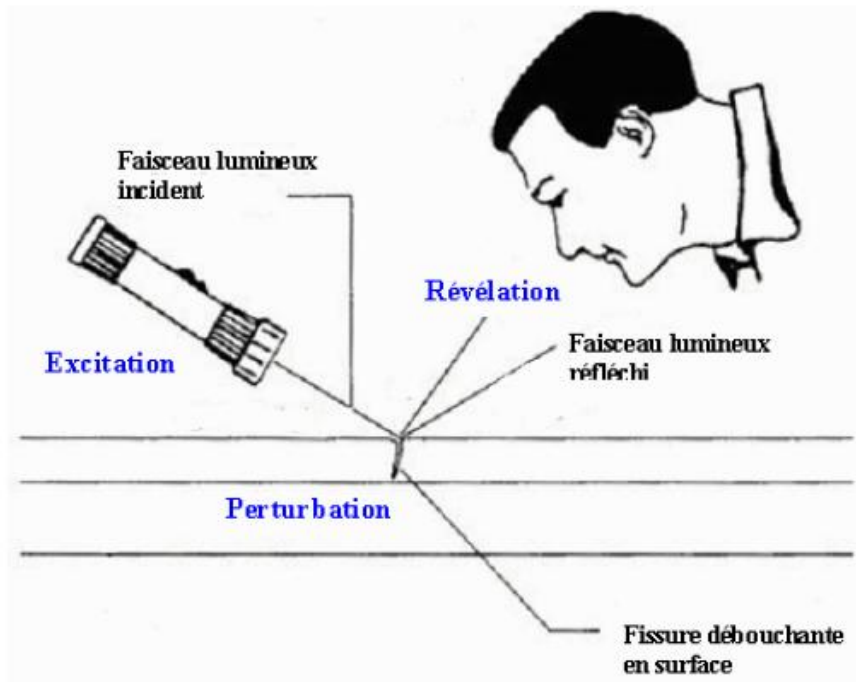


Figure II 17. Etape de control visuel [14]

b) Contrôle par ressuage :

Nettoyer la pièce, imprégner la surface de la pièce avec un liquide pénétrant (rouge organol) qui s'infiltré dans les fissures.

Essuyer la pièce et recouvrir avec une couche de talc.

Les défauts apparaissent suivants des traces rouges. [14]

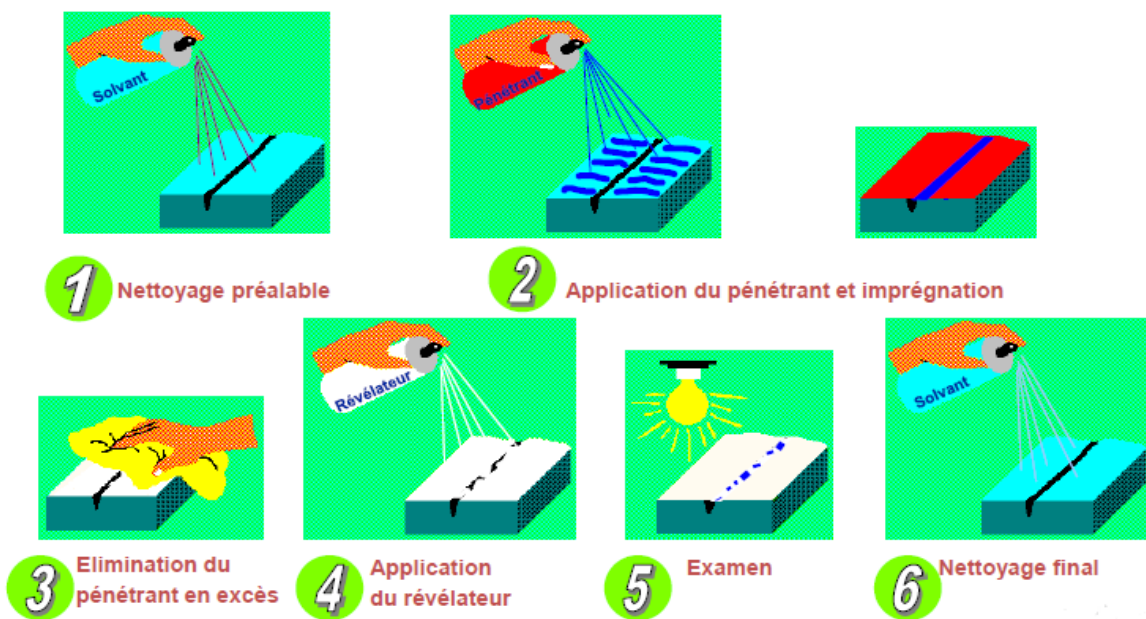


Figure II 18. Les étapes de contrôle par ressuage [13]

c) **Contrôle par magnétoscopie :**

On dépose sur la surface de la pièce une poudre magnétique à l'aide d'un électro aimant on crée un champ magnétique, sur la pièce il se forme un flux qui est perturbé au niveau des défauts. [12]



*Figure II 19. Poudre magnétique de contrôle par magnétoscopie [12]*



*Figure II 20. champ magnétique [12]*

d) **Contrôle par ultrasons :**

Les ultrasons permettent de détecter les défauts en profondeur dans la soudure. La méthode consiste à émettre un signal ultra sonore et de le recueillir la ou les ondes réfléchies qui sont ensuite analysées sur un oscilloscope ou par ordinateur à l'aide d'un programme adapté. [14]

*Tableau II 1. les zones d'ultrasons [14]*

0 - 16 Hz	16 Hz - 16.103 Hz	16.103Hz - 150.106 Hz	Plus que 150.106 Hz
Infrasons sons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

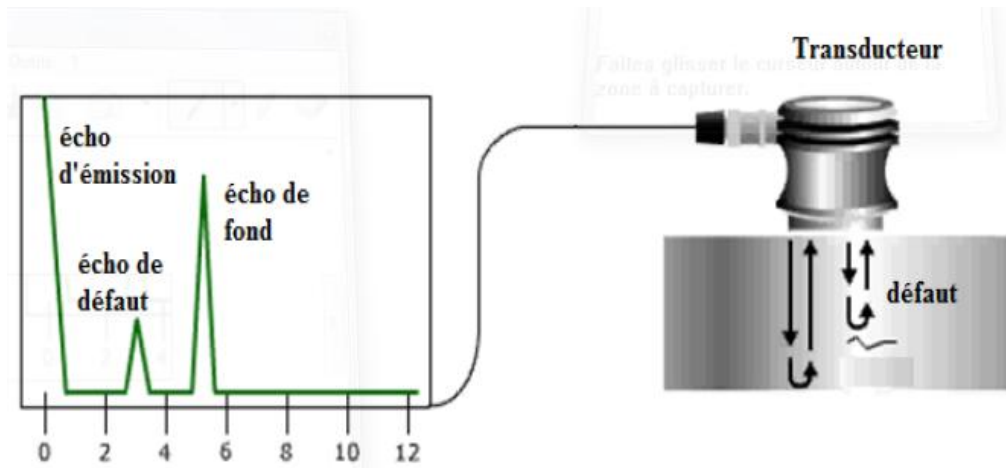


Figure II 21. Principe d'ultrason [13]

e) **Contrôle par radiographie.**

On place sur la soudure un film, la pièce à contrôler est soumise à un rayonnement (rayon X ou  $\gamma$ ) ces rayons traversent la soudure et imprègnent le film, les défauts sont alors repérés sur le film par des taches sombres. [12]

**Sécurité radio** : les radiographies sont faites :

- Soit dans des blocs de contrôle radio, ou les murs sont épais et blindés de plaques de plomb.
- Soit dans des coffres à parois épaisses en plomb, si la radiographie doit être faite sur chantier. Les personnes aux alentours doivent se retirer pendant la réalisation de la radio.
- Les opérateurs sont soumis régulièrement à un examen biologique du sang.

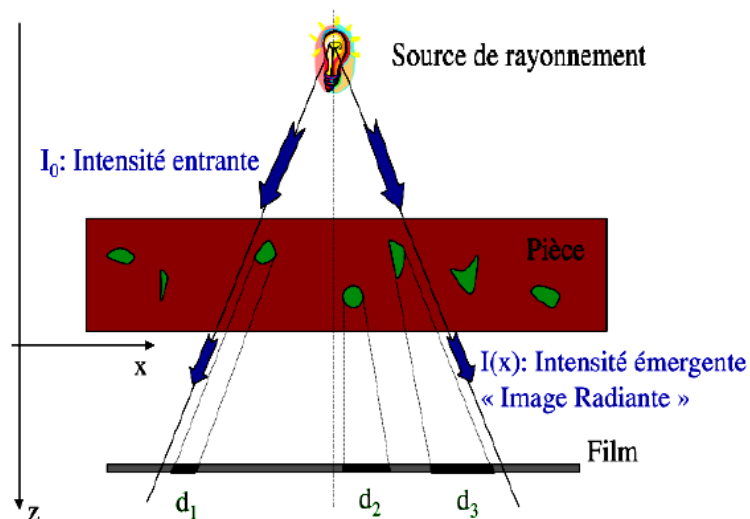


Figure II 22. Principe de contrôle par Radiographie [12]

## Chapitre 03

### Etude expérimentale

### **DEMARCHE EXPERIMENTALE :**

Les pièces à assembler sont de nature « API 5L X60 » d'épaisseur (10 mm), la préparation et l'assemblage des quatre pièces sont effectués dans deux entreprises différentes; les deux pièces soudées avec l'électrode enrobée cellulosique sont exécutées à l'entreprise « CPECC » située à Oued Souf.

Les deux autres pièces soudées avec l'électrode enrobée rutile sont exécutées à l'entreprise « PAF » située à Reghaia-Alger.

Après le nettoyage des deux assemblages, le contrôle s'est effectué au laboratoire mécanique de l'entreprise « ANABIB » de Reghaia-Alger.

### **MATERIAUX (métal d'apport et de base) :**

- Les produits de base utilisés pour réaliser les joints soudés sont des tubes en API 5L X60.
- Les métaux d'apports sont :
  - Cellulosique 6010
  - Rutil 6013

#### **1. Présentation du matériau (API 5L X60) :**

La spécification API 5L de l'American Petroleum Institute est conçue pour les systèmes de transport dans les industries du pétrole et du gaz naturel pour le transport de gaz, d'eau et de pétrole.

API 5L X60 est une nuance d'acier API 5L qui spécifie la fabrication des tubes de canalisation à deux niveaux de produit (PSL1 et PSL2). Acier WLD est l'un des grands fabricants, fournisseurs de tuyaux en acier API 5L, nous fournissons également des revêtements internes et externes tels que la peinture noire, le vernis, le revêtement FBE, le revêtement 3LPE et tous les tuyaux revêtus sur des tuyaux en acier selon les exigences des clients. WLD a fourni de l'acier et a fabriqué un vaste inventaire des tubes en acier API 5L X60 en PSL1 et PSL2. [16]

Le tuyau sans soudure API 5L X60 est fabriqué selon les normes ISO qui spécifient différentes qualités et spécifications. Les extrémités de ces tuyaux sont reliées à différents raccords. De plus, ces tuyaux sont différents en ce qui concerne la teneur en acier au carbone qu'ils contiennent. [15]



Figure III 1. Tuyau API 5L X60

1.1. Différences entre API 5L X60 PSL 1 et PSL 2 :

Tableau III 1. Différences entre API 5L X60 PSL1 et PSL2 [15]

PSL	PSL1	PSL2
Test de Charpy	Aucun requis	Obligatoire pour tous les grades
Contrôle non destructif de la	Uniquement lorsque l'acheteur spécifie SR4	SR4 obligatoire
Certifications	Certificats lorsque spécifié par SR15	Certificats (SR 15.1) obligatoires
Traçabilité	Traçable uniquement jusqu'à ce que tous les tests soient réussis, sauf si SR15 est spécifié	Traçable après achèvement des tests (SR 15.2) obligatoire
Test hydrostatique	Requis	Requis

1.2. Composition chimique et mécanique API 5L X60 :

Tableau III 2. Analyse chimique et mécanique API 5L X60 PSL2

Composition chimique API 5L X60					
C	Si	Mn	P	S	V
0.24	0.45	1.4	0.025	0.015	0.1
Caractéristique mécanique API 5L X60					
Limite d'élasticité, [N/mm <sup>2</sup> ]		Résistance à la traction, [N/mm <sup>2</sup> ]		Allongement	
415		565		f	

### 2. Métaux d'apport :

Ces soudures sont étai réalisées en deux (02) passes

- La soudure qui fait par l'électrode enrobée cellulosique (A).
- La soudure qui fait par l'électrode enrobée rutile (B).

#### 2.1. Composition chimique.

*Tableau III 3. Composition chimique des métaux d'apport*

Eléments	C	Mn	Si
Rutil 6013	0.06	0.5	0.45
Cellulosique 6010	0.12	0.2	0.6

#### 2.2. Propriétés mécaniques.

*Tableau III 4. Propriétés mécaniques des métaux d'apport*

Propriété	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]	Résistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ]	Allongement	Résilience [J]
Rutil 6013	430	480	0.26	60
Cellulosique 6010	470	540	0.29	68

3. Les dessins Techniques des pièces soudées :

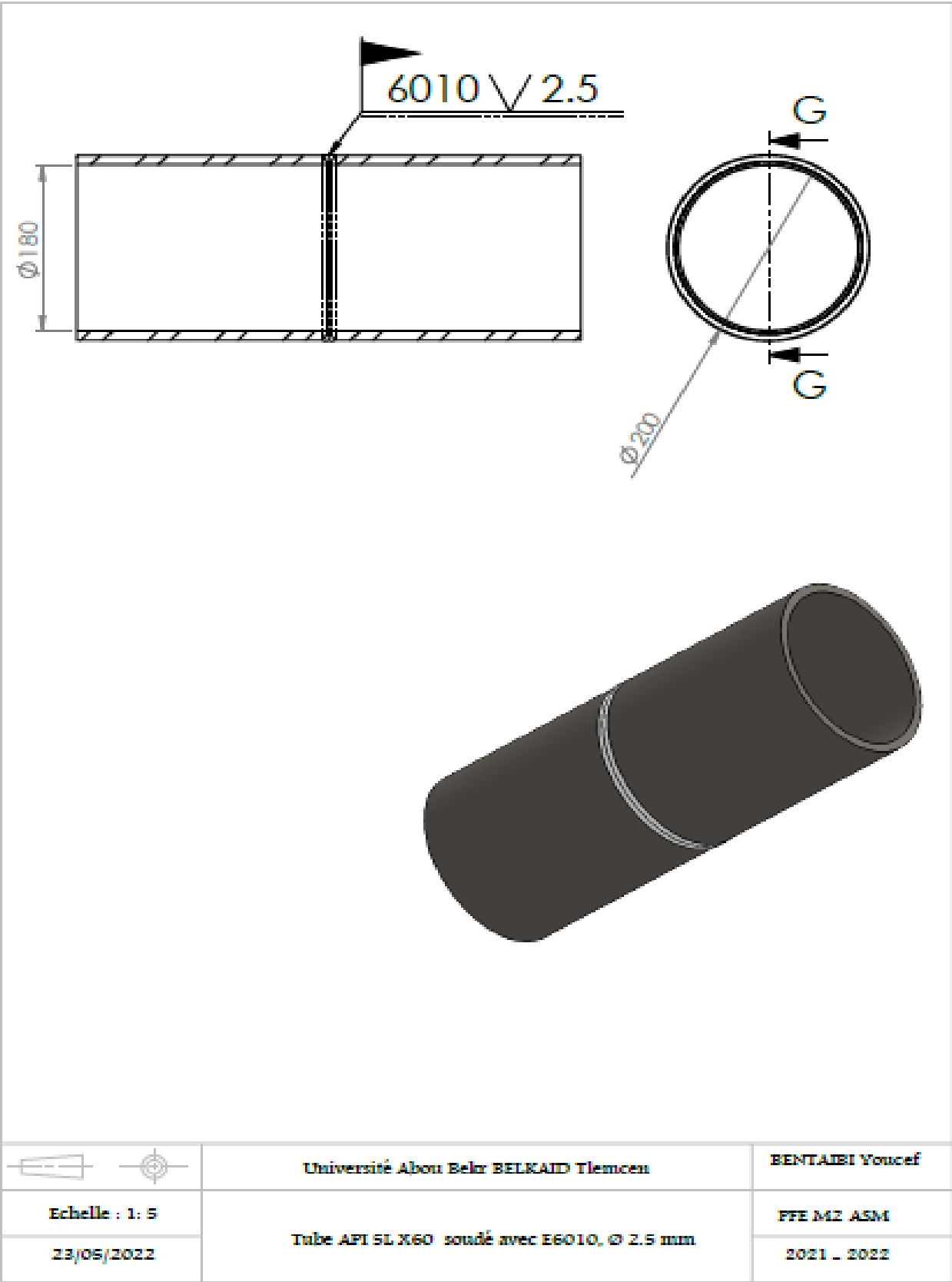


Figure III 2. Dessin de joint soudé d'E6010



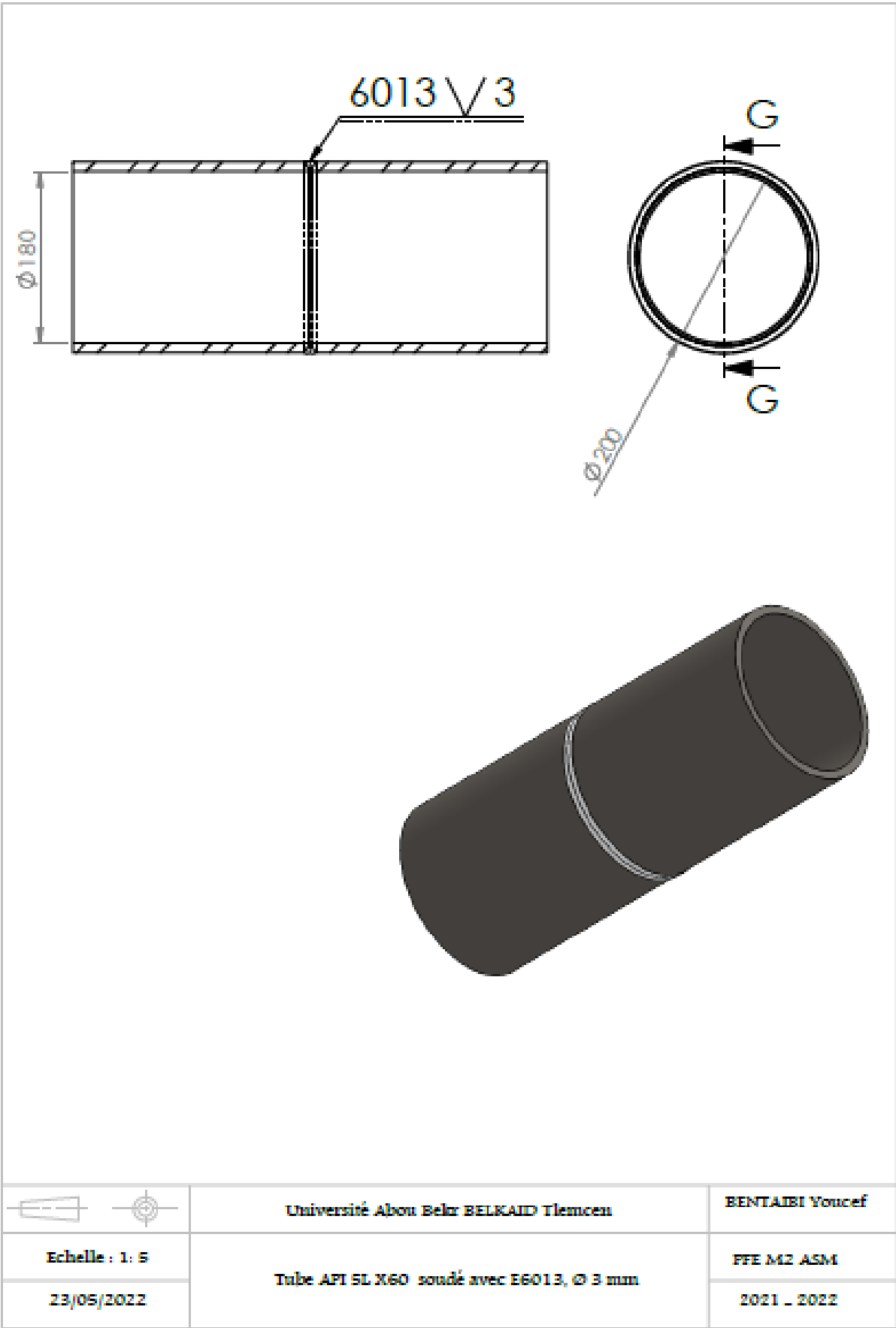


Figure III 3. Dessin de joint soudé d'E6013

### 4. Procédures:

#### 4.1. Préparation de chanfrein :

L'assemblage des deux tubes nécessite deux passes, pour exécuter cet assemblage nous avons réalisé par meuluse sur le coté de tube un chanfrein de  $35^\circ$  d'inclinaison pour tenir un « V » de  $70^\circ$  à l'aide d'une meule métallique comme le montre dans la (figure III.4) :

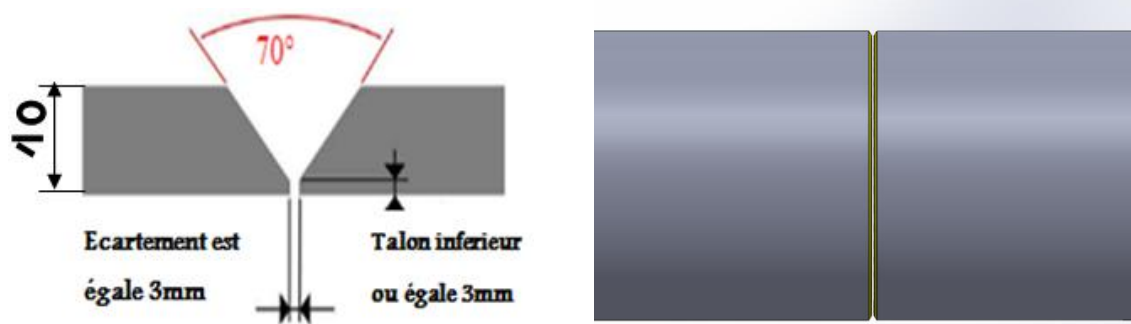
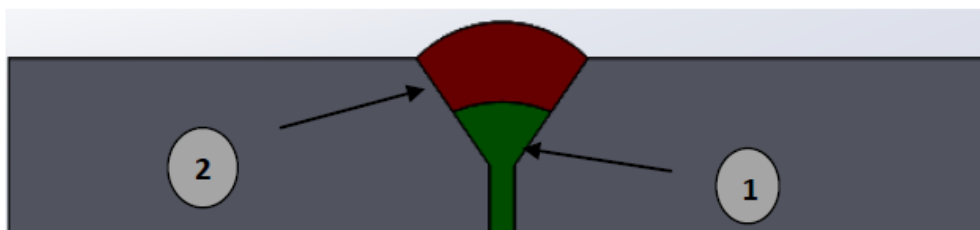


Figure III 4. a) Représentation du Chanfrein.



b) Dessin pour représenté les passes



Figure III 5. Pièces chanfreinés

### 4.2. Réglage les paramètres de soudage :

Pour l'électrode « B » :

Nous allons utiliser une électrode de diamètre 3mm ( $\varnothing = 3$  mm).

L'intensité de soudage :

$$I = 50 * (e - 1)$$

$$I = 50 * (3 - 1)$$

$$I = 100 \text{ (A)}$$

La tension de soudage:

$$U = 20 + (0.04 * I)$$

$$U = 20 + (0.04 * 100)$$

$$U = 24 \text{ (V)}$$

Pour l'électrode « A » :

Nous allons utiliser une électrode de diamètre 2mm ( $\varnothing = 2.5$  mm).

L'intensité de soudage :

$$I = 50 * (e - 1)$$

$$I = 50 * (2.5 - 1)$$

$$I = 75 \text{ (A)}$$

La tension de soudage:

$$U = 20 + (0.04 * I)$$

$$U = 20 + (0.04 * 75)$$

$$U = 23 \text{ (V)}$$

### 4.3. Positionnement des tubes par pointage :

Après la réalisation de chanfrein, j'ai positionné les tubes en position verticale suivant la (figure III.6) pour les pointers.



*Figure III 6. Positionnement et pointage de tube*

4.4. L'opération de soudage :

- Réglage des paramètres de soudage.
- Soudage des deux tubes, (figure III.7).



*Figure III 7. l'opération de soudage*

4.5. Tubes à assemblés :

La (figure III.8) représente le cordon soudure final pour différents métaux d'apport.



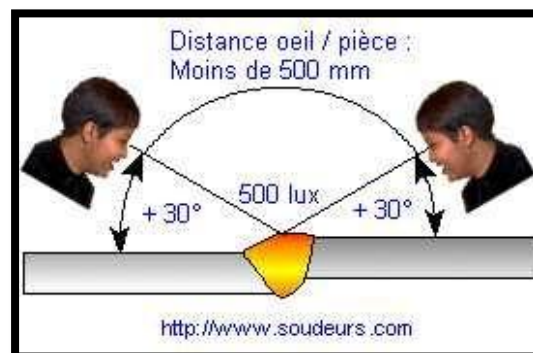
*Figure III 8. Photo des pièces finies*

### 5. Contrôle du joint de soudure .

#### 5.1. Contrôle Visuel .

Le contrôle visuel et dimensionnel doit être réalisé sous une luminosité de « 500 lux » minimum sur la surface de la pièce. L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°.

L'acuité visuelle du personnel de contrôle doit être vérifiée tous les ans (visite médicale).



#### 5.1.1. Les moyennes à être en œuvre .

Pour être pertinent, le contrôle visuel nécessite un minimum de moyens à mettre en œuvre :

- brosse métallique (pour enlever les éclats de peinture)
- chiffon et dégraissant
- miroir pour observer une zone qui n'est pas directement visible
- loupe pour améliorer l'analyse d'un défaut
- lampe d'appoint

#### 5.1.2. Résultats de contrôle visuel .

##### 5.1.2.1. Constatations des joints soudés à l'électrode enrobée « B » :

Nous avons constaté des défauts de soudure sont les suivantes :

- Manque de pénétration,
- Manque de fusion.

Causes possibles :

- Intensité de soudage trop faible
- Tension de soudage trop forte
- Préparation de joint incorrecte
- Vitesse de soudage trop rapide
- Vitesse de soudage trop lente
- Dénivellation trop importante

Nous avons remarqué des discontinuités dans les cordons de soudure, comme le montrer dans la (figure III.9).



Figure III 9: 1) Manque de fusion, 2) Manque de pénétration

#### 5.1.2.2. Constatations des joints soudés à électrode enrobée « A » :

Il y'a aucun défaut dans cette joint soudée, parce que :

- Le cordon soudure a été soudé par deux soudeurs professionnels (plus 8 ans expérience).
- Le matériel de soudage est certifié et moderne.
- L'entreprise « CPECC » est ancienne et major dans le domaine de soudage.
- La présence de superviseur et ingénieur cnd.

#### Remarque :

L'utilisation de l'électrode « A » donne de bonne résultat que l'électrode « B ».

#### 5.2. Essai de flexion :

L'essai consiste à exercé sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est prélevée transversalement ou longitudinalement à l'assemblage soudé. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers ou côté). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle alpha déterminé avec le prolongement de l'autre branche. La norme de référence est la **NF EN 910 Mai 1996**.

Il existe de nombreux types d'essais de flexion, principalement :

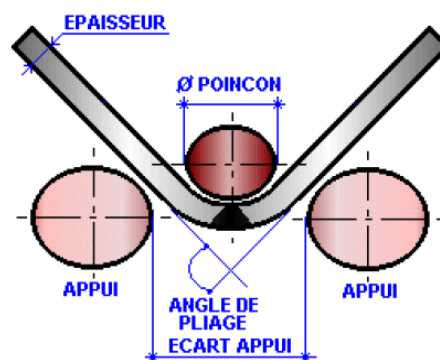
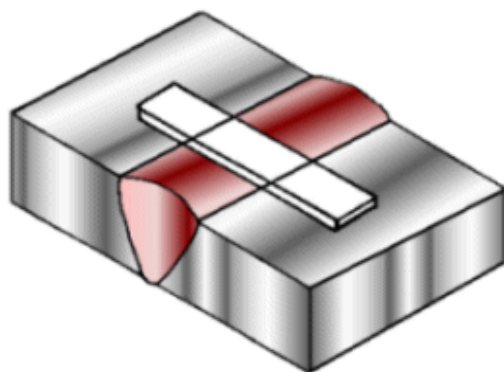


Figure III 10. Principe de l'essai de pliage

- Essai de pliage transversal endroit
- Essai de pliage transversal envers
- Essai de pliage transversal de côté
- Essai de pliage longitudinal endroit
- Essai de pliage longitudinal envers

### 5.2.1. Localisation des éprouvettes de pliage dans un joint soudé .



*Figure III 11. position d'éprouvette de pliage*

### 5.2.2. Les différents types de pliages.

- Essai du pliage transversal envers et endroit sur soudure bout à bout.
- Essai du pliage transversal de côté sur soudure bout à bout.
- Essai du pliage longitudinal sur soudure bout à bout.

### 5.2.3. Essai avec poinçon .

L'essai doit être effectué en plaçant l'éprouvette sur deux supports constitués de deux rouleaux parallèles ou dans un gabarit en U. La soudure doit se trouver à mi-distance des rouleaux en appliquant une charge perpendiculairement à la surface du pliage en 3 trois points.

#### 5.2.3.1. Eprouvette

*Tableau III 5. Paramètres d'éprouvette*

Type d'essai	Désignation	Exigence	Epaisseur de l'éprouvette	Norme
Pliage	Larguer de l'éprouvette	38.1	10	API 5L

### 5.2.4. L'identification de l'éprouvette :

#### 5.2.4.1. Les Paramètres d'essai de pliage :

L'essai de pliage fait à l'endroit.

*Tableau III 6. Paramètres d'essai de pliage*

Pré charge	Vitesse du module	Vitesse d'essai	Vitesse de la limite d'élasticité
2 Mpa	30 Mpa/s	0.5 mm/s	30 Mpa/s

#### 5.2.4.2. Les éprouvettes avant pliage :



*Figure III 13. Éprouvette soudée avec 6010*



*Figure III 12. Éprouvette soudée avec 6013*

#### 5.2.4.3. Les éprouvettes pendant le pliage :



*Figure III 14. L'éprouvette pendant le pliage*





5.2.5. Résultats d'essai de flexion :



Figure III 15: les éprouvettes après l'essai de pliage

5.2.5.1. Eprouvette soudé par électrode « A » :

Tableau III 7: Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6010

Légende	Rm (Mpa)	a0 (mm)	b0 (mm)	SO (mm2)
	59.5	10	38	380
	60.7	10	38	380

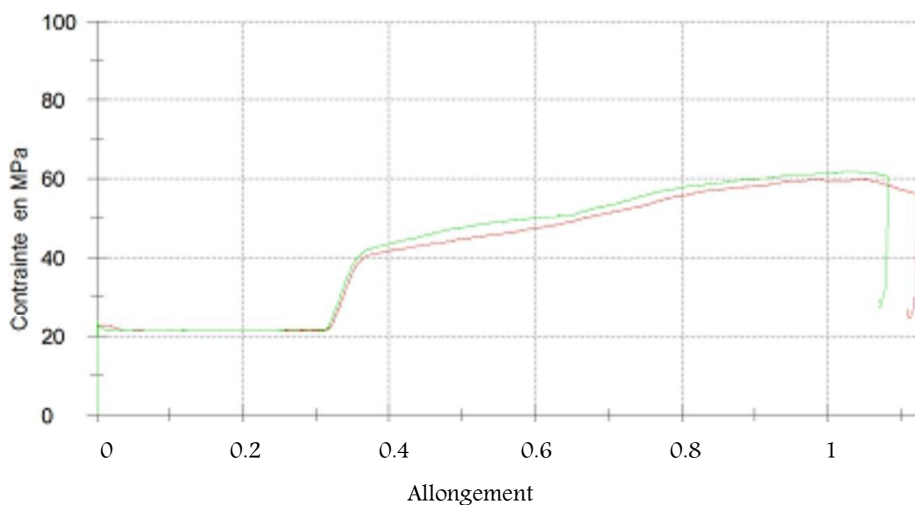
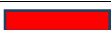

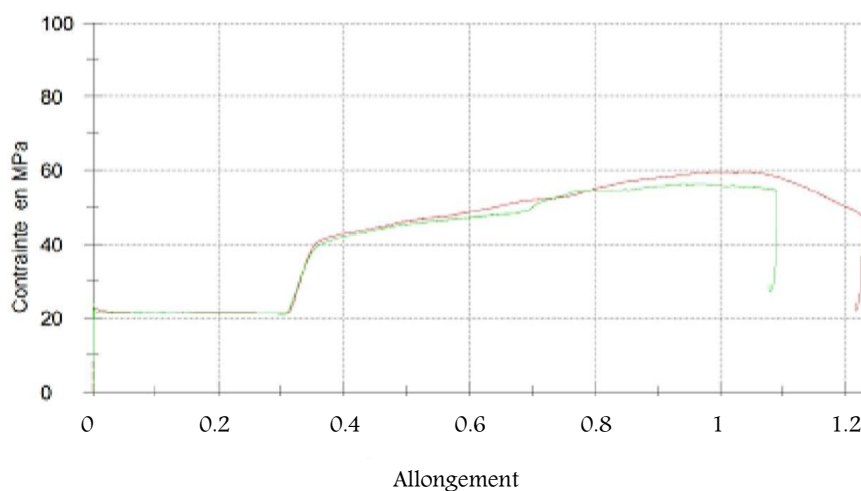


Figure III 16: Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6010

5.2.5.2. Eprouvette soudé par électrode « B »

Tableau III 8: Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6013

Légende	Rm (Mpa)	a0 (mm)	b0 (mm)	SO (mm2)
	59.1	10	38	380
	53.3	10	38	380



*Figure III 17. Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes d'E6013*

### **Interprétations .**

Pour un contrôle visuel :

L'électrode enrobée rutile nous a donné une discontinuité de cordon et quelques défauts dans le cordon; par contre, l'électrode enrobée cellulosique nous a donné l'homogénéité de cordon et aucun défauts visuel.

Mon avis pour souder tel matière, je choisis l'électrode enrobée cellulosique.

Pour un contrôle flexion :

La pression exerciez était la même pour les deux types, constatation

On remarque que l'allongement élastique dans les deux graphes est beaucoup plus important que l'allongement normal, et aucun défaut évidé n'est observé, ce qui prouve le bon choix des électrodes.

On remarque que les deux joints souder par l'électrode enrobée cellulosique et l'électrode enrobée rutile on presque les mêmes résistances maximales de pliage, avec un petit avantage pour l'électrode cellulosique.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Le soudage est une procédé d'assemblage permanent, il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Il existe plusieurs types de soudage, mais le procédé de soudage à l'arc à l'électrode enrobée est l'un des procédés de soudage les plus utilisés pour les travaux de la maison par les particuliers, dans les ateliers et principalement sur les chantiers par les professionnels.

Dans le domaine de soudage, il existe plusieurs types des défauts de soudure ainsi que différentes pour les prévenir et les corriger.

Pour la qualité de cordon de soudure, nous allons faire un contrôle visuel et un contrôle de pliage des pièces soudées d'API 5L X60, d'épaisseur (10 mm). Les pièces sont assemblées par l'électrode enrobée, à différentes métaux d'apport : cellulosique et rutile.

Dans le contrôle visuel on n'a constaté que l'éprouvette soudé par l'électrode enrobée cellulosique meilleur que l'éprouvette soudé par l'électrode enrobée rutile, parce que l'électrode enrobée cellulosique ne donne une bonne pénétration à ces profonds et manque de défauts.

A l'aide de contrôle de pliage on à constaté que les deux pièces sont solidement assembler avec l'électrode enrobée cellulosique que avec l'électrode enrobée rutile, se qui fait le choix ce porte l'électrode enrobée cellulosique.

## Références bibliographiques

- [1] <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-l-arc-e-e-mma-smaw-111-263/>
- [2] <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-tig-gtaw-141-210/>
- [3] <https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-procede-de-soudage-arc-plasma-paw-procede-15-350/>
- [4] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-metal-dapport>
- [5] : <https://www.matérielwelding.com/specification-de-lelectrode-e6010-et-sa-signification/>
- [6] <https://www.materialwelding.com/specification-de-lelectrode-e6013-et-sa-signification/>
- [7] <https://www.hobartbrothers.com/2013/07/7018-welding-rod-amperage/>
- [8] <https://www.inrs.fr/risques/fumees-soudage/ce-qu-il-fautretenir.html#:~:text=Outre%201%27exposition%20aux%20fum%C3%A9es,auditives%2C%201%27%C3%A9lectrification%2C%20les>
- [9] [https://www.cchst.ca/oshanswers/safety\\_haz/welding/eyes.html](https://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/welding/eyes.html)
- [10] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/les-principaux-defauts-de-soudage>
- [11] <https://www.rocdacier.com/defauts-des-soudures/>
- [12] <https://www.technologiepro.com/cours-control-non-destructif.html>
- [13] <https://www.scribd.com/doc/293047268/2014-CND-Institut-soudure-Godard-pdf>
- [14] [https://www.academia.edu/4556206/CONTRÔLE\\_DES\\_SOUDURES](https://www.academia.edu/4556206/CONTRÔLE_DES_SOUDURES)
- [15] <http://m.fr.baogangpipe.com/seamless-steel-pipe/pipeline-seamless-steel-pipe/steel-pipe-api-5l-x60.html>
- [16] <https://www.wldsteel.com/fr/product/api-5l-x60-line-pipe/>
- [17] <https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/mig-mag-welding/>

[18] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-procede-de-soudage-mig-mag-gmaw>

[19] <https://www.formation-soudure.com/LE%20SOUDAGE%20MIG%20MAG%20SD%20SERVICE%20-%202016.pdf>

[20] Klas weman, Aide-mémoire (Procédés de soudage), traduit par la promotion M2 du CFTTR sous la direction de Daniel Goudaec (bibliothèque d'université de Tlemcen).

[21] Michel Bramat, (Technologie des métaux, contrôle et essais des soudures) de Boeck (bibliothèque d'université de Tlemcen).