République Algérienne Démocratique
ET Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Ecole Nationale supérieure Polytechnique
Département de Métallurgie

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème:

Réparation par soudage des aciers faiblement alliés au Cr-Mo

Dirigé par : Mr M. Bouabdallah
Mr Y. Yahmi
Réalisé par: Mr A. Yahia Ammar

Promotion 2008/2009

ENSP; 10 Avenue Hassen Badi – El Harrach, Alger

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail qui marque fa fin d'une période très enrichissante à la mémoire de mon grand père, **que Dieu tout puissant** lui accorde sa sainte **miséricorde et l'accueil** dans son vaste paradis.

Je le dédie à mes très chers parents, qui m'ont tout donné, et qui m'ont toujours soutenu et poussée à aller toujours plus loin, pour tout cela je leur témoigne toute ma gratitude.

Je n'oublie pas aussi mes **frères Mohammed et Islem, et ma sœur** adorée Amel, leur présence me motive et m'apporte joie et rigolade et à toute la famille.

mes amis Meriem, **Othmene**,hania, Rooney, djalel, Latif mouloudia,Soufiane, Samado, brahim...

A toutes ces personnes je tiens à témoigner ma reconnaissance et mon affection

Abram.

Dédicaces

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu le Tout Puissant de m'avoir créé et donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail ainsi qu'à mes Parents qui me sont les plus chers au monde.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur M. M. BOUABDALLAH et mon Co-promoteur M. Y.YAHMI pour leurs conseils, qui m'ont été précieux, ainsi que pour toutes les suggestions et remarques qu'ils ont formulées tout au long de ce travail.

à tous les membres de centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle non destructif à CHERAGA

Que Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie par anticipation, monsieur le président de jury M.E. SALHI ainsi que tous les membres du jury à savoir, Mme KECHOUD et M. DELLALI d'avoir bien voulu siéger dans mon juré.

Je souhaiterai également remercier tous mes enseignants du département de métallurgie de l'ENP, pour avoir participé à ma formation.

Mes remerciements s'adressent également à mes amis en particulier:

O. YETTOU et M.SENNED

Cette liste de remerciements n'est pas exhaustive, que tous ceux avec lesquels j'ai interagi lors de ce travail, sans toutefois les citer ci-dessus, sachent que leur contribution à la réalisation de ce mémoire a été grandement appréciée.

Akram.

Remerciement

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة إصلاح اللحام المنخفضة أشابة صلب الكروم والموليبدينوم لنقل سوائل في درجات الحرارة والضغط العال. وتعتمد هذه الدراسة على الخصائص الهيكلية والميكانيكية من الصلب والكروم أشابة منخفضة بعد المعالجة حراريا ويلحم .

الكلمات الرئيسية : الكربون الصلب ، والصلب للحام ريال برازيلي - مو اللحام.

Résumé

Le principale objectif de ce travaille est l'étude de réparation par soudage des aciers faiblement allié au chrome molybdène destiné au transport des fluides à des températures et pressions élevées. Cette étude est basée sur la caractérisation structurale et mécanique d'un acier au chrome molybdène faiblement allié après l'avoir soudé et traité thermiquement.

Mots clé: acier au Carbonne, soudabilité des acier au Cr-Mo, soudage

Abstract

The main objective of this work is the study of repair welding of low alloy steel chrome molybdenum for the transport of fluids at high temperatures and pressures. This study is based on the structural and mechanical characterization of a chromium molybdenum steel low alloy after welded and heat treated.

Keywords: carbon steel, steel weld ability of Cr-Mo, welding

Liste des figures

Partie bibliographique

Figure I.1: diagramme métastable Fe-C…….....4

Figure I.2: structures d'un Acier hypoeutectoid..... 5

Figure I.3: structure d'un acier hypereutectoide..... 6

Figure I.4: structure d'un Acier austénitique..... 6

Figure I.5: La cémentite.....7

Figure I.6: structure perlitique……..……7

Figure I.7 : structure ferritique……..……....8

Figure I-8: Structure martensitique……9

Figure II.1: Les principaux procédés de soudage en fonction de la source d'énergie**…**…...…..17

Figure II.2: Principe de la soudure "TIG……...…….....18

Figure II.3 : Augmentation de la résistance à la rupture du fer par effet de solution solide de divers éléments……..22

Figure II.4: Diagrammes de transformation en refroidissement continu……...…….....23

Figure II.5: Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion……...24

Figure II.6: Couplages entre les phénomènes thermique, métallurgique et mécanique induits lors d'une opération de soudage……..28

Figure II.7 : Cycle thermique de soudage et transformations structurales**……...**30

Figure II.8: les différentes régions de la zone affectée par la chaleur et les différentes microstructures obtenues au voisinage de la zone fondue**……**31

Figure II.9: Diagramme TRC spécialement élaboré pour le soudage …**……**32

Figure III.1: l'ordre de grandeur de la réduction de la limite d'élasticité et de l'augmentation de la température en fonction valeurs du paramètre H.……37

Figure IV.1: la rupture d'une éprouvette soudée lors d'un essai de traction……43

Figure IV.2 Principe de l'essai de pliage……43

Figure IV.3: déformation d'une éprouvette soudée lors d'un essai de pliage……...45

Figure IV.4: Dimensions de l'empreinte et formule de calcule de la dureté selon Vickers…....46

Figure IV.5: Schéma du balayage pour la mesure de la dureté sur le long d'un échantillon…..47

Partie expérimentale

Figure V.1: Schéma de prélèvement des éprouvettes pour caractérisation des joints soudés...56

Figure V.2 : microscope optique……..……....56

Figure V.3 : Polisseuse……...…….....57

Figure V.4 : Schéma de l'attaque électrolytique..……..…….…58

Figure V.5 : micro-duromètre SHIMATZU HMV-M3……...59

Figure VI.1 : TN(G) métal de base……...…….……...61

Figure VI. 2 : TN(G) zone de transition à l'interface MB / ZAT……..……...…61

Figure VI. 3 : TN(G) Zone affectée thermiquement……...……...…..62

Figure VI. 4 : Zone de fusion à structure aciculaire……...……...…...……...63

Figure VI. 5 : TC(S+G) métal de base…….……...……63

Figure VI. 6 : TC (S+G) zone de transition à l'interface MB / ZAT……...……...….64

Figure VI. 7 : TC (S+G) zone de fusion……..……...……...……..64

Figure VI. 8 : TC (S+G) zone de fusion la 2eme passe……...…....64

Figure VI.9 : Profil de la Micro-dureté de TN(G)……....66

Figure VI-10 : Profil de la Micro-dureté de la première passe TC(S+G)…...…….67

Figure VI-11 : Profil de la Micro-dureté de la deuxième passe TC(S+G)……...……....67

Figure VI-12 : Profil de la Micro-dureté de la première passe TC(S)……..…68

Figure VI-13 : Profil de la Micro-dureté de la deuxième passe TC(S)**……...…….**…69

Liste des tableaux

Partie bibliographique:

Tableau I.1: Teneurs limites ……10

Partie expérimentale

Tableau V.1: Composition chimique du métal de base (tube1)…… 51

Tableau V.2: Composition chimique du métal de base(tube2)…… 51

Tableau V.3 : Propriétés mécaniques du métal de base……51

Tableau V.4: Composition chimique du métal d'apport ……52

Tableau V.5: Propriétés mécaniques du métal d'apport……53

Tableau V.6: Composition chimique du métal d'apport ……53

Tableau V.7: Propriétés mécaniques du métal d'apport……53

Tableau V.8 : Désignation des éprouvettes soudées……54

Tableau VI.1 : valeurs de la micro-dureté TN(G)……66

Tableau VI.2 : valeurs de la micro-dureté de la première passe TC(S+G)……66

Tableau VI.3 : valeurs de la micro-dureté de la deuxième passe TC(S+G)……67

Tableau VI.4: valeurs de la micro-dureté de première la passe TC(S)……68

Tableau VI.4: valeurs de la micro-dureté de la deuxième passe TC(S)……69

Sommaire

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction général……1

Chapitre I: Généralité sur les aciers……2

1. introduction……3

2.Le diagramme Fe-C……3

2.1.Généralité……3

2.2.Les formes allotropiques du fer ……5

2.3.Transformations de phases ……5

3.Structure métallographiques des Aciers ……5

3.1.Acier hypoeutectoïde……5

3.2.Acier eutectoïde……6

3.3.Acier hypereutectoïde ……6

3.4.Austénite……6

3.5.Cémentite ou Carbure de Fer (Fe3C)……7

3.6.perlite……7

3.7.Ferrite……8

3.8.Martensite ……9

3.9.Bainite……9

4.Les différents Aciers……10

4.1.Aciers non alliés……10

4.1.1.Aciers de construction métallique……10

4.1.2.Aciers non alliés à outils pour travail à froid ……11

4.1.3.Aciers non alliés de construction mécanique……11

4.2.Aciers alliés……11

4.2.1.Aciers alliés pour appareils à pression ……11

4.2.2 Aciers de construction mécanique……12

4.2.3. Aciers inoxydables …… 12

4.2.4.Aciers à outils alliés ……12

5.Influence des éléments d'adition sur la propriété et la structure des aciers……13

5.1. Le chrome……13

5.2. Le molybdène……13

Chapitre II: soudage……14

1.Description d'une opération de soudage……15

2 .Classification des procèdes de soudage……16

2.1.Procédé de soudage GTAW (gas tungsten arc welding)……17

2.1.1.principe……17

2.1.2.Applications……19

2.2.Procédé de soudage SMAW (Soudage manuel à l'arc électrique avec électrodeenrobée)……19
2.2.1.principe……19
2.2.2.le rôle de l'enrobage de l'électrode……20
2.2.3.Applications……21
3. Métallurgie de soudage……22
3.1.Rappels de Métallurgie……22
3.2.Caractéristiques de la soudure……23
3.3. Paramètre de refroidissement en ZAT……25
3.4. Conséquences du procédé de soudage……26
3.4.1. Conséquences thermiques du soudage……26
3.4.2.Conséquences métallurgiques du soudage……27
3.4.3.Conséquences mécaniques du soudage……27
3.4.4.Couplage thermique, métallurgique et mécanique……27
3.5.Les différentes transformations de phases lors du soudage des aciers au Carbonne……29
3.5.1.Transformations au cours du soudage ……30
3.5.2.Transformations lors du chauffage ……31
3.5.3.Transformations lors du refroidissement……32

Chapitre III: traitement thermique des soudures……34
1.introduction……35
2. Le traitement de relaxation (détente) et/ou revenu……35
2.1.Effet métallurgique du traitement……36
2.2.Traitement avant ou après refroidissement……37
3.Traitement comportant une austénisation……38
3.1.recuit-normalisation……38
3.2.Traitement intercritique……39

Chapitre IV: Caractérisations mécaniques……41
1.Essai de traction……42
1.1.Principe de l'essai de traction……42
2.1.Application de l'essai de traction sur une éprouvette soudée……42
2.Essai de pliage……43
2.1.Principe de l'essai de pliage……43
2.2.Application de l'essai de pliage sur une éprouvette soudée……44
3.Essai de micro-dureté……45
3.1.Principe de l'essai de micro-dureté ……45
3.2.Essai de micro-dureté Vickers ……46

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre V: matériau et méthodes expérimentales.....48

1.Caractérisation du métal de base.....49

1.1.Analyse chimique du métal de base.....49

1.2.Propriétés mécaniques du métal de base.....50

2.Critère de choix du métal d'apport.....51

3. Soudage des tubes 52

3.1.Choix du procédé de soudage.....52

3.2.Déroulement de l'opération de soudage 54

3.3. Elaboration de la fiche technique de soudage.....55

4.Traitement thermique appliqué aux tubes soudés.....55

5.Caractérisation des soudures des tubes.....55

5.1.L'examen métallographique.....56

5.1.1.Technique de la métallographie.....57

5.1.2.Préparation micrographique des échantillons 57

5.1.3.L'attaque chimique 58

5.1.4.L'attaque électrolytique 58

5.1.5.Essai de micro-dureté.....59

Chapitre VI: Exploitation des résultats.....60

1.Présentation et interprétation des résultats métallographiques.....61

1.1.Observation du tube TN(G).....61

1.2. Observation du tube TC(S+G).....63

2.Présentation et interprétation des résultats des essais mécaniques 65

2.1.Essai de micro-dureté.....65

2.1.1.pour le tube TN(G).....65

2.1.2.pour le tube TC (S+G).....66

2.1.3.pour le tube TC(S).....68

conclusion.....70

ANNEXE 1 : fiche technique de soudage du tube TN(G).

ANNEXE 2 : fiche technique de soudage du tube TC(S).

ANNEXE 3 : fiche technique de soudage du tube TC(S+G).

Partie bibliographique

Nombreuses sont les installations industrielles à travers le monde, opérant dans le domaine de l'énergie électrique et du pétrole et ses dérivés, utilisent des tubes qui transportent des fluides à températures élevées et sont soumis à plusieurs types de dégradation de service et de vieillissement, tel que l'adoucissement, la sphéroïdisation, la fragilisation …

Quand des fissures sont détectées dans ces composants, ces derniers sont souvent soumis à des soudures de réparation, puisque, du point de vue technologique et économique, il s'agit d'une solution viable. Toutefois aucune des normes ou des procédures spécifique n'autorise explicitement la réparation en service par soudage ou prédit les performances d'un composants réparé.

Dans ce travaille, on prévoit d'étudier la soudabilité des aciers au Cr-Mo vieillis après un temps de service donné pour cela on a suivi le plan suivant:

- ✓ Etudes bibliographique
- ✓ Soudage des éprouvettes
- ✓ Caractérisations métallurgique et mécanique

Chapitre I:

Généralités sur les aciers

1. introduction

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2%de ce dernier élément. Il peut contenir de petites quantités d'autres éléments incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un *acier allié* . La teneur en carbone de certains de ces aciers alliés peut parfois dépasser 2%**[1]**.

l'acier est un métal ductile; il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé, en outre, par une propriété fondamentale qui est la raison du développement considérable de ses emplois: il "prend la trempe", c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande. Cependant, cette propriété ne se rencontre pas dans certains aciers alliés, qui doivent leur utilisation à d'autres caractéristiques. L'acier peut durcir également sous l'effet d'autres traitements que la trempe, par exemple par écrouissage (travail mécanique à froid) **[2]**.

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo) **[1]**.

2.Le diagramme Fe-C:

2.1Généralité

Les métaux sont rarement utilisés à l'état pur mais le plus souvent sous forme d'alliages. Les états d'équilibre thermodynamique des alliages sont définis par les diagrammes de phases à l'équilibre. Bien que ces états soient rarement atteints dans les matériaux réels, ils correspondent à des états de référence vers lesquels les systèmes ont tendance à évoluer**[2]** .

Le système binaire Fe-C peut subir deux types d'évolution selon que la phase riche en carbone qui se forme est la cémentite (Fe_3C) ou le graphite (Cgr). Si la phase riche en carbone formée est Fe_3C, l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme métastable ou cémentite (figure I.1). Si la phase riche en carbone formée est Cgr, l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme stable ou graphite **[3]**.

Le diagramme fer-C est un outil de base pour le métallurgiste et le métallographe, il permet de connaître:

Les types de transformations qui doivent se produire pendant la solidification et le refroidissement du solide (ou inversement au chauffage)

- ✓ Les températures de début et fin de transformation .
- ✓ La nature des phases en présence.
- ✓ La composition de ces phases à l'équilibre
- ✓ La proportion des phases présentes à une température donnée (règle des segments inverses)

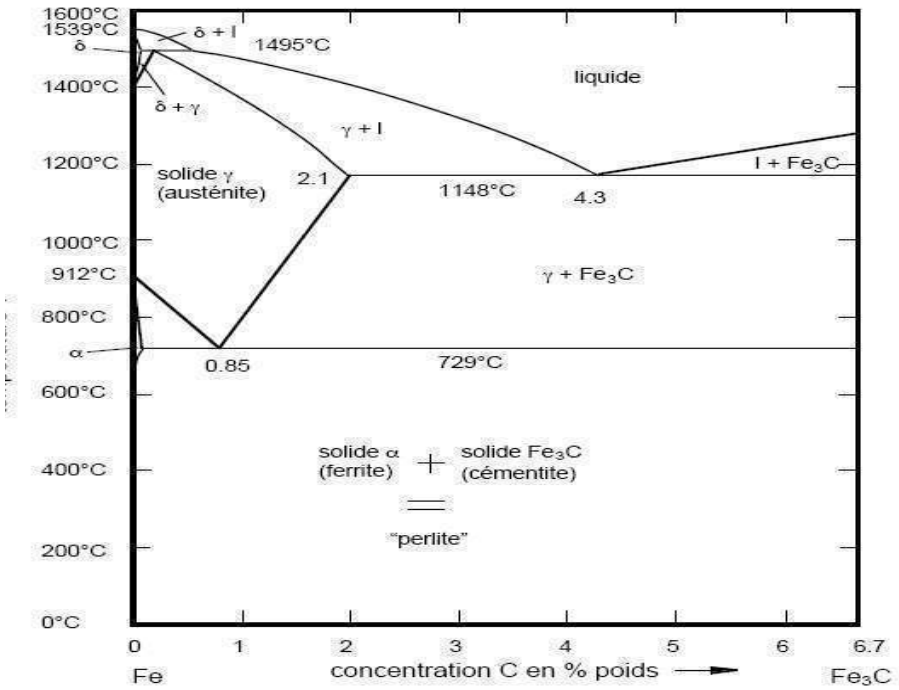


Figure I.1: diagramme métastable Fe-C **[4]**

2.2.Les formes allotropiques du fer

Le fer α : De la température ambiante à 912°C, la structure cristalline du fer pur est cubique centrée (CC) structure n'est pas compact dans cet état, les atomes de fer occupent les sommets et le centre d'un cube dont le paramètre, à 20 °C, mesure 2,866A°, et 2,903A° 912 °C. Le fer γ : Entre 912 °C et 1 394 °C, la structure cristalline du fer pur est cubique à face centrée(CFC). Dans cet état, les atomes de fer occupent les sommets et les centres des faces d'un cube dont l'arête mesure 3,647A° à 912 °C et 3,678A° à 1 394 °C.

Le Fer δ : structure cubique centrée (CC), stable de 1400°C à 1540°C**[5]**.

2.3Transformations de phases:

a ⟶ γ (912°C.(

L+δ ⟶ γ (1497°C, avec C=0.17%) transformation péritictique.

γ ⟶ α+Fe3C (723°C, avec C=0.8%) transformation eutectoïde.

L ⟶ γ +fe3C (1147°C, avec C=4.3%) transformation eutectique.

L ⟶ Fe3C.

3.Structure métallographiques des Aciers

3.1.Acier hypoeutectoïde:

%C compris entre 0,2 % et 0,85 % : l'acier est du type hypoeutectoide formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique. (voir figure I.2) **[6]**.

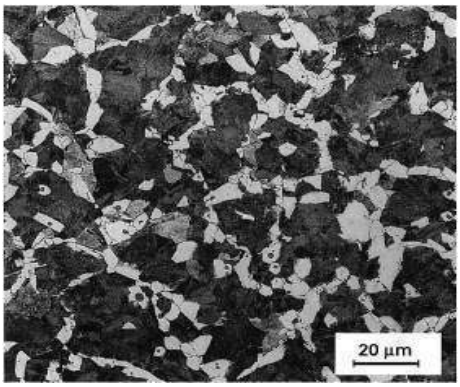


Figure I.2: structures d'un Acier hypoeutectoide**[6]**.

3.2.Acier eutectoïde:

C'est un acier dont la teneur en carbone est égale à 0.85%, constitué de perlite

3.3.Acier hypereutectoïde:

C'est un acier dans la teneur en carbone est supérieure à 0.8%, constitué de cémentite et de perlite.
(figure I.3) **[6]**.

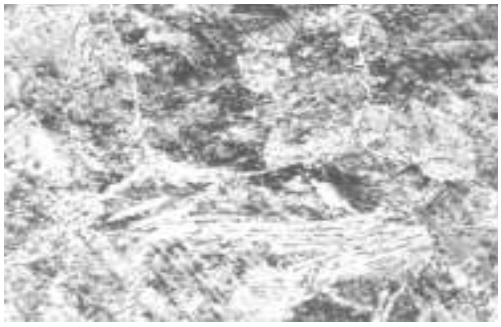


Figure I.3: structure d'un acier hypereutectoide**[6]**.

3.4.Austénite C'est une solution solide de carbone dans le fer gamma, la quantité de carbone atteint 2.1 % à 1145 ° C. cette phase n'existe pas à la température ordinaire, elle est stable qu'à haute température, elle ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliage tel que par exemple Ni et Mn (aciers austénitique) L'austénite est très ductile(figure I.4) **[6]**.

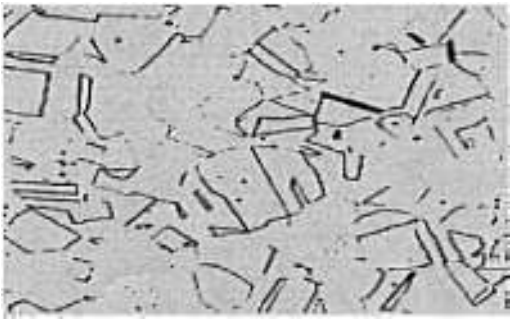


Figure I.4: structure d'un Acier austénitique**[7]**.

3.5.Cémentite ou Carbure de Fer (Fe3C)

La cémentite est une phase très dur chimiquement défini dont la formule est Fe3C. Des éléments tels que le manganèse ou le chrome peuvent se substituer partiellement au fer. Elle contient 6,67% massique de Carbone. C'est un composé très dur (dureté Vickers HV=700 à 800) mais très fragile A=0%، Rm=700N/mm² (figure I.5) **[8]**.

Figure I.5: La cémentite**[8]**.

3.6.perlite

C'est un agrégat de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone (eutectoïde) qui peut avoir deux aspects : lamellaire ou globulaire (ou coalescée), elle ne dissout pas le carbone, elle est magnétique est ductile, dureté(HB=200-250),traction (Rm=~830N/mm²) allongement(A%=~10), facile à usiner elle offre une assez bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements. A faible grossissement, les lamelles peuvent ne pas être distinctes(voir Figure I.6) **[8]**.

Figure I.6: structure perlitique**[8]**.

Sous sa forme globulaire, elle se présente sous la forme d'une matrice ferritique, dans laquelle sont enchâssée des particules de cémentite. Sous sa forme lamellaire des lamelles de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement. On distingue une alternance de bandes claires et sombres qui ne représentent pas les phases mais correspondent aux zones planes et inclinées de l'échantillon, provoquées par l'abrasion préférentielle causée par le polissage. A faible grossissement, les lamelles peuvent ne pas être distinctes**[8]**.

3.7.Ferrite

c'est une solution solide de carbone dans le fer α.(Structure cubique centrée) - 0.005 % de carbone à température ambiante environ 0.02 % à 720 °C. la ferrite peut contenir en solution des éléments variés tel que le Cr-Ni-Si-P… elle est ductile et malléable:

Hv : 80 à 100 ~ Rm=300N/mm²~ A=35% (allongement)

la ferrite est magnétique jusqu'à ° 770C (point de curie)

La figure I.7 représente une micrographie d'une structure ferritique

Figure I.7 : structure ferritique**[8]**.

Après attaque au Nital, elle se présente sous forme de polyèdres blancs dont les joints de grains apparaissent en foncé. on a deux structures de ferrite**[8]**:

- ✓ Une structure cellulaire : favorisée par un petit lent la ferrite se forme aux joints de grains de l'austénite et les entoure d'un liseré continu.

- ✓ Une structure en aiguille : favorise par un gros grain d'austénite et un refroidissement très lent, la ferrite se dépose en aiguilles à l'intérieur de l'austénite.

3.8.Martensite :

Constituant de trempe engendré au cours de la décomposition de l'austénite, la structure se présente sous la forme d'aiguilles(figure I.8), la martensite est une ferrite au réseau détendu sursaturé de carbone, elle est très dure entre 500 - 650 HB selon la teneur en carbone, et difficilement usinable **[6]**.

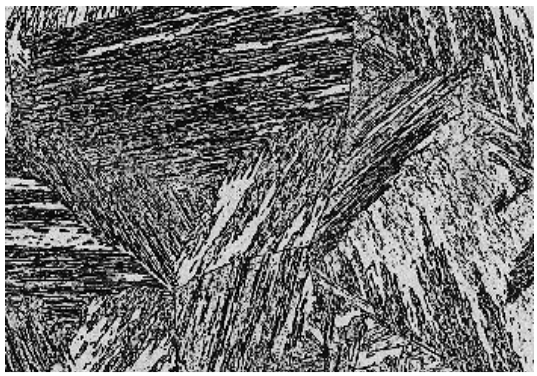


Figure I-8: Structure martensitique**[7]**.

3.9.Bainite:

Constituant de trempe intermédiaire, la structure à un aspect voisin de celui de la martensite, c'est un agrégat de ferrite et de carbures. C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite), mais de structure vraiment fine, souvent en aiguilles ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et plutôt facile à usiner **[6]**.

4.Les différents Aciers:

Différentes classifications sont utilisées pour décrire la gamme des aciers. Elles font référence à la composition chimique, aux modes de transformation, aux propriétés ou aux emplois.

- ✓ ***Les aciers non alliés***:

Aciers pour lesquels la teneur minimale imposée ou 70 % de la teneur maximale imposée en chaque élément est inférieure aux limites fixées par la norme (tableau I.1)

- ✓ ***Les aciers alliés***:

Aciers pour lesquels la teneur minimale imposée ou 70 % de la teneur maximale imposée en chaque élément est égale ou supérieure aux limites fixées par la norme (tableau I.1)

Eléments spécifies		Teneurs limites (en % en masse)
Al	**Aluminium**	0.10
B	**Bore**	0.008
Bi	**Bismuth**	0.10
Co	**Cobalt**	0.10
Cr	**Chrome**	0.30
Cu	**Cuivre**	0.40
Mn	**Manganèse**	1.65
Mo	**Molybdène**	0.08
Nb	**Niobium**	0.06
N i	**Nickel**	0.30
Si	**Silicium**	0.50
Pb	**plomb**	0.40
Ti	**Titane**	0.05
V	**Vanadium**	0.10
W	**Tungstène**	0.10
Zr	**Zirconium**	0.05

Tableau I.1: Teneurs limites des éléments d'alliage

4.1.Aciers non alliés

4.1.1.Aciers de construction métallique

Aciers de base non alliés au Fe/C ou Fe/C/Mn livrés généralement prêts à l'emploi à l'état ferrito-perlitique et dits parfois d'usage général. Ils sont soudables et ne sont pas destinés à subir des traitements thermiques (sauf les traitements de détente après formage ou soudage). Ils doivent parfois satisfaire à des conditions particulières relatives à leur mise en forme à température ambiante (pliage, bordage...). En température, leur domaine d'emploi est limité approximativement à l'intervalle 60 à 350C° **[9]**.

4.1.2.Aciers non alliés à outils pour travail à froid

Aciers spéciaux au carbone aptes aux traitements thermiques avec, pour certains, de très faibles teneurs en éléments résiduels et pour d'autres de petites additions de Cr≤0.50% ou de V≤0.15%**[9]**.

4.1.3.Aciers non alliés de construction mécanique

Aciers spéciaux destinés à subir des traitements thermiques et devant, de ce fait, répondre à des exigences relatives à leur trempabilité (qui est faible) et à sa régularité. Ils peuvent, par ailleurs، présenter des aptitudes particulières quant à leur mise en œuvre (usinabilité notamment) **[10]**.

4.2.Aciers alliés:

4.2.1.Aciers alliés pour appareils à pression:

Aciers spéciaux alliés (généralement au molybdène et au chrome et parfois au vanadium auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation et (éventuellement revenu)après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage**[9]**.

4.2.2 Aciers de construction mécanique

Aciers spéciaux destinés à subir des traitements thermiques et devant, de ce fait, répondre à des exigences relatives à leur trempabilité et à sa

régularité. Ils peuvent, par ailleurs, présenter des aptitudes particulières quant à leur mise en oeuvre (usinabilité notamment). Des éléments d'alliage (Cr,Ni,Mo,V et parfois Si) apportent surtout la trempabilité et, éventuellement, des aptitudes particulières au durcissement. Les plus alliés peuvent atteindre des niveaux élevés de résistance et sont susceptibles d'être utilisés à des températures extrême **[10].**

4.2.3. Aciers inoxydable

Aciers spéciaux dont l'élément d'alliage de base est le chrome à des teneurs supérieures à 10% et contenant souvent peu ou très peu de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome) mais, par contre, des éléments d'alliage agissant sur l'état structural et sur la résistance à la corrosion (nickel, molybdène, cuivre, titane, niobium...). Les fortes additions d'éléments d'alliage alphagènes (Cr, Mo...) ou gammagènes (Ni,Mn) modifient profondément l'état structural d'emploi de ces aciers, et on distingue quatre catégories**[9]**:

- ✓ Les aciers inoxydables martensitiques
- ✓ Les aciers inoxydables ferritiques
- ✓ Les aciers inoxydables austénitiques
- ✓ Les aciers inoxydables austéno-ferritiques.

4.2.4.Aciers à outils alliés

Aciers spéciaux (avec notamment des éléments carburigènes) auxquels il est demandé d'être aptes à atteindre, par traitements thermiques, des niveaux élevés de résistance à la température ambiante ou, souvent, à hautes températures. Parmi eux on distingue trois types d'acier**[10]** :

-Les aciers alliés pour travail à froid

-Les aciers alliés pour travail à chaud

- Les aciers rapides.

5.Influence des éléments d'adition sur la propriété et la structure des aciers

Les éléments d'alliage utilisés pour l'élaboration des aciers alliés sont très nombreux. Ils agissent sur leur structure et modifient par là certaines de leurs propriétés, mais ils peuvent aussi attribuer à l'acier des propriétés entièrement nouvelles. Les éléments les plus fréquemment incorporés sont, outre le silicium et le manganèse , le nickel et le chrome ; viennent ensuite le molybdène , le tungstène et le vanadium , puis, moins fréquemment, l'aluminium , le titane , le niobium . Le cobalt , le cuivre , le bore , le soufre , le phosphore , l'azote répondent aussi à certains buts particuliers**[11]**.

5.1. Le chrome

Il augmente la trempabilité: le domaine de transformation martensitique pourra être atteint avec de plus faibles vitesses de refroidissement. Des aciers au chrome pourront être trempés à l'huile ou même à l'air. Et aussi il augmente également la résistance au revenu: lorsque l'acier, après la trempe, est soumis à un revenu, il s'adoucit plus lentement et à de plus hautes températures, Enfin, une importante propriété du chrome est de donner à l'acier une bonne résistance à la corrosion**[11]**.

5.2. Le molybdène

Il se rencontre dans beaucoup d'aciers alliés. Comme le chrome, il est alphagène et, plus que lui encore, tend à former des carbures. Il augmente la trempabilité**[11]**.

Chapitre II: soudage

1. Description d'une opération de soudage:

On estime aujourd'hui que 60 à 80% de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés. Le soudage est utilisé dans les domaines de la fabrication et des assemblages métalliques à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques.

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle des matériaux de base **[12].**

Théoriquement, l'installation de la liaison métallique consiste à rapprocher les surfaces à unir de telle sorte que les atomes superficiels parviennent à des distances de l'ordre de grandeur des distances inter nœuds de leur système cristallin propre.

Il existe trois types d'activation des surfaces permettant d'obtenir la liaison métallique [Blondeau, 2001]. Le premier type de processus d'activation, le plus efficace, est la fusion. La liaison métallique est crée par la solidification.

L'activation des surfaces peut aussi être obtenue par échauffement sans fusion. En général, elle est complétée par une action mécanique qui permet également le nettoyage et l'amélioration du contact des surfaces à assembler.

Enfin, l'activation des surfaces peut résulter d'une action mécanique sans échauffement globale notable des pièces à assembler. Cette action mécanique provoque une plastification de l'extrême couche de chaque surface et engendre un échauffement très localisé permettant d'établir la liaison métallique.

Dans un processus de soudage, il y a plusieurs éléments qui peuvent influencer la qualité de la liaison. Parmi ces phénomènes, on peut citer : les irrégularités géométriques de la surface, la pollution de la surface et

les éléments chimiques apportés par l'atmosphère ambiante.

Les irrégularités de la surface sont susceptibles de perturber l'installation de la liaison métallique. Dans ce cas, la fusion superficielle des pièces peut ne pas être obtenue et il sera alors nécessaire de procéder à une préparation des surfaces par action mécanique telle que le meulage ou l'usinage. Les pollutions des surfaces peuvent également être éliminées par action mécanique ou chimique.

Dans le cas d'un soudage à l'arc, l'oxygène, dans l'atmosphère ambiante, peut réagir avec les éléments vaporisés par l'arc et engendrer des fumées de soudage. Mais il peut surtout se dissoudre dans le métal fondu et contribuer, au cours de la solidification, à la formation d'oxydes métalliques dans le métal solidifié et de soufflures dans le métal fondu.

Lors du soudage, au voisinage du métal fondu, la surface du métal de base portée à haute température peut aussi réagir avec l'oxygène de l'air et se couvrir d'oxydes. Il est donc nécessaire d'utiliser des moyens de protection contre l'oxygène ambiant **[13]**.

2 .Classification des procèdes de soudage

Il existe ; à l'heure actuelle des dizaines de procèdes de soudage, le plus souvent ils sont classés a partir du type d'énergie utilisées, par exemple : énergie électrique, énergie chimique etc. **[14].** Dont Les principaux procédés de soudage sont présentés sur la figure II.1:

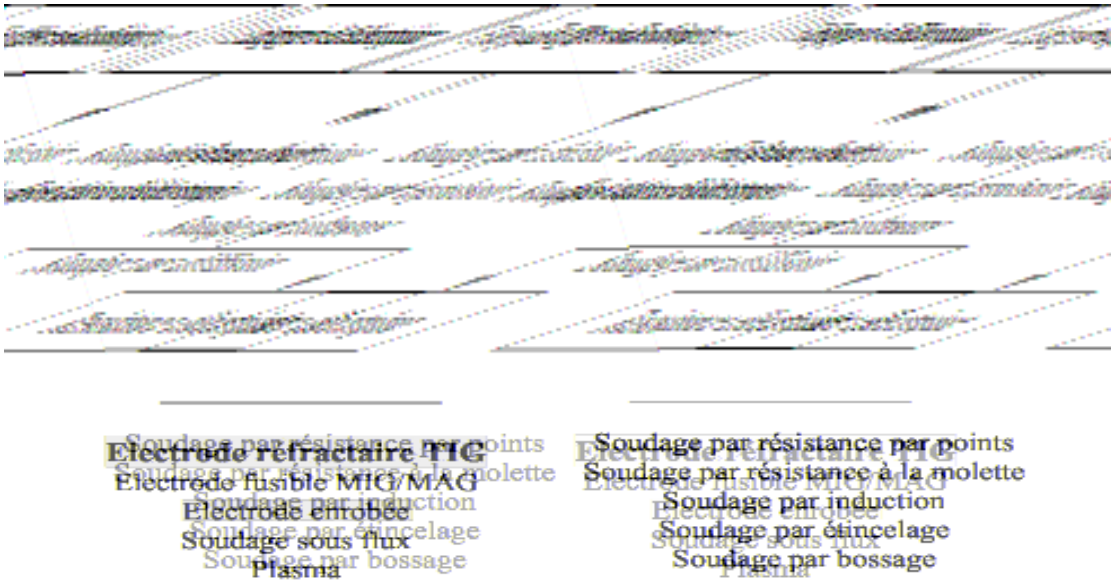


Figure II.1: Les principaux procédés de soudage en fonction de la source d'énergie **[14].**

Dans notre étude, nous nous intéressons au soudage de l'acier ASTM T11 couramment utilisé dans la fabrication des tubes des chaudières. Dans ce cas, les technologies de soudage électrique à l'arc sont généralement utilisées spécialement le procédé SMAW et le procédé GTAW, Afin de comprendre ces procédés, une brève description de ces procédés est présentée ci-dessous.

2.1. Procédé de soudage GTAW (gas tungsten arc welding):

2.1.1. Principe:

Le soudage au gaz à l'arc de tungstène (GTAW), même s'il est un procédé électrique, est semblable, quant à la technique, au soudage au gaz. L'arc de tungstène (GTAW) produit des soudures de grande qualité sur divers métaux, spécialement l'acier inoxydable et l'aluminium. Aussi, on y recourt là où l'inspection de joints soudés est soumise à un contrôle strict de la qualité **[15]**.

Par définition, le terme "TIG" est l'abréviation de 'Tungsten Inert Gas" et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée "G.T.A.W." (gas tungsten arc

welding) **[15]**.

Le soudage à l'arc au tungstène est un procédé qui utilise un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage (Figure II.2) **[15]**.

Le métal d'apport peut être ou ne pas être utilisé. Lorsque l'on a besoin de métal complémentaire, on utilise une baguette d'apport qui vient alimenter le bain de fusion remplissant ainsi le joint à souder. La technique de soudage utilisée est la même que pour le procédé de soudage oxyacétylénique. Pendant qu'une main tient la torche pour amener le métal de base en fusion, l'autre tient la baguette et alimente le bain de fusion **[15]**.

Le principe de soudure "TIG" est simple en soi puisque la torche électrique est conçue pour alimenter un jet de gaz inerte (argon, hélium ou parfois un mélange argon-hélium) qui vient envelopper l'arc électrique à la pointe de l'électrode et créer un bouclier gazeux empêchant l'air ambiant de venir en contact avec l'opération de soudure **[15]**.

Description du procédé

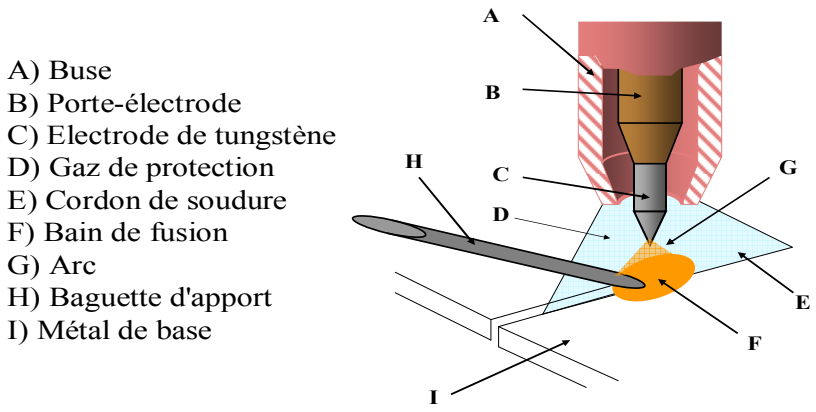


Figure II.2: Principe de la soudure "TIG

2.1.2. Applications:

- Ce procédé de soudage apporte une grande qualité de régularité au cordon de soudure.
- Il est aussi apprécié pour la rapidité de sa mise en œuvre, en effet la température de fusion au niveau de la zone à souder est obtenue quasi immédiatement, de plus elle reste bien localisée, ne s'étendant que sur une zone de quelques millimètres.
- nécessaire est plus faible qu'avec le procédé au chalumeau. Les joints ainsi obtenus sont de grande qualité. Il n'y a pas les défauts d'inclusion du « laitier » comme avec l'électrode enrobée.
  Les défauts observés peuvent être des excès de soufflure par Manque de gaz, ou un aspect vermiculaire (bulles de gaz) par excès de gaz.
- Ce procédé de soudage est appliqué pour les soudures de tôlerie fine, de tubes par les tuyauteurs.
- Il convient à la plupart des métaux, aciers divers, aluminium, manganèse cuivre, nickel, métaux et alliages réfractaires ainsi qu'aux métaux précieux ou délicats (titane-tantale ou zirconium)
- En raison du poids et de l'encombrement des installations nécessaires il est appliqué en atelier
- La mise en œuvre en endroits clos est possible car il n'y a pratiquement pas d'émission de fumées ni de particules métalliques. Sauf dans le cas de traitement de surface au niveau des métaux à souder**[15]**.

2.2.Procédé de soudage SMAW (Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée):

2.2.1.principe

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure. Il s'agit du type de soudage le plus répandu.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc

électrique.

jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport.

La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l' acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage.

Les applications de ce procédé sont particulièrement nombreuses. La mobilité des appareils et la grande diversité des types d'électrodes permettent d'effectuer des travaux sur un certain nombre de métaux et de leurs alliages comme les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables, les fontes et dans certaines conditions, l'aluminium, le cuivre et le nickel. Tous les types d'assemblage (bord à bord, d'angle ...) et toutes les positions de soudage (à plat, en corniche ...) sont possibles.

Il y a mise en fusion des pièces à souder et du métal d'apport.

Pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal d'apport) en créant un «arc électrique» qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intenses**[16]**.

2.2.2.le rôle de l'enrobage de l'électrode

En fondant, l'enrobage de l'électrode remplit différents rôles :

- **Rôle électrique:** l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air
- **Rôle physique:** l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L' enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique. Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.
- **Rôle mécanique:** l'apport de matière confère une solidité à

l'assemblage

- **Rôle métallurgique:** il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse. Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (acide, basique, cellulosique ou rutile : oxyde de titane Ti O2) **[16]**.

2.2.3.Applications:

- Le soudage manuel à l'arc électrique et électrode enrobée concerne surtout les postes de tuyauteurs pour des tubulures de diamètre et d'épaisseur importante. Conférant une bonne résistance mécanique aux soudures.
- Il convient aux aciers doux (enrobage de l'électrode type O), aux aciers faiblement alliés, aux aciers inoxydables et réfractaires, à la fonte grise, aux métaux non ferreux : nickel (après décapage à l'acide et neutralisation), cuivre et cupro-aluminium.
- La rapidité de sa mise en œuvre est aussi appréciable ; sous arc électrique la température idéale de soudage qui est atteinte rapidement reste stable tout au long du soudage.
- Sur le plan financier son intérêt réside aussi dans le coût minime et la simplicité du matériel mis en œuvre : onduleur, porte électrode, électrode, meuleuse, brosse...
- Ce type de procédé de soudage se pratique en général à l'extérieur, en effet il rend possible le soudage quelques soient les conditions météo, de température, de vent .... C'est le procédé de soudage idéal par tous temps**[16]**.

3. Métallurgie de soudage

3.1.Rappels de Métallurgie

D'une manière tout à fait générale, les caractéristiques mécaniques d'un acier résultent de sa structure et de sa composition chimique. Pour une structure donnée, la composition chimique influence les propriétés mécaniques par l'effet des éléments en solution solide**[17]**.

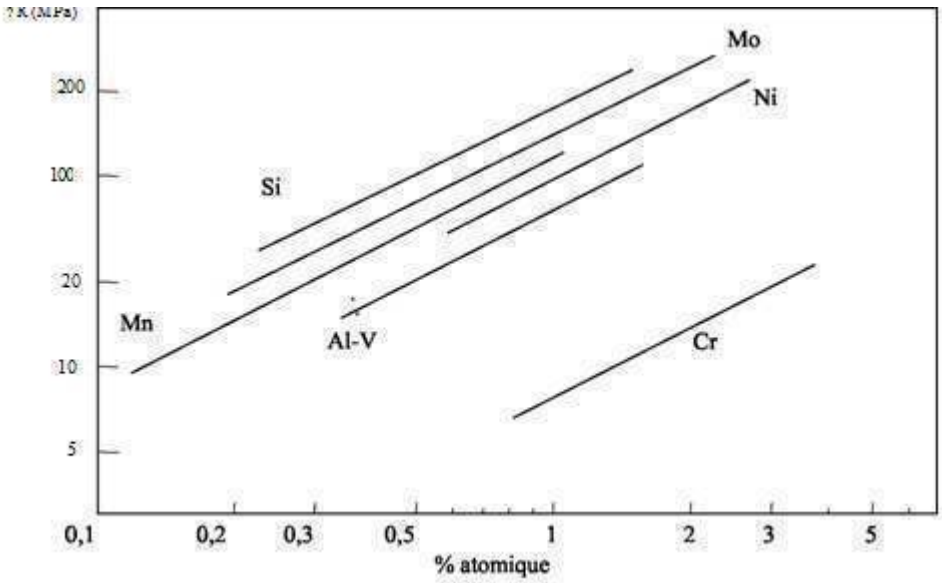


Figure II.3 : Augmentation de la résistance à la rupture du fer par effet de solution solide de divers éléments**[17]**.

La figure 1.1 montre que cet effet est modeste puisqu'une addition de 1% atomique de chrome ou de molybdène ne modifient la résistance à la rupture de la ferrite que de respectivement 6 ou 70 MPa.

La structure de l'acier dépend, quant à elle, du traitement thermique mais aussi de la composition chimique qui détermine sa trempabilité. Ainsi, deux aciers de composition chimique différente ne conduiront pas à la même structure pour un même traitement thermique et auront donc des propriétés mécaniques différentes.

Les diagrammes de transformation en refroidissement continu des aciers XC48 et 50CD4 montrent très clairement que l'influence de la structure est infiniment supérieure à l'effet de solution solide des éléments d'alliage. En effet, ces deux aciers ayant une teneur en carbone similaire, présentent des

duretés voisines lorsqu'ils sont dans un même état structural (dureté: 210 / 220 Hv à l'état de ferrite + perlite; 60 / 62 HRc à l'état martensitique) mais ont des caractéristiques fort différentes lorsqu'ils sont soumis au même traitement thermique. Ainsi, pour la vitesse de refroidissement représentée en trait fort sur la figure II.4, l'acier 50CD4 présente une structure. essentiellement martensitique qui lui confère une dureté de 60 HRc tandis que l'acier XC48 présente une structure ferrite + perlite dont la dureté n'est que de 23 HRc. **[17]**

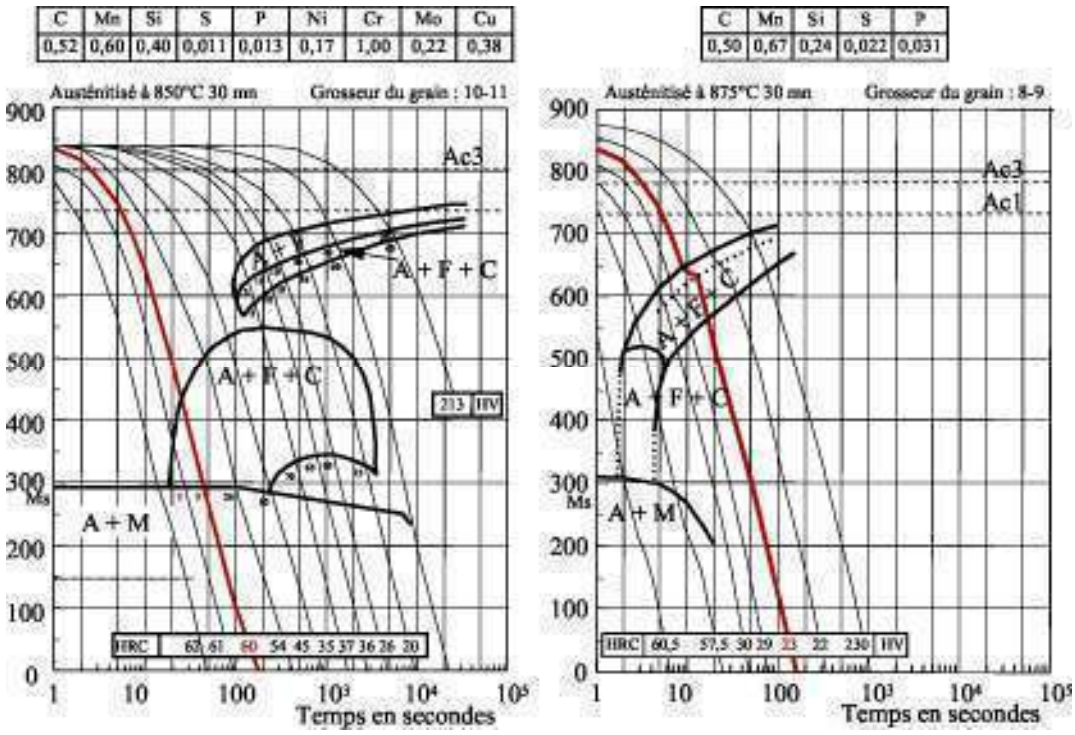


Figure II.4: Diagrammes de transformation en refroidissement continu **[17]**.

Ces principes métallurgiques sont tout à fait généraux et s'appliquent donc aussi à la métallurgie du soudage. De ce fait, on devra examiner toute opération de soudage sous son aspect thermique aussi bien que chimique**[17]**.

3.2.Caractéristiques de la soudure

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de

même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales **(figure.9).**

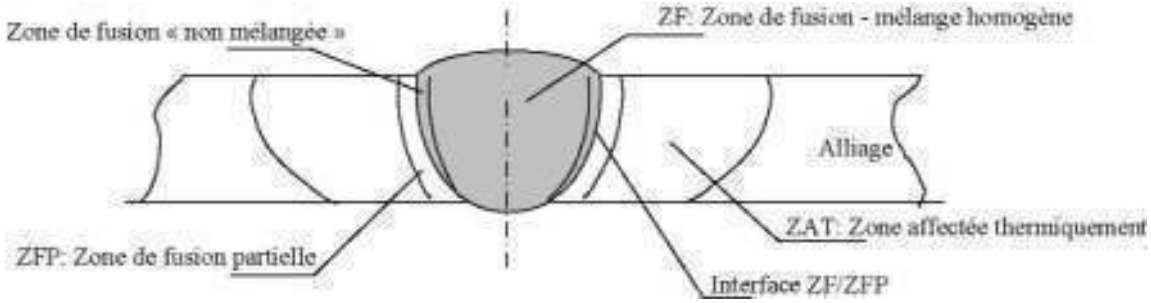


Figure II.5: Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion**[18]**.

La zone de fusion (ZF) est la région chauffée au-dessus de la température du liquidùs. Le bain de fusion est similaire à un système de fonderie où le métal de base est considéré comme un moule qui étreint la solidification du métal fondu par un processus de ségrégation qui débutera aux parois du moule engendrant la germination et par suite la croissance. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés.

La zone non mélangée « ZNM » est la zone étroite à l'extrémité du bain de fusion. Dans cette zone, les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides. La composition chimique est identique à celle du métal de base. Cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base.

Le bain de fusion est délimité par l'interface définie par la zone (ZF/ZFP) qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée.

La zone partiellement fondue (ZFP) est directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une zone de fusion partielle. Le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidùs et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages, contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle.

La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre la température du solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide, en modifiant la structure du métal de base.

Le métal de base (MB) est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que métallurgiquement inchangé, en revanche, (MB) est le siège de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure**[18]**.

3.3. Paramètre de refroidissement en ZAT

Des relevés de cycles thermiques sur joints soudés montrent que le paramètre de refroidissement varie très peu au sein d'un même joint soudé**[19]**.

L'évolution continue de la microstructure dépend donc uniquement de celle de la température maximale atteinte localement, tous les points subissant une loi de refroidissement pratiquement identique

Il reste maintenant à relier le paramètre de refroidissement aux conditions de soudage d'une manière plus précise : si l'on réalise des joints soudés à partir de produit de différentes épaisseurs en faisant varier l'énergie linéaire de soudage.

D'une manière pratique, il est important de bien définir l'énergie linéaire de soudage:

- de l'énergie linéaire électrique E_e , définie à partir des paramètres de soudage: Par exemple, en soudage à l'arc, effectué avec une tension *U* et une intensité *I,* On écrira :

$$\mathbf{E_e = UI\ /v}$$

E Étant fréquemment exprimée en KJ/cm.

-d'un coefficient de rendement thermique η_p, propre au procédé de soudage utilisé, qui caractérise le rapport entre l'énergie effectivement transférée à la pièce et l'énergie électrique Dans le procédé de soudage (TIG) le rendement thermique η_p varie de 0,2 à 0,8 dans le soudage MIG (0,7 à 0,8).

L'énergie linéaire de soudage est également le produit d'un coefficient η_G lié à la géométrie du dépôt et de l'assemblage. Par définition, un dépôt sur plat (diffusion de la chaleur dans un angle de 180°) sera tel que : η_G=1 pour un assemblage en T.

Cette approche peut être généralisée à des cas plus complexes (préparation de chanfreins en X, en V ….)

L'énergie linéaire de soudage (effective) s'écrit donc:

$$\mathbf{E= \eta_p \times \eta_G \times UI\ /v}$$

Cette valeur, ainsi que l'épaisseur des produits soudés, permet de définir le régime thermique en soudage : dans une remarquable étude basée sur une approche théorique et expérimentale, G. Bernard a pu préciser le domaine des produits (épais) et (minces) vis-à-vis de l'écoulement de la chaleur en soudage **[20].**

3.4. Conséquences du procédé de soudage

3.4.1. Conséquences thermiques du soudage

Les opérations de soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des changements de phase à l'état liquide et solide dans la zone soudée. Les cycles thermiques sont caractérisés par un chauffage suivi d'un refroidissement. L'amplitude et la durée de ce trajet thermique varie en fonction de la distance par rapport à la source de la chaleur qui

peut être mobile (ex. soudage à l'arc) ou non (ex. soudage par résistance) **[17]**.

3.4.2.Conséquences métallurgiques du soudage

Les cycles thermiques du soudage conduisent à des modifications métallurgiques du matériau de base dans la zone où la température maximale obtenue au chauffage est suffisamment importante. Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la source de chaleur et les conditions de refroidissement**[17]**.

3.4.3.Conséquences mécaniques du soudage

L'histoire thermique et les modifications de microstructures provoquées par le soudage s'accompagnent naturellement d'évolutions importantes des propriétés mécaniques par rapport au métal de base. D'autre part, la localisation de la source de chaleur ou autrement dit, les dilatations hétérogènes et les variations des propriétés mécaniques du matériau en fonction de la température et de la microstructure ainsi que les conditions de bridage des pièces engendrent les contraintes et les déformations résiduelles dans les structures après soudage**[17]** .

3.4.4.Couplage thermique, métallurgique et mécanique

Lors d'une opération de soudage, les phénomènes physiques peuvent être répertoriés dans trois catégories :

- ✓ thermique: apport de chaleur, conduction et convection;
- ✓ métallurgie: transformations allotropiques, évolutions microstructurales ;
- ✓ mécanique : contraintes et déformations résiduelles induites lors du soudage. Les interactions entre ces trois phénomènes sont souvent représentées par la figure .

Lors de la simulation numérique d'une opération de soudage, le calcul thermique permet de simuler le champ de température dans la pièce. Ce calcul nécessite la connaissance des caractéristiques thermiques, le

comportement thermique du matériau ainsi que la quantification de l'apport de chaleur. Ce calcul est généralement à la base des calculs métallurgiques et mécaniques.

L'état métallurgique est ensuite obtenu à partir du champ de température, de l'état métallurgique du matériau de base et des cinétiques de transformation de phase pour chaque histoire thermique du soudage.

L'état mécanique est ensuite déterminé à partir de la loi de comportement et des chargements appliqués à la structure (bridage, chargement thermique, chargement mécanique) . Il dépend très fortement des états thermiques et métallurgiques précédemment calculés. Le calcul mécanique fournit les champs de contraintes et déformations résiduelles**[17]**.

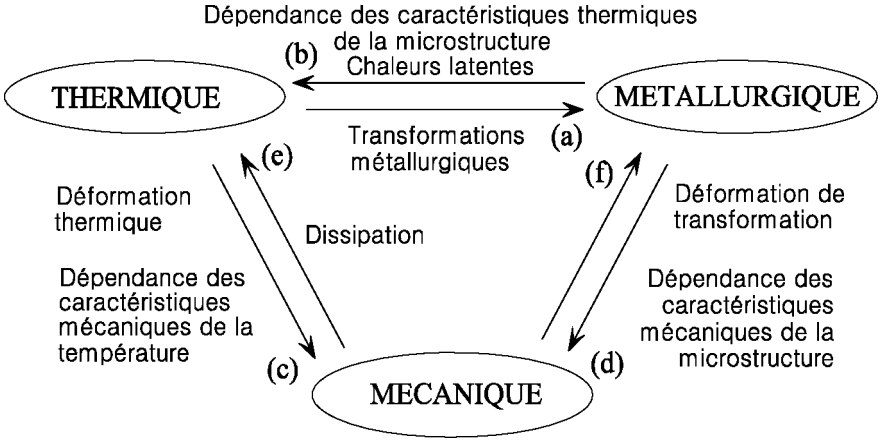


Figure II.6*:* Couplages entre les phénomènes thermique, métallurgique et mécanique induits lors d'une opération de soudage**[17]**.

Généralement, les interactions entre ces différents phénomènes peuvent être classées en six catégories :

- Le premier type d'interaction représente l'influence de la température sur la microstructure de l'acier. Pour les aciers, il décrit l'effet de la température sur la cinétique de transformation de phase à l'état solide et le changement d'état liquide-solide.
- Le deuxième type d'interaction couvre l'influence de l'état métallurgique sur l'état thermique. Il est caractérisé par les chaleurs latentes de changement d'état liquide-solide et de

transformations de phase à l'état solide et par la dépendance des caractéristiques thermiques de la microstructure.

- Le troisième type d'interaction représente l'influence de la température sur l'état mécanique du matériau. Il provient de la dépendance des caractéristiques mécaniques de la température et de la dilatation thermique du matériau.
- Le quatrième type d'interaction représente l'influence de l'état métallurgique sur l'état mécanique, il décrit la dépendance du comportement du matériau par rapport à l'évolution de la microstructure et permet d'obtenir une déformation de transformation (TRIP - Transformation Induced Plasticity).
- Le cinquième type d'interaction décrit l'influence de l'état mécanique sur l'état thermique par la prise en compte des dissipations dues aux mécanismes irréversibles.
- Le sixième type d'interaction concerne l'influence de l'état mécanique sur les cinétiques de transformation métallurgique**[17]**.

3.5.Les différentes transformations de phases lors du soudage des aciers au Carbonne

3.5.1.Transformations au cours du soudage :

Au voisinage de la zone fondue le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées aux conditions de refroidissement du joint soudé.

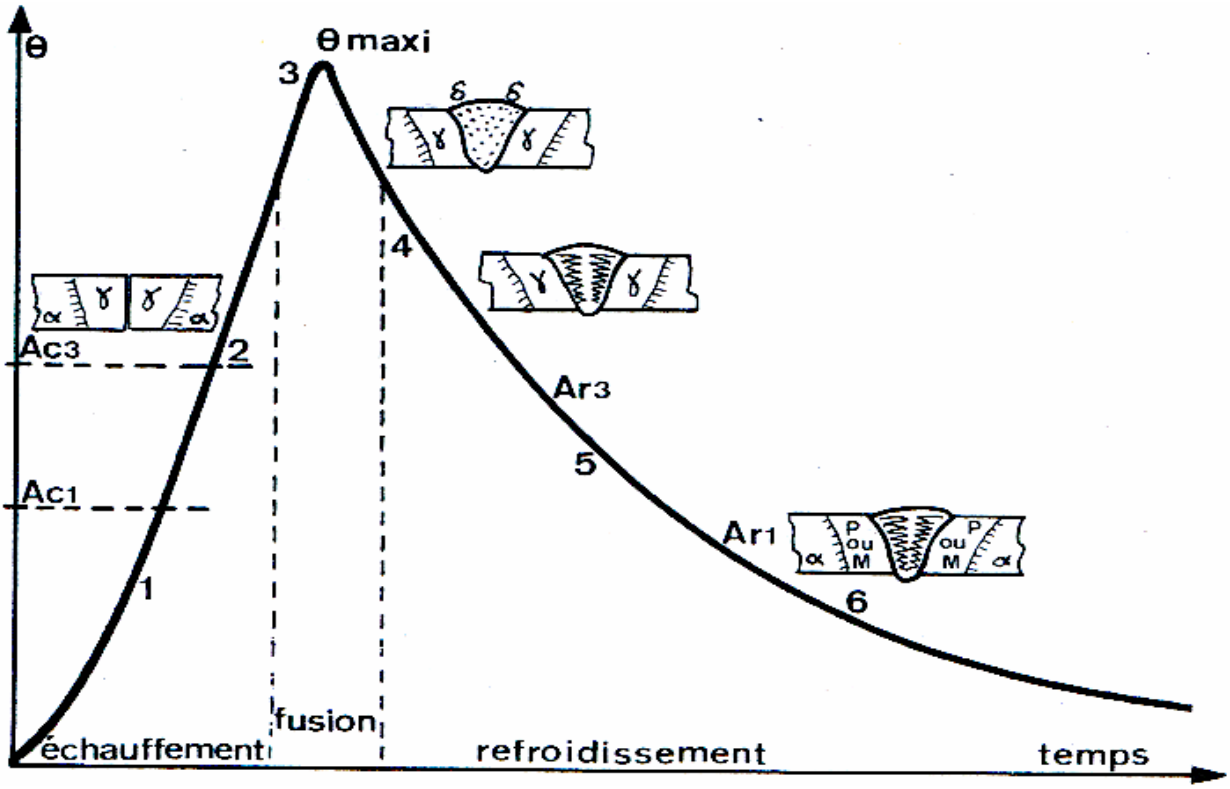


Figure II.7 : Cycle thermique de soudage et transformations structurales **[21].**

- 1 : Dilatation, plastification ; Ac1 cessation des états hors équilibre.

- 2 : Dilatation, plastification ; Ac3 début de l'austénitisation.

- 3 : (zone fondue) fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base et changement de la structure (ferrite δ).

- 4 : solidification et formation des premières dendrites austénitiques accompagné d'un retrait, Ar3.

- 5 : transformations allotropiques (M ou, M+F+C ou, F+C) diffusion de l'hydrogène, ainsi qu'une présence de contraintes locales est constaté Ar1.

- 6 : Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles ; avec des risques de fissuration à froid.

3.5.2.Transformations lors du chauffage :

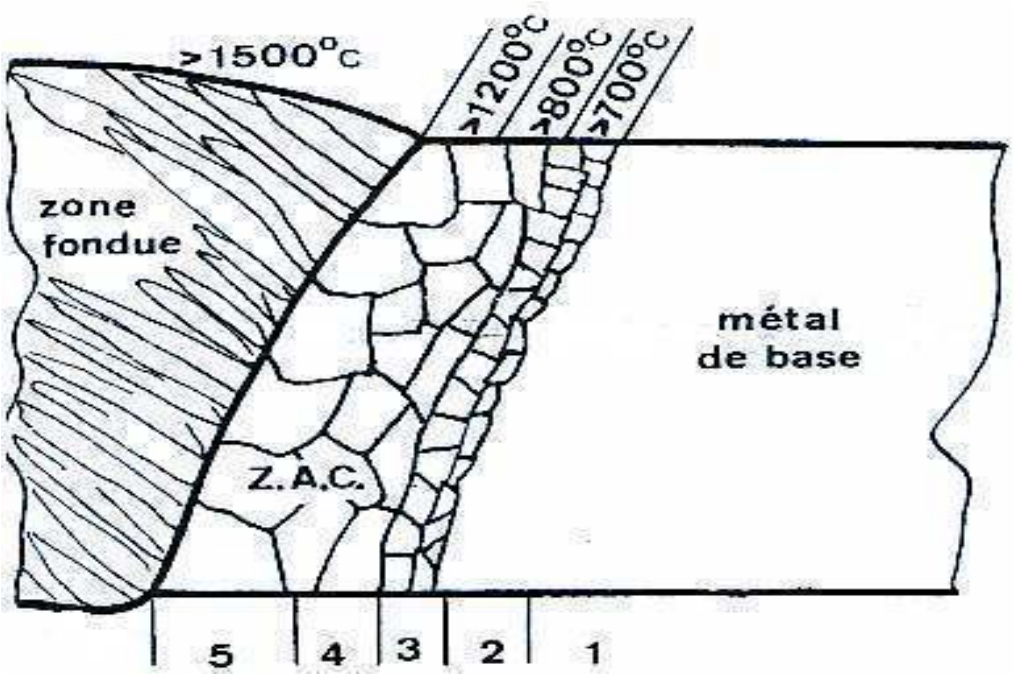


Figure II.8: les différentes régions de la zone affectée par la chaleur et les différentes microstructures obtenues au voisinage de la zone fondue[**21**].

-1 : portion ou le métal de base n'a pas atteint une température de 600°C environ.

-2 : 600°C < θ < Ac1, on observe quelques modifications tels que la globulisation des lamelles de Cémentite, la recristallisation pour le soudage de produits écrouis,...etc.

-3 : Ac1 < θ < Ac3 l'austénitisation partielle du métal donne une structure à grains très fins.

-4 : Ac3 < θ < 1200°C : structure à gros grains.

-5 : au delà de 1200°C au contact de la zone fondue (zone de liaison), une structure à gros grains confère au métal une forte trempabilité ; d'où après refroidissement, des structures aciculaires grossières ou même parfois des structures de trempe. D'ailleurs dans cette région il subsiste un risque de fissuration à froid d'où l'impacte sur les caractéristiques mécaniques après soudage[**21**].

3.5.3.Transformations lors du refroidissement :

Contrairement au chauffage les modifications structurales au court

du refroidissement sont décrites à travers des diagrammes TRC établis spécialement pour le soudage :

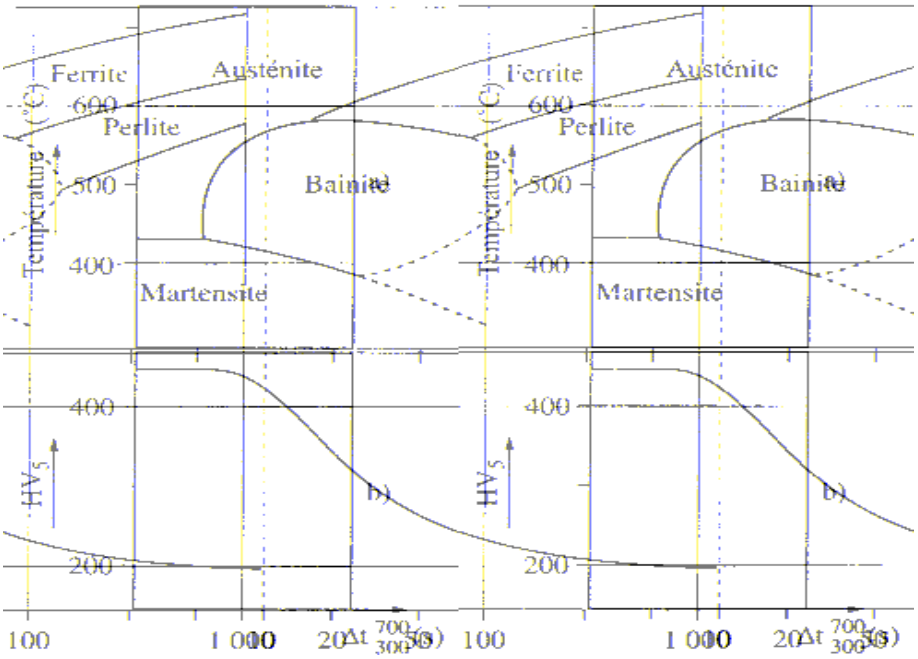


Figure II.9: Diagramme TRC spécialement élaboré pour le soudage**[22]** .

En fonction de la cinétique de refroidissement la transformation de l'austénite s'opère de différentes manières :

- La structure martensitique dure (de réseau tetragonale) prend place ; pour des cinétiques rapides de refroidissement.

- Pour des cinétiques intermédiaires c'est la structure bainitique qui prend forme.

- Par contre pour de faibles vitesses de refroidissement l'austénite c'est le mode perlitique qui prend forme. .... **[23].**

Chapitre III: traitement thermique des soudures

1. introduction:

l'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales du métal de base et, selon les procédés et les modes opératoire es, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différentes de celle du métal de base. D'autre part, l'opérions de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont elle aussi, fonction des procédés et des modes opératoires.

Qu'elles soient à caractère métallurgique ou thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement en service et les ensembles soudés sont utilisés a l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est juste préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugées importantes vis-a-vis des conditions de service, ou d'éliminer (ou simplement de réduire) les contraintes résiduelles. En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement, destine à jouer un rôle métallurgique, agit aussi sur l'état de contraintes. Le second, a finalité mécaniques, a cependant des conséquences métallurgiques**[21].**

2. Le traitement de relaxation (détente) et/ou revenu:

Le traitement thermique de relaxation, ou encore de détente, a pour objet d'annuler ou d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement ou en cours de construction il apparait nécessaire d'intervenir sur l'état de contraintes avant de poursuivre les opérations de soudage en toute sécurité. Compte tenu du domaine de température, en tous cas inferieure a Celle du point A_1, dans lequel se pratique le traitement de relaxation, il entraine aussi un effet de revenu, lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondue comme dans la zone affectée. Cet effet est parfois l'objet

principal du traitement qui reste alors pratique selon les mêmes techniques. Malheureusement, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent intervenir, en affectant les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration dit "au réchauffage"**[21]**.

2.1.Effet métallurgique du traitement:

Ce Le cycle thermique d'un traitement de relaxation étant assimilable a celui d'un traitement de revenu, il n'y a dans l'ensemble pas d'effet sur le métal de base lorsque-ce dernier est lui même mise en œuvre *à l'état* normalise et revenu ou trempe et revenu, sauf si le traitement à lieu a une température supérieure à celle du revenu initial ,a cet effet.on *se* tient en général à une température inferieure d'une trentaine de degrés au-dessous. II faut cependant signaler que certains aciers allies (au Mn-Mo, au Mn-Ni-Mo ou encore au Cr-Mo) peuvent être sensibles au phénomène dit de fragilité de revenu, qui se produit au cours d'un traitement à 450-550° ou durant le refroidissement au cours d'une traverses trop lente de cet intervalle de température. Ce phénomène, qui semble être associe a l'effet des impuretés; est moins sensible en présence de vanadium. Par centre, pour les aciers utilisés a l'état normalisé, le traitement thermique de relaxation à une action a la fois sur les caractéristiques de traction (à l'ambiante ou à chaud) et sur la température de transition de résilience ; cette action est fonction du paramètre H du traitement, défini comme indiqué ci-dessus. Ce comportement se produit pour les aciers au C, au C-Mn, au C-Mn additionnés de Ni et pour les aciers à haute limite d'élasticité à dispersaoides. Par exemple, pour un acier au C-Mn, la normes A36 200 donne (Figure III.1) pour diverses valeurs du paramètre H, l'ordre de grandeur de la réduction de la limite d'élasticité et de l'augmentation de la température de transition à laquelle on peut s'attendre dans le métal de base**[21]**.

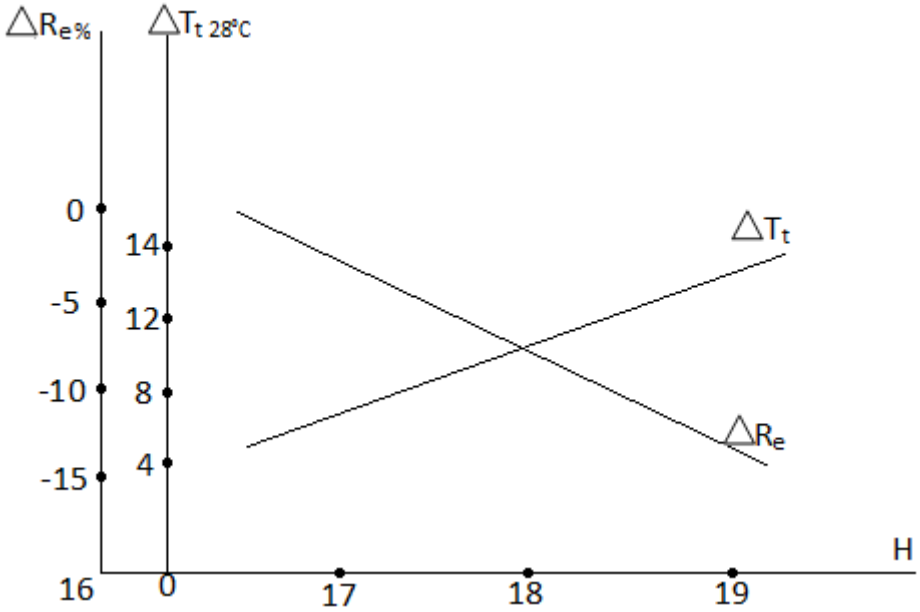


Figure III.1: l'ordre de grandeur de la réduction de la limite d'élasticité et de l'augmentation de la température en fonction valeurs du paramètre H**[21]**.

En ce qui concerne l'effet du traitement de relaxation sur les propriétés mécaniques du métal fondu, il est bénéfique en ce qui concerne la restauration à partir de l'état vieilli par l'effet tenso-thermique que l'on peut rencontrer dans les soudures multi passes sur produits épais .II peut par contre avoir un effet fragilisant pour certaines compostions sensibles à la fragilité de revenue essentiellement au cours d'un refroidissement trop lent ; la température maximale atteinte et la duret du séjour ne sont pas en cause dans ce phénomène**[21]**.

2.2. Traitement avant ou après refroidissement:

normalement, il n'y a pas d'inconvénient à procédé au traitement de relaxation d'un ensemble soudé aussitôt après l'exécution de la dernière soudure, avant refroidissement complet, même si le programme de soudage prescrit un postchauffage : en effet, le traitement de relaxation se pratique a une température supérieure aux températures usuelles du postchauffage, dont il ne peut que compléter les effets. Cependant, si on est en présence de plusieurs pièces identiques a souder et a traiter, on peut avoir intérêt a les stocker après refroidissement pour leur faire subir ultérieurement et simultanément le traitement thermique prescrit. Mais il faut, pour opérer

ainsi en toute sécurité, veiller à ce que la température et le temps de postchauffage permettent un refroidissement complet sans risque de fissuration a froid.

De même, lorsqu'une opération de soudage de longue duré doit être interrompue, par exemple aux fin de contrôle, la température de prechauffage doit être maintenue pendant un temps suffisant pour assurer un refroidissement sans risque, ou alors il faut procéder a un traitement intermédiaire de relaxation. Une autre solution consiste a procéder au contrôle non destructif à chaud, mais cela implique des difficultés techniques non négligeables**[21]**.

3.Traitement comportant une austénisation

3.1.recuit-normalisation

En matière d'acier, le recuit ou la normalisation ont tous deux pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au dessus du point A3 provoquant l'austénitisation complète de la zone on de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrite et de perlite qui remplace, quelle qu'elles aient été, la constitution et la structure à métal brut de soudage. La normalisation, qui comporte un refroidissement moins lent que le recuit, produit une perlite dont l'espace interlamellaire est plus faible, donc plus dure que ne le fait le recuit. Pour certains aciers faiblement allies. la normalisation peut provoquer une trempe du type bainitique et requérir de ce fait on traitement ultérieur de revenu**[21]**.

Du point de vue, du mode de mise en œuvre, le traitement globale simultané est le plus complet car il affecte tout l'ensemble traité, sans gradient de température ; il produit donc uniformément l'effet métallurgique recherche aussi Bien dans la zone fondue et thermiquement affectée que dans le métal de base, qui bénéficie de la même régénération thermique, s'il a été déformé è froid ou à haute température (emboutissage à froid ou à chaud). S'il s'agit d'un ensemble important et lourd, le traitement global peut poser des problèmes pratiques difficiles de déformation ou d'encombrement. On peut être amené à étayer les pièces pour éviter leur déformation et, pour les pièces trop importantes pour être

normalisées en une seule fois, telles que de longues viroles, on pout traiter successivement chaque moitie qu'on introduit dans le four cependant que l'autre dépasse a l'extérieur. On pout aussi assimiler séparément chaque élément virole, dans la soudure longitudinale. place verticalement dans le four bénéficie du traitement sans risque de déformation ; on assemble ensuite les viroles entre elles et on termine alors, par un traitement de relaxation global, sans normalisation des soudures circulaires**[21]**.

3.2. Traitement intercritique

On qualifie d'inter critique un traitement pratique à une température situé entre les points A, et $\mathbf{A_3}$ de l'acier considéré D'après le diagramme fer-carbone, l'acier est constitue, dans ce domaine de température, par une partie de la ferrite initiale, c'est-a-dire celle qui existait avant le traitement, et une austénite résultant de la transformation de l'agrégat lamellaire perlitique initial. Si on part d'un métal hors d'équilibre, c'est aussi vers cette constitution que le traitement intercritique fait évoluer l'acier. En même temps, les carbures ou carbonitrures présents (aciers a dispersoides) subissent une dissolution partielle. au refroidissement (nécessairement lent car il s'agit toujours d'un traitement global) les plages d'austénite se transforment en ferrite et perlite, nouvelles et plus fines, par rapport aux constituants initiaux qu'elles remplacent et les plages de ferrite non dissoutes à l'échauffement demeurent intactes. II en est de même pour le comportement des carbures et carbonitrures. Ce mécanisme, sommairement décrit, s'accompagne d'une amélioration de la ténacité, (abaissement de la température de transition) qui sans être aussi importante que celle que procure la normalisation, est néanmoins asses sensible pour une intéressante, d'autant qu'à la température pratique, le risque d'affaissement des pièces traitées est beaucoup moins grand**[21]**.

En ce qui concerne les ensembles soudés, le traitement intercritique peut être utilisé soit en complément du traitement de normalisation dont il complète les effets, soit comme seul traitement sur l'état brut de soudage, essentiellement pour améliorer la ténacité de la zone fondue. cette amélioration est d'autant plus sensible que, compte

tenu de la composition chimique, la structure initiale est plus éloignée de l'état d'équilibre**[21]**.

Enfin, il convient de signaler que malgré les avantages qu'il comporte, l'application du traitement intercritique est limitée au cas des ensembles soudés constitues avec un acier de base mis en œuvre a l'état normalisée. En effet, compte tenu de la température à laquelle doit être pratiqué, nécessairement supérieure à celle du point A_1, il ne peut pas être applique a des ensembles constitues par de l'acer trempé et revenu qui ne saurait, sous peine d'un adoucissement inacceptable, être porté à une pareille température**[21]**.

Chapitre IV: Caractérisations mécaniques sur les soudures

1.Essai de traction:

1.1.Principe de l'essai de traction:

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette de section ou prismatique à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts. L'essai permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile. Pour cela on a effectué l'essai sur deux éprouvettes différentes prélevées aux même endroits, et ce, pour veiller à la reproductibilité des résultats**[24].**

2.1.Application de l'essai de traction sur une éprouvette soudée

La disposition la plus fréquemment proposée pour l'essai de traction d'assemblages plans comportant une soudure bout a bout par fusion est celle qui consiste a prélever une éprouvette prismatique (ou, plus rarement, cylindrique), perpendiculaire a la soudure, qui se trouve au milieu de la partie calibrée, la surépaisseur étant arasée au niveau du métal de base, Lorsqu'une telle éprouvette est soumise a l'essai de traction jusqu'a rupture, on observe (Figure IV.1) que la cassure apparait soit dans la zone fondue **(cas a)** soit dans le métal de base **(cas b).** Si la cassure a lieu dans la zone fondue, on peut noter une charge de rupture, mais la valeur de cette charge dépend, pour une largeur L d'éprouvette donnée, de la largeur I de la zone fondue. Par un effet de consolidation du au métal de base voisin, la déformation diminue et la charge augmente lorsque la largeur de la zone fondue diminuer). D'autre part, la mesure de l'allongement est impossible, car l'étendue de la zone déformée est insuffisante pour qu'un résultat significatif puisse être noter. Si la cassure a lieu clans le métal de base **(cas b),** on peut évidemment noter une valeur de la charge de rupture de ce dernier), cependant que la mesure de l'allongement est douteuse, en raison du raidissement crée par le cordon de soudure dans la panic calibrée de l'éprouvette, Quant a la zone fondue, on n'apprend rien sur son compte. Notons enfin qu'on pout observer un commencement de striction dans le métal de base, du cote non rompu, symétrique de la zone rompue, par rapport au métal fondu**[23]** .

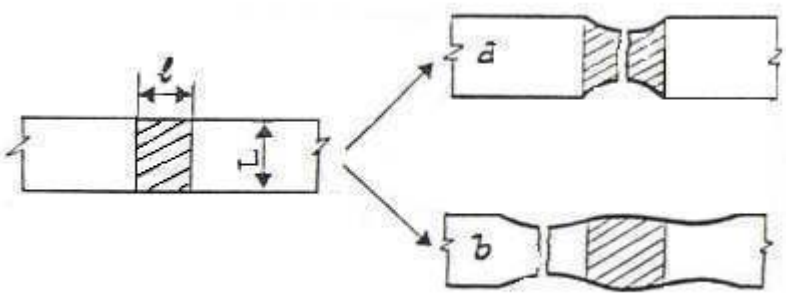


Figure IV.1: la rupture d'une éprouvette soudée lors d'un essai de traction**[23]**.

2.Essai de pliage

2.1Principe de l'essai de pliage

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est prélevée transversalement à l'assemblage soudé. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle alpha déterminé avec le prolongement de l'autre branche.

Pour cela on a effectué l'essai sur deux éprouvettes différentes prélevées aux même endroits, et ce, pour veiller à la reproductibilité des résultats**[24]**.

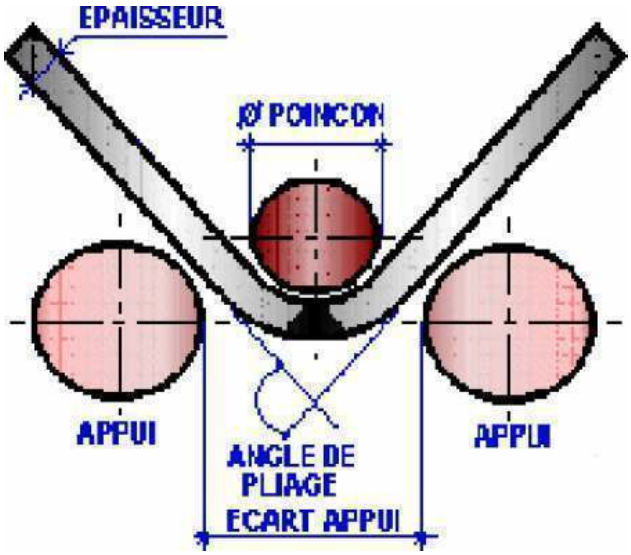


Figure IV.2 Principe de l'essai de pliage**[24]**.

2.2.Application de l'essai de pliage sur une éprouvette soudée

L'application des essais de pliage classiques aux assemblages soudés présente aussi des difficultés associées a la plus ou moins grande hétérogénéité des assemblages a éprouver. Néanmoins, envisonne sa simplicité de mise en œuvre et des passibilités, offre quant L'évaluation de la qualité des soudures, l'essai de pliage est très largement surtout sur éprouvettes transversales, moins Souvent sur éprouvettes longitudinales. Dans les deux cas, la surépaisseur et le bourrelet de pénétration sont arasés, en raison de la difficulté d'exécution de l'essai qu'entraine leur présence.

L'essai de pliage transversal (NF A89-203) se pratique de manière a ce que son mis en tension soit l'endroit (a) son l'envers (b), soit encore la surface dune tranche (c) de l'assemblage essayé. L'angle de pliage imposé est de 180^0, une fois cet angle obtenu, on examine l'aspect de la panic tendue, on débouchent les éventuels défauts. Les cotes du dispositif de miss en œuvre (diamètre du mandrin et écartement des appuis) ont fonction de l'épaisseur de l'éprouvette, qui est celle des épaisseurs d'assemblées ou celle de l'échantillon prélevé.

En fait, l'essai n'a de sens que si l'allongement au niveau de la partie tendue est à peut près uniforme dans la zone fondue et le métal de base voisin. Dans le cas contraire, l'un des deux subit une déformation excessive par rapport a l'autre (Figure IV.3).

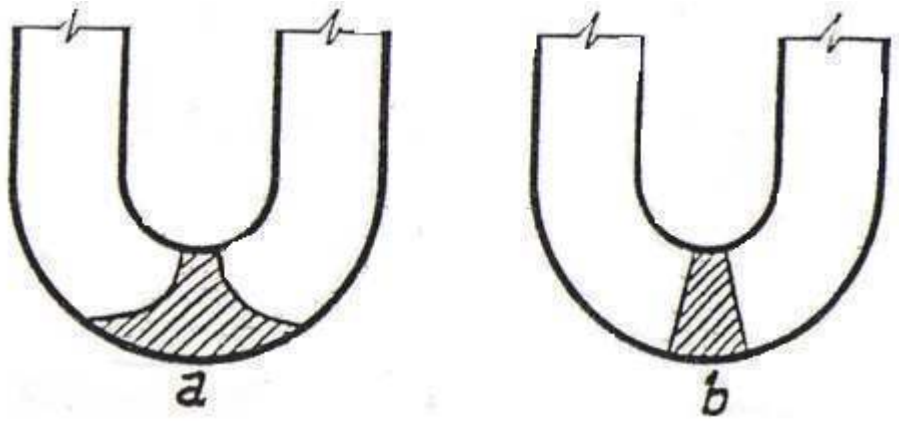


Figure IV.3: déformation d'une éprouvette soudée lors d'un essai de pliage**[23].**

C'est précisément pour remédier a cette situation que, dans le cas d'une telle hétérogénéité d'allongement entre métal fondu et métal de base, de pratiquer l'essai de pliage sur une éprouvette longitudinale, c'est-a-dire dans laquelle la zone fondue occupe l'axe. Rien n'est changé par ailleurs aux conditions d'essai, sinon évidemment que l'essai sur le cote n'est pas proposé**[23]**.

3.Essai de micro-dureté

3.1Principe de l'essai de micro-dureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou, en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration**[24].**

3.2.Essai de micro-dureté Vickers

Dans le cas de la dureté Vickers le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de 36° au sommet. La charge de l'essai est généralement de 49,2 N soit 5 Kgf (HV5 utilisée dans notre étude) ou 98,07 N ou 10 Kgf (HV10). Cette charge est appliquée d'une manière progressive et constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte, elle est ainsi maintenue pour une période de temps variant entre 10 et 15 s (figure IV. 4).

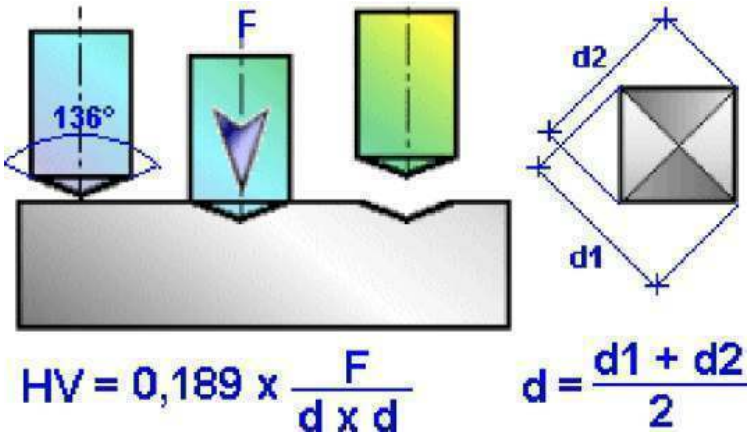


Figure IV.4: Dimensions de l'empreinte et formule de calcule de la dureté selon Vickers**[23].**

enfin, l'empreinte et formule de calcule de l'essai de dureté se déroule à la température ambiante.la dureté selon Vickers. Notre essai a été réalisé sur un échantillon prélevé de manière perpendiculaire à l'axe du cordon de soudure de tube soudés. Il est été poli à l'aide d'une polisseuse et du papier abrasif, l'état de surface est alors bon.

La mesure de la dureté dans notre cas à été effectuée par un balayage ce qui a pour objectif d'étudier l'évolution de la dureté dans les différentes zones d'un assemblage hétérogène par soudage : les métaux de base et les deux ZAT des métaux de base et la zone fondue.

Les mesures ont été faites selon 2 profils parallèles aux bords de l'éprouvette (figure IV.5), le premier distant de 2 mm du bas, et le second de 2 mm du haut (c'est-à-dire le premier à la première passe et le second à la deuxième passe). Le choix de cette méthode est motivé par la soudure en 2 passes **[24]**.

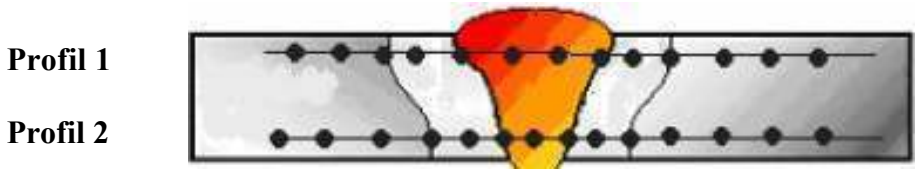


Figure IV.5: Schéma du balayage pour la mesure de la dureté sur le long d'un échantillon**[24].**

Partie expérimentale

Chapitre V : matériau et méthodes

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés au problème de la réparation par soudure de deux tubes en acier faiblement allié ASTM A213 T11 (selon la norme américaine). Cependant, le premier tube provient d'une vieille chaudière et l'autre est neuf. l'acier qui provient de la chaudière contient un taux de carbone relativement élevé voir tableau V.1

Ce problème a été abordé en respectant la démarche suivante:

- Première étape : Identification du métal de base.
- Deuxième étape : réalisation de soudage des sections des tubes.
- Troisième étape : Réalisation du traitement thermique à haute température (traitement de revenu à 720 °C) avec un temps de maintien allant de 15 à 35 minutes.
- Quatrième étape : Caractérisation métallographique au microscope optique.
- Cinquième étape: les essais mécaniques (essais de micro-dureté)

Les matériaux que nous avons traité dans ce travail sont des aciers faiblement allié au chrome molybdène de la nuance T11 destinée au transport des fluides à des températures et pressions élevées. Le tube neuf (TN) possède un diamètre extérieur D_{TN} =50,8 mm et une épaisseur E_{TN} = 4 mm. Par contre, le tube provenant de la chaudière (TC) a un diamètre extérieur D_{TC} = 101.6 mm et une épaisseur E_{TC} = 8 mm.

1.Caractérisation du métal de base

1.1.Analyse chimique du métal de base

L'analyse chimique des deux aciers a été réalisée au laboratoire de d'analyse et contrôle de qualité de l'entreprise SNVI de Rouïba. La technique adoptée est la spectrométrie de fluorescence des RX. Pour le dosage du carbone, des analyses complémentaires ont été faites par la méthode de fusion avec catalyseur (Cu). Cette analyse a permis d'obtenir la composition chimique en teneur massique de chacun des deux tubes.

la composition chimique du métal de base des deux tubes est donnée dans le tableau V.1:

.

Tableau V.1: la composition chimique du métal de base des deux tubes**.**

Eléments chimiques	*composition chimique, Pourcentage massique*	
	TN	**TC**
C	**0.4**	**0.22**
Si	**0.20**	**Trace**
Mn	**0.39**	**0.40**
S	**0.054**	**0.038**
P	**0.078**	**0.047**
Mg	**0.009**	**0.008**
Ni	**0.84**	**0.05**
Cr	**0.82**	**0.99**
Mo	**0.85**	**0.95**
Cu	**0.12**	**0.005**
Al	**0.052**	**0.009**
Pb	**0.013**	**0.005**

1.2.Propriétés mécaniques du métal de base:

Certaines propriétés mécaniques du métal de base sont indiquées ci-dessous (Tableau V.2) :

Tableau V.2 : Propriétés mécaniques du métal de base.

Résistance rupture minimale (MPa)	*Limite élastique minimale (MPa)*	**Allongement minimal (1) sur 2 ou 50mm(%)**	**Dureté Brinell**
414	**530**	**30**	**163 HB**

2. Critère de choix du métal d'apport

Nous avons réalisé des soudures par deux procédés distincts:

- Le procédé SMAW a électrode enrobé
- Le procédé GTAW (TIG avec métal d'apport).

Pour se faire nous avons utilisé un métal d'apport différent pour chaque procédé. Les métaux d'apport utilisables pour le soudage des aciers faiblement alliés au Cr-Mo ne sont pas définis par une norme spécifique. Cependant, les métaux d'apport que nous avons utilisé, ont été choisis selon les critères suivants:

- Propriétés mécaniques du métal d'apport et du métal de base similaires
- La composition des baguettes d'apport qui a une influence directe sur la qualité de la soudure, doit s'apparenter à celle du métal de base de façon à obtenir un mélange homogène.
- La composition du mélange métal d'apport, métal de base, a une influence directe sur la qualité de la soudure. Il est donc nécessaire de bien nettoyer les baguettes et le métal de base afin qu'il n'y ait aucune contamination.

les caractéristiques générales des nuances des métaux d'apport sont résumés dans le tableau **V.3**:

tableau V.3 les caractéristiques des nuances des métaux d'apport

	Baguette pour procédé SMAW	**Baguette pour procédé GTAW**
Classification	AWS/SFA A5.5: E 1018-B2 L BS 2943:1Cr Mo DIN 8575:E Kb, Cr MO 1 26 Swedish standard : 143272-H AS 1553,2:E5518-B2 L	SFA/AWS AS28 ER90S-G DIN 8575 W.nr 1.7384 EN12070 W CrMo2Si

La composition du métal d'apport est donnée dans le tableau V.4:

Tableau V.4: Composition chimique du métal d'apport

Eléments chimiques	**composition chimique, *Pourcentage massique***	
	Baguette pour le procédé SMAW	**Baguette pour le procédé GTAW**
C	**<0.05**	**0.08**
Mn	**0.60**	**1.0**
Si	**0.30**	**0.7**
Cr	**1.40**	**2.6**
Mo	**0.50**	**1.0**

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport employé dans chaque procédé sont données dans le tableau V.5:

Tableau V.5: Caractéristiques mécaniques des métaux d'apport

	Baguette pour procédé GTAW	**Baguette pour procédé SMAW**
Re (Mpa)	**>400**	**520**
Rm (MPa)	**>500**	**610**
A (%)	**>18**	**24**

3. Soudage des tubes

3.1.Choix du procédé de soudage

Pour raccorder les tubes, les pièces de forme et les appareils accessoires des tuyauteries en acier, on utilise généralement les procédés de soudage à énergie électrothermique. De nombreux procédés de soudage par fusion

peuvent être employés dans la mise en œuvre des aciers: soudage à l'arc SMAW et GTAW

Les procédés de soudage utilisables devront assurer une bonne protection du bain de fusion. Ce but est facilement atteint avec les procédés de soudage à l'arc électrique: soit sous atmosphère gazeuse neutre ou réductrice, soit sous laitier apporté par une électrode enrobée.

Dans notre cas, nous avons choisi deux procédé de soudage SMAW et soudage GTAW. Ce dernier a l'avantage de la réalisation de cordons lisses, ayant un bel aspect, exempts de défauts de surface et possédant une bonne compacité. De plus il est conseillé pour le soudage des épaisseurs minces, d'utiliser le procédé GTAW. Les propriétés mécaniques et la qualité du joint soudé sont donc excellentes.

Le tableau V.6 résume les notations utilisées par la suite, pour désigner chaque éprouvette soudée.

Tableau V.6 : Désignation des éprouvettes soudées.

Tube	Eprouvette	Procédé de soudage
Tube TN	TN(G)	GTAW
Tube TC	TC(G+S)	GTAW+SMAW
	TN(S)	SMAW

3.2.Déroulement de l'opération de soudage

L'opération de soudage nécessite des préparatifs en vue de réaliser une soudure saine et de qualité. A cet effet les opérations suivantes ont été réalisées [25]:

1- Chanfreinage des tubes : Le chanfreinage des bords en V a été effectué au tour parallèle.
2- Nettoyage des bords à souder : On a procédé à l'enlèvement de l'humidité ainsi que les huiles et graisses provenant de l'opération d'usinage à l'aide d'une brosse, d'une lime ou d'un solvant approprié. L'humidité, les huiles et les graisses sont susceptibles d'entraîner une carburation du métal fondu et des zones voisines et par suite une contamination du bain fondue au cours du soudage.
3- Alignement Pointage des tubes à souder : Le positionnement des tubes à souder est assuré à l'aide d'un montage d'axe horizontale pour un soudage vertical montant (La fixation des bords des tubes a été faite par la réalisation de points de soudure distants et répartis tout le long du périmètre des tubes, ces derniers ont été fixé par des points de soudure sur un palier métallique fixe, pour permettre un soudage à position fixe).
4- Mesure de la température de soudage: On a placé un thermocouple à 3 mm du chanfrein coté face du tube, et un deuxième thermocouple à 6 mm du chanfrein de l'autre té (cote envers) du tube. Les thermocouples sont fixés à l'aide d'une patte isolante céramique pour avoir une bonne fixation. Ces thermocouples nous ont permis la saisie de la température maximale pour chaque passe. Ils sont relies à un enregistreur de température.
5- Saisi du temps de soudage: On a saisi le temps mis pour la réalisation de chaque passe à l'aide d'un chronomètre. Le temps d'interpasses a également été saisi.
6- Contrôle de la température d'interpasses: A l'aide d'un crayon thermochrome, nous avons pris la température entre les deux passes. Cette dernière, ne doit pas dépasser 250°C.

3.3. Elaboration de la fiche technique de soudage

La fiche technique de soudage a été élaborée avant l'opération de soudage. Cette fiche indique l'ensemble des paramètres de soudage ainsi que les conditions dans lesquelles s'est déroulée cette opération (ou le mode opératoire). Par exemple les valeurs de Is, Us et ts ont été mesurées, où Is est l'intensité de soudage, Us est la tension de soudage, et ts est le temps de soudage (Voir Annexe (1) (2) (3), la fiche technique de soudage et calcul des paramètres de soudage).

4. Traitement thermique appliqué aux tubes soudés

Le traitement thermique du tube soudé a été réalisé à l'aide d'une unité de traitement thermique type ***MANNINGS*** comme suit:

- Le tube TN(G) a subit un maintien de 15 minutes à 720 °C
- les deux tubes TC(G+S) et TC(S) ont subit un maintien de 35 minutes à 720°C
- Toutes les tubes d'une longueur de 30 cm sont préalablement chauffés par effet joule grâce à des éléments de résistances électriques que l'on a enroulé autour de leurs corps. Sa température est mesurée par un couple thermoélectrique soudé par étincelage et asservi à un cycle programmé**[25]**.

5. Caractérisation des soudures

Pour la caractérisation des soudures, nous avons prélevé une éprouvette par tube soudé pour la caractérisation métallographique (micrographie, dureté). Par contre pour les tests mécaniques nous avons adopté un protocole de prélèvement des éprouvette de traction et de pliage (voir figure V. 1). Cependant, les prélèvement n'ont pas réussies a cause de la dureté du matériaux. On effet, on a sollicité 3 tourneur privé pour cette action et a chaque foi l'outil se rompe. Finalement faute de moyen de moyen et de temps nous avons abandonné les essais de pliage et de traction.

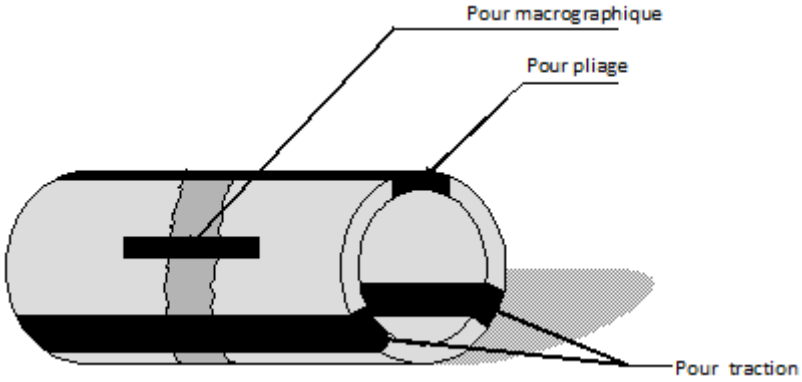


Figure V.1: Schéma de prélèvement des éprouvettes pour caractérisation des joints soudés.

5.1.L'examen métallographique :

L'examen métallographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et distinguer les différentes zones du cordon de soudure. A cette effet, nous avons utilisé un microscope optique équipé du camera CCD reliée a un microordinateur (figure V.2).les images saisies sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur et ils peuvent être transférer vers un F-Disc ou un CD-ROM.

Le logiciel de traitement d'image ARCHIMED nous a permis de mieux caractériser les microstructures

Figure V.2 : microscope optique

5.1.1.Technique de la métallographie

Dans une opération de micrographie, on doit distinguer:

1) le prélèvement de l'échantillon.
2) le polissage: mécanique- de finition.
3) l'attaque (chimique et électrolytique).
4) l'observation et photographie.

5.1.2.Préparation micrographique des échantillons

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique. Le polissage se fait généralement sur une polisseuse (figure II.3) en deux étapes:

- Le Pré-polissage.
- Le Polissage de finition.

Figure V.3 : Polisseuse

- **Le pré-polissage**

Il se fait par frottement de l'échantillon, sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine. Le polissage se fait habituellement sous eau (ou arrosage), en prenant soin de croiser le sens de polissage en passant d'un grade à un autre. La finesse des grains décroît dans l'ordre suivant 100-180-400-600-800-1000-1200

- **Le polissage de finition**

C'est un polissage sur un feutre contenant une pâte diamantée dont la finesse des grains est dans l'ordre décroissant (3 µ m -1 µ m).

La pâte diamantée est étalée sur le feutre à l'aide d'un diluant après le polissage on nettoie l'échantillon par un jet d'eau pour éliminer les particules de l'abrasif, suivi d'un rinçage à l'alcool pour enlever toute trace de matière grasse. Une fois que l'échantillon est prêt on procède à l'attaque chimique pour l'observer au microscope.

5.1.3.L'attaque chimique

L'attaque chimique donne des variations de relief ou coloration, entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'une même phase. Après polissage mécanique et de finition, nous avons procédé à une- attaque chimique de la surface par le Nital : HN03 4% et 98% Acide Nitrique.

- **Durée d'attaque :** de 15 à 20 secondes.

5.1.4.L'attaque électrolytique

La solution utilisée est le potasse (KOH) de concentration 10N dilué dans l'eau. L'échantillon à polir joue le rôle de l'anode. Pour la cathode nous avons placé une plaque d'un acier au carbone .L'ensemble est parcouru par un courant continu dont la source est une batterie de 1,5V. L'attaque électrolytique a été effectuée à la température ambiante pendant 10 à 15 seconde.

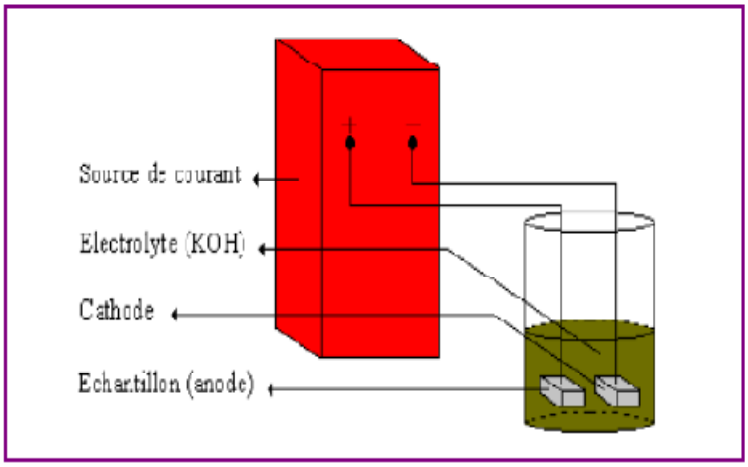


Figure V.4 : Schéma de l'attaque électrolytique.

5.1.5.Essai de micro-dureté:

Les essais sont effectués sous des charges moyennes (1 kp=9.084 N selon la Norme NF A 03-163). Le pénétrateur est de type Vickers. La mesure de la dimension de l'empreinte et réalisée à laide d'un microscope (X400). Figure (II.4).

Figure V.5 : Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.

CHAPITRE VI:

Exploitation des résultats

1.Présentation et interprétation des résultants métallographiques

1.1.Observation du tube TN(G)

On remarque sur la figure VI.1 une structure biphasée constituée de deux constituants cristallographiques : la perlite et la ferrite de forme cellulaire

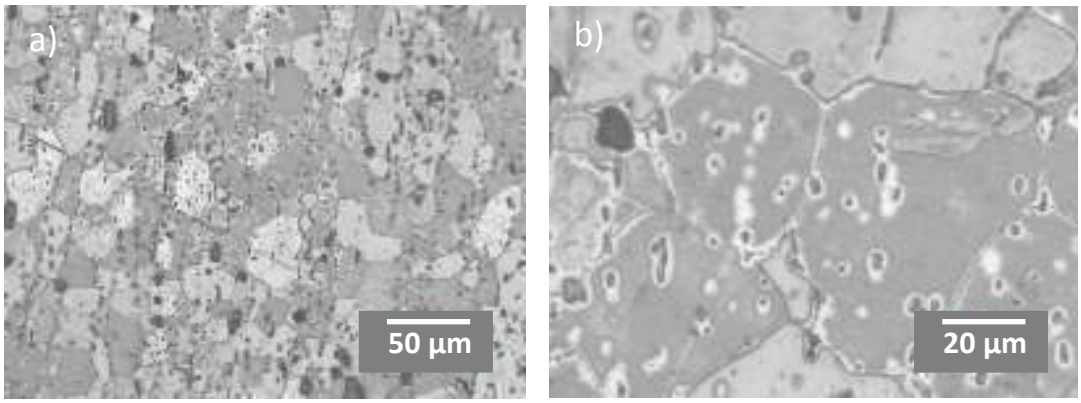


Figure VI.1 : TN(G) métal de base.

La figure VI.2 illustre la microstructure du tube TN(G) au niveau de la transition entre la zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB).

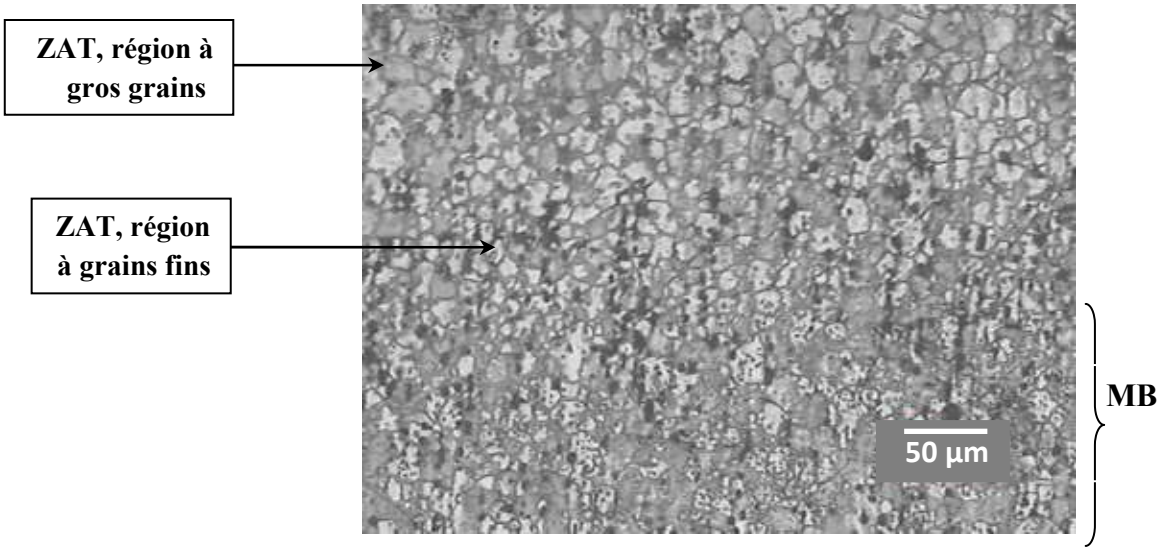


Figure VI. 2 : TN(G) zone de transition à l'interface MB / ZAT

.

Un changement remarquable de la morphologie des grains, ceci explique le début de la zone de liaison entre le métal de base et la zone fondu. Le mécanisme principal qui provoque ce changement est le gradient de température entre le métal de base et le métal d'apport lors du soudage.
La zone affectée thermiquement est subdivisée en deux régions : une région à grains grossiers au voisinage de la zone fondue, et une zone à grains fins. Le grossissement de grains ayant lieu à la ZAT (figure VI.3) est dû principalement à l'apport thermique lors du soudage.

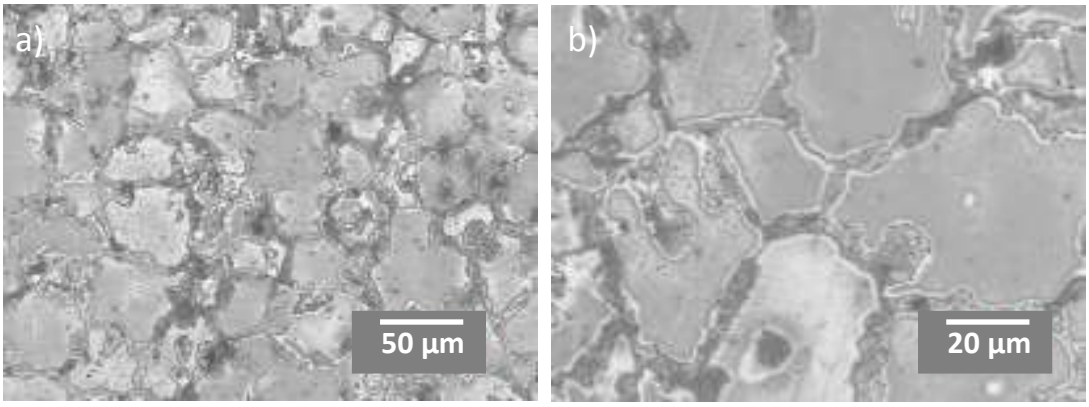


Figure VI. 3 : TN(G) Zone affectée thermiquement, a:grossissement

Les joints de grains sur la photographie VI. 3 ont disparus.
Une décomposition de la bainite en (ferrite +cémentite) est observée aux niveau des joints de grains.

La zone de fusion a pu être identifiée dans cette éprouvette et on la montre par la figure VI.4. La structure aciculaire ou de Widmansttaten observée est due à un refroidissement rapide du métal à partir d'une température élevée. En effet, le métal dans la zone de fusion reçoit une quantité de chaleur importante qui est évacuée rapidement en poursuivant la passe de soudage. Les contraintes thermiques provoquées par ce phénomène créent un glissement des plans cristallographiques qui donnent une morphologie en aiguilles.

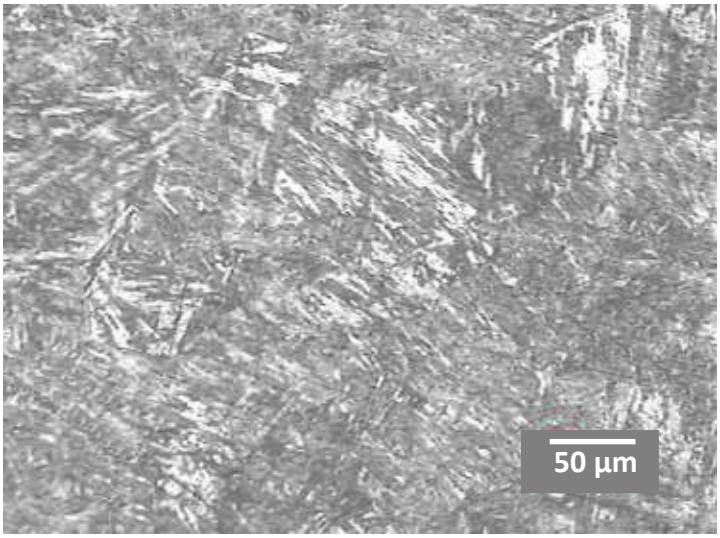


Figure VI.4 : Zone de fusion à structure aciculaire.

V. 1.2. Observation du tube TC(S+G)

Les figures VI.5 – VI.8 représentent la microstructure issues du tube *TC(S+G)*.

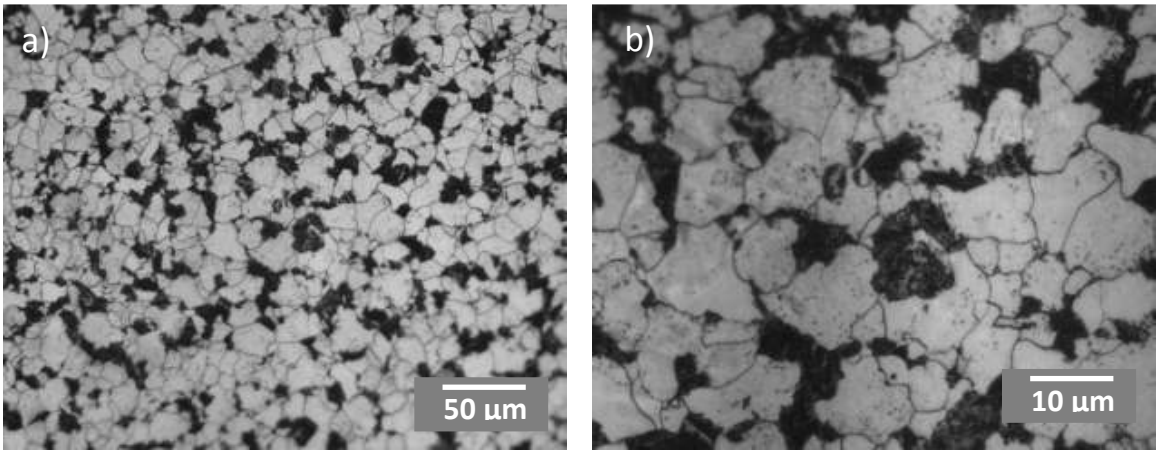


Figure VI. 5 : TC(S+G) métal de base.

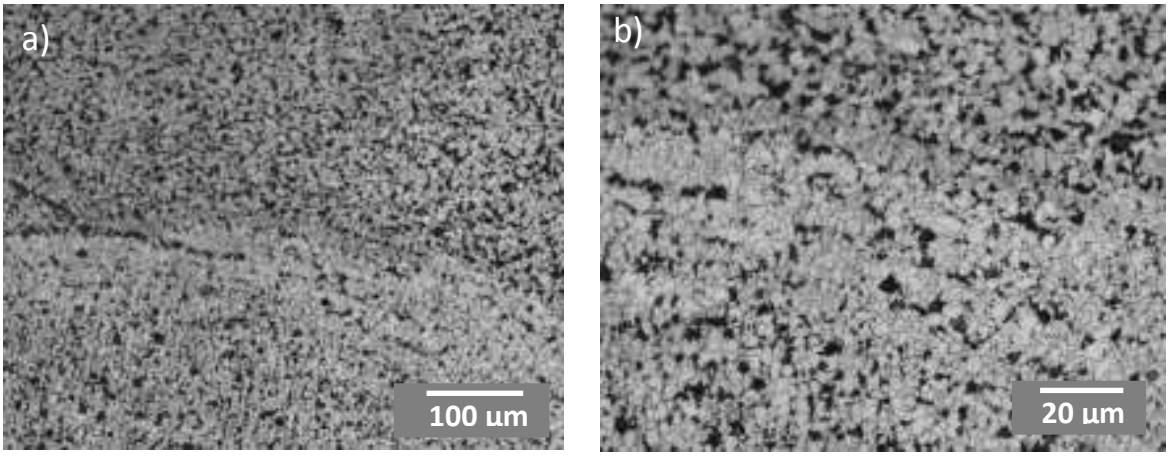


Figure VI. 6 : TC(S+G) zone de transition à l'interface MB / ZAT.

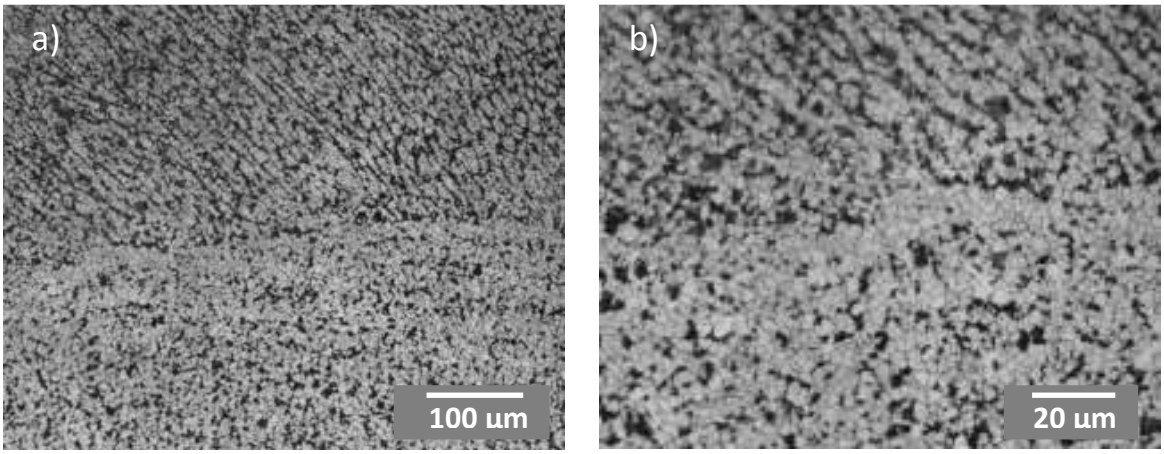


Figure VI. 7 : TC(S+G) zone de fusion entre les deux passes.

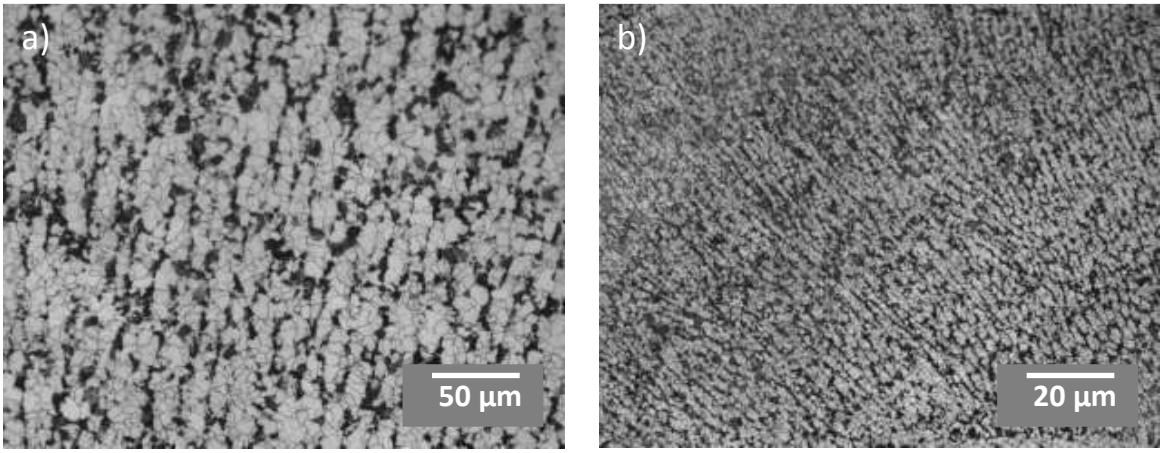


Figure VI. 8 : T2(S+G) zone de fusion la deuxième passe.

On remarque sur la **figure VI.5** une structure biphasée à grains polygonaux. La microstructure brute de notre tube est constituée de deux phases

cristallographiques : la perlite (régions blanches), la ferrite (régions grises) c'est ce que on appelle une structure ferrito-perlitique.

La figure VI.6 montre la zone de liaison qui est une zone de transition entre la métal de base et la zone fondue. Un faible taux de perlite est observé à cause d'une probable dissolution des carbures de fer (Fe_3C) a l'interface métal de base/zone fondue.

Dans **la figure VI.7**, une séparation claire est observée entre les deux passes à l'interface entre la première passe et la deuxième passe . Un phénomène d'appauvrissement en perlite dans cette région est dû au gradient thermique entre les deux passes.

La figure VI.8 montre la structure de la deuxième passe dans la zone de fusion. Une structure orientée caractérise la microstructure de cette deuxième passe. Ce phénomène résulte d'une orientation préférentielle des grains vers le point qui présente la température la plus élevée, c'est-à-dire le point qui se refroidit en dernier.

Comme le refroidissement après le soudage est à l'air, la vitesse de trempe est tellement rapide que des phase hors équilibre tel que la bainite peuvent avoir lieu. Cette phase se forme toujours après soudage mais en superposant deux passes, l'apport thermique de la deuxième passe constitue un traitement thermique qui homogénéise la structure de la première basse et conduit à la formation de phase d'équilibre : ferrite et perlite à des vitesses de refroidissement basses comme l'illustre la figure VI. 7.

2.Présentation et interprétation des résultats des essais mécaniques

2.1.Essai de micro-dureté

2.1.1.pour le tube TN(G)

Les résultats sont présentés sous la forme d’un tableau comme suit :

Tableau VI.1 : Valeurs de la micro-dureté TN(G).

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dureté Hv	178.4	177.6	176.8	183.2	206.3	221.7	210.2	208.3	207.3	218.5

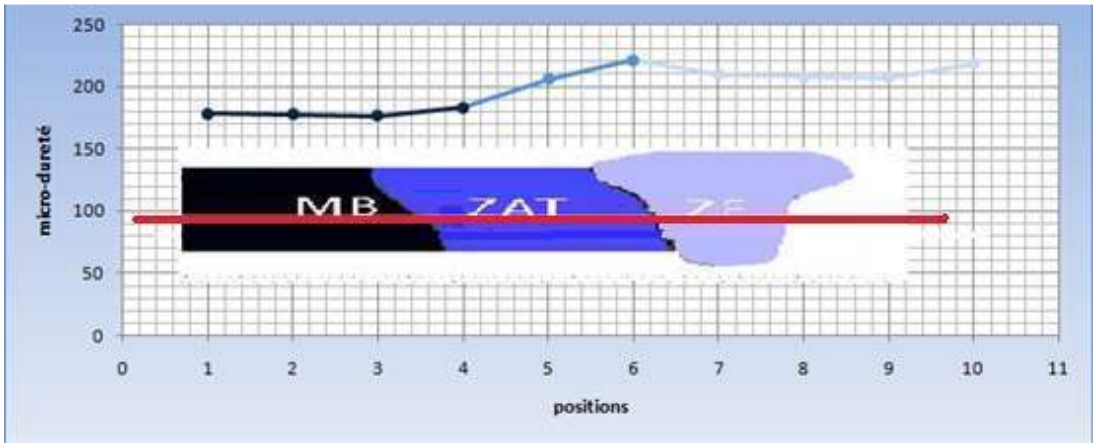


Figure VI.9 : Profil de la Micro-dureté de TN(G)

On apprécie une augmentation des valeurs de dureté au niveau de la ZAT du fait de l'affinement des grains au niveau de cette zone provoqué par la formation de précipités aux joints de grain.

On observe une relative stabilisation de la dureté au niveau de la zone fondue qui est due a la refroidissement rapide de cette dernier.

2.1.2.pour le tube TC(S+G)

- **Micro-dureté de la première passe :**

Les valeurs de micro-dureté sont représentées sous forme de tableau comme suit :

Tableau VI.2 : Valeurs de la micro-dureté de la première passe TC(S+G).

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dureté Hv	160.3	164.4	167.9	159.6	183.2	120.4	129.6	126.3	132	132	131	127.2

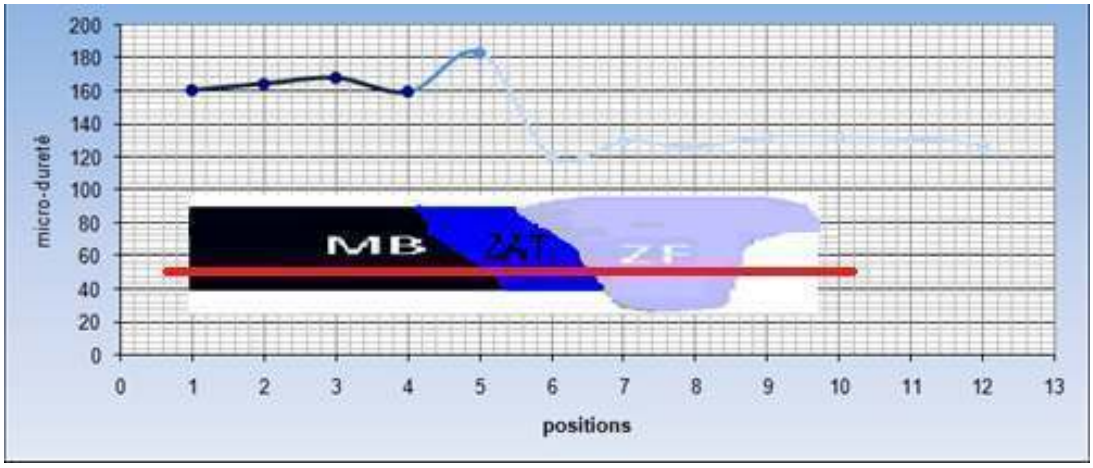


Figure VI-10 : Profil de la Micro-dureté de la première passe TC(S+G)

la différence de la composition chimique entre le métal de base et le métal d'apport cause une différence de dureté entre ces deux zone, en effet dans la figure VI-10 on remarque que la dureté au niveau de la zone fondue est inferieure à celle du métal de base.

- **Micro -dureté de la deuxième passe**

Les valeurs de micro dureté sont représentées sous forme de tableau comme suit :

Tableau VI.3 : Valeurs de la micro-dureté de la deuxième passe TC(S+G)

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dureté HV	151.4	145.4	147.2	151.4	148.4	150.1	148.4	142.6	126.3	147.2	154.5	156.4

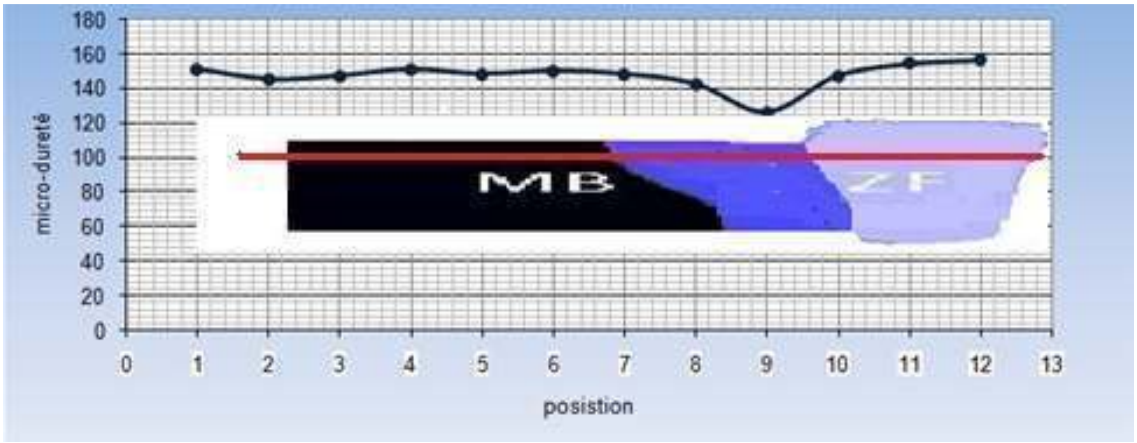


Figure VI-11 : Profil de la Micro-dureté de la deuxième passe TC(S+G)

On remarque une augmentation de la dureté au niveau de la zone fondue

provoquée par le refroidissement rapide de cette passe contrairement à la passe précédente qui a subi un effet thermique de la passe ultérieure.

2.1.3.pour le tube TC(S)

- **Micro-dureté de la première passe**

Les valeurs de micro-dureté sont représentées sous forme de tableau comme suit :

Tableau VI.4: Valeurs de la micro-dureté de la première passe TC(S)

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dureté Hv	188.1	183.2	187.3	186.5	185.6	189.8	198.7	200.6	203.4	196.9	223.9	196	183.2

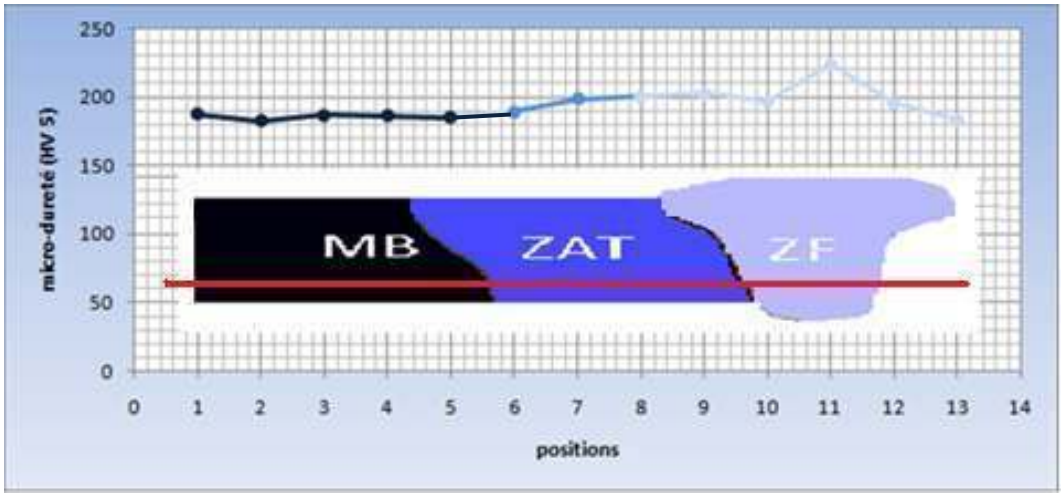


Figure VI-12 : Profil de la Micro-dureté de la première passe TC(S).

Dans la figure ci-dessus on constate une légère augmentation de la dureté dans la zone fondue à cause d'une faible cinétique de refroidissement. L'utilisation d'une électrode enrobée forme, lors de la fusion, un laitier qui diminue l'évacuation de chaleur du métal fondu vers l'extérieur.

- **Micro-dureté de deuxième passe**

Les valeurs de micro-dureté sont données sous forme de tableau IV.5 puis représentées sur le diagramme de la figure IV.13.

Tableau VI.5: Valeurs de la micro-dureté de la deuxième passe TC(S)

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dureté Hv	170.1	172.3	171.5	175.3	190	218.5	231.8	227.2	210.2	229.5	231.8	187.3

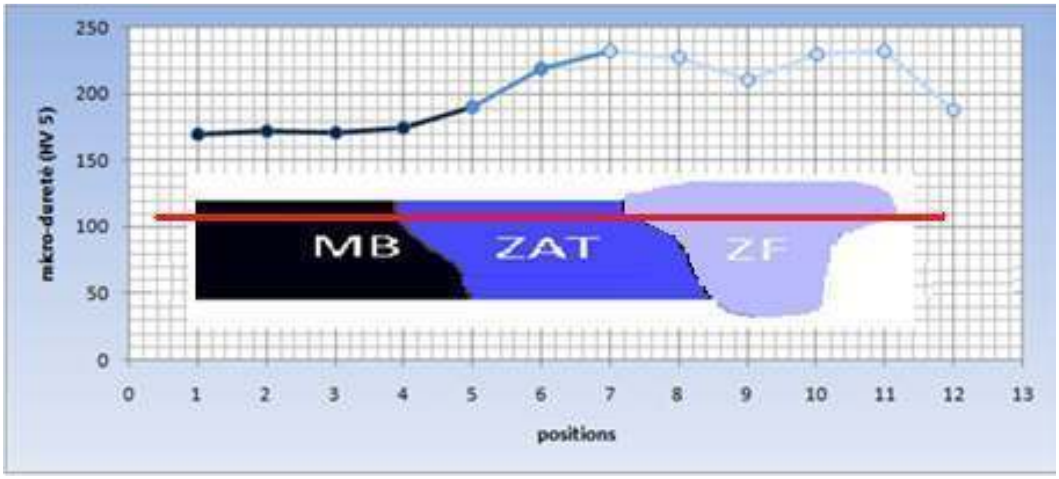


Figure VI.13 : Profil de la Micro-dureté de la deuxième passe TC(S)**.**

Une augmentation remarquable de la micro-dureté au niveau de la zone de fusion est due à un refroidissement rapide comparé à la première passe ; étant donné que celle-ci a fait objet d'une sorte de traitement thermique provoqué par la chaleur la chaleur dégagée par la passe ultérieure.

Tableau 1–Procédé de soudage.

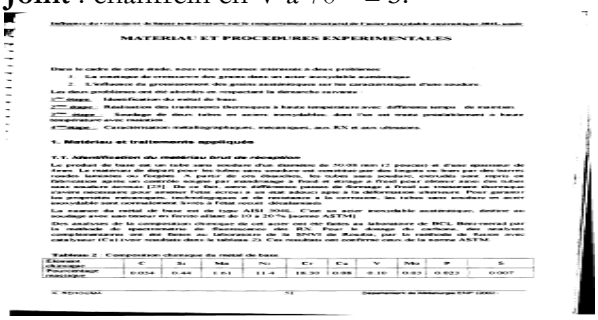
Procédé de soudage : T.I.G (Tungstène Inerte Gaz).	**Atelier de soudage** : C.S.C de chéraga. **Poste de soudage** : S.A.F.
Métal de base : A213 T11 (selon ASTM)	**Métal d'apport** : . ER 80SG sous forme de baguette nue.
Joint : chanfrein en V à 70 ° ± 5.  Les dimensions sont en millimètre.	**Position** : Tube fixe avec axe horizontal. Soudage en position verticale montante. **Courant électrique** : C.C avec polarité (-) à l'électrode de W.
Préchauffage (métal de base) : sans. **Préchauffage** (métal d'apport) : entre 90 et 150 °C.	

Tableau 2 –Paramètres énergétiques de soudage.

N° de passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de la baguette	Gaz de protection
N° 1	60 - 90	11-15	6 mn	1.6	Argon
Contrôle : Visuel. Radiographie. Ultrason.					

Calcul des paramètres de soudage

- **Calcul de la vitesse de soudage**

$$V_S = \frac{l_S}{t_S} \qquad (1)$$

$l_S = 2 \times 25.4$ (mm) $\times$ 3.14 = 159.512 (l_S : longueur soudée ou périmètre du tube).

<u>Tube non traité</u>

$t_S = 6$ (mn) = 6 × 60 (s) = 360 (s) (temps de soudage pour la première passe).
$t_S = 4$ (mn) 50 (s) = 4 × 60 (s) + 50 (s) = 290 (s) (temps de soudage pour la deuxième passe).

La vitesse de soudage pour la première passe est égale à :

$$V_S^1 = \frac{l_S}{t_S^1} = \frac{15.9512cm}{360s} = 0.0443\text{cm/s}.$$

La vitesse de soudage pour la deuxième passe est égale à :

$$V_S^2 = \frac{l_S}{t_S^2} = \frac{15.9512cm}{290s} = 0.055 \text{ cm/s}.$$

La vitesse moyenne de soudage pour les deux passes est égale à :

$$V_m = \frac{V_S^1 + V_S^2}{2} = \frac{0.0443 + 0.055}{2} = 0.04965 \text{ cm/s} \approx 0.05 \text{ cm/s} \approx 3 \text{ cm/mn}.$$

Tableau 1–Procédé de soudage.

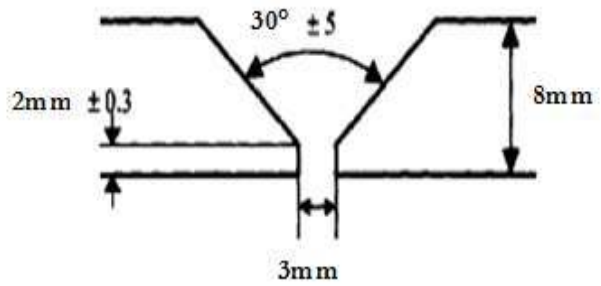
Procédé de soudage : SMAW (électrode enrobé).	**Atelier de soudage** : C.S.C de cheraga. **Poste de soudage** : S.A.F.
Métal de base : T11 (selon ASTM). **Fournisseur** : CSC.	**Métal d'apport** : 9018B3L.
Joint : chanfrein en V à 30 ° ± 5.  Les dimensions sont en millimètre.	**Position** : Tube fixe avec axe horizontal. Soudage en position verticale montante. **Courant électrique** : C.C avec polarité (-) à l'électrode de W.
Préchauffage (métal de base) : sans. **Préchauffage** (métal d'apport) : 350°C pendent 2h	

Tableau 2 –Paramètres énergétiques de soudage.

N° de passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de la baguette	Gaz de protection
N° 1	70-110	40-50	8 mn	2.5	/
N°2	70-110	17-23	6mn	2.5	/
Contrôle : Visuel. Radiographie. Ultrason.					

Calcul des paramètres de soudage

- ✓ **Calcul de la vitesse de soudage**

$$V_S = \frac{l_S}{t_S}$$

$l_S = 2 \times 50.8(\text{mm}) \times 3.14 = 319.024$ (l_S : longueur soudée ou périmètre du tube).

<u>Tube non traité</u>

$t_S = 8$ (mn) $= 8 \times 60$ (s) $= 480$ (s) (temps de soudage pour la première passe).
$t_S = 5$ (mn) 60 (s) $= 6 \times 60$ (s) $= 360$ (s) (temps de soudage pour la deuxième passe).

La vitesse de soudage pour la première passe est égale à :

$$V_S^1 = \frac{l_S}{t_S^1} = \frac{31.902cm}{480s} = 0.066\text{cm/s}.$$

La vitesse de soudage pour la deuxième passe est égale à :

$$V_S^2 = \frac{l_S}{t_S^2} = \frac{31.902cm}{360s} = 0.088 \text{ cm/s}.$$

La vitesse moyenne de soudage pour les deux passes est égale à :

$$V_m = \frac{V_S^1 + V_S^2}{2} = \frac{0.066 + 0.088}{2} = 0.077 \text{ cm/s} \approx 0.08 \text{ cm/s}.$$

CSC	SPECIFICATION DE SOUDAGE (WPS)	WPS N° 13/05/A	Feuille 1

Client : M.Yahia ammar	Lieu: ALGERIE	Proiet . Proiet fin d'etude	Contrat N° : 1

POSITION		TRAITEMENT TERMIQUE	
Bout a Bout:	FIXED 5G	Temperature de maintien :	750°C
Progres. de soudage:	MONTANTE	Duree :	35minutes
Angle:	TOUS		
		GAS	
PRECHAUFFAGE		Pour cent Composition	
Temp. Min :	100°C si T. 0°C; 50°C si T‹ + 5°C	Gaz (MIXTURE)	Debit
Inter passes Temp. Max :	260°C	Ala torche :	NA.
Maintien :	NA.	A l'interieur :	N.A.

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES			
Courent AC o DC :	DC	Polartte :	ELECTRODE NEGATIF/POSITIF
Amps :	50+90	Votts :	17+30

Tungstene Electrode Diametre et Type :	N A
Methode de transf. pour GMAW :	N.A.
Vitesse dêroulement fil :	NA.
TECHNIQUE	
Passes large ou serree :	SERREE et/ou LARGE
Diametre Orifice :	N A
Methode de nelloyage/yeule- Brosse) :	MEULE et/ou BROSSE
Methode de reprise au reverse :	N.A.
Oscillation :	N.A.
Ecartement Orifice :	N.A.
Multiples ou Single Passes :	MULTIPLES
Multiples ou Single Electrodes :	SINGLE
Vitesse de soudage :	6 cm/min.
Nombre des soudeurs :	1
Temps entre passe penetration et ame passe :	6 Min. Max.
Minimum nombre des passes avant de s'arreter :	
Methode de fixation :	1°) PAR CLAMPS EXTERIEUR
Durte fixation :	1°) EN SEQUENCE AVEC L'AVANCEMENT DE LA 1' PASSE
	2°) JUSQUE A REALISATION DE 50% DE LA 1" PASSE

N°de Passe	Proc,ede	Metal d'apport		Courent			Vitesse d'avancement	Autres
		Class.	Diametre	Type/Polarite	Intensitê	Voltage		
1	GTAW	E9018-B3L	2,5	DC -	70-110	26+30		
2	SMAW	E9018-B3L	2,5	DC -	70-110	26+30		

CSC	SPECIFICATION DE SOUDAGE (iNPS)	MOD-409-045 Rev.0	LC C
		WPS N° 13/05/	Feuite 1/2

Client : M.Yahia ammar	Lieu ALGERIE	Projet : Projet fin d'etude	Contrat N°

	QUALIFICATION **PQR N° PA13**
Enb-eprise : **CSC**	
Specification de soudage valable pour :	TUYAUTERIES ET RACCORDEMENTS
Revision N°: 0	Date : 25/05/09
Procéde de soudage : SMAW	Type (Automatique, Manuel, Semi - Auto) : MANUEL
GTAW	

JOINTS

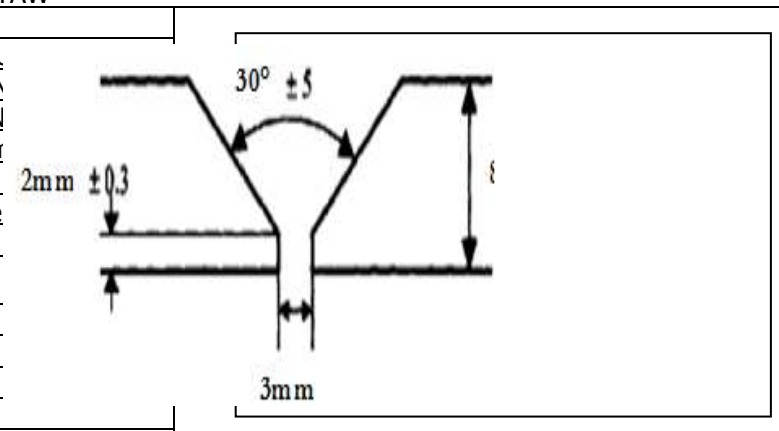
Dessin du joint : V BOU

Support envers nature : N

Materiel support (Type) N

Metallique Ceram

Pas metallique Autre



METAL DE BASE

P - N°. N.A	Group a	avec	P - N°. N.A	Group a
Ou				
Specification Type et Grade :	ASTM T11			
avec Specification Type et Grade :	ASTM T11			
Ou				
Chem. Analyse et Mec. Prop.	414Mpa			
avec Chem. Analyse et Mec. Prop.	414Mpa			
Champ de validite epaisseur :				
Base Metal :	Bout a Bout	< 9mm	Angle	TOUS
Champ de validite diametre:	Bout a Bout	- 60,3 mm	Angle	TOUS
Autres				

METAL D' APPORT

Spec. N°. (Esab) :	OK 76.28			
AWS **N°.** (Class)	E9018-B3L			
Group				
A - **N°.** **N.A.**.	F - N°.	N.A.		
Diametre metal d'apport :	2,5 mm			
Metal d'apport depose :	N.A			
Champ de validite epaisseur :	Bout a Bout	N.A	Angle	**N.A**
Electrode Flux (Class) :	N.A			
Electrode Producteur :	NA			
Nome commercial du Flux :	N.A			
Insert de consummation :	N.A			
Autres				