

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Assemblages soudés et matériaux

**Par** : BOUREBAA Mohamed El amine

### Sujet

*Influence du mode de soudage sur les caractéristiques mécaniques aux alentours des joints soudés dans les aciers API 5L*

Soutenu par distance, le 21/06 /2022, devant le jury composé de :

Mr GUENIFED Halim	Grade MAA	Université de Tlemcen	Président
Mr KARA- ALI Djamal	Grade MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mr HADJOUI Féthi	Grade MCB	Université de Tlemcen	Encadreur

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 **HADJOUI Féthi**, qui grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser. Je lui exprime mes gratitude, mes reconnaissances et mes sincères remerciements. Et également, j'associe mes remerciements à Monsieur **BOUREBAA Abdallah** et Madame **BEKHTI Djamila** pour tous leurs conseils, et de m'avoir guidé tout le long de cette étude.*

*Je remercie mon camarade **BENTAIBI Youcef** pour son aide durant toute la période de travail.*

*Je remercie les membres de jury qui ont acceptés d'évaluer et de juger le présent travail.*

*Enfin, mes vifs remerciements à toute ma famille qui n'a jamais arrêté 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 parents. Pour mon père et ma mère, la richesse de ma vie, mais aussi leurs patiences, merci pour eux.*

*Ainsi à :*

*Toute la famille BOUREBAA*

*Tous mes amis.*

*La popularité de LAKHDARIA.*

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

## Résumé

Le soudage des tubes en acier API 5L est très important dans le domaine du pétrole et du gaz, car il possède des propriétés mécaniques exceptionnelles.

Ce travail a pour objectif d'étudier l'effet de différences types de soudage sur cet acier, ainsi qu'une comparaison entre eux afin d'en déterminer le type le mieux approprié pour le soudage de tubes en acier API 5L.

Pour aboutir aux différents résultats nous avons exercés différents essais destructifs (CD) sur des échantillons de cet acier soudés par différents modes de soudage.

**Mot clé :** soudage, pipelines, essai mécanique, API 5L, normes, aciers.

## ملخص

تلحيم الأنابيب المصنوعة من الصلب API 5 L أمر مهم جدا في مجال البترول والغاز و حيث يتميز هذا النوع من الصلب بخصائص ميكانيكية مميزة.

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير مختلف أنواع التلحيم على هذا النوع من الصلب بالإضافة إلى مقارنة بين هذه الأنواع و تحديد النوع الأفضل لتلحيم أنابيب الصلب API 5L ن طريق إجراء تجارب تكسير ميكانيكية مختلفة (CD) على عينات من هذا الصلب ملحمة بطرق مختلفة.

**كلمات مفتاحية :** صلب، تلحيم، خطوط الأنابيب، معيار، تجارب ميكانيكية, API 5L .

## **Abstract**

The welding of Pipes made of API 5L steel is very important in the field of oil and gas, as this type of steel has distinctive mechanical properties.

This work aims to study the effect of different types of welding on this steel in addition to a comparison between these types and to determine the best type for the welding API 5L steel pipes by cracking distractive tests (CD) on samples of steel were behind different methods.

**Key words:** steel, API 5L, welding, pipelines, distractive tests, norm.

# Listes des figures

## Chapitre 1

Figure 1. 1 : Acier extra-doux.....	5
Figure 1.2 : Acier hypoeutectoïde resurchauffé.....	5
Figure 1. 3: Acier hypoeutectoïde 1.....	5
Figure 1. 4: Acier hypoeutectoïde 2 .....	5

## Chapitre 2

Figure 2. 1:Schéma d'installation manuelle pour soudage à l'électrode enrobée. ....	12
Figure 2. 2: procédé du soudage TIG. ....	13
Figure 2. 3:procédé du soudage MIG-MAG .....	13
Figure 2. 4:Dispositif de soudage SMAW .....	15
Figure 2. 5:les compositions de poste de soudage MIG-MAG .....	17
Figure 2. 7:principe de fonctionnement du procédé de soudage SAW. ....	21
Figure 2. 6:photos montrant le principe de soudage SAW .....	21
Figure 2. 8: Organigramme des procédés de soudage les plus répandus .....	22
Figure 2. 9:Différentes zones atteintes par la chaleur.....	24
Figure 2. 10:Effets de l'énergie linéaire. ....	25
Figure 2. 11:Dilatation de l'acier et de l'aluminium. ....	26
Figure 2. 12:Refoulement.....	27
Figure 2. 13:Influence de la température sur les grains.....	28

## Chapitre 3

Figure 3. 1: Illustration des trois modes de sollicitation d'une fissure .....	33
Figure 3. 2:Les métaux : du plus fragile au plus ductile .....	33
Figure 3. 3:Cycle d'un traitement thermique.....	35
Figure 3. 4:courbe simplifiée de chauffage des pièces .....	36
Figure 3. 5:diagramme de phase fer-carbone .....	37
Figure 3. 6:Le cycle thermique lors d'une trempe. ....	39
Figure 3. 7 : cycle thermique du revenu . ....	40
Figure 3. 8 : Courbes de contraintes et déformation .....	41
Figure 3. 9 : courbe de la limite conventionnelle d'élasticité $Re\ 0,2\ Mpa$ .....	42
Figure 3. 10: Courbes de traction de divers matériaux.....	43
Figure 3. 11:essai de pliage transversal endroit. ....	44
Figure 3. 12:essai de pliage transversal envers.....	44
Figure 3. 13 : dispositif pour l'essai de pliage .....	45
Figure 3. 14 : dispositif pour la résilience. ....	46
Figure 3. 15 : point d'application de choc pour la résilience. ....	46
Figure 3. 16 : éprouvette en U et en V pour la résilience .....	46
Figure 3. 17 : machine d'essai de dureté. ....	47
Figure 3. 18 : dureté Brinell. ....	47
Figure 3. 19 : schéma du pénétrateur de diamant dans la machine de dureté Rockwell. ....	48
Figure 3. 20: principe de teste de flexion.....	49
Figure 3. 21 : flexion simple (a) et flexion pure (b) . ....	50
Figure 3. 22 : schéma du dispositif d'essai de flexion simple.....	50
Figure 3. 23 : schéma du dispositif d'essai de flexion pure.....	51
Figure 3. 24 : différents types d'éprouvettes de fatigue en flexion relative. ....	52
Figure 3. 25 : Diagramme de Wöhler .....	52

## Chapitre 4

Figure 4. 1 : Canalisation enterré .....	54
Figure 4. 2: Préparation du joint des tubes d'épaisseurs $2 \leq t \leq 20mm$ .....	61

Figure 4. 3: Chanfrein en J composés (doubles pentes).....	62
Figure 4. 4 : Diagramme de Seferian. ....	63
Figure 4. 5 : Préparation d'un joint V doubles pentes .....	64
Figure 4. 6: Chanfreins en J .....	64
Figure 4. 7: Chanfrein en J composés (doubles pentes) .....	64
Figure 4. 8 : Diagramme de Seferian.....	65
Figure 4. 9: Abaque thermique général de l'IRSID didactisme.....	68
Figure 4. 10 : Abaque thermique de BAUS et CHAPEAU.....	69
Figure 4. 11 : Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale.....	70
Figure 4. 12 : Fissure de Gorge.....	71
Figure 4. 13 : Fissure de Racine.....	71
Figure 4. 14 : Fissure à chaud (ou de solidification) .....	71
Figure 4. 15 : Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein.....	71
Figure 4. 16 : Les manques de fusion.....	72
Figure 4. 17 : Inclusions gazeuses porosités uniformes.....	72
Figure 4. 18 : Inclusions de tungstène.....	73
Figure 4. 19 : Excès de pénétration.....	73

## Chapitre 5

Figure 5. 1 : Tuyau API 5L X60.....	75
Figure 5. 2 : Dessin de définition de tube .....	79
Figure 5. 3 : Chanfrein avec le dessin technique.....	80
Figure 5. 4 : Fixation le tube .....	81
Figure 5. 5 : le soudage TIG après l'opération de soudage .....	82
Figure 5. 6 : le soudage SMAW pendant et après l'opération de soudage.....	82
Figure 5. 7 : le soudage GMAW pendant et après l'opération de soudage.....	82
Figure 5. 8 : l'opération et le poste de coupage plasma.....	83
Figure 5. 9 : Machine de traction utilisée.....	84
Figure 5. 10 : les démenions qui existe pour l'éprouvette de traction selon ASTM A 370. ....	84
Figure 5. 11 : Eprouvette de traction avant et après la rupture (soudage TIG) .....	85
Figure 5. 12 : position d'éprouvette de pliage .....	85
Figure 5. 13: Les éprouvettes avant l'essai de pliage.....	86
Figure 5. 14 : Les éprouvettes pendant l'essai de pliage.....	86
Figure 5. 15 : Les éprouvettes après l'essai de pliage.....	87
Figure 5. 16 : éprouvette de résilience avec ses dimensions selon la norme ASTM A 370. ....	87
Figure 5. 17 : machine de résilience.....	88
Figure 5. 18 : Des éprouvettes de résilience après la rupture.....	88
Figure 5. 19 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par MAG .....	89
Figure 5. 20 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par EE .....	90
Figure 5. 21 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par TIG .....	90
Figure 5. 22 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes EE .....	91
Figure 5. 23 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes de MAG.....	92
Figure 5. 24 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes de TIG .....	92

# Listes des Tableaux

## Chapitre 1

Tableau 1. 1: les aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés. ....	3
Tableau 1. 2: Différences entre API 5L, PSL 1 et PSL 2 .....	7
Tableau 1. 3: Composition chimique (niveau de spécification PSL1). ....	8
Tableau 1. 4: Composition chimique (niveau de spécification PSL2). ....	9
Tableau 1. 5: Propriétés mécaniques au niveau de spécification PSL1. ....	10
Tableau 1. 6: Propriétés mécaniques au niveau de spécification PSL2. ....	10

## Chapitre 2

Tableau 2. 1: Numéros de référence pour quelques procédés de soudage par fusion (norme ISO 4063) .....	14
Tableau 2. 2: Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage. ....	23
Tableau 2. 3: Coefficients de dilatation linéaire. ....	26
Tableau 2. 4: Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier. ....	28
Tableau 2. 5: Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables. ..	29

## Chapitre 3

Tableau 3. 1 : Tableau comparatif des valeurs de dureté Rockwell, Brinell et Shore. ....	49
--	----

## Chapitre 4

Tableau 4. 1: Résumé sur la différence entre PSL1 et PSL2. ....	55
Tableau 4. 2 : composition chimique des pipelines . ....	56
Tableau 4. 3 : traction pour PSL1 .....	57
Tableau 4. 4 : Traction pour PSL2 . ....	57
Tableau 4. 5 : l'intensité en fonction de diamètre de l'électrode . ....	59
Tableau 4. 6 : choix de courant du soudage .....	59
Tableau 4. 7 : Le choix du diamètre des électrodes en tungstène. ....	60
Tableau 4. 8 : Choix du diamètre du fil et l'intensité .....	60
Tableau 4. 9: Des exemples sur la TSN .....	64
Tableau 4. 10 : Indice de soudabilité en fonction de Céq. ....	65
Tableau 4. 11 : Diamètre des électrodes en fonction de la température de préchauffage .....	66
Tableau 4. 12 : Le coefficient K souvent le type de joint .....	67
Tableau 4. 13 : Le coefficient K souvent l'angle des chanfreins . ....	67

## Chapitre 5

Tableau 5. 1: Différences entre API 5L X60 PSL1 et PSL2 .....	76
Tableau 5. 2 : Analyse chimique API 5L X60 .....	77
Tableau 5. 3 : Caractéristique mécanique API 5L X60 .....	77
Tableau 5. 4 : Composition chimique du métal d'apport (Cellulosique 6010) .....	77
Tableau 5. 5 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (Cellulosique 6010) .....	77
Tableau 5. 6 : Composition chimique du métal d'apport (TIG) .....	77
Tableau 5. 7 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (TIG) .....	77
Tableau 5. 8 : Composition chimique du métal d'apport (MAG) .....	78
Tableau 5. 9 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (MAG) .....	78
Tableau 5. 10 : paramètres de soudage TIG .....	81
Tableau 5. 11 : paramètres de soudage MAG .....	81

<i>Tableau 5. 12 : tableau des dimensions d'éprouvette de pliage selon API 5L .....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 5. 13 : Les Paramètres de machine de pliage. ....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 5. 14 : Les paramètres de soudage des éprouvettes de caractérisations. ....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 5. 15 : Résultats pour l'éprouvette soudée par MAG.....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 5. 16 : Résultats pour l'éprouvette soudée par EE .....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 5. 17 : Résultats pour l'éprouvette soudée par TIG.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 5. 18 : Les Paramètres d'essai de pliage .....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 5. 19 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes EE .....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 5. 20 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes de MAG .....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 5. 21 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes de TIG .....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 5. 22 : paramètres et résultats de l'essai de résilience .....</i>	<i>93</i>

## LISTE DES ABREVIATION ET SYMBOLES

PSL : Pipes Steel Line  
API: American Petroleum Institute  
BWRA: British welding research association  
TSN: Thermic Severity Number  
SAW: Submerged arc welding  
SMAW: Shielded metal arc welding  
GTAW: Gas-tungsten arc welding  
TIG : Tungsten Inert Gas  
M.I.G : Métal Inert gaz  
M.A.G : Métal active gaz  
ZAT : Zone Affectée Thermiquement  
MB : métal de base  
MD : métal d'apport  
EE : électrode enrobée  
IRSID : L'Institut de Recherche de la SIDérurgie française.  
FDA: code of federal regulations  
ERW: Electric resistane welded  
AS: l'arc submergé  
ISO: International organization standardization  
QMOS : Qualification du mode opératoire de soudage  
ZTA : zone thermiquement atteint  
DMOS : Descriptif du Mode opératoire de soudage  
HB : Dureté Brinell  
HV : Dureté Vickers  
HRC : Dureté Rockwell  
Céq : Carbone équivalent  
Tp : Température de préchauffage  
ASTM : American society for testing materiels  
CC : Courant direct  
AC : Courant alternative  
CPECC : China Petroleum engineering and construction corps  
PAF : Profilé à froid  
Ø : Diamètre  
U<sub>0</sub> : La tension à vide de générateur  
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<sub>s</sub> : Vitesse d'avance de l'arc électrique (mm/s)  
P: Phosphor

S: Soufré  
Cr: Chrome  
Ni: Nickel  
Nb: Niobium  
V: Vanadium  
Mo : Molybdène  
Cu : Cuivre  
Al : Aluminium  
Ti : Titane  
C : Carbone  
Fe : Fer  
Si : Silicium  
CO : Cobalt  
E : L'énergie de soudage  
U : La tension électrique.  
I : l'intensité du courant électrique.

## Sommaire

Remerciements .....	I
Résumé .....	III
ملخص .....	IV
Abstract .....	V
Listes des figures .....	VI
Listes des Tableaux .....	VIII
LISTE DES ABREVIATION ET SYMBOLES .....	X
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Généralités sur les aciers et les normes API

1. Les aciers : .....	3
1.1. Définition de l'acier : .....	3
1.2. Classification des aciers : .....	3
1.2.1. Aciers ordinaires ou aciers au carbone : .....	3
1.2.2. Aciers de traitement thermique : .....	4
1.2.3. Aciers à outils : .....	4
1.2.4. Aciers inoxydables : .....	4
1.3. Structure micrographiques des aciers : .....	5
2. API : .....	5
2.1. Définition : .....	5
2.2. Emploi de l'organisation API : .....	5
2.3. API 5L : .....	6
2.3.1. Définition : .....	6
2.3.2. Domaine d'utilisation : .....	6
2.3.3. API 5L avantages et Applications : .....	6
2.3.4. Grades et classification Des aciers API 5L : .....	7
2.3.5. Propriétés physiques et mécaniques et compositions chimiques des aciers API 5L : .....	7

### Chapitre II : Généralités sur les modes de soudage

1. Définition du soudage : .....	12
2. Histoire du soudage : .....	12
3. Terminologie : .....	13
3.1. Dénominations et références : .....	13
3.2. Vocabulaire de base : .....	14
4. Différents modes du soudage : .....	14
4.1. Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées SMAW : .....	14
4.1.1. Généralités : .....	14
4.1.2. Type de courant : .....	15
4.1.3. Types d'électrodes : .....	16
4.1.4. Avantages et inconvénient : .....	16
4.2. Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles GMAW-MIG-MAG : .....	16
4.2.1. Définition : .....	16
4.2.2. Circuit de soudage : .....	17
4.2.3. Gaz de protection : .....	17
4.2.3. Les avantages du procédé MIG/MAG : .....	18
4.2.4. Les inconvénients du procédé MIG/MAG : .....	18
4.3. Soudage à l'arc avec électrodes non fusibles TIG, GTAW : .....	18
4.3.1. Définition : .....	18
4.3.2. Avantages de soudage par TIG : .....	19
4.3.3. Inconvénients de soudage par TIG : .....	19

4.4.	Soudage à l'arc au plasma :	19
4.4.1.	Définition :	19
4.4.2.	Les avantages d'un arc plasma :	19
4.5.	Soudage à l'arc submergé SAW :	20
4.5.1.	Définition :	20
4.5.2.	Avantages du Procédé :	20
4.5.3.	Inconvénients :	20
4.6.	Autres procédés :	21
5.	Soudabilité des métaux :	23
5.1.	Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage :	23
5.2.	Quantité de chaleur transférée :	23
5.3.	Température initiale de la pièce :	24
5.4.	Vitesse de refroidissement du métal :	24
5.5.	Température atteinte dans la ZTA :	24
5.6.	Énergie linéaire :	25
5.7.	Coefficient de dilatation :	25
5.8.	Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés :	27
5.9.	Soudabilité des aciers inoxydables :	29
<b>Chapitre III : Caractéristique mécanique des aciers</b>		
1.	Propriétés mécaniques des matériaux :	31
1.1.	Introduction :	31
1.2.	Fragilité :	31
1.2.1.	Définition :	31
1.2.2.	Facteurs influençant :	31
1.3.	Ductilité :	32
1.3.1.	Définition :	32
1.3.2.	Condition de ductilité :	32
1.4.	Ténacité :	32
1.4.1.	Définition :	32
1.5.	Malléabilité :	33
1.5.1.	Définition :	33
1.6.	L'élasticité :	33
1.6.1.	Définition :	33
1.7.	Dureté :	34
1.7.1.	Définition :	34
1.7.2.	Processus de mesure de la dureté :	34
2.	Traitements thermiques des aciers :	34
2.1.	Introduction :	34
2.2.	Cycle d'un traitement thermique :	35
2.3.	Chauffage des pièces :	35
2.4.	Refroidissement des pièces :	36
2.5.	Diagramme d'équilibre fer-carbone :	36
2.6.	Traitements thermiques des soudures :	37
2.7.	Gammes des traitements thermiques :	38
2.7.1.	Trempe :	38
2.7.2.	Revenu :	39
3.	Essais mécaniques :	41
3.1.	Définition :	41
3.2.	Essais de traction :	41
3.2.1.	Courbes de contraintes et déformation :	41

3.2.2.	Module d'élasticité longitudinale E Mpa :	42
3.2.3.	Loi de Hooke $\sigma = E \times \varepsilon$ :	42
3.2.4.	Limite élastique Re Mpa :	42
3.2.5.	Limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 Mpa :	42
3.2.6.	Limite maximale Rm MPa :	42
3.2.7.	Phénomène d'écrouissage :	42
3.2.8.	Courbes de traction de divers matériaux :	43
3.3.	Essai de pliage :	43
3.4.	Essai de résilience :	45
3.5.	Essai de dureté :	47
3.5.1.	Dureté Brinell (symbole HB) :	47
3.5.2.	Dureté Vickers (symbole HV) :	48
3.5.3.	Dureté Rockwell (symbole HR) :	48
3.6.	Essai de flexion :	49
3.6.1.	Définition :	49
3.6.2.	Différents types d'essai de flexion :	49
3.7.	Essai de fatigue :	51
3.7.1.	Diagramme de Wöhler :	52
<b>Chapitre IV: Configuration pour le soudage de pipelines</b>		
1.	Généralités sur les pipelines :	54
1.1.	Définition :	54
1.2.	Composantes de pipelines :	54
1.3.	Caractéristiques des tubes :	54
1.4.	Grades :	55
1.5.	Exigences matérielles :	56
1.5.1.	Propriétés Chimique :	56
1.5.2.	Propriétés mécaniques (de traction) :	56
1.6.	Avantages de pipelines :	58
2.	Méthode de soudage de pipeline :	58
2.1.	Réglage des Paramètres du soudage :	58
2.1.1.	Électrode enrobée (SMAW):	58
2.1.2.	Procédés TIG (GTAW) :	59
2.1.3.	Procédé MIG/MAG (GMAW) :	60
2.2.	La préparation des joints :	61
2.2.1.	Gamme d'épaisseur $t \leq 3\text{mm}$ :	61
2.2.2.	Gamme d'épaisseur $2 \leq t \leq 20\text{mm}$ :	61
2.2.3.	Gamme d'épaisseur $20\text{mm} \leq t$ :	62
2.3.	Calcul de la température de préchauffage :	63
2.3.1.	Méthode SEFERIEN :	63
2.3.2.	Méthode BWRA :	64
2.4.	Calcul de la vitesse de refroidissement :	66
2.4.1.	Méthode de l'IRSID :	66
2.4.2.	Méthode BAUS et CHAPEAU :	68
3.	Défauts des soudages de pipelines :	70
3.1.	Les fissures :	70
3.2.	Manque de pénétration :	71
3.3.	Manque de fusion :	71
3.4.	Inclusion gazeuses :	72
3.5.	Inclusion solides :	72
3.6.	Excès de pénétration :	73

## Chapitre 5 : Etude expérimentale

1. DEMARCHE EXPERIMENTALE :.....	75
2. MATERIAUX (métal d'apport et de base) :.....	75
3. Présentation du matériau (API 5L X60) :.....	75
3.1. Spécifications des tuyaux sans soudure API 5L X60 :.....	76
3.2. Les avantages du tuyau sans soudure API 5L X60 :.....	76
3.3. Différences entre API 5L X60 PSL 1 et PSL 2 :.....	76
3.4. Compositions chimiques et propriété mécanique API 5L X60 :.....	77
4. Métaux d'apport :.....	77
5. Les dessins Techniques des pièces soudées :.....	79
6. Procédures :.....	80
6.1. Préparation de chanfrein :.....	80
6.2. Réglage les paramètres de soudage :.....	80
6.2.1. Pour l'électrode enrobée :.....	80
6.2.2. Pour le soudage TIG :.....	81
6.2.3. Pour le soudage MAG :.....	81
6.3. Fixation du tube par des points de soudures :.....	81
6.4. Opération de soudage :.....	81
6.4.1. Le soudage TIG :.....	82
6.4.2. Le soudage avec l'électrode enrobée :.....	82
6.4.3. Le soudage avec fil fourré (MAG) :.....	82
6.5. Découpage des éprouvettes :.....	83
7. Les essais mécaniques :.....	83
7.1. Essai de traction :.....	83
7.1.1. Machine de l'essai :.....	83
7.1.2. Eprouvettes de traction :.....	84
7.2. Essai de pliage :.....	85
7.2.1. Définition :.....	85
7.2.2. Localisation des éprouvettes de pliage dans un joint soudé :.....	85
7.2.3. Différents types de pliages et le symbole de l'essai :.....	85
7.2.4. Eprouvette :.....	86
7.2.5. Paramètres d'essai de pliage :.....	86
7.2.6. Opération de pliage :.....	86
7.3. Essai de résilience :.....	87
8. Résultats et discussions :.....	89
8.1. Introduction :.....	89
8.2. Résultats d'essais de traction :.....	89
8.2.1. Caractérisation des joints des soudures :.....	89
8.2.2. Interprétation :.....	91
8.3. Résultats d'essais de pliage :.....	91
8.3.1. Caractérisation des joints des soudures :.....	91
8.3.2. Interprétation :.....	93
8.4. Résultats d'essais de résilience :.....	93
8.4.1. Interprétation :.....	93
Conclusion générale.....	94
Référence bibliographique.....	95

### Introduction générale

#### **Problématique industriel :**

La demande croissante en énergie, telle que le gaz et le pétrole, nécessite de plus en plus la construction de nouveaux pipelines. En fait, au cours des dernières années, ces formulaires ont entraîné des coûts de transport moins importants et relativement plus sûrs pour le transport de grandes quantités de matériaux sur de longues distances (plusieurs centaines, voire des milliers de kilomètres). Deux événements majeurs vont rendre les pipelines indispensables : la révolution industrielle et l'apparition de l'ère du pétrole.

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique et thermomécanique. Les techniques d'assemblage des matériaux métalliques sont en constante évolution afin de réaliser une parfaite continuité entre les matériaux assemblés.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence du mode de soudage fréquemment utilisé dans le soudage sur les caractéristiques mécaniques autour des joints soudés dans les aciers API 5L.

Le manuscrit est composé dans sept chapitres :

Le premier chapitre est une généralité sur les aciers et les normes API.

Le deuxième chapitre est une généralité sur les modes de soudage.

Les troisièmes chapitres est des présentations des caractéristiques mécaniques.

Le quatrième chapitre est une présentation sur les configurations de soudage de pipelines.

Le cinquième chapitre est réservés aux :

- Présentation du matériel et leur caractéristique mécanique et chimique.
- L'opération de soudage et contrôle par des essais mécaniques.
- Résultats et discussion

Une conclusion générale.

# **Chapitre I**

Généralités sur les aciers et les  
normes API.

# Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

## 1. Les aciers :

### 1.1. Définition de l'acier :

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliages ; il est considéré alors comme un acier allié ; [1,2].

### 1.2. Classification des aciers :

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- ✓ Les aciers au carbone d'usage général,
- ✓ Les aciers de traitement thermique, alliés ou non alliés,
- ✓ Les aciers à outils
- ✓ Les aciers inoxydables

#### 1.2.1. Aciers ordinaires ou aciers au carbone :

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80% de la production des aciers (tableau 1.1). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : Manganèse (1.2%), Silicium (0.6%), Phosphore (0.06%). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers ; [3].

*Tableau 1. 1: les aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés ; [3].*

Nuance	Pourcentage de carbone	Résistance Rm (MPa) état recuit	Emplois
<b>Extra-doux</b>	$C < 0.15$	330_420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
<b>doux</b>	$0.15 < C < 0.20$	370_460	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
<b>Demi doux</b>	$0.20 < C < 0.30$	480_550	Pièces de machines pour applications mécanique, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
<b>Mi dur</b>	$0.30 < C < 0.40$	550_650	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
<b>dur</b>	$0.40 < C < 0.60$	650_750	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
<b>Extra dur</b>	$0.60 > C$	>750	Outils d'usinage et découpe, câbles,

## Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

---

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- ✓ La résistance mécanique à l'état normalisée ou l'état recuit,
- ✓ La trempabilité,
- ✓ La tenue à chaud,
- ✓ La résistance à l'usure de la corrosion.

### 1.2.2. Aciers de traitement thermique :

On définit les aciers de traitement thermique par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitement thermique sont soit des aciers au carbone sans autre éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si , soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'addition ( Cr, Ni , V ,etc. ... ) ; [3].

### 1.2.3. Aciers à outils :

Les aciers à outils ont une importance technologie primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage ~0.1 %, mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique ; [4].

### 1.2.4. Aciers inoxydables :

La dénomination « aciers inoxydables » concerne un ensemble d'alliage ferreux résistant à un grand nombre de milieux corrosifs, dans des limites étendues de température.

L'élément absolument indispensable pour qu'un acier soit inoxydable est le chrome à teneur suffisante, variable selon les cas, mais toujours supérieure à 12 %. La présence du chrome permet la formation en surface d'un film de passivation conférant à l'alliage son caractère (inoxydabilité). L'emploi des aciers inoxydables doit être considéré sous deux aspects principaux :

- La résistance à la corrosion dans le milieu de service ;
- Les propriétés mécaniques exigées par la mise en œuvre et les conditions d'utilisation ; [5].

#### 1.2.4.1. Catégories d'aciers inoxydables :

La norme NF EN10088-1 définit les diverses nuances d'aciers inoxydables et les correspondances avec les anciennes normes NF EN 10088-2 donne les conditions de livraison des produits plats et la norme 10088-3 celle des produits ronds profilés.

Les fascicules de documentation A 35-585/-586 et FDA 35-570 récapitulent et présente la condition des diverses nuances.

Les nuances sont classées en cinq catégories en fonction de leur composition et de leur constitution métallurgique à la température ambiante :

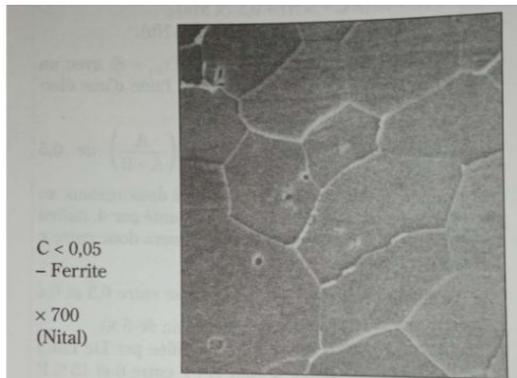
- ✓ Aciers inoxydables ferritiques et semi- ferritiques ;
- ✓ Aciers inoxydables martensitique ;

# Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

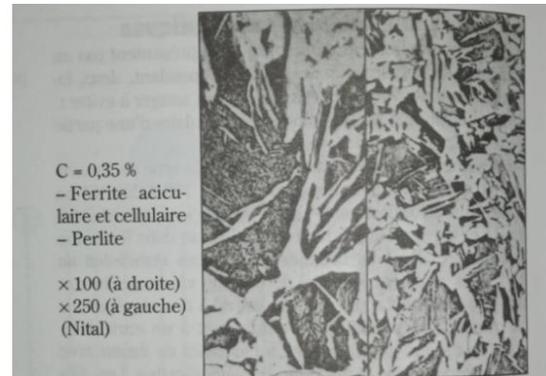
- ✓ Aciers inoxydables austénitiques ;
- ✓ Aciers inoxydables à durcissement par précipitation ;
- ✓ Aciers inoxydables austéno-ferritiques ; [5].

## 1.3. Structure micrographique des aciers :

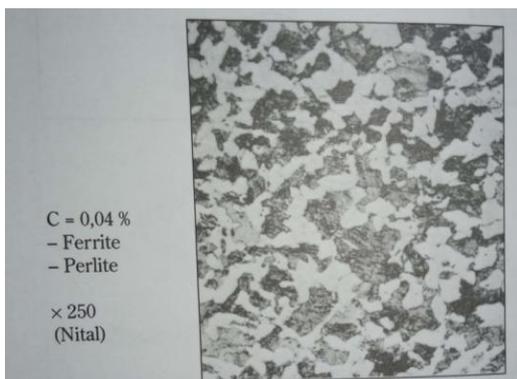
Dans les graphes suivants il y'a quelques exemples des structures micrographiques des aciers :



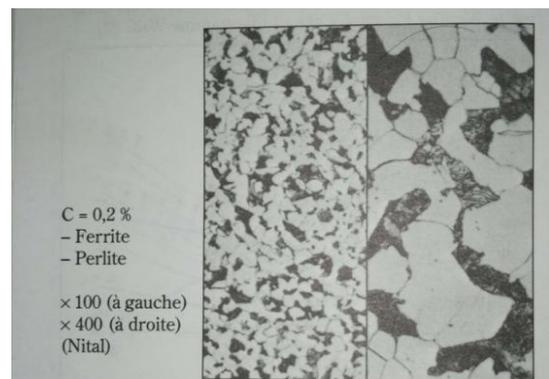
**Figure 1. 1 :** Acier extra-doux ; [5].



**Figure 1.2 :** Acier hypo-eutectoïde resurchauffé ; [5].



**Figure 1. 3:** Acier hypo-eutectoïde 1 ; [5].



**Figure 1. 4:** Acier hypo-eutectoïde 2 ; [5].

## 2. API :

### 2.1. Définition :

American Petroleum Institute, Institut Américain du Pétrole, qui fixe notamment les spécifications des matériels et équipements utilisés dans l'industrie pétrolière ainsi que les modalités des contrôles à effectuer.

### 2.2. Emploi de l'organisation API :

L'American Petroleum Institute (API) est l'un des 600 organismes de normalisation présents aux États-Unis. Celui-ci regroupe les industriels américains du gaz et du pétrole.

## **Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API**

---

L'Institut se prononce sur des questions comme l'exploitation de gisements minéraux, la consommation de pétrole, les taxes, le commerce, l'environnement et la sécurité. Un domaine important est l'élaboration de directives et normes techniques. L'influence de l'API va bien au-delà des États-Unis. Les lignes directrices techniques émises par l'API sont relativement complexes et exigeantes. Les lignes directrices sont élaborées non pas par des institutions indépendantes, mais par des spécialistes des entreprises industrielles dans l'association. D'autres lignes directrices traitent de la conception des machines, des navires de transport du pétrole, de la maintenance des équipements et la mise en œuvre des dispositifs de sécurité.

Normes API sont conçues pour être admissible à l'industrie du pétrole et l'essence selon les exigences de la législation et de l'environnement. Selon l'API, industrie du pétrole et du gaz naturel peut avoir des étalons de référence concerne l'industrie. En vertu des normes générales, il y a quelques caractéristiques subordonnées rédigés pour chaque produit de tubes OCTG spécifique, telles que l'API 5 b, API 5CT, API 5D, API 5 L et ainsi de suite.

### **2.3.API 5L :**

#### **2.3.1. Définition :**

La norme de spécification API 5L de l'American Petroleum Institute couvre les tuyaux de canalisation soudés et sans soudure. Ce tuyau d'acier est utilisé pour les systèmes de transport par pipeline dans les industries du pétrole et du gaz naturel. Il peut être utilisé pour le transport du gaz, de l'eau et du pétrole.

#### **2.3.2. Domaine d'utilisation :**

La spécification API 5L fournit des normes pour les tuyaux adaptés à la conversion du gaz, de l'eau et du pétrole dans les industries du gaz naturel et du pétrole et définit les exigences pour les tubes en acier sans soudure et soudés utilisés pour les systèmes de transport de pétrole et de gaz appelé pipelines. Ce programme de certification nécessite des tests détaillés, y compris des tests hydrostatiques, des tests non destructifs et des tests destructifs.

Les entreprises produisant des tuyaux en acier exigent des audits API 5L des institutions autorisées pour évaluer leur capacité à se conformer à la norme API 5L. Un monogramme API est remis aux usines de tuyauterie qui réussissent cette inspection. Ce monogramme a une date d'expiration et il maintient l'indice composé du fabricant approuvé. Cela signifie que, à la demande d'un fabricant potentiel, API envoie des vérificateurs au moulin pour veiller à ce qu'ils ont la capacité de répondre aux exigences de la norme. Ce serait similaire à une franchise, mais API n'a aucun avantage financier de l'usine, et décline toute responsabilité pour les actions de l'usine ou la performance du produit.

#### **2.3.3. API 5L avantages et Applications :**

- Transport du gaz, de l'eau et du pétrole – préféré dans les longs pipelines en raison de son faible coût
- Acier de pipeline – résistance à la propagation des fissures
- Tuyau de canalisation / tuyaux de conduite de service aigre

## Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

### 2.3.4. Grades et classification Des aciers API 5L :

- Le tuyau API 5L est un tuyau en acier au carbone utilisé pour les transmissions de pétrole et de gaz, il comprend les tuyaux fabriqués en sans soudure ou soudés (ERW, SAW).
- Les grades couverts par l'API 5L sont A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, Maintenant, les grandes aciéries ont développé des tubes en acier pour pipeline avec des nuances d'acier de X100 et X120. Plus les exigences en matière premières et de production sont élevées, plus la nuance d'acier est élevée et l'équivalent carbone entre les différentes nuances d'acier est strictement contrôlé. Le nombre à deux chiffres suivant le « X » indique la limite d'élasticité minimale (en milliers de psi) du tube produit selon cette catégorie.
- Le comité technique auteur des normes a reconnu qu'il existe deux niveaux de base de spécifications techniques PSL qui est synonyme de niveaux de spécification de produit (Product Standard Level) et a donc développé deux variétés PSL1 et PSL2. PSL1 et PSL2 sont différents dans l'inspection, la chimie, les propriétés mécaniques et PSL2 supérieur à PSL1. Quand l'ordre selon API 5L, le PSL est habituellement indiqué dans le Contrat, y compris les spécifications et les nuances d'acier
- La différence entre les deux niveaux de base de cette spécification technique est résumée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 1. 2: Différences entre API 5L, PSL 1 et PSL 2 ; [6].*

Paramètres	PSL1	PSL2
Test de charpy	Non requis	Obligatoire pour tous les grades
Contrôle non destructif	Uniquement lorsque l'acheteur spécifié SR4	Obligatoire
certification	Non requis sauf lorsque spécifié	Certificat obligatoire
traçabilité	Traçable uniquement jusqu'à ce que tous les tests soient réussis	Traçable après achèvement des tests (SR 15.2) obligatoire
Test hydrostatique	Requis	Requis

### 2.3.5. Propriétés physiques et mécaniques et compositions chimiques des aciers API 5L :

La spécification API 5L PSL2 est supérieure à la spécification API 5L PSL1. Ces deux niveaux de spécification ont non seulement des exigences d'inspection différentes, mais également des exigences différentes en matière de composition chimique et de performances mécaniques. PSL2 est supérieure à la PSL1 en termes de composition chimique, de propriétés de traction, d'énergie d'impact, d'essais non destructifs et d'autres indicateurs.

## Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

---

Par conséquent, lors de la passation d'une commande selon l'API 5L, en plus des indicateurs habituels tels que la spécification et la nuance d'acier, le contrat doit également indiquer le niveau de spécification du produit, à savoir PSL1 ou PSL2.

### 2.3.5.1. Compositions chimique :

La composition chimique est résumée dans les deux tableaux ci-dessous pour les deux niveaux de qualité PSL1 et PSL2.

#### a) Composition chimique (niveau de spécification PSL1) :

*Tableau 1. 3: Composition chimique (niveau de spécification PSL1) ; [6].*

Grade	C	Mn	P	S
A25	≤0.21	≤0.6	≤0.03	≤0.03
A25p	≤0.21	≤0.6	0.045-0.08	≤0.03
A	≤0.22	≤0.9	≤0.03	≤0.03
B	≤0.28	≤1.2	≤0.03	≤0.03
X42	≤0.28	≤1.3	≤0.03	≤0.03
X46	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03
X52	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03
X52	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03
X60	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03
X65	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03
X70	≤0.28	≤1.4	≤0.03	≤0.03

## Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

### b) Composition chimique (niveau de spécification PSL2) :

Tableau 1. 4: Composition chimique (niveau de spécification PSL2) ; [6].

Grade	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	f	Ceq	Ceq.c
BR	≤0.024	≤0.4	≤1.2	≤0.025	≤0.015	≤a	≤a	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X42R	≤0.024	≤0.4	≤1.2	≤0.025	≤0.015	≤0.06	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
BN	≤0.024	≤0.4	≤1.2	≤0.025	≤0.015	≤a	≤a	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X42N	≤0.024	≤0.4	≤1.2	≤0.025	≤0.015	≤0.06	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X46N	≤0.024	≤0.4	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.07	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X52N	≤0.024	≤0.45	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.1	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X56N	≤0.024	≤0.45	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.1	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X60N	≤0.024	≤0.45	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.1	≤0.05	≤0.04	≤a	≤a
BQ	≤0.018	≤0.45	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.05	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X42Q	≤0.018	≤0.45	≤1.4	≤0.025	≤0.015	≤0.05	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X46Q	≤0.018	≤0.45	≤1.5	≤0.025	≤0.015	≤0.05	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X52Q	≤0.018	≤0.45	≤1.5	≤0.025	≤0.015	≤0.05	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤a
X56Q	≤0.018	≤0.45	≤1.5	≤0.025	≤0.015	≤0.07	≤0.05	≤0.04	≤0.043	≤0.25
X60Q	≤0.018	≤0.45	≤1.7	≤0.025	≤0.015	≤a	≤a	≤a	≤0.043	≤0.25
X70Q	≤0.018	≤0.45	≤1.7	≤0.025	≤0.015	≤a	≤a	≤a	≤a	≤a

#### 2.3.5.2. Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques sont résumées dans les deux tableaux ci-dessous pour les deux niveaux de qualité PSL1 et PSL2.

## Chapitre 1 : Généralités sur les aciers et les normes API

### a) Propriétés mécaniques (niveau de spécification PSL1) :

*Tableau 1. 5: Propriétés mécaniques au niveau de spécification PSL1 ; [6].*

Grade	Resistance a la traction Rt0.5 Mpa	Resistance a la rupture Rm Mpa	Allongement 50mm
<b>A25/A26</b>	≥175	≥310	Af
<b>A</b>	≥210	≥335	Af
<b>B</b>	≥245	≥415	Af
<b>X42</b>	≥290	≥415	Af
<b>X46</b>	≥320	≥435	Af
<b>X52</b>	≥360	≥460	Af
<b>X56</b>	≥390	≥490	Af
<b>X60</b>	≥415	≥520	Af
<b>X65</b>	≥450	≥535	Af
<b>X70</b>	≥485	≥570	Af

### b) Propriétés mécaniques (niveau de spécification PSL2) :

*Tableau 1. 6: Propriétés mécaniques au niveau de spécification PSL2 ; [6].*

Grade	Resistance a la traction Rt0.5 Mpa	Resistance a la rupture Rm Mpa	Rt0.5/Rm	Allongement 50mm
<b>BR/BN/BQ</b>	245	415-655	≤0.93	Af
<b>X42R/X42N/X42Q</b>	290	≥415	≤0.93	Af
<b>X46N/X46Q</b>	320	435-655	≤0.93	Af
<b>X52N/X52Q</b>	360	460-760	≤0.93	Af
<b>X56N/X56Q</b>	390	490-760	≤0.93	Af
<b>X60N/X60Q</b>	415	520-760	≤0.93	Af
<b>X65Q</b>	450	535-760	≤0.93	Af
<b>X70Q</b>	485	570-760	≤0.93	Af

# **Chapitre II**

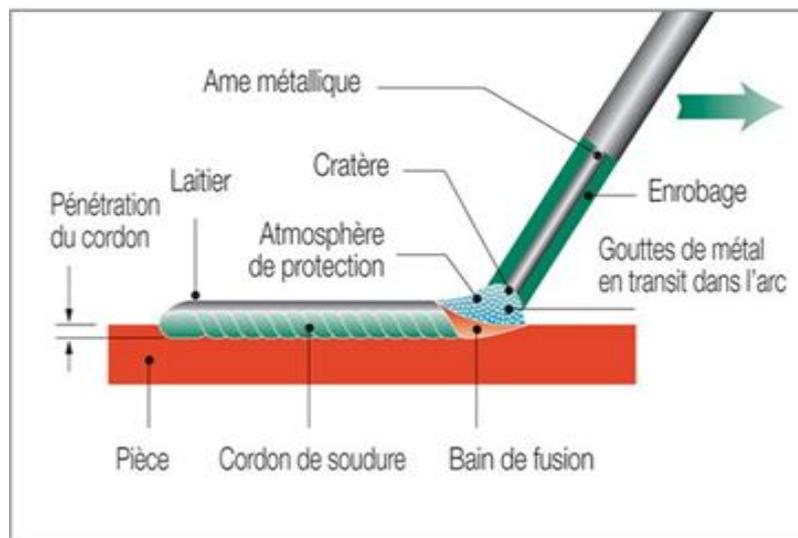
Généralités sur les modes de soudage.

### 1. Définition du soudage :

Le travail du soudeur s'effectue sur une vaste gamme de métaux. Afin d'être en mesure de choisir ou de justifier le choix d'un procédé de soudage et d'un métal d'apport approprié, on doit évidemment connaître les propriétés et la soudabilité de la pièce à souder. C'est là que des notions de métallurgie trouvent toute leur utilité. Ce premier chapitre propose donc un aperçu des propriétés physiques de différents métaux et présente, plus particulièrement, les métaux les plus communément soudés.

### 2. Histoire du soudage :

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La fin du XIX<sup>ème</sup> siècle marque, avec l'apparition de procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Les paramètres électrodes étaient en acier. Elles ont été rapidement remplacées par les électrodes en carbone de Bernardos pour le soudage à l'arc. En 1904, le Suédois Oskar Kjellberg invente l'électrode enrobée et la fait breveter. Cette innovation marque une évolution radicale ; [8].

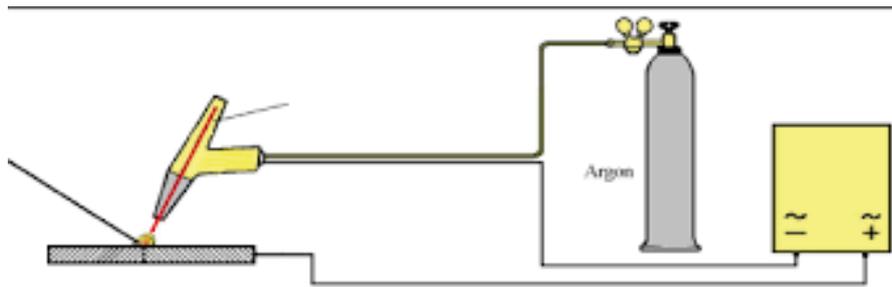


*Figure 2. 1: Schéma d'installation manuelle pour soudage à l'électrode enrobée.*

À peu près au moment apparaît le soudage au gaz, utilisant l'acétylène et l'oxygène pour produire une flamme dont la température peut atteindre 3100°C, soit bien plus que celle que permettant les autres hydrocarbures gazeux.

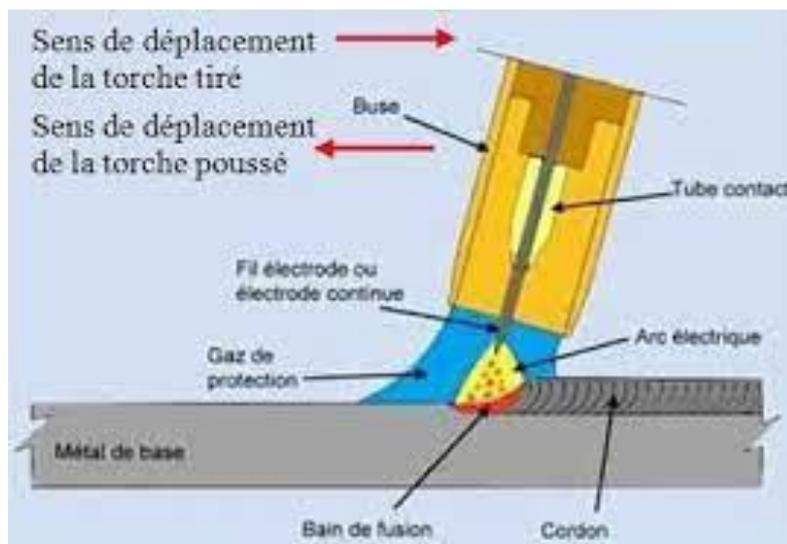
À la fin des années 1930, de nouveaux procédés apparaissent. Ils détrônent le soudage à l'arc traditionnel (manuel) avec électrode fusible remplacée par un fil-électrode dont on commence à automatiser le dévidage. Dans cette catégorie, le procédé le plus utilisé est le soudage à l'arc submergé (AS), dans lequel l'arc est immergé dans une couche de flux granuleux.

Pendant la seconde guerre mondiale, les États-Unis expérimentent la protection de l'arc par gaz inerte puis l'utilisation d'une électrode de tungstène permet l'amorçage de l'arc sans fusion de l'électrode, et donc la soudure sans matériau d'apport. Le procédé est dit soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz).



*Figure 2. 2: procédé du soudage TIG.*

Quelques années plus tard, apparaît la méthode MIG (soudage avec gaz de protection inerte), ce procédé utilise comme un gaz de protection un gaz inerte tel l'hélium ou l'argon. Avec le remplacement de l'hélium ou l'argon par du CO<sub>2</sub> –gaz plutôt réactif, on parle de soudage MAG (Metal Active Gaz).



*Figure 2. 3:procédé du soudage MIG-MAG*

En 1958, apparaît le soudage par faisceau d'électrons (FE), qui, avec le soudage laser relève de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie ; [8].

### **3. Terminologie :**

#### **3.1.Dénominations et références :**

La norme ISO 857 définit les procédés de soudage. La norme ISO 4062 définit la nomenclature et la numérotation des procédés (**Tableau 2.1**). On retrouve tous ces éléments sur les dessins (norme ISO 2553) ou les qualifications des modes opératoires de soudage (QMOS) (norme EN 288) ; [8].

**Tableau 2. 1:** Numéros de référence pour quelques procédés de soudage par fusion (norme ISO 4063) ; [8].

Procédé	Numéro De référence
Soudage à l'arc avec électrode enrobée	111
Soudage à l'arc avec fil fourré sans gaz de protection	114
Soudage à l'arc submergé	12
Soudage MIG	131
Soudage MAG	135
Soudage MAG avec fil fourré	136
Soudage TIG	141
Soudage à l'arc plasma	15
Soudage oxygaz	31

### 3.2. Vocabulaire de base :

- Soudage par pression : soudage avec application d'une pression provoquant une déformation plus ou moins plastique des surfaces à souder, généralement sans métal d'apport. Aucune partie constitutive ne subit de fusion. Il est possible, au besoin, de chauffer les surfaces à souder pour permettre ou faciliter l'assemblage.
- Soudage par fusion : soudage avec fusion assurant la formation du joint, sans intervention de pression. L'utilisation d'un métal d'apport fondu n'est pas toujours nécessaire.
- Rechargement : application par soudure, sur la pièce à souder, d'une ou plusieurs couches d'un métal différent de celui de la pièce à souder. Permet d'obtenir une meilleure résistance à l'abrasion, la corrosion ou à la chaleur.

### 4. Différents modes du soudage :

#### 4.1. Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées SMAW :

##### 4.1.1. Généralités :

SMAW : Shielded Metal Arc Welding selon les normes américaines ou MMA : Manual Metal Arc.

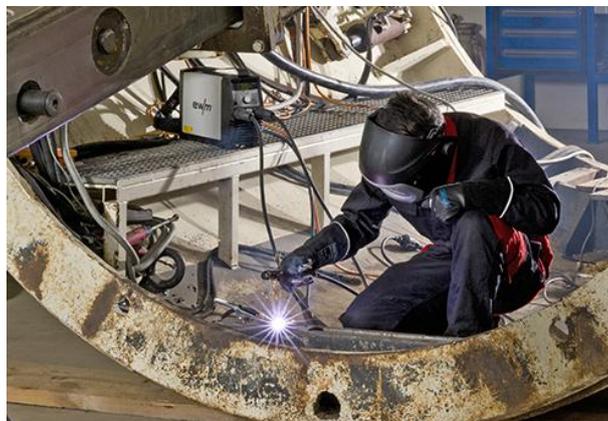
Le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée (SAEE) couramment appelé soudage à la baguette est le procédé de soudage sur chantier le plus répandu. La norme ISO 2560 préconise d'utiliser des électrodes à enrobage basique ou cellulosique.

Ce procédé est utilisé pour toutes les passes de soudage (première passe, deuxième passe, passe de finition) et toutes les positions de soudage. Il convient particulièrement bien au soudage vertical descendant.

Dans le procédé de soudage SMAW on utilise une électrode consommable recouverte d'un flux. La machine à souder est raccordée à une source d'énergie qui crée un courant alternatif (CA) ou un courant continu (CC) pour former un arc électrique entre l'électrode et le métal au fur et à mesure que cet arc se forme, l'électrode et le métal fondent pour former le bain de fusion. En même temps, la chaleur de l'arc brûle le flux, ce qui forme une couche de gaz qui

protège la soudure de certains gaz atmosphériques. Lorsque le bain de soudure refroidit, il se solidifie pour former un joint. Ce processus forme également une couche laitière qui doit être ébréchée- ce qui le rend moins rapide que beaucoup d'autres types de soudage. mais le choix de l'électrode appropriée peut aider à accélérer le processus.

Dans la zone linguistique anglophone, il est connu sous l'abréviation MMA ou MMAW (Manuel Metal Arc Welding). Il est caractérisé par le fait que l'arc brûle entre une électrode en fusion et le bain de fusion. Il n'existe aucune protection externe. La protection contre l'atmosphère est assurée uniquement par l'électrode. Dans ce cas l'électrode est à la fois le support d'arc et le matériau d'apport. Le revêtement forme des scories et/ou un gaz de protection qui, entre autres, protège les gouttes à transférer et le bain de fusion contre l'introduction des gaz atmosphériques comme l'oxygène, l'azote et l'hydrogène.



*Figure 2. 4: Dispositif de soudage SMAW*

### **4.1.2. Type de courant :**

Pour le soudage manuel à l'électrode (soudage à l'électrode enrobée), en principe, on peut utiliser aussi bien le courant continu que le courant alternatif, toutefois tous les types d'électrodes enrobées ne peuvent pas être soudées par courant alternatif sinusoïdal, par exemple, c'est le cas des électrodes basiques. Pour le soudage au courant continu, le pôle négatif est en général raccordé à l'électrode et le pôle positif à la pièce à usiner, pour la plupart des types d'électrodes. Les électrodes basiques font également exception car elles se soudent mieux sur le pôle positif. Il en va de même pour certains matériaux des électrodes cellulosiques. Vous retrouverez des informations détaillées à ce sujet dans le chapitre « Types d'électrodes ». L'électrode est l'outil du soudeur. Il guide l'arc amorcé sur celle-ci dans le joint de soudage et fait fondre les bords du joint, comme sur l'image 2. Selon le type de joint et l'épaisseur du métal de base, différentes intensités de courant sont nécessaires. Étant donné que l'intensité maximale admissible des électrodes est limitée en fonction de leur diamètre et de leur longueur, les électrodes enrobées sont disponibles en différents diamètres et longueurs. Le tableau 1 indique les dimensions normalisées dans la norme NF EN 759. Plus le diamètre d'âme métallique est grand, plus il est possible d'utiliser des courants de soudage élevés ; [9].

### 4.1.3. Types d'électrodes :

Il existe des électrodes enrobées dont l'enrobage présentant des compositions très différentes. La composition de l'enrobage détermine les caractéristiques de fusion de l'électrode, ses propriétés de soudage et la qualité du métal fondu. Conformément à la norme NF EN 499, il existe différents types d'enrobage pour les électrodes enrobées destinées à souder les aciers non-alliés. Ici, on fait la distinction entre les types de base et les types mixtes. Des lettres sont utilisés pour désigner les différents types d'électrodes : C = cellulose, A = acide, R = rutile et B = basique. En Allemagne, le type rutile joue un rôle prépondérant. Les électrodes enrobées peuvent présenter un enrobage mince, moyen ou épais. Pour les électrodes rutilés, qui sont disponibles habituellement dans les trois épaisseurs d'enrobage, les électrodes à enrobage épais sont par conséquent connues sous le nom de RR pour mieux les différencier. Pour les électrodes enrobées alliées et hautement alliées, il n'existe pas une telle variété de types d'enrobages. Parmi les électrodes enrobées destinées au soudage des aciers inoxydables, qui sont normalisées par la norme NF EN 1600, on distingue par exemple uniquement les électrodes de type rutile et celles de type basique, de même pour les électrodes enrobées pour le soudage des aciers réfractaires (NF EN 1599) mais dans ce cas il y a uniquement des types mixtes basiques, comme pour les électrodes de type rutile, bien que cela ne soit pas spécifiquement désigné. Cela est le cas pour les électrodes qui présentent de meilleures caractéristiques pour le soudage en position difficile, par exemple. Les électrodes enrobées destinées au soudage d'acier à haute résistance (NF EN 757) sont uniquement disponibles avec des enrobages basiques ; [9].

### 4.1.4. Avantages et inconvénient :

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux. Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

## 4.2. Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles GMAW-MIG-MAG :

### 4.2.1. Définition :

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. 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 ; [10].

### 4.2.2. Circuit de soudage :



*Figure 2. 5: les compositions de poste de soudage MIG-MAG*

Le circuit de soudage est essentiellement composé des éléments suivants :

- générateur
- torche avec faisceau de câbles
- dévidoir de fil
- groupe de refroidissement par eau
- bouteille de gaz avec système de réglage de pression
- borne avec câble de masse

### 4.2.3. Gaz de protection :

Les gaz de protection utilisés dans les procédés de soudage M.I.G.-M.A.G. Appartiennent essentiellement à deux catégories : inertes et actifs. À la première catégorie appartiennent l'argon, l'hélium et les mélanges argon-hélium, tandis que les gaz actifs comprennent l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>), les mélanges argon/oxygène ou argon/anhydride carbonique.

**L'Argon (Ar)** est un gaz inerte produit de la distillation fractionnée de l'atmosphère. Étant extrait de l'air, il peut donc contenir des traces d'impuretés, comme oxygène, azote ou vapeur d'eau ; il s'adapte néanmoins à la quasi-totalité des applications de soudage.

L'utilisation de ce gaz dans les applications M.A.G. permet une bonne stabilité de l'arc et un amorçage facile. Étant donné sa basse conductivité thermique, la partie centrale de la colonne

de l'arc se maintient à une température élevée et fluidifie les gouttes du matériel transitant dans la zone de l'arc.

**L'Hélium (He)** est un gaz inerte et assez rare, peu présent dans l'atmosphère et extrait du sous-sol ; il est par conséquent bien plus coûteux que l'argon. Les caractéristiques de l'hélium, comparées à celles l'argon, comportent une stabilité de l'arc moindre mais une meilleure pénétration ; il est surtout utilisé dans les cas de soudages sur grandes épaisseurs et pour les matériaux à conductibilité thermique élevée, comme le cuivre et l'aluminium. L'hélium étant, à différence de l'argon, plus léger que l'air, et donc plus volatile, il est indispensable de l'utiliser en quantité supérieure à l'argon pour une protection adéquate de la zone de soudage.

**L'Anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>)** est un gaz actif présent dans l'air et le sous-sol. Le problème le plus fréquent causé par ce type de protection est de provoquer la formation d'éclaboussures et un arc instable ; le maintien d'un arc assez court et d'une longueur constante permet qu'il en soit un bon contrôle de ce dernier. La protection en CO<sub>2</sub> garantit généralement une bonne pénétration.

**Mélanges actifs.** Il est souvent possible d'exploiter les qualités individuelles des gaz en utilisant comme protection gazeuse un mélange de ces derniers, comme par exemple Argon-Oxygène, Argon-Oxygène-CO<sub>2</sub>, Argon-CO<sub>2</sub>. Même si les gaz inertes à l'état pur sont en mesure de remplir leur fonction de protection à toutes températures, l'ajout de gaz actifs améliore la stabilité de l'arc et le transfert du métal du fil-électrode au bain sans pour autant compromettre l'action protectrice, [10].

### 4.2.3. Les avantages du procédé MIG/MAG :

- De hautes performances.
- Un apport d'énergie vers la pièce relativement faible.
- Une automatisation simple.
- Pas de remplacement continu d'électrodes.
- Pas de laitier à enlever, sauf sur certains fils fourrés.
- Le taux de fusion est plus élevé, plus forte concentration de courant dans le fil).

### 4.2.4. Les inconvénients du procédé MIG/MAG :

- Un équipement de soudage plus complexe, plus coûteux.
- Les torches de soudage sont plus grandes. L'accessibilité au métal de base peut être plus limitée lors de certaines utilisations

## 4.3. Soudage à l'arc avec électrodes non fusibles TIG, GTAW :

### 4.3.1. Définition :

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne d'une part la sortie du gaz , et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si l'électrode tungstène est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le soudeur apporte manuellement (ou automatiquement sur certaines installations) le métal d'apport (d'un diamètre d'environ

0,8 mm à 4 mm) pour le mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue en créant le cordon de soudure. Le tout s'exécute sous protection gazeuse ; [11].

La soudure TIG à la particularité d'être exécutée sous protection de gaz inerte avec une électrode non fusible et réfractaire(en tungstène). Ce procédé s'appelle Tungsten Inert Gas (TIG) ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) aux USA, WIG en Allemagne. Le poste TIG est une machine qui est désormais un procédé très prisé des entreprises, pour sa précision notamment. Les postes TIG peuvent aussi être adaptés pour souder en MMA. L'amorçage se fait souvent soit en haute fréquence(HF) soit au toucher (Lift).

De plus en plus utilisées les pédales permettent de gérer son intensité directement avec le pied et libèrent la dextérité du poignet. Les torches peuvent aussi être refroidies. Certaines torches peuvent aussi avoir une fonction de réglage de l'intensité directement au niveau de la torche ; [11].

### 4.3.2. Avantages de soudage par TIG :

- Large gamme d'épaisseurs à souder ;
- Simple d'emploi ;
- Travail précis et esthétique ;
- Peu de fumées ;
- Soudage dans toutes les positions ;
- Procédé automatisable.

### 4.3.3. Inconvénients de soudage par TIG :

- Faible vitesse de soudage.
- Apport important d'énergie.

## 4.4. Soudage à l'arc au plasma :

### 4.4.1. Définition :

Le soudage plasma peut être considéré comme une évolution des procédés TIG, tant en termes de densité énergétique du faisceau que des performances réalisées.

Il est impossible d'augmenter de manière continue la densité énergétique du procédé TIG au-delà de 400 A. En réalité, la densité énergétique diminue très rapidement au-delà de cette valeur en raison d'un élargissement incontrôlé du panache de l'arc. On passe alors du confinement au rétrécissement de l'arc à l'aide du procédé plasma, ou jet plasma (selon le schéma comparatif ci-dessous), dont la densité énergétique est supérieure à celle d'un arc libre, par le biais de deux méthodes :

- par augmentation directe de l'énergie cinétique des électrons en augmentant la tension d'accélération (tension d'arc) ;
- par rétrécissement mécanique et pneumatique de l'arc, accompagné d'une expulsion de gaz plasmagène à grande vitesse.

### 4.4.2. Les avantages d'un arc plasma :

On peut aisément identifier les avantages d'un arc plasma rétréci par rapport à un arc TIG ouvert :

- Les isothermes obtenues à la racine de l'arc du côté cathode sont de loin les plus élevés à plus de 24 000°K par rapport aux 14 000 à 18 000°K du TIG.

- Dans le cas du plasma, les isothermes utilisables compris entre 10 000 et 16 000°K sont quasiment verticaux et parallèles à l'axe du chalumeau sur plusieurs cm. La densité énergétique est donc constante tout au long de cette distance et possède une latitude de réglage qu'il est impossible d'obtenir dans le soudage TIG, dont les températures utiles sont inférieures (entre 4 000° K et 10 000 °K avec une densité énergétique très inférieure due à la divergence du panache de l'arc).

Ces températures et leurs isothermes sont dépendantes du débit du gaz plasma, du degré de rétrécissement et de la valeur du courant.

La puissance utilisée de 10 à 15 KW est 50 à 60% supérieure à la puissance générée par un arc TIG. Elle reste néanmoins très en dessous de la puissance de 120 KW utilisée dans le coupage plasma ; [12].

### 4.5. Soudage à l'arc submergé SAW :

#### 4.5.1. Définition :

Le soudage à l'arc submergé est généralement utilisé dans les applications industrielles impliquant des plaques d'acier épaisses ou des soudures longues surtout dans les ateliers. Ce procédé consiste à créer un joint de soudure entre les composants en acier à l'aide d'un arc électrique submergé par une couche de flux granuleux qui se présente sous forme de poudre. Le flux a pour fonction de protéger le bain de fusion contre l'atmosphère ambiante oxydante. Le flux en général est du type basique ou acide avec parfois des éléments d'addition qui permettent de modifier sensiblement la composition chimique du métal déposé et les caractéristiques mécaniques du joint soudé.

#### 4.5.2. Avantages du Procédé :

- Une pénétration importante due à une énergie de soudage très élevée
- Une très grande vitesse de soudage supérieur à 2 m/min.
- Un dépôt de cordon de soudure de très bel aspect ne nécessitant aucun usinage et de très bonnes caractéristiques du joint soudé (physique, mécanique)
- Le prix de revient du mètre de soudure est bas au regard de quelques autres procédés de soudure.

#### 4.5.3. Inconvénients :

- En raison de l'importance du bain de fusion il Ya risque de fissuration à chaud,  
Le procédé sous flux ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontale sauf un dispositif particulier.
- Le coût des équipements est assez élevé.
- Procédé de soudage qui est généralement utilisé dans les ateliers.



Figure 2. 6: photos montrant le principe de soudage SAW

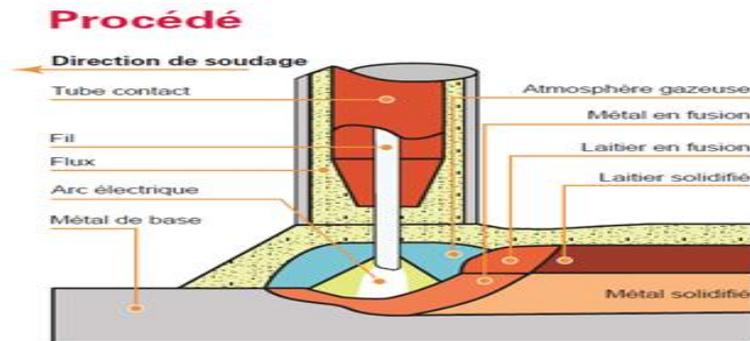


Figure 2. 7: principe de fonctionnement du procédé de soudage SAW.

### 4.6. Autres procédés :

Depuis la fin du néolithique ou La métallurgie du laiton puis du fer est apparue les techniques et les procédés de soudage ne cessent de se développer surtout Au milieu du XXe siècle ou de nombreuses nouvelles méthodes de soudage ont été inventés poussées par les besoins croissant de l'industrie de fabrication de l'armement durant la première et la deuxième guerre mondiale et les industries de construction naval, aéronautique et automobiles par la suite.

Ces procédés son listés comme suit :

- Brasage à la lampe à souder
- Soudage oxyacétylénique ou soudage oxygaz
- Soudage aluminothermique
- Soudage électrique par résistance
- Soudage orbital
- Soudage laser
- Soudage plasma
- Soudage par friction
- Soudage par composition de procédés
- Soudage électro-gaz
- Soudage par diffusion.

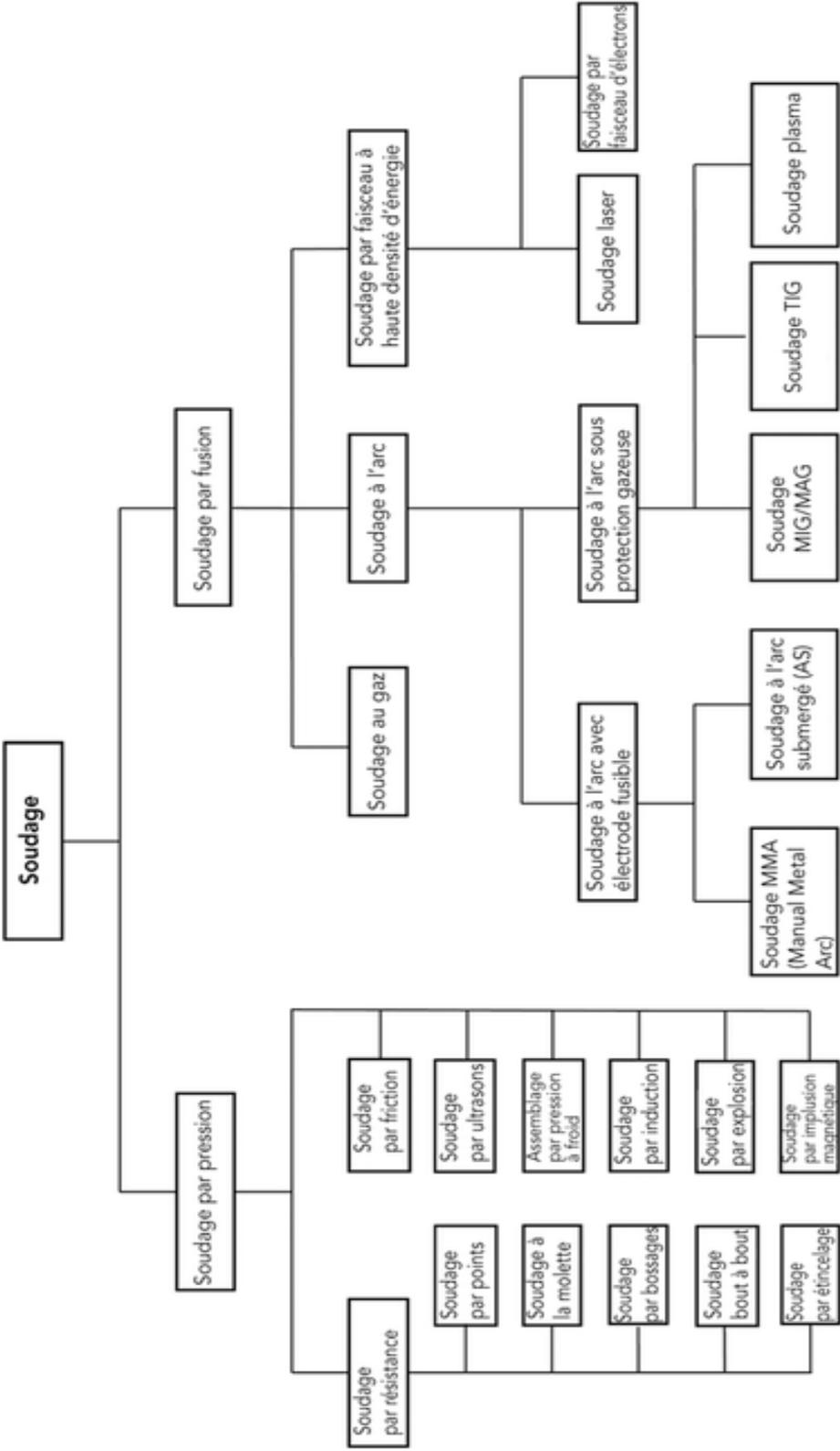
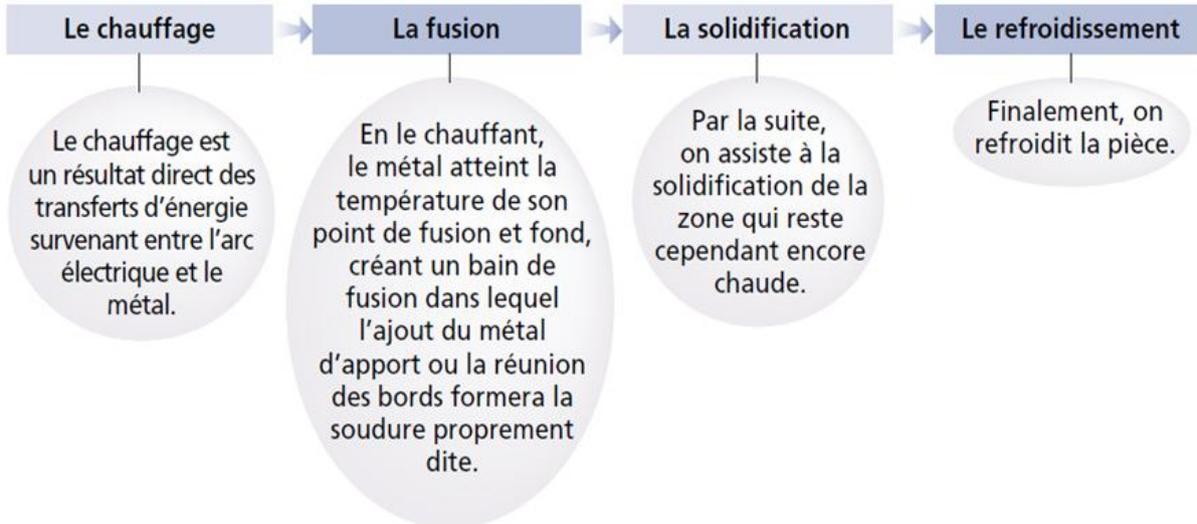


Figure 2. 8: Organigramme des procédés de soudage les plus répandus

### 5. Soudabilité des métaux :

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « zone thermiquement atteinte » ou ZTA ; [13].

On peut distinguer quatre étapes lors de l'application d'un procédé de soudage à l'arc :



#### 5.1. Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage :

On compte quatre principaux facteurs qui déterminent les effets des opérations de soudage et qui entrent en considération dans le choix d'un procédé :

- Quantité de chaleur transférée
- Température initiale de la pièce
- Vitesse de refroidissement du métal
- Température atteinte dans la ZTA

#### 5.2. Quantité de chaleur transférée :

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé :

*Tableau 2. 2: Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage ; [13].*

Procédé de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90 à 99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec fil fourré de flux (FCAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	50 à 85
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (GTAW)	20 à 50

### 5.3. Température initiale de la pièce :

La température initiale détermine la vitesse de refroidissement de la pièce et l'humidité qu'elle contient. Un préchauffage approprié permet de diminuer la vitesse de refroidissement et d'assécher les pièces, ce qui atténue les risques d'absorption d'hydrogène.

### 5.4. Vitesse de refroidissement du métal :

La vitesse de refroidissement dépend de la différence de température entre la pièce et le milieu de refroidissement ; plus l'écart est élevé, plus le refroidissement sera rapide. Plus les zones de contact entre le cordon de soudure et le milieu de refroidissement sont étendues, plus le refroidissement sera rapide.

### 5.5. Température atteinte dans la ZTA :

La température atteinte dans la ZTA modifie la structure finale du métal dans cette zone. La figure 1.20 illustre l'influence de la température atteinte dans la ZTA dans le cas de l'acier. On remarque que la grosseur des grains est proportionnelle à la chaleur atteinte dans la ZTA. La conductivité thermique du métal détermine la vitesse à laquelle le métal transfère la chaleur depuis la ZTA, donc la taille des zones atteintes par la chaleur. L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire sont deux facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZTA ; [13].

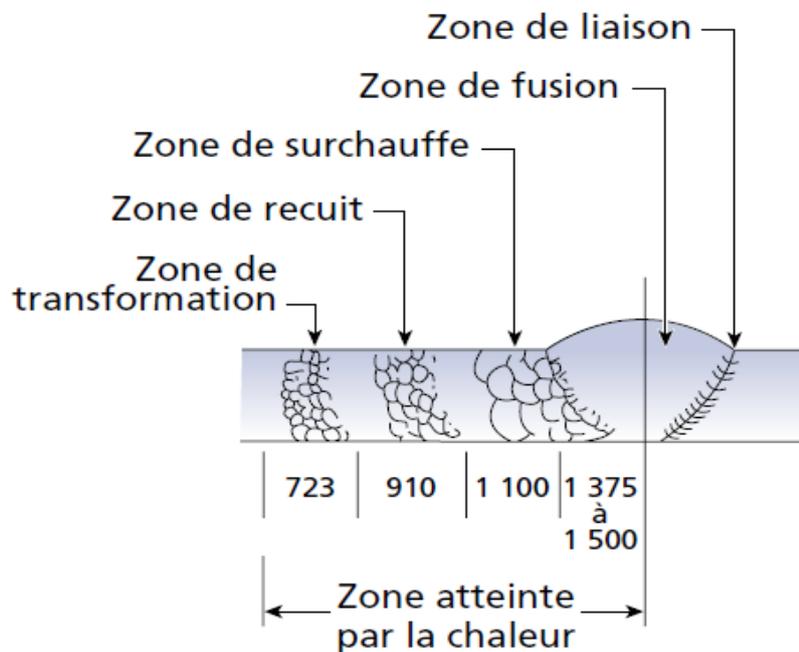


Figure 2. 9: Différentes zones atteintes par la chaleur ; [13].

### 5.6. Énergie linéaire :

L'énergie linéaire ( $E_l$ ) correspond à l'énergie transférée au métal de base par unité de longueur de soudure. Elle dépend de la vitesse d'avance ( $v$ ), de même que de la tension ( $V$ ) et de l'intensité de courant ( $I$ ) utilisées :  $E_l = \frac{L \times V}{v}$

L'énergie linéaire s'exprime en joules/millimètre (J/mm) lorsque le courant est exprimé en ampères (A), la tension en volts (V) et la vitesse en millimètres/seconde (mm/s).

Plus l'énergie linéaire est élevée, plus la ZTA sera grande et plus la vitesse de refroidissement sera lente (figure 1). Par contre, l'épaisseur des pièces provoque l'effet inverse : plus elle est grande, plus la pièce refroidira rapidement et plus la ZTA sera petite ; [13].

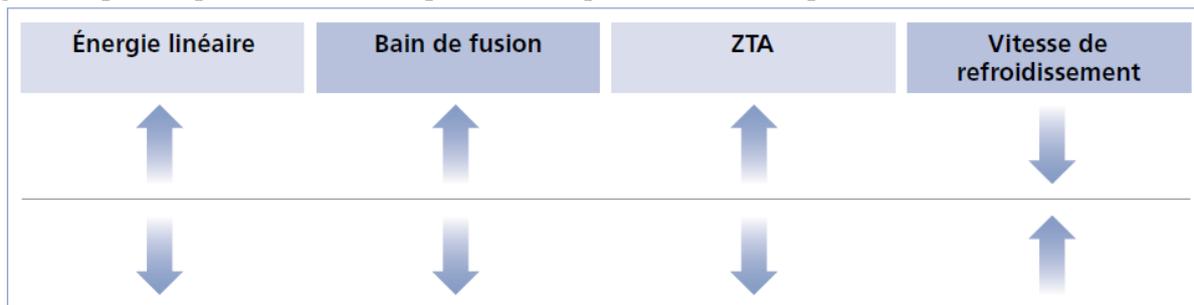


Figure 2. 10: Effets de l'énergie linéaire ; [13].

### 5.7. Coefficient de dilatation :

Les taux de dilatation et de contraction (retrait) de chaque métal ainsi que sa ductilité permettent de prévoir comment le métal réagira lors du soudage. Le coefficient de dilatation représente la valeur de l'augmentation de volume d'un métal sous l'effet de la chaleur en exprimant la valeur de la déformation linéaire. Le tableau de la figure présente la valeur des coefficients de différents métaux pour chaque degré Celsius d'augmentation de la chaleur. L'unité de mesure de la dilatation est le micron ( $\mu$ ), lequel est égal à un millionième de mètre ou encore, un millième de millimètre ( $1 \mu = 0,001 \text{ mm}$ ). Les valeurs de dilatation sont valides pour chaque mètre linéaire de métal.

Lorsqu'on connaît la température initiale et la température finale d'un métal, on peut ainsi calculer l'ampleur de sa dilatation (ou de sa contraction, s'il refroidit).

Par exemple, comparons la dilatation d'une barre d'acier à celle d'une barre d'aluminium, d'un mètre chacune, lorsqu'on les chauffe à  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  à partir d'une température initiale de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , soit une augmentation de température de  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  (figure 1.23).

Pour chaque degré, la barre d'acier se dilate de  $12 \mu/\text{m}$  (soit  $0,012 \text{ mm/m}$ ) ; par mètre, la variation totale sera donc de :

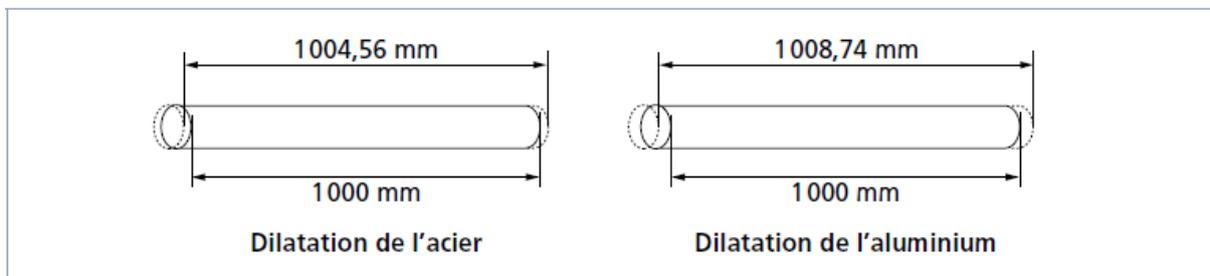
$$380 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,012 \text{ mm}/^\circ\text{C} = 4,56 \text{ mm}$$

Par contre, la barre d'aluminium se dilate de  $23 \mu/\text{m}$  (ou  $0,023 \text{ mm/m}$ ) ; la variation par mètre sera plutôt de :

$$380 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,023 \text{ mm}/^\circ\text{C} = 8,74 \text{ mm}, \text{ ce qui correspond à près de deux fois la valeur de dilatation de l'acier ; [13].}$$

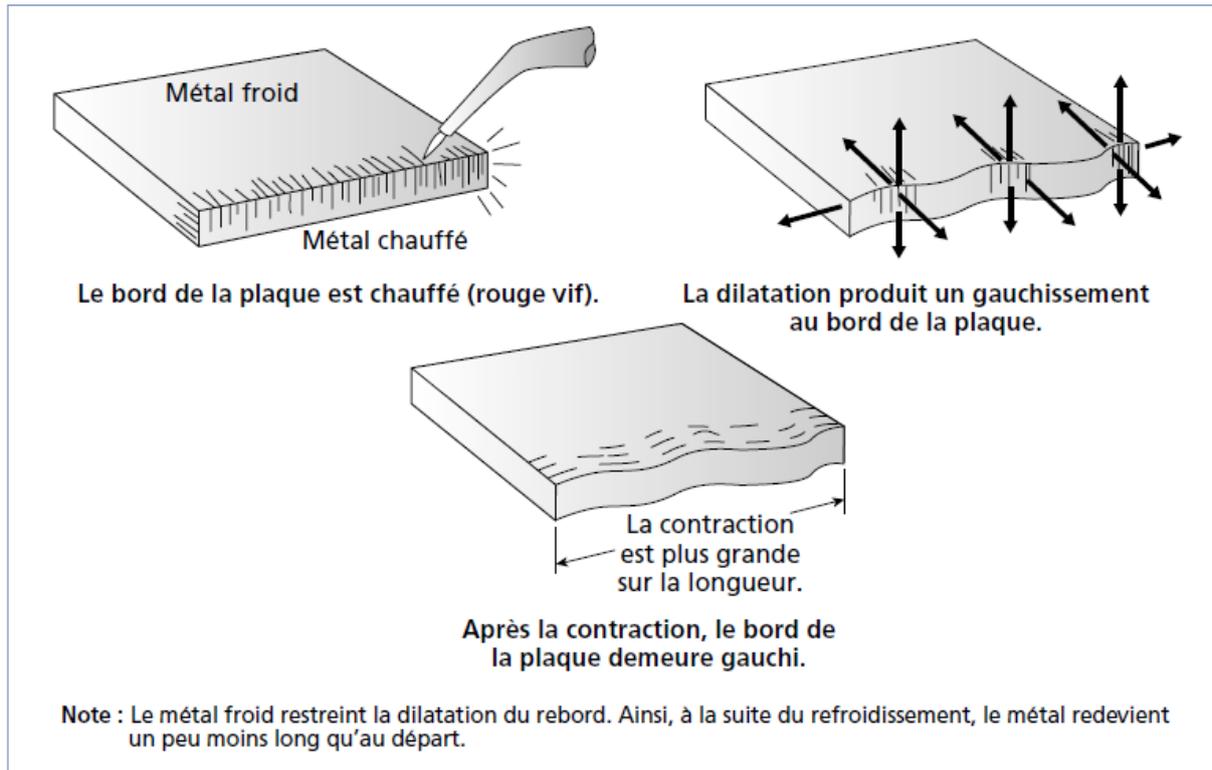
*Tableau 2. 3: Coefficients de dilatation linéaire ; [13].*

Métal	Coefficients de dilatation en microns ( $\mu$ )
Acier	12
Aluminium	23
Argent	19
Bronze	18
Cuivre	17
Étain	23
Fer	12
Fonte	11
Laiton	19
Magnésium	23
Or	15
Plomb	29
Tungstène	4
Zinc	30



*Figure 2. 11: Dilatation de l'acier et de l'aluminium ; [13].*

En soudage, on ajoute généralement un métal d'apport à la pièce soudée, ce qui provoque un retrait (contraction) généralement plus grand que la dilatation qui a eu lieu avant l'ajout du métal d'apport. Par ailleurs, comme la pièce doit être maintenue en place, elle subit des contraintes dans l'espace et ne se dilate généralement pas dans tous les sens de manière égale. Tous ces facteurs peuvent être à l'origine de déformations dans la pièce soudée.

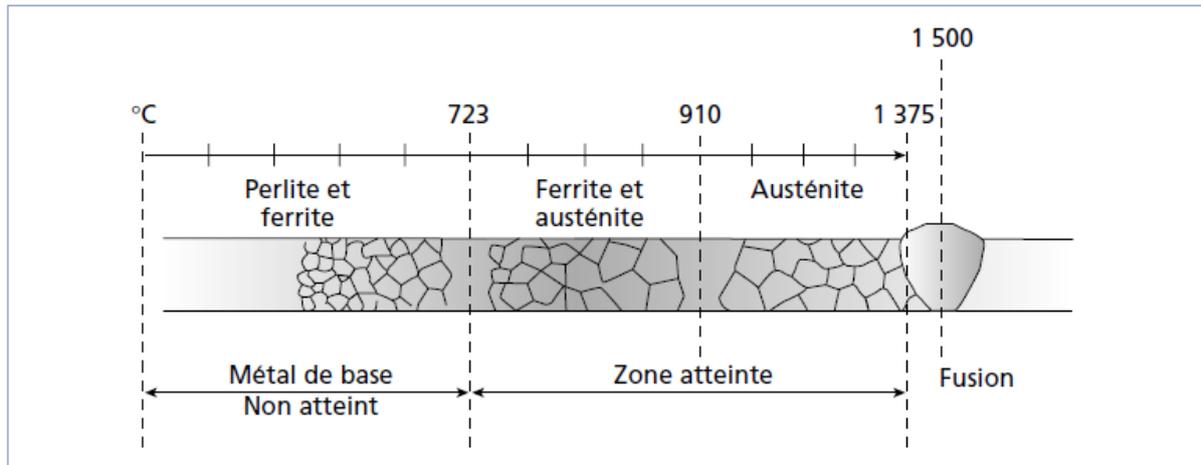


*Figure 2. 12: Refoulement ; [13].*

### 5.8. Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés :

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZTA après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La figure 2.13 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier. Remarquez la zone où on trouve de l'austénite ; c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes.



**Figure 2. 13:** Influence de la température sur les grains ; [13].

Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants :

- Trempabilité : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- Carbone équivalent : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent.

**Tableau 2. 4:** Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier ; [13].

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	Aucun De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent :

Le carbone bien sûr (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Carbone équivalent } C = + \frac{Mn+Si+Cr}{6} + \frac{Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse dans l'alliage (par exemple, si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors C = 0,5 et Mn = 0,03). Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder ; [13].

### 5.9. Soudabilité des aciers inoxydables :

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité de ces aciers, comparativement aux aciers au carbone, sont les suivantes :

- Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée ; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
- Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique élevée indique que la chaleur sera plus dispersée dans le métal et qu'il y aura des pertes.
- Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer ; par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- En fait, pour toutes ces raisons, la taille de la ZTA d'un acier inoxydable sera d'environ 50 % plus grande que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes
- conditions. Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables possédant des niveaux de soudabilité différents ; [13]

Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables possédant des niveaux de soudabilité différents :

**Tableau 2. 5:** Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables ; [13].

Type d'acier inoxydable	Facteurs influant sur la soudabilité
Austénitique	<ul style="list-style-type: none"><li>- Coefficient de dilatation supérieur (environ 1,5 fois celui de l'acier au carbone), donc sensible aux déformations</li><li>- Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux, donc une ZTA moins grande pour un même courant</li><li>- Résistance électrique jusqu'à 6 fois plus élevée que celle de l'acier doux</li><li>- Point de fusion inférieur à celui de l'acier doux, donc température nécessaire moindre</li></ul>
Martensitique	<ul style="list-style-type: none"><li>- Coefficient de dilatation inférieur (minimise les déformations lors du soudage)</li><li>- Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux (intensité de courant plus basse)</li><li>- Résistance électrique de 3 à 6 fois plus élevée que celle des aciers au carbone</li><li>- Forte tendance à durcir au contact de l'air</li></ul>
Ferritique	<ul style="list-style-type: none"><li>- Aucun durcissement, même lorsque refroidi rapidement</li><li>- Le grain grossit si la pièce est chauffée à plus de 870 °C, puis refroidie lentement, ce qui rend la pièce fragile.</li></ul>

# **Chapitre III**

## **Caractéristiques mécaniques des aciers**

### 1. Propriétés mécaniques des matériaux :

#### 1.1. Introduction :

Le comportement mécanique d'un matériau est fonction des forces extérieures appliquées et traduit les évolutions de la cohésion de ces atomes. Ainsi, les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation. Les propriétés mécaniques sont déterminées au moyen d'essais normalisés. Les principales propriétés mécaniques sont : Module d'élasticité, Limite d'élasticité, écrouissage, ductilité, Viscosité, vitesse de fluage, amortissement, Charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure..., etc.

#### 1.2. Fragilité :

##### 1.2.1. Définition :

La fragilité montre la particularité d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement. Les métaux fragiles ont une capacité de déformation plastique relativement faible avant la rupture. Cela signifie qu'une pièce fragile soumise à une charge excessive de contraintes peut connaître une défaillance soudaine et potentiellement catastrophique sans allongement initial ou déformation. Moins un métal est ductile, plus il sera fragile.

##### 1.2.2. Facteurs influençant :

La fragilité dépend non seulement des forces de liaison entre les atomes, mais aussi de la contribution d'éventuels phénomènes de dissipation d'énergie : plasticité, microfissuration, changement de phase, recristallisation dynamique, interviennent donc en particulier la température et la vitesse de déformation :

- de nombreux matériaux sont fragiles en dessous d'une température dite « température de transition fragile-ductile »,
- Certains matériaux sont peu ductiles aux faibles vitesses de déformation, et très ductiles aux fortes vitesses (recristallisation dynamique),
- Certains matériaux sont fragiles aux vitesses de déformation élevées, mais « pâteux » aux très faibles vitesses ; c'est le cas par exemple des roches.

La fragilité inter granulaire peut provenir de la présence d'atomes étrangers qui ségrègent aux joints de grain, comme le phosphore ou le soufre dans l'acier. De manière générale, un matériau cristallin est souvent d'autant moins fragile qu'il est pur. On peut renforcer les joints de grain en ajoutant des éléments d'alliage pour piéger les impuretés, ou pour renforcer les joints de grain en y ségrégant (bore). L'hydrogène est également un élément fragilisant ; le dégazage des métaux lors de la fusion est donc capital ; [3].

La fragilité peut aussi provenir de réaction avec l'environnement. En particulier, l'eau, dans le cas d'immersion ou bien l'humidité de l'air, peut réagir avec le métal et produire de l'hydrogène qui vient fragiliser le métal ; [14].

### 1.3. Ductilité :

#### 1.3.1. Définition :

À l'opposé de fragilité, la ductilité est la capacité d'un métal à se déformer sans se briser. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation ne se propagent pas facilement.

Les matériaux ductiles sont habituellement relativement tendres, et les matériaux durs sont souvent fragiles. Les diamants sont des exemples de matériaux très durs, et le talc est un exemple de matériau très tendre. Le cuivre, par ailleurs, est un métal relativement ductile, bien qu'il soit tendre. On peut le plier plusieurs fois sans qu'il se rompe mais, comme nous l'a appris l'expérience, s'il est plié trop souvent, il devient écroui puis fragile, et se rompt alors facilement. La ténacité est une propriété semblable qui combine la ductilité et la résistance. Le cuir est un excellent exemple de matériau ayant une bonne ténacité. De façon générale, les métaux ductiles ont également une bonne ténacité ; [3].

Il existe deux méthodes principales pour mesurer la ductilité :

- Les essais de traction mesurant l'allongement à la rupture et la striction.
- L'essai mouton de Charpy mesurant l'énergie dépensée pour casser une éprouvette.

#### 1.3.2. Condition de ductilité :

La ductilité dépend de la température, de la pression et de la vitesse de déformation :

- Quand la température augmente, le seuil de plasticité diminue.
- Quand la pression augmente, le seuil de rupture augmente.
- Quand la vitesse de déformation augmente, le seuil de rupture diminue.

### 1.4. Ténacité :

#### 1.4.1. Définition :

La ténacité est la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture, elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont faits avec des matériaux de haute ténacité.

Détermination expérimentale Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-entaillée. En exerçant sur cette éprouvette un système de forces appropriées, on soumet sa fissure à un mode d'ouverture et on évalue l'énergie élastique libérée par la progression de la fissure. La ténacité est proportionnelle à la racine carrée de cette énergie.

On distingue trois modes de sollicitation de la fissure (figure 3.1) :

- Le mode I : on effectue un essai de traction perpendiculairement au plan de la fissure, c'est le mode le plus dangereux ; [3].
- Le mode II : on cisaille dans le plan de la fissure.

- Le mode III : on cisaille perpendiculairement au plan de la fissure. La fissure étant une entaille, il se crée une concentration de contrainte. On définit donc les facteurs d'intensité de contrainte  $K_I$ ,  $K_{II}$  ou  $K_{III}$  selon le mode de sollicitation.

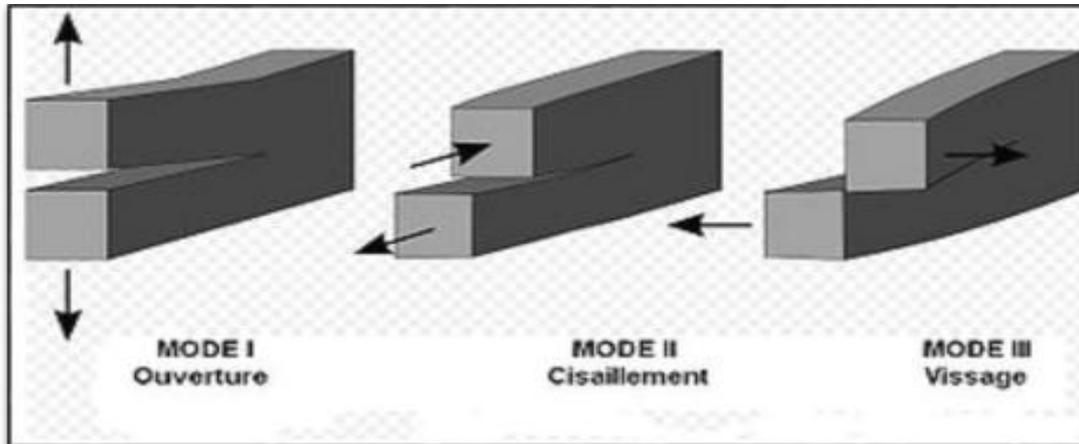


Figure 3. 1: Illustration des trois modes de sollicitation d'une fissure ; [15]

### 1.5. Malléabilité :

#### 1.5.1. Définition :

La malléabilité est une particularité qui permet au métal de se laisser façonner. Est la propriété d'un matériau à être déformé à chaud ou à froid, par choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise. La malléabilité est la raison pour laquelle on peut laminier (rouleau compresseur) un matériau, le forger (martèlement), ou découper plus ou moins facilement un matériau de faible épaisseur. D'une autre façon c'est la résistance du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Ainsi, plus la température est élevée, plus la malléabilité d'un matériau augmente ; [15].

La figure 3.2 qui suit présente certains matériaux en fonction de leur ductilité et de leur malléabilité.

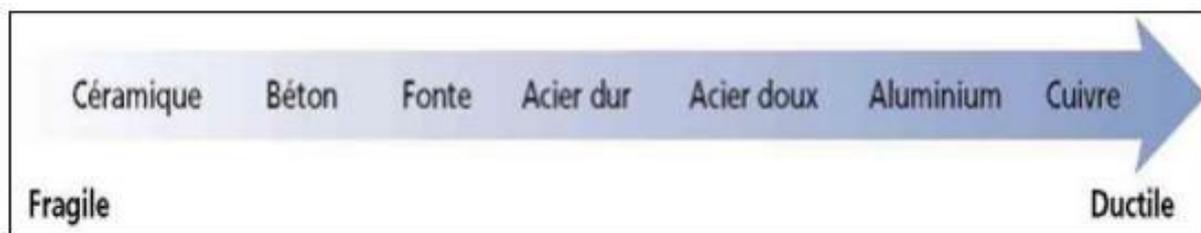


Figure 3. 2: Les métaux : du plus fragile au plus ductile ; [15]

### 1.6. L'élasticité :

#### 1.6.1. Définition :

L'élasticité est la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche. La déformation élastique est une déformation réversible. Un matériau solide se déforme lorsque des forces lui

sont appliquées. Un matériau élastique retrouve sa forme et sa taille initiales quand ces forces ne s'exercent plus, jusqu'à une certaine limite de la valeur de ces forces. Les tissus biologiques sont également plus ou moins élastiques.

Les raisons physiques du comportement élastique diffèrent d'un matériau à un autre. Pour les métaux, le treillis atomique change de taille et de forme quand des forces leur sont appliquées. Quand les forces sont supprimées, le système retourne à son état original où l'énergie est la plus faible. [3].

### 1.7. Dureté :

#### 1.7.1. Définition :

La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, tandis que l'aluminium est de faible dureté ; [15].

#### 1.7.2. Processus de mesure de la dureté :

Il faut distinguer entre les processus statiques et dynamiques pour mesurer la dureté. Tous se rapportent à un même principe ; un corps pénétrateur est constamment appuyé sur son matériau avec une force de test précise. La déformation locale provoquée sur la partie plastique et élastique sera mesurée. Les mesures statiques ne déterminent que la déformation plastique.

Selon l'ampleur de la force d'essai on distingue : macro dureté (force  $F > 30$  N), la dureté de faible charge (de 2 à 30 N) et la micro dureté ( $< 0,5$  N). La mesure de dureté avec Brinell, Vickers et Rockwell appartient aux processus de mesure de dureté statique. Dans les processus dynamiques (méthode de dureté Shore ou essai pendulaire de dureté) on provoque le choc d'un corps pénétrateur sur la partie à mesurer avec une énergie cinétique d'un intervalle défini. C'est ainsi qu'on vérifie les tuyaux, les arbres de turbines ou les pièces coulées ; [16].

## 2. Traitements thermiques des aciers :

### 2.1. Introduction :

Les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la structure du matériau par l'effet de la température tout en restant à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). Les traitements thermiques sont des opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux afin de les rendre plus favorables à un emploi donné, par les modifications suivantes : - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A$  % en donnant une meilleure tenue de l'élément. - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi un forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

### 2.2. Cycle d'un traitement thermique :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Ce procédé se compose de (Figure 3.3) ;

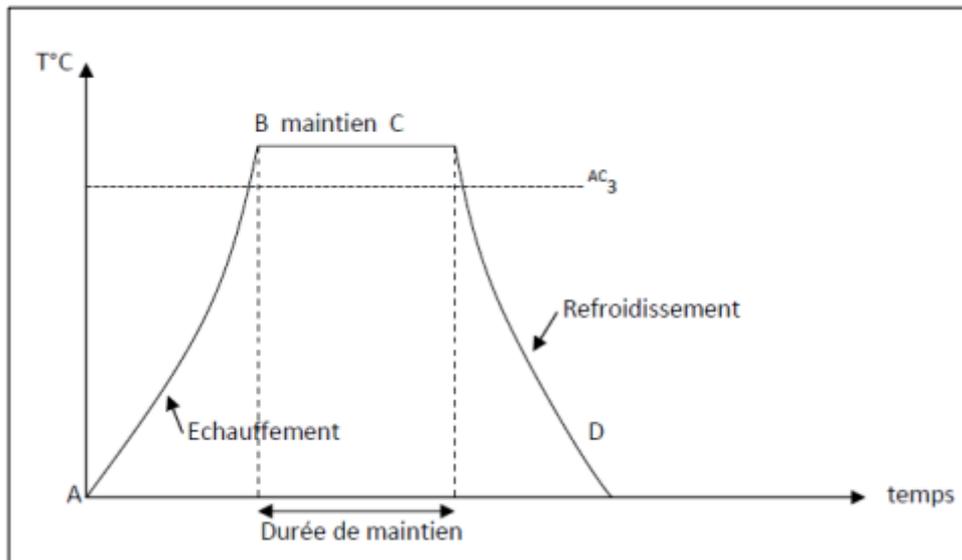


Figure 3. 3: Cycle d'un traitement thermique ; [17].

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (AC<sub>3</sub>).

BC : Maintient à une température définie.

CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- Lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau) ; [17].

### 2.3. Chauffage des pièces :

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. La figure 3.4 représente la courbe de chauffage pour le contour, et le cœur de la pièce ; la courbe est simplifiée comme une droite. Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

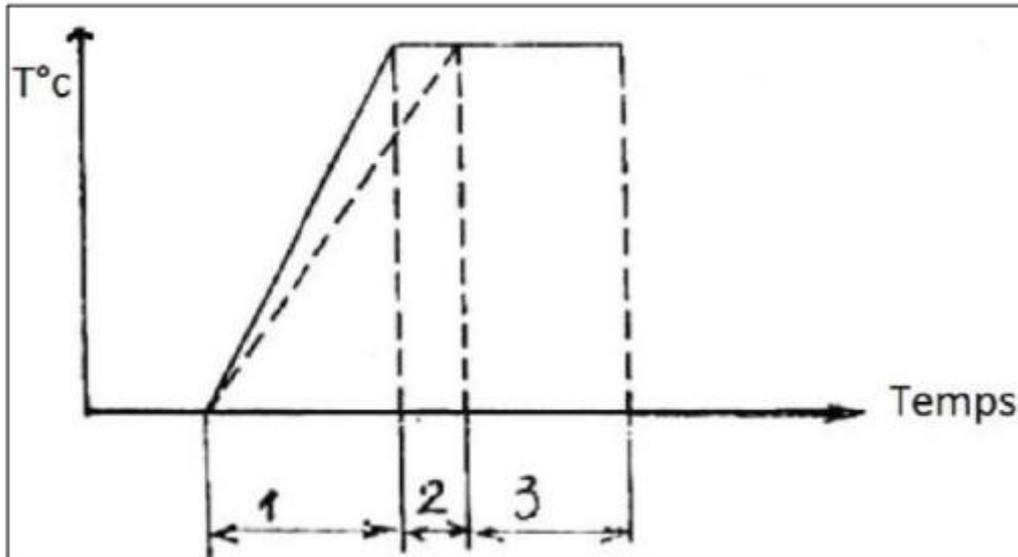


Figure 3. 4: courbe simplifiée de chauffage des pièces ; [17]

1. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit atteinte à la surface de la pièce.

2. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.

3. Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent ; [17].

### 2.4. Refroidissement des pièces :

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT. Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac ; [17].

### 2.5. Diagramme d'équilibre fer-carbone :

Le diagramme d'équilibre (figure 3.5) est obtenu à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone. Dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaît comme une discontinuité. Lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures de traitement ; il est important de connaître les températures de transformations.

## Chapitre 3 : Caractéristique mécaniques des aciers

La ligne HJK, correspond à la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite, se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite. Puisque la solubilité maximum du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Donc lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite). Si on désire modifier la microstructure (et ainsi les propriétés mécaniques) de l'alliage, on doit modifier les transformations qui surviennent normalement dans l'alliage ; [3].

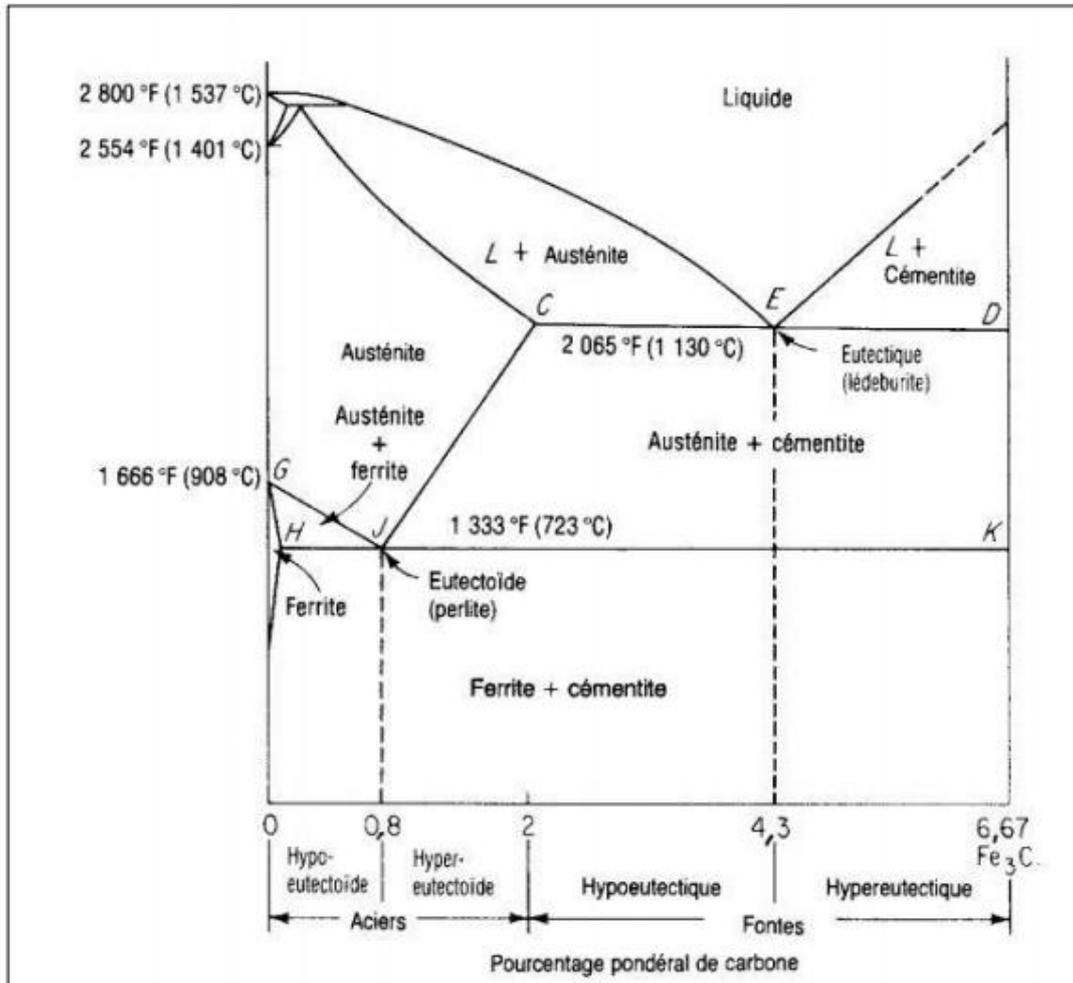


Figure 3. 5:diagramme de phase fer-carbone ; [3]

### 2.6. Traitements thermiques des soudures :

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés et les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires. Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est

obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être l'amélioration ou l'obtention des propriétés jugées importantes vis à vis des conditions de service, ou d'élimination ou simplement la réduction des contraintes résiduelles.

En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement destiné à jouer, un rôle métallurgique, agissant aussi sur l'état de contraintes. Le second à finalité mécanique, a cependant des conséquences métallurgiques. C'est donc en gardant à l'esprit cette interaction que l'on étudiera successivement, ci-dessous, dans le cas des aciers, les types de traitement suivants, sans entrer dans le détail de la nature des sources d'énergie mise en œuvre :

- Traitement de relaxation (ou de détente) et de revenu,
- Traitement de normalisation,
- Traitement de trempe et revenu ; [3].

### 2.7. Gammes des traitements thermiques :

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit.
- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.
- La normalisation.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement ; [16].

#### 2.7.1. Trempe :

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite. La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au-dessus de la ligne AC3, pour les aciers hypoeutectoïde et supérieure à AC1, pour les aciers hypereutectoïdes. A cette température l'acier est maintenu jusqu'à la transformation des phases, ensuite l'acier subit un refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

Le but du refroidissement rapide et d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se termine dans le domaine de la martensite. Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier HRC = 60 à 65, ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu. La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées ; [16,17].

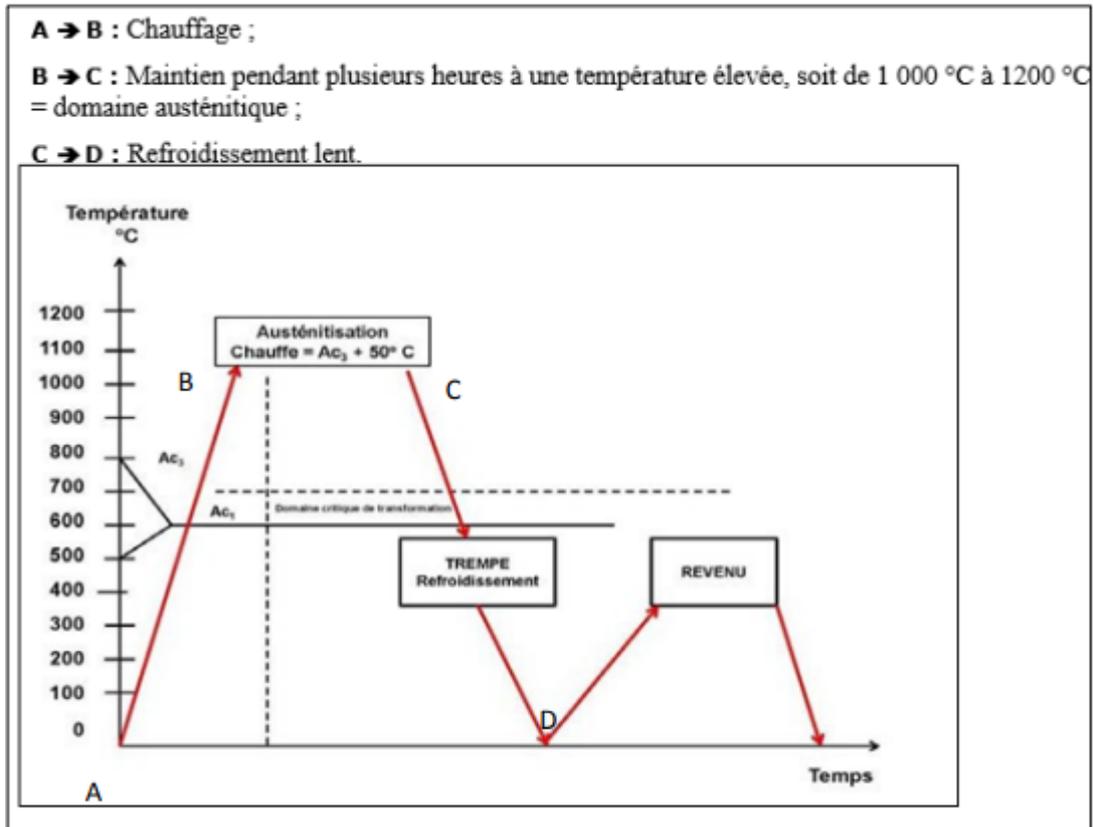
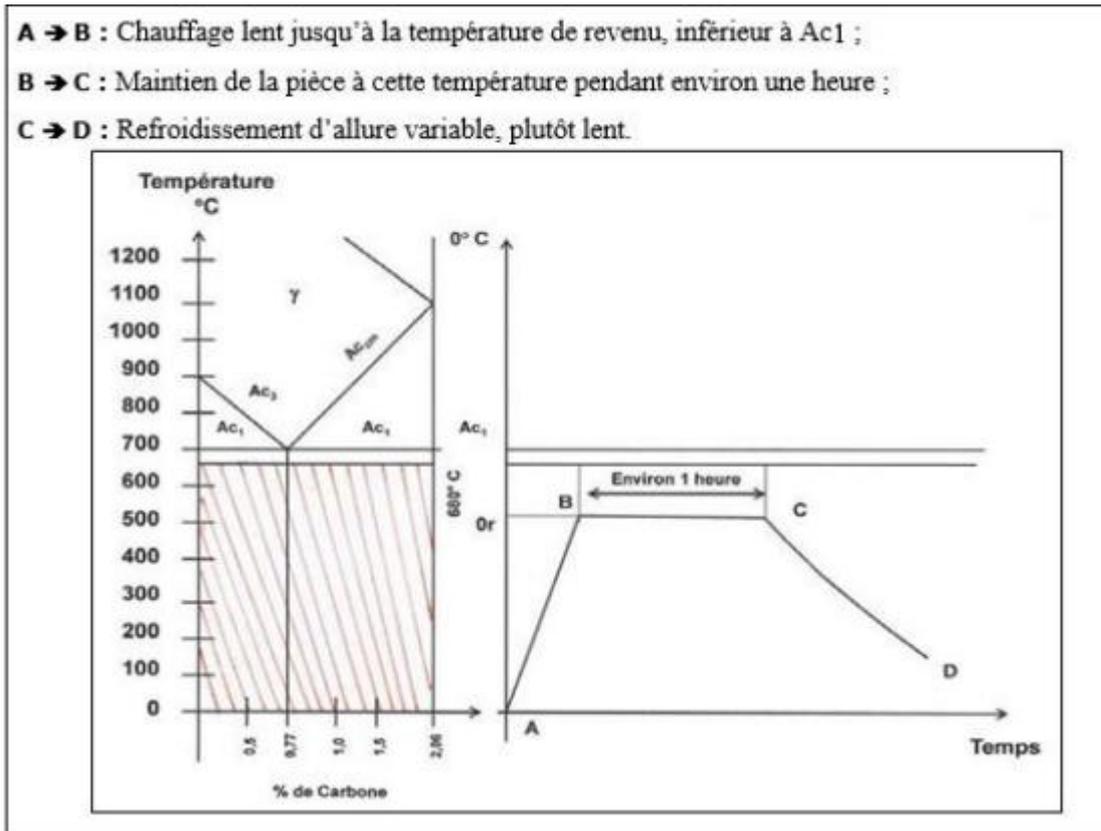


Figure 3. 6: Le cycle thermique lors d'une trempe ; [16].

### 2.7.2. Revenu :

La trempe confère aux aciers une structure dure mais particulièrement fragile, une telle structure ne peut être mise en service. Ainsi on procède toujours à un traitement après trempe pour remédier aux effets néfastes de celle-ci tout en maintenant à un niveau assez élevé les autres propriétés (dureté, ...). Le revenu est le traitement qu'il faut faire subir au matériau afin d'arriver à un compromis (conditions optimales) entre les propriétés de résistance et celles de ductilité. Il consiste à réchauffer le métal à une température inférieure à la température de début de transformation ( $AC_1$  pour les aciers au carbone). Ce réchauffage va éliminer ou atténuer les tensions internes dues à la trempe et causes de fragilité. Les caractéristiques de résistance ( $R_e$ ,  $R_m$ ) vont diminuer au cours de revenu alors que la résilience augmente ; la température idéale de revenu serait celle qui correspond au point d'intersection de ces deux caractéristiques.



*Figure 3. 7 : cycle thermique du revenu ; [3].*

### 2.7.2.1. Objectif du revenu :

- Soit supprimer les contraintes de trempe (relâchement) ; on dit que le matériau a subi un adoucissement.
- Soit suivant la composition ; former d'autres phases qui ont tendance à améliorer la résistance du matériau, on dit qu'il a subi un durcissement. 52 Chapitre 3 Traitements thermiques des aciers

### 2.7.2.2. Différents types de revenu :

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

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement.

### 3. Essais mécaniques :

#### 3.1. Définition :

Les essais destructifs sont utilisés pour déterminer les caractéristiques physiques d'une soudure. Pour chaque type de soudure et de matériau, un Descriptif de Mode Opérateur de soudage (DMOS) est établi. Pour démontrer que le DMOS permettra d'obtenir une soudure de bonne qualité, on utilise un Procès-verbal de Mode Opérateur de soudage (PV-QMOS) pour documenter la soudure ainsi que les essais qu'elle a subis. Il existe plusieurs codes et spécifications pour identifier le type et le nombre d'essais exigés pour la vérification des propriétés d'une soudure.

Les essais destructifs rendent la soudure impropre à une utilisation ultérieure. Les principaux essais sont :

- Essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...).
- Essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...).
- Essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...).
- Essais sur les fluides (viscosité, écoulements...) ; [18,19].

#### 3.2. Essais de traction :

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

##### 3.2.1. Courbes de contraintes et déformation :

Pour un grand nombre de matériaux, comme les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation (ou l'allongement) est proportionnelle à la contrainte et le matériau se déforme élastiquement.

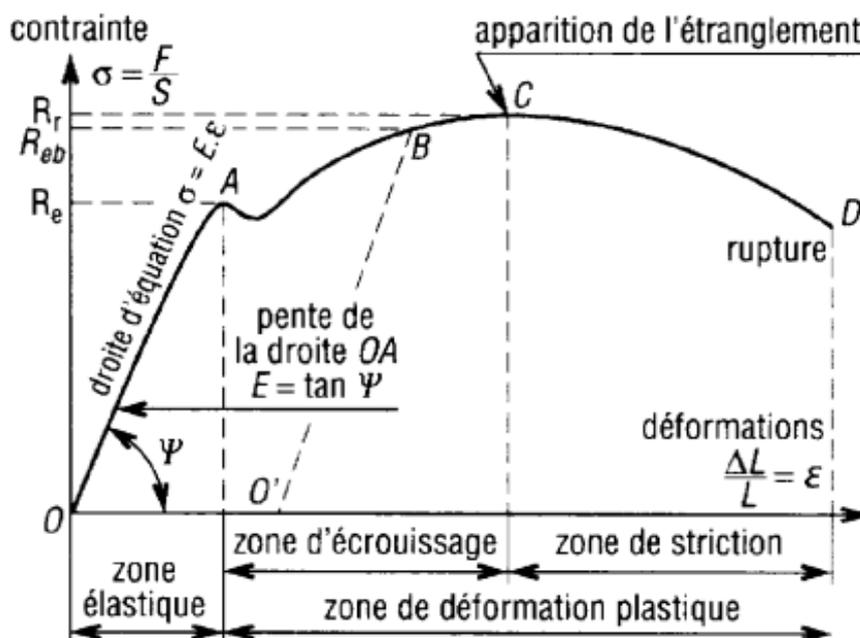


Figure 3. 8 : Courbes de contraintes et déformation ; [18].

### 3.2.2. Module d'élasticité longitudinale E Mpa :

Il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente donc l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : acier  $\Rightarrow E = 200\,000$  Mpa et élastomère  $\Rightarrow E = 1$  Mpa.

### 3.2.3. Loi de Hooke $\sigma = E \times \varepsilon$ :

Cette loi, ou équation de la droite OA, traduit la proportionnalité précédente  $\sigma$  en Mpa, E en Mpa et  $\varepsilon$  sans unité) ; [18].

### 3.2.4. Limite élastique Re Mpa :

Elle marque la fin du domaine élastique (au point A). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après « déchargement », il subsiste un allongement permanent soit un phénomène de rémanence) ; [18].

### 3.2.5. Limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 Mpa :

On utilise cette détermination pour les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement. Pour la mesure de Re on tolère une légère déformation permanente de 0,2% ( $A\% = 0,2$ ).

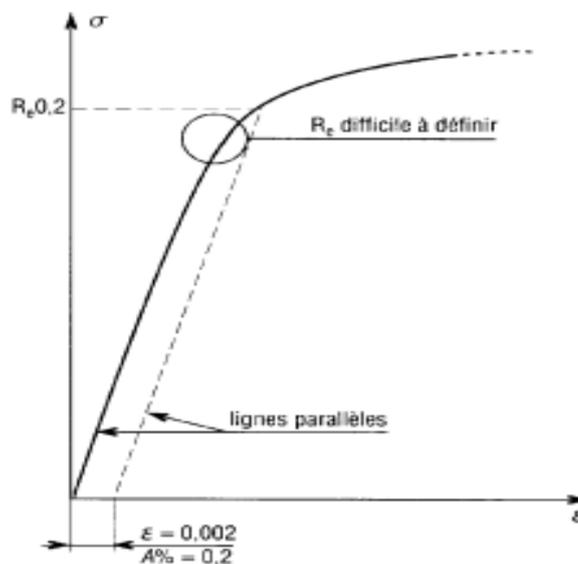


Figure 3. 9 : courbe de la limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 Mpa ; [18].

### 3.2.6. Limite maximale Rm MPa :

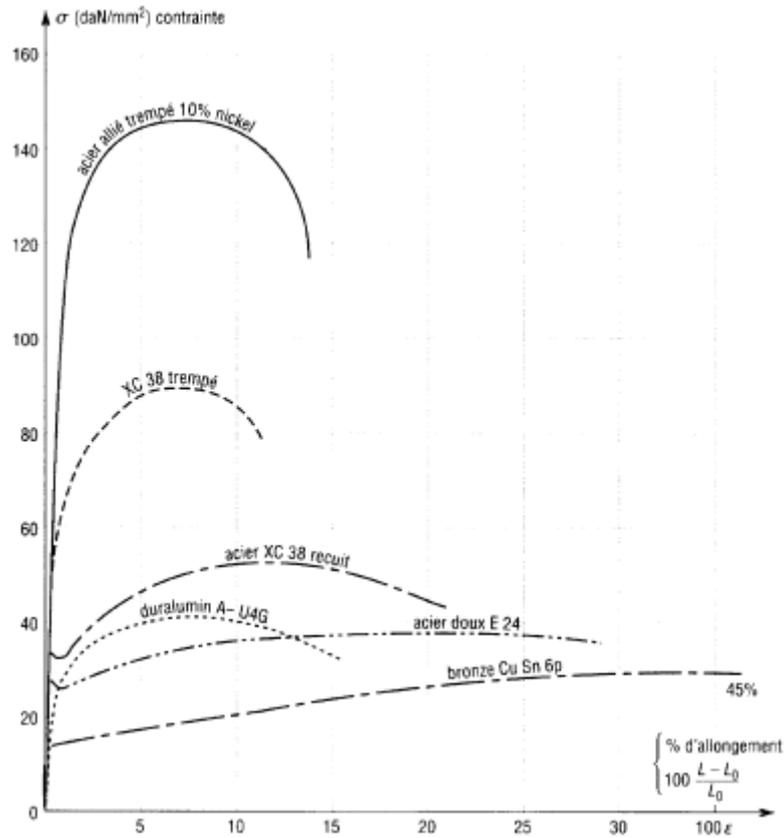
C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture.

### 3.2.7. Phénomène d'écrouissage :

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique Re sans modifier la résistance à la rupture Rr. Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement avant point de striction, chemin OB. Au relâchement le "déchargement" se fait suivant la droite BO'

parallèle à OA. Après remise en charge, la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec  $\text{Re}_b$  comme nouvelle limite élastique; [18].

### 3.2.8. Courbes de traction de divers matériaux :



### 3.3. Essai de pliage :

L'essai de pliage représente une méthode très courante d'essai destructif des soudures qui n'exige pas de matériel sophistiqué. La méthode d'essai et révèle les défauts de soudure de façon précise.

- Les essais de pliage les plus courants sont les suivantes :
- Essai de pliage endroit et envers avec guidage
- Essai de pliage latéral.
- Essai de pliage libre
- Essai de pliage sur soudure d'angle

Ces essais permettent :

- De déterminer l'état physique des soudures et ainsi de valider la qualification du mode opératoire.
- De qualifier la soudure.

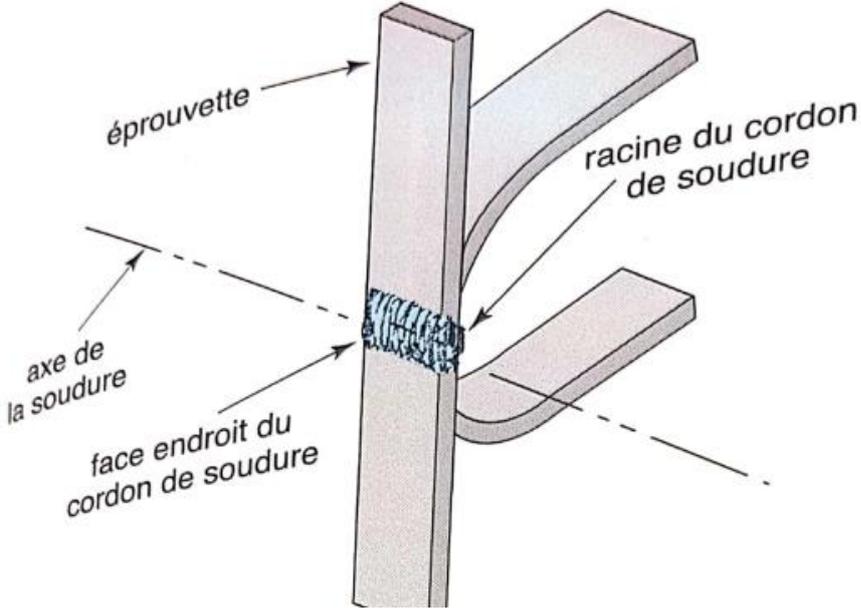


Figure 3. 11:essai de pliage transversal endroit ; [19].

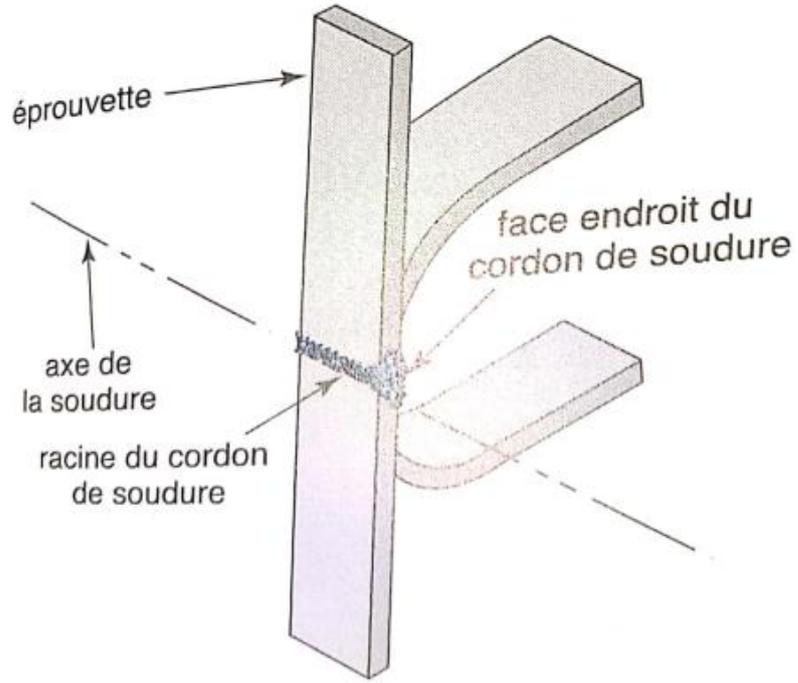
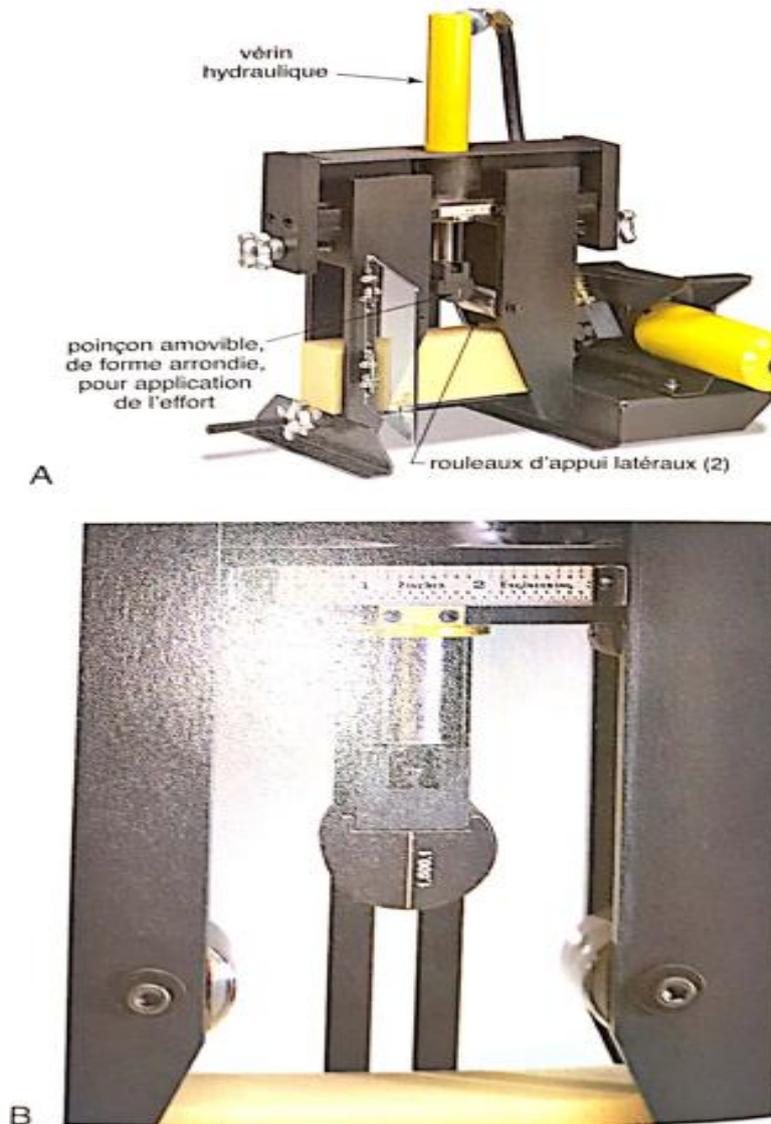


Figure 3. 12:essai de pliage transversal envers ; [19].



*Figure 3. 13 : dispositif pour l'essai de pliage ; [19].*

**A** : dispositif pour essai de pliage de faible encombrement.

**B** : deux rouleaux latéraux permettent à l'éprouvette de se déplacer vers le bas de façon régulière sous la pression exercée par le poinçon central; [19].

### 3.4. Essai de résilience :

La résilience, de symbole général  $K$ , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée). L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester. L'énergie absorbée par l'éprouvette ( $W$ ) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W_0 = P.h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1 = P.h_1$ ) :  $W = P.h_0 - P.h_1 = P(h_0 - h_1)$  La résilience est égale au rapport de  $W$  sur l'aire de la section au droit de l'entaille ; [18].

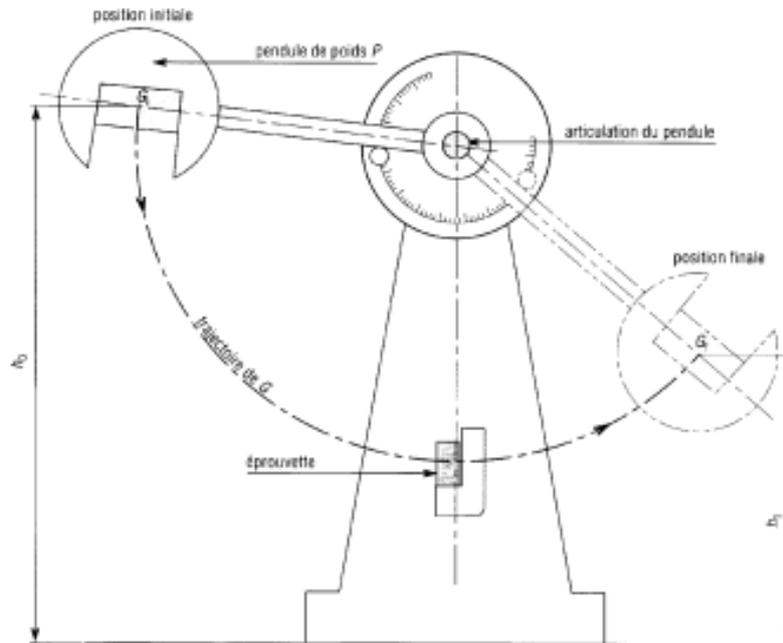


Figure 3. 14 : dispositif pour la résilience ; [18].

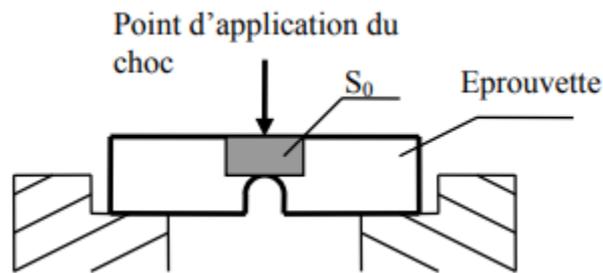


Figure 3. 15 : point d'application de choc pour la résilience ; [18].

Deux cas :  $k_{cu}$  ou  $K_{cv} = \frac{W_0 - W_1}{S_0}$  (1)

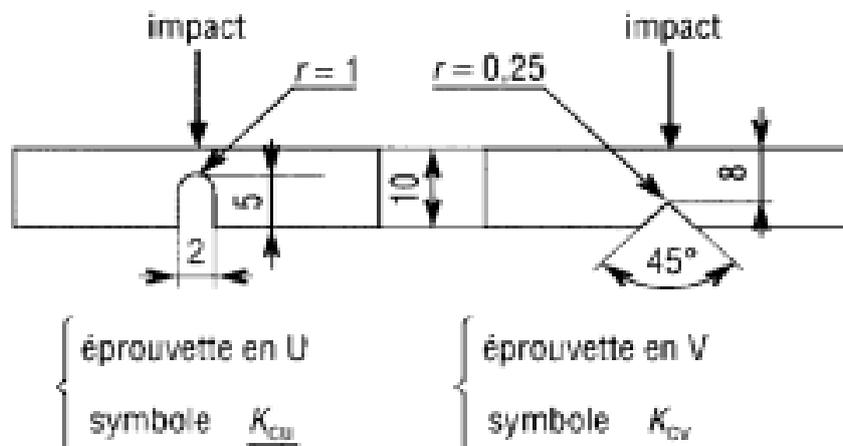


Figure 3. 16 : éprouvette en U et en V pour la résilience ; [18].

### 3.5. Essai de dureté :

La dureté, de symbole général H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures. . .), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques) ; [18].

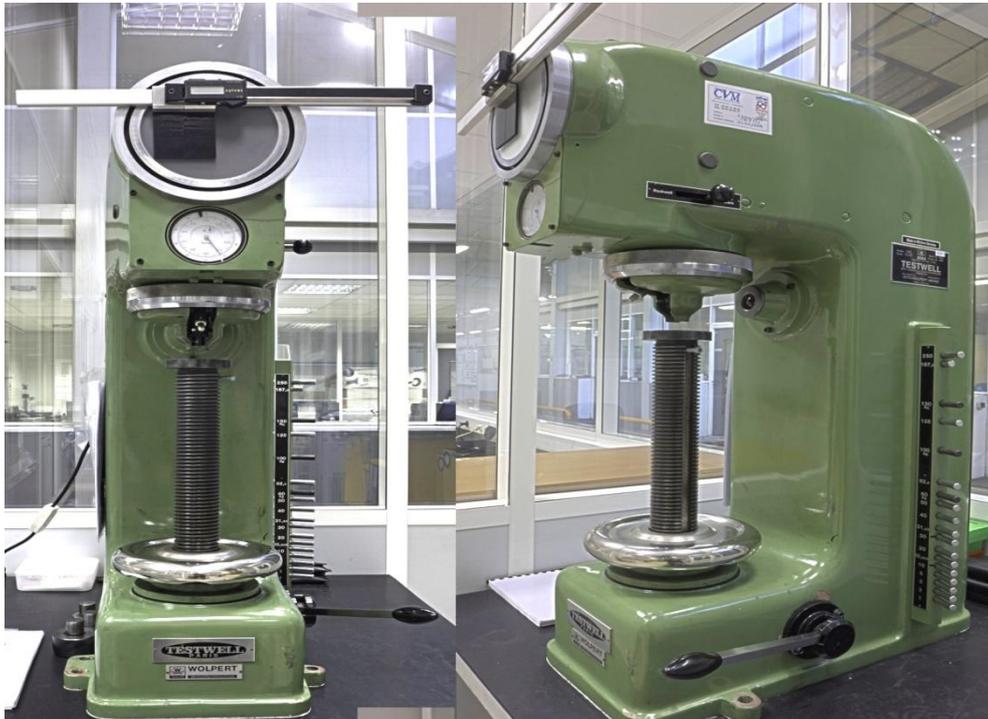


Figure 3. 17 : machine d'essai de dureté ; [20].

#### 3.5.1. Dureté Brinell (symbole HB) :

Elle est obtenue par calcul. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille polie (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte (essai usuel : F = 3 000 daN, d = 10 mm, pendant 15 à 60 secondes). Utilisation : tous métaux:

$$HB = \frac{F}{10\pi \left( 5 - \sqrt{25 - \frac{d^2}{4}} \right)} \quad (2)$$

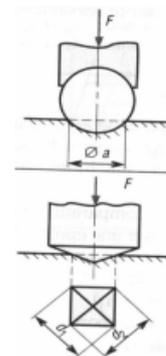


Figure 3. 18 : dureté Brinell ; [18].

### 3.5.2. Dureté Vickers (symbole HV) :

Elle est obtenue par calcul ; le principe est identique au précédent mais avec une pyramide droite en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de  $136^\circ$ . Utilisation : tous métaux,

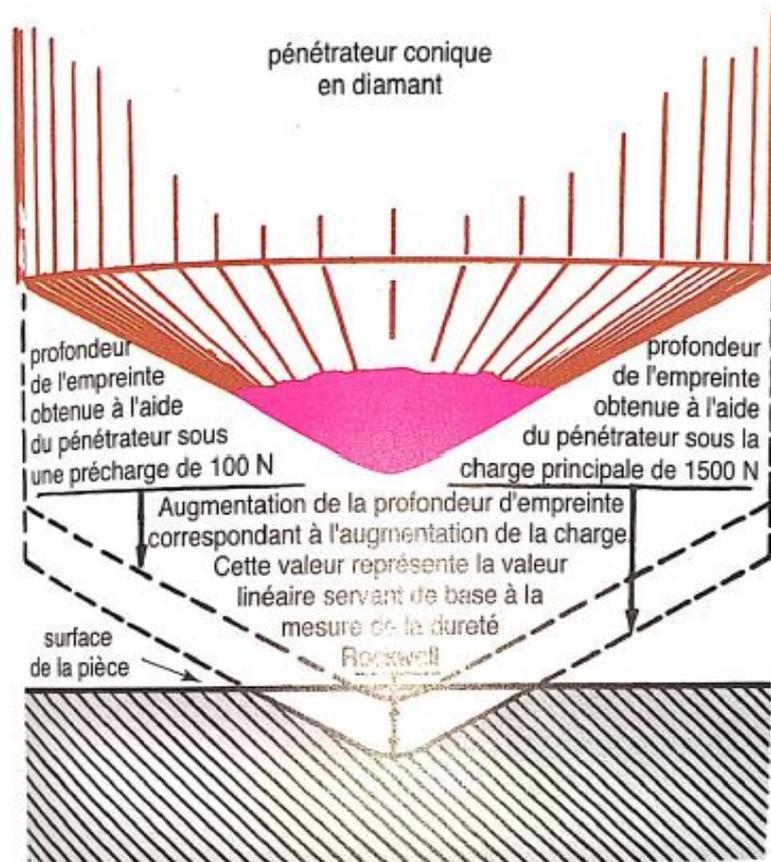
$$HV = \frac{0.189 \times F}{d^2} \quad (3)$$

Tel que :  $d=d_1+d_2$

Variante : essai KNOOP (micro dureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et pièces à sections fines) ; [19].

### 3.5.3. Dureté Rockwell (symbole HR) :

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur bille acier ou cône diamant. Une pré-charge ( $F_0$ ) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface ; [18].



**Figure 3. 19 :** schéma du pénétrateur de diamant dans la machine de dureté Rockwell ; [19].

**Note :** dans la figure 4.12 on remarque l'écart de profondeur des empreintes laissées par le pénétrateur en diamant sous une charge de 100 N et de 1500 N.

Tableau 3. 1 : Tableau comparatif des valeurs de dureté Rockwell, Brinell et Shore ; [19].

Rockwell C	Rockwell B	Brinell	Dureté Shore
69	–	755	98
60	–	631	84
50	–	497	68
40	–	380	53
30	–	288	41
24	100	245	34
20	97	224	31
10	89	179	25
0	79	143	21

### 3.6. Essai de flexion :

#### 3.6.1. Définition :

L'essai de flexion est l'un des types de sollicitation les plus fréquents. Ce comportement est donc particulièrement important pour l'essai sur de nombreux matériaux. C'est pourquoi l'essai de flexion est utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux sur l'acier, les plastiques, le bois, le papier, la céramique etc. ...

Basée sur des essais de flexion, une caractérisation simple des principales propriétés mécaniques pourra être mise en œuvre. Cet essai, qui permet de contourner le problème de comportement à la rupture de l'éprouvette en essai de traction, est principalement utilisé pour tester les matériaux fragiles ; [22].

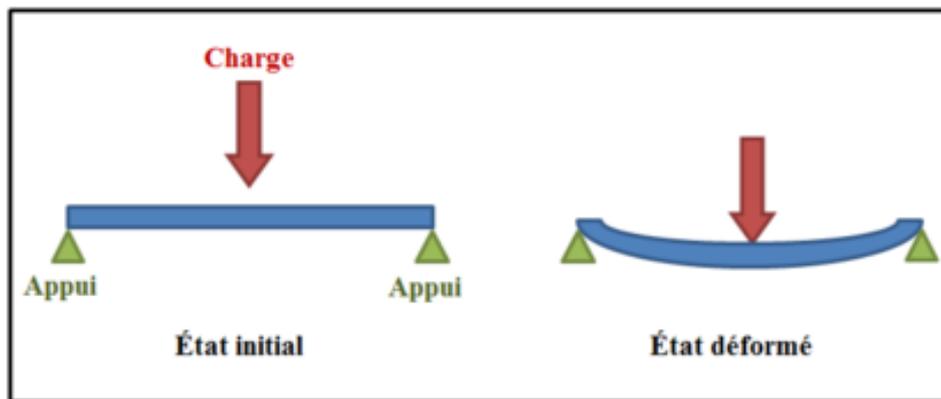


Figure 3. 20: principe de teste de flexion; [23].

#### 3.6.2. Différents types d'essai de flexion :

Les deux essais de flexion les plus utilisés sont l'essai de flexion trois points simple, caractérisé par un moment fléchissant variable le long de l'éprouvette et un cisaillement constant, et l'essai de flexion quatre points ou flexion pure avec un moment constant dans les sections entre appuis et un cisaillement nul ; [23].

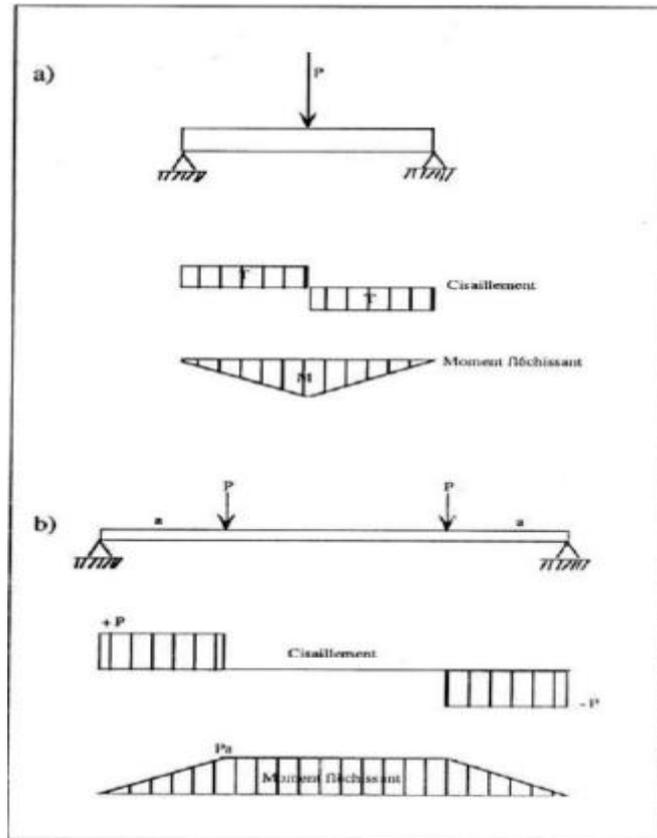


Figure 3. 21 : flexion simple (a) et flexion pure (b) ; [23].

**3.6.2.1. Essai de flexion simple (3 points) :**

L'amarrage de flexion permet d'effectuer divers essais de flexion et de résistance à la rupture, notamment la détermination du module de flexion, de la résistance à la flexion et de la limite d'élasticité à la flexion. Facile à installer, la fixation à 3 points peut être modifiée à l'aide d'un kit de conversion optionnel pour permettre une conversion en flexion à 4 points. Les enclumes inférieures sont réglables pour accueillir des échantillons de différentes largeurs. La déflexion de l'échantillon peut être mesurée soit par le déplacement de la traverse, soit, pour une mesure plus précise, par l'utilisation d'un piston de mesure directe à mi-portée avec un extensomètre à pince ; [21].

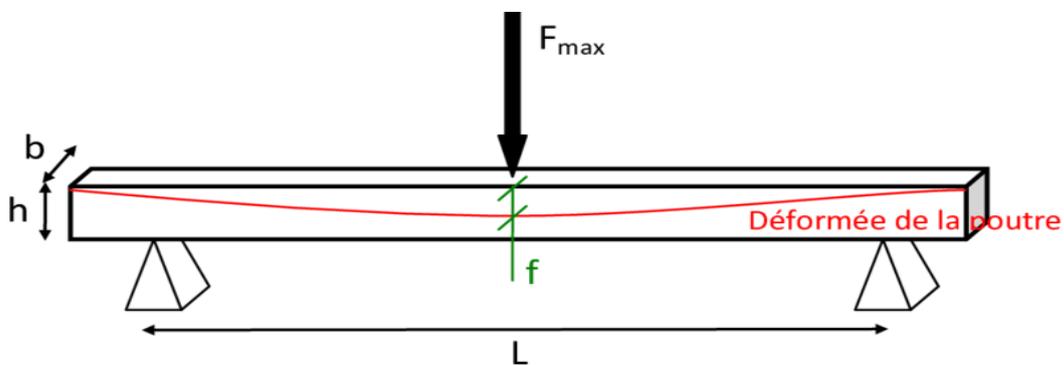
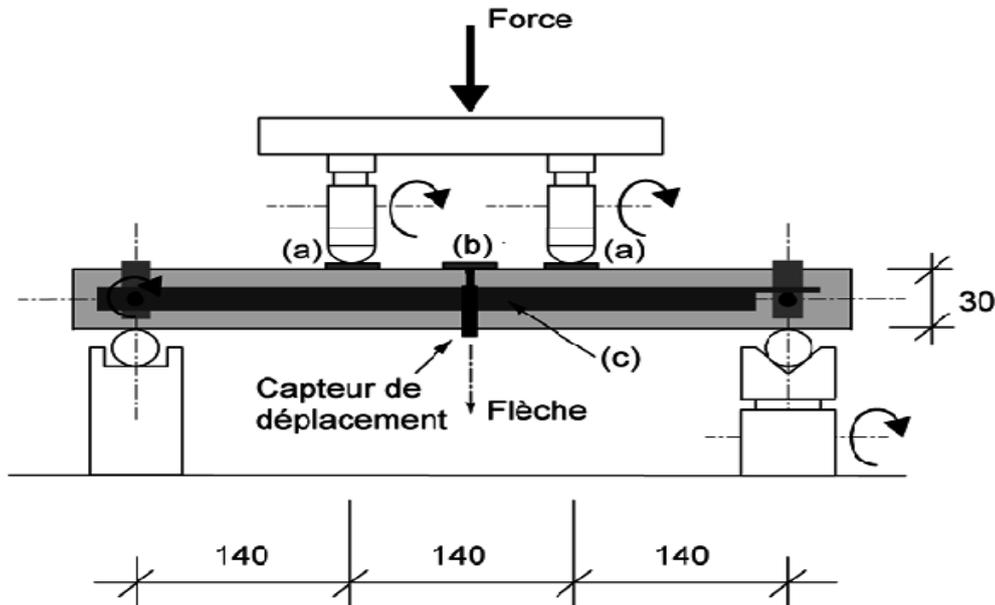


Figure 3. 22 : schéma du dispositif d'essai de flexion simple; [19].

### 3.6.2.2. Essai de flexion pure (4 points) :

Similaire à l'essai de flexion 3 points avec l'avantage de ne pas positionner l'appui au niveau de la zone de rupture. Ceci est en effet une limitation du système à trois points où l'appui central peut endommager l'éprouvette et fausser ainsi les résultats en entraînant une rupture précoce de celle-ci. L'essai de Charpy (essai de résilience) est également un essai de flexion où l'éprouvette est brisée par un choc. Il est décrit plus loin.



*Figure 3. 23 : schéma du dispositif d'essai de flexion pure; [23].*

### 3.7. Essai de fatigue :

Lorsque l'on soumet un matériau métallique à des cycles répète d'efforts, il subit des modifications de microstructure regroupées sous le terme général d'endommagement par fatigue, ou plus simplement de fatigue.

Cet endommagement ne se signale par aucune modification macroscopiquement décelable, et la rupture peut intervenir à niveaux de contraintes peu élevés, souvent inférieurs à la limite d'élasticité, mais dont la répétition constitue le danger.

La capacité de résistance à la fatigue d'un matériau s'appelle l'endurance ; [5].

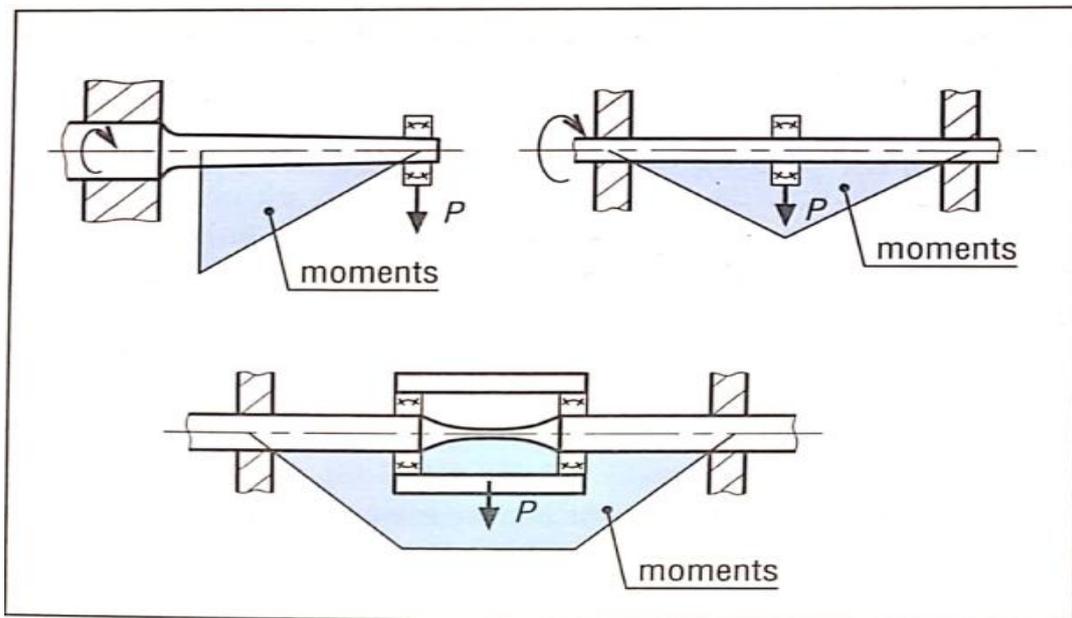


Figure 3. 24 : différents types d'éprouvettes de fatigue en flexion relative ; [5].

### 3.7.1. Diagramme de Wöhler :

Les essais les plus simples consistent à imposer à des séries d'éprouvettes des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux, soit par charge axiale, soit par flexion rotative. Chaque cycle est caractérisé par  $\Sigma_{max}$ , valeur maximale de la contrainte, et par le rapport de contrainte  $R\Sigma = (\Sigma_{max}/\Sigma_{min})$  ; [5].

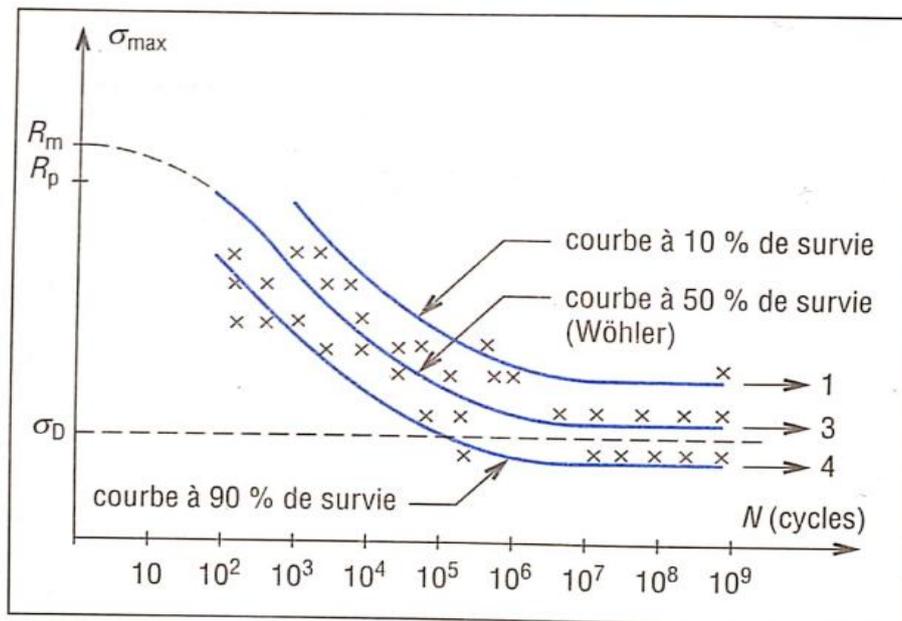


Figure 3. 25 : Diagramme de Wöhler ; [5].

# **Chapitre IV**

## Configuration pour le soudage de pipelines

### 1. Généralités sur les pipelines :

#### 1.1. Définition :

Un pipeline ou une canalisation enterrée ou aérienne transport des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances ; [24,25].



*Figure 4. 1 : Canalisation enterrée*



*Figure 4. 2 : Canalisation aérienne*

#### 1.2. Composantes de pipelines :

Un pipeline est un système de transport complexe. Il inclut des composantes tel que pipe, essayages (valves, couplages, etc.), crique et structures de sortie, pompes (pour le liquide) ou compresseurs (pour le gaz) et équipement auxiliaire (débitmètres, cochons, transducteurs, systèmes de protection de cathodique et systèmes de contrôle automatiques en incluant des ordinateurs et contrôleurs logiques programmables) ; [26].

#### 1.3. Caractéristiques des tubes :

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré.

Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation. Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies partout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques.

Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser. Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi

permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères. Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation.

Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menés à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses) ; [27].

### 1.4.Grades :

Les grades couverts par la présente spécification sont les grades standard A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 et X80; et les notes intermédiaires (notes Sont supérieurs à X42, intermédiaires à deux standards séquentiels agréés par l'acheteur et le fabricant). Le tube PSL1 peut être fourni dans les classes A25 à X70. Le tube PSL 2 peut être fourni dans les catégories B à X80. L'acier de classe II (CI II) est rephosphorisé et a probablement Meilleures propriétés d'enfilage que la classe I (CI 1). Parce que la classe II (CI II) a une teneur en phosphore supérieure à celle de la classe I (CI I), il peut être un peu plus difficile à plier; [28].

**Tableau 4. 1:** Résumé sur la différence entre PSL1 et PSL2 ; [28].

Parameter	PSL 1	PSL 2
Grade range	A25 through X70	B through X80
Type of Pipe Ends	Plain-end, threaded-end; belled-end; special coupling pipe	Plain-end
Seam welding	All methods; continuous welding limited to Grade A25	All methods except continuous and laser welding
Electric welds: welder frequency	No minimum	100 kHz minimum
Heat treatment of electric welds	Required for grades > X42	Required for all grades (B through X80)
Chemistry: max C for seamless pipe	0.28% for grades $\geq$ B	0.24%
Chemistry: max C for welded pipe	0.26% for grades $\geq$ B	0.22%
Chemistry: max P	0.030% for grades $\geq$ A	0.025%
Chemistry: max S	0.030%	0.015%
Yield Strength, Maximum	None	Maximum for each grade
UTS, Maximum	None	Maximum for each grade

### 1.5. Exigences matérielles :

#### 1.5.1. Propriétés Chimique :

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, des nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques sont améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100. Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à 0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1% Nb, 0,015 % Al. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinée à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé ; [27].

**Tableau 4. 2 : composition chimique des pipelines ; [29].**

API Grade	Steel Alloying Approach
X120	AF/Bainite/Martensite, C <0.10, Mn<2.0, Si<0.40, Nb<0.06, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.25
X100	AF/Bainite, C<0.06, Mn<2.0, Si<0.40, Nb<0.06, Cu, Ni, Cr, Mo, V, Pcm≤0.23
X80	F/AF, C≤0.06, Mn<1.70, Si<0.40, Nb≤0.10, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.18
	F/AF, C≤0.06, Mn<1.70, Si<0.40, Nb≤0.10, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.21
X70	D/t<50: F/AF, C≤0.06, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.10 only, or Nb+Mo, Pcm≤0.18 or 0.21
	D/t>50: F/P, C≤0.10, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V, Pcm≤0.20
X65	F/P, C≤0.10, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V≤0.15 Pcm≤0.23
X60	F/P, C≤0.10, Mn≤1.50, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V≤0.12, Pcm≤0.23
X52	F/P, C≤0.10, Mn≤1.20, Si<0.40, Nb≤0.050 only, Pcm≤0.17
X42	F/P, C≤0.10, Mn≤1.00, Si<0.40, Nb≤0.050 only, Pcm≤0.16
API 5LB	F/P, C≤0.20, Mn≤1.00, Si<0.40, Pcm≤0.16

#### 1.5.2. Propriétés mécaniques (de traction) :

PSL I Grades A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, et X70 doivent être conformes aux exigences de traction spécifiées dans.

PSL 2 Grades B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, Et X80 doivent être conformes aux exigences de traction spécifiées dans.

Autres qualités intermédiaires aux notes énumérées entre X42 et X80 doivent être conformes aux exigences de traction convenues entre l'acheteur et le fabricant, et les exigences doivent être conformes à celles qui sont indiquées dans le (pour PSL 1) ou (pour la canalisation PSL2).

## Chapitre 4 : Configuration pour le soudage de pipelines

Pour les tubes expansés à froid, le rapport de la limite d'élasticité du corps et la résistance à la traction finale du corps de chaque tuyau d'essai sur lequel la limite d'élasticité corporelle et la résistance à la traction déterminée, ne doit pas dépasser 0,93. La limite d'élasticité doit être la contrainte de traction nécessaire pour produire un allongement total de 0,5% de la longueur de mesure déterminée par un extensomètre. Lorsque l'allongement est enregistré ou signalé, l'enregistrement ou le rapport doit indiquer la largeur nominale de l'éprouvette lorsque la bande les spécimens sont utilisés et le diamètre et la longueur du calibre Des éprouvettes à barres rondes sont utilisées, ou doivent être Les spécimens sont utilisés. Pour les tuyaux de catégorie A25, le fabricant Peut certifier que les matériaux fournis ont été testés et satisfait aux exigences mécaniques du grade A25; [30].

**Tableau 4. 3 : traction pour PSL1 ; [30].**

(1) Grade	(2) Yield Strength, Minimum		(3) Ultimate Tensile Strength, Minimum		(4) Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

**Tableau 4. 4 : Traction pour PSL2 ; [30].**

(1) Grade	(2) Yield Strength, Minimum		(3) Yield Strength, Maximum <sup>b</sup>		(4) Ultimate Tensile Strength, Minimum		(5) Ultimate Tensile Strength, Maximum <sup>c</sup>		(6) Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	
B	35,000	(241)	65,000 <sup>d</sup>	(448)	60,000	(414)	110,000	(758)	a
X42	42,000	(290)	72,000	(496)	60,000	(414)	110,000	(758)	a
X46	46,000	(317)	76,000	(524)	63,000	(434)	110,000	(758)	a
X52	52,000	(359)	77,000	(531)	66,000	(455)	110,000	(758)	a
X56	56,000	(386)	79,000	(544)	71,000	(490)	110,000	(758)	a
X60	60,000	(414)	82,000	(565)	75,000	(517)	110,000	(758)	a
X65	65,000	(448)	87,000	(600)	77,000	(531)	110,000	(758)	a
X70	70,000	(483)	90,000	(621)	82,000	(565)	110,000	(758)	a
X80	80,000	(552)	100,000 <sup>e</sup>	(690)	90,000	(621)	120,000	(827)	a

### 1.6. Avantages de pipelines :

Pour le transport de grandes quantités de liquide (le liquide ou le gaz), un pipeline est incontestablement le mode le plus privilégié de transport. Même pour les solides, il y a beaucoup de cas où cette faveur le pipeline sur d'autres modes de transport. Les avantages des pipelines sont :

- Économique dans beaucoup de circonstances. Les facteurs qui préfèrent des pipelines incluent grand débit, terrain accidenté et environnement hostile (tel que transport par les marais). Sous les conditions ordinaires, les pipelines peuvent liquides de transport (Liquides ou gaz) à une fraction du prix de transport par le camion ou le train. Le transport ferme par le pipeline est beaucoup plus complexe et coûteux que le transport liquide.

Enfin, dans beaucoup de cas, pipelines sont utilisés pour transporter des solides parce que le prix est inférieur que pour d'autres modes du transport, tel que les camions.

- Consommation d'énergie basse. Le fait d'être intensif d'énergie de grands pipelines est beaucoup inférieur que ce de camions et est encore inférieur que ce de rail. Le fait d'être intensif d'énergie est défini comme l'énergie consommée dans le transport poids d'unité de chargement sur la distance d'unité, dans les unités telles que Btu par ton mile.

La table 1.2 compare le fait d'être intensif d'énergie de pipelines à ceux pour d'autres modes de transport.

- Sympathique à l'environnement. C'est dû principalement au fait que la plupart des pipelines sont le métro. Ils ne posent pas la plupart des problèmes environnementaux associés aux camions et aux trains, tels que la pollution de l'air, le bruit, les embouteillages sur les autoroutes et aux traversées de rail et aux animaux tués qui se sont égarés sur autoroutes et chemins de fer. Les oléoducs peuvent polluer la terre et les fleuves quand a la fuite ou la rupture se développent. Cependant, beaucoup plus de déversements accidentels se produiraient si les camions et les trains ont transporté du même pétrole; [32].

## 2. Méthode de soudage de pipeline :

### 2.1. Réglage des Paramètres du soudage :

#### 2.1.1. Électrode enrobée (SMAW):

- ✓ Mesurer l'épaisseur des pièces à souder.
- ✓ Choisir un diamètre d'électrode inférieur ou égal à cette épaisseur.
- ✓ Régler l'intensité en fonction du diamètre de l'électrode en consultant la notice d'emploi sur le paquet qui vous donne la plage de réglage. On peut utiliser la formule suivante :  $I = (\text{DIAMETRE} - 1) \times 50$
- ✓ Affiner ce réglage en fonction de la masse des pièces, de l'écartement des bords et la méthode de soudage utilisée ainsi que de la position à plat... ; [31].

**Tableau 4.5 :** l'intensité en fonction de diamètre de l'électrode ; [31].

Epaisseur E en mm	Ø 1.6 mm	Ø 2 mm	Ø 2.5 mm	Ø 3.15 mm	Ø 4 mm
1	25 A	Zone de non utilisation			
2	30 A	45 A	65 A		
3		55 A	70 A	95 A	
4			75 A	105 A	140 A
5				115 A	150 A
6					150 A
8					160 A
10					160 A

### 2.1.2. Procédés TIG (GTAW) :

- ✓ Le Courant de soudage nécessaire pour chaque mm d'épaisseur selon le matériau.
- ✓ Le choix du diamètre des électrodes en tungstène.

**Tableau 4.6 :** choix de courant du soudage; [31].

Nature du métal	Type de courant de soudage	courant de soudage en A
Aluminium	AC	40–50 A
Magnésium	AC	40–50 A
Cuivre	DC	75–80 A
Acier au carbone	DC	30–40 A
Acier faiblement allié	DC	30–40 A
Acier inoxydable	DC	30–40 A

**Tableau 4.7 : Le choix du diamètre des électrodes en tungstène; [31].**

	<b>Aluminium</b>	<b>Acier, inox, cuivre</b>
<b>Diamètre de l'électrode Ø mm</b>	<b>Tungstène ampères AC</b>	<b>Alliage au thorium Amp CC</b>
0.5	5-15	5-20
1.0	10-60	20-80
1.6	50-100	80-150
2.4	100-160	120-220
3.2	130-180	200-300
4.0	180-230	250-400

### 2.1.3. Procédé MIG/MAG (GMAW) :

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

- ✓ Intensité = (Tension – 14) \* 20
- ✓ Tension = 14 + (0.05\* Intensité)

**Tableau 4.8 : Choix du diamètre du fil et l'intensité; [31].**

<b>Diamètre du fil Ø mm</b>	<b>Gamme du courant applicable</b>	<b>Type du soudage</b>
0.6	40à100 A	Carrosserie automobile
0.8	60à180 A	Tuyauterie à faible épaisseur
1.0	100à300 A	Toute position passe de pénétration
1.2	150à350 A	A partir 8 mm épaisseur
1.6	200 à700 A	A partir 12 mm épaisseur

### 2.2. La préparation des joints :

#### 2.2.1. Gamme d'épaisseur $t \leq 3\text{mm}$ :

Lorsqu'il s'agit de souder bout à bout des tubes d'épaisseurs inférieures à 3mm, le chanfreinage de l'extrémité du tube n'est généralement pas requis. Les technologies de soudage à l'arc (Electrode enrobée, MIG/MAG et Fil Fourré, TIG) permettent une pénétration suffisante sur toute l'épaisseur du tube en une seule passe.

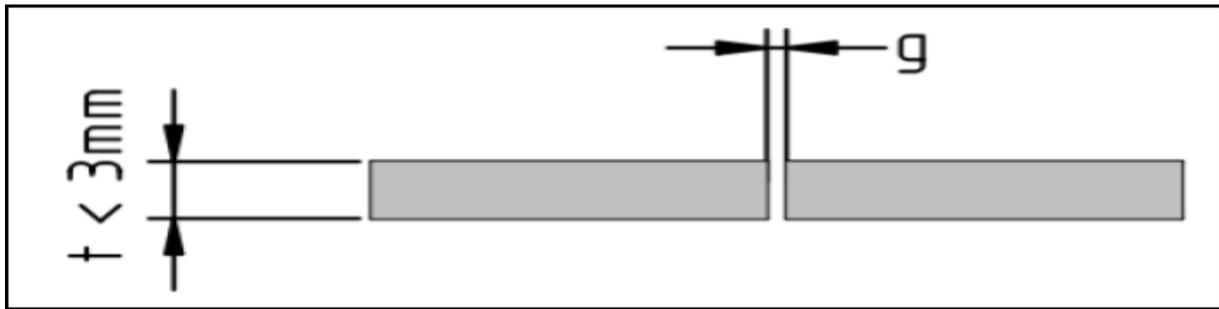


Figure 4. 3: Préparation du joint des tubes d'épaisseurs inférieures à 3mm; [30].

#### 2.2.2. Gamme d'épaisseur $2 \leq t \leq 20\text{mm}$ :

Lorsque le soudeur n'a accès qu'à une seule face du joint à souder, une préparation à bords droits non jointifs ne permet généralement plus d'assurer une pénétration complète pour des épaisseurs supérieures à 2mm. Un chanfrein doit donc être réalisé pour permettre au soudeur de réaliser une passe « racine » à la base du joint qui sera ensuite recouverte par une ou plusieurs passes supplémentaires ; [30].

Les angles les plus communs pour les chanfreins en V sont  $60^\circ$  et  $75^\circ$  ( $2 \times 30^\circ$  et  $2 \times 37.5^\circ$ ). Un talon est généralement requis d'une épaisseur ( $s$ ) comprise entre 0.5 et 1.5mm. Le jeu entre les pièces à souder ( $g$ ) se situera entre 0.5 et 1mm.

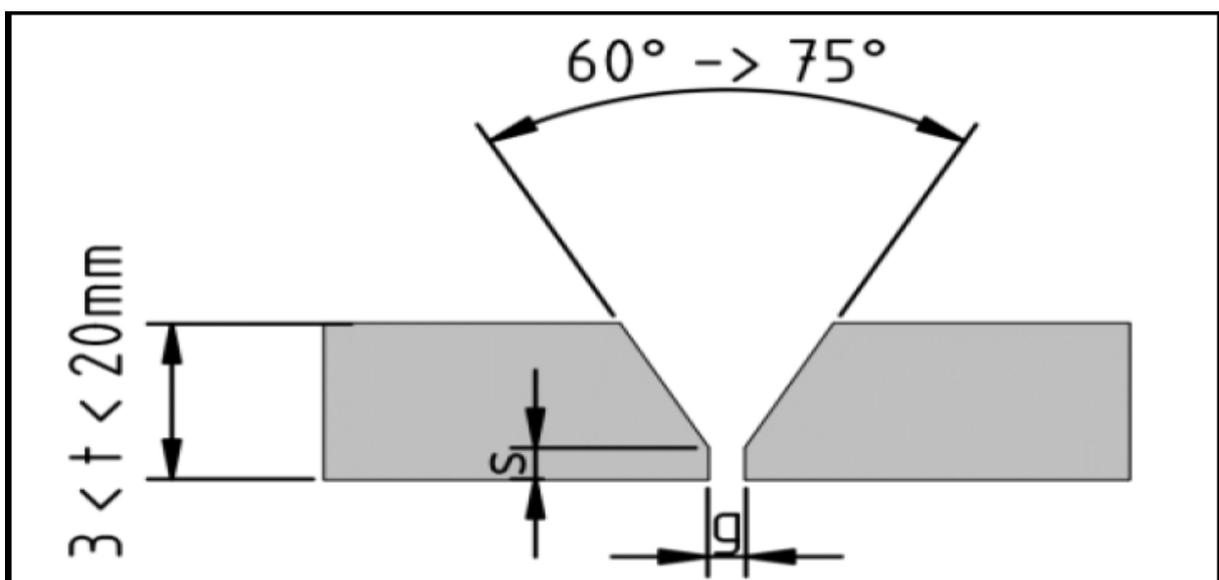


Figure 4. 4: Préparation du joint des tubes d'épaisseurs  $2 \leq t \leq 20\text{mm}$ ; [30].

### 2.2.3. Gamme d'épaisseur $20\text{mm} \leq t$ :

Lorsque l'épaisseur des pièces à souder augmente, la quantité de matière à déposer dans le cordon de soudure augmente proportionnellement. Afin d'éviter des opérations de soudage trop longues et coûteuses d'un point de vue de la main d'œuvre et des consommables, une préparation permettant de réduire le volume du chanfrein est généralement privilégiée pour les épaisseurs supérieures à 20mm :

- V doubles pentes (ou V composés)
- J et J double pente

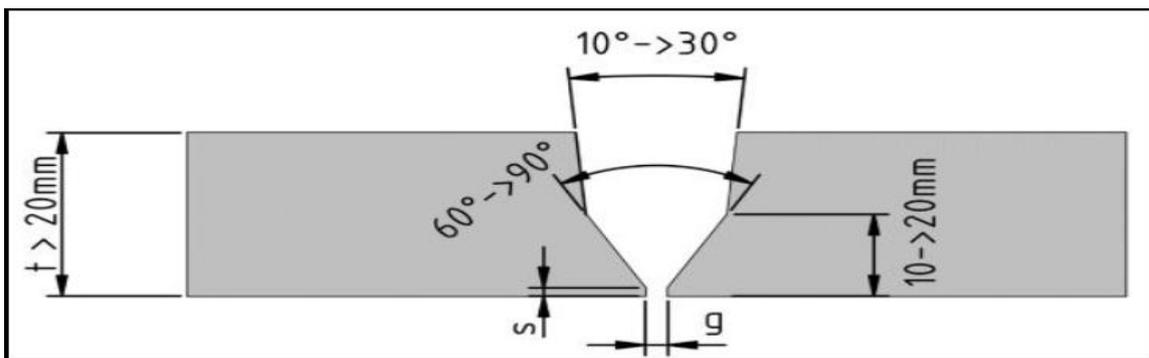


Figure 4. 5 : Préparation d'un joint V doubles pentes; [30].

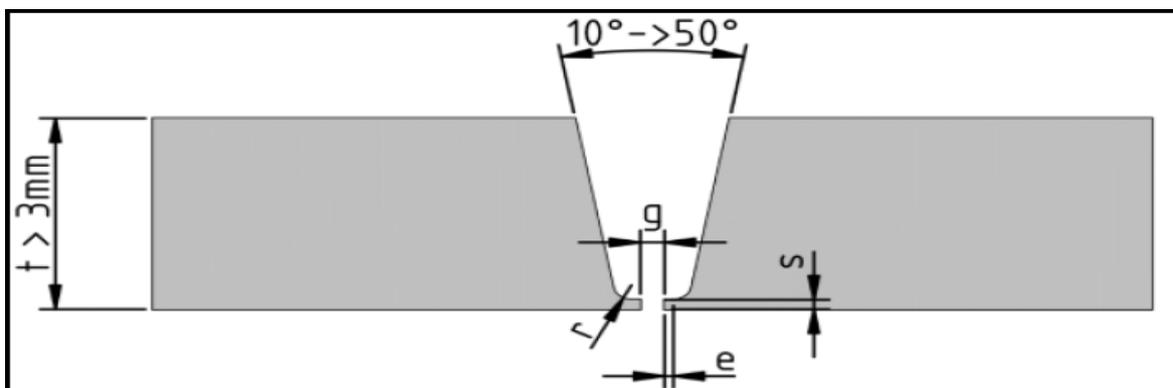


Figure 4. 6: Chanfreins en J; [30].

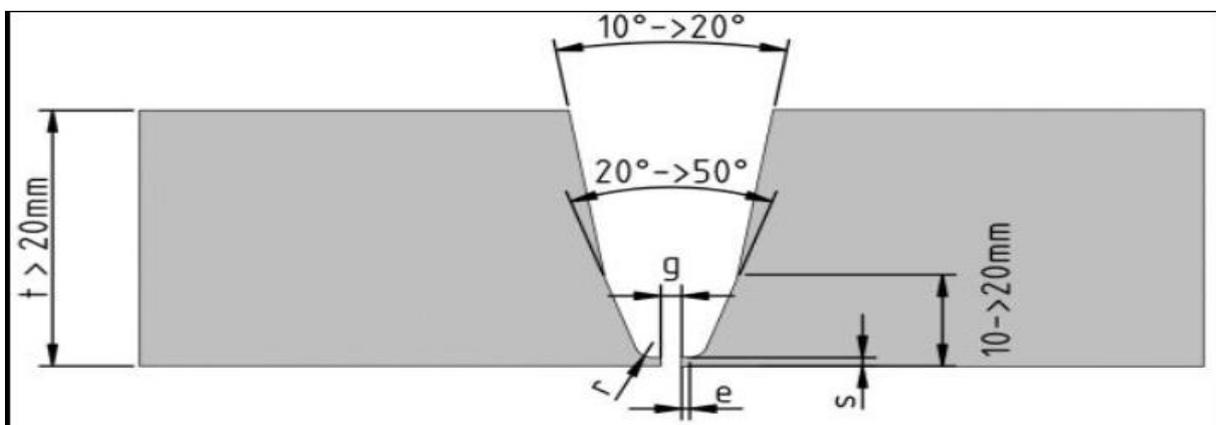


Figure 4. 7: Chanfrein en J composés (doubles pentes); [30].

### 2.3. Calcul de la température de préchauffage :

#### 2.3.1. Méthode SEFERIEN :

Cette méthode est également basée sur le « pouvoir trempant », elle consiste, pour un acier donné, à déterminer la température de préchauffage des pièces à souder, de manière à éviter un refroidissement trop rapide du joint qui conduirait à la formation d'une structure fragile (martensite) dans la Z.A.C. Le calcul de cette température de préchauffage s'effectue en trois étapes :

✓ **Étapes 1 : Carbone équivalent : expression de SEFERIEN:**

$$C_{\text{éq}} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad (1)$$

✓ **Étapes 2 : Carbone équivalent compensé :**

Le carbone équivalent compensé ( $C_{\text{eq.C}}$ ) tient compte de l'épaisseur des pièces à assembler (influence de la vitesse de refroidissement) ainsi que du carbone équivalent ( $C_{\text{eq}}$ ).

Il est défini par la formule :

$$C_{\text{eq.C}} = C_{\text{eq}} \cdot (1 + 0.005 e) \quad (2)$$

$e$  : Epaisseur moyenne des tôles en mm.

✓ **Étapes 3 : Température de préchauffage des pièces à soudé :**

Elle est calculée en fonction du  $C_{\text{eq.C}}$  par l'expression suivante :

$$T_p = 350 \sqrt{C_{\text{eq.C}} - 0.25} \quad (3)$$

Le diagramme suivant détermine  $T_p$ , directement à partir de  $C_{\text{eq}}$  et de  $e$ .

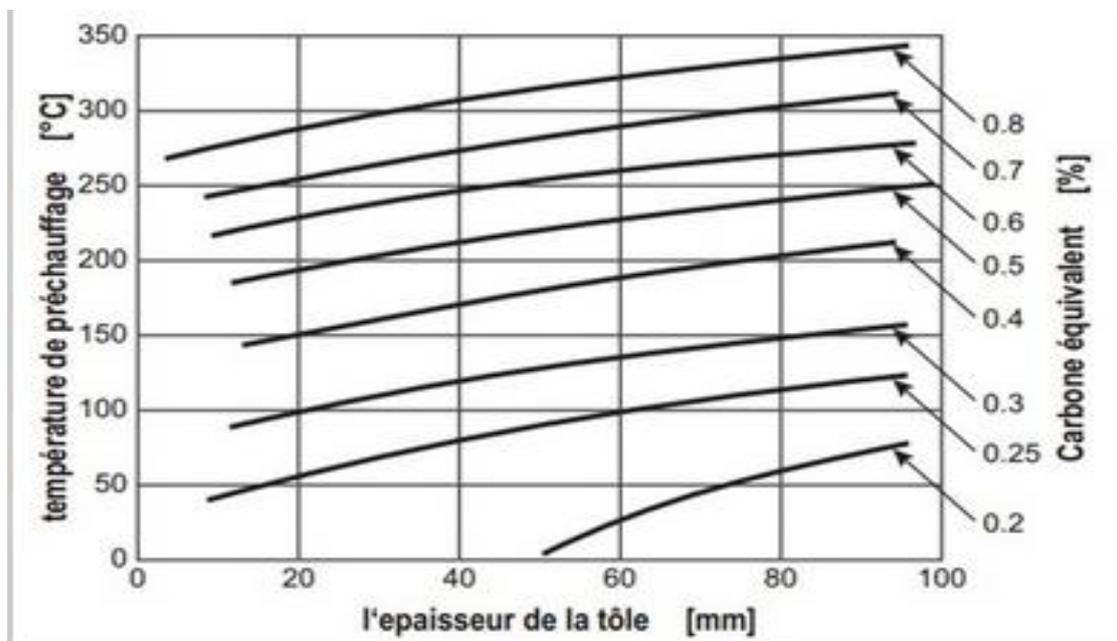


Figure 4. 8 : Diagramme de Seferian; [31].

### 2.3.2. Méthode BWRA :

On peut aussi calculer la température de préchauffage avec la méthode BWRA (British Welding Research Association). Cette méthode est adaptée au soudage à l'électrode enrobée. Cette méthode permet de calculer aussi la température de préchauffage, précise, elle prend en compte :

- l'indice de sévérité thermique
- l'indice de soudabilité
- le diamètre des électrodes.

#### 2.3.2.1. Indice de sévérité thermique :

Il faut commencer par déterminer TSN (Thermic Severity Number) qui prend en compte la géométrie et l'épaisseur de l'assemblage. Il faut diviser par 6 la somme des épaisseurs qui dépend des chemins de dispersion de la chaleur. Par exemple dans le cas d'un assemblage en T, il y'aura 3 chemins de dispersions, donc on aura l'équivalent de 3 épaisseurs.

$T. S. N = \text{Sommedes épaisseur}/6$  ; [31].

Tableau 4. 9: Des exemples sur la TSN; [31].

Type de joint	Epaisseur des tôles en mm	TSN
<p>2 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	2
	24 et 24	8
	24 et 48	12
<p>3 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	3
	12 et 12	6
	24 et 24	12
<p>4 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	4
	24 et 24	8
	6 - 12 - 12 - 12	7

### 2.3.2.2. Indice de soudabilité :

Il est fonction du pourcentage en C<sub>éq.</sub>, de l'acier à souder, ainsi que de la nature des électrodes utilisées. Le tableau ci-dessous permet de le déterminer après avoir calculé le C<sub>éq.</sub>. Par la formule :

**Tableau 4. 10 : Indice de soudabilité en fonction de C<sub>éq.</sub>; [31].**

$C_{\text{éq}} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo + Cr + V}{10}$		Indice de La soudabilité
Electrodes rutiles	Electrodes Basiques	
jusqu'à C <sub>éq</sub> = 0,20	jusqu'à C <sub>éq</sub> = 0,25	A
0,21 à 0,23	0,26 à 0,30	B
0,24 à 0,27	0,31 à 0,35	C
0,28 à 0,32	0,36 à 0,40	D
0,33 à 0,38	0,41 à 0,45	E
0,39 à 0,45	0,46 à 0,50	F
> 0,45	> 0,50	G

### 2.3.2.3. Diamètre des électrodes et température de préchauffage :

La quantité de chaleur transmise au joint étant liée au diamètre des électrodes utilisées, on prend en compte ce paramètre pour le calcul de T<sub>p</sub> (Température de préchauffage).

**Tableau 4. 11 : Diamètre des électrodes en fonction de la température de préchauffage; [31].**

	Indice Indice de Soudabilité	Température minimum à laquelle doit être effectuée la soudure				
		Diamètre des électrodes en millimètres				
		3,2	4	5	6	8
		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
T.S.N. 2	D	0	-	-	-	-
	E	50	0	-	-	-
	F	125	25	-	-	-
T.S.N. 3	C	0	-	-	-	-
	D	75	0	-	-	-
	E	100	25	0	-	-
	F	150	100	25	-	-
T.S.N. 4	C	50	-	-	-	-
	D	100	25	-	-	-
	E	125	75	0	-	-
	F	175	125	75	0	-
T.S.N. 6	B	50	-	-	-	-
	C	100	25	-	-	-
	D	125	100	25	-	-
	E	175	125	75	0	-
	F	225	175	125	75	0
T.S.N. 8	A	25	-	-	-	-
	B	75	25	-	-	-
	C	125	75	25	-	-
	D	175	125	75	0	-
	E	200	175	125	50	25
	F	225	200	175	125	50
T.S.N. 12	A	75	25	-	-	-
	B	125	75	25	-	-
	C	150	125	75	0	-
	D	200	175	125	75	0
	E	225	200	175	100	50
	F	250	225	200	150	125
T.S.N. 16	A	75	25	0	-	-
	B	125	75	50	0	-
	C	150	150	125	50	25
	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	155	100
	F	250	250	225	200	200
T.S.N. 24	A	75	25	0	-	-
	B	125	75	50	25	-
	C	150	150	125	75	25
	D	200	175	175	125	100
	E	225	200	200	175	150
	F	250	250	250	200	150

### 2.4. Calcul de la vitesse de refroidissement :

#### 2.4.1. Méthode de l'IRSID :

L'Institut de Recherche de la Sidérurgie française (IRSID) a mis au point un abaque qui permet de déterminer la nécessité ou non d'un préchauffage.

Il permet, également de calculer la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C  $\Delta t$ . Elle utilise les paramètres suivants :

## Chapitre 4 : Configuration pour le soudage de pipelines

- Energie nominale  $E_n = U \cdot I / V$  en fait  $E_n = 60 \cdot U \cdot I / 1000$  V.
- Energie corrigée qui tient compte de la géométrie du joint  $E_c = E_n \cdot k$
- Energie équivalente qui tient compte de la géométrie de l'assemblage et du rendement d'arc :

$$E_q = E_c \cdot \eta = E_n \cdot k \cdot \eta \quad (4)$$

$\eta = 1$  pour le soudage à l'électrode enrobée et sous flux solide.

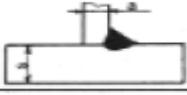
$\eta = 0.7$  pour le soudage MIG MAG

$\eta = 0.5$  pour le soudage TIG.

Avec  $E_n, E_c, E_q$  en kJ/cm

- Epaisseur des pièces à souder en mm.

**Tableau 4. 12 : Le coefficient K souvent le type de joint; [31].**

	Soudage à plat K=1					
	$\frac{\alpha}{S}$	0	0.25	0.5	0.75	1
		1	0.97	0.89	0.78	0.67

**Tableau 4. 13 : Le coefficient K souvent l'angle des chanfreine ; [31].**

Forme	$\alpha$	60°	75°	90°	105°
	K	0.60	0.63	0.67	0.70
	K	1.50	1.72	2	2.38
	K	0.75	0.85	1	1.20

### 2.4.1.1. Pour obtenir le point (5) :

Selon l'assemblage à réaliser, le soudeur émet l'hypothèse d'une  $E_n = 18$  kJ pour une électrode de  $\varnothing 4$  mm (1)

$k = 0.75$  (2)  $\varnothing 4$ , 111  $\eta = 1$  (3) Schéma ci-dessous Epaisseur = 20 (4).

Le point (5) nous donne  $\Delta t = 6$  s (tr)

### 2.4.1.2. Pour obtenir le point (8) :

La température de préchauffage sera de : 250 ° C points (6) et (7) ce qui donne  $\Delta t = 15$  s (tr) point (8); [31].

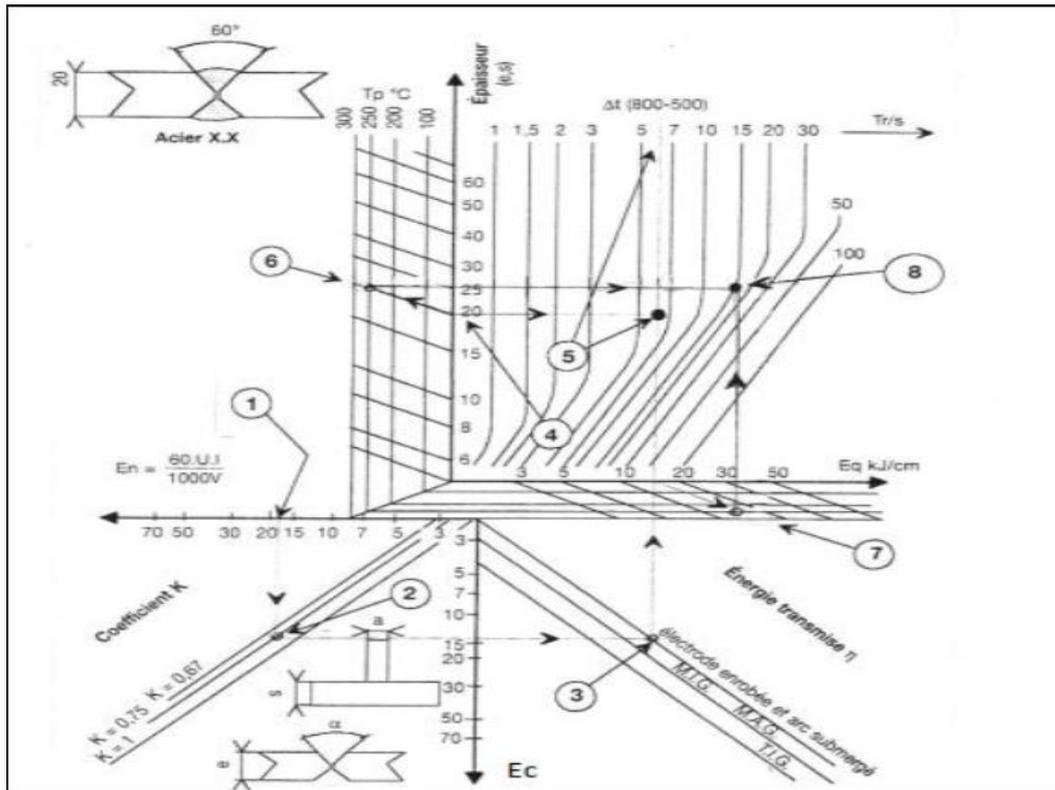


Figure 4. 9: Abaque thermique général de l'IRSID didactisme; [31].

### 2.4.2. Méthode BAUS et CHAPEAU :

Les expressions des durées de refroidissement sont déduites des expressions de la répartition thermique de la chaleur dans les assemblages soudés.

Pour éviter les calculs, on utilise l'abaque établi par BAUS et CHAPEAU à partir de ces expressions des durées de refroidissement. Cet abaque permet de déterminer indifféremment :

- La durée de refroidissement entre 800 et 500°C Δt.
- L'énergie de soudage nécessaire en fonction de la géométrie du joint soudé, on utilise l'énergie dissipée  $E_d = E_n * \eta$  (5).
- La température de préchauffage, si besoin est.

#### a) Quadrant supérieur gauche orange :

On l'utilise pour les tôles épaisses ( $e > 25\text{mm}$ ) en soudage bout à bout avec chanfrein en V. Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement Δt = en fonction de l'énergie dissipée  $E_d$ .

Avec :  $E_d = E_n * \eta$

	η1 tôles minces	η2 tôles épaisses
Soudage sous flux solide	0.9	0.99
Soudage électrode enrobée	0.7	0.85
MIG-MAG	0.65	0.85
TIG	0.3	0.48

## Chapitre 4 : Configuration pour le soudage de pipelines

- Pour  $T_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$  et  $E_d = 17\text{ kJ/cm}$ ,  $\Delta t = 6.5\text{ s}$ .
- Pour  $T_o = 200\text{ }^\circ\text{C}$  et  $E_d = 17\text{ kJ/cm}$ ,  $\Delta t = 14\text{ s}$ .

### b) Quadrant supérieur droit bleu :

Il est utilisé pour le soudage des tôles minces ( $e < 25\text{ mm}$ ) en bout à bout, en L, ou en T. Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement en fonction de l'énergie dissipée  $E_d/e'$  ( $e'$  : épaisseur combinée en cm). L'écoulement du flux thermique ou de la chaleur (calcul de  $e'$ ) dépend du nombre de chemins de dispersion de la chaleur (voir les schémas sur l'abaque).

➤ Exemple : deux tôles d'épaisseur 10 mm sont soudées en T avec électrodes enrobées. L'énergie nominale de soudage étant de 18 kJ/cm.

On détermine  $E_d$  et  $e'$  :  $E_d = E_n * \eta = 18 * 0.7 = 12.6\text{ kJ/cm}$ .

$e' = 0.5 (e_1 + 2e_2) = 0.5 (1 + 2) = 1.5\text{ cm}$ .

Sur le quadrant inférieur droit, à partir de ces deux valeurs, on obtient

$E_d/e' = 12.6 / 1.5 = 8.4\text{ kJ/cm}$ .

On détermine ensuite à partir du quadrant supérieur droit. Le soudage s'effectue à température ambiante, 20°C, la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C  $\Delta t = 9\text{ s}$ .

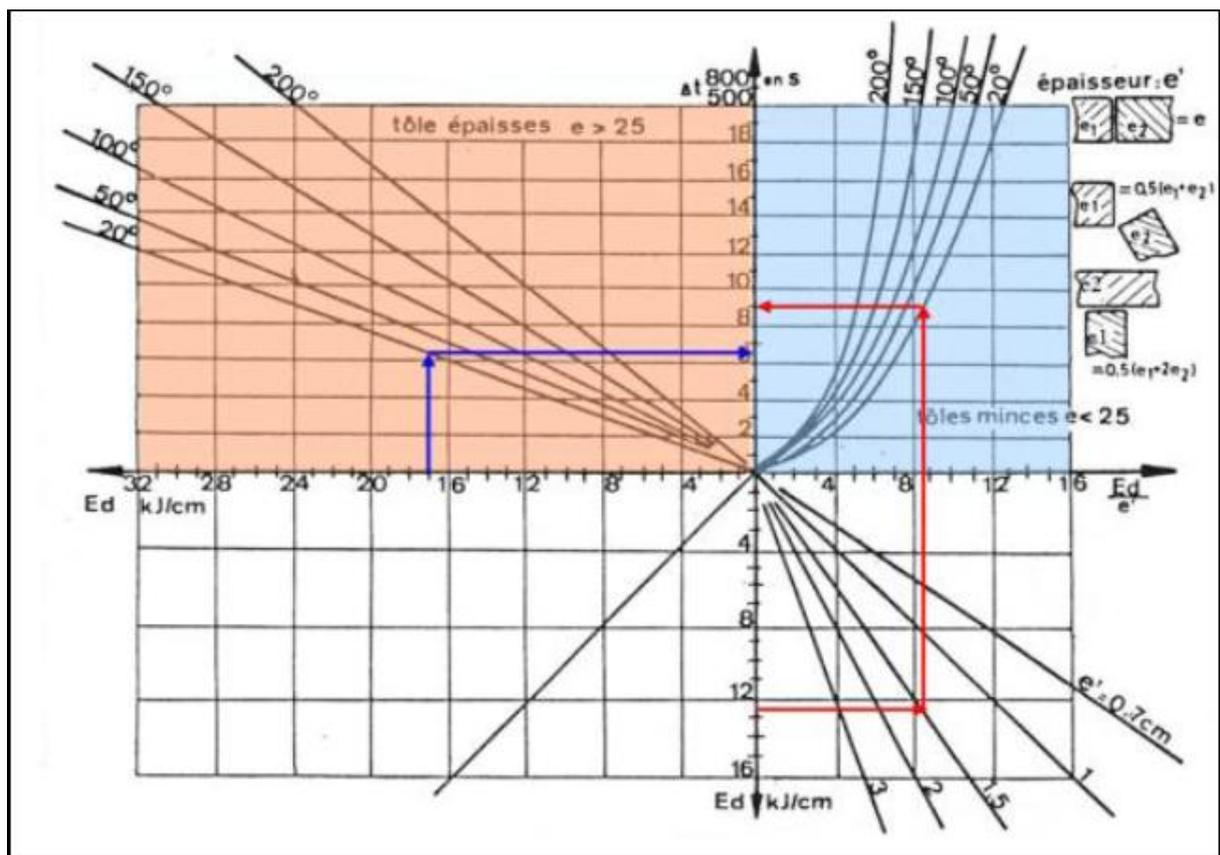


Figure 4. 10 : Abaque thermique de BAUS et CHAPEAU; [31].

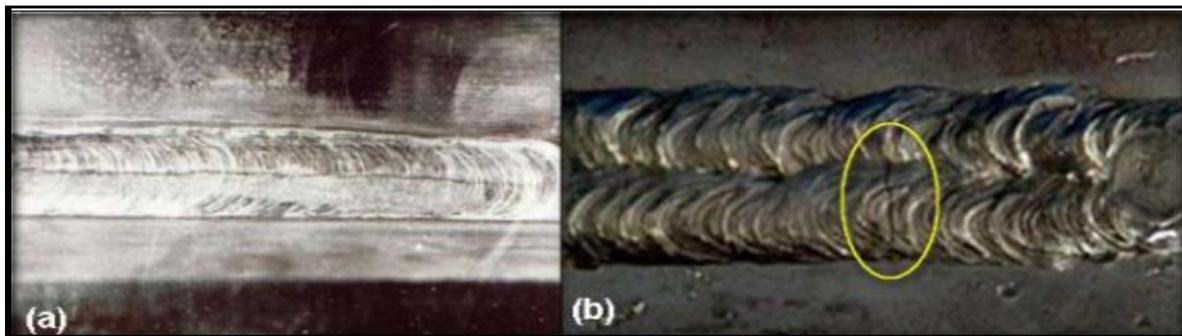
### 3. Défauts des soudages de pipelines :

#### 3.1. Les fissures :

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint.

Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique... Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement ce dernier; [30].

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales :



**Figure 4. 11** : Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale; [30].

Il y'a plusieurs types des fissures, on situés :

- Fissures de Gorge (Throat Cracks)
- Fissures de Racine
- Fissures de Cratère
- Fissures au raccordement
- Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)
- Fissures de réchauffages (Reheat cracking)
- Fissure à chaud (ou de solidification)
- Fissure à froid.

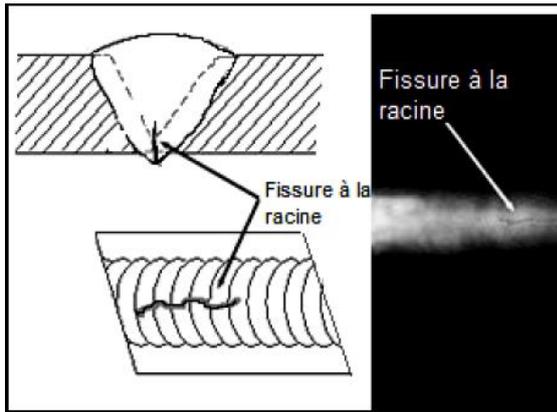


Figure 4.12 : Fissure de Gorge

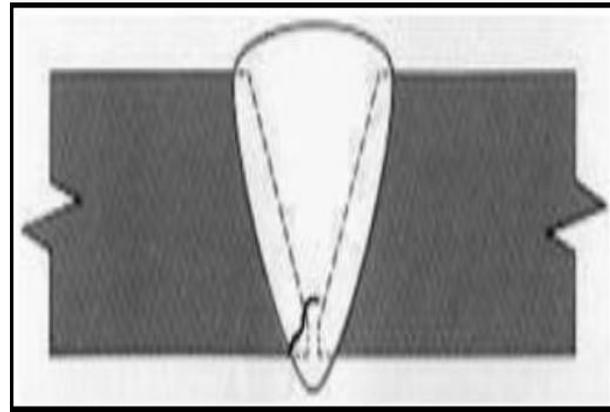


Figure 4.13 : Fissure de Racine

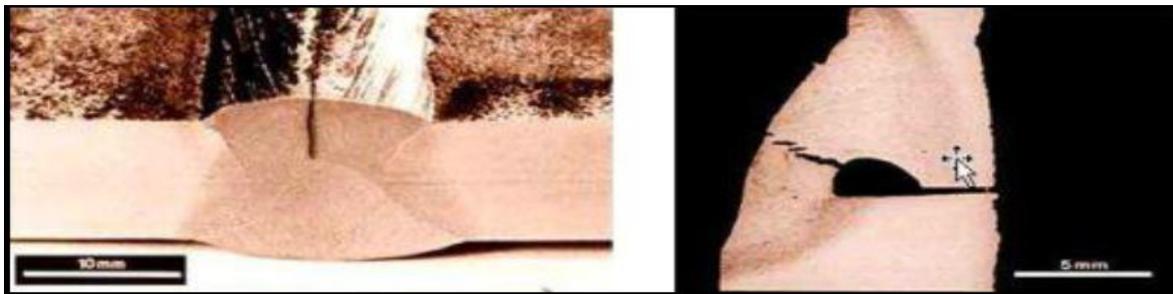


Figure 4.14 : Fissure à chaud (ou de solidification); [30].

### 3.2. Manque de pénétration :

Le manque de pénétration est un manque de fusion de bords à souder. Il se situe en racine de cordon. Il est souvent dû à une puissance du faisceau insuffisante ou à une dégradation de la focalisation du faisceau.



Figure 4.15 : Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein; [30].

### 3.3. Manque de fusion :

Le manque de fusion (ou collage) est un manque de liaison entre le métal de base et la zone fondue. C'est un défaut plan. Il peut être lié à un décalage entre le faisceau et le plan de joint. Dans le cas d'un assemblage hétérogène, il est favorisé par une différence de conductibilité importante entre les matériaux. Il est difficilement détectable par les contrôles non destructifs.

Des manques de fusion peuvent apparaître :

- ✓ Soit dans le flanc de la soudure entre métal de base et métal déposé.
- ✓ Soit entre passes de soudage.
- ✓ Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé; [30].

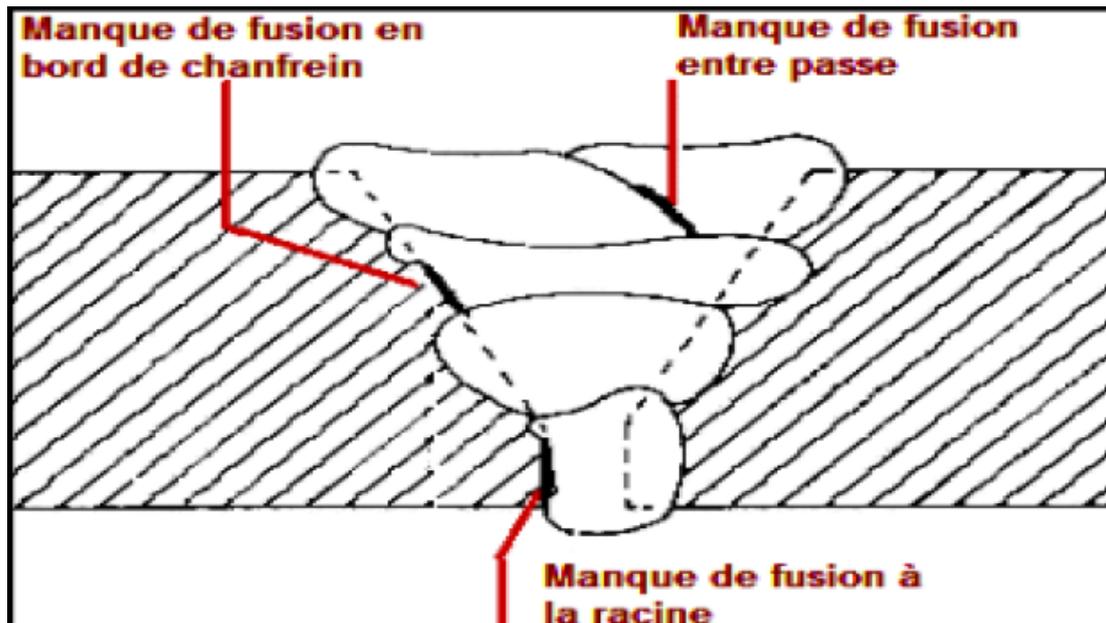


Figure 4. 16 : Les manques de fusion; [30].

### 3.4. Inclusion gazeuses :

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

- Porosités vermiculaires.
- Porosités de reprise.
- Porosités uniformes.

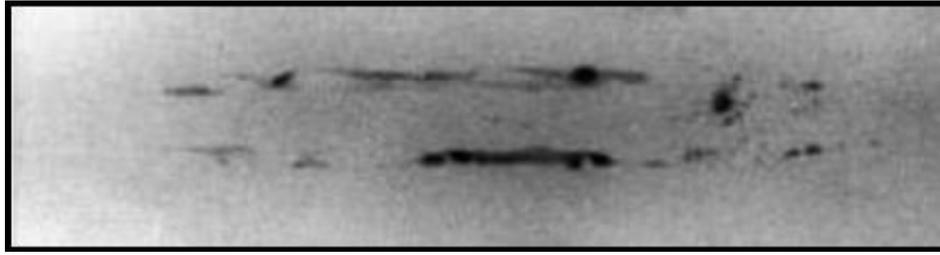


Figure 4. 17 : Inclusions gazeuses porosités uniformes; [30].

### 3.5. Inclusion solides :

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents :

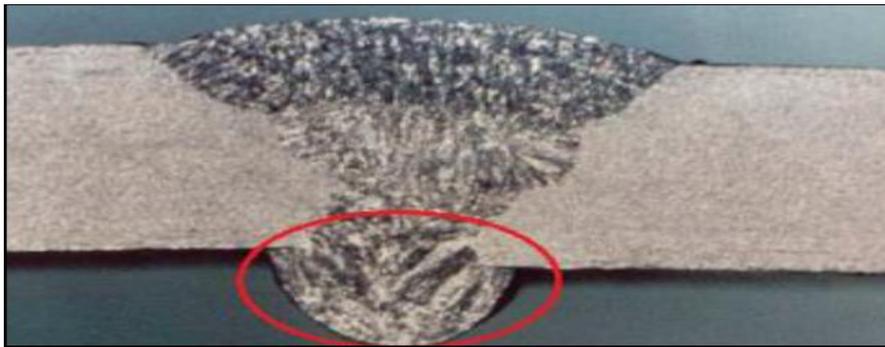
- Laitier.
- Tungstène.
- Cuivre.



*Figure 4. 18 : Inclusions de tungstène; [30].*

### 3.6. 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 :



*Figure 4. 19 : Excès de pénétration; [30].*

Il y'a d'autre types des défauts de soudage de pipelines comme :

- Surépaisseur ou convexité excessive.
- Effondrements ou concavité excessive.
- Débordement du cordon.
- Morsures/Caniveaux.
- Défauts d'alignement.
- Projections.
- Retassures et criques de solidification ; [30].

# **Chapitre V**

## Etude expérimentale

### 1. DEMARCHE EXPERIMENTALE :

Le sujet de cette étude porte sur l'effet des différents types de soudage sur les caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L.

Nous présenterons dans ce chapitre un descriptif des diverses étapes expérimentales utilisées.

Dans cette étude nous avons soudé trois tubes d'API 5L dans deux entreprises différentes (CPECC et PAF) avec trois procédés de soudage (électrode enrobée, TIG et MAG) après nous avons préparé trois éprouvettes dans l'ordre suivant :

- 3 éprouvettes de traction
- 3 éprouvettes de pliage
- 3 éprouvettes de résilience.

Les essais mécaniques ont été réalisés dans le laboratoire mécanique de l'entreprise ANABIB au Reghaia-Alger.

### 2. 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 :
  - EE : E6010
  - MAG : Fil plein
  - TIG : Baguette acier SG2

### 3. 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 de 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 de tubes en acier API 5L X60 en PSL1 et PSL2. 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 carbone qu'ils contiennent.



*Figure 5. 1 : Tuyau API 5L X60*

### 3.1. Spécifications des tuyaux sans soudure API 5L X60 :

Type: Tuyau sans soudure API 5L X60 / L415

Standard: API

Tailles de tuyau: 1/2" NB - 60" NB

OD: 21,3 mm-610 mm (3", 4", 5", 6", 8", 10", 12", 14", 16" ;, 18")

POIDS: 2,5 mm-60 mm (SCH5, SCH10, SCH20, SCH30, STD, SCH40, SCH60, XS, SCH80, SCH100, SCH120, SCH140, SCH160, XXS)

Longueur: Fixe: 5,8, 6,0, 11,8, 12,0 m / Longueur aléatoire: 5-12 m

Finitions de surface: surface extérieure - enduit de vernis, 3-LPE (FBE + adhésif + PE) / surface intérieure: PE

Finition d'extrémité: coupe carrée biseautée / plate-extrémité simple, biseautée, coupe carrée, ampli&fileté; Accouplé.

Emballage: tuyau sans soudure API 5L X60 emballé dans des boîtes en bois, des sacs en plastique, des bandes d'acier groupées, ou selon les demandes des clients ; [33].

### 3.2. Les avantages du tuyau sans soudure API 5L X60 :

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.

Bien que l'acier soit solide, divers processus de test sont effectués pour vérifier la résistance et la durabilité de l'acier. Dans certains cas, les fournisseurs proposent également des alternatives à ces tuyaux selon la demande des clients. Cependant, aucun autre tuyau ne peut parfaitement les échanger ou les remplacer en raison de leur nature stricte de réglementation. De plus, une attention particulière est portée aux essais de ténacité et à ses exigences.

Ces tests sont effectués pour vérifier les cotes de haute pression et température.

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

*Tableau 5. 1: Différences entre API 5L X60 PSL1 et PSL2 ; [34]*

PSL	PSL1	PSL2
Test de Charpy	Aucun requis	Obligatoire pour tous les grades
Contrôle non destructif de la qualité	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

### 3.4. Compositions chimiques et propriété mécanique API 5L X60 :

*Tableau 5. 2 : Analyse chimique API 5L X60; [34]*

Grades	C	Si	Mn	P	S	V
X60 PSL1 (sans soudure)	0.28	0.45	1.40e	0.3	0.3	f
X60 PSL1 (soudé)	0.26	0.45	1.40e	0.3	0.3	f
X60Q PSL2	0.18	0.45	1.7	0.025	0.015	g
X60N PSL2	0.24	0.45	1.4	0.025	0.015	0.1

*Tableau 5. 3 : Caractéristique mécanique API 5L X60; [34]*

Grades	Limite d'élasticité, Mpa	Résistance à la traction, Mpa	Allongement, en 2po
API 5L X60 PSL1	420	59.5	c
API 5L X60 PSL2	480	59.5	f

#### 4. Métaux d'apport :

Ces soudures ont été réalisées par les procédés suivants :

- Electrode enrobée SMAW (Cellulosique 6010).
- Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles GMAW (avec gaz active CO<sub>2</sub>).
- Soudage à l'arc avec électrodes non fusibles TIG, GTAW.

*Tableau 5. 4 : Composition chimique du métal d'apport (Cellulosique 6010)*

Eléments	C	Mn	Si
%	0.12	0.2	0.6

*Tableau 5. 5 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (Cellulosique 6010)*

Propriété	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]	Résistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ]	Allongement [%]	Résilience [C°]
Valeur	min. 380	470 - 540	min. 22	min. 47 J

*Tableau 5. 6 : Composition chimique du métal d'apport (TIG)*

C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
0.015%	0.40%	1.50%	18.50%	12.5%	2.60%

*Tableau 5. 7 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (TIG)*

Charge rupture	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]	Allongement [%]	Résilience (J)	Température [C°]	Dureté [HB]
600	460	35	80	-196	-

*Tableau 5. 8 : Composition chimique du métal d'apport(MAG)*

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0.02%	0.35%	1.30%	16.0%	5.0%	1.0%

*Tableau 5. 9 : Propriétés mécaniques du métal d'apport (MAG)*

<b>Charge rupture</b>	<b>Limite élastique [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Allongement [%]</b>	<b>Résilience (J)</b>	<b>Température [C°]</b>	<b>Dureté [HV]</b>
840	540	23	80	20	260

5. Les dessins Techniques des pièces soudées :

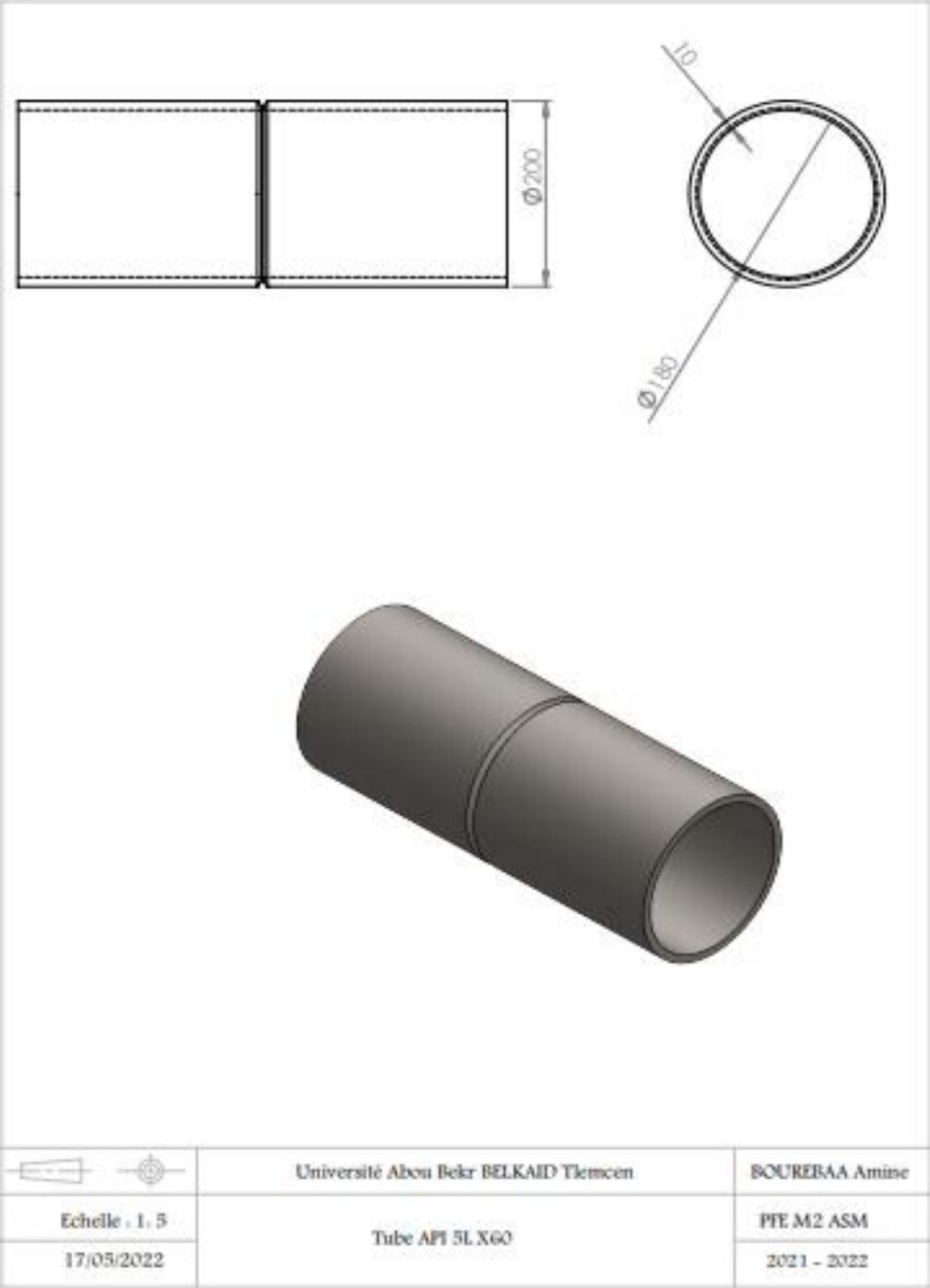


Figure 5. 2 : Dessin de définition de tube

### 6. Procédures :

#### 6.1. Préparation de chanfrein :

Pour l'exécution de soudage du tube API 5L X60, nous avons réalisé par meuleuse sur la coté de tube un chanfrein de 35° d'inclinaison pour tenir un « V » de 70° à l'aide d'une meule métallique comme le montre la figure suivante :

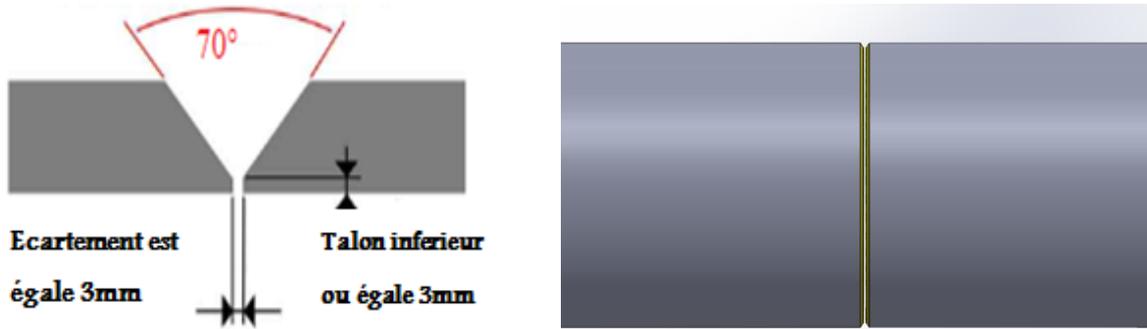


Figure 5. 3 : Chanfrein avec le dessin technique.

#### 6.2. Réglage les paramètres de soudage :

##### 6.2.1. Pour l'électrode enrobée :

Nous avons utilisé une électrode de diamètre 2 mm ( $\varnothing = 2.5$  mm).

L'intensité de soudage :

La tension de soudage:

$$I = 50 * (e - 1) \quad U = 20 + (0.04 * I)$$

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

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

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

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

### 6.2.2. Pour le soudage TIG :

Tableau 5. 10 : paramètres de soudage TIG

Diametre d'électrode	Tungstene pur	Tungstène théorie	Epaisseur de tole
2.0 mm	80 a 160	80 a 120	2.0 mm a 4.0 mm

### 6.2.3. Pour le soudage MAG :

Tableau 5. 11 : paramètres de soudage MAG

Diametre d'électrode	Bobine	Poids (kg)	Référence	Intensité (A)	Voltage (V)
1.2	D200	5.0	08M2	190-260	24-28

Avec le CO<sub>2</sub> comme un ga de protection.

### 6.3. Fixation du tube par des points de soudures :

Dans cette opération nous avons fixé les tuyaux pour démarrer dans l'opération de soudage (voir la figure suivante).



Figure 5. 4 : Fixation le tube

### 6.4. Opération de soudage :

Après l'exécution de l'opération de soudage on obtient trois (3) tubes assemblées comme l'indique les figures suivantes.

**Note :** nous avons exercé le soudage avec l'électrode et le soudage TIG dans la raffinerie de Oued-Souf dans l'entreprise ( CEPCC et SONATRACH) et le soudage MAG dans l'unité de PAF au reghaia Alger.

### 6.4.1. Le soudage TIG :

Le soudage de TIG a été réalisé par un soudeur professionnel et qualifié du fait que ce procédé est très difficile.



*Figure 5. 5 : le soudage TIG après l'opération de soudage*

### 6.4.2. Le soudage avec l'électrode enrobée :

Dans ce type de soudage nous avons utilisé un autre soudeur pour gagner le temps et assurer une bonne soudure.



*Figure 5. 6 : le soudage SMAW pendant et après l'opération de soudage*

### 6.4.3. Le soudage avec fil fourré (MAG) :

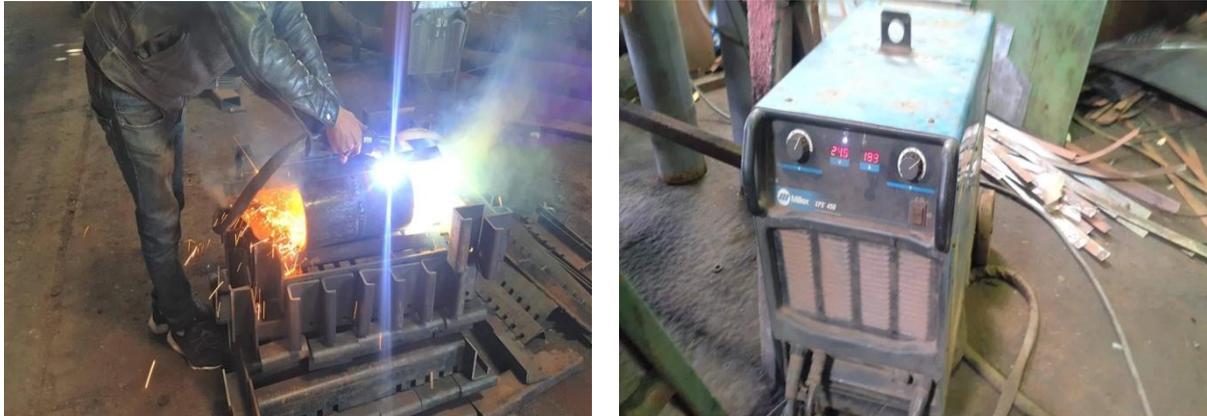
Dans ce type nous avons utilisé le CO<sub>2</sub> comme un gaz de protection et j'ai fait cette opération dans l'entreprise de PAF au Reghaia-Alger.



*Figure 5. 7 : le soudage GMAW pendant et après l'opération de soudage*

### 6.5. Découpage des éprouvettes :

Pour prélever des éprouvettes à partir de ces trois tubes soudés en électrode enrobé, MAG et en TIG nous avons utilisé un coupage plasma dans l'entreprise de PAF, (figure ci-dessus).



*Figure 5. 8 : l'opération et le poste de coupage plasma.*

### 7. Les essais mécaniques :

Après la réalisation des éprouvettes, nous avons démarré mes essais mécaniques dans l'entreprise ANABIB dans un laboratoire mécanique que contient :

- Une machine de traction-pliage séparé avec un logiciel qui donne des résultats rapides (ZWICK ROELL test).
- Une machine de résilience.

#### 7.1. Essai de traction :

L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plupart des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

##### 7.1.1. Machine de l'essai :

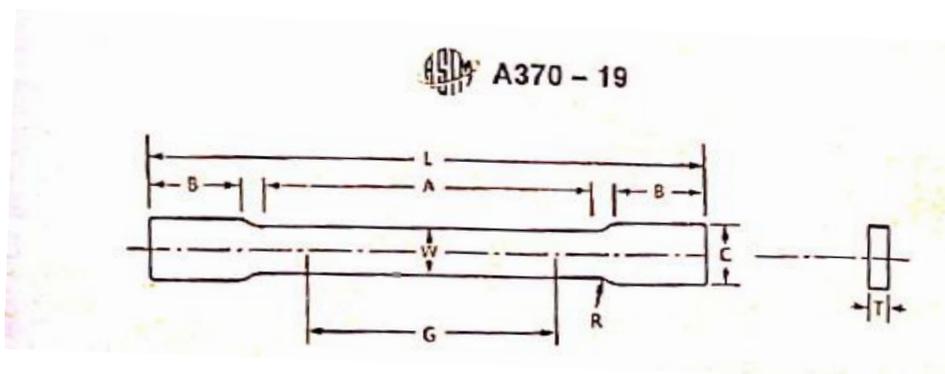
La machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. La norme utilisée est ASTM A 370 A. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande numérique (figure suivante).



*Figure 5. 9 : Machine de traction utilisée.*

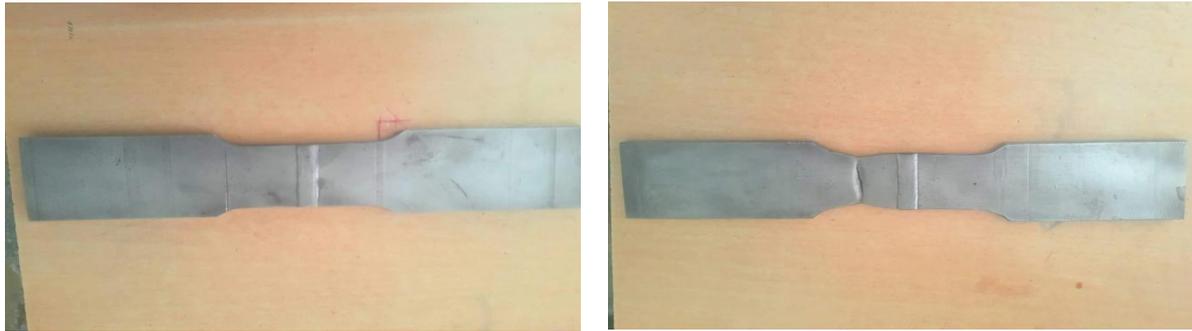
### 7.1.2. Eprouvtes de traction :

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions de matériau dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques (dans ce cas en utilise la spécification ASTM A 370 A).



*Figure 5. 10 : les démenions qui existe pour l'éprouvette de traction selon ASTM A 370.*

Avec :  $L = 350 \text{ mm}$  ;  $W = 40 \text{ mm}$  ;  $C = 50 \text{ mm}$  ;  $L_0 = 50.8 \text{ mm}$



*Figure 5.11 : Epreuve de traction avant et après la rupture (soudage TIG)*

### 7.2. Essai de pliage :

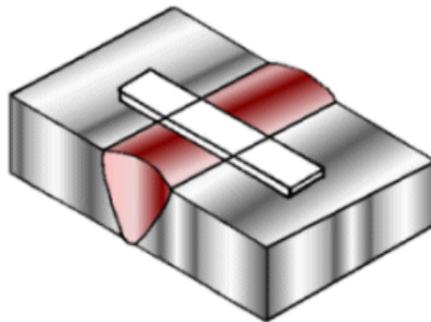
#### 7.2.1. Définition :

L'essai consiste à exercer 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 norme API spécification 5L (NF EN 910 Mai 1996).

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

- 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

#### 7.2.2. Localisation des éprouvettes de pliage dans un joint soudé :



*Figure 5.12 : position d'éprouvette de pliage*

#### 7.2.3. Différents types de pliages et le symbole de l'essai :

- Essai du pliage transversal envers et endroit sur soudure bout à bout (TFBB et TRBB)
- Essai du pliage transversal de côté sur soudure bout à bout (SRB)
- Essai du pliage longitudinal sur soudure bout à bout (LFBB et LRBB).

### 7.2.4. Epreuve :

*Tableau 5. 12 : tableau des dimensions d'éprouvette de pliage selon API 5L*

Type d'essai	Désignation	Exigence	Epaisseur d'éprouvette	Norme
Pliage	largeur d'éprouvette	38.1	10	API 5L

Chaque éprouvette doit être marquée de manière qu'après son prélèvement il soit possible de repérer sa position exacte ou à l'éprouvette.

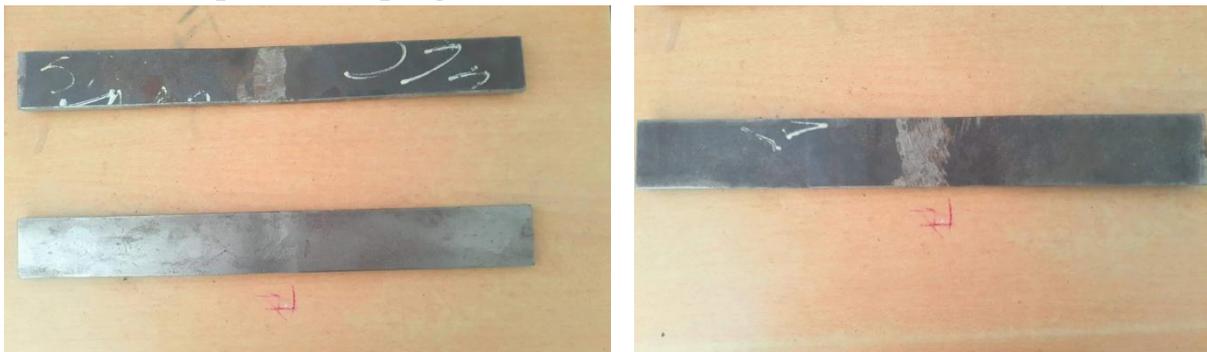
Pour cette essai nous avons choisie trois éprouvettes de « tube API 5L X60 » soudée avec SMAW, GTAW et GMAW.

### 7.2.5. Paramètres d'essai de pliage :

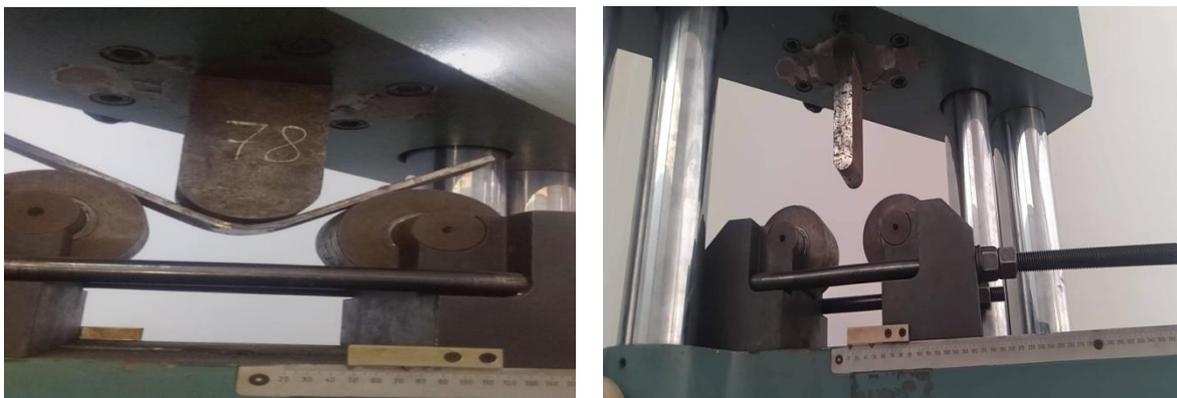
*Tableau 5. 13 : Les Paramètres de machine de pliage.*

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

### 7.2.6. Opération de pliage :



*Figure 5. 13: Les éprouvettes avant l'essai de pliage*



*Figure 5. 14 : Les éprouvettes pendant l'essai de pliage*



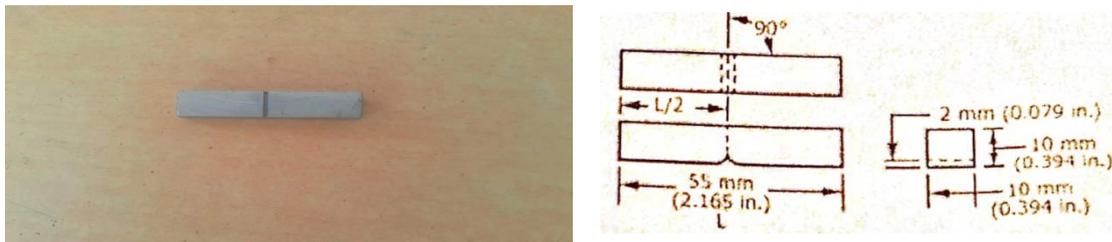
*Figure 5. 15 : Les éprouvettes après l'essai de pliage*

### 7.3. Essai de résilience :

Pour l'essai de résilience, on a utilisé des éprouvettes dont les dimensions sont normalisées, selon la norme API 5L.

On a pris trois éprouvettes entaillé en V. L'essai était réalisé à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  Afin de simuler les conditions de soudage des pipelines selon la norme ASTM A 370.

Pour cette essai nous avons choisie trois éprouvettes de « tube API 5L X60 » soudée avec SMAW, GTAW et GMAW.



*Figure 5. 16 : éprouvette de résilience avec ses dimensions selon la norme ASTM A 370.*

L'essai est réalisé à une température de ( $0^{\circ}\text{C}$ ) afin de simuler les conditions d'utilisation des pipelines. Aussi, des températures basses réduisent l'allongement à la rupture ce qui conduit à la fragilisation du métal.



*Figure 5. 17 : machine de résilience.*



*Figure 5. 18 : Des éprouvettes de résilience après la rupture.*

### 8. Résultats et discussions :

#### 8.1. Introduction :

Nous discutons dans ce chapitre les différents résultats relatifs aux essais mécaniques appliqués sur le joint soudé d'acier API 5 L. le but de cette recherche est d'estimer l'influence des modes de soudage sur les propriétés mécaniques des éprouvettes d'acier API 5L sur trois types de soudage TIG, EE, MAG selon les normes API 5L et ASTM A 370 par les essais expérimentaux suivants :

- L'essai de traction
- L'essai de pliage
- L'essai de résilience

#### 8.2. Résultats d'essais de traction :

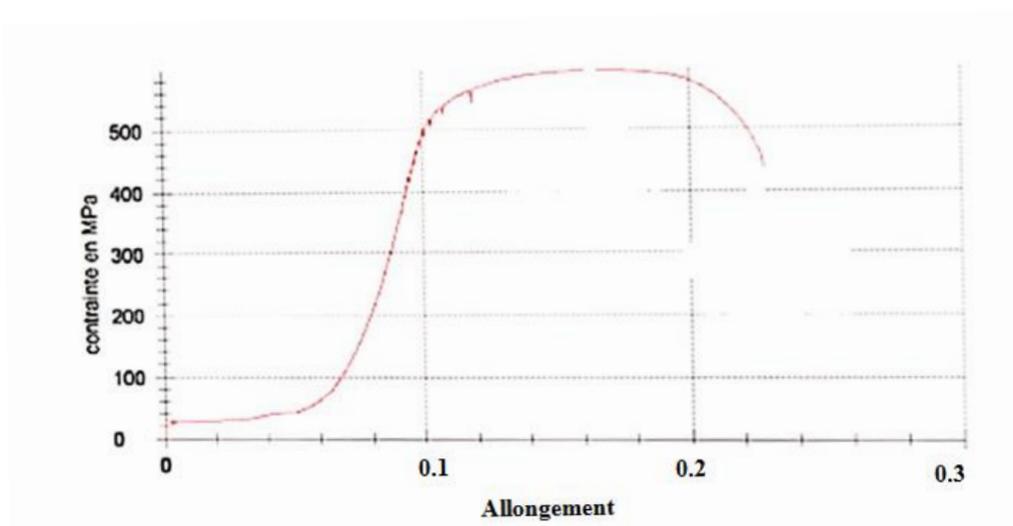
##### 8.2.1. Caractérisation des joints des soudures :

Pour caractériser les joints des soudures nous effectuons un essai de traction aux éprouvettes soudées, avec les paramètres suivants :

*Tableau 5. 14 : Les paramètres de soudage des éprouvettes de caractérisations.*

Procédé de soudage	MB	MA	Ep (mm)	Polarité
TIG	API 5L	Baguette acier SG2	10	CC, direct
EE	API 5L	E6010	10	Direct
MAG	API 5L	Fil plein	10	Direct

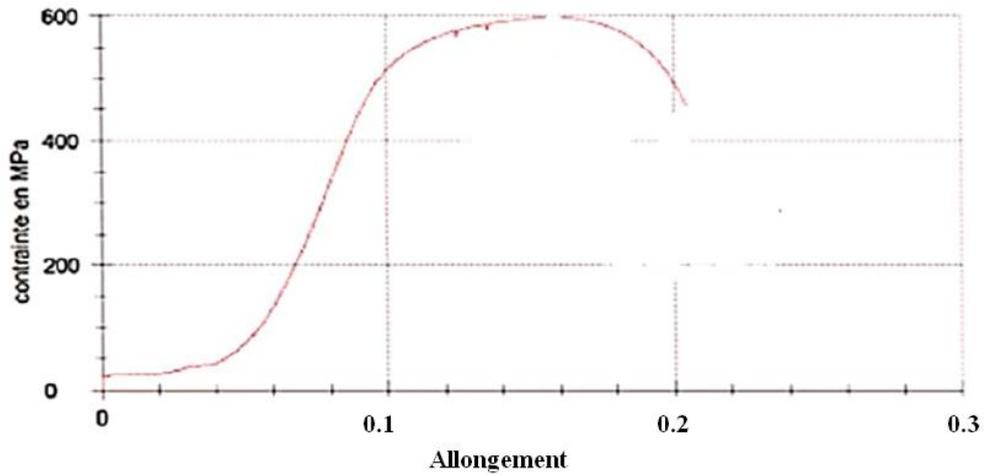
Les essais de traction menés, ont permis d'obtenir les courbes allongements/contraintes représentées dans les figures et tableaux suivantes :



*Figure 5. 19 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par MAG*

*Tableau 5. 15 : Résultats pour l'éprouvette soudée par MAG*

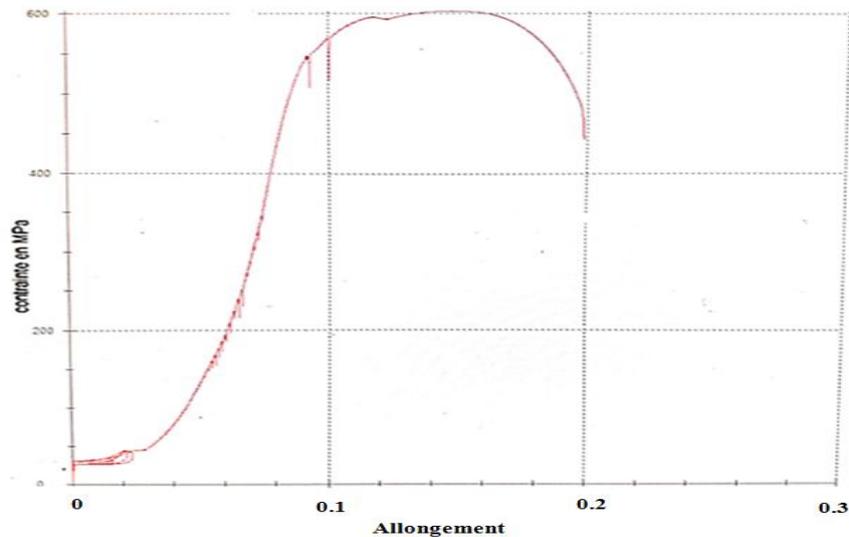
Légende	Nr	Rm MPa	Rb MPa	A0 mm	B0 mm	S0 mm	A %
	1	591	426	7	38	266.00	31.80



*Figure 5. 20 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par EE*

*Tableau 5. 16 : Résultats pour l'éprouvette soudée par EE*

Légende	Nr	Rm MPa	Rb MPa	A0 mm	B0 mm	S0 mm	A %
	2	599	442	7	38	266.00	31.80



*Figure 5. 21 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée par TIG*

*Tableau 5. 17 : Résultats pour l'éprouvette soudée par TIG*

Légende	Nr	Rm MPa	Rb MPa	A0 mm	B0 mm	S0 mm	A %
	3	601	450	7	38	266.00	31.80

### 8.2.2. Interprétation :

On remarque que l'allongement élastique dans le graphe de courbe de traction de TIG (figure 5.21) est beaucoup plus important que l'allongement normal.

Dans cet essai on remarque que les résultats (EE, TIG, MAG) sont presque les mêmes résistances maximale de traction.

### 8.3. Résultats d'essais de pliage :

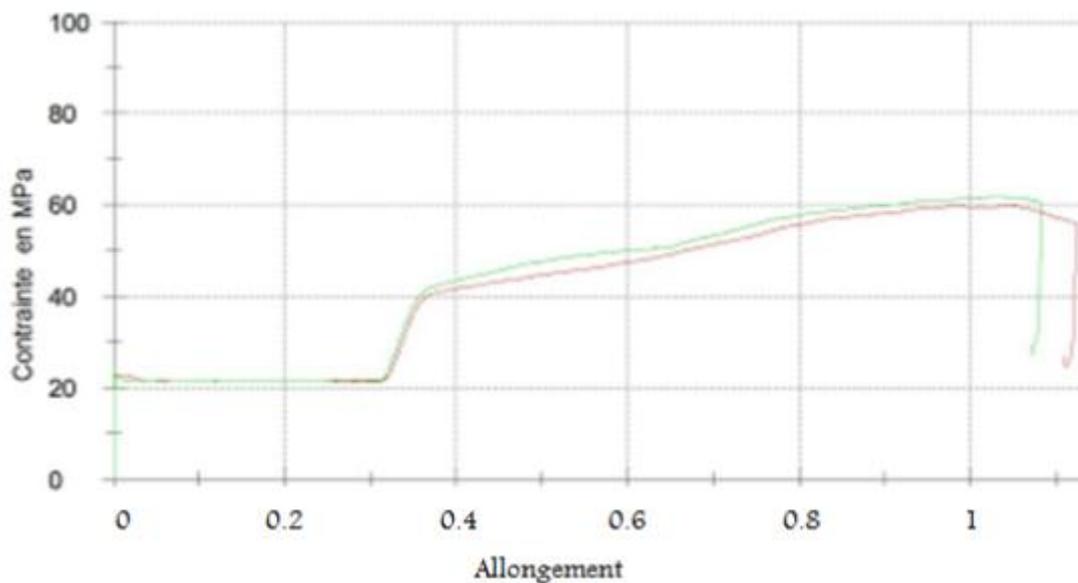
#### 8.3.1. Caractérisation des joints des soudures :

Pour caractériser les joints des soudures nous effectuons un essai de pliage aux éprouvettes soudées, avec les paramètres suivants :

*Tableau 5. 18 : Les 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

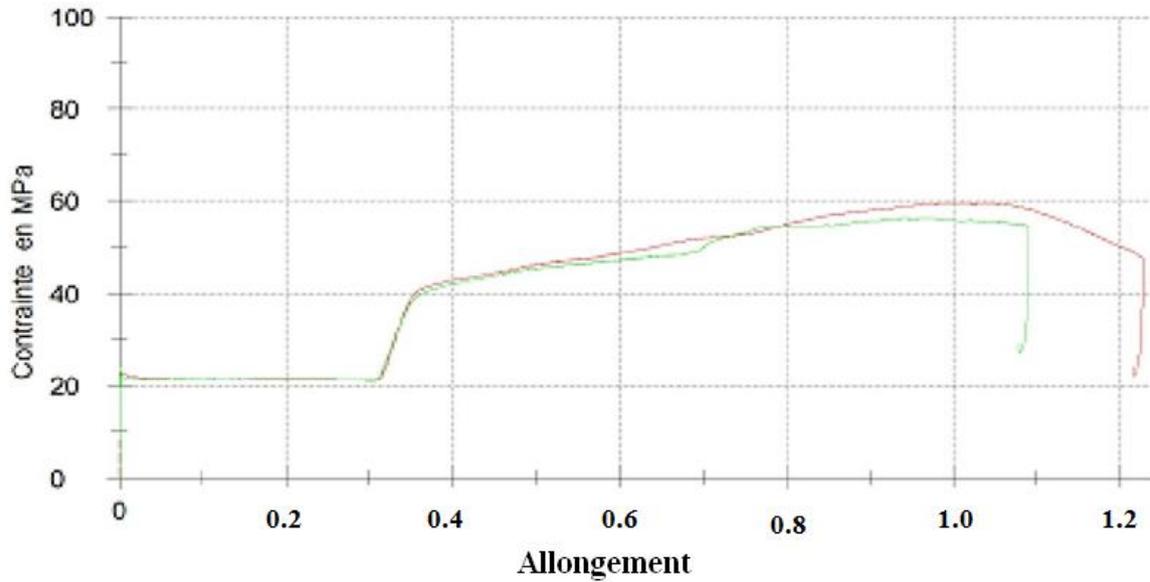
Les essais de pliage menés, ont permis d'obtenir les courbes allongements/contraintes représentées dans les figures et tableaux suivantes :



*Figure 5. 22 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes EE*

**Tableau 5. 19 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes EE**

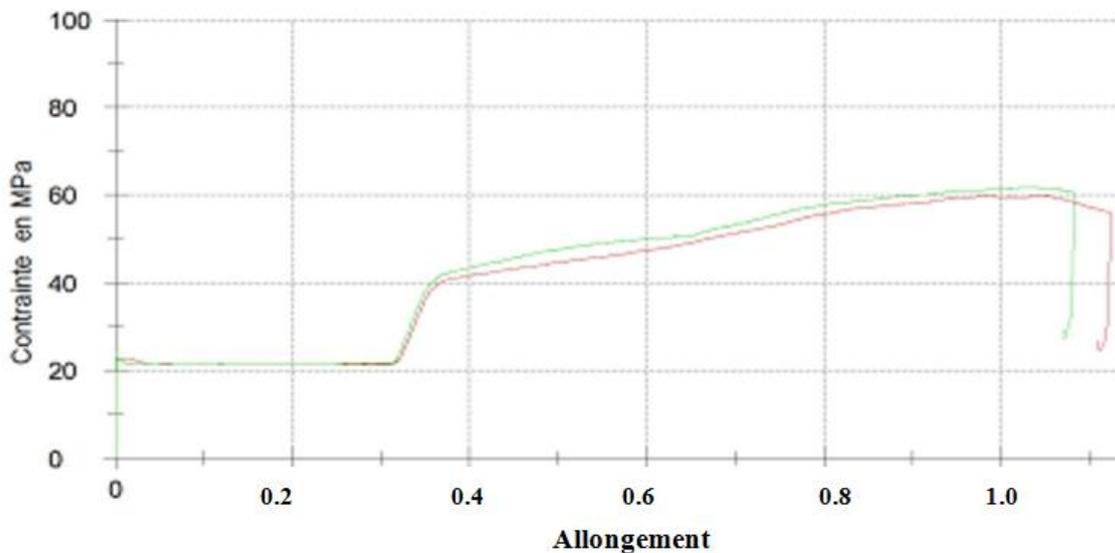
Légende	Nr	Rm (MPa)	a0 (mm)	b0 (mm)	S0 (mm2)
<span style="color: red;">■</span>	1	59.5	7.1	38	269.8
<span style="color: green;">■</span>	2	60.7	7.1	38	269.8



**Figure 5. 23 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes de MAG**

**Tableau 5. 20 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes de MAG**

Légende	Nr	Rm (MPa)	a0 (mm)	b0 (mm)	S0 (mm2)
<span style="color: red;">■</span>	1	59.1	7.1	38	269.8
<span style="color: green;">■</span>	2	53.3	7.1	38	269.8



**Figure 5. 24 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes de TIG**

*Tableau 5. 21 : Résultats de l'essai de pliage pour les éprouvettes de TIG*

Légende	Nr	Rm (MPa)	a0 (mm)	b0 (mm)	S0 (mm <sup>2</sup> )
	1	59.7	7.1	38	269.8
	2	61.1	7.1	38	269.8

### 8.3.2. Interprétation :

On remarque que l'allongement élastique dans les trois graphes est beaucoup plus important que l'allongement normal. Parce-que cet essai met notre structure matérielle dans des conditions sévères, c'est pourquoi la rencontre de fissures est très courante, et les mesurer déterminera la conformité ou que nos produits ne suivent pas les normes de qualité de l'entreprise.

Dans notre cas, aucune fissure évidente n'est observée, ce qui prouve la conformité du nos échantillons.

On remarque qu'il y'a un avantage de cordon soudure de TIG et EE par rapport le cordon de MAG.

### 8.4. Résultats d'essais de résilience :

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

*Tableau 5. 22 : paramètres et résultats de l'essai de résilience*

Types de soudage	Dimensions	Surface (cm <sup>2</sup> )	Energie moyenne (J)	Résilience (J/cm <sup>2</sup> )
TIG	55x10x5	0.40	93.2	233.33
EE	55x10x5	0.40	87.8	221.4
MAG	55x10x5	0.40	81.9	204.7

#### 8.4.1. Interprétation :

L'essai est réalisé à une température de (0°C) afin de simuler les conditions d'utilisation des pipelines. Aussi, des températures basses réduisent l'allongement à la rupture ce qui conduit à la fragilisation du métal.

Pour concentrer les contraintes et donner un sens de propagation de la fissure, on a opté à l'entaille en V afin d'optimiser nos résultats.

On remarque dans ce tableau que la résistance à la résilience de cordon soudure de MAG est beaucoup faible que les deux autres cordons.

## Conclusion générale

Lors de la réalisation du projet de fin d'étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence du mode de soudage sur les joints de soudure sur un acier API 5L. Nous avons choisi trois modes de soudage les plus utilisés dans le soudage des pipelines ; soudage à l'arc manuel (SMAW) pratiqué généralement pour le soudage sur chantier, soudage à électrode non fusible de tungstène (TIG) utilisé généralement pour le soudage des petits diamètres que ce soit sur chantier ou atelier de préfabrication et le soudage à l'arc sous flux (MIG-MAG) utilisé généralement pour le soudage dans les ateliers de préfabrication.

Pour réaliser notre travail nous avons préparé trois échantillons de tubes pour être soudés par les trois procédés de soudage cités ci-dessus. Les éprouvettes ont été découpées afin de réaliser les essais destructifs (traction, pliage et résilience) et pour mieux connaître leurs caractéristiques mécaniques.

Les différents essais de comportement en traction, la résilience et la résistance au pliage montrent que les propriétés mécaniques sont convenables et sont supérieures aux valeurs nominales minimales indiquées par les normes internationales et aux exigences des clients.

Cependant, les modes ou procédés de soudage étudiés peuvent être indiqués pour le soudage des pipelines selon la possibilité et la praticabilité d'exécution et les coûts qui peuvent être engendrés.

Le procédé MMA est conseillé pour le soudage sur chantiers. Il permet de souder des pièces d'épaisseur de 2 mm et plus et offre un confort d'utilisation optimal couplé à une économie d'énergie indéniable. Facile d'utilisation, en intérieur et extérieur et dans toutes positions.

Le procédé MIG-MAG semi-automatique est conseillé au soudage pour grosses productions. Le MIG-MAG offre un éventail d'utilisation très large (plage d'épaisseurs, soudage dans toutes les positions, vitesse très élevée, procédé automatisable). Le travail en extérieur est difficile.

Le procédé TIG est le Must du procédé de soudage, mais également le plus difficile à maîtriser. Il offre une qualité de soudure exceptionnelle avec l'avantage de ne pas déformer les tôles. Travail difficile en extérieur et lenteur du procédé, ce type de procédé est conseillé pour la réalisation des ouvrages fins qui nécessitent une soudure parfaite.

Durant l'élaboration de notre projet de fin d'étude nous avons établis plusieurs étapes, pour réaliser des différentes éprouvettes, l'assemblage s'est fait selon trois types de soudage ainsi que les différents essais.

Nous avons admis aux différents résultats qui nous ont permis de faire une comparaison entre les différents procédés de soudage et d'en ressortir le moyen le plus approprié.

Nous avons constaté que le procédé TIG nous donne de meilleurs résultats suivis avec une légère marge d'électrode enrobée, par contre le procédé MAG à donner des résultats moins concluants.

## Référence bibliographique

[1]: G.Beranger, G.sanz, (livre de l'acier), Ed.SOLLAC, 1996

[2]: A.roos, B.milet, (précis de métallurgie appliqué), Edition technique documentation, Lavoisier 1982.

[3]: S.Bounoua, mémoire (effets de traitement thermique sur les propriétés mécaniques des assemblages soudés), université de Tlemcen 2019.

[4]: J.paul Bailon, J.Marie Dolort, (Des matériaux) 3 ème édition, école de polytechnique de MTL, 2001-2002.

[5]: J.Barralis, G.maeder, (METTALURGIE "élaboration, structures-propriétés, normalisation") 2002, (bibliothèque d'université de Tlemcen).

[6]: API 5L, disponible sur : <http://olympiatubes.com/grades/api-5l-tuyau-de-canalisation/?lang=fr#:~:text=La%20norme%20de%20sp%C3%A9cification%20API,1%27eau%20et%20du%20p%C3%A9trole> le 28/02/2022.

[7]: API, disponible sur :

<https://www.google.com/url?sa=D&q=https://www.laboratuvar.com/fr/testler/metal-test-laboratuvari/api-5l-boru-muayene-ve-testi/&ust=1649569500000000&usg=AOvVaw07LBhLLrI0m6NF-65FZdtb&hl=fr&source=gmail> le 28/02/2022.

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

[9] : disponible sur : <https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/e-hand-grundlagen.htm> Le 07/03/2022

[10] : MIG-MAG, disponible sur : <https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/mig-mag-welding/> Le 07/03/2022

[11] : disponible sur : <https://www.rocdacier.com/cours-soudure-tig/> Le 07/03/2022

[12] : disponible sur : <https://industrie.airliquide-benelux.com/belgique-luxembourg/soudage-coupage-coating/soudage-plasma> Le 07/03/2022

[13] : Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage, Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2010

[14] : MERSEDEH SAFA, Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales Matériaux Groupe de formation technique.

[15] : CSMOFMI. Soudage et assemblage Guide d'auto-apprentissage, p.8, Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle, 2010.

[16] : dureté, Disponible sur : <https://www.pce-france.fr/mesureurs/links/explication-mesuredurete.htm>, le 02/04/2022.

[17] : soudage, Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/mise-en-forme-des-metaux-aspects-mecaniques-et-thermiques42348210/soudage-et-soudabilite-metallurgique-des-metaux-m715/>, le 01/04/2022

[18] : disponible sur : <http://joho.monsite.orange.fr/> (Les essais.doc).

[19] : Michel Bramat, (Technologie des métaux, contrôles et essais des soudeurs) de Boeck (bibliothèque d'université de Tlemcen)

[20] : Machine d'essai de dureté, disponible sur : <https://www.andre-laurent.fr/x-portfolio/machine-dessais-de-durete/> le 09/04/2022

[21] : dispositif d'essai de flexion, disponible sur : [https://www.instron.com/fr-fr/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures](https://www.instron.com/fr/fr/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures), le 30/04/2022.

[22] : essai de flexion : disponible sur : <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-flexion/>, le 30/04/2022

[23] : B.Redjel, S.Benmedakhen, les pratiques des essais destructifs : essai de flexion, université d'Annaba.

[24] : Fateh Aggoun ; Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation ; Thèse de Magister en Génie Mécanique option : Mécanique Appliquée en Engineering ; 2010

[25] : Djdid Ibrahim ; étude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZ1 ; Mémoire de master en génie mécanique option maintenance industriel ; Université Tlemcen ; 2013.

[26] : Henry liu ; pipeline engineering ; 2003

[27] : Mechernene Abderrahim ; Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipeline ; Mémoire de master en Génie Mécanique Option Ingénierie des systèmes mécaniques productives ; Université Tlemcen 2013.

[28]: API specification 51 forty-third edition, 49 CFR 192.113, MARCH 2004

[29]: Lucinda Jeanette Smart; Review of materials property data for nondestructive Characterization of pipeline materials; Graduate Theses and Dissertations; Iowa State University ; 2015

[30] : BENCHADLI ISMAIL ; Détermination des différents critères de qualité des joints soudés sur les pipelines en service ; Université Tlemcen 2017.

[31] : Métallurgie de soudage ; M.HADJOUI Féthi ; cours de master 1 assemblage soudée et matériaux ; université de Tlemcen 2021.

[32]: Henry liu; pipeline engineering; 2003.

[33]: API 5L X60, Disponible sur: <https://www.wldsteel.com/fr/product/api-5l-x60-line-pipe/>

[34]: AFNOR, API specifications 5L pour ALTUMET (ANABIB), avril 2018, laboratoire mécanique d'ANABIB