

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université

Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de génie de la construction

Département de génie mécanique



Master II Académique

Génie mécanique

Option: Science des matériaux

# MEMOIRE

De fin d'études

*Thème*

*Analyse structurale de l'acier  
XC42 du point de vue fissuration  
à froid en soudage*

Dirigé par:

Mr. S. FILALI

Réalisé par:

BOUGUERRA YUCEF

BOURAHLA SAID

*Promotion 2017*

# *Remerciements*

*Tout d'abord et avant toute chose on remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la patience pour mener à bien et achever ce travail.*

*On tient à remercier vivement dans un premier temps notre encadreur Mr Filali de nous avoir gracieusement fait bénéficier tout au long de ce travail de ses précieuses connaissances et de sa longue expérience dans le domaine du soudage et qui sans son aide et conseils, l'accomplissement du projet n'aurait pas été possible.*

*On adresse également nos remerciements les plus sincères à Mr Abtouche et Mr Debiane, qui malgré leurs responsabilités ont bien voulu s'intéresser à notre travail et apporter toute l'aide nécessaire à sa réalisation.*

*On tient aussi à remercier les membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner et juger notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi au personnel du laboratoire SDM pour son accueil, sa disponibilité et toute sa contribution à la réalisation de notre travail.*

*Qu'ils trouvent tous, ici, l'expression de notre profonde gratitude.*

<b>Sommaire</b>	<b>page</b>
Nomenclature.....	
Liste des figures.....	
Liste des Tableaux.....	
<b>Introduction générale</b> .....	(1)
<b>Chapitre I : Les aciers</b>	
I.1 Introduction.....	(3)
I.2 Définition.....	(3)
I.3 Classification et désignations des aciers.....	(3)
I.3.1 Selon la teneur en carbone.....	(3)
I.3.2 Selon la composition chimique .....	(4)
a. Aciers non alliés.....	(4)
b. Aciers faiblement alliés.....	(5)
c. Aciers fortement alliés.....	(7)
I.3.3 Selon le mode d'emploi.....	(8)
I.4 Diagramme d'équilibre Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	(10)
I.4.1 Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	(11)
I.5 Tubes en aciers des pipelines.....	(11)
I.5.1 Définition.....	(11)
I.5.2 Fabrication des tubes.....	(12)
a. Fabrication des tubes sans soudures.....	(13)
b. Fabrications des tubes soudés.....	(13)
b <sub>1</sub> . Tubes soudés longitudinalement.....	(13)

b <sub>2</sub> . Tubes soudés en spirale.....	(13)
I.6 Aciers utilisés pour pipelines.....	(14)
I.6.1 Spécification et propriétés.....	(14)
I.6.2 Composition chimique.....	(15)
I.6.3 Caractéristique mécaniques des aciers API.....	(16)

## **Chapitre II : Soudage**

II.1 Définition du Soudage.....	(17)
II.2 Préparation des joints de soudures.....	(17)
II.3 Positions de soudage.....	(18)
II.4 Soudabilité.....	(19)
II.4.1 Définition.....	(19)
a. La Soudabilité métallurgique.....	(19)
b. La soudabilité globale ou constructive.....	(20)
c. La soudabilité opératoire ou relative.....	(20)
II.4.2 Soudabilité des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés.....	(20)
II.4.3 Carbone équivalent C <sub>eq</sub> d'après l'IIS.....	(21)
II.4.4 Coefficient de soudabilité (S).....	(21)
II.4.5 Influence des éléments d'additions.....	(23)
II.4.6 Soudabilité des aciers inoxydables.....	(24)
II.5 Procédés de soudage des métaux.....	(25)
II.5.1 Soudage à la poche .....	(25)
II.5.2 Soudage à la forge.....	(25)
II.5.3 Soudage à la flamme.....	(25)

II.5.4 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.....	(25)
II.5.5 Soudage à l'arc électrique sous flux pulvérulent.....	(25)
II.5.6 Soudage TIG.....	(25)
II.5.7 Soudage A-TIG.....	(26)
II.5.8 Soudage au plasma.....	(26)
II.5.9 Soudage MIG.....	(26)
II.5.10 Soudage MAG.....	(26)
II.5.11 Soudage au fil fourré.....	(26)
II.5.12 Soudage par effet Joule sous flux protecteur.....	(26)
II.5.13 Soudage par résistance.....	(27)
II.5.14 Soudage par étincelage.....	(27)
II.5.15 Soudage par décharge de condensateur.....	(27)
II .5.16 Soudage par faisceau d'électrons.....	(27)
II.5.17 Soudage par faisceau laser.....	(27)
II.5.18 Soudage par ultrasons.....	(27)
II.5.19 Soudage par aluminothermie.....	(28)
II.5.20 Soudage par friction.....	(28)
II.6 Procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	(28)
II.6.1 Description du procédé.....	(28)
II.6.2 Installation du procédé de soudage à l'arc avec l'électrode enrobée.....	(28)
II.6.3 Type de Soudeuse et de courant.....	(29)
II.6.4 L'électrode enrobée.....	(29)
a. Caractéristiques de l'électrode.....	(30)

a.1 Âme métallique.....	(30)
a.2 Enrobage.....	(30)
b. Étuvage des électrodes enrobées.....	(32)
c. Rôles de l'enrobage.....	(32)
c1. Rôle électrique.....	(32)
c2. Rôle métallurgique.....	(32)
c3. Rôle mécanique.....	(33)
d. Fusion de l'électrode.....	(33)
d1. Constante de fusion.....	(33)
d2. Pertes de fusion.....	(33)
d3. Rendement.....	(34)
d4. Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire.....	(34)
e. Caractéristiques mécaniques et métallurgiques.....	(35)
II.6.5 Domaines d'applications.....	(35)
II.7 Paramètres de soudage.....	(36)
II .7.1 Energie de soudage.....	(36)
II.7.2 Relation entre énergie dissipée et énergie équivalente.....	(37)
II.7.3 Choix des paramètres.....	(37)
a. Temps de refroidissement $t_{r\ 850/ 500}$ .....	(37)
a1. Détermination du temps de refroidissement $tr_{850/ 500}$ .....	(38)
b. Epaisseur critique $\delta_c$ .....	(38)
II.8 Cycle thermique de soudage.....	(39)
II.9 Répartition thermique.....	(40)

II.10 Métallurgie du soudage.....	(43)
II.10.1 Différentes zones d'une soudure.....	(43)
II.10.2 Modifications structurales dans cordon de soudure .....	(44)
II.10.3 Diagramme TRC.....	(45)
II.11 Défauts de soudures.....	(47)
II.11.1 Fissurations.....	(47)
a. Fissuration à chaud.....	(47)
b. Fissuration à froid.....	(48)
II.11.2 Soufflures.....	(48)
II.11.3 Retassures et criques de solidification.....	(49)
II.11.4 Morsures et caniveaux.....	(49)

### **Chapitre III : Modélisation des transformations métallurgiques**

III.1 Différentes transformations de phases en TRC.....	(50)
III.1.1 Transformation austénitique.....	(50)
a. Au chauffage.....	(50)
b. Au refroidissement.....	(50)
III.1.2 Transformation ferritique.....	(51)
III.1.3 Transformation martensitique.....	(51)
III.1.4 Transformation perlitique.....	(52)
III.1 .5 Transformation bainitique.....	(53)
a. Bainite supérieure.....	(53)
b. Bainite inferieure.....	(53)

III.7 Critères de soudabilité.....	(55)
a. En soudage mono passe.....	(55)
b. En soudage multi passe.....	(55)
III.8 Application pour l'optimisation des paramètres de soudage.....	(55)
III.8.1 Définition.....	(55)

## **Chapitre IV : Partie expérimentales**

IV.1 Matériaux d'étude.....	(57)
a. Métal de base.....	(57)
b. Métal d'apport.....	(58)
IV.2 Propriétés mécaniques du couple métal de base/ métal d'apport.....	(58)
a. Métal de base.....	(58)
b. Métal d'apport.....	(59)
IV.3 Procède de soudage.....	(59)
IV. 4 Algorithme de calcul des taux de phases présents dans la ZAT.....	(61)
IV. 5 Essais mécaniques.....	(64)
a. Essais de traction.....	(64)
b. Essai de dureté.....	(67)
IV. 6 Analyse métallographique.....	(70)
a. Prélèvement des échantillons.....	(71)
b. Polissage et attaque chimique.....	(71)
c. Observation.....	(71)
c1. Microstructure du métal de base.....	(71)
c2. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec E <sub>1</sub> .....	(72)

c3. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec E <sub>2</sub> .....	(73)
c4. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec E <sub>3</sub> .....	(74)
c5. Micrographie de l'échantillon en soudage multi-passe.....	(75)
<b>Conclusion générale</b> .....	(77)
<b>Bibliographiques</b> .....	(78)
<b>ANNEXES 1 : Présentation des Entreprises « GTP » et « KANA GAZ »</b>	
<b>ANNEXES 2 : Paramètres de soudage pratique</b>	

## Nomenclature

**HLE** : Les aciers à haute limite élastique.

**HSLA**: High Strength Low Alloy.

**API** : Institut Américain du Pétrole.

**5 L** : Spécification pour le pipeline.

**X** : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance :

- Le chiffre après le "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Par exemple X70 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (485 MPa).

**PSL** : Pipes Steel Line

- **PSL1** : Pipes Steel Line (tube de conduite)
- **PSL2** : Pipes Steel Line (tube de produit)

**SAEE ou SMAW** : Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

**IIS** : Institut International de Soudure

**C<sub>éq</sub>** : carbone équivalent

**C<sub>éc</sub>** : carbone équivalent compensé

**S** : Coefficient de soudabilité

**E<sub>s</sub>** : Energie de soudage [j / cm]

**E<sub>n</sub>** : Energie nominale [j / cm]

**U<sub>s</sub>** : Tension de soudage [V]

**I<sub>s</sub>** : Intensité de courant [A]

**V<sub>s</sub>** : Vitesse de soudage [cm / mn]

**E<sub>d</sub>** : Energie dissipée [j / cm]

**η** : Rendement d'arc

**$t_{r850/500}$**  : Temps de refroidissement [s]

**$t_{r2d}$**  : Temps de refroidissement en écoulement bidimensionnel [s]

**$t_{r3d}$**  : Temps de refroidissement en écoulement tridimensionnel [s]

**$\rho$**  : Masse volumique [ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ]

**$C_p$**  : Capacité calorifique [ $\text{J}/\text{g} \text{ } ^\circ\text{C}$ ]

**$T_0$  ou  $T_P$**  : température de préchauffage

**$F_1, F_2, F_3$**  : facteur de forme

**$\delta$**  : Epaisseur [cm]

**$\delta_c$**  : Epaisseur critique [cm]

**$T_m$  ou  $\theta_m$**  : Température maximale atteinte

**$y_0$**  : Position d'un point A

**TRC** : Transformation au refroidissement continu.

**$\Phi$**  : représente l'intégrale de fonction exponentielle de répartition normale

**F %** : Taux de ferrite en pourcentage

**$F_{\max}$**  : Taux maximale de la ferrite

**$t_F$**  : le temps de la germination de la ferrite [s]

**M %** : Taux de martensite en pourcentage

**$t_M$**  : le temps de la germination de la martensite [s]

**P %** : Taux de perlite en pourcentage

**FP %** : Taux de ferrite-perlite en pourcentage

**$t_{FP}$**  : le temps de la germination de ferrite-perlite [s]

**B%** : Taux de bainite en pourcentage

**$t_B$**  : Le temps de germination de la bainite [s]

$x$  :  $(\ln t_r - \ln t_F) / \ln S_F$

$x_1$  :  $(\ln t_r - \ln t_M) / \ln S_M$

$x_2$  :  $(\ln t_r - \ln t_{FP}) / \ln S_{FP}$

$E_{inf}$  : Energie soudage minimal [j / cm]

$E_{sup}$  : Energie soudage maximal [j / cm]

$E_{2d inf}$  : Energie soudage minimal en écoulement bidimensionnel [j / cm]

$E_{3d inf}$  : Energie soudage minimal en écoulement tridimensionnel [j / cm]

$E_{2d sup}$  : Energie soudage maximal en écoulement bidimensionnel [j / cm]

$E_{3d sup}$  : Energie soudage maximal en écoulement tridimensionnel [j / cm]

$e_r$  : Epaisseur réel [cm]

$e_{c1}$  : Epaisseur critique pour Energie soudage minimal en écoulement bidimensionnel [cm]

$e_{c2}$  : Epaisseur critique pour Energie soudage minimal en écoulement tridimensionnel [cm]

$e_{c3}$  : Epaisseur critique pour Energie soudage maximal en écoulement bidimensionnel [cm]

$e_{c4}$  : Epaisseur critique pour Energie soudage minimal en écoulement tridimensionnel [cm]

$t_{rinf}$  : Temps de refroidissement minimal [s]

$t_{rsup}$  : Temps de refroidissement maximal [s]

$R_m$  : résistance à la rupture [Mpa]

$R_e$  : Limite d'élasticité [Mpa]

$A$  : Allongement [%]

$\eta$  = Rendement effectif thermique du procédé SMAW

$\emptyset$  = diamètre de l'électrode [mm]

$Hv_{30}$  : La dureté Vickers pour charge d'essai "F" (30 N)

<b>Liste des figures</b>	<b>page</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>Figure I.1</b> : Diagramme d'équilibre Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	(10)
<b>Figure I.2</b> : Pipelines.....	(12)
<b>Figure I.3</b> : Microstructure des aciers de pipeline.....	(14)
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure II.1</b> : les différents joints de soudure.....	(18)
<b>Figure II.2</b> : Réalisation d'un chanfrein en V.....	(18)
<b>Figure II.3</b> : Positions de soudage.....	(19)
<b>Figure II.4</b> : courbe de coefficient de soudabilité S en fonction du % de carbone.....	(21)
<b>Figure II.5</b> : Soudage à l'électrode enrobée : croquis du dispositif.....	(29)
<b>Figure II.6</b> : Électrode enrobée : caractéristiques.....	(30)
<b>Figure II.7</b> : Fusion des électrodes.....	(34)
<b>Figure II.8</b> : Cycle thermique : courbe (température – temps $T=f(t)$ ).....	(40)
<b>Figure II.9</b> : Répartition thermique : courbe (température – distance).....	(41)
<b>Figure II.10</b> : Cycle thermique du soudage multi passe.....	(42)
<b>Figure II.11</b> : Différentes zones d'une soudure.....	(44)
<b>Figure II.12</b> : Modification structurale de la ZAT.....	(44)
<b>Figure II.13</b> : Diagramme TRC (Transformation au refroidissement continu) de X42....	(46)
<b>Chapitre III</b>	
<b>Figure III.1</b> : Microstructures bainitique.....	(54)

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> : Tubes en acier X42 utilisés dans l'opération de soudage.....	(57)
<b>Figure IV.2</b> : Dimensions du chanfrein en V.....	(59)
<b>Figure IV.3</b> : Diagramme des phases présentes dans la ZAT en fonction de $tr_{850/500}$ en soudage.....	(63)
<b>Figure IV.4</b> : Machine de traction.....	(65)
<b>Figure IV.5</b> : Courbe de traction ( $\sigma$ - $\epsilon$ ).....	(66)
<b>Figure IV.6</b> : État des éprouvettes avant et après la traction.....	(67)
<b>Figure IV.7</b> : Méthode de mesure de dureté.....	(67)
<b>Figure IV.8</b> : Courbe de dureté en soudage mono-passe $E_1$ .....	(68)
<b>Figure IV.9</b> : Courbe de dureté en soudage mono-passe $E_2$ .....	(68)
<b>Figure IV.10</b> : Courbe de dureté en soudage mono-passe $E_3$ .....	(69)
<b>Figure IV.11</b> : Courbe de dureté en soudage multi-passe.....	(69)
<b>Figure IV.12</b> : Micrographie du métal de base grossissement 400.....	(71)
<b>Figure IV.13</b> : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec $E_1$ .....	(72)
<b>Figure IV.14</b> : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec $E_2$ .....	(73)
<b>Figure IV.15</b> : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec $E_3$ .....	(74)
<b>Figure IV.16</b> : Micrographie de l'échantillon en soudage multi-passe.....	(75)

# Liste des Tableaux

page

## Chapitre I

<b>Tableau I.1:</b> Classification des aciers selon la teneur en Carbone.....	(3)
<b>Tableau I.2:</b> Quelques propriétés mécaniques des aciers non alliés .....	(4)
<b>Tableau I.3:</b> Facteur de teneurs des éléments d'alliages.....	(5)
<b>Tableau I.4:</b> Quelques propriétés mécaniques des aciers faiblement alliés.....	(6)
<b>Tableau I.5:</b> Quelques propriétés mécaniques des aciers fortement alliés.....	(7)
<b>Tableau I.6 :</b> Désignation des aciers selon leur emploi.....	(8)
<b>Tableau I.7 :</b> Quelques propriétés mécaniques des aciers d'usage général .....	(9)
<b>Tableau 1.8 :</b> Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés) .....	(15)
<b>Tableau I.9 :</b> Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés) .....	(15)
<b>Tableau I.10 :</b> Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1).....	(16)
<b>Tableau I.11 :</b> Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2).....	(16)

## Chapitre II

<b>Tableau II.1 :</b> Influence du $C_{\text{éq}}$ sur l'indice de soudabilité.....	(22)
<b>Tableau II.2 :</b> Consommation des électrodes en fonction du diamètre.....	(35)
<b>Tableau II.3 :</b> Rendements thermiques effectifs des procédés $\eta$ .....	(37)

## Chapitre IV

<b>Tableau IV.1:</b> Composition chimique du métal de base X42.....	(57)
<b>Tableau IV.2 :</b> Composition chimique de l'électrode E6010.....	(58)
<b>Tableau IV.3 :</b> Composition chimique de l'électrode E7018.....	(58)
<b>Tableau IV.4:</b> Caractéristiques mécaniques de l'acier X42.....	(58)

<b>Tableau IV.5:</b> Caractéristiques mécaniques des 2 classes d'électrodes.....	(59)
<b>Tableau IV.6 :</b> Paramètres utilisés dans le soudage mono-passe.....	(60)
<b>Tableau IV.7 :</b> Paramètres utilisés dans le soudage multi-passe.....	(60)
<b>Tab IV.8 :</b> Les proportions de phases présente dans la ZAT pour $tr_{inf}$ et $tr_{sup}$ .....	(64)
<b>Tab IV.9 :</b> Résultats de l'essai de traction.....	(66)

# **Introduction générale**

# Introduction générale

**L**e développement rapide des techniques modernes a provoqué simultanément l'évolution des procédés et matériels de soudage ainsi que celle des produits d'apport. Ceci permet aujourd'hui de maîtriser les problèmes de soudabilité métallurgiques (problème de fissuration à froid et fissuration à chaud) intervenant en soudage et d'assurer une parfaite continuité métallique des assemblages soudés. Tout ceci a rendu possible le montage de toute une gamme d'équipements, d'infrastructures et de production qui touchent à divers domaines industriels (constructions navales, pipelines, tour de forage en mer, constructions aéronautiques...etc.).

Malgré les progrès atteints dans ce domaine de perfectionnement, les constructions soudées, sont souvent sujettes aux phénomènes qui risquent de les endommager. Il s'agit principalement des fissurations à froid (mouvement dynamique des structures) qui se manifestent pendant ou après le soudage, qui altèrent grandement le bon fonctionnement des organes.

Ces risques sont généralement causés par des facteurs susceptibles d'être contrôlés (taux de Martensite, contraintes résiduelles, teneur d' $H_2$  diffusible) par des régimes adéquats.

À cet égard, pour épargner donc aux assemblages soudés tout risque de fissuration, une analyse structurale préliminaire s'impose qui fera l'objet d'une étude rigoureuse dans ce projet. Cette étude regroupera tout ce qui est utile de savoir sur la soudure (essai de traction, essai de dureté, micrographie) pour juger et attester si cette dernière est conforme aux critères. Et pour étoffer ce travail, un programme informatique en langage matlab a été développé pour prédéterminer les constituants de la zone à gros grains (ZAT). Dans le but d'optimiser les paramètres de soudage et de déterminer donc la plage de travail

assurant des soudures fiables on se sert dans ce programme de relations empiriques préétablies conditionnées par des critères évoqués dans le contexte de soudabilité métallurgique (50% de Martensite et taux critique de Bainite faisant la grosseur du grain).

Afin de bien traiter le sujet et apporter des clarifications sur la problématique posée, le travail est divisé principalement en 2 grandes parties :

- la 1ere est consacrée à la recherche bibliographique ; elle réunit toutes les notions théoriques et pratiques sur le soudage.
- Quant à la 2eme partie, elle s'articule sur l'expérimentation et l'interprétation des résultats.

Et enfin, le tout sera clôturé par une conclusion générale et des suggestions pour une meilleure approche de ce problème.

**Chapitre I :**

**Les aciers**

# Chapitre I : Les aciers

## I.1 Introduction

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

## I.2 Définition

L'acier est un alliage à base de fer et d'un rajout de carbone en proportions restreintes ne dépassant pas 2,1% C (limite théorique).

Au delà de cette teneur, l'alliage est nommé fonte blanche. La limite de 2,1%C est l'une des extrémités du palier eutectique du diagramme fer-Fe<sub>3</sub>C. Les carbures peuvent toujours être dissouts dans le domaine austénitique à l'inverse des fontes... [2].

## I.3 Classification et désignations des aciers (norme NF EN 10020) :

### I.3.1 Selon la teneur en carbone [3]

Tab I.1 : Classification des aciers selon la teneur en Carbone [3].

Nuance	Pourcentage de Carbone	Emploi
Extra doux	$C < 0.15$	Tôle pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge.
Doux	$0.15 < C < 0.2$	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires.
Semi-doux	$0.2 < C < 0.3$	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Semi-dur	$0.3 < C < 0.4$	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission.
Dur	$0.4 < C < 0.6$	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
Extra dur	$0.6 < C$	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

### I.3.2 Selon la composition chimique [4]

Les aciers sont groupés d'après leur composition chimique en trois classes:

1. Aciers non alliés;
2. Aciers faiblement alliés;
3. Aciers fortement alliés.

#### a. Aciers non alliés

Ces aciers sont destinés aux traitements thermiques des petites ou moyennes pièces, Ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté que les aciers d'usage général et des éléments d'addition en très faible quantité.

Les propriétés varient selon le traitement thermique appliqué.

**Applications :** Pièces forgées, rasoirs, lames forets matrice d'outillage.

**Désignation :** Ces aciers sont désignés par la lettre (C) suivi d'un chiffre représentant la teneur en carbone.

**Exemple :** GC25 acier non allié (C) et moulé (G) et possède une teneur en carbone de 0,25 %.

**Tab I.2: Quelques propriétés mécaniques des aciers non alliés [4].**

Aciers non alliés				
Nuance	Rmin (Mpa)	Re min (Mpa)	Emplois	
C22	410	255	Construction mécanique	
C25	460	285		
C30	510	315	Ces aciers conviennent au traitement thermique et au forgeage Note : Cette symbolisation ne s'applique pas aux aciers de décolletage	
C35	570	335		
C40	620	355		
C45	660	375		
C50	700	395		
C55	730	420		
C60	HRC $\geq$ 57			

## b. Aciers faiblement alliés

Par acier faiblement allié, on entend les aciers dont la teneur de la somme des éléments d'addition est inférieure à 5 % et dont la teneur en manganèse est inférieure à 1%.

**Utilisation :** Utilisés en l'état ou avec traitement thermique (cémentation, trempe dans la masse).

**Propriétés :** Les propriétés varient selon le traitement thermique et les éléments d'addition. La résistance mécanique et la résilience sont facilement améliorées.

**Applications :** Pièces mécaniques techniques qui subissent de fortes contraintes mécaniques, roulements, engrenages, arbres de transmission, axes, tiges et leviers, boulonnerie haute résistance, ressort, pièces de sécurités, pièces de frottement, gazoduc....etc.

**Désignation :** Ces aciers sont désignés par :

- Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone ;
- Les symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur ;
- Les teneurs des éléments d'alliage sont séparées par un trait d'union.
- Les teneurs des éléments d'alliage sont multipliées par un facteur (et arrondies à la valeur entière la plus proche).

Ces facteurs sont donnés dans le tableau ci-dessous :

**Tab I.3 : Facteur de teneurs des éléments d'alliages [4].**

Eléments	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
C, N, P, S	100

### Exemple :

Acier 20MoCr5 : C'est un acier allié au molybdène (Mo) et au chrome (Cr).

- La composition chimique de cet acier est donc :
- De 0,2 % carbone (C).
- De 0,05 % molybdène (Mo).
- Il y a des traces non quantifiées de chrome.
- Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'une lettre G.

**Tab I.4 : Quelques propriétés mécaniques des aciers faiblement alliés [4].**

<b>Aciers faiblement alliés</b>		
<b>Nuances usuelles</b>	<b>Traitement de référence</b>	
	<b>Rmin (Mpa)</b>	<b>Re min (Mpa)</b>
<b>38Cr2</b>	800	650
<b>34 Cr4</b>	880	660
<b>37 Cr4</b>	930	700
<b>41 Cr4</b>	980	740
<b>55 Cr3</b>	1100	900
<b>100 Cr6</b>	HRC $\geq$ 62	
<b>25 CrMo4</b>	800	700
<b>35 CrMo4</b>	980	770
<b>42 CrMo4</b>	1080	850
<b>16 CrNi6</b>	800	650
<b>17 CrNiMo61</b>	1130	880
<b>30 CrNiMo81</b>	1030	850
<b>51 CrV4</b>	1180	1080
<b>16MnCr5</b>	1080	835
<b>20MnCr5</b>	1220	980
<b>36NiCrMo16</b>	1710	1275
<b>51Si7</b>	1000	830
<b>60SiCr7</b>	1130	930

### c. Aciers fortement alliés

Par acier fortement allié, on entend les aciers dont la teneur de la somme d'éléments d'addition est supérieure à 5 %. Ils sont le plus souvent inoxydables.

**Applications :** Pièces mécaniques travaillant à l'extérieur ou aux milieux marins.

**Désignation :** Ces aciers sont désignés par :

- La lettre X ou Z ;
- Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone ;
- Les symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur.

**Exemple :**

X6NiCrTi17-12

Cet acier fortement (X) allié possède une teneur en carbone de 0,06 %.

- Il est allié au Ni, au Cr et au Ti.
- La teneur au Ni est de 17 %.
- La teneur au Cr est de 12 %.
- Il y a aussi des traces (non quantifiées) de titane (Ti).
- Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'une lettre G.

**Tab I.5 : Quelques propriétés mécaniques des aciers fortement alliés [4].**

Aciers fortement alliés		
Nuances usuelles	Traitement de référence	
	Rmin (Mpa)	Re min (Mpa)
X4CrMoS18	400	2714
X30Cr13	HRC $\geq$ 51	
X2CrNi19-11	460	175
X5CrNi18-10	510	195
X5CrNiMo17-12	510	205
X6CrNiTi18-10	490	195
X6CrNiMoTi17-12	540	215

### I.3.3 Solen le mode d'emploi

Les aciers peuvent être désignés selon leurs emplois et leurs caractéristiques mécaniques ou physiques.

**Tab I.6 : Désignation des aciers selon leur emploi [4].**

<b>Lettre</b> <b>nombre</b>	<b>Signification de la lettre</b>	<b>Signification du nombre après la lettre</b>
<b>S N°</b>	Acier de construction	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>
<b>P N°</b>	Acier pour appareil à pression	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>
<b>L N°</b>	Acier pour tube de conduite	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>
<b>E N°</b>	Acier de construction mécanique	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>
<b>B N°</b>	Acier à béton	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>
<b>Y N°</b>	Acier pour béton précontraint	Valeur de la résistance à la traction en N/mm <sup>2</sup>
<b>R N°</b>	Acier pour ou sous forme de rail	Valeur de la résistance à la traction en N/mm <sup>2</sup>
<b>H N°</b> <b>T N°</b>	Produit plat laminé à froid pour emboutissage à froid	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm <sup>2</sup>

**Exemple :**

Acier E 295

Cet acier de construction mécanique (E) a une valeur minimale de limite d'élasticité de 295Mpa. Il est Caractérisé par une faible teneur en carbone. Il est soudable, formable à froid et à chaud, pliable, emboutissable et laminable, Ces aciers rencontre dans le domaine de Construction mécano soudée, carrosserie automobile, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plates- forme spétrolières, trains, chaudronnerie, ameublement électroménager, biens de consommation...etc.

**Remarque :**

Ils sont livrés sous forme de laminés (profilés, poutrelles, barres, tôles, aux dimensions normalisées)

Les aciers commençant par (S), sont des aciers de gamme de construction générale. Généralement ils sont laminés à chaud.

Les aciers commençant par (E), sont des aciers plus solides et mieux finis (aciers étirés) et ont déjà un profil précis.

Si l'acier est moulé, la désignation est précédée d'une lettre G.

**Tab I.7 : Quelques propriétés mécaniques des aciers d'usage général [4].**

<b>Aciers d'usage général</b>			
<b>Nuance</b>	<b>Rm min (Mpa)</b>	<b>Re min (Mpa)</b>	<b>Emplois</b>
<b>S 185</b>	290	185	Constructions mécaniques et métalliques générales assemblées ou soudées.
<b>S 235</b>	340	235	
<b>S 275</b>	410	275	
<b>S 355</b>	490	355	
<b>E295</b>			Ces aciers ne conviennent pas aux traitements chimiques.
<b>E335</b>			
<b>E360</b>			
<b>moulage</b>	GS235-GS275-GS355 GS295-GE335-GE360		

## I.4 Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C [5] [6]

C'est le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe<sub>3</sub>C. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite pure.

- La cémentite pure (100%) correspond à 6,67 % de carbone, voir figure (I.1) ci dessous :

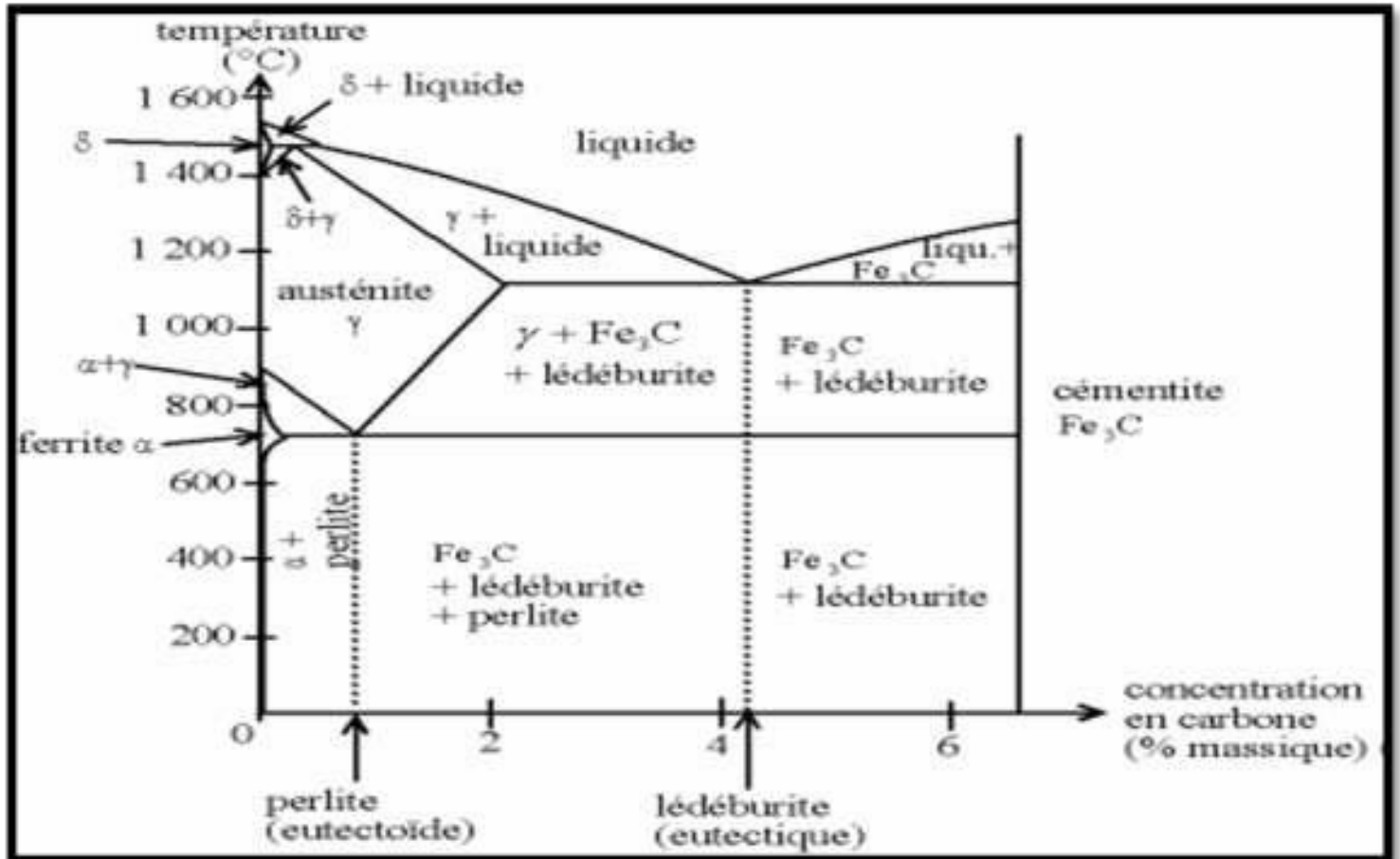


Fig I.1 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C [5].

Le diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C métastable, possède une structure analogue à celle du système eutectique plomb-antimoine. Les complications qui existent dans le fer sont les différentes modifications allotropiques du fer et les différentes capacités de dissolution du carbone. Les aciers et les aciers de moulage se solidifient selon le système métastable, tandis que la solidification des fontes de moulage s'effectue, le plus souvent, suivant la forme stable et métastable suite à la haute teneur en carbone et au refroidissement lent.

#### **I.4.1 Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C [6] :**

- **A** : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).
- **D** : correspond à la température de fusion de la cémentite (1392°C).
- **B** : 0,51 % C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite  $\delta$  et l'austénite à la température péritectique 1493°C.
- **H** : 0,10 % C teneur limite du carbone dans la ferrite  $\delta$  à 1493°C.
- **I** : 0,16 % C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.
- **N (1392°C) et G (910°C)** : marquent la transformation polymorphe réciproque ferrite-austénite ( $\delta\gamma$ ).
- **E** : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).
- **S** : 0,8 % C dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C.
- **P** : 0,02 % C teneur limite dans la ferrite à la température eutéctoïde 727°C.
- **C** : 4,3 % C transformation eutectique à la température 1147°C.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06 % C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est supérieur à 2,06 % C s'appellent fontes. Cette délimitation coïncide avec la solubilité limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique, ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la structure du composant eutectique lédéburite [6].

### **I.5 Tubes en aciers de pipelines :**

#### **I.5.1 Définition**

Un pipeline (originaire de l'anglais) est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destinée à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides. Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement et presque toujours enterrées sauf dans certaines régions.

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres, voir des milliers de kilomètres.

Selon le produit transporté, les pipelines sont nommés différemment. Leurs techniques de construction et d'exploitation diffèrent en fonction de certaines réglementations.

Les principaux systèmes de transport par pipeline concernent :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel
- Les oléoducs pour le transport du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aqueducs (les canaux) conduites ou émissaires utilisés pour l'eau douce et l'irrigation.



**Fig I.2: Pipelines [7].**

### **I.5.2 Fabrication des tubes [8] [9]**

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- Les tubes non soudés,
- Les tubes soudés en spirale,
- Les tubes soudés longitudinalement.

On se limitera dans le cadre de cette étude à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de grands diamètres et utilisés dans le transport. Cette appellation est réservée aux tubes de diamètre extérieur supérieurs à 16" (406.4 mm). Ils sont obtenus par formage.

L'opération de soudage est réalisée en long ou en spirale sur tôles laminées à chaud [8].

### **a. Fabrication des tubes sans soudures [9]**

Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenue par les cylindres du laminoir, cette déformation est caractérisée par un amincissement et un allongement (la pièce laminée ne s'élargit presque pas). Le laminage en passes successives peut produire une forte réduction d'épaisseur. Le coefficient de corroyage (toujours supérieur à l'unité) est le rapport entre la section du produit avant et après laminage. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines.

Dans le laminage à chaud, la température du matériau est choisie de façon à obtenir les caractéristiques plastiques optimales. Le laminage à froid se fait à la température ambiante et nécessite une abondante lubrification. L'importance de la variation de section à chaque passe est limitée (V. écrouissage).

Les tubes laminés sans soudures sont obtenus par laminage à chaud ; utilisés pour les faibles diamètres jusqu'à un maximum de 16" à 24" (406.4mm à 609.6mm), selon les pays.

### **b. Fabrications des tubes soudés [9]:**

#### **b<sub>1</sub>. Tubes soudés longitudinalement**

Sont obtenues par cintrage d'une tôle et soudure le long d'une génératrice ; deux procédés de soudure sont employés, soit la soudure à l'arc immergé, comportant un apport de métal, soit la soudure par rapprochement et fusion obtenue par action de courants de forte intensité.

Les diamètres maximaux obtenus dans cette catégorie de fabrication sont actuellement de 56"(1422.4mm).

#### **b<sub>2</sub>. Tubes soudés en spirale**

Sont obtenues par enroulement et soudure hélicoïdale d'un ruban de tôle approvisionné sous forme de bobines, ce procédé permet d'ailleurs d'atteindre de très gros diamètres, très largement supérieurs aux diamètres obtenus industriellement par soudure longitudinale puisque l'on a fabriqué jusqu'à des diamètres de 100"(2540mm) avec une épaisseur de 1"(25.4mm).

## I.6 Aciers utilisés pour pipelines [10] [11] :

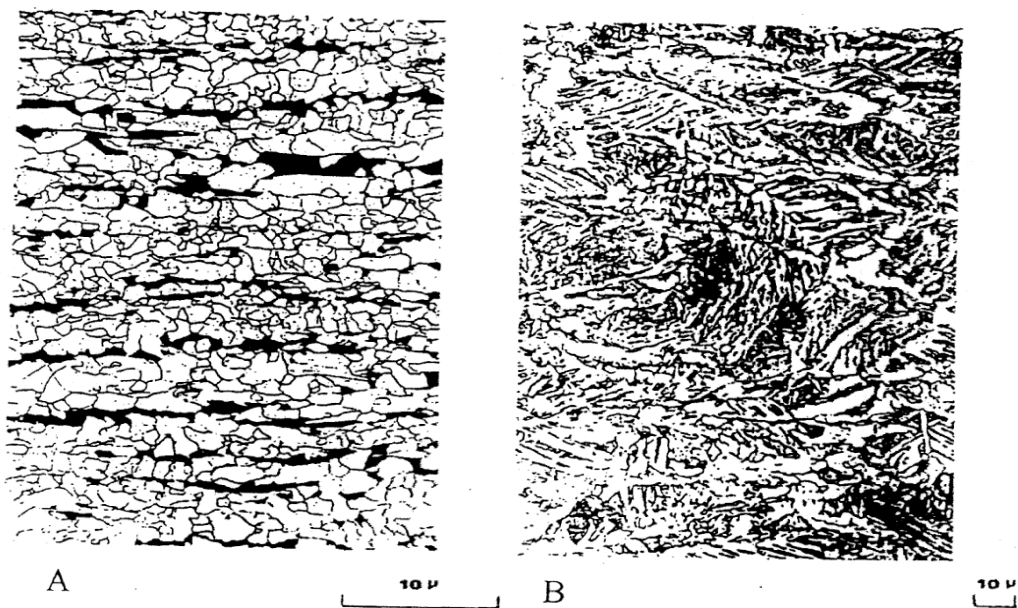
### I.6.1 Spécification et propriétés (norme API) [10]

L'une des exigences du cahier des charges que doit remplir l'acier pour pipeline est la réconciliation des propriétés d'emploi ; une limite d'élasticité maximale, une bonne ténacité, ainsi qu'une bonne soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût de revient, Pour répondre à ces exigences la classe des aciers dits (HSLA) (High Strength Low Alloy Steels) a été développée au fil des quarantes dernières années. 95% des aciers utilisés pour pipeline sont des aciers micro alliés à haute résistance (HSLA).

Des aciers à haute résistance, X42 à X65, qui pour des prix à la tonne très peu différents, permettent d'effectuer de très importantes économies de métal.

Les spécifications américaines API STD et 5LX fixent pour chaque diamètre l'épaisseur standard et leurs tolérances de fabrication.

Pour les tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 18", soudés ou étirés, les tolérances sont de +15% à 12.5%. Pour les tubes de diamètres supérieurs à 18", en ce qui concerne les tubes étirés sans soudure, les tolérances vont de 17.5% à 10% et pour les tubes soudés longitudinalement de 19.5% à 8%.



**Fig I.3 : Microstructure des aciers de pipeline [10] :**

- (A) Microstructure ferrito-perlitique
- (B) Microstructure bainitique aciculaire

## I.6.2 Composition chimique [11]

Tableau I.8 et Tableau I.9 ci-dessous indiquent respectivement la composition chimique des aciers API 5L, tubes de conduite PSL1 et PSL2 :

**Tab I.8 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés) [11].**

<b>API 5L -PSL1</b>	<b>Carbone C (max)</b>	<b>Manganèse Mn (max)</b>	<b>Phosphore P (max)</b>	<b>Soufre S (max)</b>	<b>Titan Ti (max)</b>
<b>X42</b>	0,26	1,30	0,03	0,03	0,04
<b>X52</b>	0,26	1,40	0,03	0,03	0,04
<b>X60</b>	0,26	1,40	0,03	0,03	0,04
<b>X65</b>	0,26	1,45	0,03	0,03	0,06
<b>X70</b>	0,26	1,65	0,03	0,03	0,06

**Tab I.9 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés) [11].**

<b>API 5L - PSL2</b>	<b>Carbone C (max)</b>	<b>Manganèse Mn (max)</b>	<b>Phosphore P (max)</b>	<b>Soufre S (max)</b>	<b>Titan Ti (max)</b>
<b>X42</b>	0,22	1,30	0,025	0,015	0,04
<b>X52</b>	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
<b>X60</b>	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
<b>X65</b>	0,22	1,45	0,025	0,015	0,06
<b>X70</b>	0,22	1,65	0,025	0,015	0,06
<b>X80</b>	0,22	1,85	0,025	0,015	0,06
<b>X100</b>	0,22	1,85	0,025	0,015	0,06

### I.6.3 Caractéristique mécaniques des aciers API [11].

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API [American petroleum Institute] qui sont adaptées depuis 1922 par l'industrie pétrolière Américaine

- Dénommées 5L pour les qualités normales
- 5L(\*), pour les qualités à haute résistance.

Ces spécifications sont utilisées d'une façon générale dans le monde entier. Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentées dans le Tableau I.10 et Tableau I.11 ci-dessous :

**Tab.I.10: Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1) [11].**

<b>API 5L – PSL1</b>	<b>Resistance à la rupture [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Limite élastique [N/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>X42</b>	414	290
<b>X52</b>	455	359
<b>X60</b>	517	414
<b>X65</b>	531	448
<b>X70</b>	565	483

**Tab.I.11: Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2) [11].**

<b>API 5L - PSL2</b>	<b>Resistance à la rupture [N/mm<sup>2</sup>] [min-max]</b>	<b>Limite élastique [N/mm<sup>2</sup>] [min-max]</b>
<b>X42</b>	414-758	290-496
<b>X52</b>	455-758	359-531
<b>X60</b>	517-758	414-565
<b>X65</b>	531-758	448-600
<b>X70</b>	565-758	483-621
<b>X80</b>	621-827	552-690

Tous matériaux métalliques sont généralement soudables. Toutefois leur soudabilité impose le type du procédé de soudage à utiliser.

**Chapitre II :**

**Soudage**

## **Chapitre II : Soudage**

### **II.1 Définition du Soudage [12]**

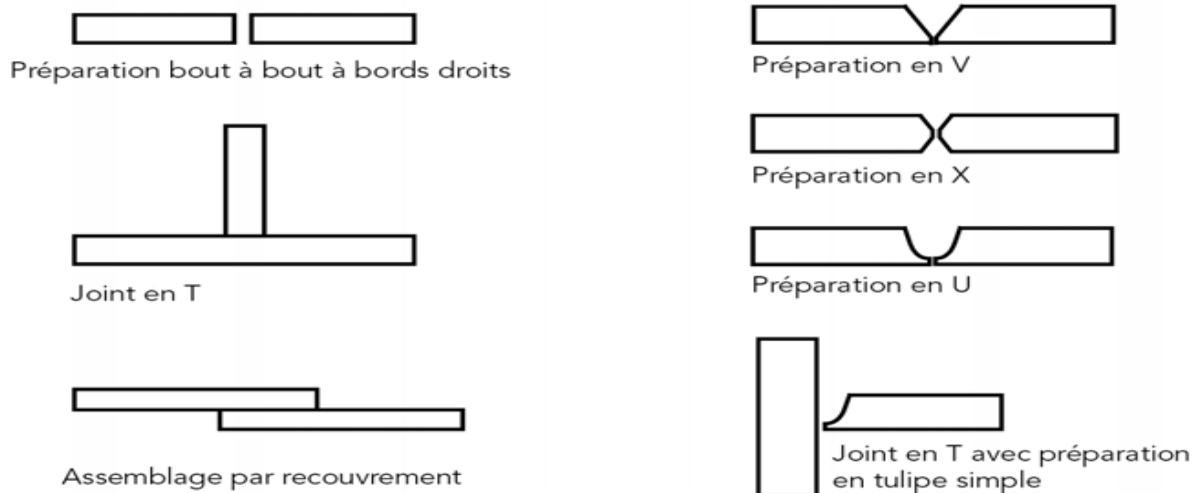
Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il est dit homogène quand ces deux pièces, ainsi que le métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et hétérogène dans les autres cas. Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il s'applique aussi, dans une moindre mesure et depuis plus récemment, aux matériaux thermoplastiques. Le soudage nécessite un apport de chaleur mobile. Les types de sources d'énergie utilisées sont généralement : chimique (flammes), lumineuse (laser), électrique (arc) ou mécanique.

### **II.2 Préparation des joints de soudures [13]**

Il existe plusieurs types de joints, les plus répandus dans la pratique sont les suivantes :

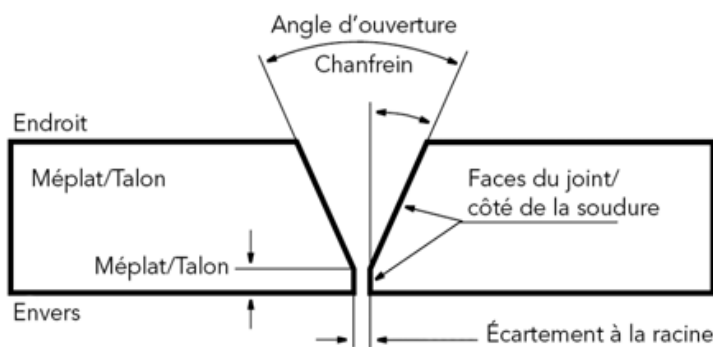
- Préparation bout à bout à bords droits ;
- Préparation en V
- Préparation en X ;
- Préparation en U ;
- Joint en T ;
- Joint en T avec préparation en tulipe simple ;
- Assemblage par recouvrement.

Le choix du type de soudure dépend, du procédé de soudage utilisé, de la nature et de l'épaisseur du matériau. L'objectif est d'obtenir la meilleure résistance mécanique et meilleure qualité de soudure en limitant les coûts.



**Fig II.1: les différents joints de soudure [13].**

La confection d'un joint en V est représentée sur la figure qui suit :



**Fig II.2 : Réalisation d'un chanfrein en V [13].**

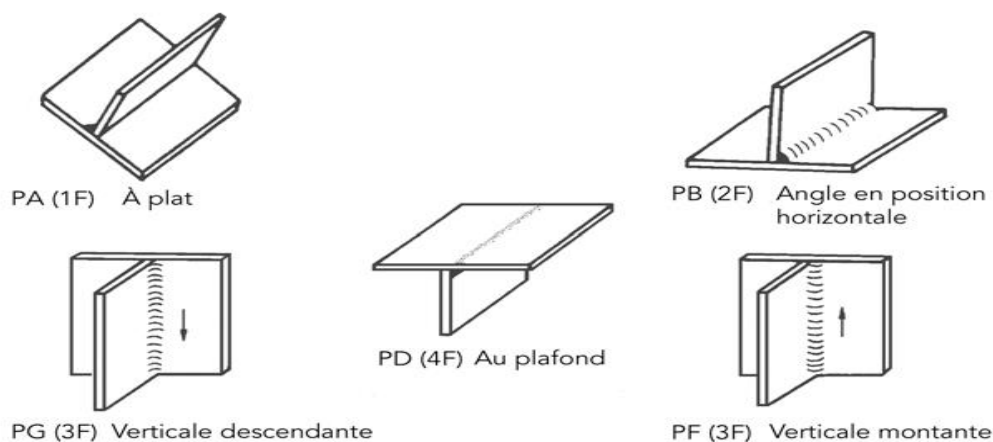
### **II.3 Positions de soudage [13]**

Le soudage peut se faire à plat, en corniche, au plafond ou en position verticale. Pour le soudage en position verticale ; il peut se faire de bas en haut (en montant), comme il peut aussi se faire de haut en bas (en descendant), quant aux soudures d'angles elles se font en corniche ou à plat.

- **A plat :** La soudure à plat est réalisée par un accès horizontal au-dessus de l'articulation. Cette position est la plus simple en soudage.
- **En corniche :** Le soudage en corniche est fait sur une surface horizontale. Ce type de soudage est souvent utilisé pour effectuer des soudures en angle.

- **Verticale** : Pour cette position de soudage, l'axe de la soudure est majoritairement dans une position verticale. Le soudage vertical est généralement plus compliqué à réaliser que la soudure à plat ou en corniche.
- **Au plafond** : De tous les quatre positions de soudage, c'est la plus complexe. Elle est réalisée par le dessous de l'articulation. La haute qualification du soudeur s'impose.

Les quatre positions de soudage varient dans leur complexité, mais le soudage de tuyauterie reste le type de soudage le plus difficile à exécuter. Indépendamment de la position ou du type de soudage, une articulation correctement créée par ce processus sera plus forte que le métal de base.



**PA** : à plat. **PB** : d'angle en position horizontale. **PC** : en corniche. **PD** : d'angle au plafond. **PE** : au plafond. **PF** : verticale montante. **PG** : verticale descendante.

**Fig II.3 : Positions de soudage [13].**

## II.4 Soudabilité :

### II.4.1 Définition [14]

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné, par un procédé donné pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction assurant la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont les propriétés requises et choisies comme bas de jugement. On distingue :

#### a. La Soudabilité métallurgique

Elle est conditionnée par les transformations métallurgiques, sous l'effet de la fusion et du refroidissement postérieur, dans les zones soudées (métal déposé et ZAT ou zone affectée

thermiquement) et qui peuvent conduire à des structures fragiles dans lesquelles des risques de fissuration peuvent apparaître, dont le plus important est le risque de fissuration à froid.

#### **b. La soudabilité globale ou constructive**

Elle concerne les problèmes liés au comportement des joints soudés dans une construction donnée, compte tenu de l'influence de facteurs tels que :

- La forme de la pièce, de sa masse et les caractéristiques mécaniques du métal ;
- Le bridage et l'existence de tensions internes ;
- Les possibilités de répartition des déformations à travers la structure ;
- La conception de la construction soudée et le type de joint.

#### **c. La soudabilité opératoire ou relative**

Elle est liée aux problèmes rencontrés par le soudeur ou l'opérateur, lors de l'exécution du joint par un procédé donné comme par exemple, la grande fluidité d'un bain de fusion dans le cas des aciers austénitiques pour le soudage en position.

### **II.4.2 Soudabilité des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés [14] [16]**

On désigne par soudabilité l'aptitude des métaux à être assemblés par fusion. Elle est inversement proportionnelle à sa teneur en carbone et en carbone équivalent  $C_{eq}$ , autrement dit, plus la teneur en carbone est élevée et plus l'acier est difficile à souder et nécessite des précautions spécifiques (refroidissement lent sous calorifuge, préchauffage, post chauffage...). Cependant, 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.

Les aciers faiblement alliés sont des aciers dont une partie de leur carbone est remplacée par des éléments comme le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo). Cette classe d'aciers est caractérisée par des propriétés mécaniques remarquables obtenues par :

- des traitements et cycles thermiques appropriés comme la normalisation ou la trempe suivis d'un revenu.
- Pour certaines catégories bien particulières d'aciers, un traitement thermomécanique approprié (conjonction des effets de la température et de la déformation plastique pendant le laminage de l'acier).

Les aciers faiblement alliés ne présentent pas les difficultés de soudage liées à la présence du carbone mais doivent faire l'objet de précautions particulières pendant le soudage afin que les propriétés mécaniques ainsi obtenues soient maintenues après soudage (soudabilité métallurgique). En règle générale, les précautions pour le soudage sont déterminées dans un mode opératoire de soudage. Dans certains cas, le ou les modes opératoires de soudage doivent être validés par une qualification.

### II.4.3 Carbone équivalent $C_{eq}$ d'après l'IIS [15]

Le carbone équivalent détermine le pouvoir trempant d'un acier. L'Institut International de Soudure a mis au point une formule permettant de calculer le carbone équivalent :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Cu + Ni)}{15} \dots \text{II.1}$$

Ainsi que le carbone équivalent compensé  $C_{éc}$  qui tient compte de l'épaisseur à souder :

$$C_{éc} = C_{eq} + 0.0254.e \dots \text{II.2}$$

### II.4.4 Coefficient de soudabilité (S) [15]

Si l'on représente la soudabilité par un coefficient : **S** variant de 0 à 10, la courbe Fig.II.4 représente la variation de **S** en fonction de la teneur en carbone de l'acier.

Pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

**Parfaitement soudable :** C = 0 à 0,25 % S 9 à 10

**Moyennement soudable :** C = 0,25 à 0,45 % S 7 à 9

**Soudable avec préchauffage :** C = 0,45 à 0,65 % S 5 à 7

**Soudage difficile :** Soudage sous conditions (préchauffage) indispensable S < 5

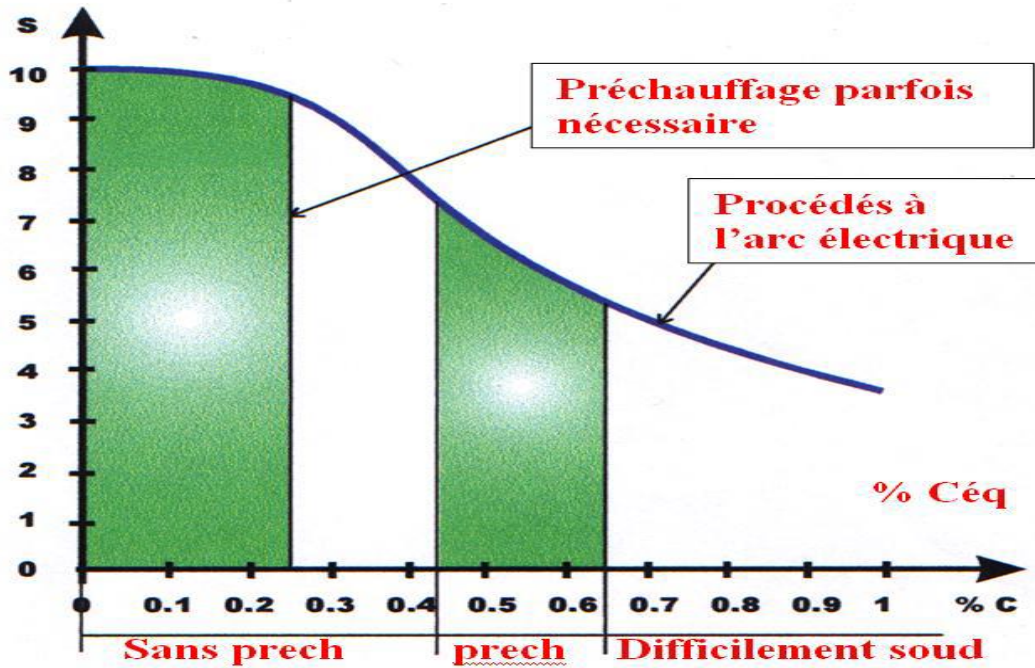


Fig II.4 : courbe de coefficient de soudabilité S en fonction du % de carbone [15]

- **Température de préchauffage [15]**

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

$$T_o = 350 \sqrt{C_{\text{éq}} \cdot C - 0.25}$$

Cette relation intervient uniquement quand le Carbone équivalent dépasse 0.42%.

Tab II.1 : influence du  $C_{\text{éq}}$  sur l'indice de soudabilité [16].

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	préchauffage
< 0.40	Excellent	Aucun
0.40 à 0.50	Bon	Aucun
0.50 à 0.60	moyen	De 100 à 300°C De 200 à 400°C
0.60 à 0.70	médiocre	De 300 a 400°C
> 0.70	Mauvais	Non soudable

## II.4.5 Influence des éléments d'additions [14]

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confère à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage(ZAT). Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques. Les principaux éléments d'addition utilisés dans ce genre d'application sont :

- **Carbone (C)** : C'est l'élément prépondérant lors du soudage. Quoique nécessaire pour augmenter la résistance à la rupture, son rôle sera à la fois actif et défavorable. Son influence sur l'effet de trempe du métal de base et dans la ZAT est importante. Il peut agir seul, mais très souvent en relation avec d'autres éléments trempant tels que le Mn; Cr et Mo par exemple.
- **Manganèse (Mn)** : Comme pour le carbone, il augmente la résistance à la traction mais ne diminue pas l'allongement. Par son rôle désoxydant, les caractéristiques sont donc améliorées. Il confère à l'acier une forte résistance aux chocs et à l'usure (acier Hadfield). Dans le cas des aciers ordinaires, sa teneur varie de 0,3 à 0,9% et pour les aciers à haute limite élastique (HLE) de 1 à 1,8%.
- **Chrome (Cr)** : Le chrome est un élément dont on doit tenir compte lors du soudage. Élément trempant très actif, c'est la raison pour laquelle sa teneur reste inférieure à 1% dans les aciers au carbone, de la classe des soudables. A forte teneur en (C) et de (Cr), les aciers sont durs et résistent à l'usure.
- **Nickel (Ni)** : Sans conférer un rôle trempant aux aciers, il améliore les propriétés générales. Allié au chrome, il constitue les aciers inoxydables. Il est utilisé dans les aciers autotrempant allié au (Cr) et au (C) et surtout dans les aciers travaillant à basse température (3 à 9% et  $t^{\circ} \approx -190^{\circ}\text{C}$ ).
- **Molybdène (Mo)** : Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l'UREE dans l'industrie chimique).
- **Cuivre (Cu)** : Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion à l'eau de mer (ex. palplanches). Il provoque néanmoins des porosités lors du soudage avec des électrodes de qualité médiocre.

- **Silicium (Si)** : Agent désoxydant, se retrouve en faible pourcentage ( $\leq 0,2$  %) sans influence néfaste. Au-delà, il augmente la résistance à la traction, mais diminue l'allongement.
- **Aluminium (Al)** : Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxy-acétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace.
- **Titane (Ti)** : Il s'oppose à la trempabilité à l'air des aciers au chrome courants. C'est un élément puissant de résistance à la surchauffe. Il combat la précipitation du (C) et réduit la corrosion inter granulaire. Il donne une meilleure résistance à chaud à l'oxydation (soudures). C'est un agent stabilisant dans les aciers inoxydables.
- **Niobium (Nb)** : Même avantage que le titane mais beaucoup moins volatile, il le remplace donc dans les métaux d'apport lors du soudage.
- **Phosphore (K)** : augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu des soudures.

En général tous ces éléments influent sur la position des courbes de transformation des TRC.

#### II.4.6 Soudabilité des aciers inoxydables [16]

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité des aciers inoxydables, comparativement aux aciers 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 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.
- Pour toutes ces raisons, la taille de la ZAT d'un acier inox sera de +/- 50% plus importante que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions

(Voir EN 1011-3).

## **II.5 Procédés de soudage des métaux [17] :**

D'une manière succincte on citera ci-après les différents procédés de soudage utilisés avec leur principe de fonctionnement.

### **II.5.1 Soudage à la poche**

C'est le plus ancien des procédés de soudage. Les pièces à souder sont enfermées dans un moule en céramique et le métal de joint est coulé sur les faces à souder par une perforation dans le moule.

### **II.5.2 Soudage à la forge**

Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de « blanc soudant » (1 200 °C et plus) estimée à l'œil par le forgeron. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées. Ce procédé s'apparente au brasage car il n'y a pas à proprement parler de fusion ; ce principe est en partie repris dans le soudage par ultrasons.

### **II.5.3 Soudage à la flamme (gaz oxyacétylénique C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)**

Une flamme est dirigée sur la pièce à souder, le métal d'apport étant apporté dans le bain de fusion sous forme d'une baguette tenue à la main.

### **II.5.4 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport (MA) constitué par une électrode enrobée fusible et la pièce à souder. C'est le procédé utilisé dans cette étude et qui fera l'objet d'un développement approprié dans la suite de ce travail.

### **II.5.5 Soudage à l'arc électrique sous flux pulvérulent**

Un arc électrique jaillit entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant submergés par un flux pulvérulent.

### **II.5.6 Soudage TIG (tungstène inert gaz)**

Un arc électrique éclate entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. S'il faut un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion à la main (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport). Le gaz protecteur est l'Argon.

### **II.5.7 Soudage A-TIG (active tungstène inert gaz)**

Même procédé que le TIG, à la différence près que les pièces sont revêtues d'un flux qui, au passage de l'arc électrique, provoque un effet constricteur sur l'arc électrique. La concentration d'énergie qui en résulte permet une pénétration plus importante ; pour une même consommation d'électricité, l'épaisseur soudée est plus importante qu'en TIG traditionnel.

### **II.5.8 Soudage au plasma**

Un plasma électrique est maintenu entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. En cas de besoin d'un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion manuellement (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

### **II.5.9 Soudage MIG (métal inert gaz)**

Un arc électrique surgit entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement inerte d'argon ou d'hélium.

### **II.5.10 Soudage MAG (métal activ gaz)**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement active qui peut être du CO<sub>2</sub> ou un mélange argon/CO<sub>2</sub>.

### **II.5.11 Soudage au fil fourré**

Un arc électrique est produit entre un métal d'apport constitué en un fil fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder. Ce procédé s'apparente au soudage à l'électrode enrobée.

### **II.5.12 Soudage par effet Joule sous flux protecteur**

L'effet Joule (échauffement par résistance électrique) est produit entre un fil ou un feuillard qui se dévide mécaniquement dans le bain de fusion formé avec les pièces à souder (ou à revêtir), le bain de fusion étant protégé de l'oxydation par un flux pulvérulent flottant à sa surface. Ce procédé est souvent dénommé « **electroslag** », ou, si l'on utilise un gaz protecteur inerte, « **electrogas** ».

### **II.5.13 Soudage par résistance**

Des électrodes non fusibles et refroidies pincement adéquatement deux pièces superposées et conduisent un courant électrique ; la température de fusion est atteinte par effet Joule au droit des pièces à souder et le soudage s'effectue lors du pincement.

### **II.5.14 Soudage par étincelage**

Des étincelles éclatent entre les bords des pièces à souder. Une fois la fusion est obtenue, les bords à souder sont vivement rapprochés jusqu'à provoquer l'éjection de la phase liquide et des impuretés éventuelles, puis on maintient l'ensemble sous pression.

### **II.5.15 Soudage par décharge de condensateur**

Les pièces sont maintenues en contact jusqu'à décharge d'un condensateur libérant l'énergie nécessaire à la production du bain de fusion. Les pièces sont maintenues pressées l'une contre l'autre jusqu'à la solidification du joint (ce procédé est très utilisé pour le soudage de fil thermocouple sur paroi métallique).

### **II .5.16 Soudage par faisceau d'électrons**

Un faisceau d'électrons bombarde les pièces à souder et produit une source de chaleur tridimensionnelle étroite et intense formant un trou ou un tunnel débouchant à travers les matériaux et se déplaçant le long du joint à souder. La machine et les pièces à assembler sont maintenues dans une enceinte sous vide.

### **II.5.17 Soudage par faisceau laser**

Technique similaire à la précédente, le faisceau d'électrons est remplacé par un faisceau laser et le soudage n'est pas effectué sous vide.

### **II.5.18 Soudage par ultrasons**

C'est un procédé de soudage à l'état solide car la température atteinte est comprise entre 30 à 50 % de la température de fusion. Les surfaces à assembler sont maintenues en position par des sonotrodes reliées à un transducteur d'ultrasons. Les vibrations ultrasoniques communiquées aux pièces à souder portent l'interface à un état pâteux qui, associé aux efforts mécaniques appropriés, permet de créer une zone de liaison comparable à celle d'une soudure. Cette technique s'apparente au brasage.

### **II.5.19 Soudage par aluminothermie**

Une réaction exothermique est provoquée au sein d'un mélange approprié d'oxydes métalliques et d'agents réducteurs maintenu entre les bords de pièces à assembler. Un fois la réaction amorcée, le mélange exothermique et les bords des pièces entrent en fusion et forment le joint soudé, contenu généralement dans une coquille réfractaire.

### **II.5.20 Soudage par friction**

Les bords des pièces à souder sont maintenus et pressés l'un contre l'autre et mis en mouvement jusqu'à ce que le frottement provoque la fusion, les pièces sont alors vivement rapprochées et maintenues sous pression.

## **II.6 Procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée [18] :**

### **II.6.1 Description du procédé**

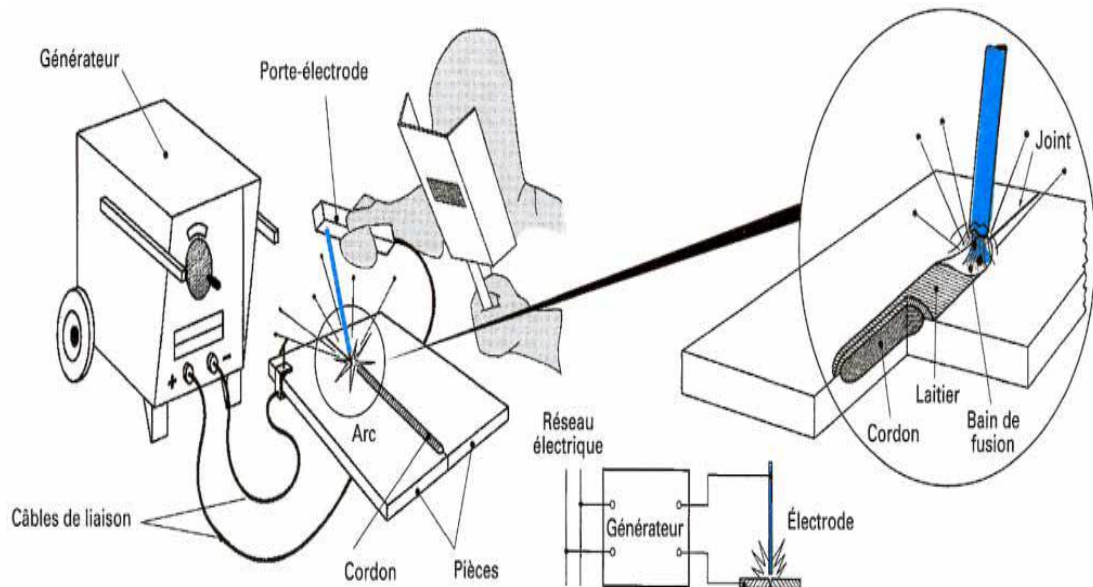
Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé soudage manuel à l'arc (manual arc welding, shielded metal arc welding process), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la Figure II.5. L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse. L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la Figure II.5 recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement. La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable. Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- la technologie des électrodes ;
- l'habileté de l'opérateur.

### **II.6.2 Installation du procédé de soudage à l'arc avec l'électrode enrobée**

- Un générateur de courant (poste de soudage).
- Une pince porte-électrode avec câble conducteur.
- Une pince de masse ou connecteur de pièce avec câble conducteur.
- Un masque avec verres teintés spéciaux de 11 à 13.

- Un marteau à piquer et une brosse métallique.
- Une meuleuse d'angle électrique.
- Des écrans ou rideaux de protection.
- Une ventilation dans les endroits confinés.



**Fig II.5 : Soudage à l'électrode enrobée : croquis du dispositif [18].**

### II.6.3 Type de Soudeuse et de courant

On emploie généralement une soudeuse à courant continu avec ce type de procédé. La polarité inversée permet une plus grande pénétration de la soudure parce que le métal en fusion de l'électrode, qui se dépose sur la pièce, atteint des températures plus élevées, ce qui procure une meilleure pénétration.

### II.6.4 L'électrode enrobée

L'électrode enrobée constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Elle est déterminée et construite en fonction du matériau à souder. Elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre. Il trouve largement sa place dans la construction des pipelines.

## a. Caractéristiques de l'électrode

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette (d'où les expressions courantes de baguette de soudage et de soudage à la baguette) comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (Fig.II.6). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (NF A 81-300). Nous donnons ci-après quelques données générales concernant l'âme métallique et son enrobage.

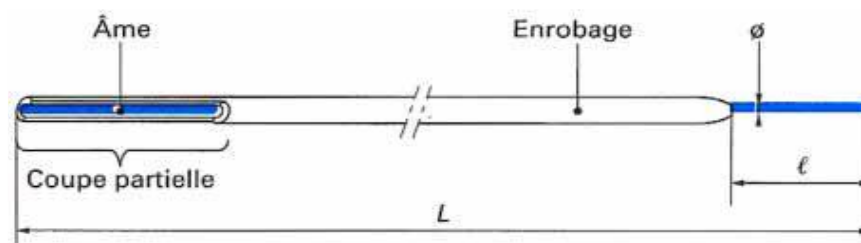
### a.1 Âme métallique

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliages devant assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure. Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux de dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par suite le courant de soudage à utiliser. La longueur n'excède pas 400 à 500 mm, pour des raisons évidentes de fabrication et d'emploi.

### a.2 Enrobage

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes, il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication. Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc.

Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes : minces, semi-épais et épais, respectivement  $< 140 \%$ ,  $140$  à  $180 \%$  et  $> 180 \%$  du diamètre de l'âme.



Dimensions standards :  
 $\phi = 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5$  ou  $6,3$  mm  
Par tranche de 50 en 50 mm,  $L = 150$  à  $350$  mm  
puis de 100 en 100 jusqu'à 700 mm  
(en relation avec le diamètre)

Fig II.6 : Électrode enrobée : caractéristiques [18].

Généralement le courant de soudage  $I_s$  est compris entre 100 et 500 A. Les relations appliquées afin de calculer la valeur du courant et de la tension de soudage ( $I_s$  et  $U_s$ ) sont :

- $I_s = 50 \cdot (d - 1)$  ;  $d$  : diamètre de l'âme (mm) ;
- $U_s = 0.04 \cdot I_s + 21$ .

### a.2.1 Types d'enrobage

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont :

- **enrobage acide (symbole A ou RA)** : réservé à des aciers de bonne soudabilité ;
- **enrobage basique (symbole B ou RB)** : enrobage à base de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  (comme fondant) ; taux d'humidité très élevé ceci dit un étuvage est nécessaire, courant continu avec polarité indirecte, position montante (teneur en fluor élevée), laitier facile à détacher ;

Les produits de la combustion de  $\text{CaCO}_3$  à  $700^\circ\text{C}$  sont :  $\text{CaO}$  et  $\text{CO}_2$  ;

- **enrobage cellulosique (symbole C ou RC)** : forte pénétration, arc relativement instable, soudage en position descendante avec polarité directe, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ; contient de 15% à 30 % de cellulose qui est une substance organique naturelle de type  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$  à base de végétaux, excellent pour la 1ère passe. Les éléments de la combustion de la cellulose se combinent avec l'oxygène en donnant des gaz de protection tels que  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et vapeur d'eau notamment. Néanmoins on observe un dégagement d' $\text{H}_2$  élevé qui est l'une des raisons de la fissuration à froid, d'où la nécessité du préchauffage ;
- **enrobage rutile (symbole R et RR) (le rutile est l'oxyde de titane  $\text{TiO}_2$ )** : stabilisation de l'arc en courant alternatif et en continu, pénétration moyenne, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ;
- **enrobage oxydant (symbole O)** : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, faible pénétration, belle apparence du cordon, travaux courants. Le symbole S est relatif aux enrobages spécifiques non répertoriés.

## **b. Étuvage des électrodes enrobées :**

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

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

## **c. Rôles de l'enrobage**

### **c1. Rôle électrique**

C'est le premier rôle essentiel de l'enrobage ; il permet d'amorcer l'arc et de le maintenir de façon stable par les vapeurs et divers dégagements gazeux qui y prennent place. Le potentiel d'ionisation des éléments dégagés définit directement, pour un courant donné, la tension d'arc. Selon la composition de l'enrobage, cette tension peut varier dans de larges limites comprises entre 4 et 30 V. Deux conséquences en résultent :

- la stabilité de l'arc et sa facilité d'amorçage et de réamorçage d'autant plus aisées que la tension d'arc est basse, grâce par exemple à des éléments tels que le potassium, le sodium aux potentiels d'ionisation très bas ;
- toutes choses égales par ailleurs, la puissance obtenue dans l'arc et par suite la fusion de l'électrode et la pénétration qui lui sont liées, d'autant meilleures que la tension est élevée.

En découleront les principales conditions d'utilisation :

- type de courant approprié (alternatif ou continu) environ 70A ;
- tension d'amorçage (à vide) du générateur  $U_s=80V$  ;
- pénétration et taux de dépôt ;
- diversité d'emploi, etc.

### **c2. Rôle métallurgique**

L'enrobage doit, pour exercer son second rôle essentiel de protection pendant le soudage, émettre des vapeurs chassant l'air de la zone d'arc et posséder des qualités neutres, légèrement réductrices ou au pouvoir oxydant contrôlé. Pendant et après la fusion, l'enrobage forme laitier et surnage par sa faible densité au-dessus du bain jusqu'au refroidissement complet au cours duquel il se solidifie tout en conservant son action protectrice ; il doit être

enlevé par piquage. On a constaté que certains éléments de l'enrobage se diluent dans le métal en fusion et se retrouvent dans le cordon. De là, l'idée d'introduire par ce biais des corps tels que le manganèse, le silicium, le titane, le nickel, le chrome, etc. de nature à participer à la texture métallurgique résultante de la zone fondue.

### **c3. Rôle mécanique**

Le laitier que forme l'enrobage a en outre un certain nombre d'autres effets purement mécaniques sur :

- le bombé du cordon ;
- la dilution et la pénétration par effet de creuse ;
- la possibilité de travailler en position par la viscosité et l'adhérence.

### **d. Fusion de l'électrode**

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

#### **d1. Constante de fusion**

La quantité de métal déposé par unité de temps dépend linéairement du courant d'arc (Fig.II.7). Le coefficient de proportionnalité qu'il est possible de relever varie d'un modèle d'électrode à l'autre et peut être considéré comme une caractéristique propre à chacun d'eux. On appelle ce coefficient constante de fusion, il s'exprime en  $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{h})$ . Sa connaissance permet d'établir le temps nécessaire pour réaliser un dépôt de poids donné, à une intensité fixée.

#### **d2. Pertes de fusion**

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

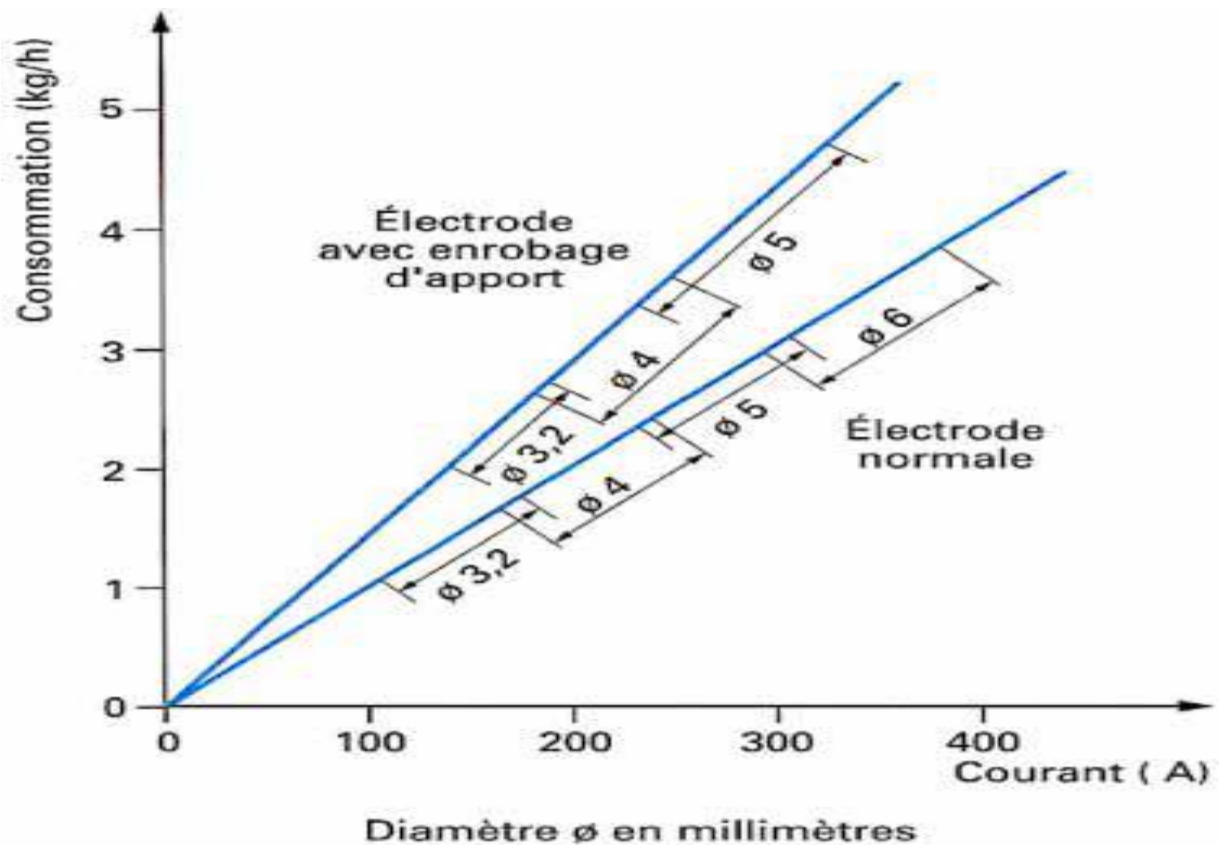


Fig II.7 : Fusion des électrodes [18].

### d3. Rendement

Il est défini comme le rapport entre le poids du métal déposé et celui de l'âme effectivement fondue. Sachant que l'on peut effectuer un apport de métal par l'enrobage (Fig.II.7).

Ce rendement de l'électrode enrobée exprime donc en définitive la proportion de cet apport dans l'apport total. On produit ainsi des électrodes ayant des rendements pouvant atteindre 200 %.

### d4. Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire [19]

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

Le tableau suivant donne quelques consommations d'électrode (0s) :

**Tab II.2 : Consommation des électrodes en fonction du diamètre  $\varnothing$  [19].**

<b>Fusion des électrodes (<math>\eta = 0,7</math>)</b>		
<b>Diamètre <math>\varnothing</math> (mm)</b>	<b>Nombre d'électrodes</b>	
	<b>Par Kg de métal déposé</b>	<b>Par heure</b>
3.2	49	20 à 25
4	32	14 à 18
5	21	12 à 14

Pour chaque modèle d'électrode, les constructeurs donnent le poids de métal déposé correspondant à l'intensité moyenne recommandée pour son emploi ainsi que, pour les sections de chanfreins les plus courantes, le nombre d'électrodes nécessaire par mètre de soudure.

#### **e. Caractéristiques mécaniques et métallurgiques**

Outre sa composition et sa destination, l'électrode est caractérisée également par les propriétés du métal déposé. Celles-ci sont déterminées sur des dépôts exécutés conformément à des normes AFNOR précises (cf. Pour en savoir plus en fin de cet article) ou suivant des spécifications édictées par des administrations ou organismes officiels (Marine, EDF, SNCF, Bureau Veritas, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, etc.). Les caractéristiques s'expriment essentiellement par :

- la charge à la rupture (en N/mm<sup>2</sup>) ;
- la limite d'élasticité (en N/mm<sup>2</sup>) ;
- la résilience (en J/cm<sup>2</sup>) ;
- l'énergie de tension en joules désignée par le symbole KV, ainsi que par l'allongement, la dureté moyenne, la caractéristique métallurgique concernant le dosage des différents composants du métal déposé.

### **II.6.5 Domaines d'applications**

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

- un équipement on ne peut plus simple ;

- une électrode enrobée qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en oeuvre, principalement les métaux ferreux. Ces avantages sont à opposer aux inconvénients :
- d'un fonctionnement cadencé ;
- d'une capacité et d'une productivité limitée.

C'est ainsi qu'il s'impose :

- dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécano-soudure ;
- sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique. Mieux que le chalumeau ou tout autre procédé (il n'a pas le problème des bouteilles de gaz sous pression), il est le moyen typique des petits travaux d'entretien ou d'amateur pour lesquels se sont développés des générateurs, ou postes, légers à faible facteur d'utilisation (30 à 40 %). On trouve des électrodes travaux courants chez tous les quincailliers.

## II.7 Paramètres de soudage [19] :

### II .7.1 Energie de soudage (E)

On appelle énergie de soudage (où énergie nominale  $E_n$ ) celle qui est fournie par l'arc l'ors de l'exécution d'une soudure. Elle est fonction directe de la différence de potentielle  $U$  entre les deux électrodes, de l'intensité du courant  $I_s$  de soudage et de la vitesse ( $v$ ) de l'opérateur. L'énergie de soudage s'exprime par la relation suivante :

$$E_n = \frac{U_s \cdot I_s}{V_s} \cdot 60 \quad \text{J/cm .... II.3}$$

Avec :

- $E_n = E_s$  : Energie de soudage [j/cm]
- $U_s$ : Tension de soudage [V]
- $I_s$  : Intensité de courant [A]
- $V_s$  : Vitesse de soudage [cm/ mn]

## II.7.2 Relation entre énergie dissipée et énergie équivalente

Pratiquement l'énergie fournie au niveau de l'arc n'est jamais transmise dans sa totalité aux pièces à souder d'où la relation suivante donne le rendement du procédé :

$$\eta = \frac{E_d}{E_n} \dots \text{II.4}$$

$E_d = E$  : Energie effective de soudage :

$$E = \eta E_n = \eta \frac{U.I}{V} \cdot 60 \quad \text{J / cm} \quad (\eta < 1) \dots \text{II.5}$$

Tab II.3 : Rendements effectifs thermiques des procédés  $\eta$  [20].

Procédés	Métaux	Rendement de l'arc $\eta$
Automatique sous flux solide	Aciers	0,90 à 0,99
A l'arc avec électrodes enrobées	Aciers	0,70 à 0,85
MIG	Aciers doux	0,65 à 0,85
	Aluminium	0,70 à 0,85

## II.7.3 Choix des paramètres

Pour déterminer certains paramètres, les plus optimaux possibles, nécessaires pour le choix de l'énergie de soudage, on fait usage de certaines relations empiriques établies. Ces dernières tiennent compte d'abord du type d'écoulement de la chaleur, de la vitesse où du temps de refroidissement entre 850°C et 500 °C ( $t_r$  850/500) et, bien entendu des caractéristiques dimensionnelles des pièces à assembler.

### a. Temps de refroidissement $t_r$ 850/ 500

Le temps de refroidissement entre 850 et 500° C est influencé par la température initiale  $T_0$  c'est-à-dire la température de la pièce au moment de l'exécution de la soudure de l'épaisseur de la pièce  $\delta$ , l'énergie de soudage  $E$  et les propriétés physiques des pièces à souder jouent un rôle prépondérant dans le temps  $t_r$  écoulé lors du passage de la température de 850 à 500 C°.

### a1. Détermination du temps de refroidissement $tr_{850/500}$ :

#### Transfert à deux dimensions (2d)

L'écoulement de chaleur se fait à deux dimensions, le temps de refroidissement se calcule par la formule suivante :

$$tr_{2d} = (1/4 \pi \lambda \rho c_p) [(1/500 - T_0)^2 - (1/850 - T)^2] F_2 (E/\delta)^2 \dots \text{II.6}$$

Dont :

- $\rho$  : Masse volumique [ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ]
- $C_p$  : Capacité calorifique [ $\text{J}/\text{g} \text{ } ^\circ\text{C}$ ]
- $T_0$  : température de préchauffage
- $F_2$  : facteur de forme
- $\delta$  : épaisseur (cm)

#### Transfert à trois dimensions (3d)

$$tr_{3d} = E/2 \pi \lambda [1/(500 - T_0) - 1/(850 - T_0)] F_3 \dots \text{II.7}$$

De cette relation précédente on constate que le temps  $tr$  qui met une transformation allotropique pour passer de  $850 \text{ } ^\circ\text{C}$  à  $500 \text{ } ^\circ\text{C}$  est indépendant de l'épaisseur des pièces à souder  $\delta$ .

- $F_2, F_3 = 1$  : Facteurs de forme

#### b. Epaisseur critique $\delta_c$

Pratiquement, c'est l'épaisseur critique  $\delta_c$  qui permet de situer avec plus au moins de précision si l'écoulement de la chaleur est bidimensionnel ou bien à trois dimensions. Ainsi, ce paramètre dimensionnel se calcule comme suit :

$$\delta_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho c_p} \left( \frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{850 - T_0} \right)} \quad (\text{cm}) \dots \text{II.8}$$

Pour déterminer le type d'écoulement de la chaleur il suffit de comparer l'épaisseur réelle  $\delta$  avec l'épaisseur critique  $\delta_c$ . Si :

- $\delta < \delta_c$  le transfert de chaleur est bidimensionnel
- $\delta > \delta_c$  le transfert est tridimensionnel

## II.8 Cycle thermique de soudage [21]

L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes qui prennent naissance durant l'opération de soudage et les modifications de structure ou transformations résultantes d'un effet thermique requiert comme condition nécessaire la connaissance du cycle thermique de soudage ; c'est-à-dire la variation de la température  $T$  en fonction du temps  $t$ . La courbe correspondante  $T=f(t)$  tracée en un point voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs dont nous avons besoin ceci dit :

- La température maximale atteinte  $T_{max}$  qui peut être calculé avec la relation suivante :
- Le temps  $t$  de séjour au dessus d'une température  $T$
- La loi de refroidissement traduite par le temps de refroidissement  $t_r$  entre deux températures  $T_1$  et  $T_2$  ou par la vitesse de refroidissement  $V_r$  à une température  $T_r$ .

Le cycle thermique est divisé en deux périodes :

### a. Période de chauffage

Elle est caractérisée par la vitesse de chauffage ( $V_c$ ) et par la température maximale atteinte ( $\theta_m$ ). Les phénomènes qui apparaissent lors de cette étape sont les suivants :

- Austénitisation ;
- Recristallisation ;
- Grossissement du grain ;
- Dissolution des carbures.

### b. Période de refroidissement

Elle est caractérisée par la vitesse de refroidissement  $V_r$  ou le temps de refroidissement entre  $850^\circ\text{C}$  et  $550^\circ\text{C}$  ( $t_r 850 / 550$ ).

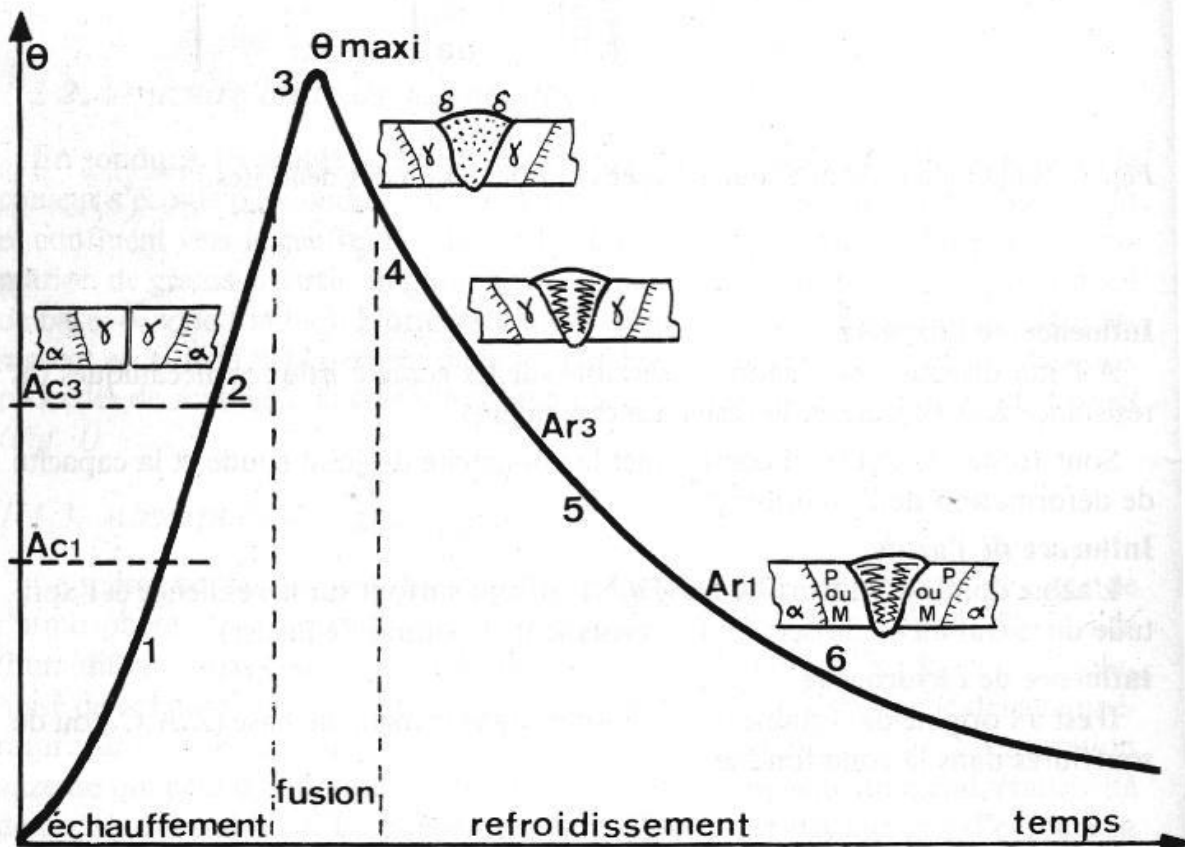


Fig II.8 : -cycle thermique : courbe (température – temps  $T=f(t)$ ) [15]

- 1 – Dilatation  $Ac_1$  :
- 2 –  $Ac_3$  : austénitisation (changement de maille).
- 3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.
- 4 – Solidification  $Ar_3$  : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – Transformations allotropiques  $Ar_1$ : trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

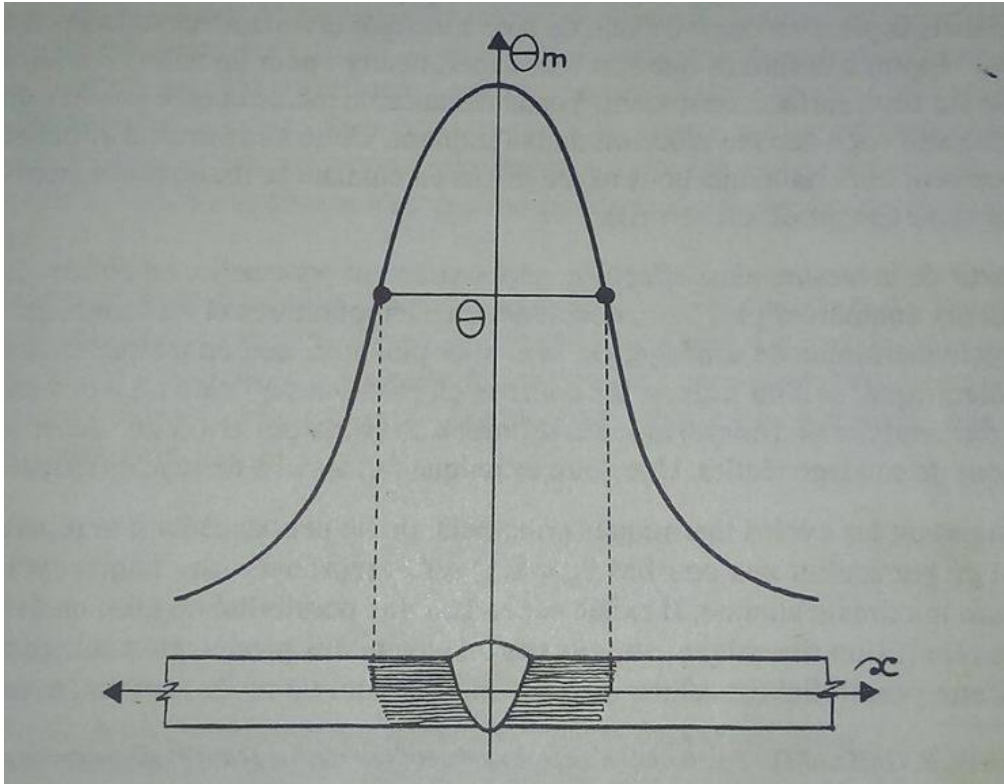
## II.9 Répartition thermique [21]

En plus du cycle thermique qui nous renseigne sur la nature des phénomènes engendrés par une opération de soudage, il est aussi nécessaire et important de connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique en particulier la courbe  $T=f(y_0)$  pour pouvoir accéder à la répartition topographique et aux modifications ayant lieu aux alentours du cordon de soudure. La courbe  $T=f(y_0)$  permet de bien situer les limites extérieures des zones où chaque transformation bien précise est susceptible de se produire mais aussi l'étendue de cette dernière; ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT).

La relation qui caractérise cette répartition thermique et qui grâce à elle on peut tracer sa courbe représentative en un point donné à une distance  $y_0$  de l'axe du cordon est définie comme suit :

$$T_m = (0,484. E/2. c\rho.y_0.\delta) + T_0 \dots \text{II.10}$$

( $T_m = \theta_m$ ), représente la température maximale atteinte en fonction de  $y_0$ .



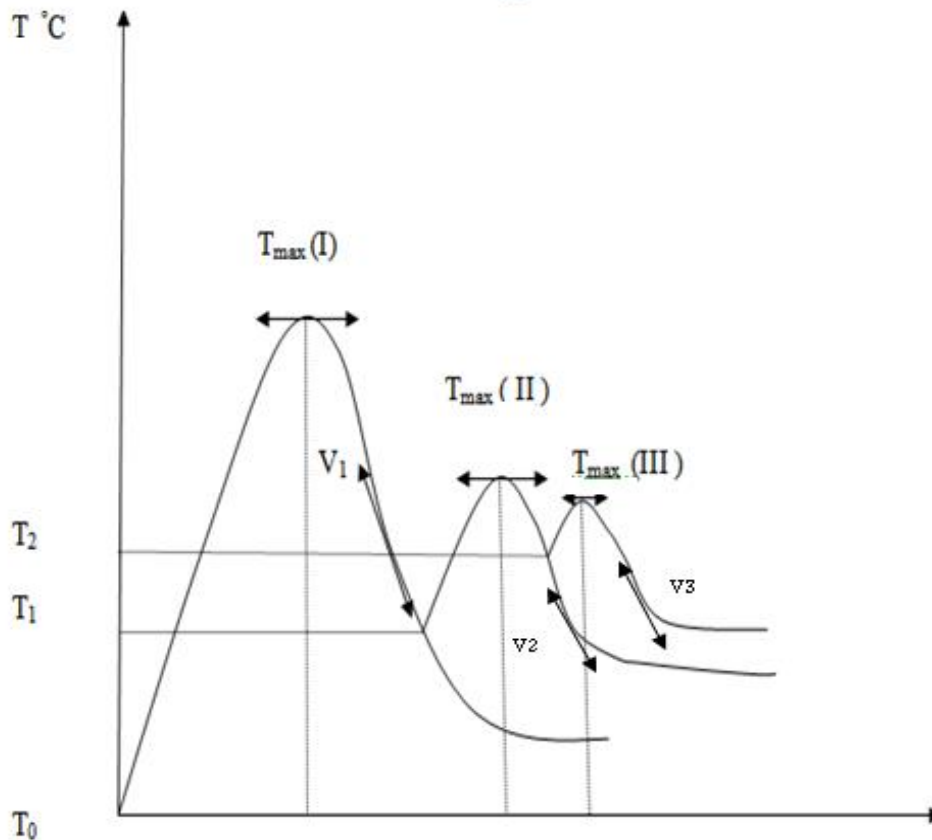
**Fig II.9 : Répartition thermique : courbe (température – distance) [21]**

- Soudage multi passe : [21]

#### Définition

Le soudage multi passe est un procédé qui consiste à faire intervenir plusieurs passages successifs de la source de chaleur en un point bien précis . Dans l'étude des cycles thermiques , il nous sera possible de montrer thermiquement que l'évolution de la température dépend essentiellement de :

- La température initiale ;
- Le nombre, la disposition des passes et leurs conditions d'exécution ;
- La température d'inter passes ;
- La position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de température.



**Fig II.10 : Cycle thermique du soudage multi passe [21]**

L'exécution de la 1<sup>ère</sup> passe se traduit par une première montée en température à partir d'une température initiale  $T_0$  jusqu'à la valeur maximale  $T_{\max(I)}$ , suivie d'un refroidissement caractérisé par une vitesse  $V_1$ .

Une seconde passe est générée avant que la température n'ait rejoint  $T_0$ , donc à une température  $T_1 > T_0$  un nouveau cycle thermique intervient du fait de cette 2<sup>ème</sup> passe, cycle caractérisé par une température maximale  $T_{\max(II)}$  inférieure à  $T_{\max(I)}$  et une vitesse de refroidissement  $V_2 < V_1$ , se fait résulte de l'éloignement de la source de chaleur du point de mesure et de l'effet de préchauffage vu que ce cycle s'amorce est parti de  $T_1$ .

Il en est ainsi de la 3<sup>ème</sup> passe qui s'amorce à partir de la température  $T_2$  à laquelle s'est arrêté la 2<sup>ème</sup> passe, et pour les mêmes raisons, on voit une température maximale atteinte  $T_{\max(III)}$  et une vitesse de refroidissement  $V_3$  être inférieure aux 2 précédentes.

Du point de vue structural, le cycle thermique répété a un effet analogue à celui du revenu, il réduit le taux de Martensite fragilisant la structure au profit de la Bainite qui est une structure souhaitée (traitement local influant positivement sur la microstructure). [21]

## II.10 Métallurgie du soudage

### II.10.1 Différentes zones d'une soudure [21] :

L'attaque chimique d'un échantillon pour macrographie fait apparaître les zones constitutives de la soudure, qui se manifestent par des intensités d'attaque ou des colorations différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution des structures engendrées par l'opération de soudage. Dans le cas général d'une soudure on verra apparaître les zones suivantes :

**1. La zone fondue :** C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la participation plus ou moins d'un métal d'apport. Les grains résultant de la solidification y sont en général visibles sans grossissement.

**2. La zone de liaison :** Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion ; ou autrement dit c'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu, elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure constatée de part et d'autre.

**3. La zone affectée thermiquement (ZAT) :** C'est la zone au sein de laquelle le cycle thermique de soudage a provoqué à partir de l'état initial une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement. Chaque transformation étant caractérisée par une température minimale. La limite extérieure de la zone affectée correspondante coïncide avec l'isotherme caractéristique de cette température. Cette isotherme apparaît plus ou moins nettement selon que le phénomène est progressif ou non en fonction de la température.

La ZAT est divisée en trois sous zones :

- **Zone à gros grains [22]**

C'est une partie de la zone affectée par la température proche de la zone fondue. Elle est constituée essentiellement de gros grains qui ont germé lors du chauffage à partir de la température de surchauffe. Le grossissement des grains austénitiques se fait au dépend des grains fins qui disparaissent au fur et à mesure que la température augmente.

- **Zone à structure grossière [22]**

Cette partie de la ZAT est une zone intermédiaire entre la zone à gros grains et la zone à grains fins. Elle apparaît à partir de températures supérieures à  $Ac_3$ .

- **Zone à grains fins [22]**

Venant juste après la zone grossière, la structure à grains fins s'obtient lors de l'austénitisation partielle c'est-à-dire entre  $Ac_1$  et  $Ac_3$ . Ensuite vient derrière la partie du métal de base où l'on

peut constater de légères modifications dans le domaine ferritique à partir de 600 °C et sans atteindre , bien sur ,  $A_{c1}$  plus loin encore , vient la zone qui ne subit aucune transformation, on sort du domaine de la ZAT. La zone à grains fins est le résultat direct de la transformation cyclique  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  (double transformation) favorisant l'affinage du grain tel que le recuit de normalisation en traitement thermique usuel.

**4. Le métal de base (MB) :** C'est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physicochimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations.

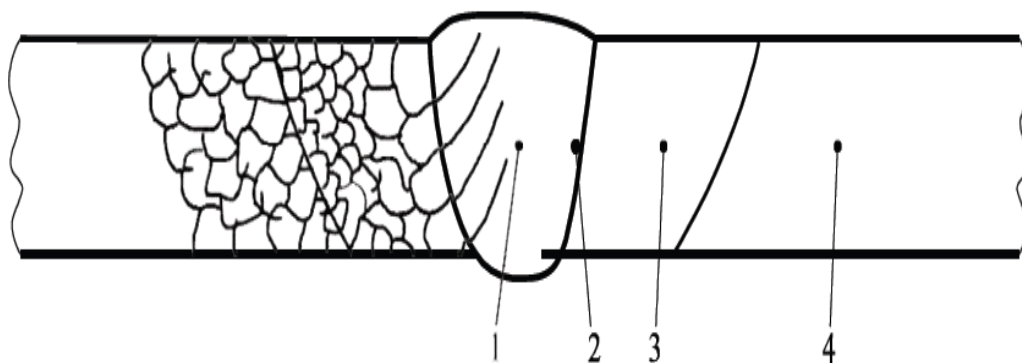


Fig II.11 : Différentes zones d'une soudure [22]

### II.10.2 Modifications structurales dans le cordon de soudure [22]

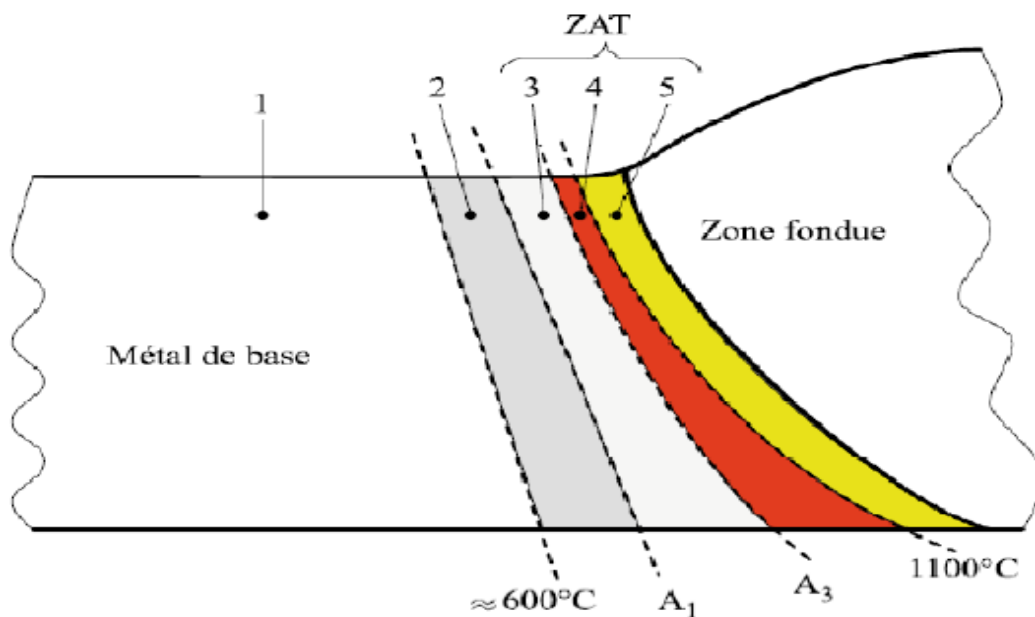


Fig II.12 : Modification structurale de la ZAT [22].

**Zone 1 :** La température ne dépasse pas 600°C environ. Aucune modification décelable sur la constitution et la microstructure.

**Zone 2 :** La température est comprise entre 600°C et A1. On peut y déceler certaines modifications selon l'état initial du métal de base : précipitations, revenu, globularisation.

**Zone 3 :** La température est comprise entre A1 et A3. Les modifications sont importantes, l'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de la structure au refroidissement. Cette zone est le début de la zone affectée thermiquement ou la ZAT.

**Zone 4 :** La température est comprise entre A3 et 1100°C environ. Après refroidissement on obtient des structures normalisées et des structures grossières selon la température atteinte.

**Zone 5 :** La température est comprise entre 1100°C et 1500°C environ. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité est considérablement augmentée et les structures obtenues après refroidissement varient de structures aciculaires très grossières à des structures de trempe pour les vitesses les plus élevées.

La majorité des problèmes métallurgiques du soudage sont relatifs à la constitution de la zone sous cordon dans laquelle a lieu un véritable traitement thermique dans des conditions d'austénitisation particulières, à une température supérieure à 1200°C pendant un temps très court.

### **II.10.3 Diagramme TRC [21]**

Diagramme TRC (Transformation en Refroidissement continu) traduit l'influence de la loi de refroidissement à partir de l'état austénitique obtenu à une température précise sur les principales familles d'acier. Ce diagramme, directement utilisable pour les traitements classiques a aussi permis d'avoir une meilleure compréhension des transformations au refroidissement au cours du soudage des aciers. Le diagramme TRC ne concerne qu'une charge donnée d'un acier en soudage mono passe (zone à gros grains de la ZAT).

Il comporte un ensemble donné de lois de refroidissement tracé à partir d'une même température d'austénitisation, les températures de début, d'arrêt éventuel et de fin de transformations ainsi que des indications sur la nature et la proportion des constituants (phases) qui apparaissent à chaque instant le long de chaque courbe de refroidissement, et il donne aussi les valeurs de dureté  $H_{V30}$ .

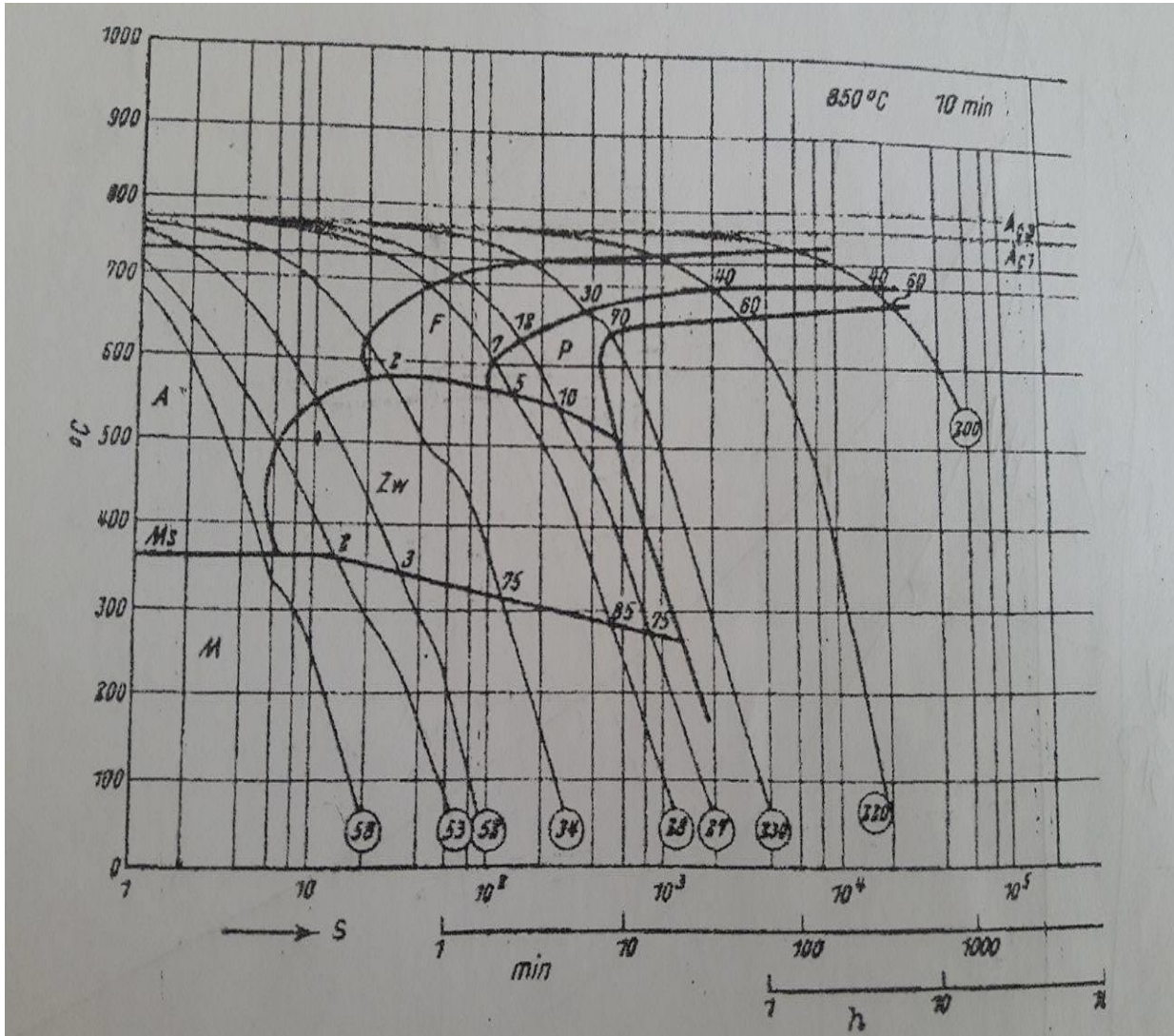


Fig II.13 : Diagramme TRC (Transformation au refroidissement continu) de l'acier X42 [19].

## **II.11 Défauts de soudures [16] :**

### **II.11.1 Fissurations :**

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait empêché peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport(MA), un préchauffage approprié  $T_p$ , une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc éluder les fissures. Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent de ce fait on observera :

- Les fissures qui peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure et notamment du degré de pureté du métal de base (MB).
- Les fissures qui peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On distingue alors deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

#### **a. Fissuration à chaud**

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure.

On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.

On rencontre généralement ce type de fissuration dans les aciers austénitiques

## **b. Fissuration à froid**

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure combiné aux tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- la trempabilité reliée au carbone équivalent ;
- la présence d'hydrogène dûe à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- l'humidité dans l'air ;
- le refroidissement rapide de la pièce ;
- la présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.) ;
- les contraintes résiduelles du fait d'un retrait empêché ;
- le mode opératoire

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures.

### **II.11.2 Soufflures**

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface). Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

### **II.11.3 Retassures et criques de solidification**

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

### **II.11.4 Morsures et caniveaux**

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base. Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

# **Chapitre III : Modélisation des transformations métallurgiques**

## Chapitre III : Modélisation des transformations métallurgiques

### III.1 Différentes transformations de phases en TRC [19] :

#### III.1.1 Transformation austénitique

##### a. Au chauffage

La transformation austénitique dans le cadre du soudage consiste à mettre complètement le carbone en solution dans le fer en phase  $\gamma$ . Pour atteindre le domaine austénitique ( $\gamma$ ) il faut chauffer à des niveaux de températures dépassant  $Ac_3$  quand l'acier est de nuance hypoeutectoïde et  $A_{cm}$  pour les aciers hypereutectoïdes. Cette phase ( $\gamma$ ) cristallise dans un réseau cubique à face centrée (CFC). La température  $Ac_1$  et  $Ac_3$  se calculent par les formules suivantes :

$$Ac_1 = 739 - 22C + 2Si - 7Mn + 15Cr + 13Mo - 13Ni + 20V \dots \text{ (III.1)}$$

$$Ac_3 = 902 - 225C + 19Si - 11Mn - 13Mo - 20Ni + 55V \dots \text{ (III.2)}$$

##### b. Au refroidissement

Les transformations de l'austénite au refroidissement sont souvent conditionnées par la connaissance du gradient des températures ou alors par la vitesse de refroidissement qui caractérise le processus. L'austénite évolue en soudage dans des conditions hors d'équilibre, ce qui est la conséquence d'un refroidissement brusque ne permettant pas aux transformations de se produire selon le diagramme de phases Fe-Fe<sub>3</sub>C. Elle devient métastable puis se transforme pour former des structures plus en moins stables. L'augmentation de la vitesse de refroidissement permet d'élever le degré de surfusion. A des vitesses de refroidissement très grandes, une partie de l'austénite surfusionnée jusqu'au point  $M_s$  se transforme en martensite.

La vitesse minimale de refroidissement correspondante à la transformation de toute l'austénite surfusionnée jusqu'au point  $M_s$  en martensite, s'appelle vitesse critique de trempe. Dans le cas des refroidissements à des vitesses lentes, on obtient des structures perlito-ferritique composées. Lorsque la décomposition de l'austénite dans la zone perlitique est plus rapide que dans la zone bainitique, le refroidissement ne déclenche en effet qu'une transformation perlito-ferritique de l'austénite.

Un refroidissement plus au moins rapide, par conséquent produit une transformation perlito-ferritique qui s'accompagne de transformation bainitique. Dans ces conditions, une partie de l'austénite qui n'a pas subi de décomposition dans le domaine perlitique et bainitique se transforme en martensite. L'acier fait apparaître alors une structure composée de perlite, ferrite, bainite et martensite. Lorsque la vitesse de refroidissement dépasse la vitesse critique de trempe, l'austénite mère ne subit que la transformation martensitique.

### III.1.2 Transformation ferritique (F)

La ferrite est définie comme solution solide du carbone dans le fer  $\alpha$ , Cristallisant dans le réseau cubique centré (CC). la ferrite s'obtient par refroidissement de l'austénite à des vitesses lentes, on peut calculer le pourcentage de la ferrite après exécution d'une passe de soudure par la formule suivante :

$$F \% = F_{\max} \Phi [(Intr - Int_F) / \ln S_F] \dots (III.3)$$

Avec :

$$F_{\max} = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{C \% - 0,02}{0,81 - 0,11 Mn \% - 0,05 Mo \%} \right] \dots (III.3.1)$$

$$\ln t_f = 0,66 + 10 C \% + 1,3 Mn \% - 0,48 Si \% + 1,3 Cr \% + 1,5 Mo \% + 1,2 Ni \% - 1,4 W \% + 3,4 W \% + 3,5 C \% - 5,9 C \% \dots (III.3.2)$$

$$\ln S_F = 1,23 + 0,17 Mn \% - 0,37 Si \% + 0,30 Cr \% - 0,50 Mo \% + 0,31 Ni \% + 0,09 Nb \% - 0,43 W \% - 0,30 Cu \% \dots (III.3.3)$$

$\Phi$ : représente l'intégrale de fonction exponentielle de répartition normale est donné par :

$$\Phi [(Intr - Int_F) / \ln S_F] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{(Intr - Int_F) / \ln S_F}{\sqrt{2}} \right) \dots (III.3.4)$$

### III.1.3 Transformation martensitique (M)

Lorsque la température s'abaisse jusqu'à dépasser un certain seuil appelé seuil des températures  $M_s$ , la transformation de L'austénite acquiert un caractère différent en donnant naissance à la martensite. Au dessous du point  $M_s$ , la diffusion du carbone s'estompe et la transformation martensitique se produit par glissement des atomes. Celui-ci consiste en un déplacement coopératif orienté des atomes au cours de la reconstitution du réseau qui ne modifie point la composition chimique de la solution solide. La martensite a une structure cristalline quadratique orthogonale centrée où les atomes de carbone s'insèrent dans leurs

sites préférentiels à savoir l'axe Z. La transformation martensitique s'illustre par le passage de la structure du réseau CFC à un autre plus proche CC en provoquant une augmentation de volume.

Le taux de la martensite formé en soudage mono passe se calcule par la relation suivante :

$$M \% = 100 (1 - \Phi [(Intr - Int_M) / \ln S_M]) \dots (III.4)$$

Avec :

$$Int_M = -2,1 + 15,5 C \% + 0,96 Mn \% + 0,84 Si \% + 0,77 Cr \% + 0,74 Mo \% + 0,70 Ni \% + 0,30 V \% + 4 Al \% + 0,5W \% + 0,8 Cu - 13,5 C \% C \% \dots (III.4.1)$$

$$\ln S_M = 0,56 - 0,41 C \% + 0,10 Mn \% + 0,14 Cr \% - 0,30 Mo \% + 2,7 Ti \% - 1,1 Nb \% + 0,50 Cu \% + 1,7 C \% Mo \% \dots (III.4.2)$$

$\Phi$ : représente l'intégrale de fonction exponentielle de répartition normale est donné par :

$$\Phi [(Intr - Int_M) / \ln S_M] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{(Intr - Int_M) / \ln S_M}{\sqrt{2}} \right) \dots (III.4.3)$$

### III.1 .4 Transformation perlitique (P)

La décomposition dans les conditions requises de L'autunite, déjà homogène, est à l'origine de la naissance de la ferrite (fer presque pur) et de la cémentite  $Fe_3C$  à 6,68 %C autrement dit, à un mélange de phases caractérisées par des teneurs en carbone différentes ; Les germes de cémentite formés aux joints de grains de L'austénite se développent par diffusion du carbone à partir des volumes adjacents d'austénite. Par conséquent, L'austénite entourant les mamelles de cémentite connaît un appauvrissement en carbone contribuant ainsi à la transformation de ferrite. L'austénite enrichie en carbone est un domaine où naissent et se développent les lamelles de cémentites ( $Fe_3C$ ) apparues auparavant. Ainsi, ces processus de formation et de croissance de particules de carbures garantissent les conditions qui favorisent la naissance de nouveaux cristaux de ferrite et l'augmentation des lamelles déjà existantes. Il en découle la croissance commune de petits cristaux et de cémentite qui forment la perlite. La perlite a une structure grossière et prend le nom de troostite quand elle fine. Le taux de cet agrégat (PF) se calcule par :

$$FP \% = 100 \Phi [(Intr - Int_{FP}) / \ln S_{FP}] \dots (III.5)$$

Avec :

$$\ln t_{FP} = 0,34 + 5,2 C\% + 1,8 Mn \% + 0,53 Si \% + 0,33 Cr \% + 2,9 Mo \% + 1,3 Ni \% + 1,5 W \% + 1,0 Cu \% - 5,1 C\% C\% \dots \text{(III.5.1)}$$

$$\ln S_{FP} = 0,91 - 0,90 C \% + 0,09 Mn \% + 0,08 Cr \% + 0,34 Mo \% + 0,15 Ni \% + 0,85 V \% + 2,2 Ti \% + 0,43 W \% \dots \text{(III.5.2)}$$

$\Phi$ : représente l'intégrale de fonction exponentielle de répartition normale est donné par :

$$\Phi [( \ln t_r - \ln t_{FP} ) / \ln S_{FP}] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{(\ln t_r - \ln t_{FP}) / \ln S_{FP}}{\sqrt{2}} \right) \dots \text{(III.5.3)}$$

Le pourcentage en phase de la perlite est donné donc par la relation suivante :

$$P \% = FP \% - F \% \dots \text{(III.5.4)}$$

### III.1 .5 Transformation bainitique (B)

Cette transformation intervient dans un domaine de températures intermédiaires qui sépare le domaine d'existence des phases perlitique et martensitique. La diffusion des éléments alliés en substitution au cours de l'abaissement de la température se fait difficilement et entraînant ainsi le remplacement progressif de la transformation perlitique par une autre dite bainitique.

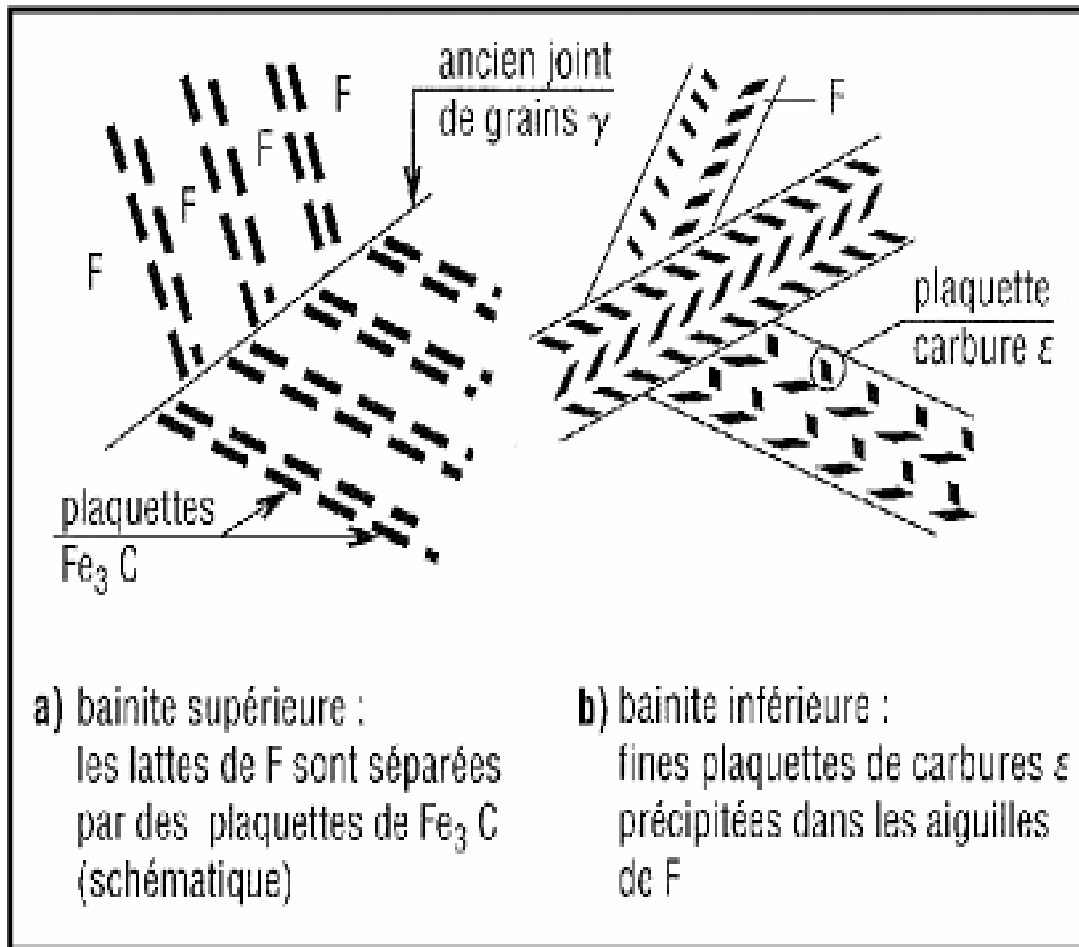
#### a. Bainite supérieure (Bs)

Dans cette zone, la Ferrite se forme en lattes. Les plaquettes de carbures de fer précipitent entre ces lattes presque parallèles à elles.

#### b. Bainite inférieure (Bi)

Dans cette zone, la Ferrite formée tend à devenir de plus en plus aciculaire. Avec de basses températures, il est évident que la diffusion du carbone se fait difficilement et les aiguilles de ferrite sont sursaturées en carbone pendant leur formation. Les plaquettes de carbures  $Fe_3 C$  précipitent à l'intérieur des aiguilles de ferrite sous forme très fine. Précipités de carbures conduisant ainsi à un durcissement de la matrice ferritique.

En générale, la Bainite est une structure composée de Ferrite fine saturée en C et de carbures sphériques bien repartis dans la matrice Ferritique.



**Fig III.1 : Microstructures bainitique**

Le temps de germination de la bainite est déduit par la relation suivante :

$$t_B = \text{expo} (\ln t_M - 2,3 \cdot \ln S_M) \dots \text{(III.6)}$$

Le pourcentage de bainite est donné par la relation ci-après :

$$B\% = 100 - M \% - FP \% \dots \text{(III.6)}$$

Les relations empiriques précitées nous permettent de déterminer les caractéristiques principales de TRC, pour une charge donnée, à savoir de :

- le temps de la germination de la ferrite ( $t_F$ ) ;
- le temps de la germination de la martensite ( $t_M$ ) ;
- le temps de la germination de ferrite-perlite ( $t_{FP}$ ) ;
- Le temps de germination de la bainite ( $t_B$ ).

### III.7 Critères de soudabilité :

En vu d'épargner a la soudure des défauts de fissuration a froid on se sert des critères préétablis selon les conditions de soudage, Dans ce cas, ou localisera  $t_{r\ inf}$  (taux admissible de M) et  $t_{r\ sup}$  (coïncidant au seuil de l'énergie de soudage a ne pas dépasser) dans la zone a gros grain (ZAT).

#### a. En soudage mono passe

- $M\ \% \leq 30\ \%$  (Martensite)
- taux inferieur au taux maximale de bainite (B) favorisant la grosseur des grains (cas défavorable).

#### b. En soudage multi passe

- En soudage multi passe le taux de Martensite toléré est de 50 % , c'est un critère plus sévère que celui du soudage mono passe ( $t_{r\ inf}$ )
- $M\ \% \leq 50\ \%$  , ce taux est permis du fait que les passes successives réalisent des pré-chauffages et post chauffages qui atténuent grandement l'effet de trempé
- $t_{r\ sup}$  es localisé au niveau d'un taux inferieur au taux maximale de bainite (B) favorisant la grosseur des grains (cas défavorable).

### III.8 Application pour l'optimisation des paramètres de soudage [23] [24]

Le logiciel utilisé dan la réalisation du programme informatique c'est : "Matlab"

#### III.8.1 Définition

MATLAB pour MATrix LABoratory, est une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre des algorithmes développés dans le cadre des projets linpack et eispack. MATLAB est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées :

- soit directement au clavier depuis une fenêtre de commande;
- soit sous forme de séquences d'expressions ou scripts enregistrées dans des fichiers-texte appelés m-files (ou fichiers .m) et exécutées depuis la fenêtre de commande;
- soit plus rarement sous forme de fichiers binaires appelés mex-files (ou fichiers .mex) générés à partir d'un compilateur C ou fortran.

Ce noyau est complété par une bibliothèque de fonctions prédéfinies, très souvent sous forme de fichiers m-files, et regroupés en paquetages ou toolboxes. A côté des toolboxes requises local et matlab, il est possible d'ajouter des toolboxes spécifiques à tel ou tel problème mathématique, Optimisation Toolbox, Signal Processing Toolbox par exemple, ou encore des toolboxes créées par l'utilisateur. Un système de chemin d'accès ou path permet de préciser la liste des répertoires dans lesquels MATLAB trouvera les différents fichiers m-files utilisés.

**Chapitre IV :**  
**Partie expérimentale**

## Chapitre IV : Partie expérimentale

### IV.1 Matériaux d'étude :

#### a. Métal de base (MB) [25]

Le matériau utilisé dans cette étude est un tube en acier faiblement allié de nuance API 5L X42, diamètre 8 ''pouces (219.18mm) et d'épaisseur 6.4 mm.



**Fig IV.1 : Tubes en acier X42 utilisés dans l'opération de soudage**

Sa composition chimique est mentionnée dans le tableau ci-dessous :

**Tab IV.1: Composition chimique du métal de base X42 [25]**

Nuance	Carbone	Manganèse	Phosphore	Soufre	Autres
X42	0.28%	1.3%	0.03%	0.03%	(No+V+Ti)<0.15%

On remarque que cet acier détient une teneur en carbone légèrement élevée ainsi que les impuretés (P, S).Ce qui nécessite impérativement un préchauffage en soudage (Céq égal 0.498%).

## b. Métal d'apport (MA) [25] [26]

Le métal d'apport utilisé pour exécuter la 1<sup>ère</sup> passe (passe de pénétration) du soudage multi passe est une électrode **AWS A5.1:E6010** de type cellulosique, de diamètre 3.2 mm et de longueur 350 mm

En ce qui concerne la passe de bourrage (2<sup>ème</sup> passe) et de finition (3<sup>ème</sup> passe) on a utilisé une électrode **AWS A5.1 :E7018** de type basique, de diamètre 3.25 mm et de longueur 350 mm.

Les compositions chimiques des deux types d'électrodes sont indiquées dans les 2 tableaux ci-après:

**Tab IV.2 : Composition chimique de l'électrode E6010 [26]**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Nb
0.12%	0.16%	0.56%	0.013%	0.008%	0.02%	0.02%	0.02%	<0.01%	0.02%	<0.01%

**Tab IV.3 : Composition chimique de l'électrode E7018 [26]**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	V
0.06%	0.67%	1.2%	0.018%	0.006%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	0.01%	<0.1%	0.02%

La composition chimique du MA utilisé représente une disparité remarquable comparativement au MB.

Toutefois cet inconvénient n'influencera pas la qualité du cordon du fait qu'on est dans la tolérance autorisée

## IV.2 Propriétés mécaniques du couple métal de base/ métal d'apport :

Les valeurs des propriétés mécaniques du métal de base et du métal d'apport qu'on citera après se réfèrent toutes à la norme américaine API.

### a. Métal de base

Le tableau qui suit résume les caractéristiques mécaniques ( $R_m$ ,  $R_e$ , A) de l'acier X42.

**Tab IV.4: caractéristiques mécaniques de l'acier X42 [25]**

Resistance à la Rupture $R_m$ (MPa)	Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	Allongement A (%)
414	290	23

## b. Métal d'apport

Tab IV.5: Caractéristiques mécaniques des 2 classes d'électrodes [26]

	Resistance à la Rupture $R_m$ (MPa)	Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	Allongement A (%)
Électrode AWS A5.1:E6010	470 – 600	$\geq 390$	$\geq 22$
Électrode AWS A5.1:E7018	540	445	29

## IV.3 Procède de soudage

Le procédé utilisé dans l'opération de soudage du tube en acier c'est le soudage à l'arc avec électrode enrobée cellulosique et basique en position montante (SMAW). Le principe de ce procédé consiste à élever la température jusqu'à la fusion des 2 bouts à souder et de l'électrode créant ainsi un bain de fusion protégé par un laitier et des gaz protecteurs.

Le chanfrein adopté est de forme V et les dimensions des bords à souder (écartement, talon ainsi que l'angle) sont indiquées sur la figure ci-dessous :

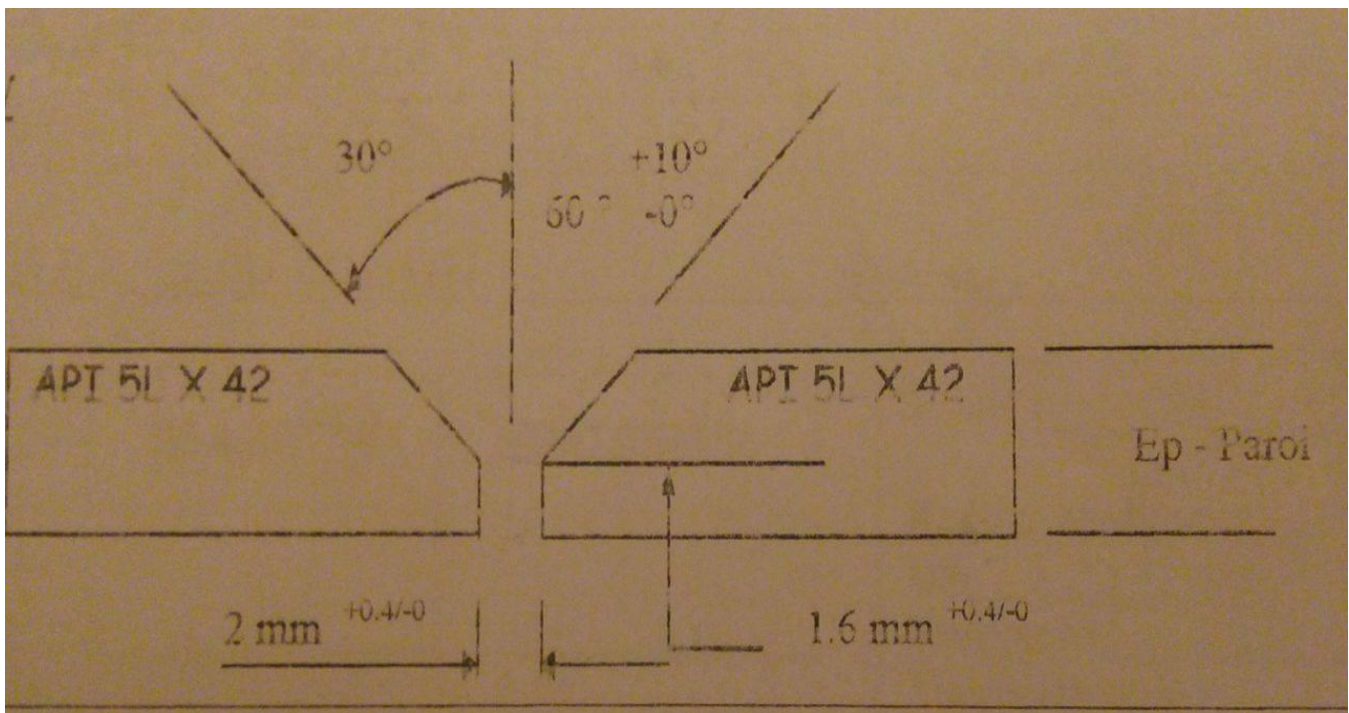


Fig IV.2 : Dimensions du chanfrein en V

Les paramètres utilisés dans la réalisation du soudage mono-passe et soudage multi-passe sont reportés dans les tableaux ci-dessous

**Tab IV.6 : Paramètres utilisés dans le soudage mono-passe**

soudage mono-passe									
Passes	type électrode	Φ (mm)	nature du courant	I <sub>s</sub> (A)	U <sub>s</sub> (V)	temps de soudage (mn)	temps de meulage (mn)	V <sub>s</sub> (cm/mn)	E (J/cm)
1 <sup>ère</sup> passe E <sub>1</sub>	cellulosique (6010)	3.25	CC (-)	75	20	2.75	1.61	8.327	8430.13
2 <sup>ème</sup> passe E <sub>2</sub>	cellulosique (6010)	3.25	CC (-)	72	20	3.06	0.86	7.483	9005.21
3 <sup>ème</sup> passe E <sub>3</sub>	cellulosique (6010)	3.25	CC (-)	80	20	2.21	1	10.361	7226.41

**Tab IV.7 : Paramètres utilisés dans le soudage multi-passe**

soudage multi-passe									
Passes	type électrode	Φ (mm)	nature du courant	I <sub>s</sub> (A)	U <sub>s</sub> (V)	temps de soudage (mn)	temps de meulage (mn)	V <sub>s</sub> (cm/mn)	E (J/cm)
1 <sup>ère</sup> passe	cellulosique (6010)	3.25	CC (-)	70	25.5	6.68	1.61	10.3	7156.31
2 <sup>ème</sup> passe	basique (7018)	3.25	CC (+)	80	25	6.93	0.86	9.930	9425.28
3 <sup>ème</sup> passe	basique (7018)	3.25	CC (+)	90	25	5.95	1	11.566	9103.96

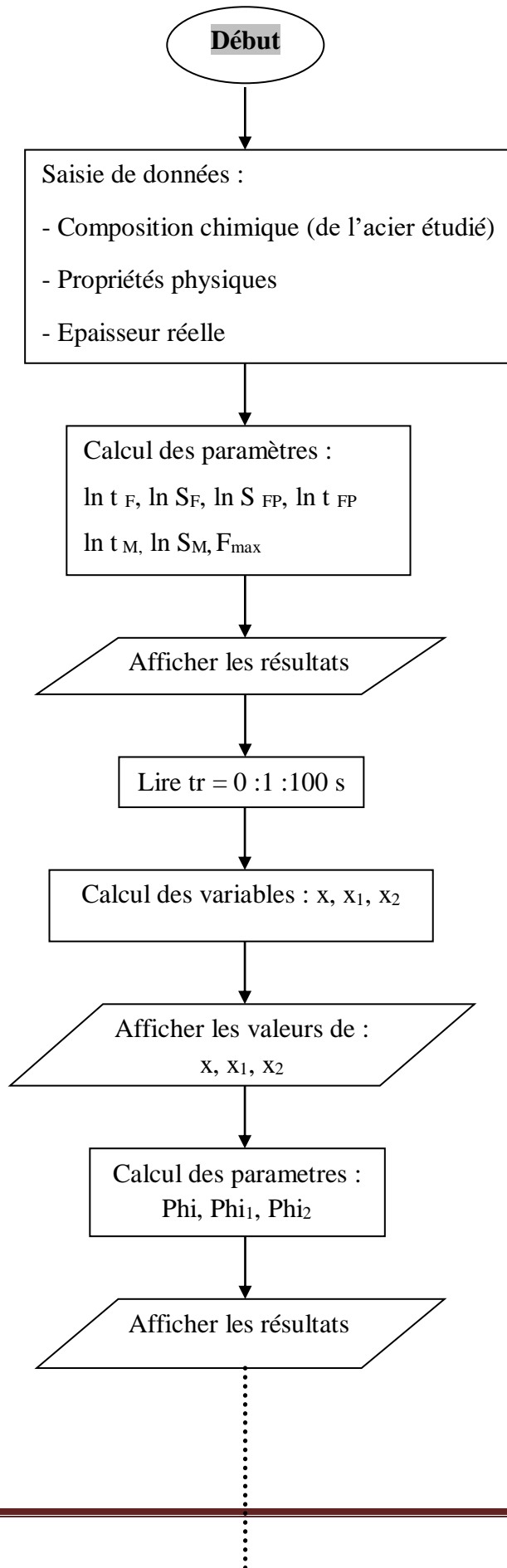
**Remarque :**

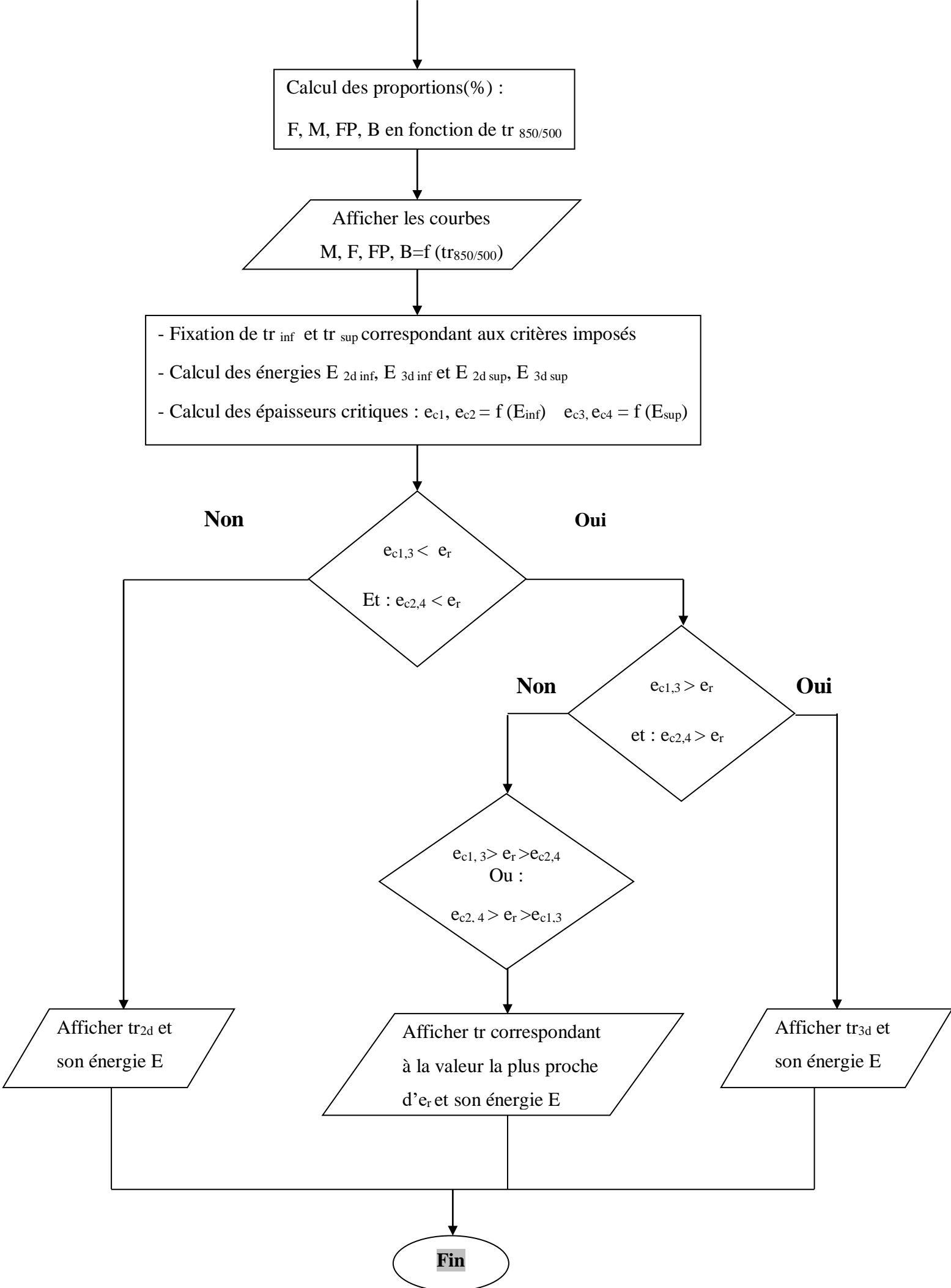
- Dans le soudage mono-passe on a fait varier 3 fois la vitesse. Le soudage multi-passe a été par 3 passes (passe de pénétration- bourrage – finition).
- Les énergies de soudage on été calculées par rapport au procédé par la relation suivante :

$$E = \eta \cdot \frac{U_s I_s}{V_s} \cdot 60 \text{ (J/cm)}$$

$\eta = 0.78$  : Rendement effectif thermique du procédé SMAW

#### IV. 4 Algorithme de calcul des taux de phases présents dans la ZAT





La courbe ci après a été obtenue par une programmation sur matlab. Elle représente les taux de phases présents dans la ZAT (zone à gros grains) pendant l'opération de soudage en fonction du temps de refroidissement  $t_r$  entre 850 et 500°C.

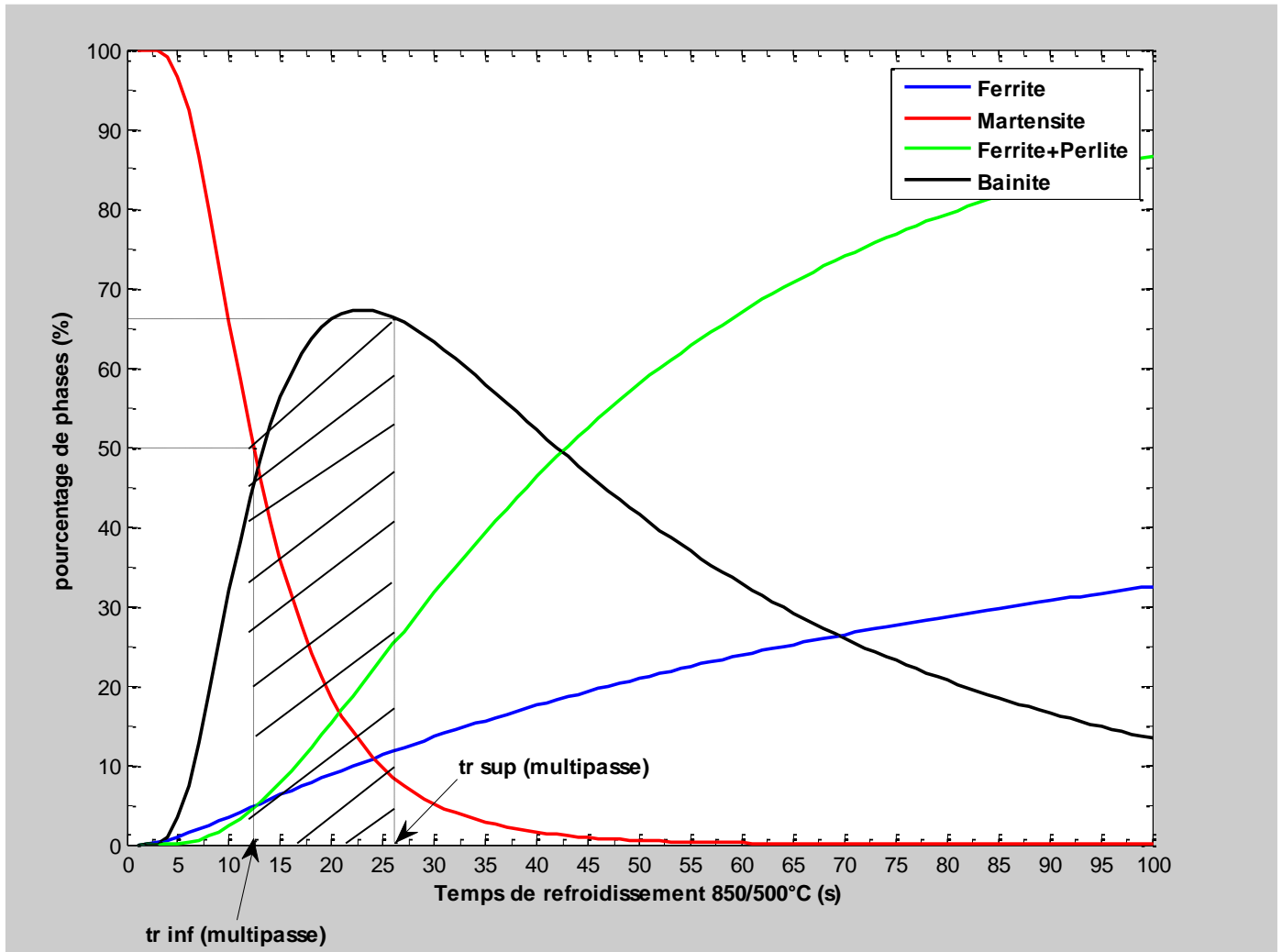


Fig IV.3 : Diagramme des phases présentes dans la ZAT en fonction de  $t_r$  850/500 en soudage

### Interprétation :

On voit que le taux de Martensite diminue quand le temps  $t_r$  850/500 augmente, contrairement au taux de Ferrite +Perlite qui est en croissance progressive. Quant au taux de Bainite il croit et prend une valeur limite 68 % (seuil) correspondante à un temps  $t_r = 23$  s, puis décroît.

Pour delimiter la plage de travail assurant la fiabilité de la soudure de point de vue fissuration et grosseur du grain, des critères de soudabilité préétablis s'imposent :

- 50 % de Martensite caracterisant la limite inferieure  $t_{r_{inf}}$
- Un taux de Bainite critique favorisant l’amorçage de la grosseur des grains (cas défavorable) caracterisant la limite superieure  $t_{r_{sup}}$ .

Dans le cas de cet acier cette plage est fixée comme suit :

- 50% de Martensite  $\rightarrow t_{r_{inf}} = 12.5 \text{ s}$
- Taux critique de Bainite (66% )  $\rightarrow t_{r_{sup}} = 26 \text{ s}$

Pour avoir une meilleure qualité de soudure il est donc conseillé de travailler dans cet intervalle de temps de refroidissement  $t_{r_{850/500}}$ .

Les proportions theoriques de phases obtenues dans la ZAT pour  $t_{r_{inf}}$  et  $t_{r_{sup}}$  sont mentionnées dans le tableau suivant :

**Tab IV.8 : Les proportions de phases présente dans la ZAT pour  $t_{r_{inf}}$  et  $t_{r_{sup}}$**

Taux de phases $t_{r_{850/500}}$	M (%)	B (%)	FP (%)
$t_{r_{inf}} = 12.5 \text{ s}$ $E_{inf} = 7082.50 \text{ J/cm}$	50	45	5
$t_{r_{sup}} = 26 \text{ s}$ $E_{sup} = 10215.0 \text{ J/cm}$	8	66	26

#### IV. 5 Essais mécaniques :

Les essais mécaniques sur les assemblages soudés ont pour but de comparer les caractéristiques mécaniques à celles du métal de base, tout en respectant une ou plusieurs normes exigées. Dans cette étude, la norme utilisée est la norme américaine API (American petroleum institut).

##### a. Essais de traction (soudage multi-passe)

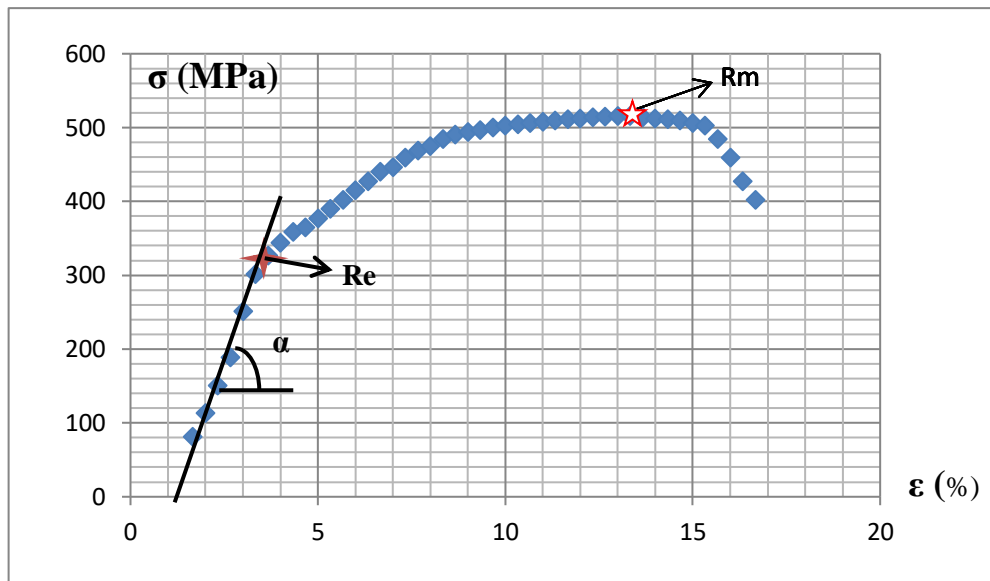
L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction généré par la machine jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (Re Rm).

- Les essais de traction ont été réalisés selon la norme NF EN10002-1 sur une machine électromécanique (INSTRON WALPERT). dans l'air et à température ambiante (= 20 à 30°C). La vitesse de déplacement imposée est de 0,035 mm/s.



**Fig IV.4 : Machine de traction (INSTRON WALPERT)**

La courbe ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) ci dessous traduit le comportement de l'assemblage soudé face à la sollicitation en traction.



**Fig IV. 5 : Courbe de traction ( $\sigma$ - $\epsilon$ )**

La partie linéaire a pour équation :  $y = 130.1x + 72.13$  avec un facteur de corrélation  $R^2 = 0.989$

La tangente  $\alpha$  représente le module de Young qui est de la valeur 130.1 MPa.

Les résultats essentiels de cette courbe sont regroupés dans le tableau ci après :

**Tab IV.9 : Résultats de l'essai de traction**

Resistance à la rupture $R_m$ (MPa)	Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	Allongement (%)
515	327	12

### Interprétation :

La valeur de résistance à la rupture  $R_m$  de l'assemblage soudé est nettement supérieure à celle du métal de base ce qui explique la rupture observée en dehors du cordon de soudure, exactement au niveau du métal de base. Cette élévation de  $R_m$  est justifiée par le traitement local influant positivement sur la microstructure. La soudure peut être donc considérée fiable et ce selon la norme exigée.



**Fig IV.6 : État des éprouvettes avant et après la traction**

**b. Essai de dureté (soudage mono et multi-passe)**

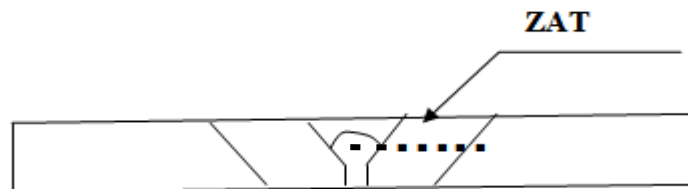
La dureté caractérise la résistance à la déformation et à la pénétration d'un matériau. Selon les méthodes d'essai employées on obtient des valeurs repères qui permettent de faire le classement des zones du cordon de soudure (ZAT) et de tracer le profile de dureté de chaque pièce.

- **Essai de dureté Vickers  $H_{v30}$**

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur, en forme de pyramide droite à base carrée (chaque 3mm), sous une charge "F", et à mesurer la diagonale "d" de l'empreinte après enlèvement de la charge.

La dureté Vickers est proportionnelle au quotient de la charge d'essai "F" (30 N) par l'aire (en mm<sup>2</sup>) de l'empreinte. La relation se présente comme suit :

$$H_{v30} = 30 * \frac{1.8544}{d^2}$$

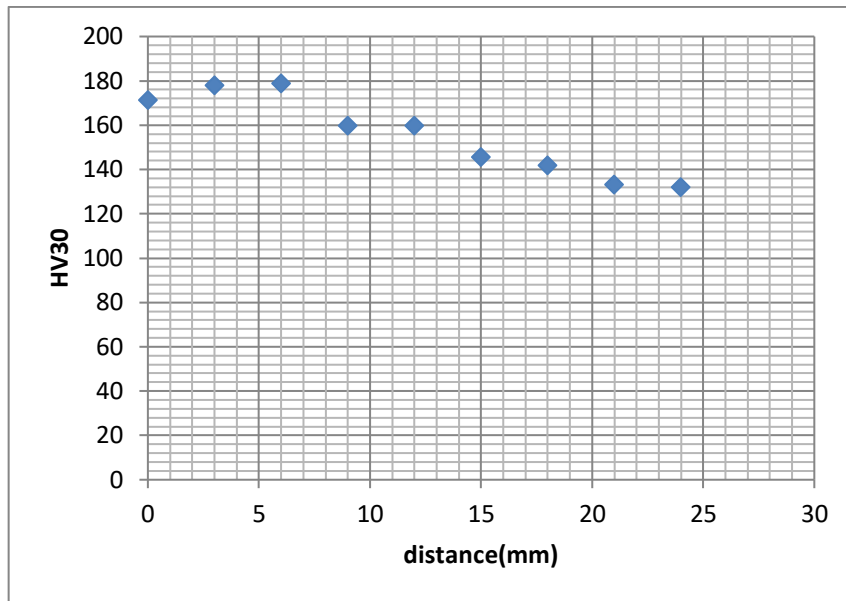


**Fig IV.7 : Méthode de mesure de dureté**

Les résultats des essais effectués sont représentés sous forme de graphes.

Les 4 figures suivantes représentent les profiles de valeurs moyennes de duretés des 3 échantillons en soudage mono-passe ainsi que celui du soudage multi passe.

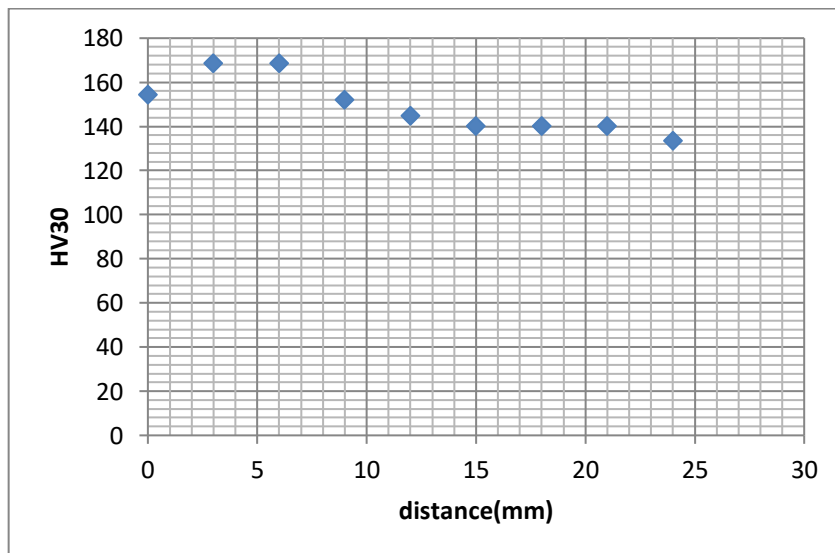
Energie de soudage mono-passe  $E_1 = 8430.13 \text{ J/cm}$



- $H_{v30 \text{ max}} = 178$

Fig IV.8 : Courbe de dureté en soudage mono-passe  $E_1$

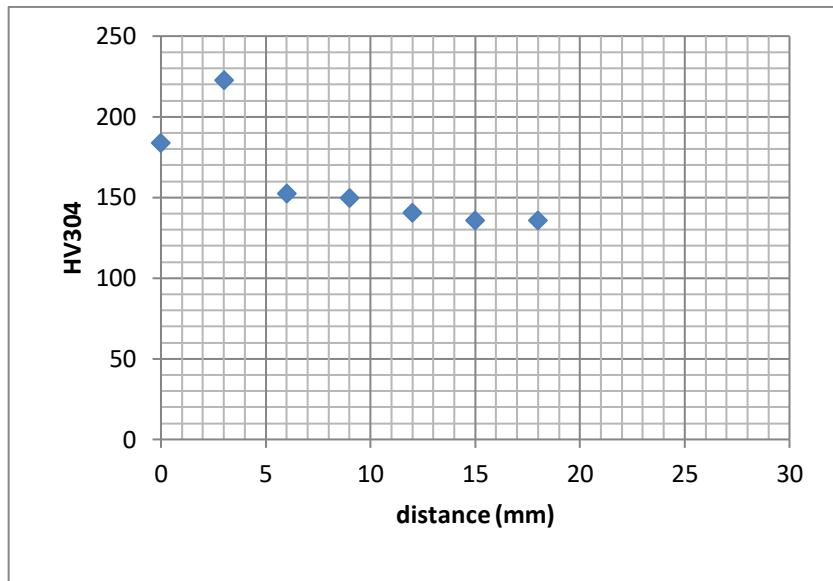
Energie de soudage mono-passe  $E_2 = 9005.21 \text{ J/cm}$



- $H_{v30 \text{ max}} = 168$

Fig IV.9 : Courbe de dureté en soudage mono-passe  $E_2$

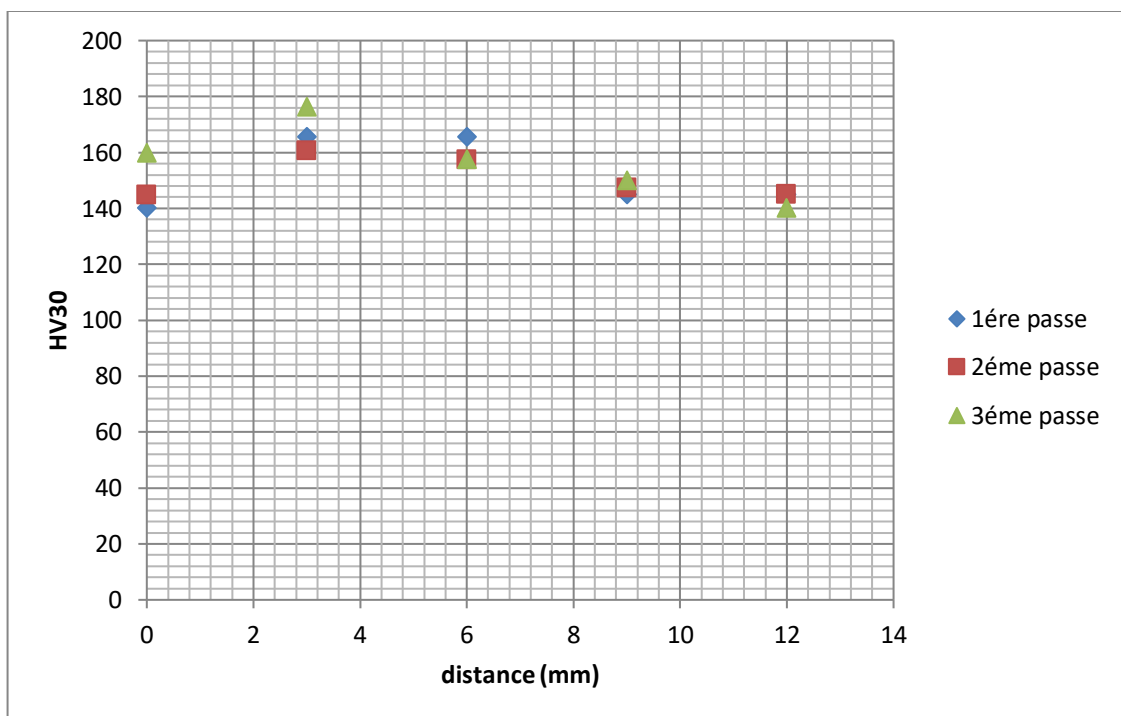
Et enfin pour l'énergie de soudage mono-passe  $E_3 = 7226.40 \text{ J/cm}$



- $H_{v30max} = 222$

**Fig IV.10 : Courbe de dureté en soudage mono-passe  $E_3$**

Dureté HV 30 du soudage multi-passe



**Fig IV.11: Courbe de dureté en soudage multi-passe**

## **Interprétation :**

La dureté de la ZAT est directement liée à la teneur en carbone, des éléments d'additions et des conditions d'austénitisation.

Les courbes ci-dessus montrent de quelle manière la dureté varie transversalement dans la liaison soudée. On remarque qu'elle varie de la même façon dans les 4 échantillons. De la zone fondue ZF, la dureté  $H_{v30}$  augmente jusqu'à une valeur maximale au niveau de la ZAT (zone à gros grains ou le taux de Martensite est élevé), puis en s'éloignant, elle a tendance à diminuer sur une large plage pour ensuite se stabiliser après une certaine distance à une valeur correspondant à celle du métal de base  $H_{v30} = 138$ .

Cette valeur est relativement élevée du fait des teneurs élevées des impuretés (C, P). Le C favorise la formation de martensite et le phosphore fragilise aussi le matériau par sa particularité de freinage des dislocations dans les cristallites. Cet état de fait s'explique aussi par l'effet du laminage (écrouissage) favorisant la densité des dislocations

On constate aussi une différence entre les 4 courbes dans la valeur  $H_{v30max}$  atteinte. Elle est d'autant plus grande que l'énergie de soudage est faible favorisant la formation de Martensite.

Par exemple, dans le cas du soudage mono-passe, pour l'énergie la plus faible E3, la valeur  $H_{v30max}$  est de 222 comparée à  $E1 > E3$  ou elle a atteint 178  $H_v$  et pour E2 la plus élevée des 3 énergies on note une dureté de 169.

Quant à l'échantillon soudé en multi-passe on remarque une légère diminution de la dureté, cela s'explique par le changement structural résultant du cycle thermique répété qui fait réduire le taux de Martensite au profit de la Bainite. La dureté  $H_{v30max} = 176$  est observée au niveau de la 3<sup>ème</sup> passe. Ceci s'explique par l'effet de dissipation thermique favorable induisant à la formation d'un taux élevé de Martensite

## **IV. 6 Analyse métallographique**

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe est simple ; une onde est envoyée sur le substrat préalablement préparé. Cette onde est ensuite captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable.

L'image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra et stocké sur ordinateur à l'aide de logiciel.

L'analyse métallographique passe par les 3 étapes suivantes :

### a. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons a été réalisé par découpage à l'aide d'une scie mécanique avec une lubrification abondante, et afin d'obtenir des pièces facilement manipulables et adaptables avec le porte échantillon du microscope on est obligé de passer par une étape d'usinage par fraisage.

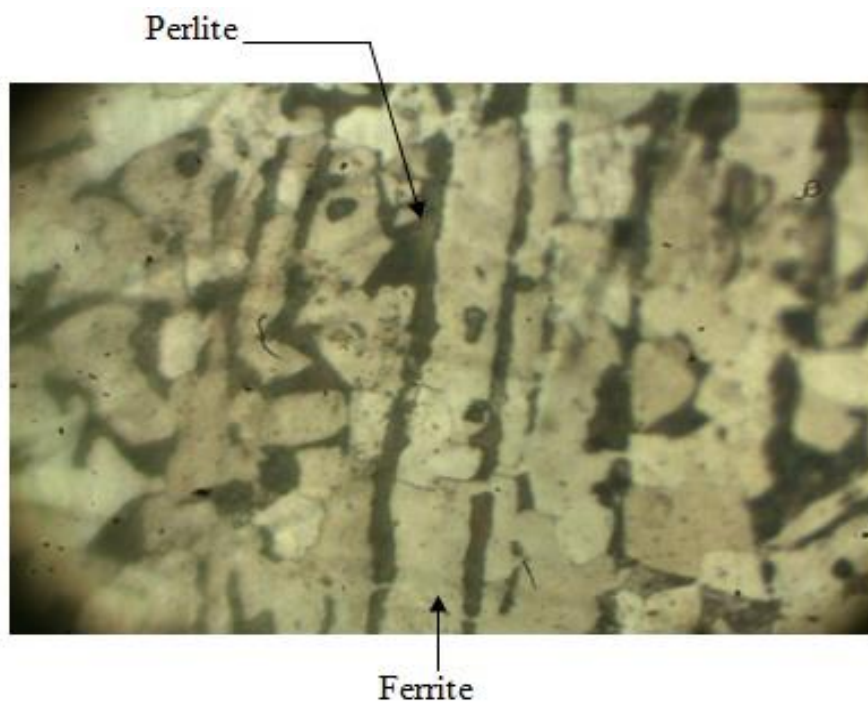
### b. Polissage et attaque chimique

L'observation métallographique ne peut pas être effectuée directement juste après le prélèvement. On a procédé au polissage avec du papier abrasif (240, 420, 800, 1200, 2400, 4000) pour éliminer l'épaisseur perturbée, puis réalisé l'attaque chimique au Nital 5 % (1 à 4% de  $\text{HNO}_3$ , reste  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) avec une durée d'attaque de 15s à 45s ensuite les échantillons ont été rincés et bien sèches.

### c. Observation

On s'est servi d'un microscope optique (HUND WETZLAR), permettant de réaliser des grossissements de 40,100, 200, 400. Les micrographies enregistrées ici sont de grossissement 400 car leur visibilité est meilleure.

#### c<sub>1</sub>. Microstructure du métal de base MB



**Fig IV.12 : Micrographie du métal de base grossissement 400**

Le MB représente une structure étirée (laminage à froid) composé principalement de Ferrite (76%) et de Perlite (24%).

c<sub>2</sub>. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_1 = 8430.13 \text{ J/cm}$  /  $H_{v30\text{max}} = 178$

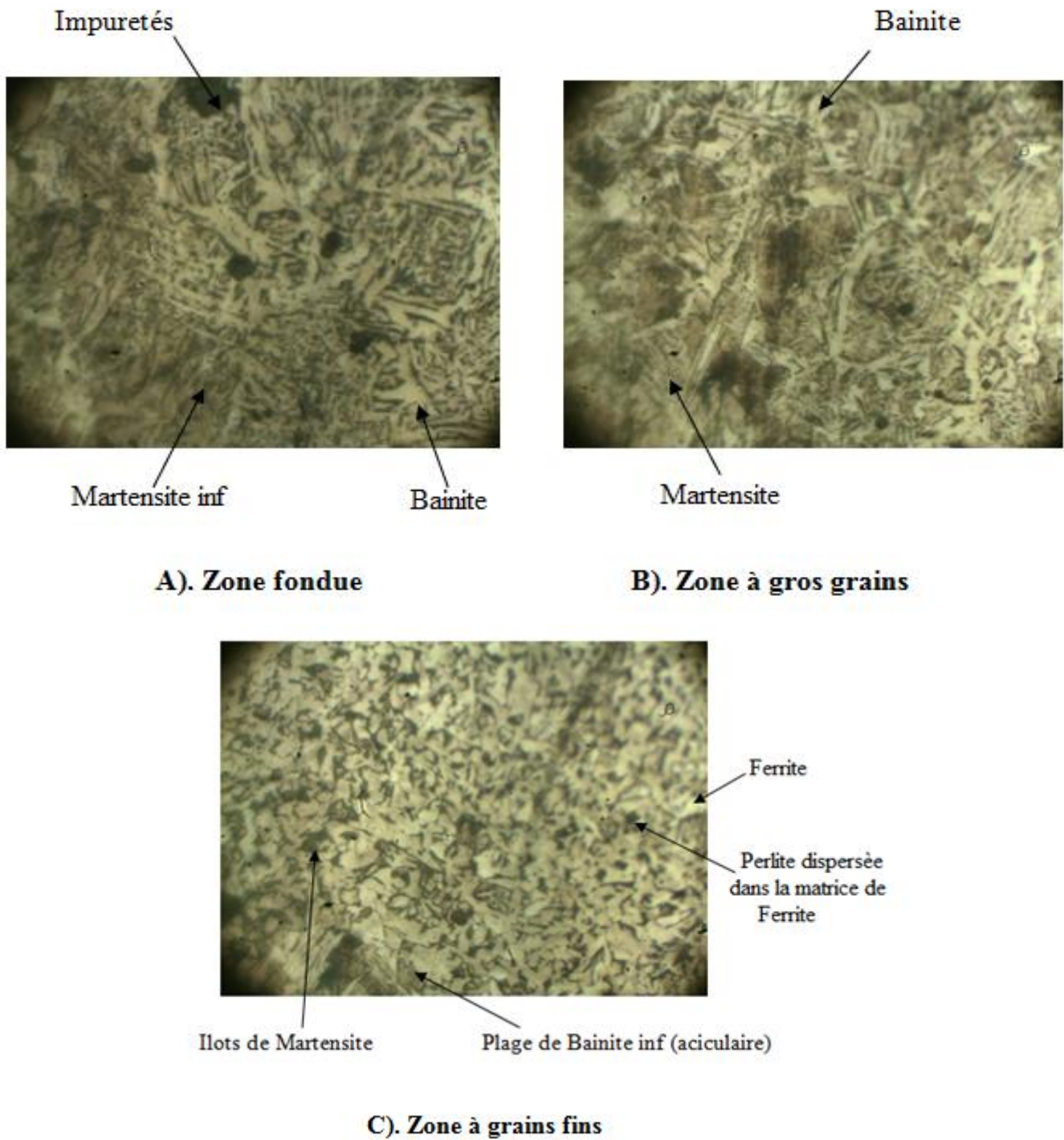
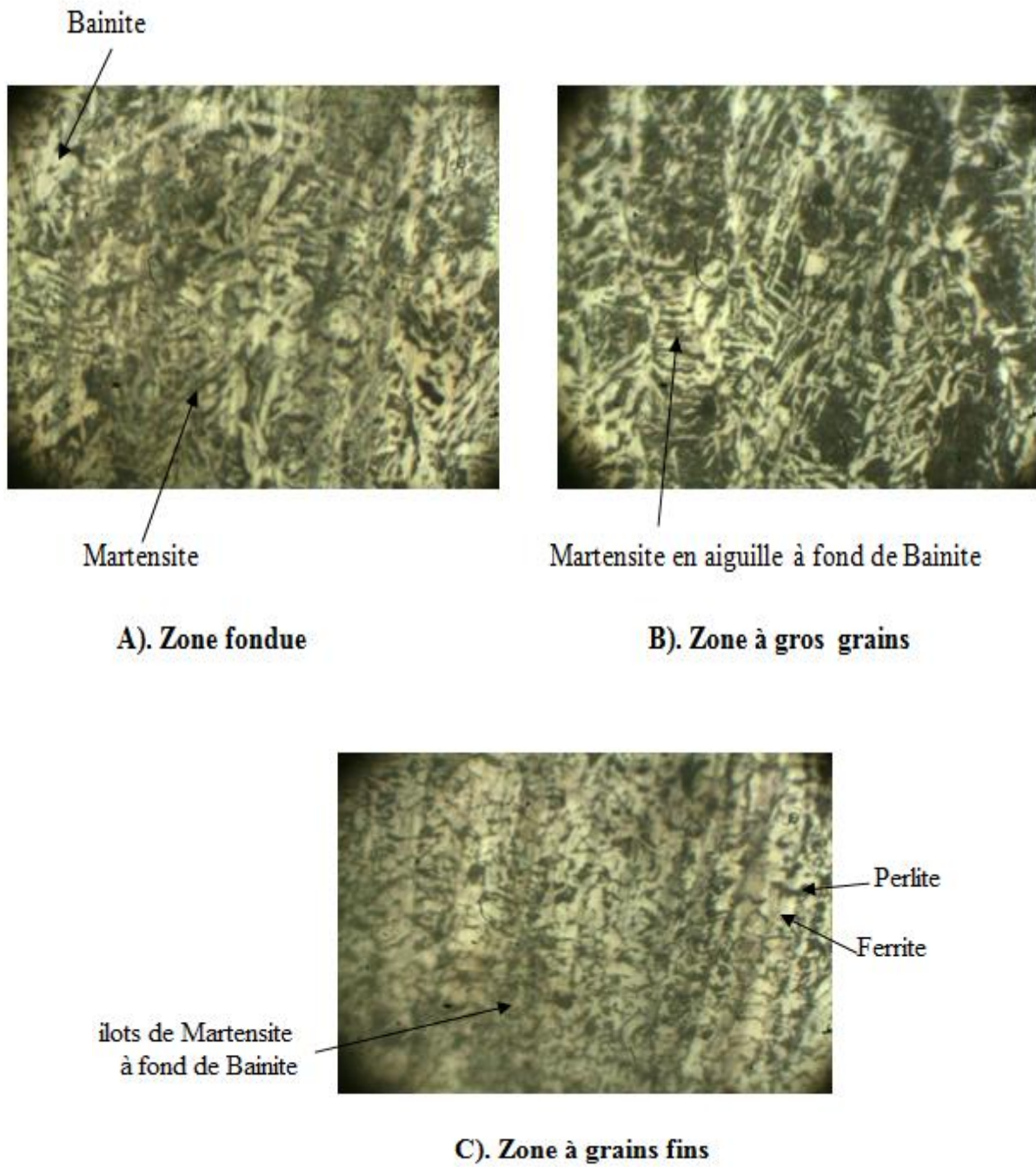


Figure IV.13 : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_1$

**c3. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_2= 9005.21 \text{ J/cm} / H_{v30\text{max}} =168$**



**Figure IV.14 : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_2$**

c4. Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_3 = 7226.40 \text{ J/cm}$  /  $H_{v30\max} = 222$

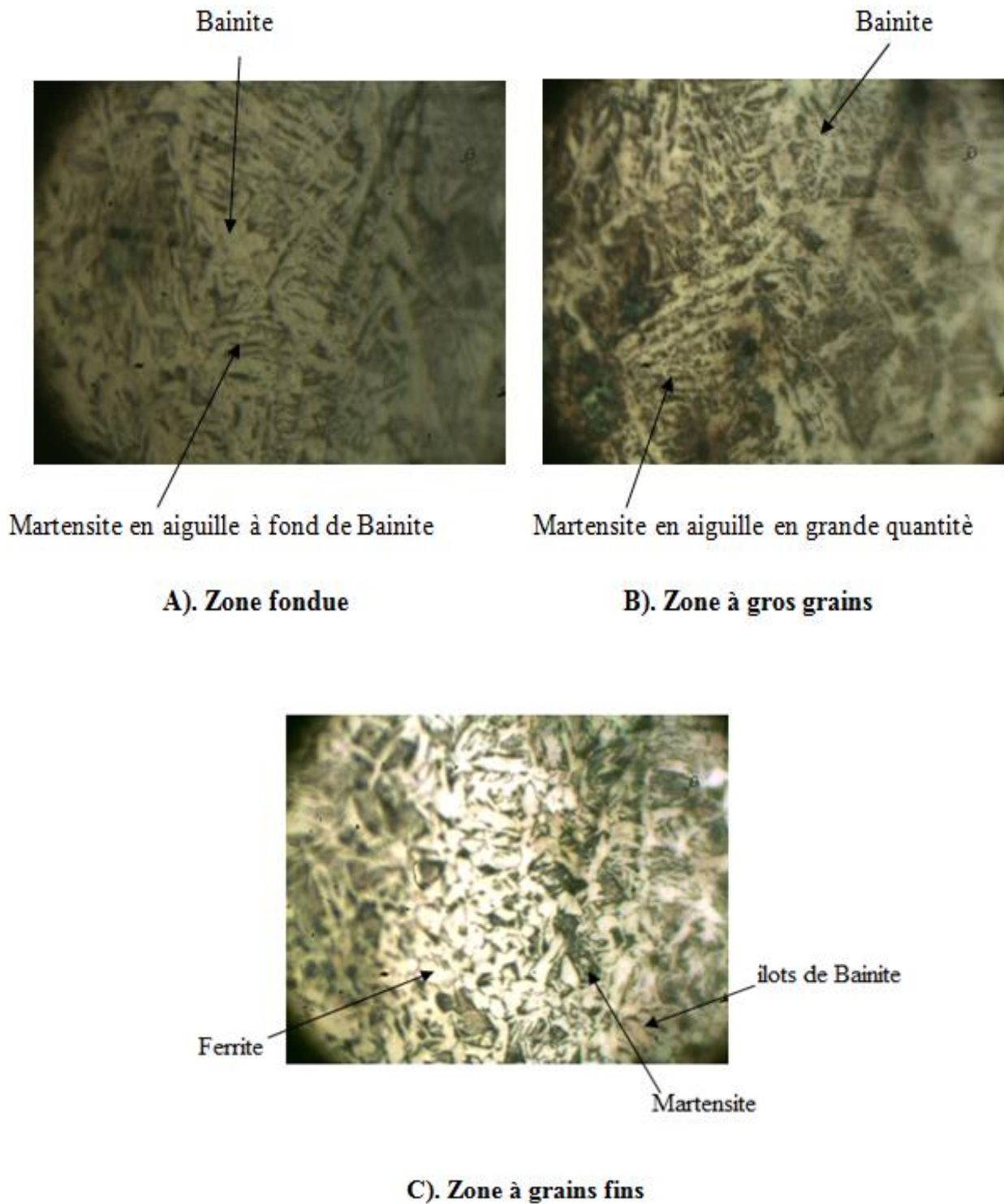


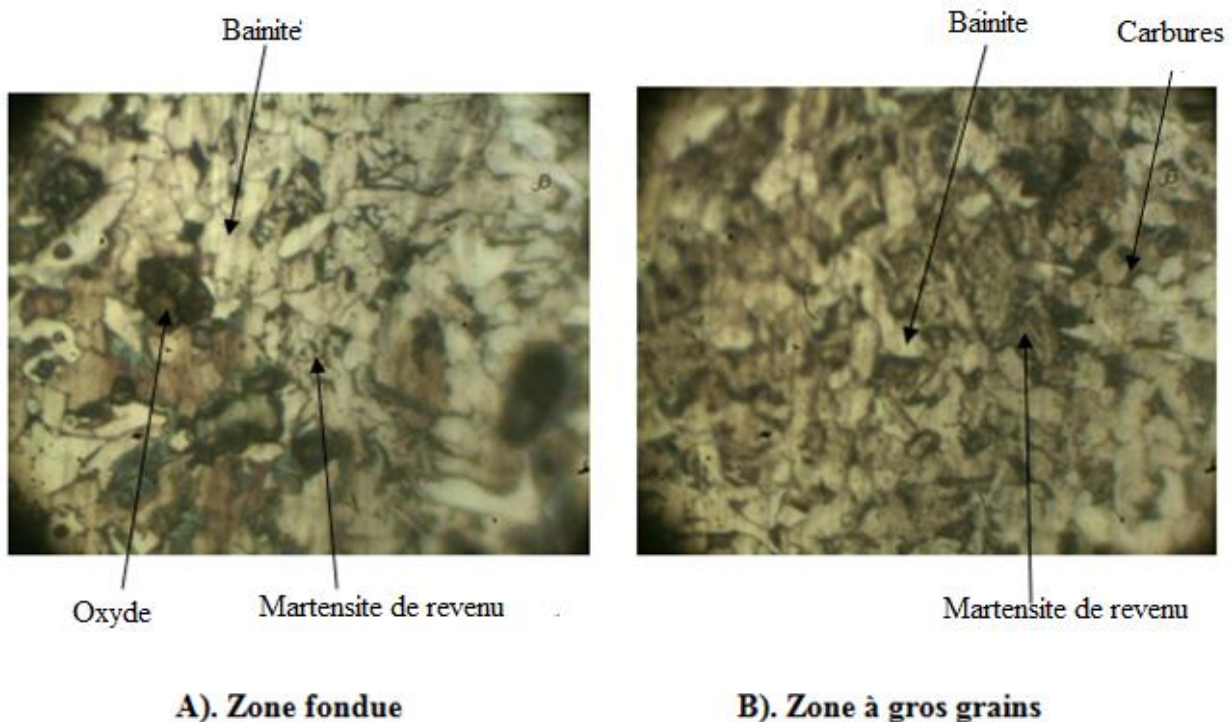
Figure IV.15 : Micrographie de l'échantillon en soudage mono-passe avec  $E_3$

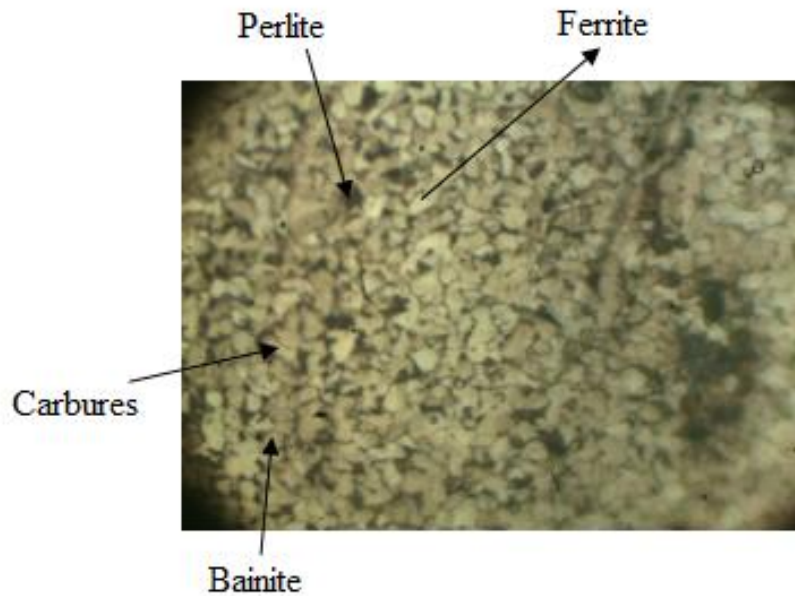
## Discussions :

Dans le soudage mono-passe les micrographies observées des différentes zones de la soudure (MF et ZAT) font apparaître souvent de la Martensite de la Bainite avec des proportions différentes, et ce selon l'énergie adoptée. Toutefois le taux maximal de Martensite se forme primordialement au niveau de la zone à gros grains. Notamment dans le cas du soudage de l'échantillon E3. Ce fait se traduit par une dureté maximale  $H_{v30max} = 222$  comparativement aux autres échantillons qui ont été réalisés par énergie légèrement élevées. La zone à grains fins résulte de l'effet de recuit de normalisation et de recristallisation de se fait on remarque la présence de Ferrite et de Perlite dans la structure

**Remarque :** il est à noter aussi que dans le cas du soudage l'austénite résiduelle (phase instable) est toujours omni présente dans la microstructure des aciers à haute teneur en carbone. Mais il est difficile de la localiser.

### c5. Micrographie de l'échantillon en soudage multi-passe avec $H_{v30max}=165$





**C). Zone à grains fins**

**Fig IV.16: Micrographie de l'échantillon en soudage multi-passe**

**Discussions :**

Les constituants fragilisant la soudure se voient diminuer par effet du post-chauffage du système multi-passe. Ce fait est remarquable sur les micrographies des différentes zones où le taux de Bainite prend le dessus sur celui de la Martensite de revenu. Cette dernière émane de la transformation de Martensite tétragonale en Martensite quadratique sous l'effet de la précipitation des carbures de type  $\epsilon$   $Fe_2C$  (température d'inter passe). La zone de recuit représente une structure Ferrito- Perlitique fine avec quelques îlots de Bainite à fond de Ferrite

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail réalisé a été très bénéfique, il nous a permis d'acquérir et d'enrichir nos connaissances sur le soudage des aciers en général, et plus précisément du point de vue structural (transformations métallurgiques générées par les cycles thermiques), d'observer tout les facteurs et paramètres qui entrent en jeu au cours de l'opération et leur influence sur les risques éventuels des soudures.

Il a aussi été une occasion de nous familiariser avec les techniques expérimentales et les équipements utilisés dans la recherche (essais de traction, dureté, microscopie) et de prendre part de la manipulation informatique par la conception d'un programme Matlab qui a été l'outil principal dans le traitement de ce thème.

La problématique a été abordée sous un seul angle, à savoir celui de la prédétermination des constituants de la ZAT (zone à gros grains) et de la localisation de l'intervalle d'énergies  $[E_{inf}, E_{sup}]$  optimal permettant de réaliser une soudure fiable sans fissuration et conforme aux exigences imposées. Si l'on se réfère au diagramme de phase obtenu (théorique), on constate que l'intervalle d'énergie déterminé engendre une microstructure constituée principalement de Bainite et aussi de Martensite.

Les énergies appliquées se trouvent toutes incluses dans la plage de sécurité localisée sur le diagramme. Du coup la fissuration éventuelle est écartée. On aurait souhaité avoir une énergie défavorable pour mieux valoriser cette méthode d'optimisation. Toutefois l'énergie  $E_3=7226$  J/cm appliquée (énergie minimale) en soudage mono-passe a donné tout de même de bons résultats. Cependant, du point de vue économie d'énergie et productivité, il serait préférable donc de choisir  $E_3$  au lieu d' $E_1$  et  $E_2$  pour l'exécution de la 1<sup>ère</sup> passe dans le cas du système multi passe

Les essais de traction ( $R_m \text{ soudure} > R_m \text{ (MB)}$ ) et de dureté ( $HV_{30_{max}}=165$ ) effectués sur l'échantillon soudé en multi-passe révèlent des valeurs appréciables. Ceci résulte de l'effet favorable du post-chauffage sur la microstructure.

Nous estimons que le travail réalisé fut il une solution partielle à cette problématique et qu'il serait souhaitable de l'étoffer encore mieux en considérant d'autres facteurs à savoir ; les contraintes résiduelles et la teneur d' $H_2$  diffusible.

## Références bibliographiques

- [1] : G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [2] : J. Baralis, G. Maeder Précis de Métallurgie, (élaboration, structures- propriétés et normalisation), 5ème édition, Nathan, 1990.
- [3] : Nuced. La grande encyclopédie Larousse
- [4] : Cours (ENSIBS). MEC 101, technologie et matériaux de construction
- [5] : H.Michel-Montrieux, Physique des Matériaux, Université de Liège, labo1.pdf.
- [6] : S.Bensaada, Elaboration Des Métaux Ferreux (FONTES ET ACIERS).
- [7] : A. Pineau (2009) "Intégrité mécanique des pipelines et gazoducs : enjeux scientifiques et techniques". Séminaire International sur les Technologies Mécaniques : SITEM 09, Tlemcen 05 et 06 Décembre 2009.
- [8] : Sedrini Abdelkader, Etude sur le comportement en endommagements des aciers API 5X65 du model weibull, ingénieur mécanique, université Tlemcen, 2007
- [9] : Bouziane Abdelkader, contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure, magister en génie mécanique, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2008.
- [10] : Michael F. Ashaby. Choix des matériaux en conception mécanique. DUNOD 1997.
- [11]: American Petroleum Institute, (2004), « API Specification 5L » 42nd ed, Washington, D.C, 2004.
- [12] : S.Benissaad, “ Le soudage ”.Edition office des publications universitaire Alger.1991.
- [13] : Klas.Weman, “Aide mémoire de l'ingénieur, procédés de soudage ”.1ère Edition DUNOD.2005.
- [14] : Jean.Maton, “Technologie du soudage”, édition 2014. Disponible sur : <<https://www.rocdacier.com/definition-soudage-soudabilite-metaux/>>, consulté le 12/08/2017.

[15] : M. Marc BENTI. “Dossier professeur métallurgie de soudage ”.Centre national de ressources Structures métalliques. St Denis.

[16] : Comité sectoriel de la main-d’œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), ’’Soudage et assemblage-soudage, Guide auto apprentissage ’’, Québec, Aout 2010.

[17] : C. Dang, ‘‘Wikibooks’’ (en ligne) disponible sur :  
<<https://fr.wikibooks.org/wiki/Soudage/G%C3>>, Consulté le 10/08/2017.

[18] : Roland Cazes, ’Technique de l’ingénieur’, traité génie mécanique, B7730.

[19] : Prof. Dr. Sc. Techn. Peter Seyffarth: Warmeausbeeitug brin Schweiben Wilhem – Pieck unversitat Rostock 2 LEHRBRIEF.Ed 1980.

[20] : R. Vzrisellaz Soudage, Elément de conception et de réalisation .Dunode 1982.

[21] H. GRANJON. Bases métallurgiques du soudage .2<sup>ème</sup> édition fév. 1995

[22] J. Baralis, G. Maeder. “Précis de Métallurgie, (élaboration, structures- propriétés et normalisation)”, édition, Nathan, 1997.

[23] : Initiation a MATLAB, Olivier LOUISNARD, 8 septembre 2005.

[24] : Débuter en Matlab IFIPS Cycle préparatoire Université Paris-Sud-Bernard Héron - Frédéric Pascal - Pierre Pansu, 22 mars 2008.

[25] : spécification APL 5L 42<sup>ème</sup> édition-janvier 2000

[26] : Boehler inspection certificate 3.1 AWS A5.1 :E6010, SFA/AWS A5.1 :E7018, 10 août 2013

# **ANNEXE**

# ANNEXE 1

## Présentation de l'E.N.G.T.P

**Dénomination :** Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers

**Logo :** E.N.G.T.P.

**Statut :** Société par actions

**Régime juridique :** Entreprise publique économique

**Filiale du groupe :** SONATRACH

**Siège social :** zone industrielle BP 09 - Reghaia - Alger



Siège de la direction générale

GTP est une société, filiale du groupe **SONATRACH**, qui offre des services de construction d'ouvrages destinés à la production, transformation et distribution des Hydrocarbures, la pose de canalisation à grande distance, l'engineering, le procurement, la maintenance industrielle, le soudage et le contrôle de soudage. Pour réaliser ses missions, GTP s'appuie sur un groupe à l'expérience nationale et internationale reconnue, le Groupe SONATRACH.

## DOMAINES D'INTERVENTIONS

GTP intervient dans les secteurs suivants :

Hydrocarbures.

- Chimie et pétrochimie.
- Energie.
- Matériaux de construction.
- Hydraulique.



## **LES ACTIVITES DE G.T.P**

GTP effectue toute sorte d'activités : Engineering, Génie civil et bâtiments, Montage industriel, Préfabrication, Canalisation, Soudage, Contrôle et essais, Traitement thermique, maintenance industrielle.

### **Présentation de l'E.N. KANAGHAZ :**

#### **Historique :**

En 1970, une société mixte Algéro- Espagnole, dénommée « SERIG » (Société d'Etudes et de Réalisation des Industries du Gaz), est créée entre SONELGAZ (51%) et le Bureau d'études espagnol HEYMO (49% des actions).

En 1976, et après rachat des parts de HEYMO, cette société a été intégrée à SONELGAZ, comme unité chargée de la réalisation de l'ensemble des infrastructures de transport et de distribution de gaz.

Suite à la restructuration des entreprises publiques, cette unité fut érigée en 1983 en Entreprise Nationale de Réalisation de Canalisations, par abréviation« KANAGHAZ ».

Enfin, dans le cadre du passage à l'autonomie, elle fut transformée en entreprise Publique économique Société par Actions (SPA).

Le mois de Janvier 2006, KANAGHAZ a été rattachée à SONELGAZ en tant que filiale travaux gaz. Elle acquiert dès lors, le statut de société filiale de SONELGAZ

Objet social

#### **KANAGHAZ a pour objet social :**

L'étude et la réalisation des canalisations de transport et distribution de gaz et autres fluides.

Dans ce cadre, elle a pour objet de :

- renforcer les moyens de réalisation de canalisations de gaz et de tous autres fluides par la promotion et la rentabilisation maximales des moyens dont elle dispose ;
- développer ses moyens de conception et d'études pour maîtriser la technologie rattachée à son objet ;
- promouvoir les études d'organisation et de gestion pour rentabiliser l'économie et la conduite de ses chantiers ;

- créer et développer tous moyens concourant à la réalisation de son objet, en particulier les parcs de stockage, les installations techniques de maintenance ;
- développer les techniques nouvelles en particulier, les soudures, et la préfabrication ;
- concevoir, acquérir, exploiter ou déposer tous modèles, licences ou procédés d'installation ou de fabrication se rattachant à son objet,

Les prestations de maintenance, de location d'engins et véhicules, et de transport de marchandises diverses pour propre compte ou pour compte de tiers (élargissement de l'objet social par voie statutaire le 3.10.2002),

Et d'une manière générale, toutes opérations commerciales, industrielles, mobilières, immobilières et financières inhérentes à ces activités et de nature à favoriser son développement.

### Missions :

Conformément à son objet social, KANAGHAZ a pour missions principales :

- La réalisation de canalisations de transport et de distribution de tout fluide ainsi que les ouvrages annexes s'y rattachant (stations de compressions ou de pompage, postes de coupure, postes de sectionnement, postes de livraison...)
- Elle intervient également dans la réalisation de travaux de montage d'installations industrielles

De par son expérience et son savoir-faire, KANAGHAZ est en mesure d'offrir des services complets (études et réalisations) dans les secteurs :

- Hydrocarbures
- Hydraulique
- Industrie
- Télécommunications

Et c'en intervenant soit pour des travaux neufs soit dans la réhabilitation d'ouvrages existants.

En tout état de cause, KANAGHAZ, société à but commercial, met en œuvre ses potentiels avec un double objectif :

- Satisfaire sa clientèle,
- Assurer la rentabilité de ses activités et sa pérennité.

Et parmi ses activités aussi il y a la Construction pipelines

- Réalisation de canalisations de transport du gaz et autres fluides.
- Réalisation de canalisations de transport d'eau potable et industrielle.
- Préfabrication et nettoyage de tuyauteries et d'équipements électromécaniques.
- Tous travaux de soudage de canalisations Bp-Mp-Hp en toutes positions avec
- différents procédés de soudage :
  - manuel avec électrodes enrobée,
  - semi-automatique sous flux solides ou gazeux,
  - automatique sous flux solides.
- Contrôles destructifs et non destructifs des soudures.
- Forage horizontal pour traversées de routes, voies ferrées etc.
- Essais hydrostatiques et séchage des canalisations.
- Installation de système de protection cathodique des canalisations.
- Pose de câble de télécommunication.
- Formation et perfectionnement des soudeurs.
- Réhabilitation des canalisations de transport de fluides.



L'opération de soudage à **KANAGHAZ**

## ANNEXE 2

### Parmètres de soudage pratiques

Passes	1 <sup>ère</sup> passe	2 <sup>ème</sup> passe	Bourage	Finition
Procédé de soudage	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW
Position de soudage	5G ↗	5G ↗	5G ↗	5G ↗
Courant / Polarité	CC(-)	CC(+)	CC(+)	CC(+)
Métal d'apport	E6010	E7018	E7018	E7018
Diamètre électrode (mm)	2.5/3.25mm	3.25mm	3.25/4mm	3.25/4mm
Amperage	75-90/ 75-100	75-100	100-130/ 150-170	100-130/ 150-170
Voltage	20-25	25-30	30-35	30-35
Vitesse de soudage mm/sec	0.83 à 2.5	0.83 à 2.5	0.83 à 2.5	0.83 à 2.5
Energie de soudage Kj/mm	--			