

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

Génie mécanique

Option: Science des matériaux

MEMOIRE

De fin d'études

Thème

*Contrôle qualité des soudures X52M
réalisées par les procédés SAW et
SMAW*

Dirigé par :

Mr. S. FILALI

Réalisé par :

AMER HAMAIDI

YOUNES MADJOUR

Promotion 2014

Sommaire

Chapitre I : Aciers

I.1. Introduction.....	01
I.2. Classification et désignation de l'acier.....	01
I.2.1. Selon leurs emplois.....	01
I.2.2. Selon leur teneur en carbone	03
I.2.3. selon la composition chimique.....	03
I.2.3.1. Aciers spéciaux non alliés	03
I.2.3.2. Aciers faiblement alliés	04
I.2.3.3. Aciers fortement alliés	07
I.2.3.4. Aciers rapides.....	08
I.3. Diagramme Fer-Cémentite	11
I.3.1. Variétés allotropique et magnétique du fer.....	11
I.3.2. Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe ₃ -C	12
I.3.3. Constituants à l'équilibre des alliages Fe-C	13
I.3.4. Transformations isothermes de l'austénite.....	16
I.3.4.1. Transformation perlitique.....	17
I.3.4.2. Transformation bainitique.....	17
I.3.4.3. Transformation martensitique.....	18
I.3.4.4. Structure de Widmanstaël en.....	18
I.4. Soudabilité des aciers	19
I.4.1. La soudabilité opératoire	19
I.4.2. La soudabilité métallurgique	20
I.4.3. La soudabilité globale	20
I.4.4. Coefficient de soudabilité S.....	20
I.4.5. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION	21
I.4.6. Différentes relations utilisées en soudage.....	22

Chapitre II : Soudage

II .1. Soudage	24
II .1.1. Différentes zones du joint soudé.....	24
II.1.2. Aspects métallurgiques de la zone soudée	25
II.1.3. Cycle thermique de soudage.....	26
II.2. Principaux procédés de soudage	27
II.2.1. Soudage à l'arc submergé (SAW)	27
II.2.1.1. Flux et matériau d'apport	29
1. Flux	30
1.1. Granulométrie des flux en poudre	30
1.2. Etuvage des flux en poudre	32
1.3. Rôles des flux en poudre	32

1.4. Caractères des flux	33
1.5. Désignation des flux.....	33
2. Fil d'apport	34
• Intensité moyenne.....	34
• Tension de soudage.....	35
2.1. Courbes de fusion	35
2.2. Symbolisation des fils électrodes.....	36
2.3. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé.....	37
a. Influence de l'intensité (Is)	37
b. Influence de la tension de soudage (Us)	39
c. Influence de la vitesse de soudage (Vs)	40
d. Influence de la polarité.....	40
II.2.2 Soudage à l'électrode enrobée (SMAW)	41
1. Sources d'alimentation	41
2. Caractéristiques de l'électrode.....	42
2.1. Âme métallique	42
2.2. Enrobage.....	42
a. Types d'enrobage	43
b. Rôles de l'enrobage	45
c. Fusion de l'électrode	46
d. Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire	47
e. Principaux composants des enrobages	47
f. Utilisation des électrodes à enrobage basique	48
3. Influence des paramètres de Soudage avec électrode enrobée	49
4. Désignation normalisée des électrodes enrobées.....	50
II.2.3. DÉFAUTS DE SOUDURE	51

Chapitre III : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET PROCEDURES

III-1. Matériau d'étude.....	55
III-2. Procédés et Paramètres de soudage.....	55
III.2.1. Soudage à l'arc submerge (SAW)	56
III.2.2. Soudage à l'électrode enrobée (SMAW)	56
III.3. Essais mécaniques	58
III.3.1. Essais de traction (soudage multi-passe)	58
III.3.1.1. dimensions de l'éprouve	58
III.3.2. Essai de résilience (soudage multi-passe)	59
III.3.2.1. Dimensions et prélèvement de l'éprouve	60
III.3.3. Essai de dureté (soudage mono et multi-passe)	61
III.3.3.1. Essai de dureté Vickers HV30.....	61
III.4. Analyse métallographique	61
III.4.1. Prélèvement des échantillons.....	62

III.4.2. Polissage.....	62
III.4.3. Observation.....	62
III.5. Contrôle radiographique RX	62

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Composition chimique.....	65
IV.2 : Caractéristiques mécaniques	67
IV.2.1. Métal de base	67
IV.2.1.1. Essais de traction.....	67
IV.2.2. Tube soudé (SAW)	68
IV.2.2.1. Essai de traction.....	68
IV.2.2.2. Essai de résilience.....	69
IV.2.2.3. Essai de dureté	69
IV.2.3. Soudage multi-passes (SMAW).....	70
IV.2.3.1. Essai de traction.....	70
IV.2.3.2 : Essai de dureté (multi-passes et mono-passes).....	72
a) Soudage mono-passe.....	72
b. Soudage multi-passes	73
IV.2.3.3 : Essai de résilience (multi-passes)	74
IV.2.4. Comparaison de résistance des soudures SAW et SMAW (multi-passe).....	74
IV.3. Analyse métallographique	75
IV.3.1 Métal de base	75
IV.3.2. Soudure (SAW)	75
IV.3.3. Soudure SMAW (Mono-passe)	77
IV.3.4. Soudure SMAW (Multi-passe)	81
IV.4. Radiographie : Soudage multi-passe	85
Conclusion ..	87

Introduction générale

Parmi les définitions variées du soudage, on trouve la plus indiquée celle qui fait appel à la notion de continuité métallique et structurale. Selon cette définition, le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans métal d'apport, en utilisant des procédés appropriés.

Le choix du procédé de soudage repose généralement sur deux critères : les limitations techniques et le coût. Les limitations techniques peuvent être inhérentes au type de matériaux, au type de joint, à la disposition de soudage et aux facteurs ayant rapport direct avec la possibilité offerte par les procédés de soudage mis en œuvre.

Les deux procédés étudiés dans cette étude sont :

-Le SAW : qui est un procédé utilisé par l'usine ANABIB pour la fabrication des tubes (gazoduc et hydraulique) en chaîne, le plus demandé par le cahier de charge.

-Le SMAW (soudage à l'arc avec électrode enrobée) : le procédé expérimenté, à l'effet de vérifier l'efficacité du mode opératoire utilisé en chaîne.

Le travail a donc pour but d'étudier ces deux procédés de soudage en se basant sur le critère de limitations techniques (caractéristiques mécaniques, chimiques, radiographie.....) des soudures et déduire la meilleure variante en procédant à la modification des paramètres de soudage tout en veillant au respect des critères imposés, c'est-à-dire la problématique de la fissuration à froid.

La tâche étant divisée principalement en deux parties :

1 -Partie théorique : comporte les notions de base de la métallurgie générale, du soudage et la description des procédés mis en œuvre ainsi que des essais d'analyse.

2 -Partie pratique : s'articule à l'investigation et aux discussions et interprétations des résultats.

Le tout est clôturé par une conclusion générale.

Présentation de l'entreprise

L'entreprise publique économique dénommée « ALTUMET » est une société par actions, issue de la dislocation de l'entreprise mère ANABIB en filiales, spécialiste du tube hydraulique et hydrocarbure.

Activités de la société

- Fabrication des tubes soudés en spirales à partir de feuillards en acier.
- Prestation de revêtement.
- Recherche de développement d'autres procédés de fabrication.
- Importation et l'exportation de tubes soudés spirales.
- distribution des produits et dérivés tels que les tubes soudés destinés au transport des hydrocarbures, eau et autres divers usages (supports de construction, pieux battus pour forage...).

Capital social

Le capital social de la société est de 537 760 000,00 DA

Siège social

Le siège social de la société est situé en zone industrielle de réghaia, route national N° 5, réghaia – Alger.

Gamme de produits

La fabrication porte sur une gamme de tubes en acier dont le diamètre est compris entre 8'' et 36'' (219 mm à 914 mm) livrés nus ou revêtus :

-Tubes pour transport des hydrocarbures.

-Tubes hydrauliques.

Capacités de production

L'usine dispose d'une capacité annuelle de production se décomposant comme suit :

Tuberie : 40 000 Tonnes

Revêtement : 40 000 Tonnes

Marché

Les produits fabriqués par l'entreprise sont destinés à la satisfaction des besoins en canalisations pour le transport des hydrocarbures et de l'eau.

Les clients potentiels sont constitués de

Secteur de l'énergie ;

Secteur de l'hydraulique ;

Domaines d'application.

Les tubes ainsi obtenus sont destinés à la

-Canalisation pour transport de fluides : Eau, Pétrole, Gaz ;

-Construction métallique ;

-Support de construction (poteaux) ;

-Pieux battus pour fondations ou forage ;

-Support d'éclairage (mât d'éclairage).

Chapitre I : Aciers

I.1. Introduction

L'acier est un alliage de fer et de carbone comportant 0,1 % à 2 % de carbone. De couleur gris foncé, l'acier est généralement obtenu par affinage de la fonte (la teneur en carbone est abaissée) suivant divers procédés.

Plus ou moins dur suivant le pourcentage de carbone (on parle par exemple d'acier doux pour des aciers possédant de 0,2 % à 0,3 % de carbone), l'acier peut être allié à de nombreux éléments modifiant ainsi sensiblement ses propriétés (les aciers alliés au chrome sont par exemple inoxydables).

De plus, les aciers sont susceptibles de recevoir des traitements thermiques (trempe, revenu, etc.) ou thermochimiques (cémentation, nitruration, etc.) qui modifieront ses propriétés intrinsèques.

D'une part son coût de revient faible, les diversités de ses nuances et ses propriétés mécaniques, l'acier est le métal le plus utilisé en construction mécanique. Ses applications trop nombreuses sont présentes dans quasiment tous les secteurs de l'industrie.

I.2. Classification et désignation de l'acier [1]

I.2.1. Selon leurs emplois :

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

Tableau I.1 : Désignation des aciers selon leur emploi [1]

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

Exemple : Acier E 295

Cet acier pour construction mécanique (E) a une valeur minimale de limite d'élasticité de 295 Mpa. Il est Caractérisé par une faible teneur en carbone, Ils sont soudables, formables à froid et à chaud, pliables, emboutissables et laminables, On les trouve dans le domaine de Construction mécano soudée, carrosserie automobile, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plates-formes pétrolières, trains, chaudronnerie, ameublement électroménager, biens de consommation.

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

- Les aciers commençant par (S), sont les aciers d'entrée de gamme de construction générale. Ils sont en général 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'un (G).

Tableau I.2 : Caractéristiques des aciers d'usage général [1]

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

I.2.2. Selon leur teneur en carbone :

Tableau I.3 : Classification des aciers selon la teneur en carbone [2]

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.
Demi-doux	$0.2 < c < 0.3$	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Demi 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.2.3. Selon la composition chimique :

I.2.3.1. Aciers spéciaux non alliés

Ces aciers sont Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes. 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).

Propriétés : les propriétés varient selon le traitement thermique

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

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

Exemple : C 45

Cet acier non allié (C) possède une teneur en carbone de 0,45 %.

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

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

Tableau I.4 : Caractéristiques des aciers non alliés [1]

Aciers non alliés			
nuance	Rmin	Re min	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>=57		

I.2.3.2. Aciers faiblement alliés

Par acier faiblement allié, on entend les aciers dont la teneur de la somme de l'élément 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 très bonnes à exceptionnelles.

Applications :

Pièces mécaniques techniques qui subissent de fortes contraintes mécaniques, roulements engrenages, arbres de transmission, axes tiges et leviers, boulonnerie haute résistance, roulements, 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 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 :

Tableau I.5 : Facteur de teneurs des éléments d'alliages [1]

Eléments	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Exemple : Acier20MoCr5 :

La composition chimique de cet acier est donc :

- possède une teneur en carbone de 0,2 %.
- Il est allié au molybdène (Mo) et au chrome (Cr).
- La teneur en molybdène est de 0,5 %.
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome.
- Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'un G.

AcierG18NiCrMo6 :

Cet acier faiblement allié est moulé (G) et possède une teneur en carbone de 0,18 %.

- Il est allié au nickel (Ni) et au chrome (Cr) et du molybdène (Mo).
- La teneur en Nickel est de 1,25 %.
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome et de molybdène.

Tableau I.6 : Caractéristiques mécaniques des aciers faiblement alliés [1]

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

I.2.3.3. 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 courant est inoxydables.

Applications : Pièces mécaniques travaillant à l'extérieur ou aux milieux marins. (Accastillage de bateau)

Désignation : Ces aciers sont désignés par:

- La lettre X
- 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 des traces (non quantifiées) de titane.

Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'un G.

Tableau I.7 : Caractéristiques des aciers fortement alliés [1]

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

I.2.3.4. Aciers rapides

Propriété : Très grande résistance à l'usure et aux températures élevées

Utilisation : Outils de coupe, forets

Désignation : Ils sont désignés par:

- Les lettres HS
- des nombres indiquant la teneur des éléments d'alliages dans l'ordre suivant:
 1. Tungstène (W)
 3. Vanadium (V)
 2. Molybdène (Mo)
 4. Cobalt (Co)

Tableau I.8 : Désignation et caractérisation des aciers rapides [1]

Nuance	caractéristiques
HS8, 5-3,5-3,5-11(nuance SANDVICK C45)	Cette nuance doit toujours être associée en priorité.il s'agit d'un acier rapide, fortement allié, capable de résister à des températures élevées.
HS6 ,5-7-6,5-10,6(nuance SANDVICK C60)	Cette nuance est un choix alternatif lorsqu'une haute résistance à l'usure est en critère déterminant.

Remarque : les aciers rapides peuvent être revêtus d'une couche de nitrure de titane (Ti, Ni) qui augmente leur dureté leur longévité.

Tableau I.9 : Classification des différents aciers par emploi [1]

Type d'acier	Nuances
Acier doux	S185, S235, C22
Acier mi-dur	C30, C35, C40, C45, C50, C60, 37Cr4, 34CrMo4, 36NiCrMo16, 51CrV4
Acier extra dur	100Cr6
Acier ressort	51Si7, 60SiCr7, 51CrV4
Trempe	C35E, C40E, C55E, C60E
cémentation	C22, 16MnCr5, 20MnCr5, 15CrNi6, 17CrNiMo6
Trempe superficielle	C40, 41CrMo4, 36NiCrMo16
Fromage à froid	S185, S235, S275, S355
Décolletage	S250Pb, S250Si, S300Pb, S300Si, X2CrMoTiS18-2
nitruration	31CrMo12, 41CrAlMo7
chocs	51CrV4
inoxydable	X4CrMo18, X30Cr13, X2CrNi19-11, X5CrNi18-10, X5CrNiTi18-10, X6CrNiMoTi17-6-12
Forte sollicitation	20MnCr5, 36NiCrMo16

DIAGRAMME FER-CEMENTITE

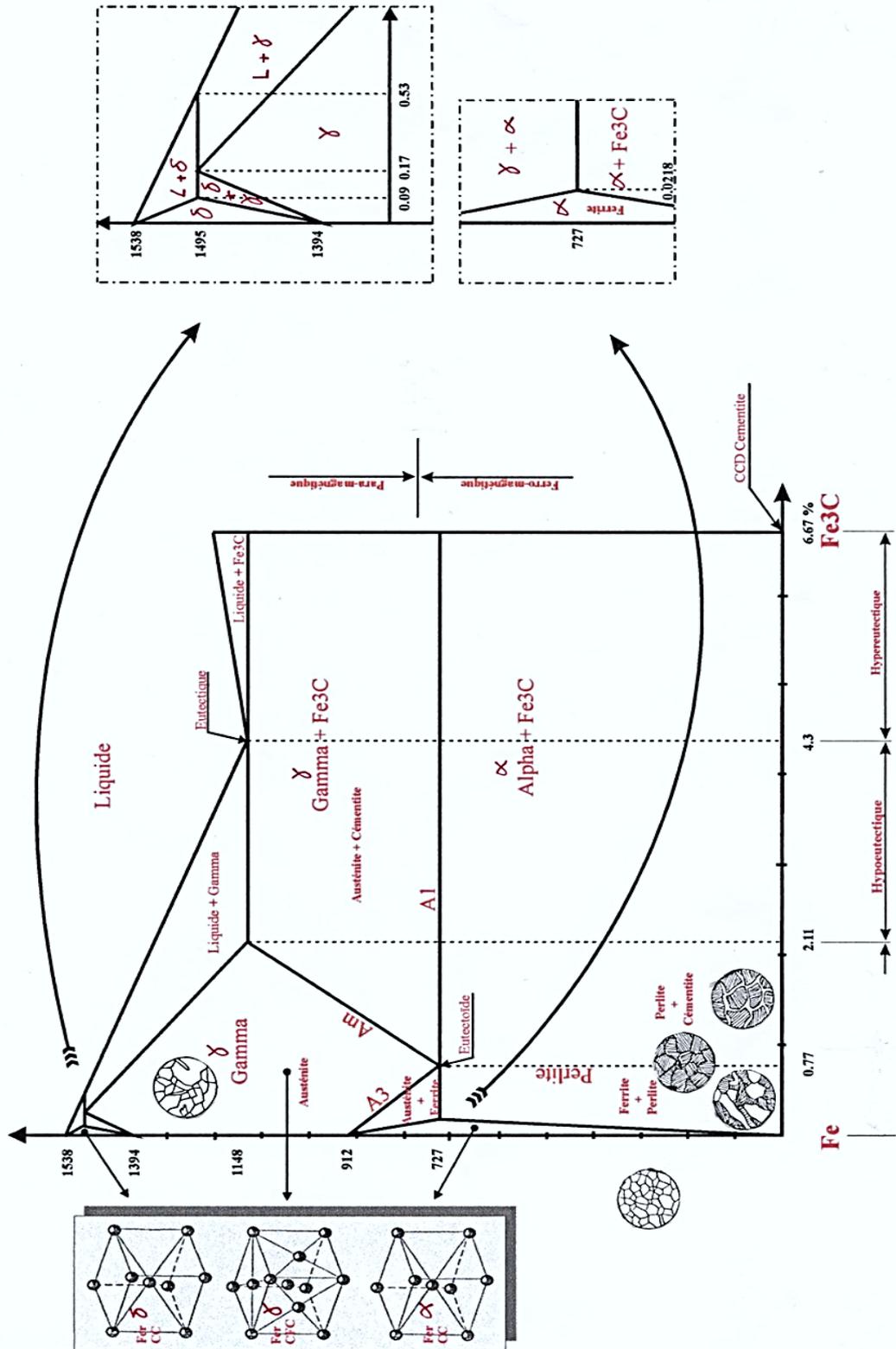


Figure I.1 : Diagramme Fer-Carbonate [3]

I.3. Diagramme Fer-Cémentite

I.3.1. Variétés allotropique et magnétique du fer [4]

Le Fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines : CC et CFC.

-A des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC).

-A des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C (A4) le réseau cristallin est du type cubiques à faces centrées (CFC).

-Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée.

-Jusqu'à 768°C (A2) point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation

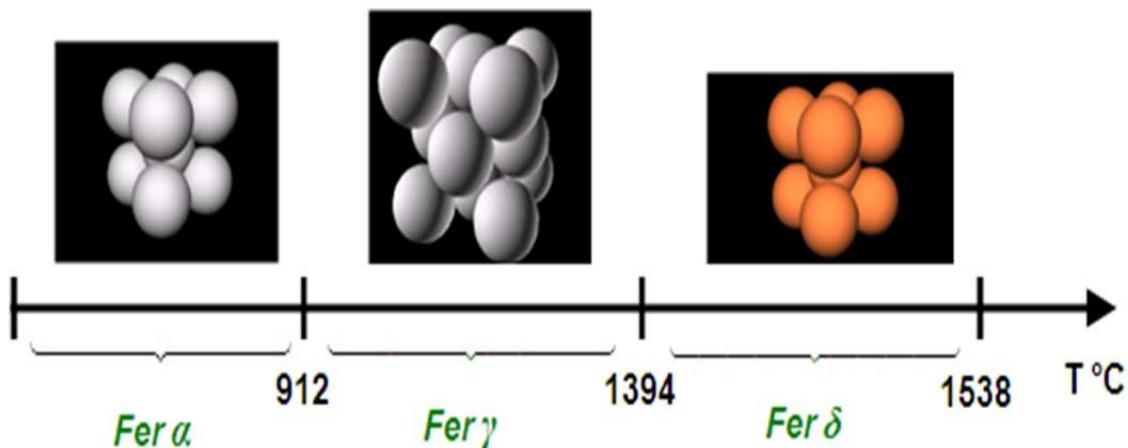


Figure I.2 : Transformation allotropique du Fer [4]

I.3.2. Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe₃-C [4]

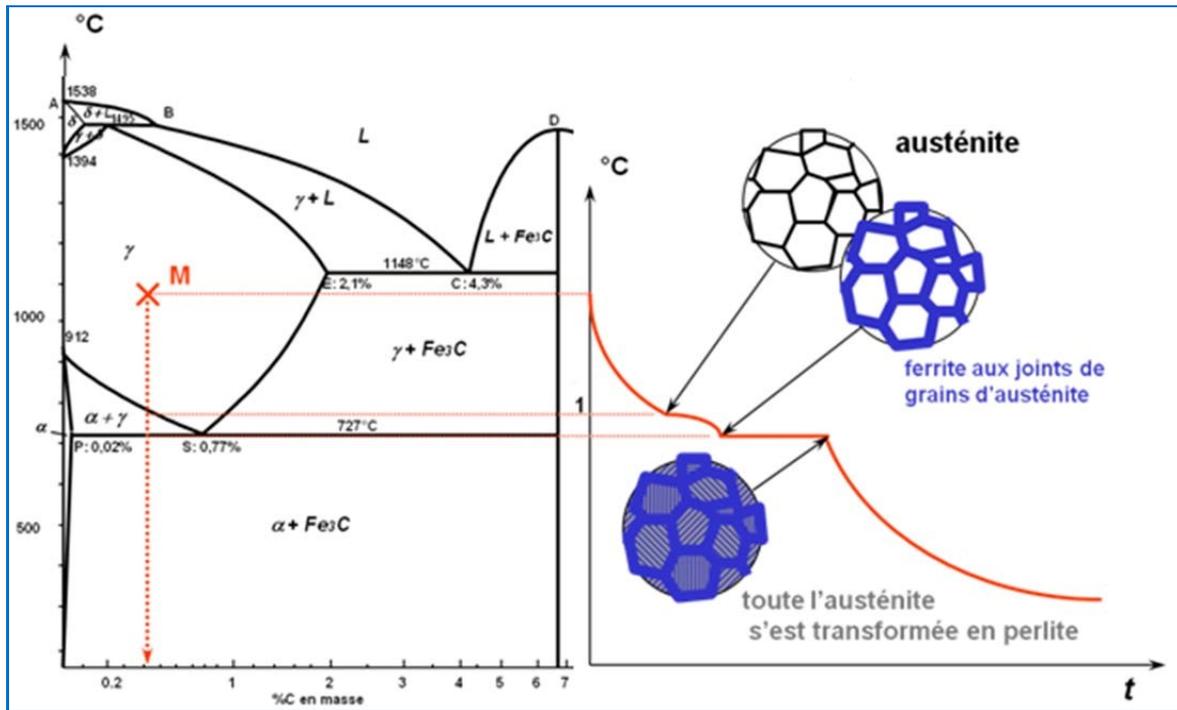


Figure I.3 : Acier hypoeutectoïde à 0.4 [4]

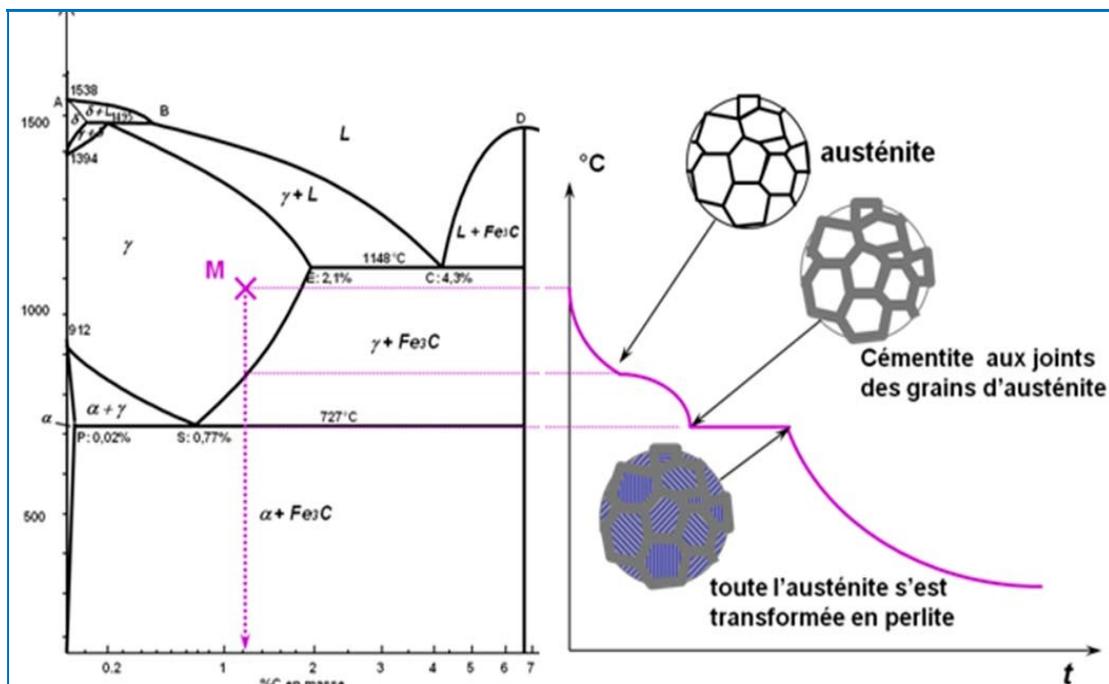


Figure I.4 : Acier hypereutectoïdes à 1.2%C [4]

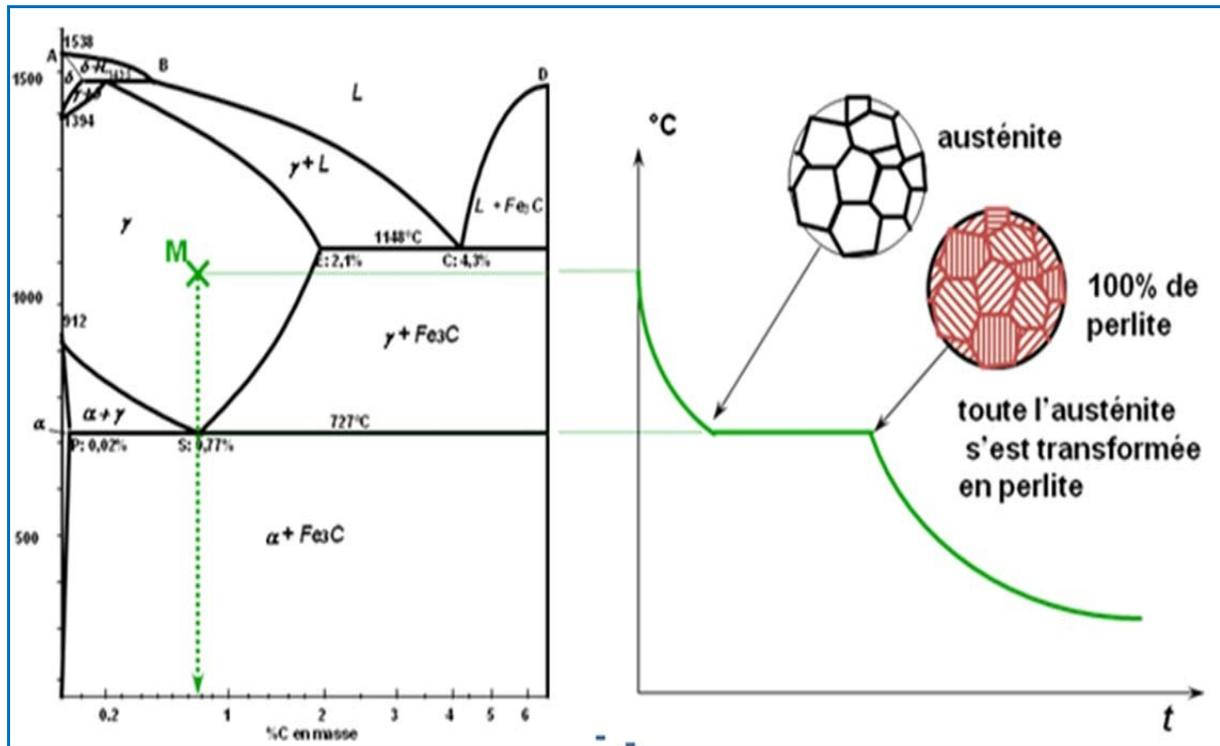


Figure I.5 : Acier eutectoïde à 0.77%C [4]

Les diagrammes d'alliages fer carbone sont de 2 types :

- Le diagramme d'équilibre stable fer graphite.
- Le diagramme d'équilibre métastable fer cémentite.

Pour les aciers et dans les conditions de refroidissement industriel, le diagramme métastable est prépondérant.

Le diagramme sera donc limité sur la partie droite, par l'existence d'un composé chimiquement défini de fer et de carbone : La cémentite(Fe_3C)

I.3.3. Constituants à l'équilibre des alliages Fe-c [3]

Dans l'étude qui suit, nous nous attarderons sur les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 2.11 %.

I.3.3.1. La phase ferritique (fer α)

La Ferrite α : Solution solide d'insertion de carbone dans le réseau du fer α . La ferrite α est un constituant cubique centré qui existe en dessous de la température de 906 °C et est ferromagnétique jusqu'à 768 °C. La ferrite α ne dissout pratiquement pas de carbone, environ 0,02 % à la température de 721 °C et environ 0,001 % à l'ambiante. La ferrite est relativement douce environ HB = 80 à 100, avec une résistance à la rupture de l'ordre de 300 MPa et un allongement compris entre 35 et 50 %.

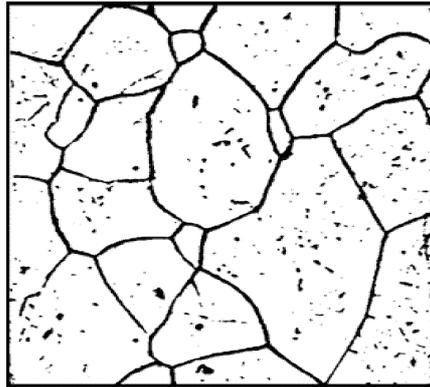


Figure I.6 : Acier à 0.04%C (X200) [5]

I.3.3.2. La phase austénitique (FER γ)

Domaine d'existence : 912° C à 1394° C.

Dissolution du carbone : 2.11 % de carbone maxi à 1148° C.

L'AUSTENITE: Solution solide d'insertion de carbone dans le réseau du fer γ . L'austénite est un constituant cubique à faces centrées et n'est pas magnétique. L'austénite dissout relativement bien le carbone, 2,1% à la température de 1145 °C et 0,85% à 726 °C. Par contre, l'austénite n'existe pas à la température ambiante, sauf par maintient hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliages tel que le nickel, le manganèse (γ résiduelle). L'austénite est très ductile, dureté est de 250 à 300 HB.



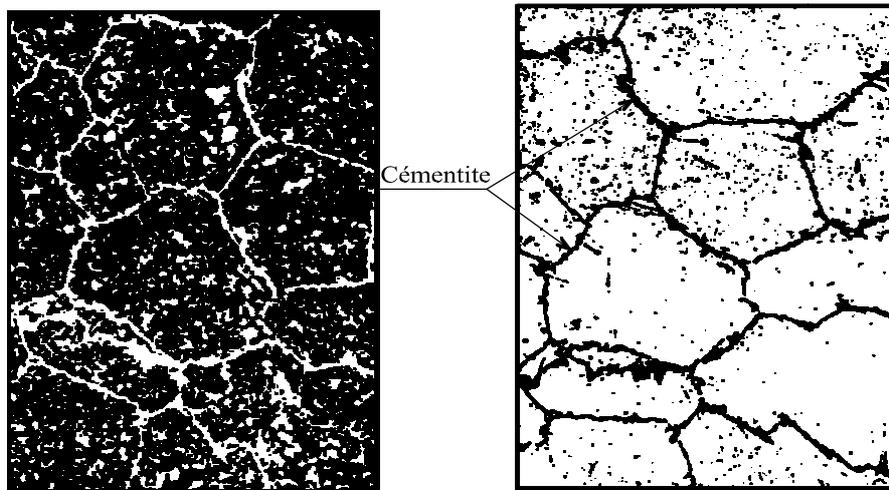
Figure I.7 : Austénite (X200) [5]

I.3.3.3. Cémentite (Fe₃C)

Domaine d'existence : 0° K à 1250° C.

Dissolution du carbone : 6.67 % de carbone de 0° K à 1250° C.

La cémentite: C'est un composé cristallin homogène, formé de trois atomes de fer et d'un atome de carbone (Fe₃C). Elle porte aussi le nom de carbure de fer et est constituée par une maille orthorhombique. La cémentite contient donc 6,7% de carbone. La cémentite est très dure et fragile, sa résistance à la rupture est difficilement mesurable, sa dureté est d'environ 700 Brinell et elle a un allongement très proche de 0%.



Figurel.8 : Cémentite cellulaire. (Acier C = 1,5 %) (X200) [5]

I.3.3.4. Le point eutectique :

Définition : Un alliage eutectique est un alliage qui se comporte comme un corps pur, il change d'état (solide / liquide) à une seule et même température.

Domaine d'existence 4.3 % de carbone de 0° K à 1148° C (fusion) pour le (Fe-C).

Ce point eutectique est appelé lédéburite, sa composition en phases (γ et Fe₃C) est donnée par la règle des segments inverses.

I.3.3.5. Le point eutectoïde

Définition : Un alliage eutectoïde est un alliage qui change de phase (CC ; CFC) à une seule et même température (727°C). Le constituant eutectoïde est appelé perlite : $P = \alpha + Fe_3C$

La perlite: Agrégat lamellaire de ferrite et de cémentite, formé lors de la transformation de l'austénite au cours d'un refroidissement lent. C'est un agrégat diphasé (ferrite α + cémentite). La teneur en carbone de la perlite est de 0,85%, indépendamment de la teneur en carbone globale de l'acier. Dans certaines conditions de chauffage, les lamelles se disloquent par coalescence en éléments isolés pour former de la perlite globulaire. La

résistance à la rupture de la perlite est d'environ 800 Mpa avec un allongement de 10% et une dureté avoisinant les 200 Brinell.



Figure I.9 : Perlite [5]

Suivant le degré de surfusion de l'austénite, il y a trois zones de transformation :

- Perlitique : de A_1 jusqu'au point d'inflexion des courbes (550°C pour les aciers non alliés)
- Bainitique ou intermédiaire : du point d'inflexion jusqu'au point M_s (martensite Start)
- Martensitique : au -dessous de M_s

I.3.4. Transformations isothermes de l'austénite

Transformation avec diffusion

Lorsque la température du soudage est supérieure au point M_s , les transformations isothermes de l'austénite conduisent à la formation d'agrégats ferrite-cémentite, cette formation met en jeu des phénomènes de diffusion.

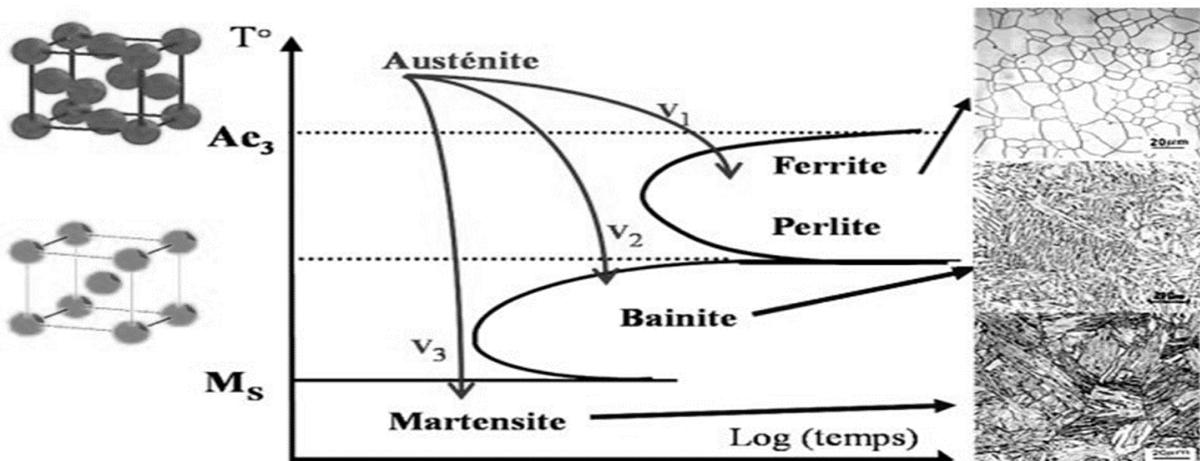


Figure I.10 : Variation structurale dans l'acier [6]

Dans le diagramme TTT existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique au-dessus de 550°C.
- Domaine bainitique intermédiaire entre 550 et 200°C.
- Domaine martensitique au-dessous de 200°C.

I.3.4.1. Transformation perlitique :

La transformation perlitique se manifeste qu'on maintient la réaction $\gamma \rightarrow P$ à des hautes températures

I.3.4.2. Transformation bainitique :

La transformation bainitique se produit dans le domaine de température intermédiaire entre le domaine d'existence de la perlite et de la martensite. Au fur et à mesure que la température s'abaisse, la diffusion du carbone devient plus difficile et la transformation perlitique est progressivement remplacée par une nouvelle transformation dite bainitique.

On distingue deux types principaux de bainite :

Bainite supérieure : dans la zone supérieure du domaine bainitique à des températures entre 300° et 500°C environ, la ferrite se forme en « latte » (petites bandes minces) ou aiguilles parallèle qui sont séparées par des particules allongées de la phase de cémentite.

Bainite inférieure : à des températures comprises entre 200°et 300°c, la phase de ferrite prend alors la forme de plaquettes mince plutôt que de lattes, comme dans la bainite supérieure, au sein desquelles se constituent de minces particules de cémentite sous forme de tiges ou de lames minces.



Figure I.11 : Bainite inférieure

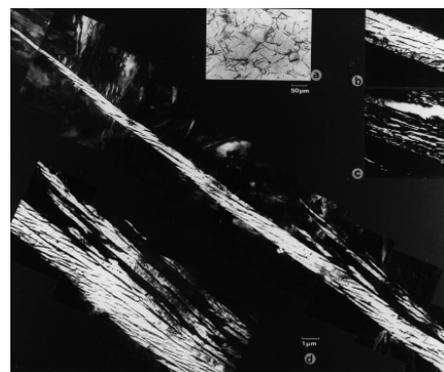


Figure I.12 : Bainite supérieure

I.3.4.3. Transformation martensitique:

La transformation de la martensite correspondant au passage rapide d'une structure CFC à une structure voisiner d'une CC, sursaturée.

La transformation martensitique se produit lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment élevée pour empêcher toute diffusion du carbone.

Deux microstructures martensitiques clairement différentes, sous forme de lattes (aiguilles) et de lentilles (plaquettes), se retrouvent dans les alliages Fer-carbone.



Figure I.13 : Martensite en aiguilles

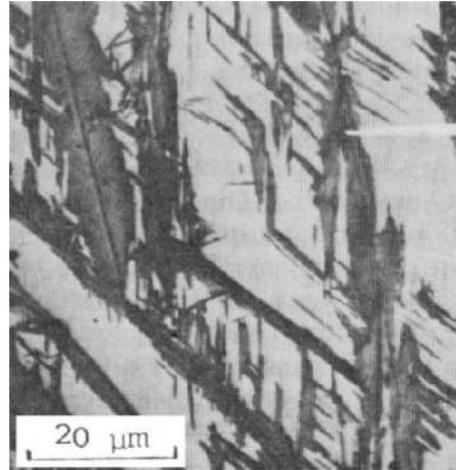


Figure I.14 : Martensite en plaquettes

I.3.4.4. Structure de Widmanstaetten

La structure de WIDMANSTAETTEN est obtenue par un refroidissement lent d'une austénite surchauffée. Ces structures sont caractéristiques des zones surchauffées par une opération de soudage effectuée avec des énergies importantes (procédé de soudage sous flux par exemple) affectant une grande étendue du métal de base. Lorsque la vitesse de refroidissement n'est pas trop rapide, la ferrite se dépose aux joints de grains. Pour des vitesses de refroidissement plus rapides, la ferrite se dépose en forme aciculaire. En générale, la structure est ferritique a gros grains et se manifeste seulement que dans le soudage multi-passe des aciers proeutectoides

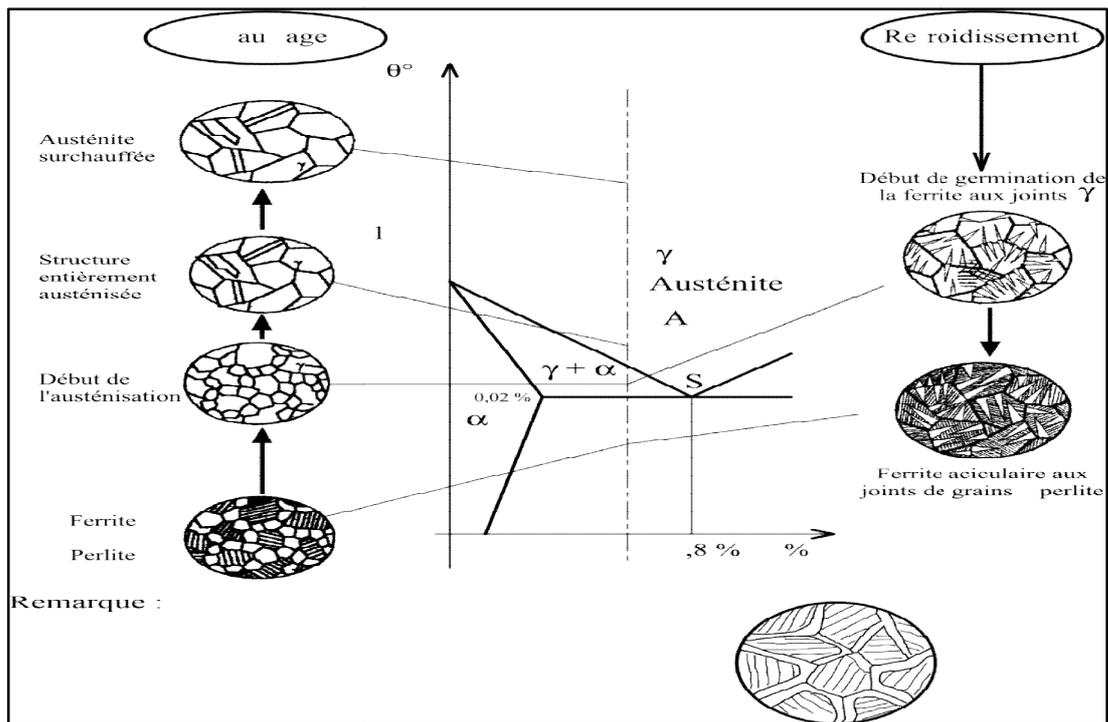


Figure I.15 : Structure de widmanstaetten

I.4. Soudabilité des aciers [7]

La soudabilité est la propriété d'un matériau qui permet, lorsqu'on emploie un procédé de soudage donné pour un but donné, d'obtenir un joint continu en appliquant un mode opératoire convenable. La soudure ainsi obtenue doit satisfaire aux exigences imposées.

Afin de mener à bien les opérations de soudage et pour assurer la fonctionnalité des assemblages réalisés, un mode opératoire de soudage doit satisfaire plusieurs critères dits de soudabilité.

Parmi ces critères on a:

- la soudabilité opératoire ;
- la soudabilité métallurgique ;
- la soudabilité globale ;

I.4.1. La soudabilité opératoire :

Correspond à la possibilité de réaliser une soudure dans les conditions réelles de fabrication (pièce et son environnement, procédé, position de soudage, éventuellement qualification des soudeurs).

I.4.2. La soudabilité métallurgique :

Correspond à la possibilité de réaliser une soudure sans former des défauts de compacité ou de structure qui résulteraient du comportement des matériaux lors du soudage (fissures, structures fragiles)

I.4.3. La soudabilité globale :

Correspond à l'aptitude de l'assemblage soudé à satisfaire aux conditions de service qui lui seront imposées (tenue mécanique, résistance à la corrosion).

Ces trois critères de soudabilité constituent une liste non exhaustive à laquelle peuvent s'ajouter des critères concernant.

- La conception et le calcul des constructions soudées
- Le contrôle en fabrication ou en service des assemblages soudés.
- La conformité à une réglementation ou à un code.

I.4.4. Coefficient de soudabilité S [3]

On représente la soudabilité par le coefficient S variant de 0 à 10.

Pour les aciers au carbone et faiblement alliés

- Parfaitement soudables ($c=0$ à 0.25% et $S=9$ à 10)
- Moyennement soudable ($c=0.25$ à 0.45% et $S=7$ à 9)
- Soudage avec préchauffage ($c=0.45$ à 0.65% et $S=5$ à 7)
- Soudage difficile : soudage sous condition (préchauffage) indispensable d'où $S < 5$.

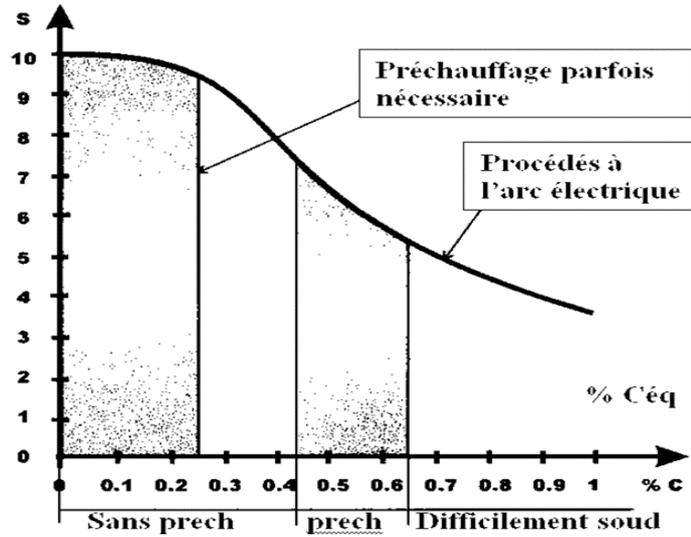


Figure I.16 : variation de S en fonction de la teneur en carbone

I.4.5. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION :

Les éléments d'addition les plus importants qui rentrent dans la composition des aciers sont: Mn, Ni, Cr, Mo car ils tendent à augmenter le pouvoir trempant du métal.

La fig. II.2 met en évidence l'influence du Mn sur le degré de la soudabilité. Un acier à 0,2 % de C et 1,5 % de Mn a une soudabilité analogue à un acier à 0,35 % de C.

INFLUENCE DU MANGANESE SUR LA SOUDABILITÉ

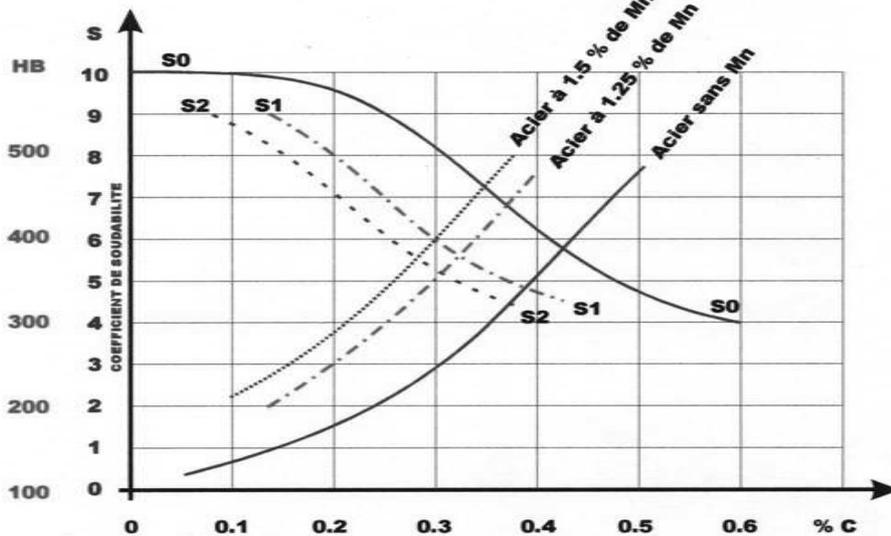


Figure I.17 : Influence du manganèse sur la soudabilité [3]

Le plus souvent, la soudabilité est évaluée par le calcul du C_{eq}

I.4.6. Différentes relations utilisées en soudage :

a. Calcul de carbone équivalent (Ceq):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{5} + (Cr + Mo + V)/10 \quad (1)$$

b. Calcule de Ceq d'après l'IIS :

$$C_{ec} = C_{eq} + 0.0254 * e \quad (2)$$

Cec : carbone équivalent compensé

e : épaisseur de la pièce

c. Calcule de Ceq : selon SEFERIAN :

$$C_{eq} = c + \frac{Mn}{9} + \frac{ni}{18} + (Cr + Mo + V)/90 \quad (3)$$

d. Ceq compensé :

$$C_{eqC} = C_{eq} * (1 + 0.05 * e) \quad (4)$$

I.4.7. Température de préchauffage des pièces à souder :

$$T_p = 350\sqrt{C_{eq} c - 0.25} \quad (5)$$

I.4.8. Energie de soudage(E) :

$$E = \eta * \frac{I * U}{v} * 60 \quad (6)$$

I.4.9. Temps de refroidissement (tr) :

Tôles fortes épaisseurs :

$$tr(850/500) = 0.24 * \frac{E}{(2 * \pi * K)} * \left[\frac{1}{c\rho 500 * (500 - T_o)} - \frac{1}{c\rho 850 * (850 - T_o)} \right] \quad (7)$$

Tôles faible épaisseurs :

$$tr(500/850) = 0.24 * \left(\frac{E}{e}\right)^2 * 1/((4 * \pi * K)) * [1/(c\rho 500 * (500 - T_o)) - 1/(c\rho 850 * (850 - T_o))] \quad (8)$$

I.4.10. Epaisseur critique (ec) :

$$ec = \sqrt{E/(2 * \rho c) * [1/(500 - T_o) + 1/(850 - T_o)]} \quad (9)$$

Condition :

Si $ec > e$: l'écoulement de la chaleur est à deux dimensions (équation).

Sinon, l'écoulement est à trois dimensions.

Les informations utiles concernant les aciers utilisés pour la construction des gazoducs sont regroupées en annexe de ce travail.

I.4.11. Dureté Hv30 théorique :

$$Hv = \left(2019 * \left(C * (1 - 0.5 * \log(tr)) \right) \right) + 0.3 * \left(\frac{Si}{11} \right) + \left(\frac{Mn}{8} \right) + \left(\frac{Cu}{9} \right) + \left(\frac{Cr}{5} \right) + \left(\frac{Ni}{17} \right) + \left(\frac{Mo}{6} \right) + \left(\frac{V}{3} \right) + 6 * (1 - 0.8 * \log(tr)) \quad (10)$$

Chapitre II : Soudage

II .1. Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser des joints métalliques soudés grâce à des températures élevées, à de fortes pressions ou aux deux. Dans ce chapitre, on abordera uniquement les procédés développant une chaleur intense sur les surfaces à assembler afin d'engendrer une fusion locale. Un métal d'apport est en général ajouté dans le bain de fusion permettant ainsi de relier les deux surfaces à assembler et former ainsi un joint soudé de dimensions et de formes voulues après refroidissement. Le procédé le plus couramment utilisé en construction métallique utilise un arc électrique développant une chaleur intense, entretenu entre l'extrémité du fil d'apport et les pièces à assembler.

Quand le métal fondu situé dans le bain de fusion n'est pas protégé, il peut absorber directement l'oxygène et l'azote contenus dans l'air. Cette absorption peut conduire à l'apparition de porosités et à une fragilité de ce métal après solidification. Les techniques utilisées pour éviter l'absorption de gaz par la soudure dépend des procédés de soudage. Les procédés de soudage les plus utilisés en construction métallique seront revus en détail ci-après [8].

II .1.1. Différentes zones du joint soudé

Sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

- 1 zone fondue «ZF»
- 2 zone de liaison «ZL»
- 3 zone affectée thermiquement «ZAT»
- 4 métal de base «MB»

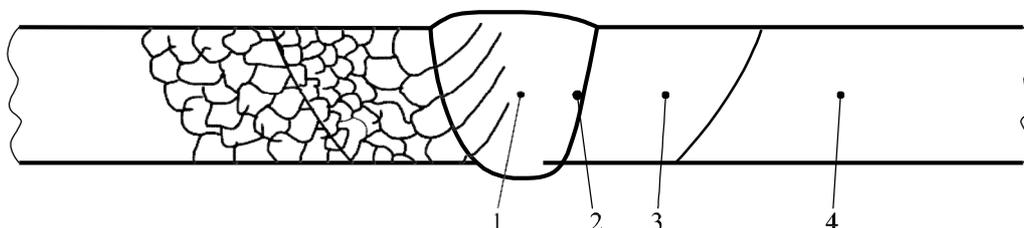


Figure II.1 : Différentes zones d'un joint soudé

1 - Zone fondue

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal

2 - Zone de liaison

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

3 - Zone affectée thermiquement

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physicochimiques (natures et proportions des constituants).

Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage. Et constitue le domaine le plus délicat.

4 - Métal de base

Le métal de base 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.

Cette zone commence à l'isotherme A1 pour le soudage d'une tôle d'acier normalisé.

II.1.2. Aspects métallurgiques de la zone soudée

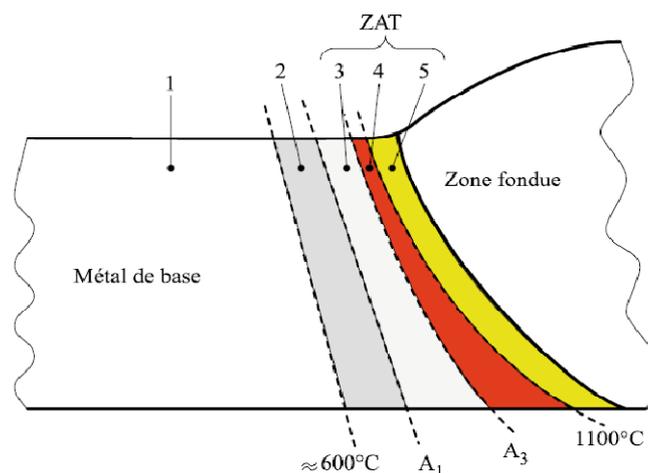


Figure II.2 : Modification structurale de la ZAT

Partie 1

Aucune modification décelable sur la constitution et la microstructure.

Partie 2

La température proche de A1 permet de déceler des modifications selon l'état initial du métal de base : précipitations, revenu, globulisation.

Partie 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.

Partie 4

La température est comprise entre A3 et 1100°C environ. Après refroidissement on obtient des structures normalisées.

Partie 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 [5].

II.1.3. Cycle thermique de soudage

Il est divisé en deux périodes :

a) Chauffage - b) Refroidissement

a) Période de chauffage

Elle est caractérisée par la vitesse de chauffage (V_c) et par la température maximale atteinte (θ_m).

L'importance de la zone affectée par la température est fonction pour un matériau et une pièce donnés de l'énergie de soudage et de la température initiale (T_0) des pièces les phénomènes suivant apparaissent :

- 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°C et 550°C ($tr_{850/550}$).

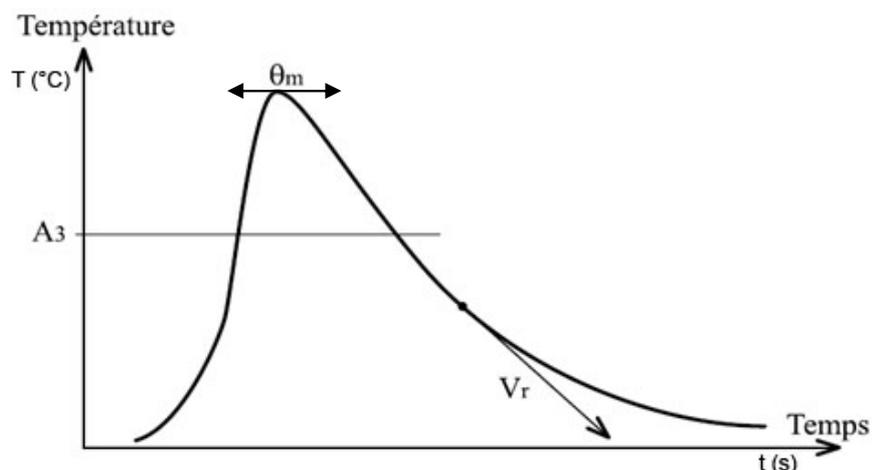


Figure II.3 : Cycle thermique de soudage [9]

II.2. Principaux procédés de soudage :

Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels, et automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité, le choix d'un gaz protecteur, la vitesse de dévidage du fil-électrode, l'élaboration de la séquence de soudage et enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.) [10].

II.2.1. Soudage à l'arc submergé (SAW)

Le soudage électrique à l'arc submergé (submerged arc welding), plus communément appelé soudage sous flux en poudre est un procédé de soudage automatique découvert aux USA en 1935 par KENNEDY.

Ce procédé, principalement utilisé en soudage à plat, trouve depuis 1950 des applications en corniche et en vertical sous laitier.

On distingue les procédés monofil, bifils et multifils qui nécessitent la mise en œuvre d'un ou plusieurs fils [5].

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues. Le procédé est représenté sur la figure II.4 et qui comporte :

- une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, le dévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- un coffret d'automatisme et des accessoires.

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact.
- appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir
- ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc,
- mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide,
- avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;
- commande du déplacement relatif tête-pièce pour former le cordon de soudure.

Le flux en poudre et le fil continuent à être alimentés d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage, réalise un certain confinement de l'arc.

L'amenée du courant à l'extrémité de l'électrode permet également de travailler à des densités de courant plus élevées que ne l'autorisent les électrodes enrobées et permet par suite d'obtenir des pénétrations, des taux de dépôts et des dilutions plus importantes (jusqu'à 70 %). Le transfert de métal s'effectue essentiellement par pulvérisation.

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (figure II.4), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage.

La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même. Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant réutilisation [11].

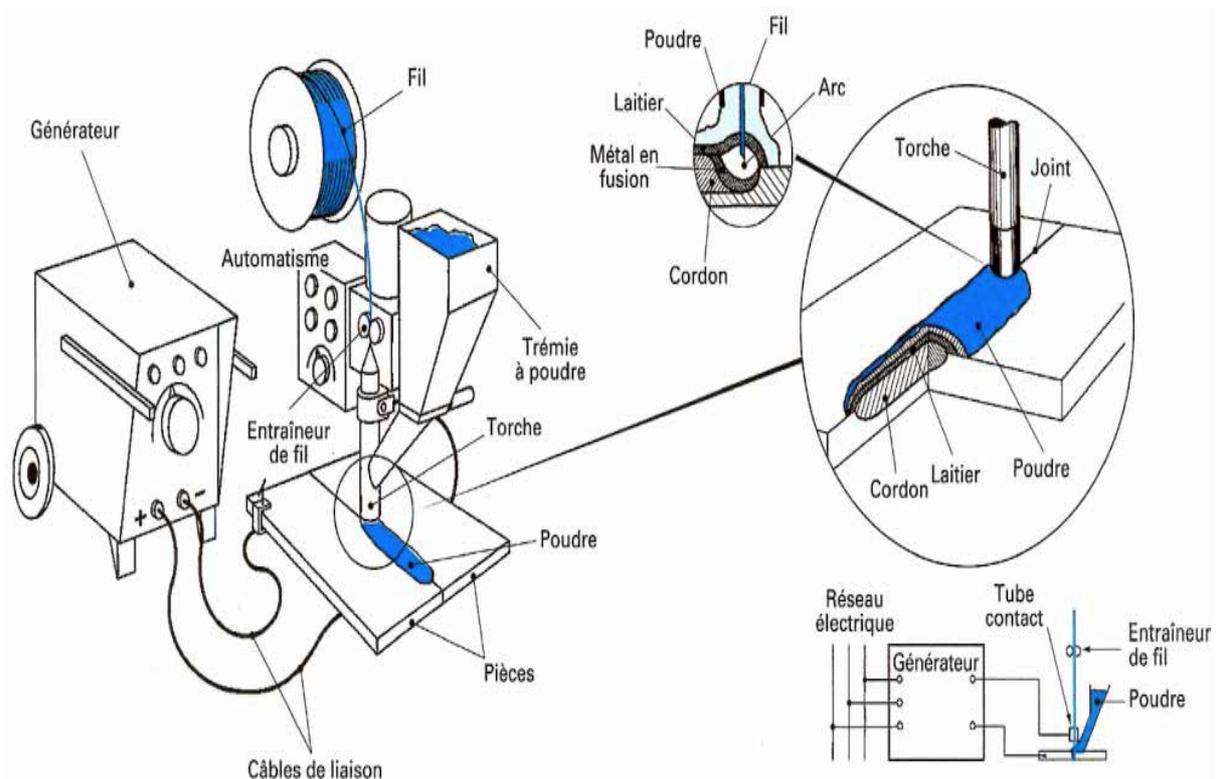


Figure II.4 : Soudage sous flux en poudre [11]

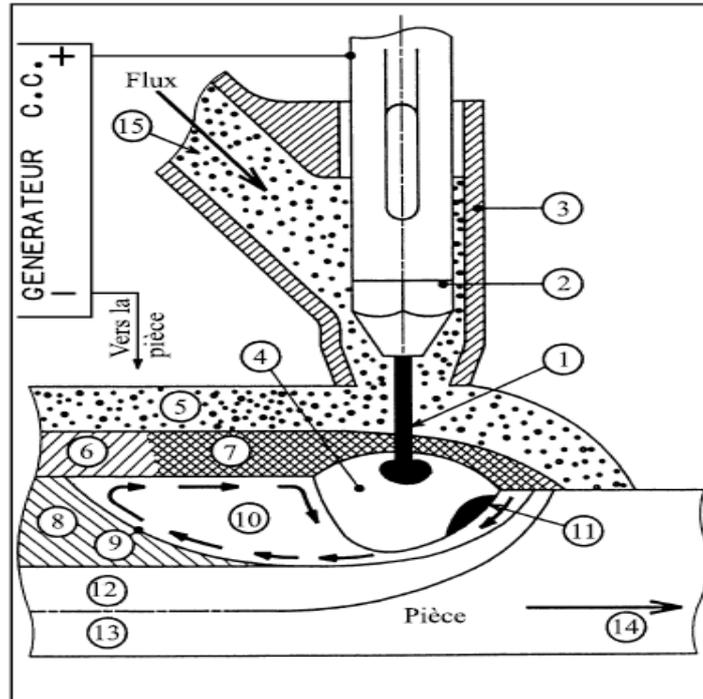


Figure II.5 : Principe du procédé de soudage sous flux en poudre [9]

- 1 - Fil électrode.
- 2 - Tube contact relié en général au pôle + du générateur.
- 3 - Buse qui canalise l'arrivée du flux.
- 4 - Arc électrique non visible.
- 5 - Flux non fondu, récupérable.
- 6 - Laitier solidifié.
- 7 - Laitier en fusion.
- 8 - Métal déposé solidifié.
- 9 - Front de solidification.
- 10 - Métal en fusion ou bain de fusion.
- 11 - Goutte de métal détachée.
- 12 - Zone affectée par la chaleur.
- 13 - Métal de base non affecté par la chaleur.
- 14 - Sens de soudage.
- 15 - Arrivée de flux.

II.2.1.1. Flux et matériau d'apport

Le fil d'apport et la composition des flux déterminent la qualité de soudure obtenue. L'objectif est d'obtenir un métal soudé dont la composition et la résistance sont identiques à celles du matériau de base. La composition du métal soudé dépend de celle du fil d'apport, qu'il faut donc choisir en conséquence en tenant compte de la possibilité de perte d'éléments d'alliage brûlés par l'arc, de fusion du métal de base et de production d'alliage sous l'effet du flux.

L'utilisation d'un flux à forte capacité d'alliage en soudure multi-passes risque d'entraîner une accumulation d'éléments d'alliage d'une passe à l'autre [12].

1. Flux

Le flux en poudre crée le milieu ionisé (ou conducteur) et protège la soudure. De plus, comme l'enrobage, il partage avec le fil la responsabilité des caractéristiques des soudures. Il est obtenu également à partir de divers oxydes minéraux et conditionné en mélanges poudreux selon essentiellement trois méthodes.

- **Flux fondus (F)**

Ils sont obtenus par fusion dans un four à haute température (1300 à 1400 °C) des divers constituants soigneusement dosés. Les pâtes très homogènes et refroidies sont ensuite broyées et tamisées pour obtenir la granulométrie désirée.

Les caractéristiques principales des flux fondus sont leur faible hygroscopicité, leur stabilité aux courants élevés, leur homogénéité. Ils ont, par suite de leur élaboration, une faible activité dans le processus de soudage.

- **Flux agglomérés (B)**

Ils sont des mélanges de divers composants, agglomérés ensuite par un liant soit à froid, soit à chaud mais toujours à basse température. On évite ainsi la décomposition des éléments ou leur interaction et cela permet d'introduire des éléments (alliages ou désoxydants) actifs. Plus sensibles à l'humidité, les flux agglomérés doivent être soigneusement séchés avant emploi et leur mise en œuvre est plus fragile. Leur caractère désoxydant est un avantage.

- **Flux mixtes (M)**

Ils sont des mélanges des deux types cités ci-dessus.

1.1. Granulométrie des flux en poudre :

- **Granulation des flux fondus selon la norme NFA 81-319**

La granulométrie d'un flux en poudre est désignée par deux nombres qui représentent les dimensions maximales et minimales des particules, correspondant aux dimensions de la maille des tamis ayant été utilisés.

Tableaux II.1 : Granulation des flux fondus selon la norme NFA 81-319

Symbole	Dimensions nominales de la maille en micromètres	Grosseurs des grains (en millimètres)
20	80	0,080
21	100	0,100
22	125	0,125
23	160	0,160
24	200	0,200
25	250	0,250
26	315	0,315
27	400	0,400
28	500	0,500
29	630	0,630
30	800	0,800
31	1000	1,00
32	1250	1,25
33	1600	1,60
34	2000	2,00
35	2500	2,5

- **Selon norme Américaine**

La granulation est exprimée par deux nombres correspondant chacun à un nombre de mailles, au pouce linéaire, de deux tamis utilisés pour la mesure.

Exemple :

Un flux de granulation 20*200 est tel que toutes ses particules passent au tamis de 20 mailles au pouce, tandis que toutes ses particules sont retenues par le tamis de 200 mailles au pouce.

S'il n'est pas utile de fixer un minimum aux dimensions des particules, le second nombre est remplacé par la lettre D.

20*D exprime la granulation d'un flux dont toutes les particules passent au tamis de 20 mailles au pouce, sans limite pour la dimension minimale.

- **Influence de la granulométrie**

Généralement plus la granulométrie est fine:

- Meilleur est le mouillage. (Plus bel aspect) ;
- La pénétration est moins importante ;
- La consommation de flux augmente ;

- Le soudage en angle avec forte gorge est plus facile ;

Plus la granulométrie est grosse:

- Plus le dégazage est facile.

1.2. Etuvage des flux en poudre

L'étuvage des flux devient indispensable si les emballages sont détériorés ou s'il est souhaité une teneur en H₂ diffusible dans le métal fondu inférieure à 5 ml/100g.

A titre indicatif, les températures d'étuvage sont au minimum de 200°C pendant deux heures ou 400°C pendant une heure.

L'étuvage évite l'apparition de porosités et la formation secondaire de fissures à froid dues à une teneur excessive en hydrogène.

Les flux agglomérés sont plus ou moins hygroscopiques selon leur composition chimique, ce qui signifie qu'ils absorbent l'humidité.

Pour les flux fondus, l'étuvage n'est pas indispensable, compte tenu de leur non reprise en humidité. A noter qu'une Récupération des flux est possible [5].

- **Conservation des flux sans étuvage**

Pour éviter une condensation d'eau superficielle sur les grains, les flux doivent être stockés à une température égale à celle du lieu d'utilisation, plus 10°C.

- **Conservation des flux après étuvage**

L'humidité étant susceptible de se déposer sur le flux à la sortie de l'étuve, il est conseillé de conserver ceux-ci dans une enceinte fermée à une température supérieure à 60°C.

1.3. Rôles des flux en poudre :

- **Rôle électrique**

Isolants à froid, les flux deviennent conducteurs à chaud et participent de ce fait à la fusion du métal déposé.

- **Rôle physique**

Le flux transformé en laitier liquide pendant le soudage maintient et moule le métal déposé. De là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui très important sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage

- **Rôle métallurgique**

- Le flux protège le bain de fusion contre l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphérique.
- Il participe à la scorification de l'oxyde de fer existant sur les bords à souder.
- Affine le métal en fusion par l'action de ses éléments calmants. (Manganèse, silicium....)
- Incorpore en faible quantité des éléments d'alliage tels que chrome, nickel, etc.
- Assure un refroidissement lent du bain.

1.4. Caractères des flux :

Selon la composition, on distingue des flux actifs et des flux non actifs. Un flux est dit actif lorsqu'il est à l'origine des teneurs en manganèse et en silicium du métal déposé.

On distingue également, pour un flux déterminé, son caractère acide, basique ou neutre.

- **Flux acides**

Ils ont un pourcentage élevé de silice (SiO_2), le laitier est dense et visqueux, les cordons ont un bel aspect. Le métal déposé a une bonne résistance à la fissuration mais des résiliences moyennes.

- **Flux basiques**

Les flux basiques, à faible pourcentage de silice, sont généralement riches en CaO , MgO , BaO , et fournissent un laitier fluide. L'aspect des soudures est moins régulier. L'action métallurgique est excellente et donne lieu à d'excellentes résiliences. Ils ne supportent pas les fortes intensités.

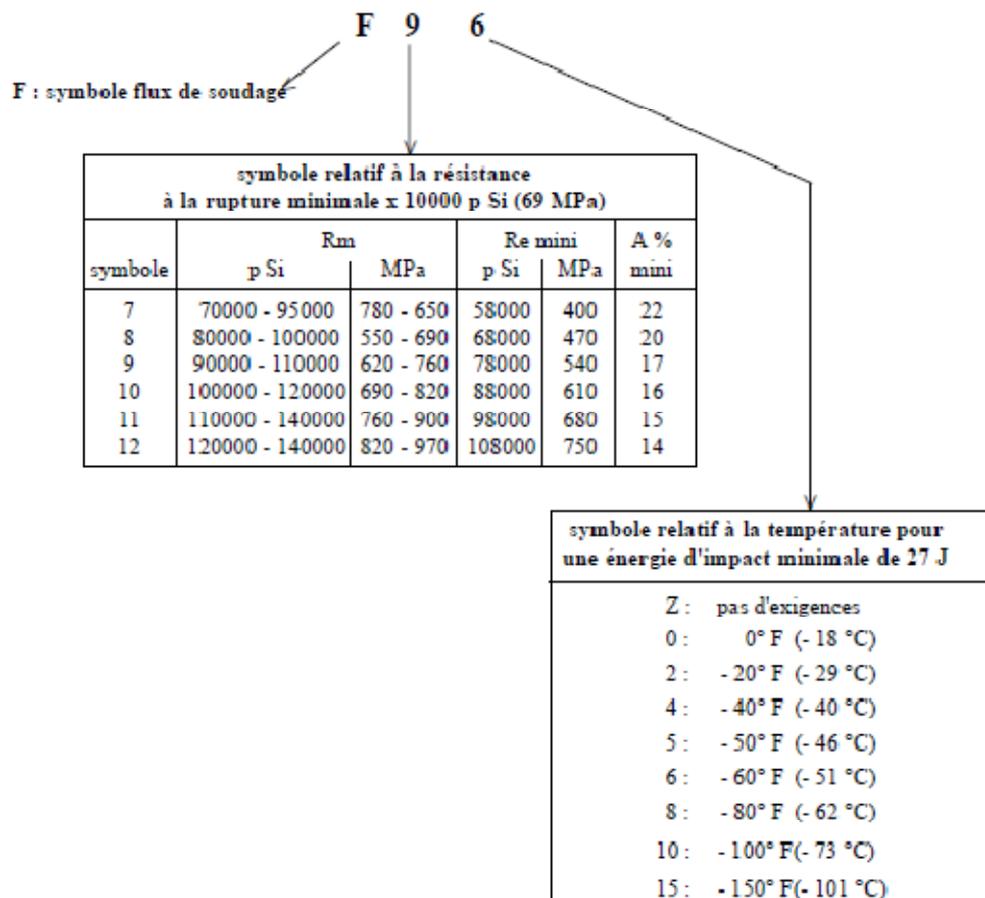
- **Flux neutres**

Les flux neutres allient les propriétés des deux précédents [5].

1.5. Désignation des flux de soudage à l'arc submergé d'après la spécification SFA 5.23 (aciers faiblement alliés) [5]

- Symbole général.....la lettre **F**.
- Symbole relatif aux caractéristiques mécaniques.....un chiffre.
- Symbole relatif aux valeurs de résiliences.....une lettre ou un chiffre

Exemple:



2. Fil d'apport [11]

Le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Les fils sont ainsi classés selon leur composition métallurgique et leurs conditions d'emploi.

Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui facilite l'arrivée du courant et reste sans effet sur le métal déposé.

Les fils sont bobinés en tourets et livrés tels quels pour leur utilisation immédiate après mise en place sur les dévideurs.

Les diamètres de fils utilisés en soudage sous flux sont normalisés :

1,2 ; 1,6 ; 2 ; 2,4 ; 3,2 ; 4 ; 4,8 ; 5 et 5,55 mm.

- **Intensité moyenne (Is) :**

On peut calculer les valeurs moyennes approximatives de l'intensité de soudage que peut supporter le fil électrode à l'aide des formules suivantes:

- Limite inférieure = \varnothing du fil (mm) * 100
- Limite supérieures = \varnothing du fil (mm) * 200

- **Tension de soudage (Us) :**

Il est possible de déterminer la tension de soudage d'après la formule:

- $U_2 = 20 \text{ volts} + 0,02 * I_2$

Tableaux II.2 : Valeurs approximatives d'intensités et de tension de soudage pour des travaux courants

\varnothing (mm)	Plage d'intensité en ampères et tensions correspondantes approximatives	
2,0	160 - 400	
2,4	180 - 220 - 500 - 520	28 + 6V
3,2	250 - <u>320</u> - <u>650</u> - 700	30 + 6V
4,0	400 - <u>460</u> - <u>800</u> - 900	31 + 7V
5,0	450 - <u>550</u> - <u>1100</u> - 1200	33 + 6V

Les chiffres soulignés indiquent la plage d'utilisation normale.

2.1. Courbes de fusion [7]

Les courbes de fusion permettent de déterminer la vitesse de fusion du fil en fonction de l'intensité de soudage.

La vitesse de fusion est, principalement en fonction de:

- Du diamètre du fil électrode.
- De la nature du courant de soudage (continu ou alternatif).
- De l'intensité appliquée.
- De la longueur de la partie terminale.
- De la polarité adoptée en courant continu (+ ou - au fil électrode).
- De la nature du fil électrode (acier ou inox).
- Du type de flux en poudre utilisé;

Remarque:

La vitesse de fusion d'un fil inox est différente d'un fil en acier.

- Utilisation des courbes de fusion

Exemple:

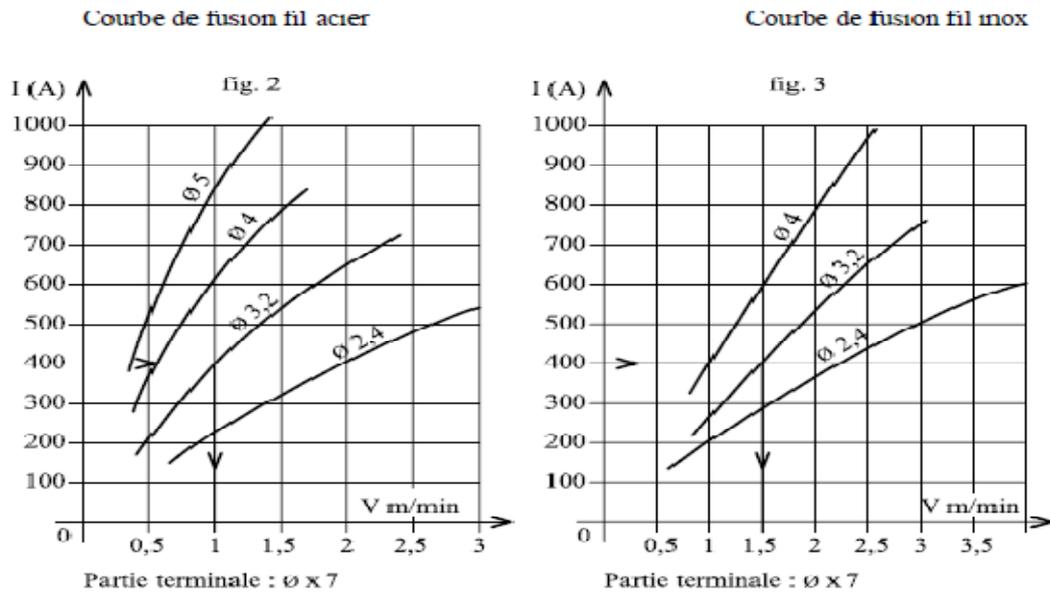


Figure II.6 : Courbe de fusion [12]

Avec une intensité de 400 A, il faut adopter une vitesse de dévidage du fil acier de 1 mètre/mn pour un diamètre de 3,2. Avec un fil inox de diamètre 3,2, une vitesse de dévidage de 1,5 m/mn est nécessaire.

2.2. Symbolisation des fils électrodes nus massifs pour soudage à l'arc submergé suivant la norme ASME

La symbolisation se fait de la façon suivante:

- Symbole relatif à la désignation du fil électrode.....la lettre **E**.
- Symbole relatif à la composition chimique du fil électrode.....une lettre:

A = acier au carbone, molybdène. (% silicium inférieur à 0,05)

B = acier au chrome, molybdène.

Ni = acier au nickel.

D = acier au manganèse, molybdène. (% silicium compris entre 0,05 et 0,3)

F ou **M** = acier contenant plusieurs éléments d'alliage.

- Symbole relatif à la teneur des éléments d'addition.....un chiffre.

Exemple:

E A 3 (SFA 5.23)

- E = fil électrode nu massif pour soudage à l'arc submergé;
- A = acier au carbone molybdène ;
- 3 = composition chimique du fil.

2.3. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé

La géométrie du cordon peut évoluer sous l'influence des principaux facteurs ci-après:

- Intensité de soudage (I_s);
- Tension de soudage (U_s);
- Vitesse de soudage (V_s);
- Densité de courant (d);
- Diamètre du fil électrode (\varnothing);
- Nature du courant et polarité;
- Longueur libre de fil électrode;
- Position du fil et inclinaison par rapport à la surface de la tôle ;
- Position de la prise de masse.

a. Influence de l'intensité (I_s)

L'intensité influence la profondeur de pénétration, la hauteur du cordon, la quantité de métal déposé et parfois les pertes en éléments d'alliage. La figure ci-dessous illustre l'influence de l'intensité sur la pénétration et la surépaisseur d'un cordon.

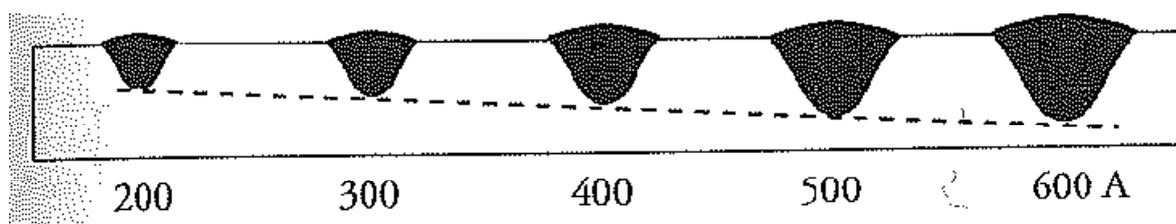


Figure II.7 : Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure. [12]

• Courbes de fusion:

Les courbes de fusion des fils électrode précisent la relation entre l'intensité de soudage et la vitesse de dévidage du fil pour différents diamètres.

On constate qu'une augmentation de l'intensité provoque:

- Une vitesse de dévidage plus rapide.
- Une quantité de métal déposé plus importante.

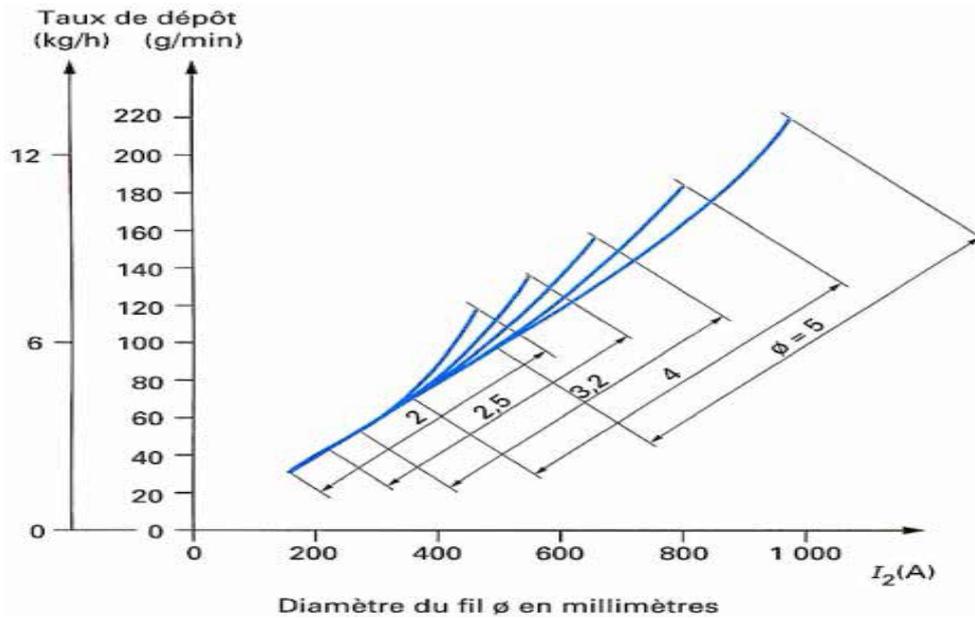


Figure II.7.a : Taux de dépôt moyen en soudage sous flux [11]

En moyenne, la vitesse de dépôt croît d'environ 1.5 kg/heure par tranche d'augmentation d'intensité de 100 ampères.

- Influence de l'intensité (I_s) sur les pertes en éléments d'alliage

L'influence de l'intensité sur les pertes en éléments d'alliage (manganèse et silicium) est déterminée par la composition chimique du fil électrode et du flux.

Exemple:

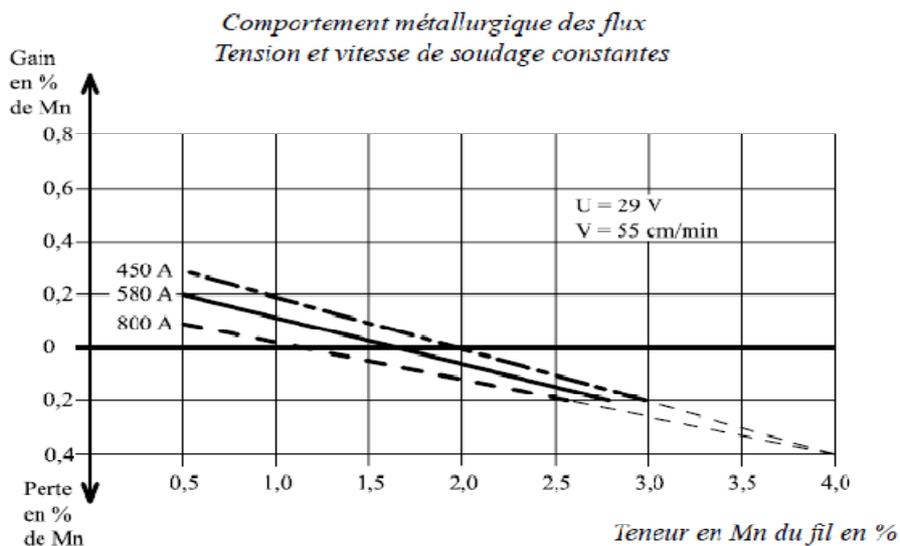


Figure II.7.b : Influence de l'intensité (I_s) sur % Mn [9]

Sur le graphique, on constate que plus l'intensité de soudage est importante, plus la perte en manganèse diminue.

L'intensité peut donc avoir une influence sur la composition chimique et les propriétés mécaniques du dépôt.

b. Influence de la tension de soudage (Us)

Une tension d'arc élevée donne une soudure large et peu pénétrante, qui convient au soudage de bords très écartés et permet l'incorporation d'un plus grand nombre d'éléments d'alliage au flux. Mais une tension d'arc élevée augmente aussi la consommation de flux et complique l'élimination du laitier refroidi en même temps. Elle accroît le risque de formation de caniveaux, notamment lors de la réalisation de soudures d'angle. A l'inverse une faible tension d'arc donne à la soudure une convexité excessive ainsi qu'un mauvais angle de contact avec la pièce à souder.

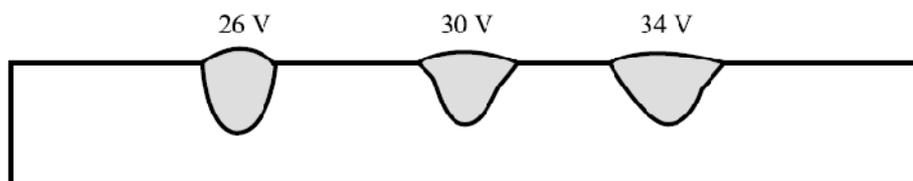


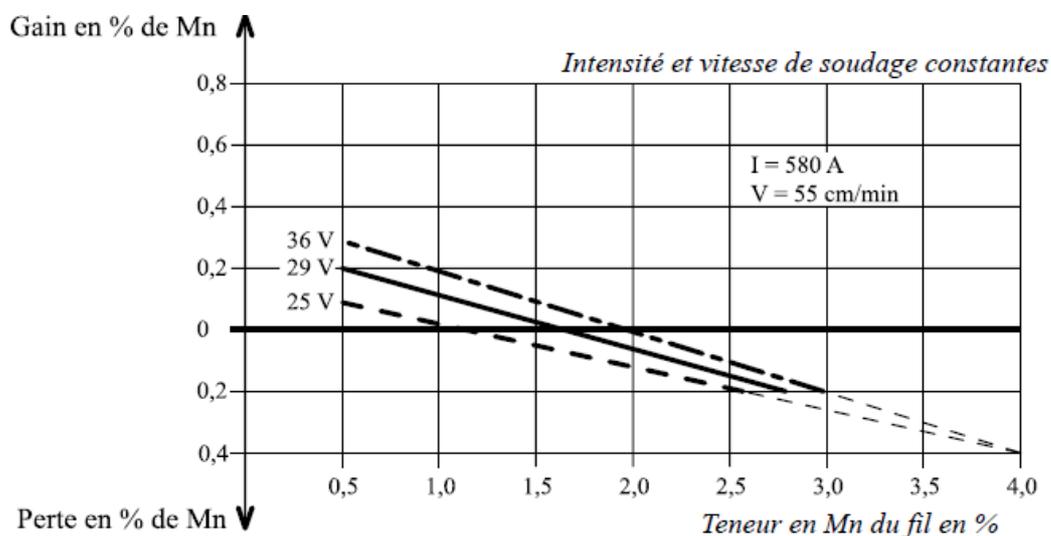
Figure II.8 : Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure [12]

- Influence de la tension de soudage sur les pertes en éléments d'alliage :

La tension doit être ajustée suivant les recommandations du fabricant de flux. La géométrie d'un cordon correspond pour un flux donné au rapport Intensité/tension de soudage.

La consommation de flux s'accroît avec la tension d'arc croissante, tandis que la variation de cette dernière peut influencer les transferts d'éléments d'alliage entre métal déposé et flux.

Exemple:



II.9 : Influence de la tension sur % Mn [9]

Sur le graphique, on constate que plus la tension de soudage augmente, plus la perte en Mn diminue ce qui est contraire à l'arc ouvert.

Remarque:

Le manganèse et le silicium diminuent la ductilité et la résilience, augmentent la résistance à la rupture, la dureté et la tendance à produire des criques.

c. Influence de la vitesse de soudage (V_s)

La vitesse influence sur la pénétration et la géométrie du cordon.

A tension et intensité de soudage constantes, l'accroissement de la vitesse a pour effet d'affiner le cordon.

La profondeur de pénétration diminue avec la vitesse de soudage.

Un accroissement de la vitesse de soudage peut provoquer l'apparition de porosités du fait de la solidification rapide du bain de fusion entraînant un dégazage insuffisant.

Un soudage trop rapide peut également provoquer l'apparition de caniveaux.

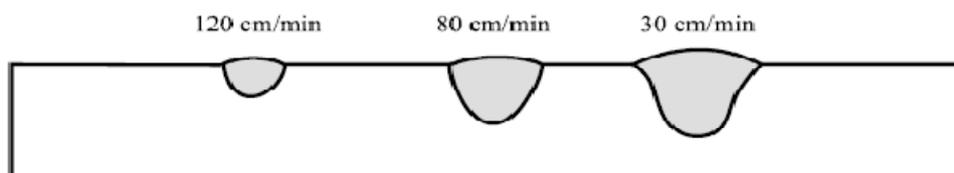


Figure II.10. Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon [12]

d. Influence de la polarité

On pratique habituellement le soudage sous flux en poudre avec le fil électrode relié au pôle +, polarité qui conduit à une pénétration plus forte avec la plupart des flux.

Par contre, la vitesse de dépôt est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive. Toutefois des défauts de liaison peuvent apparaître en soudage avec une polarité négative car la pénétration est réduite [9].

Tableaux II.3 : Influence des différents paramètres sur la morphologie du cordon de soudure [9]

Augmentation du paramètre	Largeur	Pénétration	Poudre/fil	Taux de dépôt
Intensité	→	↗	↘	↗
Diamètre du fil	↗	↘	↗	↘
Tension	↗	→	↗	→
Vitesse soudage	↘	↘	→	→
Longueur libre	→	↘	↘	↗
Polarité + / -	→	↗	↗	↘
Granulométrie	↘	↗	↘	→

II.2.2 Soudage à l'électrode enrobée (SMAW)

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure II.11.

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, 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.

L'électrode enrobée constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. 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.

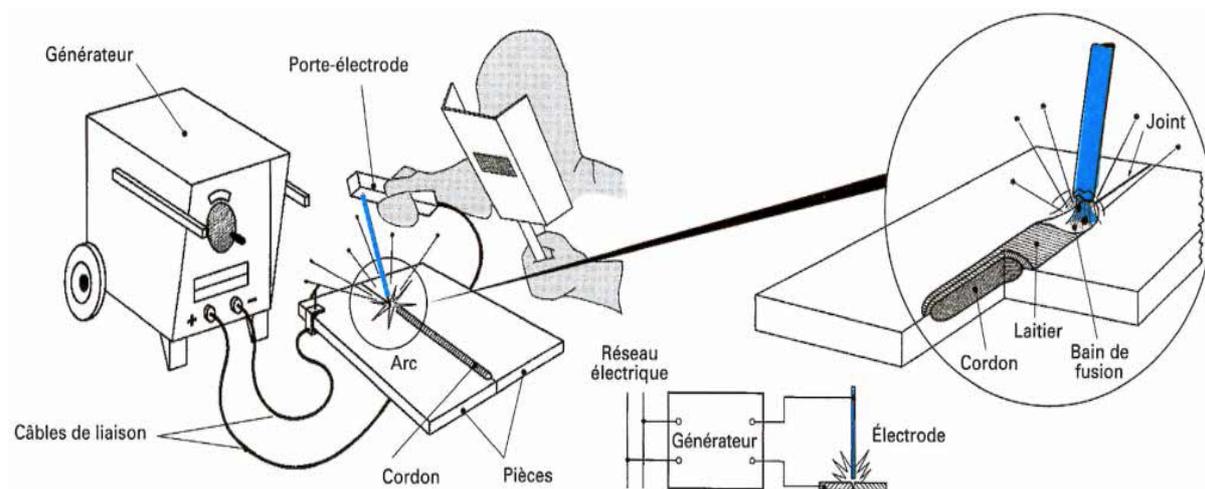


Figure II.11 : Soudage à l'électrode enrobée [11]

1. Sources d'alimentation

Lorsque l'on soude avec des électrodes enrobées, l'intensité du courant se règle au niveau de la source d'alimentation. La longueur de l'arc peut varier, mais le courant de

soudage ne doit pas varier au-delà de certaines limites. Si l'on veut éviter les projections dues au court-circuit provoqué par le métal fondu dans l'arc reliant l'électrode et la pièce à souder, le courant de court-circuit ne doit pas dépasser de plus de 60% le courant de soudage. D'un autre côté, si le courant de court-circuit est trop faible, l'électrode risque de « coller » à la pièce à souder. Il est donc nécessaire que la source d'alimentation présente une caractéristique de charge plongeante.

Pour le soudage SMAW, les sources d'alimentation ne requièrent pas un facteur d'intermittence aussi élevé que pour les autres méthodes mécanisées (35% est une valeur normale).

Etant donné que le soudage SMAW peut être réalisé en courant alternatif ou en courant continu, tous les types de sources d'alimentation peuvent être utilisés. Les avantages du courant alternatif sont la simplicité de la source d'alimentation et la diminution de l'effet de soufflage magnétique. Cependant, le choix des électrodes est alors limité et il est nécessaire que la source d'alimentation fournisse une tension à vide d'au moins 50V et, si possible davantage [7].

2. Caractéristiques de l'électrode :

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (**Figure II.12**). 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 (norme ASME).

On donne ci-après quelques données générales concernant l'âme métallique et son enrobage.

2.1. 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.

2.2. 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.

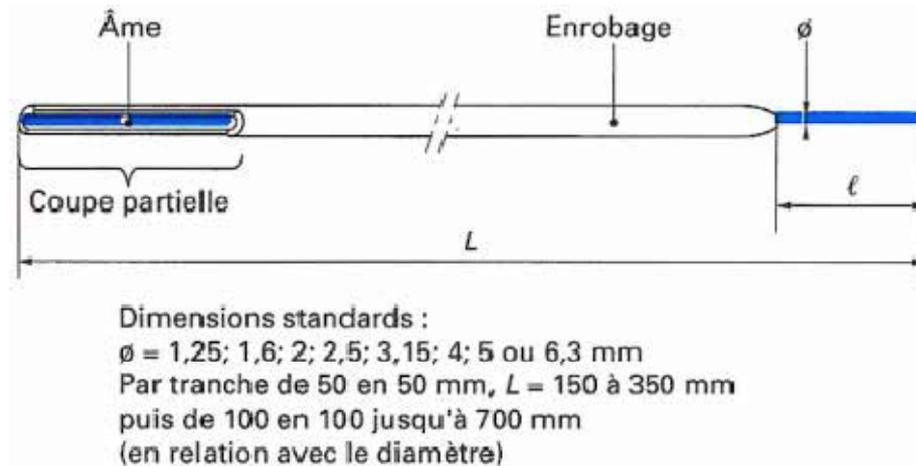


Figure II.12 : Caractéristiques de l'électrode enrobée [11]

a. Types d'enrobage :

- **Électrode acide**

L'enrobage des électrodes acides se compose d'oxyde de fer et de manganèse. Le laitier qui se solidifie, devient poreux et se retire facilement. Le métal ainsi soudé a une limite d'élasticité et une résistance à la traction plus faible que celles du métal produit par les électrodes rutiles et basiques. En revanche, la résistance à la rupture est plus élevée.

- **Électrode rutile**

L'enrobage des électrodes rutiles se compose de grandes quantités (environ 25 à 45 %) de dioxyde de titane (TiO₂). Les électrodes de ce type facilitent l'amorçage de l'arc. Elles sont très faciles à utiliser, elles produisent une belle soudure avec un laitier facile à retirer. Malheureusement, la teneur en hydrogène dans la soudure étant plus élevée, il y a un risque de fragilisation et de fissuration par l'hydrogène. Ceci limite l'utilisation de ce type d'électrodes au soudage des aciers au carbone, dont la résistance à la traction est inférieure à 300 Mpa.

Il existe deux catégories d'électrodes rutiles :

- Celles qui comportent une faible proportion de cellulose et dont l'enrobage est semi-épais. Elles produisent une importante quantité de laitier. Elles sont utilisées pour le soudage horizontal et ne produisent que peu de projections.

-Celles dont l'enrobage est plus fin et produit un laitier qui se solidifie plus rapidement et un arc plus intense en raison de l'inclusion d'une grande quantité de substances produisant des gaz. On utilise ces électrodes pour le soudage horizontal, vertical et au plafond. La pénétration est plus profonde et la quantité de laitier est réduite. Les soudures horizontales peuvent être plates ou légèrement convexes.

- **Électrode basique**

L'enrobage des électrodes basique se compose de fluorure de calcium (fluorspar CaF_2). Le laitier réagissant comme une base, la soudure obtenue ne contient qu'une faible quantité de soufre et d'oxygène. La résistance à la fissuration à chaud est supérieure à celles obtenue par d'autres électrodes. Le risque d'inclusion de laitier est faible, ces électrodes conviennent dans toutes les positions de soudage.

Les électrodes basiques étant fabriquées à très haute température (jusqu'à 500°C), la teneur en humidité de l'enrobage est faible. Le métal soude contient donc peu d'hydrogène et le risque de fissuration à froid est faible.

Toutefois, les électrodes basique étant hygroscopiques, elles doivent être conservées à l'abri de l'humidité. L'idéal est que ces électrodes soient maintenues à une température de 50 à 80°C pendant toute la période de travail, et que celles qui n'ont pas été utilisées soient remises en fin de journée dans un four à une température d'environ 150°C .

Les électrodes basiques présentent néanmoins un inconvénient :

La surface de la soudure est plus grossière et rugueuse et généralement convexe.

- **Électrode cellulosique**

L'enrobage des électrodes cellulosiques comporte une quantité relativement élevée de substances cellulosiques qui apportent une importante quantité d'hydrogène à l'arc quelles que soit la position de soudage. On obtient ainsi une excellente pénétration. On utilise exclusivement ce type d'électrodes pour le soudage de gazoducs et d'oléoducs : La teneur en humidité de l'enrobage est relativement élevée. Il faut utiliser des méthodes particulières de soudage et travailler à des températures de 100 à 250°C , même pour le soudage de faibles épaisseurs (8 à 10 mm).

Tableaux II.4 : Facteurs déterminant le choix de l'électrode. [12]

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

b. Rôles de l'enrobage :

• 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 ;
- 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 découlent les principales conditions d'utilisation :

- type de courant approprié (alternatif ou continu) ;
- tension d'amorçage (à vide) du générateur ;
- pénétration et taux de dépôt ;
- diversité d'emploi, etc.

• Rôle mécanique

Le retard de la fusion de l'enrobage sur l'âme métallique forme un cratère à l'extrémité de l'électrode. Ce cratère dirige l'arc dans le prolongement de l'électrode et contribue à la stabilité mécanique de l'arc.

La grosseur des gouttes dépend principalement de la nature de l'enrobage. Les électrodes à enrobages basiques et cellulosiques donnent des grosses gouttes de métal transféré, alors que les autres types d'électrodes produisent des gouttes plus fines.

L'action capillaire et visqueuse du laitier maintient les gouttes de métal et permet le soudage en position.

La nature du laitier influe sur la tension superficielle du métal en fusion et par conséquent sur la forme et l'aspect du cordon.

• 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 diluaient dans le métal en fusion et se retrouvaient 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.

C. Fusion de l'électrode

Les caractéristiques de fusion de l'électrode répondent à des lois générales rappelées ci-après :

- **Constante de fusion** : La quantité de métal déposé par unité de temps dépend linéairement du courant d'arc (figure II.13). Le coefficient de proportionnalité qu'il est possible de relever varie d'un modèle d'électrode à l'autre et peut être considéré comme une caractéristique propre à chacun d'eux. On appelle ce coefficient constante de fusion, il s'exprime en $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{h})$. Sa connaissance permet d'établir le temps nécessaire pour réaliser un dépôt de poids donné, à une intensité fixée.
- **Pertes de fusion** : Elles sont dues aux projections qui se produisent pendant le soudage et pour diverses raisons (type d'enrobage, caractéristiques du générateur, type de transfert, température relative du métal apporté par rapport aux pièces, conditions opératoires, etc.). Selon le cas, ces pertes peuvent atteindre des proportions importantes, de l'ordre de 20 à 25 %.
Signalons en outre que l'électrode n'est jamais complètement consommée, la longueur prise dans la pince étant inutilisable et représentant une perte supplémentaire de 5 % environ.

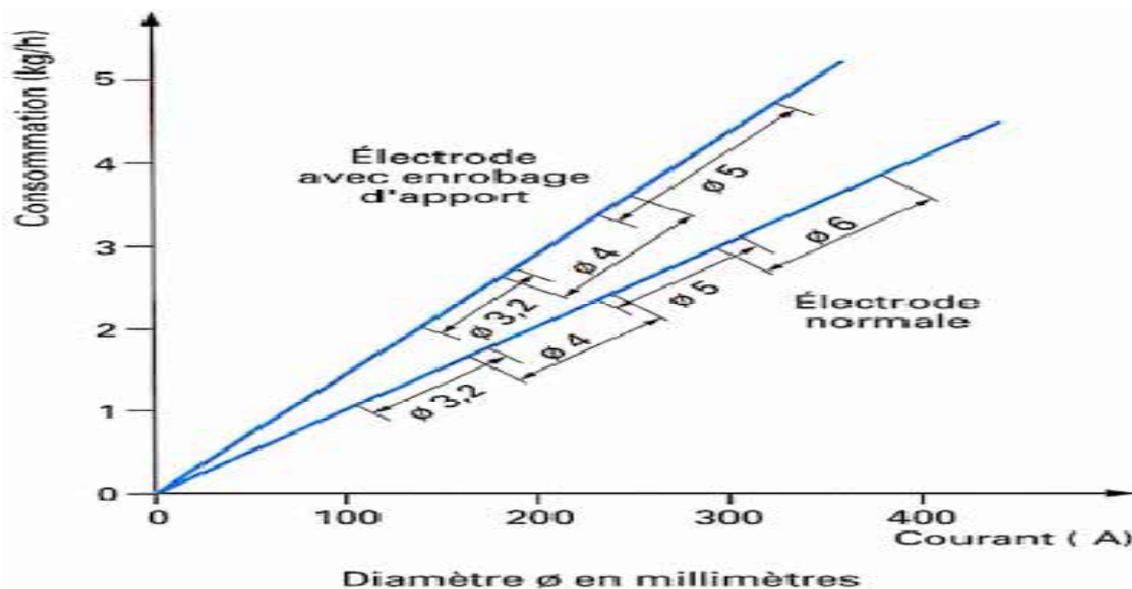


Figure II.13 : Fusion des électrodes [11]

- **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 (figure II.13), 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 %.

d. Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire

La pénétration et la vitesse de soudage dépendent non seulement de la nature de l'électrode mais aussi de ses conditions d'utilisation : nature du travail, position de soudage, intensité, etc.

Tableaux II.5 : Consommations d'électrodes [11]

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

e. Principaux composants des enrobages [5] :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La poudre de fer : on peut employer la poudre de fer dans l'enrobage de certaines électrodes. Il arrive qu'elle constitue 50 % ou plus de la masse de l'enrobage. La poudre de fer sert surtout à augmenter le taux de dépôt de l'électrode car elle fond et s'ajoute au métal déposé provenant de l'âme.

Elle peut également influencer sur l'aspect du cordon, et sur la formation, à la pointe de l'électrode, du cratère qui permet d'utiliser la technique de soudage par traînage.

f. Utilisation des électrodes à enrobage basique

Bien que les indications de ce graphique ne soient pas exactement valables pour chaque type d'électrodes basiques, il montre bien qu'en pourcentage d'humidité important est rapidement atteint lorsque les électrodes restent exposées à l'air libre. Un taux d'humidité d'enrobage de l'ordre de 1% risque de donner naissance à des porosités dans les dépôts pour tous les aciers courants ; il suffit de dépasser environ 0,3 % pour que les risques de fissuration sous cordon apparaissent au soudage des aciers sensibles à la trempe.

La prise d'humidité est si rapide que ces électrodes nécessitent bien souvent un étuvage avant leur utilisation et des précautions accrues pour éviter leur reprise d'humidité entre l'opération d'étuvage et l'emploi.

Le séchage des électrodes basiques n'est effectif que lorsqu'il est pratiqué dans une étuve à une température dépassant 250°C pendant une période allant de 2 heures minimum pour 400°C à plus de 24 heures pour 250°C.

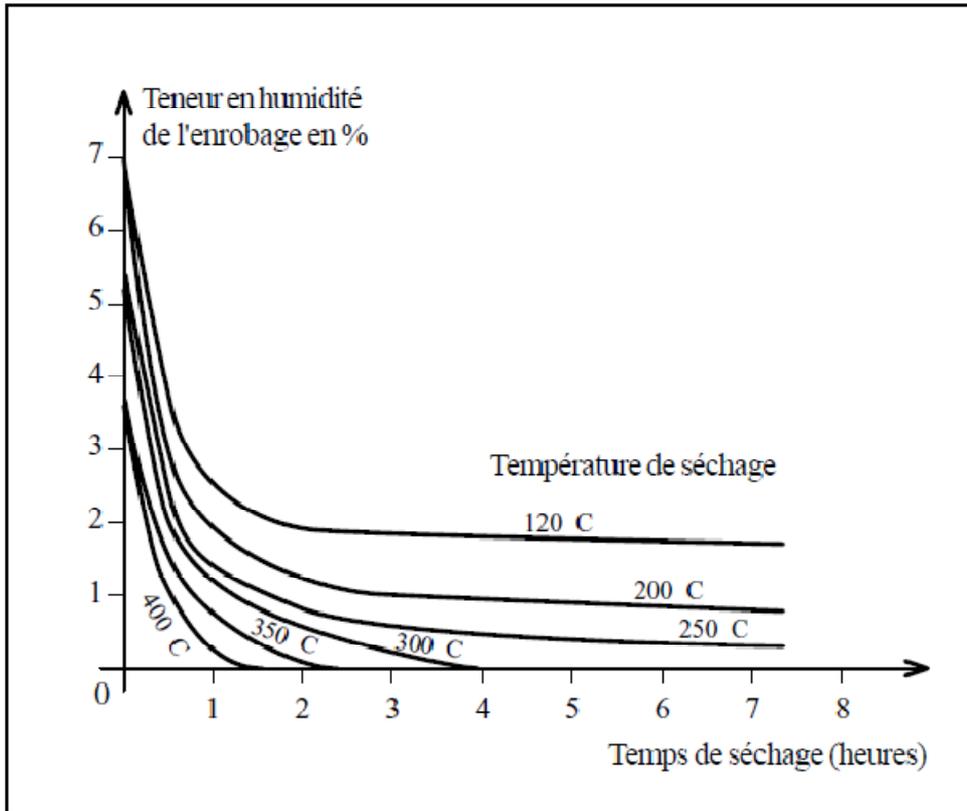


Figure II.14: Teneur en humidité de l'enrobage% en fonction de t(h) [5]

3. Influence des paramètres de Soudage avec électrode enrobée

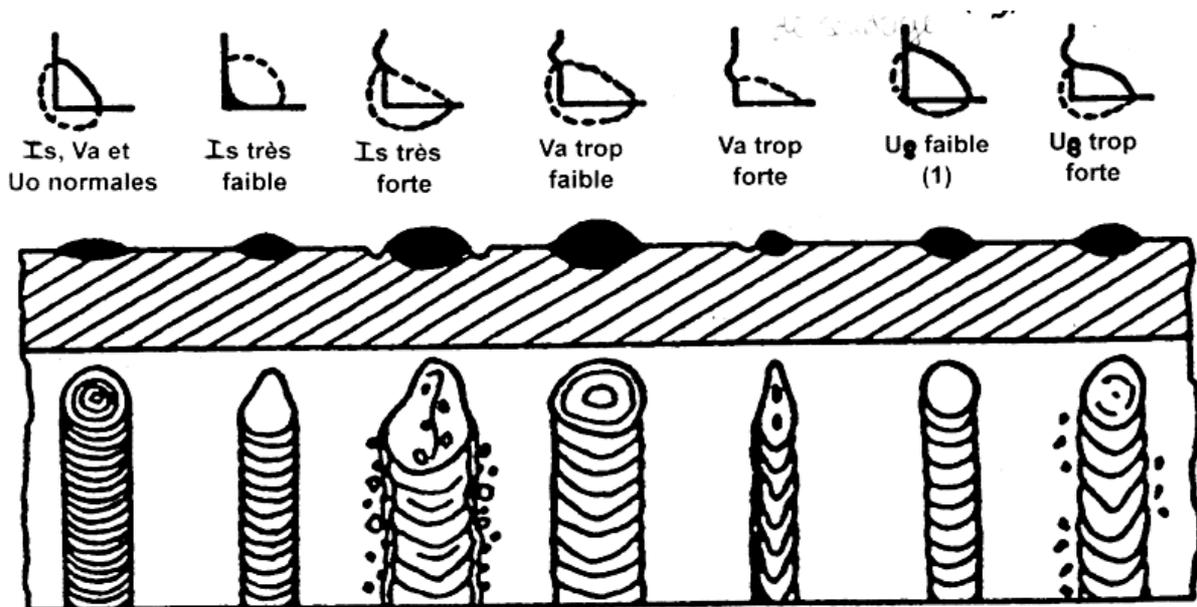


Figure II.15: Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon [13]

4. Désignation normalisée des électrodes enrobées suivant ASME section II Part. C S F A 5. 1

CLASSIFICATION :

Les électrodes sont classées suivant :

- les caractéristiques mécaniques du métal déposé à l'état brut de soudage ;
- le type de courant ;
- le type d'enrobage ;
- les positions de soudage de l'électrode ;
- la composition chimique du métal déposé.

Exemple :

E	70	1	8
Symbole général de l'électrode	Charge de rupture, limite d'élasticité. Allongement	Position de soudage	Type d'enrobage Type de courant.

SYMBOLE	R	RE	A %
	MPa	MPa	>
60	430	340	22
70	500	420	22

SYMBOLE	POSITION
1	Toute
2	10, 1F, 2F.

SYMBOLE	TYPE D'ENROBAGE	TYPE DE COURANT
0	Cellulosique au sodium	= (+)
1	Cellulosique au potassium	≈ et = (+)
2	Rutile au sodium	≈ et = (-)
3	Rutile au potassium	= et ≈
4	Rutile + poudre de fer	= et ≈
5	Basique bas hydrogène (sodium)	= (+)
6	Basique bas hydrogène (potassium)	= (+) et ≈
8	Basique bas hydrogène + poudre de fer	= (+) et ≈

Nota : E 7018 - 1 indique que Kv > 27J à 46 °C

II.2.3. DÉFAUTS DE SOUDURE [10] [14]

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les inspecter.

a. Fissurations

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes 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 peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

Les fissures 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.

Les fissures 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 peut aussi distinguer 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.

- **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 (figure 6.2). 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.

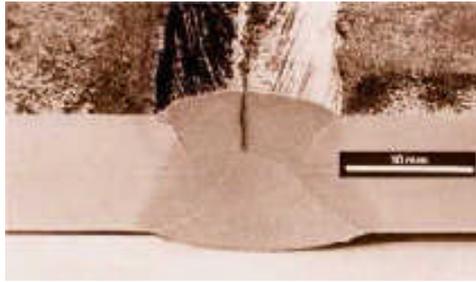


Figure II.16 : Fissure longitudinale (Fissuration à chaud) [14]

- **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 ou par des 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.



Figure II.17: Fissure à froid. [14]

b. Porosités

Il s'agit de défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchant, Figure II.18. Elles sont causées par les courants d'air, le manque de gaz, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder...etc.



Figure II.18: Porosités débouchantes en surface de cordon de soudure [14]

c. Soufflures

C'est un groupe de porosités non débouchantes. Allongées, on parle de soufflures vermiculaires. Si elles sont débouchantes, on parle alors de piqûres (**Figure II.19**).



Figure II.19 : Soufflures sphéroïdales non débouchantes [14]

d. Inclusions

Elles désignent un composé étranger à la soudure et peuvent contenir du Tungstène (Cas du Soudage TIG) ou du laitier (Soudage à l'électrode enrobée) ou encore des oxydes.

e. Retassures

Suite à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparaît visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon.

f. Excès de pénétration

Métal débordant du côté envers du cordon, Figure II.20 :



Figure II.20: Excès de pénétration [14]

g. Collage ou manque de pénétration

Le métal de base est non fondu, ce qui diminue la section efficace de la soudure, (Fig.II.21). On distingue le collage noir où l'interface entre le métal de base et la soudure est vide (par contrôle radiographique, apparaît une tache sombre sur les clichés) et le collage blanc, où l'interface est comblée par des oxydes fondus (variété indécélable par contrôle radio).

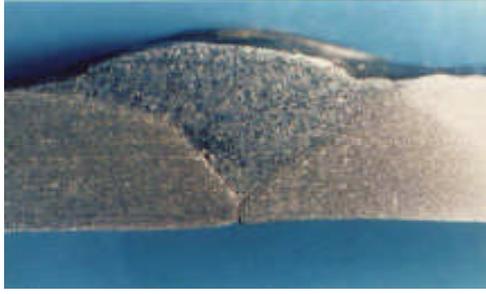


Figure II.21 : Manque de pénétration et collage en bord du joint. [14]

h. 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 (figure 6.9). 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.

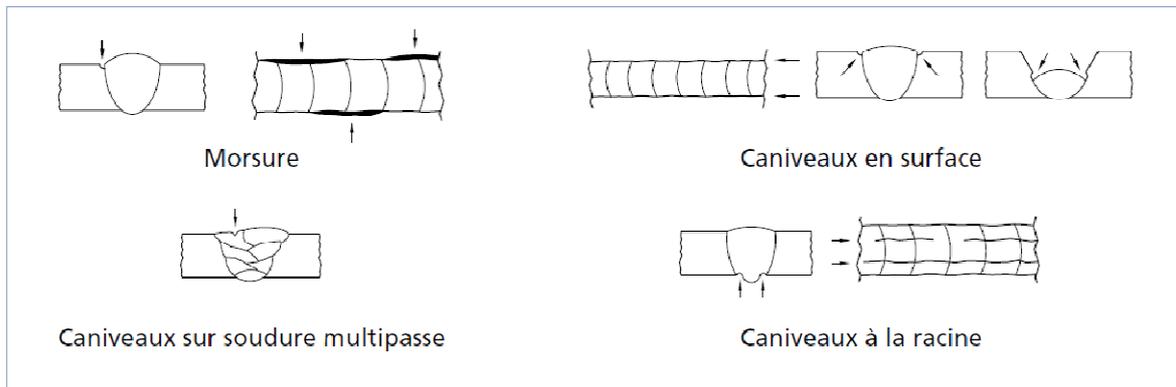


Figure II.22 : Morsures et caniveaux [13]

Chapitre III : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET PROCEDURES

Dans ce chapitre on expose les méthodes et les techniques utilisées dans notre investigation.

III-1. Matériau d'étude

Le matériau utilisé est l'acier **API 5L X52M PSL2**, fabriqué selon la norme API par le groupe allemand thyssenkrupp livré sous forme de bobines de 10,30mm d'épaisseur, destiné pour la fabrication des tube (pipeline). L'analyse chimique a été faite à l'entreprise ALTUMET (ANABIB) avec la machine (FOUNDRY-MASTER Pro) Spectromètre à émission optique (OES) (Figure III.1) :



Figure III.1 : Spectromètre à émission optique (FOUNDRY-MASTER Pro)

Tableau III.1 : Composition chimique du métal de base X52M par le fournisseur (thyssenkrupp)

C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr
0,059	0,23	1,15	0,014	0,0020	0,038	0,0004	0,074
Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Pc	CE
0,051	0,016	0,042	0,049	0,003	0,003	0,13	0,275

III-2. Procédés et Paramètres de soudage

On a utilisé deux procédés :

SAW – SMAW

III.2.1. Soudage à l'arc submerge (SAW)

On a prélevé un échantillon d'un tube soudé avec la machine de soudage à l'arc submerge directement de la chaîne de fabrication. Les paramètres de soudage utilisés en chaîne sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableaux III.2 : Paramètres de soudage (SAW)

Intensité A	580
Tension V	29
Vitesse d'avance (m/min)	0,67
Energie de soudage E (j/cm)	12000

Tableaux III.3 : Classification et composition chimique du flux et du fil

Flux													
Classification	AWA : F8 A4 EA2-A2												
COMPOSITION chimique	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	V	Zr	Mg	Fe	Ca	k
	10,51	4,24	0,11	0,06	0,12	9,09	1,13	0,07	0,13	12,33	1,02	13,50	0,76
Fil													
classification	SFA 5.23 : EA2												
Composition chimique	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V		
	0,11	0,12	0,99	<0,01	<0,01	0,04	0,04	0,47	<0,01	0,02	<0,01		

III.2.2. Soudage à l'électrode enrobée (SMAW)

L'expérience consiste à souder deux plaques métalliques de l'acier X52M de 10,30 mm d'épaisseur. Le joint de soudure a été réalisé par des paramètres différents (Is variable) en trois régions de la plaque Selon la schématisation adoptée.

La première expérience est faite avec un soudage multi-passe avec deux plaques de 300mm de largeur et un joint sous forme **(X)** figure III.2.

La deuxième expérience a été réalisée en mono-passe sur deux plaques de 100 mm de largeur et un joint sous forme **(V)** figure III.3.

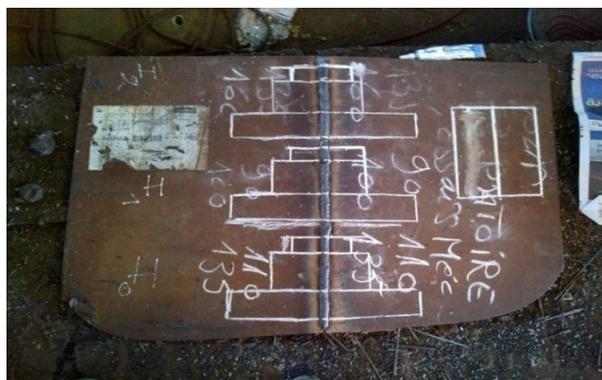


Figure III.2 : Soudages multi-passe



Figure III.3 : Soudage mono-passe

Tableaux III.4 : Paramètres de soudages SMAW (Multi-passe)

Tension (Us) V	Vitesse d'avance (Vs) Cm/min	Intensité (Is) A	
		1 ^{er} passe	2 ^{eme} passe
24	10	110 *	135
		90 **	100
		135 ***	160

NB : * échantillon (I.0) ** échantillon (I.1), *** échantillon (I.2).

Tableaux III.5 : Paramètres de soudages SMAW (Mono-passe)

Mono-passe				
Tension (Us) V	Vitesse d'avance (Vs) cm/min	Intensité (Is) A	Energie de soudage (E) J/cm	Temps de refroidissement Tr ₈₅₀₋₅₅₀
24	10	135 *	15552	53,31
		100 **	11520	29,25
		160 ***	18432	74,89

NB : * échantillon (I.0.1), énergie (E0.1), ** échantillon (I.1.1), énergie (E1.1),

*** échantillon (I.2.1), énergie (E2.1).

Tableaux III.6 : Classification et composition chimique de l'électrode

classification	AWS A5.1 : E7080										
Composition chimique	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	V
		0,093	0,43	1,27	0,007	0,007	0,05	0,07	0,01	<0,01	0,09

III.3. 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 notre cas, les normes à suivre sont la norme américaine ASME IX 2010 (American society of mechanical engineer), et API (American petroleum institute).

III.3.1. Essais de traction (soudage multi-passe)

L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique ou prismatique à un effort de traction jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (Re Rm A%).

III.3.1.1. Dimensions de l'éprouvette

L'éprouvette est normalisée selon la norme ASME IX 2010

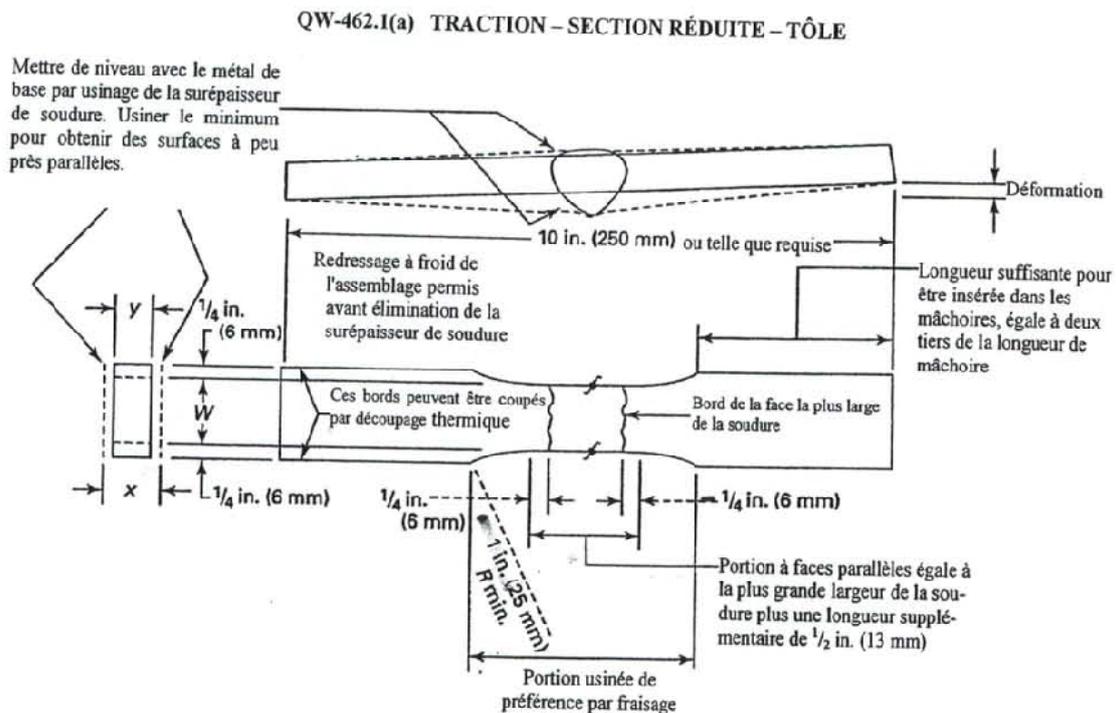


Figure III.4 : Dimensions des éprouvettes de traction selon la norme ASME [15]



Figure III.5 : Eprovettes de traction



Figure III.6 : Machine universelle de traction zwick roell (600kN)

III.3.2. Essai de résilience (soudage multi-passe)

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque les ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le métal fragile. L'essai de résilience permet de déterminer la ténacité d'un matériau métallique soumis à une sollicitation par choc. Les aciers tenaces ont une grande déformabilité; les aciers fragiles sont peu déformables.

III.3.2.1. Dimensions et prélèvement de l'éprouvette

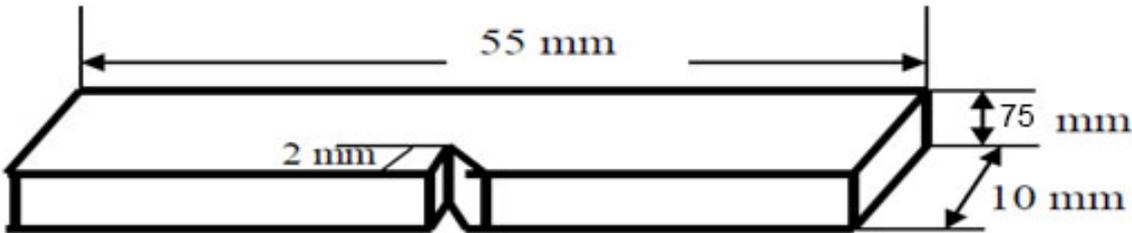


Figure III.7 : Dimensions de l'éprouvette de résilience selon la norme API

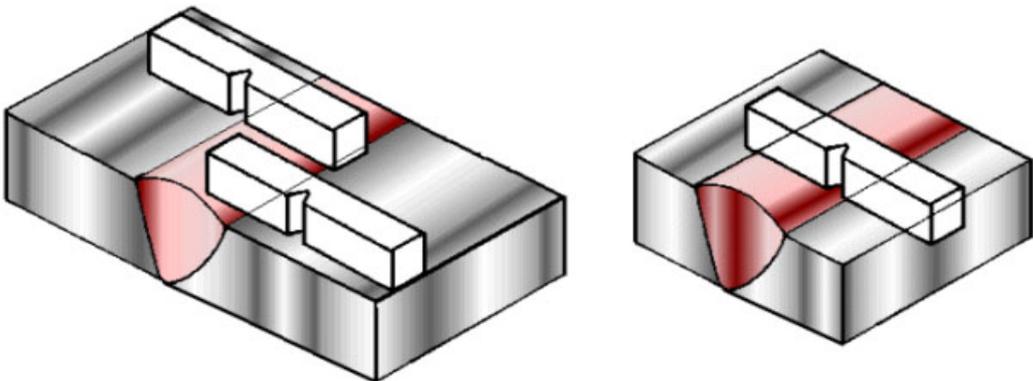


Figure III.8 : Prélèvement des échantillons



Figure III.9 : Epreuves de résilience



Figure III.10 : Mouton pendule testwell

III.3.3. 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 des classements et qui peuvent être reliées, dans une certaine mesure, aux caractéristiques de traction.

III.3.3.1. Essai de dureté Vickers HV30

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur, en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet entre faces opposées de 136° , 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^2) de l'empreinte.

III.4. Analyse métallographique

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe est dans tous les cas le même :

Une onde est envoyée sur la préparation ou émise par la préparation. Cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable. Cette image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra et stockée sur ordinateur pour traitement.

III.4.1. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons se fait avec une scie mécanique avec une lubrification abondante.

III.4.2. Polissage

L'observation métallographique ne peut pas être effectuée après prélèvement. Il faut éliminer l'épaisseur perturbée par polissage avec du papier abrasif (240, 420, 800, 1200, 2400, 4000) puis réaliser l'attaque chimique avec le Nital 5 % (5 ml d'acide nitrique + 100 ml d'éthanol pur), durée d'attaque 15s à 25s. Les échantillons seront ensuite lavés et bien séchés.

III.4.3. Observation

On se sert d'un microscope optique HUND (WETZLAR), permettant de réaliser des grossissements de 40,100, 200, 400.



Figure III.11: Microscope optique HUND (WETZLAR)

III.5. Contrôle radiographique RX

La technique est basée sur la pénétration de rayonnement X par le générateur de rayons X, Xylon smart (Figure III.12), disponible aux niveaux de l'entreprise ALTUMET. Après irradiation de la pièce, ces rayons, après leurs trajets à travers la pièce à contrôler, viennent impressionner un film avec différentes intensités de rayonnement qui participent à la formation de l'image radiographique avec la développeuse AGFA structurix U (Figure III.13). A l'issue d'un cycle chimique de développement (émulsion), les clichés obtenus sont visionnés avec un Négatoscope kowolux 4s (Figure III.13) afin de détecter d'éventuelles présences de défauts et leurs localisations.

- Paramètres utilisés

Tension : 280 Kv.

Intensité : 3mA.

Temps : 25s

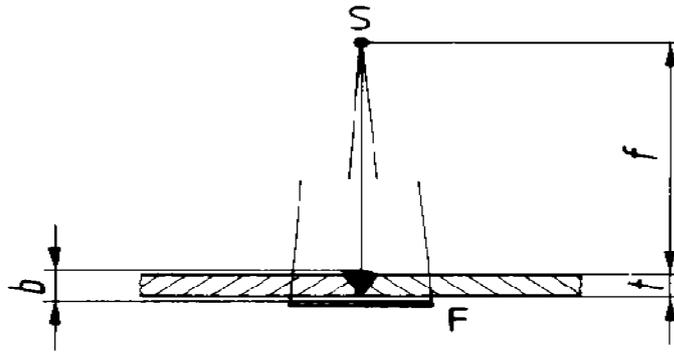


Figure III.12 : Dispositif d'examen pour parois planes et exposition simple



Figure III.13 : Générateur de rayons X yxlon smart



Figure III.14 : Développeuse de film radiographique (AGFA structurix U)



Figure III-15. Négatoscope kowolux 4s (pour observation des défauts)

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Composition chimique

Tableau IV.1 : Analyse chimique du métal de base X52M ALTUMET(ANABIB)

C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr
0,0336	0,222	1,08	0,0129	0,0043	0,0214	0,0001	0,0726
Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Co	Pcm
0,0496	0,0101	0,0392	0,0440	0,0024	0,0024	0,0015	0,104
CE IIW							
0,238							

L'acier X52M est de type thermomécanique vu sa teneur très basse en carbone. Généralement pour évaluer la soudabilité des aciers, on se sert du CE (Carbone Equivalent), dont les expressions les plus usitées par les pétroliers sont dans le Tableau IV.2 :

Tableau IV.2 : Différentes expressions du carbone équivalent [16]

Désignations	Expressions du CE										
CE IIW (par O'neill et Dearden)	CE = C +	$\frac{\text{Mn}}{6}$	+	$\frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5}$	+	$\frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$					
Pcm (par Ito et Bessyo)	Pcm = C +	$\frac{\text{Si}}{30}$	+	$\frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20}$	+	$\frac{\text{Mo}}{15}$	+	$\frac{\text{Ni}}{60}$	+	$\frac{\text{V}}{10}$	+ 5B

Le calcul des températures de préchauffage **To** et d'interpasse **Tin** se fait à l'aide du CE, mais la formule du CEIIW ne prend pas en compte le Nb, B, N. De plus, la fissuration à froid dépend de la composition, de l'épaisseur soudée, de l'histoire thermomécanique, de la sensibilité à l'H₂, de la géométrie du joint, et de l'énergie de soudage appliquée (E) [17].

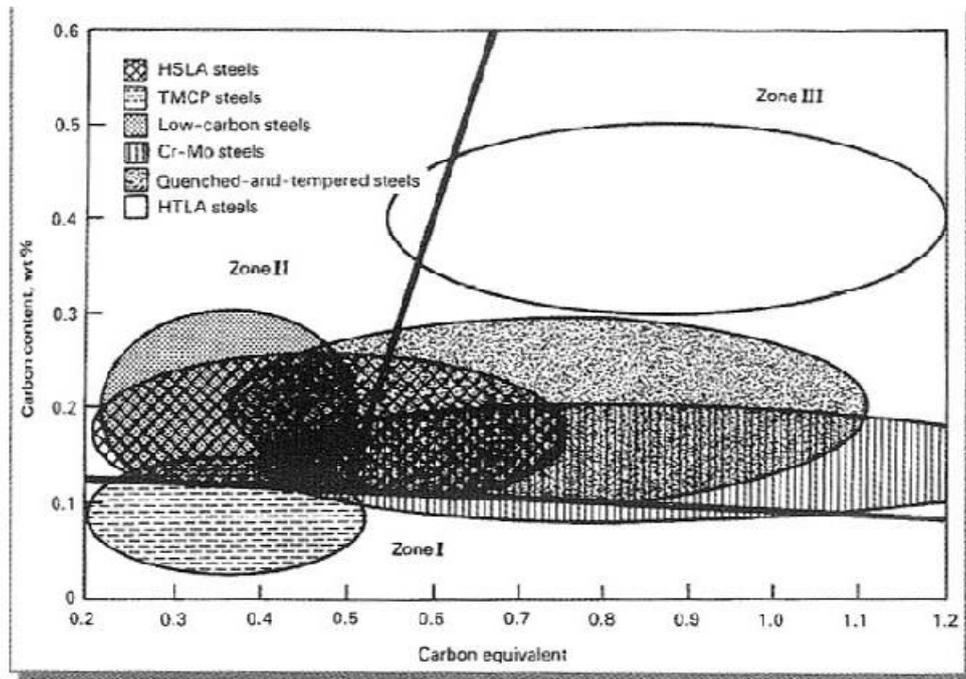


Figure IV .1. Diagramme de Graville donnant la soudabilité de l'acier en fonction de la quantité de carbone et du carbone équivalent CEIIW [17]

Le diagramme de Graville est découpé en 3 parties (Figure IV.1) :

Zone I : les aciers soudables sans précautions, tels que les aciers à très bas carbone (<0.1%),

Zone II : les aciers soudables avec précautions (post-traitement), tels que les aciers faiblement alliés avec un taux de carbone légèrement plus élevé (0.1-0.3 %),

Zone III : les alliages difficiles à souder, qui nécessitent un prétraitement, un post-traitement et un contrôle inter-passe de la température, tels que les aciers Cr-Mo, les aciers à Haute résistance faiblement alliés (**HSLA**), et les aciers thermomécanique richement alliés (**TMCP**).

Dans notre cas, l'acier étudié API5L X52M, issu d'un procédé de mise en forme TMCP, ne contenant que **0,03 %** massique de carbone et possédant un carbone équivalent CEIIW de **0,238**, se situe dans la partie soudable sans précautions. Un étuvage de flux pour le soudage SAW, et l'électrode enrobée pour le soudage SMAW permet d'éviter les effets de l'humidité internes lors du soudage pouvant conduire à une fissuration à froid.

En outre, d'après les résultats de l'analyse chimique, le Mn est l'élément dominant parmi les éléments d'addition. Il intervient comme désoxydant, évite la diminution de la résilience, et raffine la taille des grains d'austénite.

Les éléments d'addition tels que Al, Si, Ti, Nb jouent le rôle de désoxydant. Le bore B, en quantité extrêmement faible, le Cr et le Ni, accroissent la trempabilité. En plus, des rôles métallurgiques pour les autres éléments.

IV.2. Caractéristiques mécaniques :

IV.2.1. Métal de base

IV.2.1.1. Essais de traction

Le diagramme de la figure (IV.2) montre la courbe de l'essai de traction sur le métal de base X52M. Les résultats sont reportés dans le Tableau IV-3.

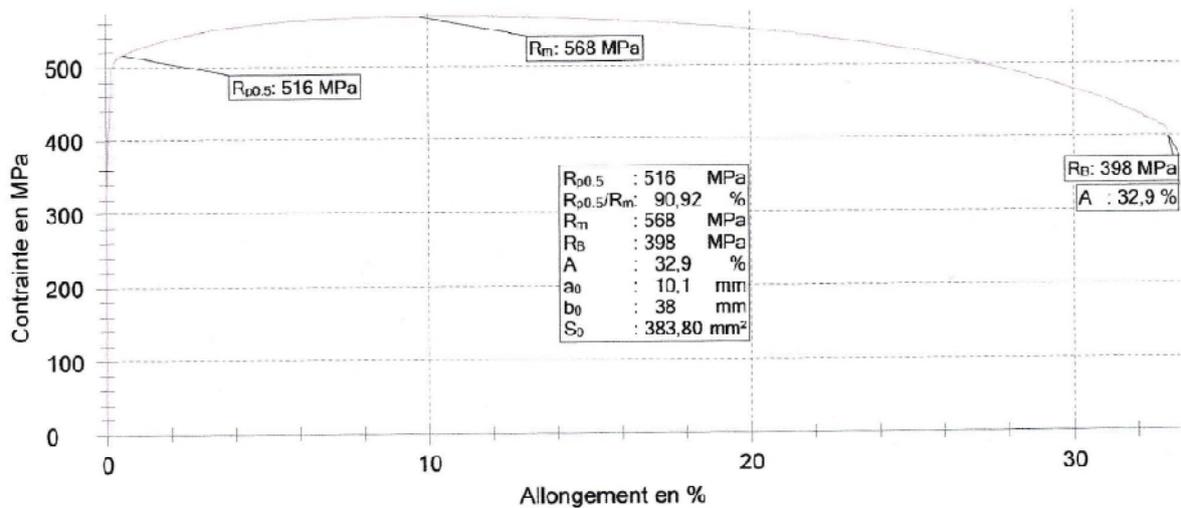


Figure IV.2 : Courbe de traction pour le métal de base.

Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques expérimentales du métal de base X52M

limite d'élasticité conventionnelle $R_{p0,5}$ (Mpa)	Resistance a la traction R_m (Mpa)	Resistance a la rupture R_r (Mpa)	Allongement A (%)
516	568	398	32,9

Les propriétés essentielles obtenues sont conformes aux caractéristiques mécaniques fournies par le fournisseur et à la norme API.

IV.2.2. Tube soudé (SAW)

IV.2.2.1. Essai de traction

Le diagramme de la figure IV.3 ci-après montre l'essai de traction de l'éprouvette extraite d'un tube soudé automatiquement (SAW) dont les résultats essentiels sont réunis dans le Tableau IV-4 ci-dessous :

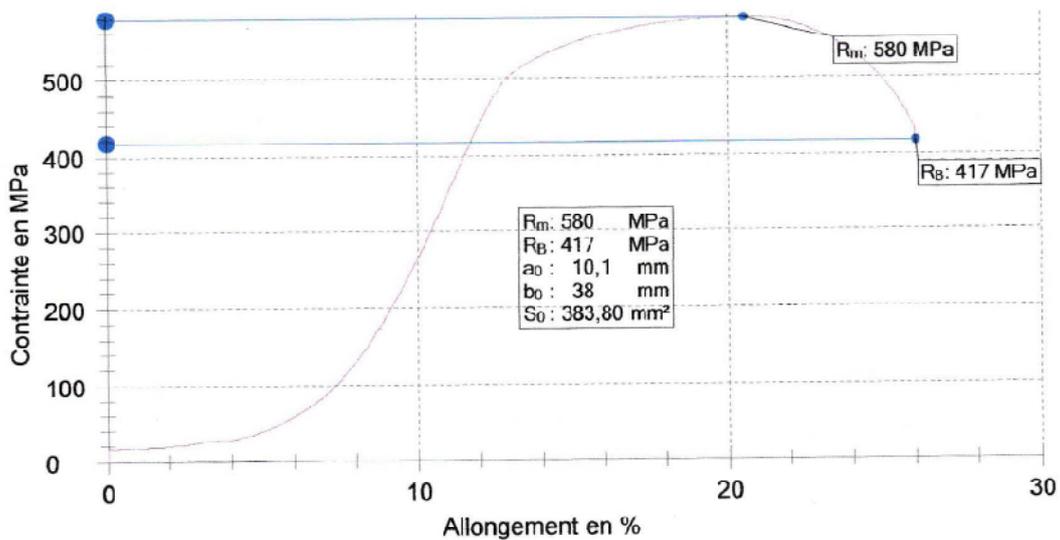


Figure IV.3 : Courbe de traction pour l'échantillon tube (SAW)

Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques

Resistance a la traction R _m (Mpa)	Resistance a la rupture R _r (Mpa)	Allongement A (%)
580	417	26

La soudure est dite conforme si sa résistance a la traction est supérieur à la résistance minimale a la traction spécifiée du métal de base 568 MPa [10].

La contrainte de rupture reste supérieure à celle préconisée par la spécification ASME (398 Mpa). Cependant, l'allongement est moins important que celui du métal de base. Cela est dû probablement aux défauts existants dans la soudure et aux traitements locaux.

En générale, les résultats sont en adéquation avec ceux exigés par la norme. De ce fait, on dira que l'énergie de soudage adoptée est favorable pour ce procédé (SAW).

IV.2.2.2. Essai de résilience

Les résultats de résilience de différentes zones de la soudure SAW sont donnés dans le tableau (IV.5) ci-dessous :

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai de résilience

	Travail moyen en joules (J)	Résilience (J/cm ²)
ZF	178,33	297,22
ZAT	207	345

On constate que la résilience de l'échantillon tube (SAW) est conforme à l'exigence de la spécification ASME (>20 joules).

IV.2.2.3. Essai de dureté

La figure (IV.7) montre le résultat de l'essai de dureté Hv30 sur l'échantillon tube soudé (SAW).

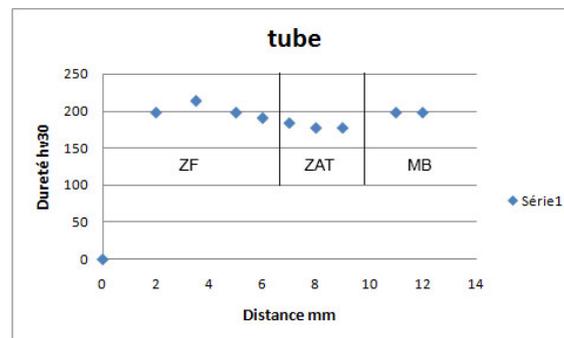


Figure IV.4 : Profil de dureté VICKERS HV30 (TUBE)

Il est à remarquer que la dureté ZF est plus élevée que celle de la ZAT (zone à gros grains) et du MB. Ceci est dû à l'efficacité de transfert d'éléments d'addition du procédé de soudage automatique à l'arc submergé. À noter qu'avoir la ZAT moins dure que le reste des zones de l'assemblage soudé s'explique par la composition chimique résultant dans la ZF et les traitements thermiques favorables apportés à la ZAT.

IV.2.3. Soudage multi-passes (SMAW)

IV.2.3.1. Essai de traction

Les résultats de l'essai de traction de soudure réalisé avec le procédé (SMAW) sont représentés dans les graphes ci-après :

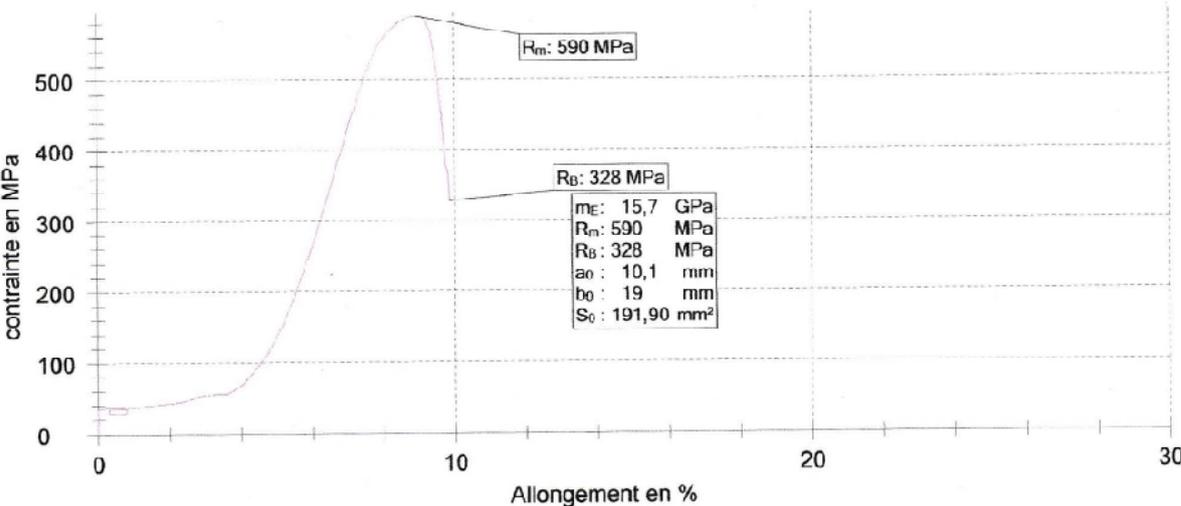


Figure IV.5 : Courbe de traction de l'échantillon I.0

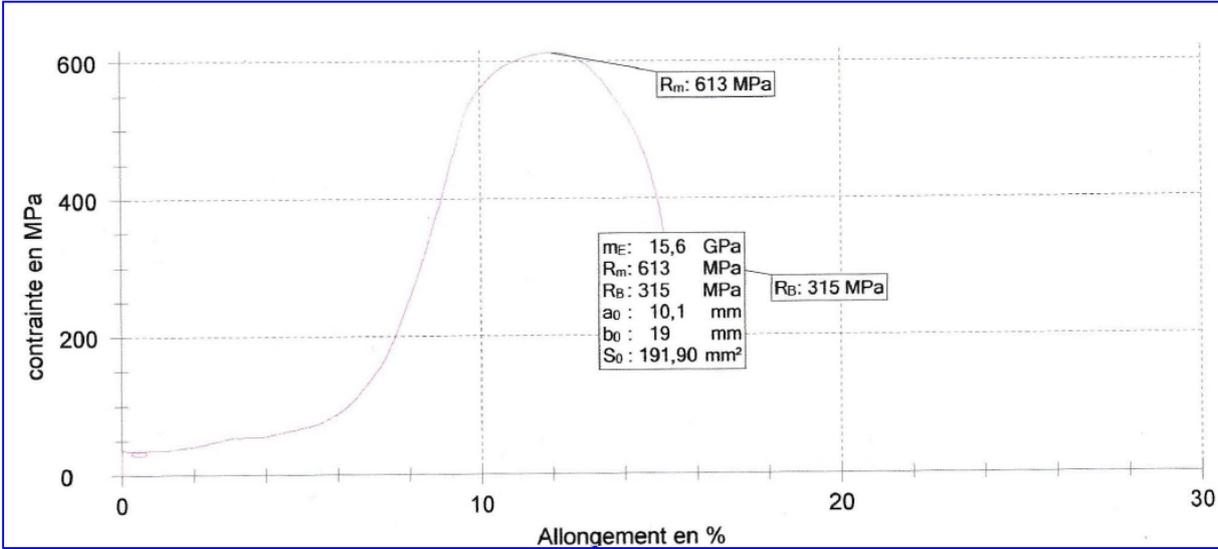


Figure IV.6 : Courbe de traction de l'échantillon I.1

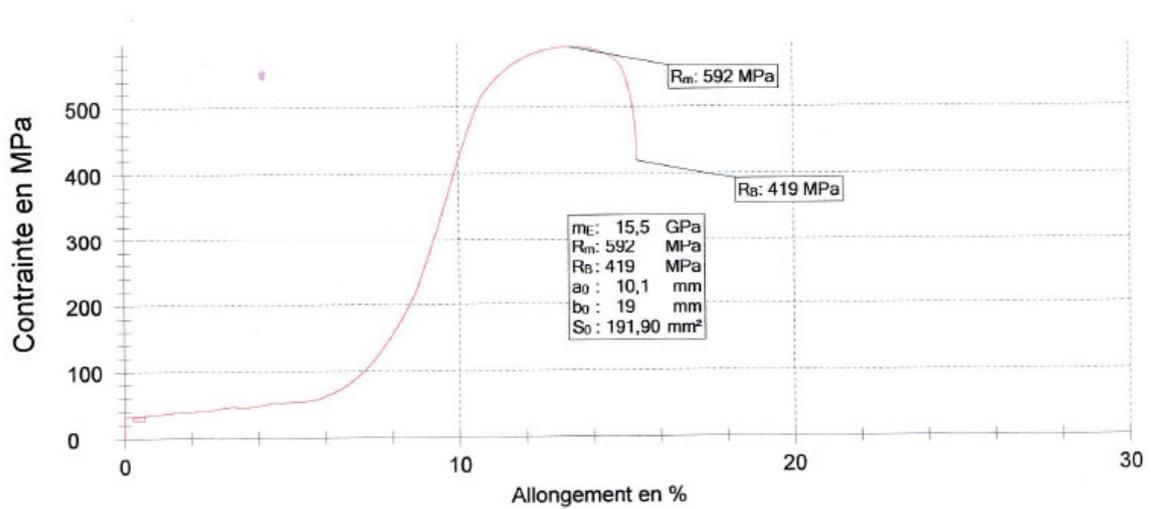


Figure IV.7 : Courbe de traction de l'échantillon I.2

Les caractéristiques essentielles de résistance sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques (multi-passes)

	Resistance a la traction Rm (Mpa)	Resistance a la rupture Rr (Mpa)	Allongement A (%)
I.0 (intensité normale)	590	328	9,9
I.1 (intensité faible)	613	315	14,2
I.2 (intensité forte)	592	419	15,4

On remarque que la résistance a la rupture (Rm) est toujours supérieure a celle du métal de base pour les trois énergies adoptées ($R_{m1}, R_{m2}, R_{m3} > R_m (MB)$). Ces résultats obéissent aux conditions auxquelles la spécification ASME a été établie.

Toutefois, l'allongement (A%) pour les différents essais sont beaucoup inférieurs a ceux du métal de bases. Ceci peut être attribué aux divers défauts constatés au niveau des soudures, ainsi que les changements structuraux survenus dans les différentes zones, a savoir le taux de martensite élevé (cas de l'essai I.1) devant les autres constituants tel que la bainite.

IV.2.3.2 : Essai de dureté (multi-passes et mono-passes)

Les figures (IV.8) et (IV.9) montrent les résultats des l'essais de dureté sur les trois échantillons soudés en multi-passes et mono-passes:

a) Soudage mono-passe

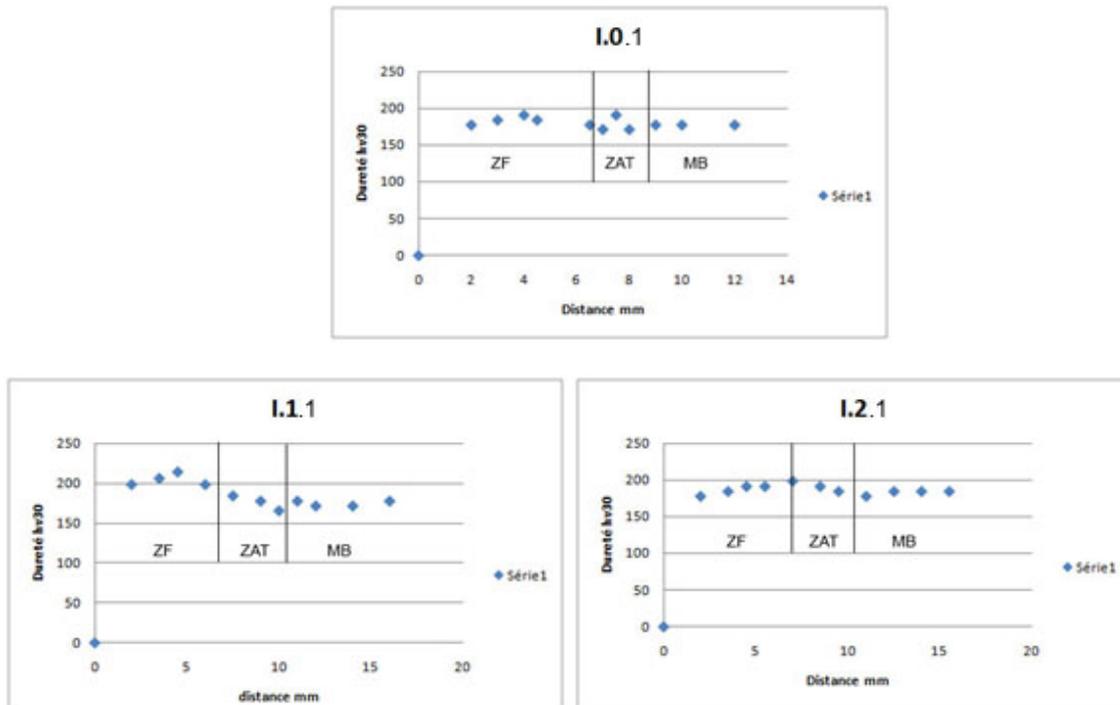


Figure IV.8.a : Profil de dureté VICKERS HV30 (mono-passes)

Tableau IV.7 : Dureté moyenne Hv30 (mono-passes)

Nº d'essai	E J/cm	ZF Hv30	ZAT Hv30	MB Hv30
I.0.1	15552	183	179/(190)	177
I.1.1	11520	203	175/(173)	174
I.2.1	18432	185	193/(200)	181

L'accroissement léger de dureté de la ZAT (zone a gros grains) pour les énergies élevées de soudage serait impacté éventuellement a l'existence en nombre appréciable d'îlots de martensite.

Nb : (...) Valeurs théoriques selon la relation N° (10)

b. Soudage multi-passe

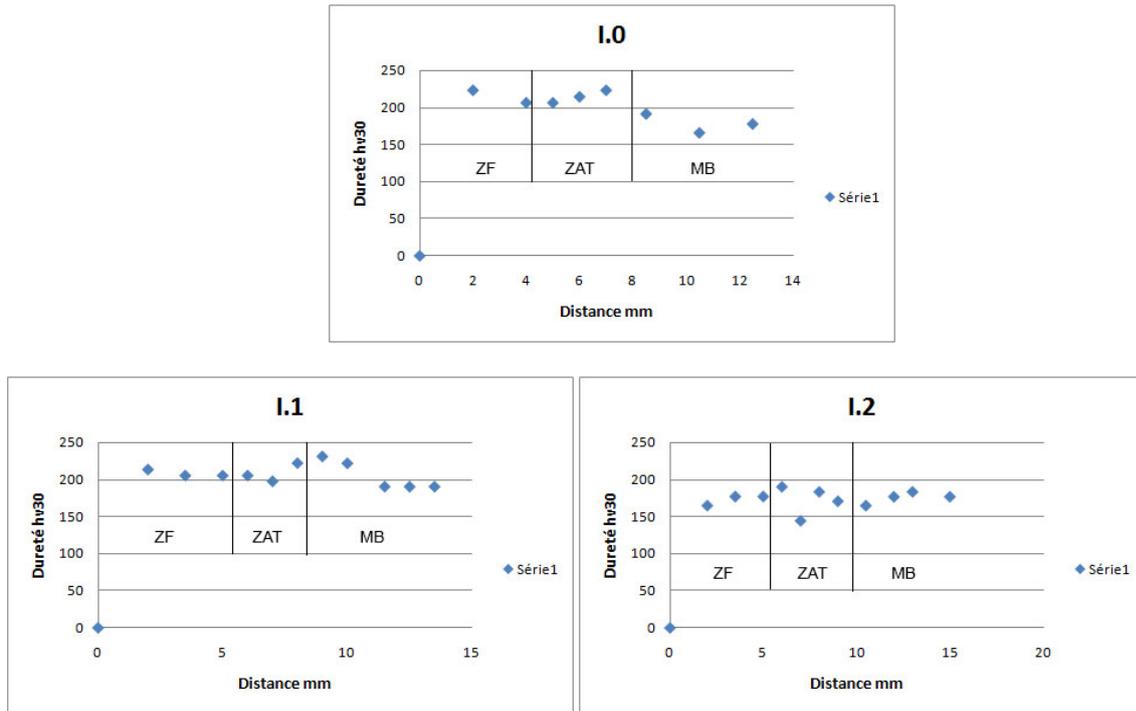


Figure IV.8.b : Profil de dureté VICKERS HV30 (mul -passe)

Tableau IV.8 : Dureté moyenne Hv30 (multi-passe)

N essai	ZF Hv30	ZAT Hv30	MB Hv30
I.0	213	201	177
I.1	207	225	188
I.2	177	173	178

L'examen de variation de la dureté dans les deux cas (multi-passe et mono-passe) n'étant pas notable exceptée une légère différence au niveau de la ZAT, c.à. d, les valeurs de la dureté Hv30 (multi-passe) sont légèrement supérieures à celles dans le soudage (mono-passe). Ceci pourrait être expliqué par l'effet favorable de transfert d'éléments d'addition et des changements structuraux s'y trouvant (taux de martensite élevé devant la bainite dans la ZF). On constate, paradoxalement, que la dureté de la ZAT (multi-passe) est plus élevée que celle du (mono-passe). Ce fait serait expliqué seulement que par le changement structural favorable résultant du cycle thermique répété. En somme, toutes les soudures réalisées sont pas sujettes au phénomène de fissuration à froid du fait que les duretés mesurées HV30 soient toutes inférieures à 350 (critère pour le soudage mono-passe).

IV.2.3.3 : Essai de résilience (multi-passes)

Les résultats obtenus après les essais de résilience sont résumés dans le tableau IV-6 :

Tableau IV.9 : Résultats de l'essai de résilience du soudage (multi-passes)

No d'Essai	Travail moyen en joules (J) ZF /ZAT	Résilience (J/cm2) ZF/ZAT
I.0	39,5/180,6	65,83/301
I.1	170,3/240,3	283,83/400,5
I.2	70,4/245,3	117,41/408,83

Les valeurs de résilience pour les trois essais sont élevées dans toutes les zones de la soudure. Cependant, il est à remarquer que les essais montrent un grand écart de résilience entre la ZAT et la ZF (résilience ZAT>ZF) bien que la dureté de la ZF soit meilleure. Cet état de fait pourrait s'expliquer éventuellement par la présence de défauts.

IV.2.4. Comparaison de résistance des soudures SAW et SMAW (multi-passe)

Tableau IV.10 : Résumé des propriétés des soudures SAW et SMAW (multi-passe)

	Resistance a la traction Rm (Mpa)	Resistance a la rupture Rr (Mpa)	Allongement A (%)
0.0 Soudure(SAW)	580	417	26
I.0 Soudure (SMAW)	590	328	9,9
I.1 Soudure (SMAW)	613	315	14,2
I.2 Soudure (SMAW)	592	419	15,4

La confrontation des résultats mécaniques des soudures réalisées par les deux procédés SAW et SMAW, nous permet de constater que la Rm est toujours supérieure à celle du métal de base. En outre, il est à noter que l'énergie adoptée dans l'essai 1.0 (SMAW) donne une Rm presque comparable à celle de l'essai 0.0. Pour ces deux essais, la rupture se situe à l'extérieur du joint comme l'exige la norme. En revanche, les essais 1.1 et 1.2 ne remplissent pas cette condition. Quant à l'allongement A(%), les valeurs ont chuté sensiblement pour le procédé SMAW. Cet état de fait peut être attribué aux défauts constatés dans la soudure.

IV.3. Analyse métallographique

IV.3.1 Métal de base

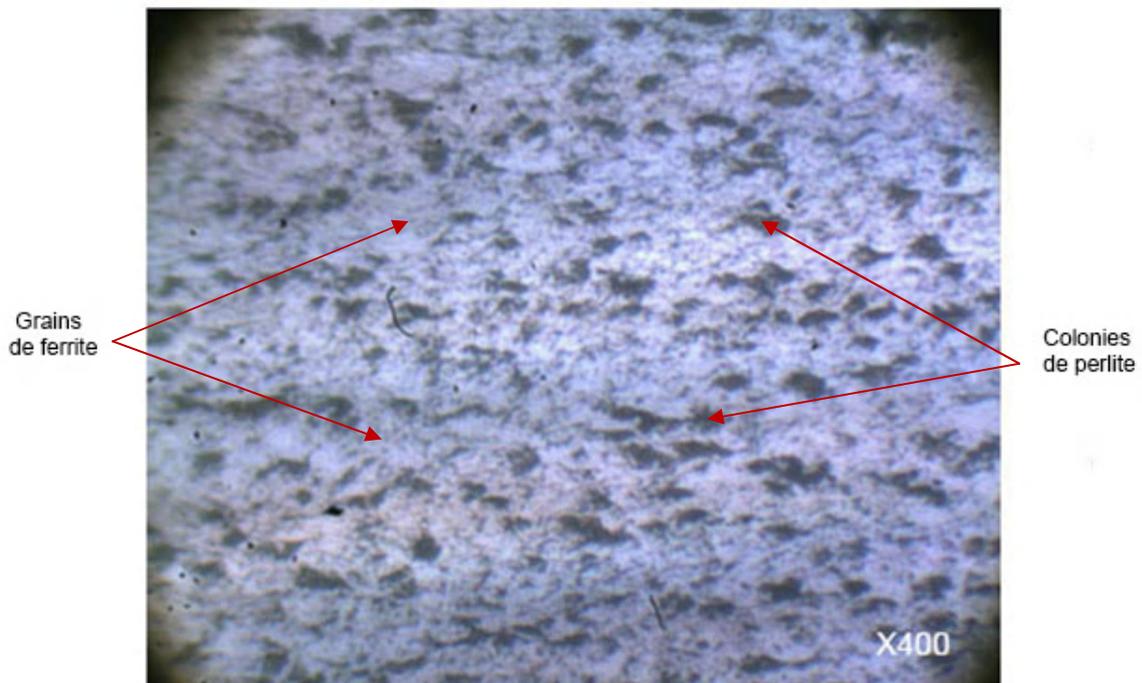


Figure IV.9 : Métal de base X52

La microstructure (Figure IV.9) est ferrito-perlitique avec prédominance de la ferrite devant la perlite. A constater aussi que la taille des grains de ferrite est assez homogène et les colonies de perlite montrent une tendance à s'aligner dans le sens du laminage des tôles.

IV.3 .2. Soudure (SAW)

Energie de soudage : 12000 J/cm

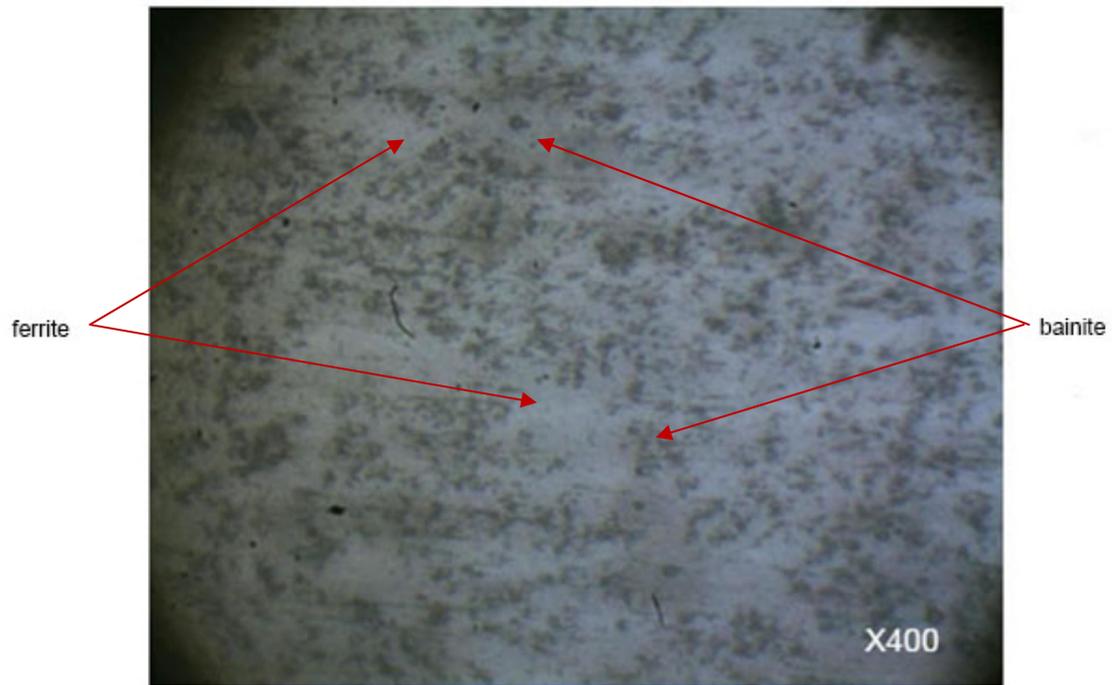


Figure IV.10 : TUBE (SAW) ZF

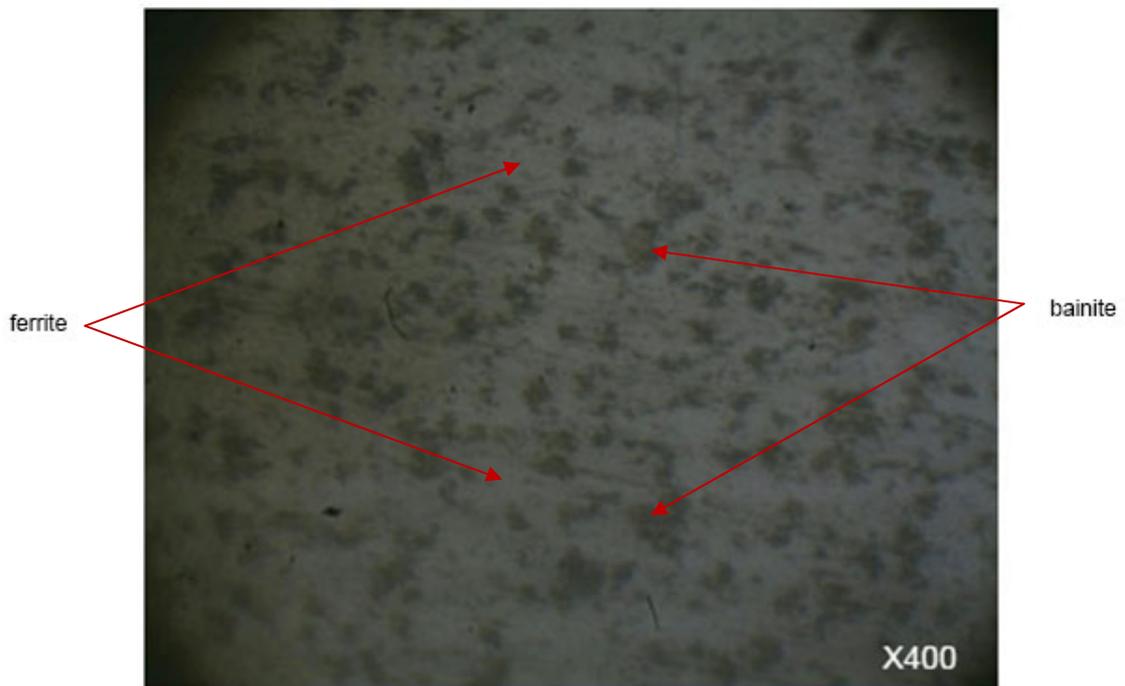


Figure IV.11 : Tube (SAW) zone à gros grains (ZAT)

Le taux de bainite dans la ZF est beaucoup supérieur par rapport à la ZAT, ce qui explique que la dureté ZF > dureté ZAT.

IV.3.3. Soudure SMAW (Mono-passe) :

Energie de soudage : $E_0 = 15552 \text{ J/cm}^2$, intensité : $I_0 = 135 \text{ A}$

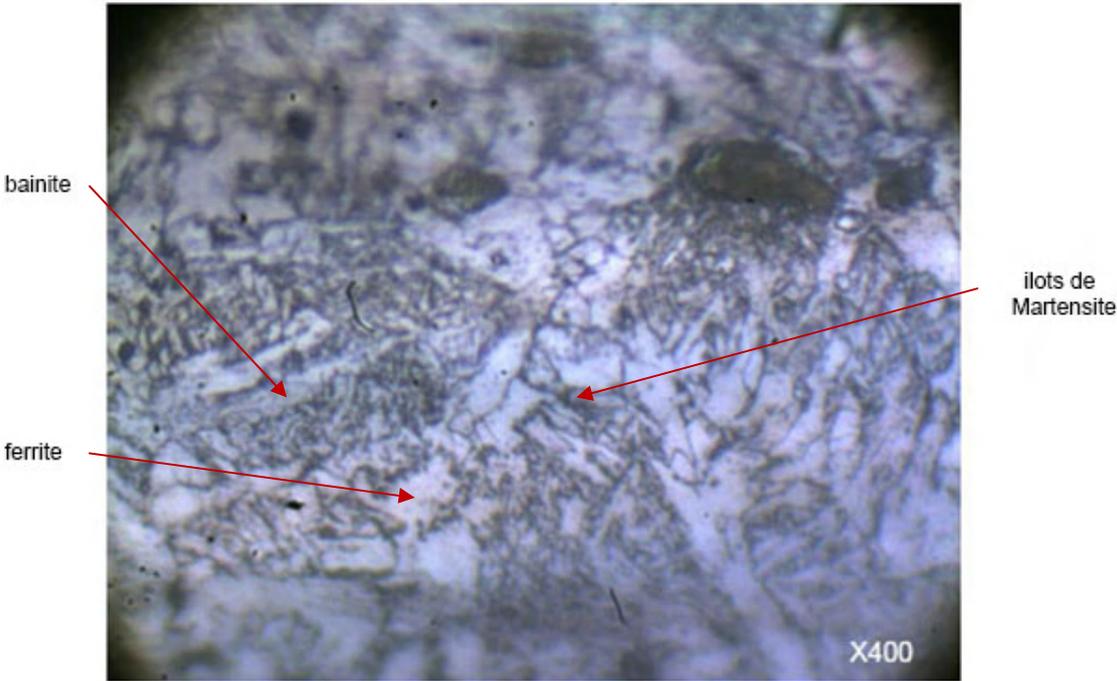


Figure IV.12 : I.O.1 ZF

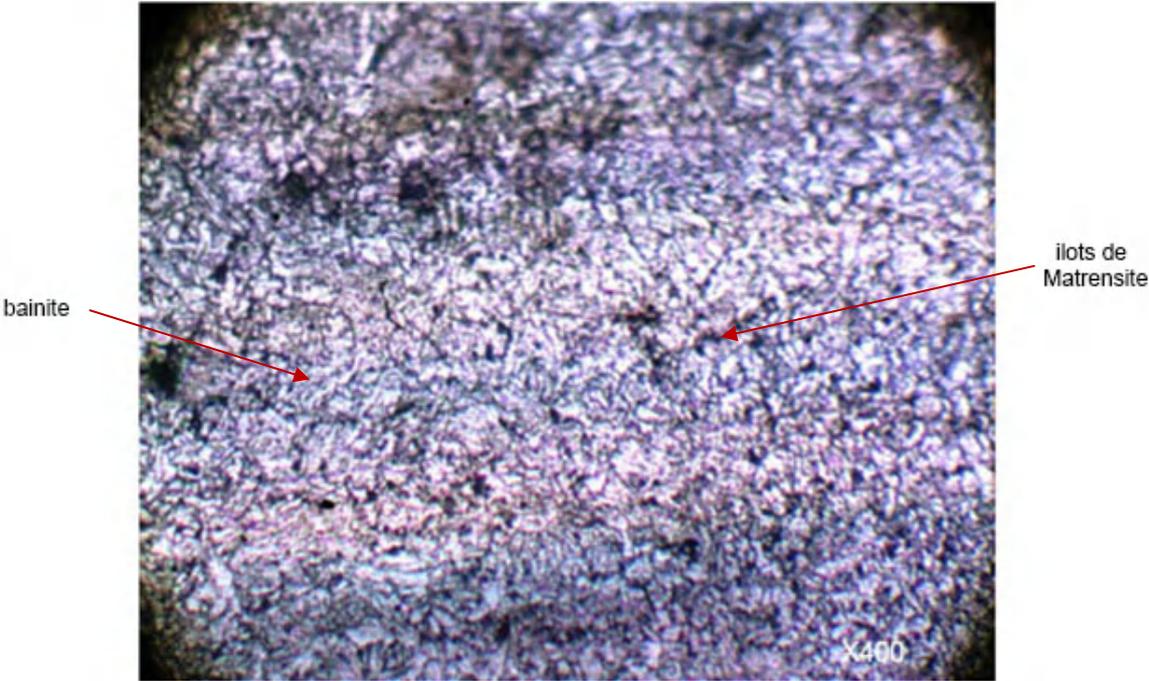


Figure IV.13 : I.O.1 Zone à gros grains (ZAT)

Energie de soudage : $E_1 = 11520 \text{ J/cm}^2$, intensité : $I_1 = 100 \text{ A}$



Figure IV.14 : I.1.1 ZF

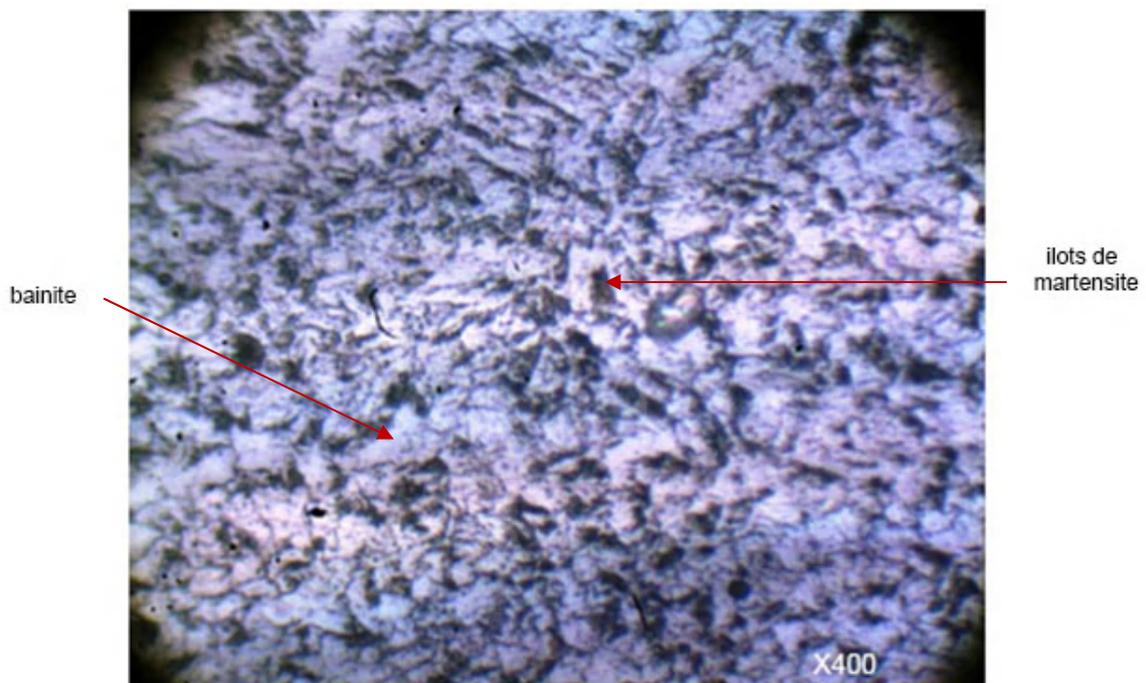


Figure IV.15 : I.1.1 Zone à gros grains

Energie de soudage : $E_2 = 18532 \text{ J/cm}^2$, intensité : $I_2 = 160 \text{ A}$

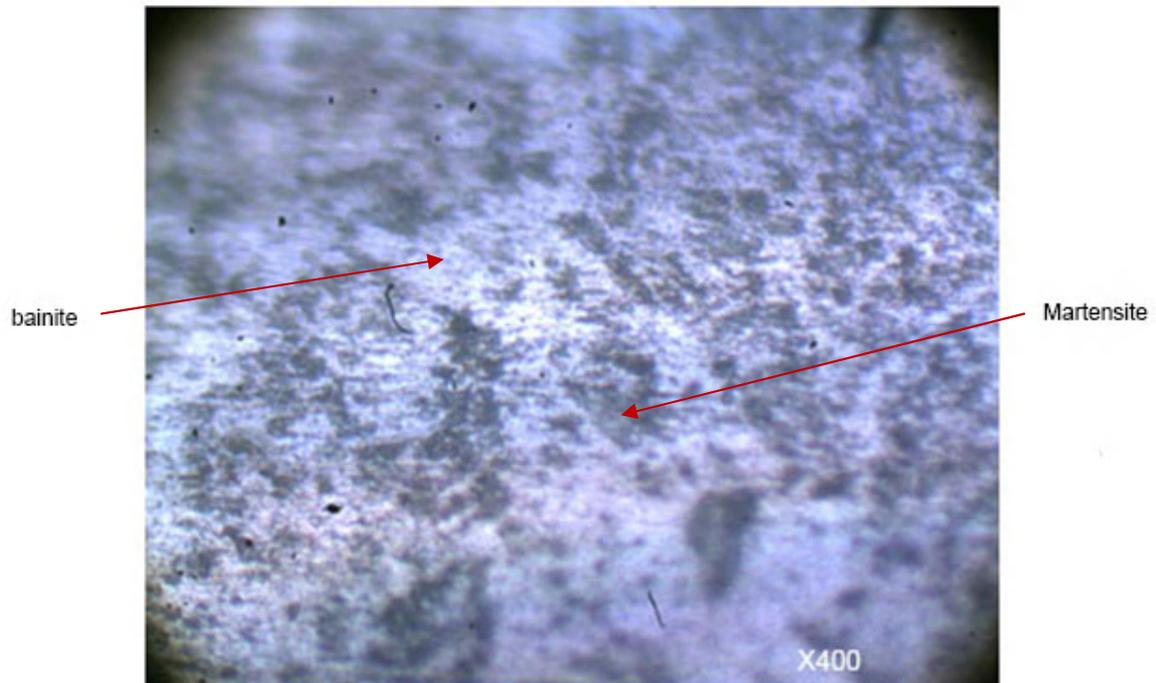


Figure IV.16 : I.2.1 ZF

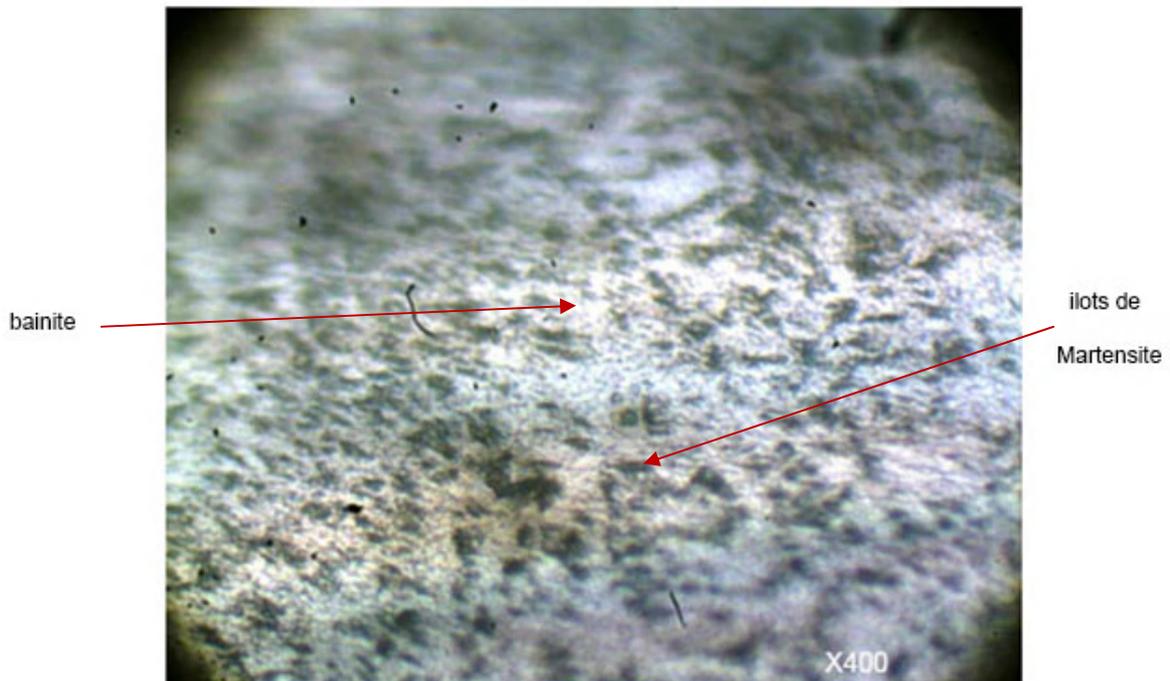


Figure IV.17 : I.2.1 Zone à gros grains (ZAT)

Les plages de martensite pour (I.1.1) sont plus indiquées dans la ZF que dans la ZAT ce qui explique la diminution de la dureté de ZAT par rapport a la zone fondue, pour (I.2.1). On constate aussi que le taux de martensite est plus élevé comparativement aux deux autres échantillons, ce qui explique l'augmentation appréciable de la dureté.

IV.3.4. Soudure SMAW (Multi-passe) :

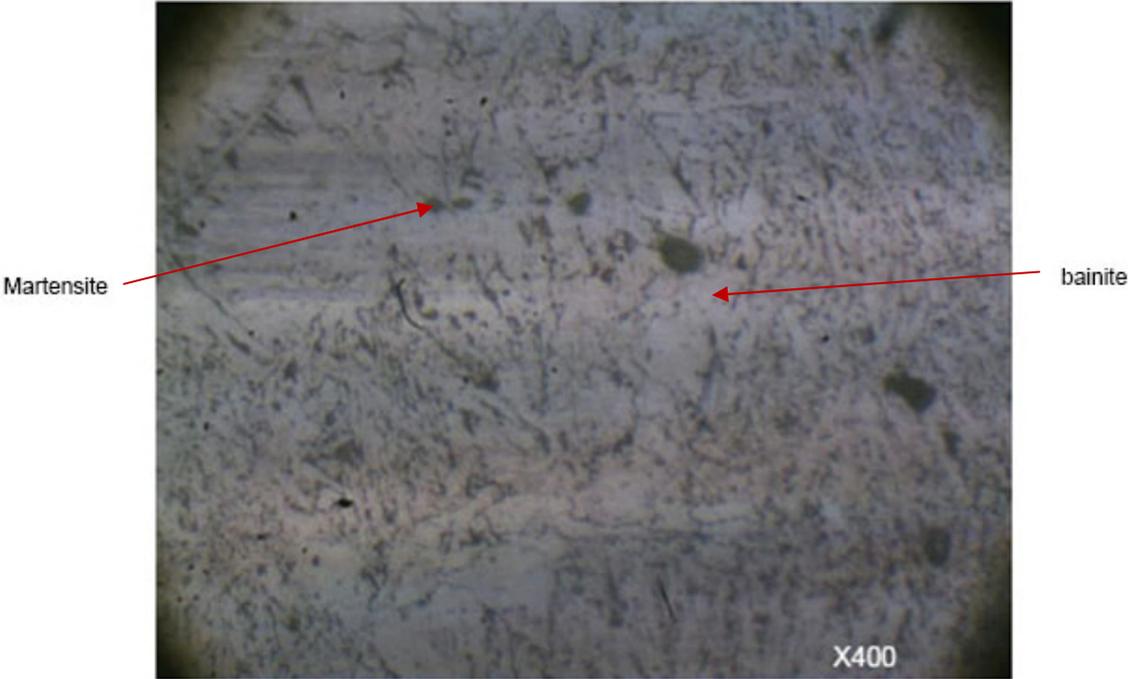


Figure IV.18 : I.O ZF

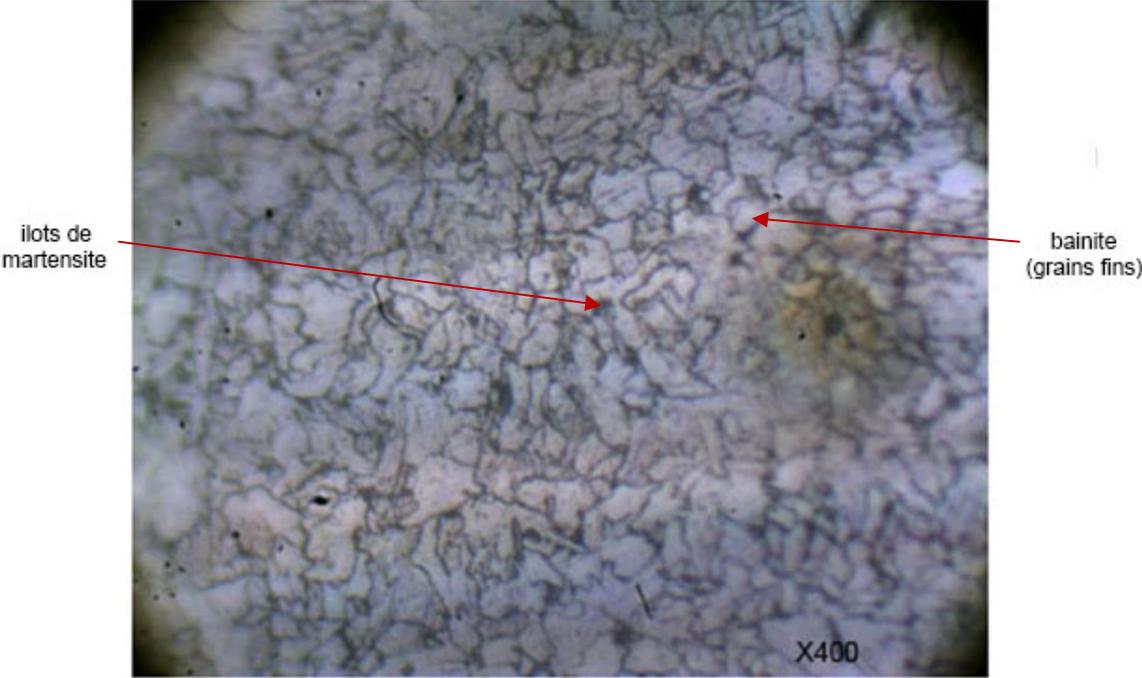


Figure IV.19 : I.O Zone à gros grains (ZAT)

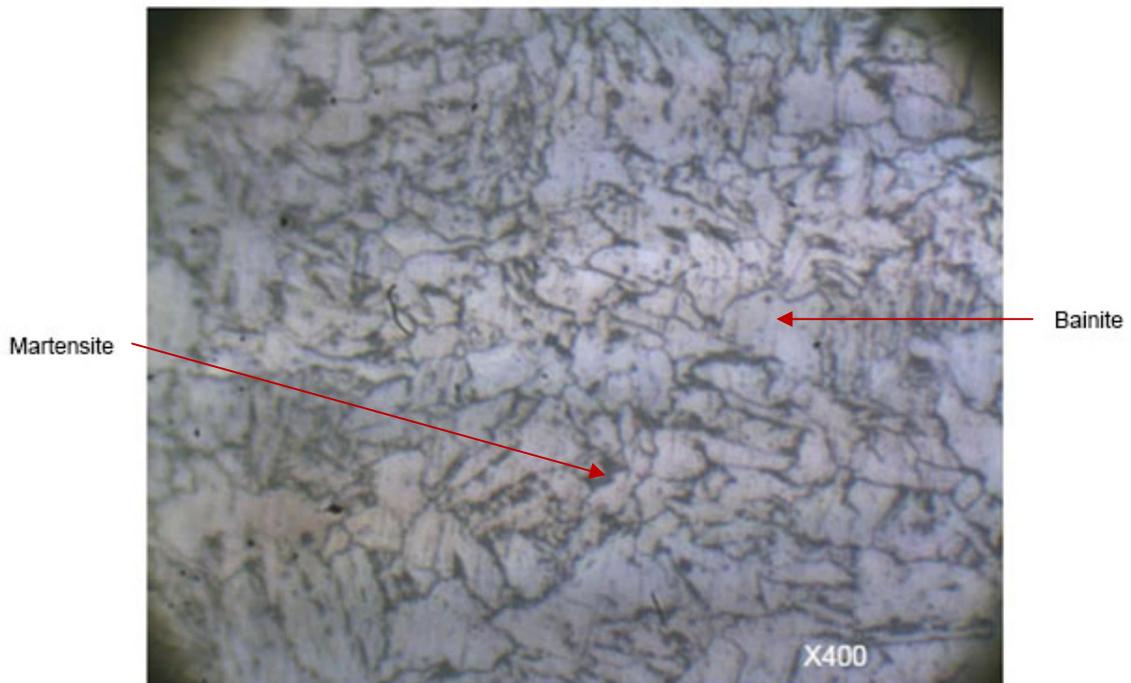


Figure IV.20 : I.1 ZF

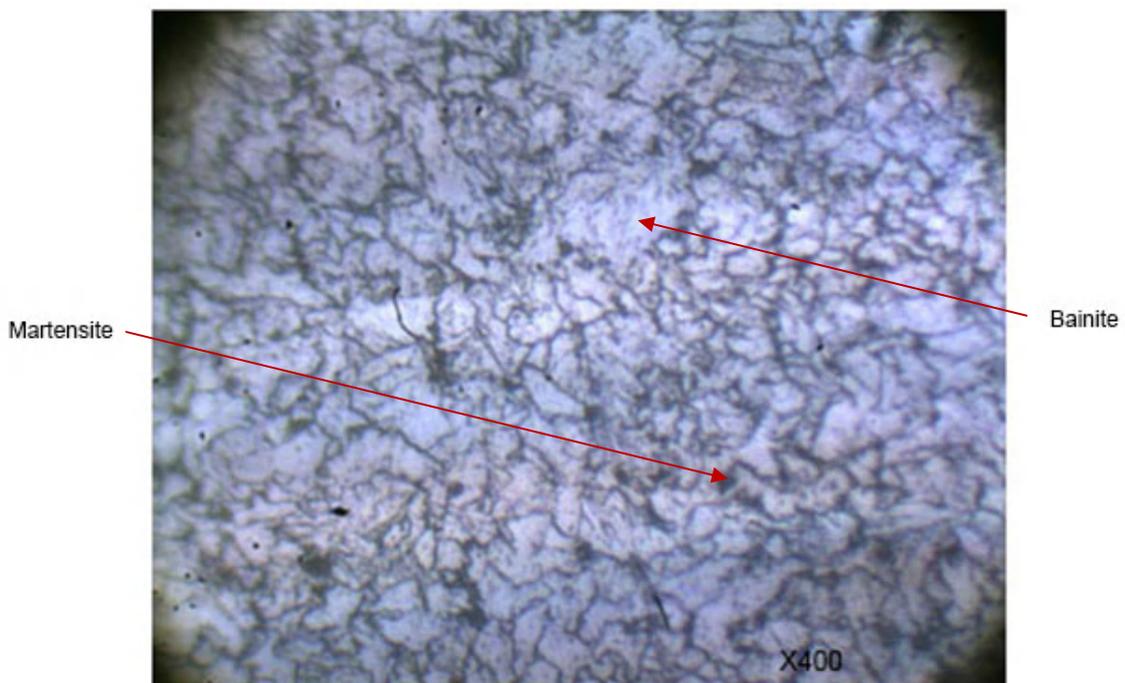


Figure IV.21 : I.1 Zones à gros grains (ZAT)

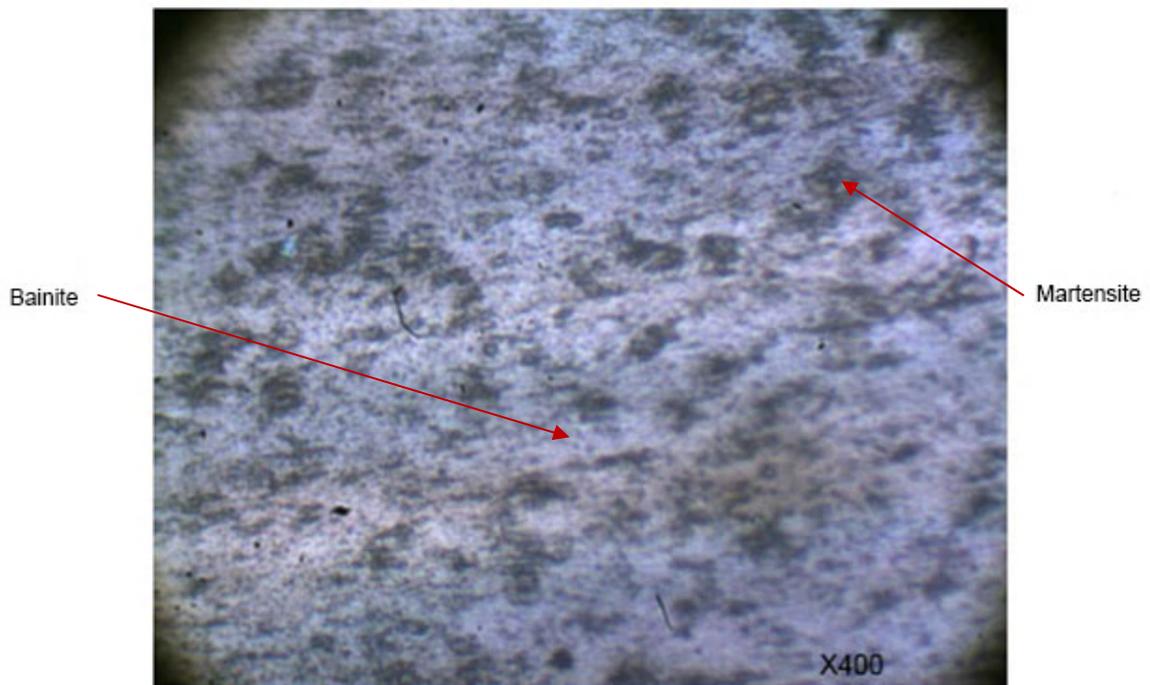


Figure IV.22 : I.2 ZF

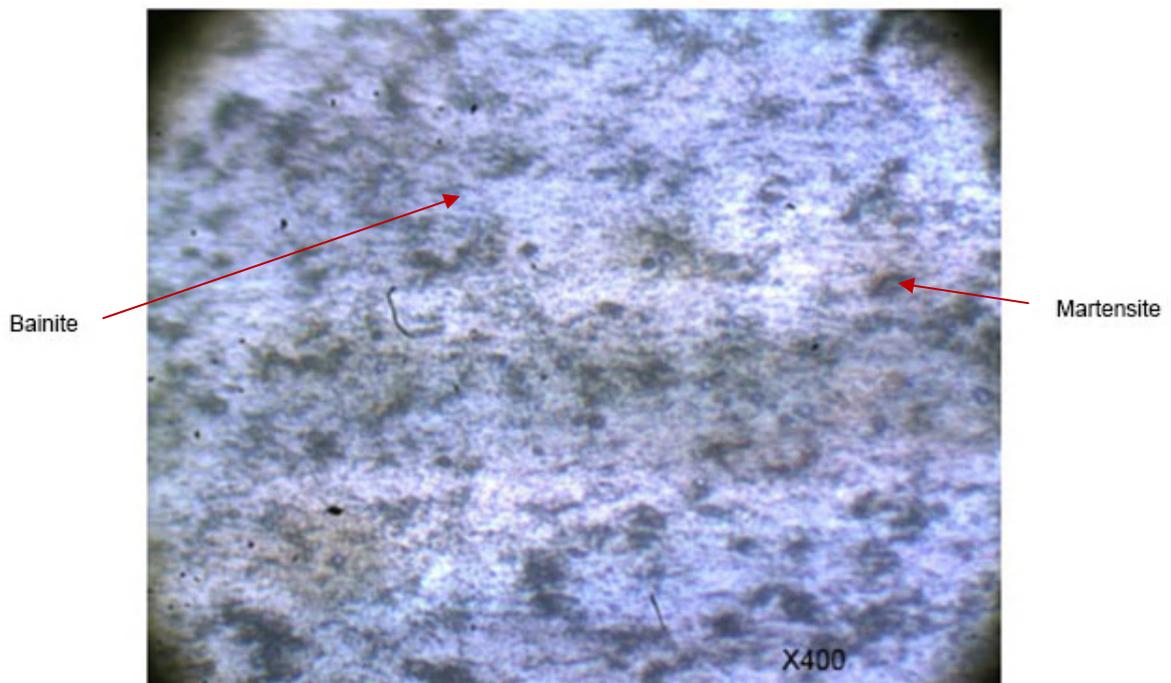


Figure IV.23 : I.2 Zone à gros grains (ZAT)

Pour (I.0) on constate qu'il ya une prédominance de la bainite (grains fins) avec quelques ilots de martensite, contrairement a (I.0). L'échantillon (I.1) montre un taux d'ilots élevé de Martensite, ce qui confère a la ZAT une élévation de la dureté.

Pour (I.2) on constate une légère augmentation de la martensite devant la bainite. Ce fait s'est traduit par une élévation de la dureté dans la zone fondue et la ZAT comparativement aux essais (I.0, I.1).

IV.4. Radiographie : Soudage multi-passe

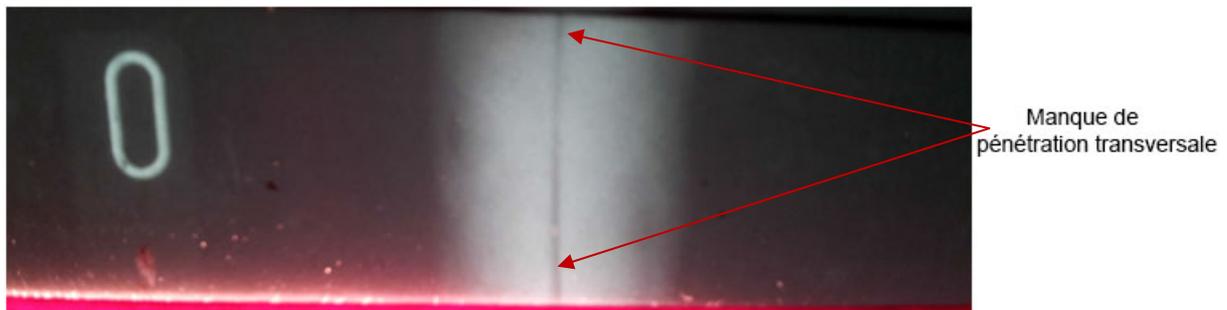


Figure IV.24 : Film radiographique de l'échantillon (I.0)

L'image radiographique révèle une longue bande de densité plus sombre ou on remarque que les arêtes dans le centre de la largeur du cordon de soudure ne sont pas fusionnées. C'est un défaut de manque de pénétration transversale.

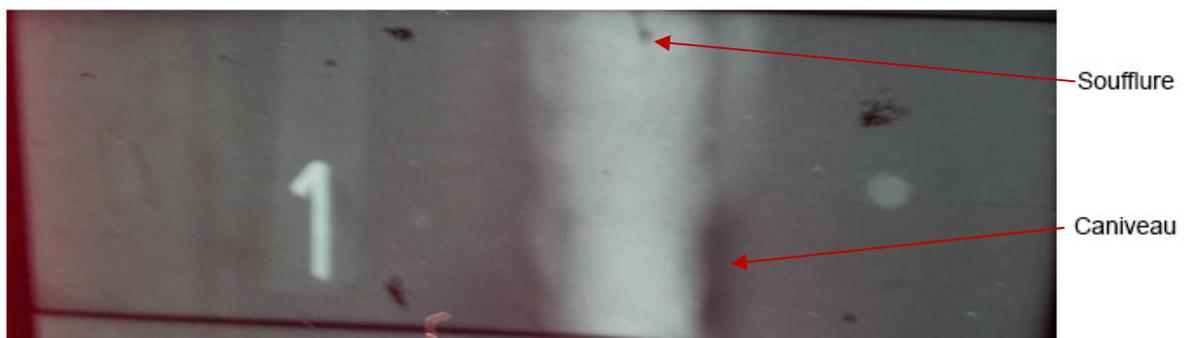


Figure IV.24 : Film radiographique de l'échantillon (I.1)

L'image radiographique révèle également une zone irrégulière de densité plus sombre (caniveau). Un deuxième défaut est de type (soufflure) caractérisant le point sphérique de densité plus ombrée.

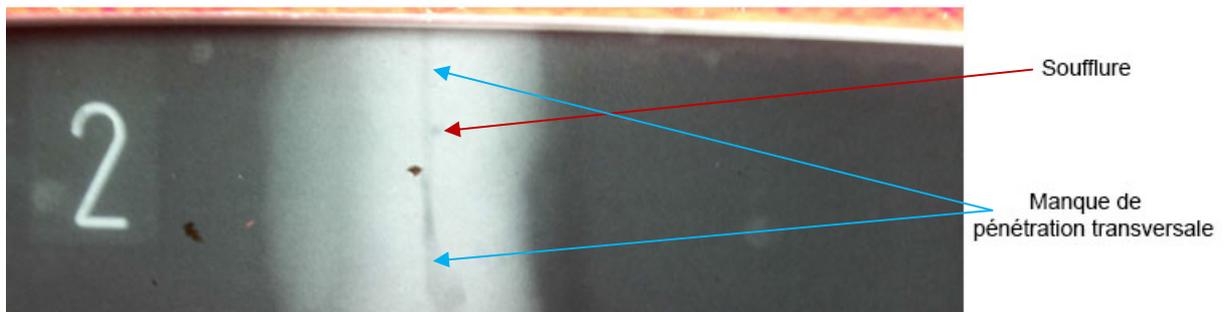


Figure IV.24 : Film radiographique de l'échantillon (I.2)

L'image radiographique révèle deux défauts : soufflure et manque de pénétration transversale, décrits précédemment.

A travers l'étude de ces radios, on constate que les soudures réalisées comportent des défauts se qui justifie leur faible tenue mécanique notamment la résilience.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'acquérir de bonnes connaissances sur les deux procédés utilisés par l'usine ANABIB et déduire la qualité et le risque de fissuration de chaque procédé.

Pour l'essai de traction on a déduit que la résistance à la traction des pièces réalisées avec le procédé SMAW est meilleure que celles de SAW, dont le taux d'allongement de ces pièces soudées par SMAW est inférieur à celui des pièces réalisées par le SAW. Ceci s'explique par le taux élevé des défauts et de la martensite d'où le risque de fissuration.

Suivant les essais de la dureté et de la résilience, on a constaté que les résultats obtenus par le procédé SAW sont plus adéquats que ceux obtenus par le SMAW où le rendement du premier est plus intéressant. Donc le SAW est un procédé de soudage à haut rendement et permet de mettre en œuvre un à trois fils-électrodes continus consommables. Il présente les avantages suivants :

- Taux de dépôt élevé,
- Pénétration profonde, permettant de déduire la quantité de matériau d'apport,
- Haute qualité de la soudure
- Environnement de travail amélioré par rapport à l'autre procédé de soudage (SMAW).

-Les principaux défauts du procédé SMAW sont les inclusions de laitiers et le manque de pénétration. Les inclusions de laitier viennent à l'utilisation d'électrode enrobées qui favorise l'apparition, sur le joint, d'une couche de laitier qui doit être éliminée à la fin du soudage au moyen d'un marteau à piquer ou d'une brosse métallique. Le manque de pénétration est fréquent avec électrode surtout si la forme du joint n'est pas régulière.

-Il s'est avéré que la technologie du soudage adoptée en chaîne est plus efficace, notamment le faible taux de défauts et les niveaux élevés de résilience. Toutefois, un ajustement de la composition du fil d'apport à celle de X52M s'impose. Aussi une adaptation appropriée d'une énergie de soudage correspondant à l'essai « I.0 » est à recommander.

La qualité et la productivité du soudage à l'arc dépendent de nombreux paramètres. Il faut donc, pour comprendre et optimiser le procédé de soudage, bien connaître la physique des procédés telle que l'énergie de soudage qui est un facteur de base pour déterminer la qualité et le choix de procédé.

On préconise de reprendre ce travail en choisissant une variation plus large de l'énergie avec de nouveaux métaux d'apports et ce, pour cerner des plages optimales de travail.