



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Abderrahim Boubaker

Le : mardi 9 juillet 2019

Effet de traitement de recuit sur les caractéristiques structurales et mécaniques d'un acier faiblement allié de type BS2 soudé : Cas de bouteille à gaz (BAG-Batna)

Jury :

Pr.	Kamel AOUES	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	Mosbah ZIDANI	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Moussa ATHMANI	MAA	Université de Biskra	Examineur

DÉDICACE

*Je dédie ce travaille à mes chers parents qui
grâce à leur
sacrifice et leur amour, Je suis arrivé à ce
niveau.*

A mes sœurs et mes frères.

A touts ma famille

A touts mes Amis

*A toute la promotion de 2éme master de génie
métallurgie
2019*

Abdrrahim Boubaker

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le tout Puissant, pour tout.

J'aimerais tout d'abord remercier mon encadreur le professeur **Mosbah ZIDANI** de m'avoir donné l'opportunité de découvrir le monde de la recherche ; monde que j'ai appris à apprécier énormément. J'aimerais également le remercier pour l'énorme quantité de temps qu'il m'a consacré et pour sa confiance.

Je remercie également le Docteur **Farida KHAMOULI** pour son gracieux accueil, son aide et son soutien.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements aux membres du jury

Je remercie également tous les responsables de l'entreprise SNS BAG de Batna pour leurs accueils, leurs aides, particulièrement Madame A. BOUMAARAF, cadre technique au niveau de l'entreprise.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants de métallurgie pour les formations dispensées, pour la richesse scientifique exprimée et pour tous ses conseils alloués durant les années de formation.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

LISTE DES ABREVIATIONS

Q : Apport calorifique (Kj/cm).

I : Courant (A).

U: Tension (V).

V: Vitesse de soudage (cm/min).

P: pénétration.

L: longueur de soudure.

SAW : soudage automatique à arc électrique immergé sous flux solide.

V: Vitesse de soudage.

ZF: zone fondue.

ZAT: zone affectée thermiquement.

SOMMAIRE

LISTES DES FIGURES.....	(i-ii)
LISTE DES TABLEAUX.....	(iii)
Introduction générale.....	(1)
Chapitre I: Etude bibliographique	
I.1. Les aciers.....	(2)
I.1.1. Définition de l'acier.....	(2)
I.1.2. Structures des aciers.....	(2)
I.1.3. Classifications des aciers	(3)
I.1.3.1. Les aciers au carbone.....	(4)
I.1.3.2. Les aciers de traitements thermiques.....	(6)
I.1.3.3. Les aciers à outils.....	(6)
I.1.3.4. Les aciers inoxydables.....	(6)
I.1.3.5. Aciers faiblement alliés.....	(7)
Chapitre II : Procédés de soudage et le traitement thermique	
II.1. Procédés de soudage.....	(9)
II.2. Soudage sous flux en poudre.	(10)
II.2.1. Description du procédé.....	(10)
II.3. Caractéristiques de la soudure.....	(12)
II.4. Effet des paramètres de soudage sur la morphologie et la Structure du cordon.	(13)
II.5. Différentes zones d'assemblage soudé.....	(15)
II.5.1. Zone fondue	(16)
II.5.2. Zone affectée thermiquement.....	(16)
II.5.3. Zone de liaison.....	(17)
II.5.4. Métal de base.....	(17)
II.5.5. Etude thermique du soudage.....	(17)

II.5.6. Traitement Thermique de recuit..... (18)

II.5.7. Différents types de recuit..... (18)

Chapitre II: Matériaux étudiés et techniques expérimentales

II.1. Matériaux étudié..... (20)

II.1.1. Compositions chimique de l'analyse de coulée en %..... (20)

II.1.2. Caractérisation mécanique..... (20)

II.2. Métal d'apport..... (20)

II.3. Procédé de soudage: SAW (soudage automatique à arc électrique immergé sous flux solide)..... (21)

II.4 . Traitement thermique de recuit (22)

II.5. Traitement thermique..... (22)

II.6. Présentation schématique de la bouteille à gaz et des zones de prélèvement des échantillons étudiées..... (23)

II.7 . Présentation des soudure étudiées..... (23)

II.8 . Prélèvement des échantillons et éprouvette..... (24)

II.9. Découpage et polissage..... (24)

II.10. L'attaque chimique (24)

II.11. Moyens utilisés..... (24)

II.11.1. Microscope optique..... (24)

II.11.2. Essai de la micro dureté..... (25)

II.11.3. Essai de traction..... (26)

Chapitre IV: Résultats et interprétations

Introduction..... (26)

IV.1. Caractérisation Structurale (28)

IV.1.1. Echantillon soudé sans traitement thermique (28)

IV.1.1.1. La micrographie du métal de base (MB) (28)

IV.1.1.2. La micrographie de différentes zones de soudage..... (29)

IV.1.1.3. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT) (29)

IV.1.1.4. La micrographie de la zone fondue (ZF)	(30)
IV.1.2. Echantillon soudé traité thermiquement à 870°C pendant 5mn.....	(31)
IV.1.2.1. La micrographie du métal de base (MB)	(31)
IV.1.2.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT)	(32)
IV.1.2.3. La micrographie de la zone fondue (ZF)	(33)
IV.1.3. Echantillon soudé traité thermiquement à 920°C pendant 5mn.....	(34)
IV.1.3.1. La micrographie du métal de base (MB)	(34)
IV.1.3.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT)	(35)
IV.1.3.3. La micrographie de la zone fondue (ZF)	(36)
IV.1.4. Echantillon soudé traité thermiquement à 970°C pendant 5mn	(37)
IV.1.4.1. La micrographie du métal de base (MB)	(37)
IV.1.4.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT)	(38)
IV.1.4.3. La micrographie de la zone fondue(ZF)	(39)
IV.2. Les Mesures de micro-dureté.....	(40)
IV.3. Caractérisation mécanique.....	(45)
IV.3.1. Essai de traction.....	(45)

LISTES DES FIGURES :

Figure I.1 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde.....	2
Figure I.2 : Structure perlitique.....	3
Figure I.3: Microstructure d'un acier hypereutectoïde	3
Figure I.4: Diagramme Fer – Carbone	4
Figure I.5: Effets des éléments alpha-gène et gamma-gène.....	5
Figure II.6 : Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie	9
Figure II.7: Soudage sous flux en poudre.....	12
Figure II.8: Les différentes zones caractéristiques d'une soudure par fusion	12
Figure II.9: Les différentes zones de soudage.....	15
Figure II.10: Constitution de la zone affectée par la chaleur sur un acier bas carbone.....	19
Figure II.11: répartition de la température dans une soudure $\theta=f(x)$	20
Figure III.12: Procédé de soudage SAW.....	21
Figure III.13: Four CARBOLITE GERO (30-3000C°).....	22
Figure III.14: Schéma de la bouteille spécifiant la zone de prélèvement des échantillons.....	23
Figure III.15: Repère de référence.....	23
Figure III.16: Type d'échantillon prélevé de la bouteille à gaz B11/13.....	24
Figure III.17: Microscope Optique type OLYMPUS CX40.....	25
Figure III.18 : Schéma de position de la micro dureté appliqué.....	25
Figure III.19: Micro uromètre de type ZWICK ROELL.....	26
Figure III.20: Éprouvette pour l'essai de traction.....	26
Figure III.21: Machine de traction ZWICK ROELLZ050 BAG-BATNA.....	27
Figure IV.22: Microstructure de métal de base (acier BS2) observé par microscope optique (X500).....	28
Figure IV.23: Les différentes zones du joint soudé.....	29
Figure IV.24: Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé Par microscope optique. (X500).....	29
Figure IV.25 : les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500)	30
Figure IV.26: Microstructure de métal de base observé par microscope optique (GFF : grain fine ferrite , P : perlite). (X500).....	31

Figure IV.27: Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique (GGF : gros grains ferrite). (X500).....	32
Figure IV.28: les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique (X500).....	33
Figure IV.29 : Microstructure de métal de base observé par microscope optique. (X500).....	34
Figure IV.30: Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique. (X500).....	35
Figure IV.31: les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500).....	36
Figure IV.32: les Microstructures de la métal de base observé par microscope optique. (X500).....	37
Figure IV.33: Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique. (X500).....	38
Figure IV.34: les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500).....	39
Figure IV.35: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et non traité.....	40
Figure IV.36: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 870°C pendant 5mn.....	41
Figure IV.37: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 920°C pendant 5mn	42
Figure IV.38: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 970°C pendant 5mn	43
Figure IV.39: Superposition des courbes de micro-dureté de la tôle soudée non traitée et la tôle soudée traitée.....	44
Figure IV.40: Courbe de traction de la tôle BS2(2.58mm).....	46
Figure IV.41: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 870°C.....	46
Figure III.42: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 920°C.....	47
Figure III.43: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 970°C.....	47

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Tableau des compositions typiques des aciers au carbone	5
Tableau I.2: Récapitulatif des différents aciers faiblement alliés.....	8
Tableau III.3: Analyse chimique sur la coulée.....	20
Tableau III.4: Caractéristiques mécanique de métal étudié.....	20
Tableau III.5: Compositions chimique de métal d'apport	21
Tableau III.6: Température utilisés.....	22
Tableau IV.7 : Résultats des essais de traction.....	45

INTRODUCTION GENERALE

Les aciers au carbone sont largement utilisés dans les différentes branches de l'industrie. On les trouve assemblés par soudage, destinés à la production, au transport et au stockage des produits pétroliers.

La présence d'une soudure dans le matériau entraîne un certain désordre structural qui peut entraîner un changement dans les propriétés mécaniques, ce qui peut être néfaste pour les propriétés de la soudure.

Etant donné que le soudage s'effectue en général en fusionnant du métal par apport de chaleur la répartition de la chaleur sur les soudures donne beaucoup d'informations sur les changements structuraux qui peuvent se produire et les propriétés mécaniques qui sont engendré par ces changements. Des traitements thermiques ont été appliqués pour comprendre leurs comportements, c'est-à-dire leurs évolutions microstructurales et mécaniques.

Dans notre travail, nous étudions **l'effet de traitement de recuit sur les caractéristiques structurelles et mécaniques d'un acier faiblement allié de type BS2 soudé : Cas de bouteille à gaz (BAG-Batna)**, Pour cela nous utilisons les techniques de caractérisation de structure :

- La microscopie optique.
- La mesure de micro-dureté.
- L'essai de traction.

Notre travail est réparti en deux parties principales, la première concerne l'étude bibliographique qui comporte deux chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur les aciers et le deuxième chapitre comporte les procédés de soudage et le traitement thermique.

La deuxième partie de notre travail est consacrée à l'étude expérimentale. Cette partie comprend deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons les méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des deux joints soudés d'un acier BS2 dont l'un a subi un traitement préalable. Dans le chapitre deux, nous présentons les résultats obtenus et leurs interprétations. Enfin nous clôturons le document par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1 Les aciers :

I.1.1. Définition de l'acier :

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2% de carbone. il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer le carbone, 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 comme un acier allié. [1-2]

I.1.2. Structures des aciers :

On distingue trois types d'aciers, selon la teneur en carbone:

- L'acier du type hypoeutectoïde :(%C compris entre 0,002% et 0,85%) formé de perlite (ferrite α +cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique. [3]

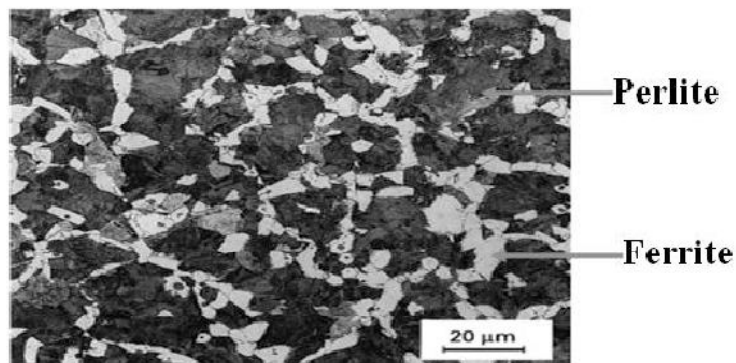


Figure I.1:Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [3]

- L'acier du type eutectoïde :(%C = 0,85%) formé de 100% perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles. [3]

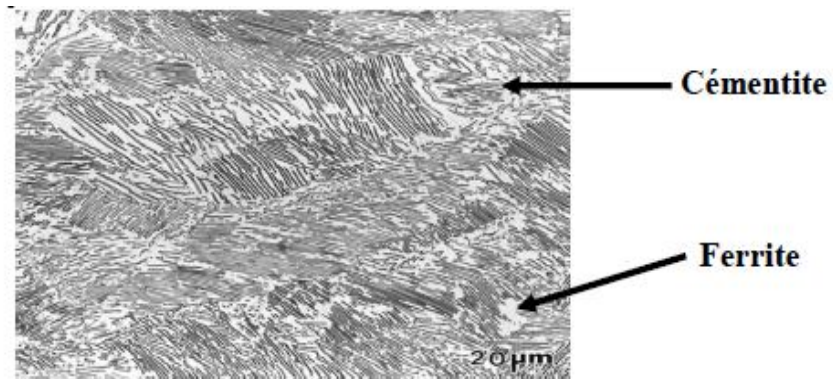


Figure I.2 : Structure perlitique [3]

- L'acier du type hypereutectoïde (%C = [0.85% - 2.1%]) formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite. [3]

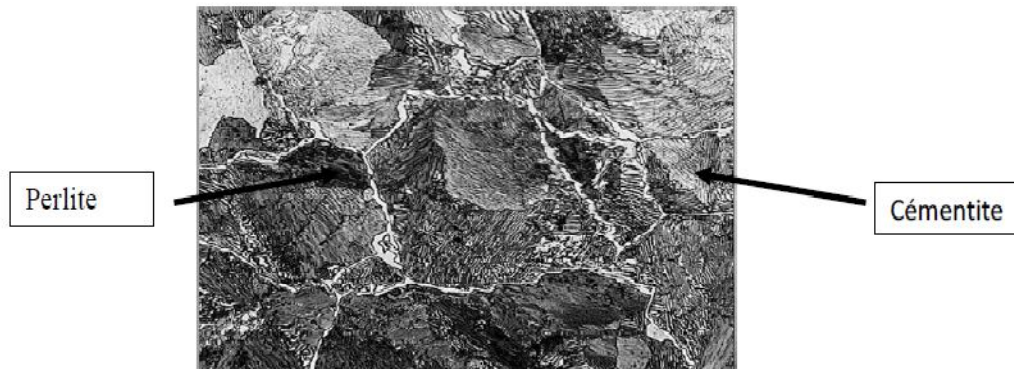


Figure I.3: Microstructure d'un acier hypereutectoïde [3]

I.1.3. Classifications des aciers :

Du fait du nombre élevée d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les présentent un très grand nombre e nuances différentes. on peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'application. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers:

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers d'outils.
- Les aciers inoxydables.

I.1.3.1. Les aciers au carbone :

Le carbone, étant l'élément le moins cher et le plus efficace pour durcir le fer, il est ajouté au fer dans des proportions variant de 0,04 m% à 4 m% pour faire des aciers à faible, moyenne ou forte teneur en carbone (Fig. I.4).[4]

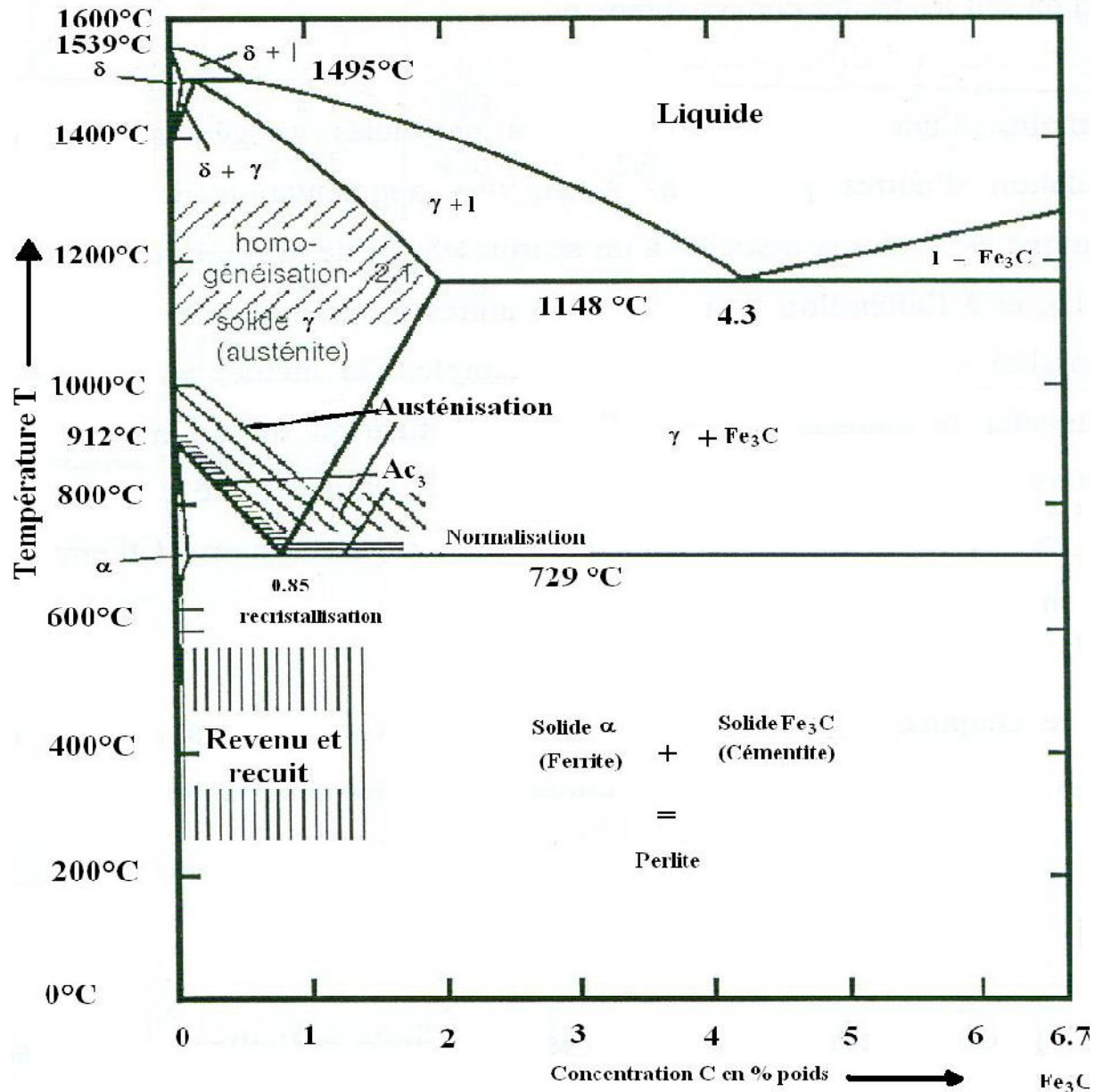


Figure I.4 : Diagramme Fer – Carbone [5]

Les propriétés mécaniques dépendent à la fois de la teneur en carbone et du traitement thermique, les aciers et les fontes ont ainsi un très vaste domaine d'application (tableau I.1).

Tableau I.1 : Tableau des compositions typiques des aciers au carbone [5]

Métal	Composition typique (m%)	Utilisation
Acier doux à faible teneur en carbone	Fe + 0,04 - 0,3 C (+ - 0,8 Mn)	Faibles contraintes (aciers de construction, bonne soudabilité)
Acier à moyenne teneur en carbone	Fe + 0,3 - 0,7 C (+ - 0,8 Mn)	Contraintes moyennes (pièces mécaniques, boulons, écrous, arbres, engrenages)
Acier à forte teneur en carbone	Fe + 0,7 - 1,7 C (+ - 0,8 Mn)	Fortes contraintes (ressorts, outils de coupe, de filage)
Acier faiblement allié	Fe + 0,2 C 0,8 Mn 1 Cr 2 Ni	Fortes contraintes: réservoirs de pression, aéronautique
Acier fortement allié (inoxydable)	Fe + 0,1 C 0,5 Mn 18Cr8Ni	Usage à haute température et anticorrosion, usines chimiques.

- **Éléments α -gènes et γ -gènes :**

Un élément alphagène est un élément qui stabilise la phase CC. Par conséquent il élève la température du point A3 et abaisse celle du point A4, et un élément gammagène est un élément qui stabilise la phase CFC. Par conséquent il abaisse la température du point A3 et élève celle du point A4 (voir la figure I.5)[4]

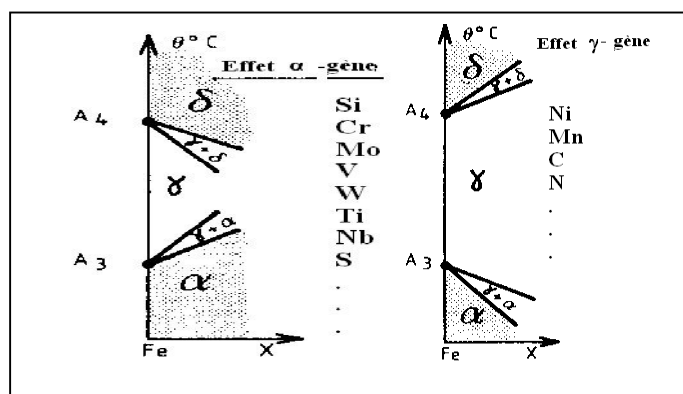


Figure I.5: Effets des éléments alphagène et gammagène [5].

I.1.3.2. Les aciers de traitements thermiques :

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur application en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliée contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'additions (Cr, Ni, V,...).

I.1.3.3. Les aciers à outils :

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé n peut se passer d'outil. la production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage, mais par exemple en Amérique plus de 75 nuances

I.1.3.4. Les aciers inoxydables :

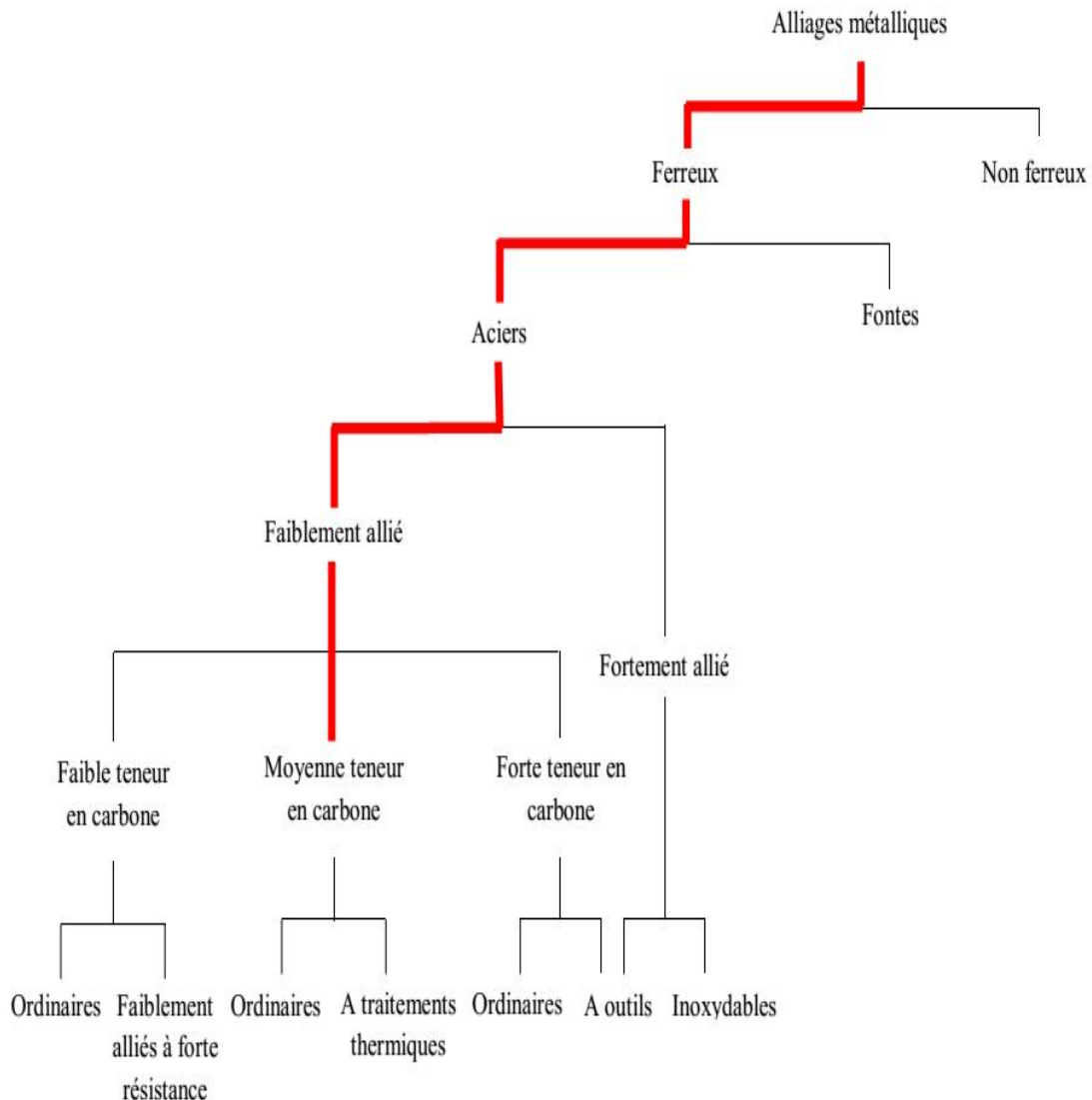
Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02 à 1 %. La résistance à la corrosion est due au chrome qui en présence d'un milieu oxydant forme à la surface de l'acier une couche complexe protectrice qui rend le métal passif, permettant ainsi la protection de ce dernier des milieux agressifs. Notons que la teneur en Chrome doit être supérieure ou égale à 10,5 %. D'autres éléments tels que "Ni, Mo, N, S, Si, Nb....." Sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion ou encore pour favoriser certaines structures par rapport à d'autres. [7]

*Les différents types d'aciers inoxydables:

- Les aciers inoxydables ferritiques.
- Les aciers inoxydables austénitiques.
- Les aciers inoxydables austéno-ferritique(DUPLEX).
- Les aciers inoxydables martensitiques.

I.1.3.5. Aciers faiblement alliés [8]:

La production d'alliages à base de fer, c'est-à-dire ceux dont le fer est le principale constituant, est supérieure à celle de tous les autres types de métal.



Ce sont des aciers ou la teneur en manganèse est supérieure ou égale à 1% et ou la teneur de chaque élément d'alliage est inférieure à 5%. La désignation comprend dans l'ordre :

- Un nombre entier, égal à cent fois pourcentage de la teneur moyenne en carbone.
- Un ou plusieurs groupes de lettre qui sont les symboles chimiques des éléments d'addition rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes.

Une suite de nombre rangé dans le même ordre que les éléments d'alliage, et indiquant le pourcentage de la teneur moyenne de chaque élément.

Tableau I.2: Récapitulatif des différents aciers faiblement alliés

ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS			
Nuances usuelles*		Traitement de référence	
		R min	Re min
38 Cr 2	(38 C 2)	800	650
34 Cr 4	(32 C 4)	880	660
37 Cr 4	(38 C 4)	930	700
41 Cr 4	(42 C 4)	980	740
55 Cr 3	(55 C 3)	1 100	900
100 Cr 6	(100 C 6)	HRC ≥ 62	
25 Cr Mo 4	(25 CD 4)	880	700
35 Cr Mo 4	(34 CD 4)	980	770
42 Cr Mo 4	(42 CD 4)	1 080	850
16 Cr Ni 6	(16 NC 6)	800	650
17 Cr Ni Mo 6	(18 NCD 6)	1 130	880
30 Cr Ni Mo 8	(30 CND 8)	1 030	850
51 Cr V 4	(50 CV 4)	1 180	1 080
16 Mn Cr 5	(16 MC 5)	1 080	835
20 Mn Cr 5	(20 MC 5)	1 230	980
36 Ni Cr Mo 16	(35 NCD 16)	1 710	1 275
51 Si 7	(51 S 7)	1 000	830
60 Si Cr 7	(60 SC 7)	1 130	930

NOTA :
 Cette symbolisation s'applique aussi aux aciers non alliés de décolletage.

Chapitre II : Procédés de soudage et le traitement thermique

II.1. Procédés de soudage :

Le soudage est un opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.[9]

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (Fig.5) [4].

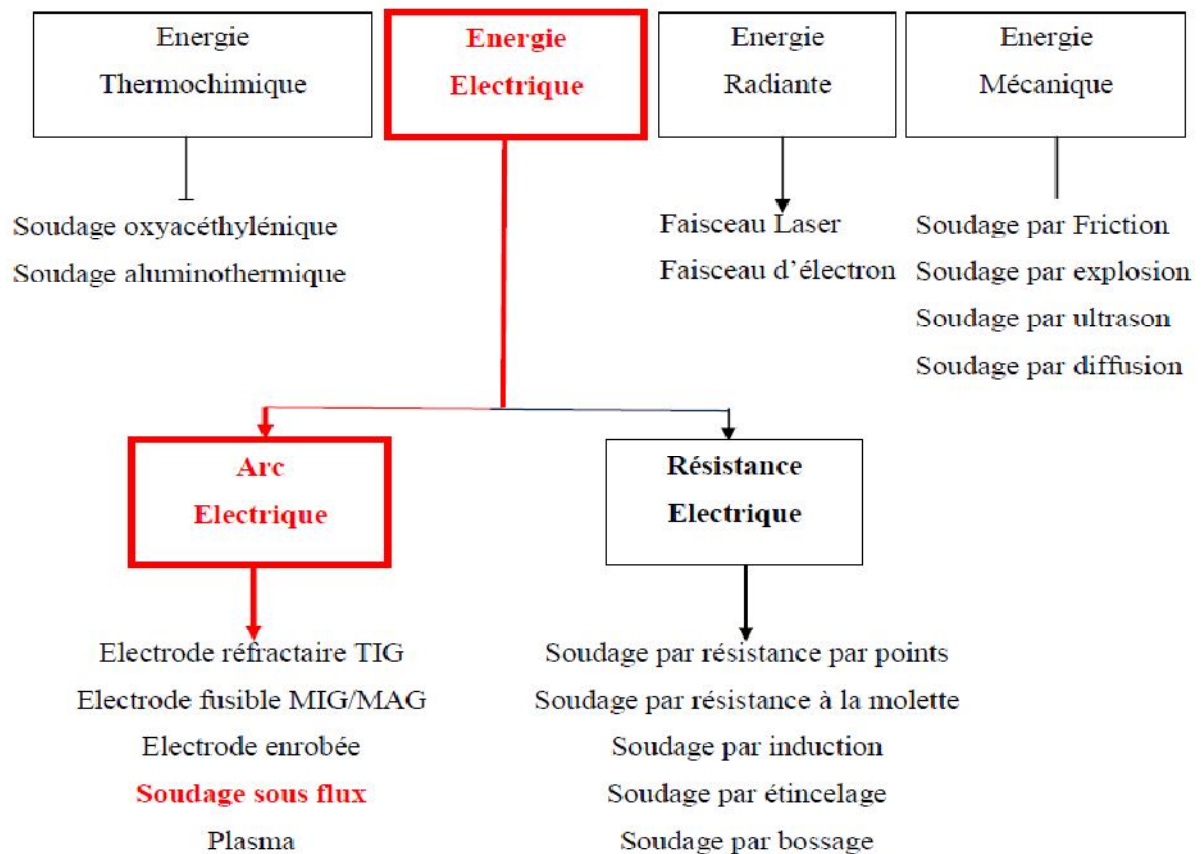


Figure II.6: Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie [9].

II.2. Soudage sous flux en poudre. [10] :

II.2.1. Description du procédé :

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multihoraires. Ce procédé est aussi appelé soudage à l'arc submergé (submerged arc welding processou SAW).

Le soudage sous flux se conduit d'une manière presque exclusivement automatique avec des installations dont le principe est représenté sur la figure II7 et qui comportent essentiellement :

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

Comme dans toute automatisation, la tête de soudage sous flux est fixée sur un mécanisme selon les deux variantes essentielles : tête fixe, pièce mobile ou inversement.

Ainsi que l'indique la figure II.8, le courant est amené à l'électrode fusible par le tube-contact, ou guide-fil, sur les parois duquel elle frotte en permanence.

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact ;
- appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir:
 - ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc,

- Mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide,
- Avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;
- Commande du déplacement relatif tête-pièce pour former le cordon de soudure.

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

- Le rend invisible.
- Accroît son rendement.
- Elimine les projections.

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

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (**Figure I.7**), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage (au moyen d'un marteau) et qui est lui-même recouvert du surplus de poudre non fondue dans l'opération et récupérable, après traitement éventuel, pour un nouvel emploi.

La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même.

L'emploi de poudre limite l'application du soudage sous flux à la seule position à plat, éventuellement (mais moyennant des artifices de retenue) en corniche.

Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant réutilisation. Cela peut s'effectuer en cycle fermé par filtrage, séchage puis réalimentation.

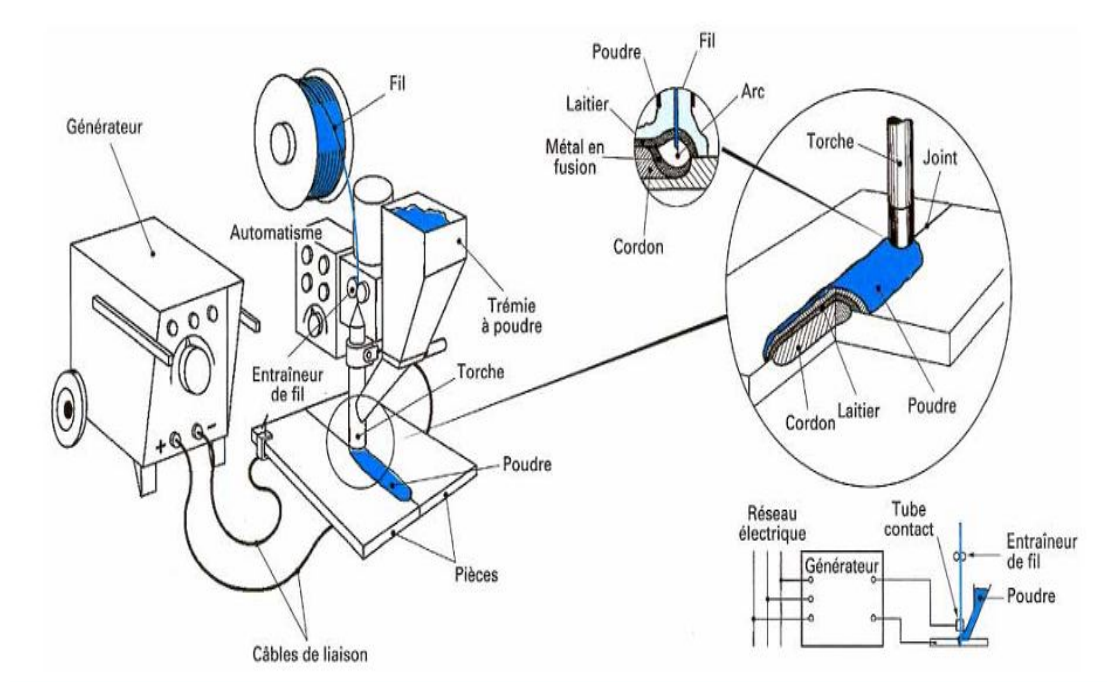


Figure II.7 – Soudage sous flux en poudre[11]

II.3. Caractéristiques de la soudure :

- **Définition :**

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 [12-13][14-15].

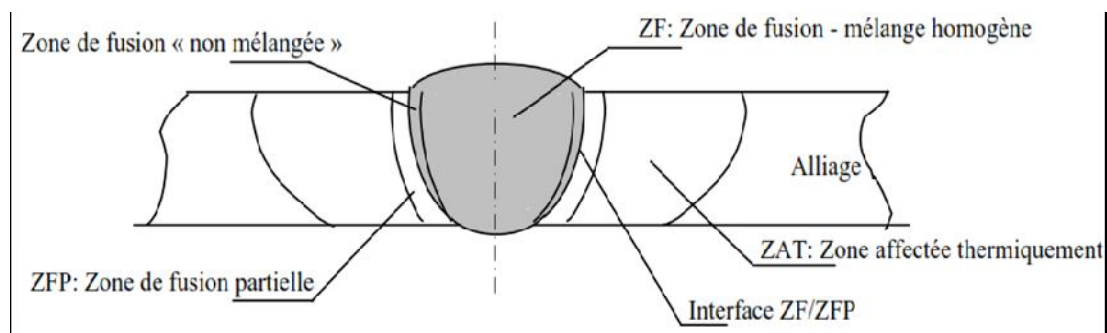


Figure II.8: Les différentes zones caractéristiques d’une soudure par fusion [16].

II.4. Effet des paramètres de soudage sur la morphologie et la

Structure du cordon :

La constitution du bain de fusion est largement déterminée par le gradient de température qui se produit pendant le soudage. Ce gradient de température dépend de plusieurs variables telles que la densité de courant, la distribution d'énergie de l'arc, le rendement de l'arc et les propriétés thermophysiques du matériau. Ces variables, en effet, sont fonction des paramètres de soudage tels que le courant de soudage, la longueur d'arc, la vitesse de soudage, la conicité d'électrode et le gaz de protection. Nous allons voir ci-après l'influence de ces paramètres sur la morphologie du cordon.[17].

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres puissance et vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement.

La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient plus rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites [18] qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques.

- **Courant de soudage :**

Le courant de soudage est un paramètre qui détermine largement la morphologie du bain de fusion [19]. Un courant de plus en plus fort entraîne un accroissement de l'apport calorifique, ce qui favorise l'augmentation du volume du métal fondu. La force électromagnétique, dont le rôle sur la pénétration du cordon est très important, est en fait fonction de la densité de courant.[17]

- **longueur de l'arc :**

La longueur d'arc (distance électrode-pièce) intervient sur la formation du cordon par son effet sur la tension d'arc. Pour un courant donné, la tension d'arc varie en

fonction de la longueur d'arc. Cette variation modifie l'apport calorifique, ce qui influe naturellement sur la morphologie du cordon.[17]

- **Vitesse de soudage :**

L'influence de la vitesse de soudage peut être évaluée par son effet sur l'apport calorifique linéaire de soudage. L'apport calorifique est lié à la vitesse de soudage par la relation:

$$Q = \frac{I \cdot U}{v}$$

avec:

Q : Apport calorifique (Kj/cm).

I : Courant (A).

U: Tension (V).

V: Vitesse de soudage (cm/min).

Une augmentation de la vitesse de soudage diminue la quantité de chaleur par unité de longueur de soudure, ce qui aboutit à une diminution de la section de la zone fondue. Cependant, plusieurs auteurs [20] ont constaté que le rendement d'arc est supérieur quand la vitesse de soudage est relativement élevée.

Diminution de la vitesse de soudage favorise la pénétration. Il précise cependant, que cette diminution doit être très importante pour que l'augmentation de la pénétration puisse être obtenue. UPTAK [21]

En l'absence d'éléments tensio-actifs, ont constaté que le rapport P/L augmente légèrement quand la vitesse croît. BUGARDT et HEIPLE [22]

La vitesse de soudage gère aussi la température maximale ainsi que le gradient thermique dans le bain de fusion. L'influence de la vitesse sur la température a été étudiée par SUNDELL et al. [23]) en soudage d'un acier la miné à froid. Ils ont remarqué qu'avec le même apport calorifique, l'augmentation de la vitesse de soudage diminue la température maximale et le gradient de température à la surface de la soudure. Ils ajoutent, cependant, que cette diminution peut être également due à l'élargissement de la distribution thermique de l'arc, dépendant lui-même d'un courant de soudage volontairement augmenté en vue de maintenir le même apport calorifique.

- **Conicité d'électrode :**

L'effet de la géométrie de l'électrode sur la morphologie du cordon a fait l'objet de nombreux travaux. Les conclusions auxquelles ont abouti les différents auteurs sont

très variées. SAVAGE et al.[24] ont constaté, par exemple, que l'accroissement de l'angle de conicité de l'électrode favorise systématiquement l'augmentation de la pénétration et du rapport P/L. De même LJPTAK [25] a remarqué, lors du soudage d'aluminium en forte épaisseur, que le rapport P/L augmente lorsque l'électrode devient moins pointue.

II.5. Différentes zones d'assemblage soudé :

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[26].

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) [26].

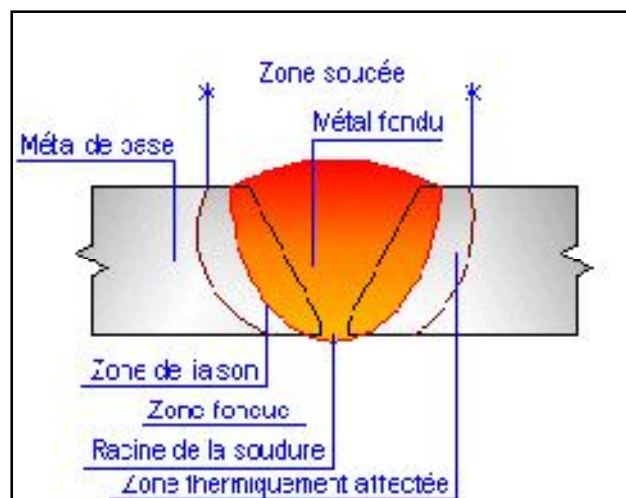
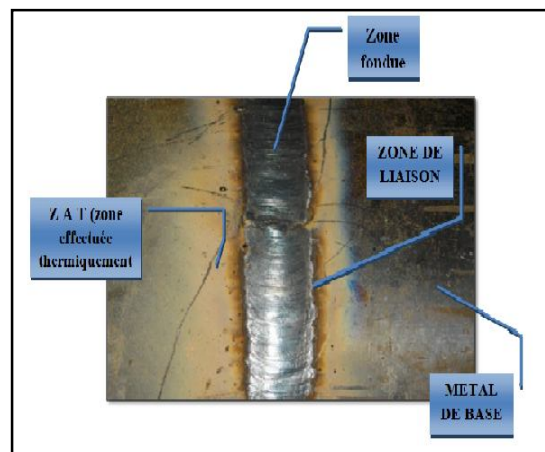


Figure II.9. Les différentes zones de soudage.

II.5.1. Zone fondue :

Nommée ZF zone où l'état liquide a été atteint pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport [27], et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté [28]. Cette zone est séparée de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) par la ligne de fusion qui caractérise l'ensemble des points ayant atteint la température de solidus. [29]

II.5.2. Zone affectée thermiquement :

Nommée ZAT c'est la zone solide de l'assemblage soudé où le comportement du matériau est fortement influencé par le champ de température du au soudage. Le terme ZAT a une signification toute particulière lorsque le matériau du métal de base ou du métal d'apport subit des transformations structurales : c'est la zone où la transformation a lieu [29].

Cette Z.A.T se décompose elle-même en trois grandes parties : la zone où la transformation est complète, la zone où la transformation est partielle et enfin la zone revenue (Z.R) où la température maximale atteinte est légèrement inférieure à la température de début de transformation mais où le comportement du matériau est légèrement modifié par rapport à celui du métal de base[29].

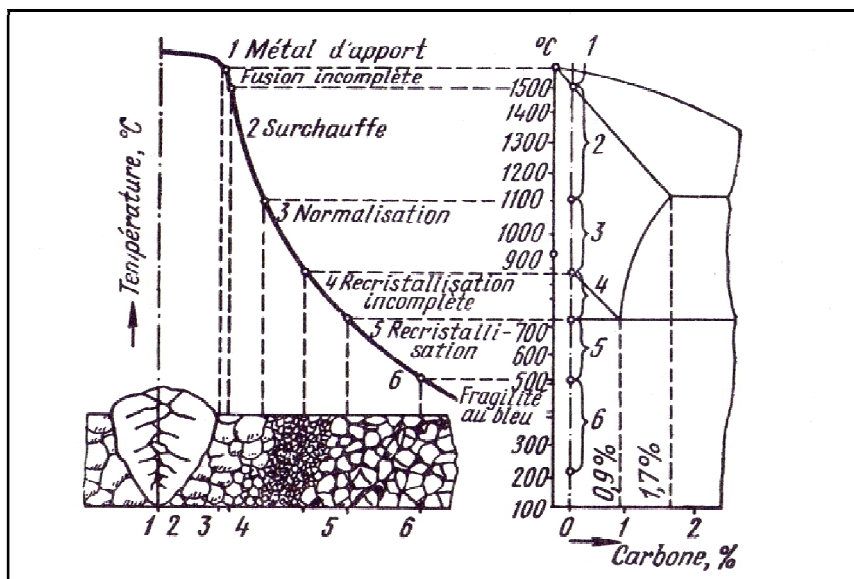


Figure II.10 : Constitution de la zone affectée par la chaleur sur un acier au carbone.

II.5.3. Zone de liaison :

C'est une zone très mince qui se trouve entre la zone fondue ZF et la zone affectée thermiquement. Dans cette zone se déroule la transformation de phase à l'état liquide et elle correspond aussi à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu débute [29].

II.5.4. Métal de base :

Au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée [30].

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celle du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage[30].

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait :

- des rapides changements de température (élévation de température et refroidissement),
- du faible temps de maintien de la température maximale,
- de la localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

II.5.5. Etude thermique du soudage:

L'intérêt de la connaissance thermique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération et par suite de prévoir ces phénomènes pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires. Pour pouvoir interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage, en un point donné de l'assemblage, il faut connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps, en tout point de l'assemblage (Figure. II.11) [31].

Les moyens mis en œuvre sont de deux ordres. Expérimental se faisant à l'aide de thermocouples dont la soudure chaude est insérée, et mathématique se faisant par des simulations ou des modèles numériques permettant l'étude métallurgique des effets du soudage. Des logiciels ont été développés dans ce domaine nous citons comme exemple le logiciel ANSYS (utilisé pour simuler les cycles thermiques de soudage). [31]

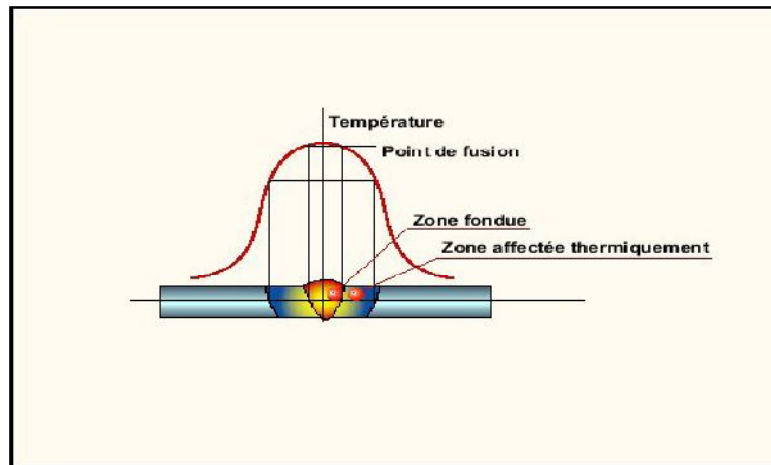


Figure II.11 : répartition de la température dans une soudure $\theta = f(x)$

II.5.6. Traitement Thermique de recuit.[32] :

Le rôle principal d'un recuit est de conférer à l'alliage une structure la plus proche possible de sa structure d'équilibre.

Les recuits ont les fonctions suivantes :

- Homogénéiser un alliage du point de vue tant chimique que micrographique : c'est, par exemple, le cas des alliages moulés, hétérogènes et de taille de grains non uniforme.
- Modifier sa structure micrographique, par exemple par coalescence d'une phase ou par affinement du grain (normalisation).
- Restaurer la structure d'un alliage après écrouissage, soudage, ou traitement thermique antérieur.
- Diminuer les contraintes internes (relaxation).

Les buts des recuits sont principalement les suivants :

- Adoucissement favorisant la mise en forme par déformation plastique ou par usinage
- Préparation de l'alliage avant un autre traitement thermique ;
- Stabilisation de l'alliage, surtout d'un point de vue dimensionnel, mais aussi pour améliorer sa résistance aux efforts mécaniques ou à la corrosion

II.5.7. Différents types de recuit.[33] :

Suivant l'état structural ou mécanique de l'acier et le but à atteindre, on peut distinguer plusieurs genres de recuit :

- **Le recuit complet**, généralement appelé simplement recuit, qui a pour but de provoquer la formation d'une structure de dureté minimale favorable à l'usinage ou à la déformation à froid.

- **Le recuit de détente**, dont la finalité est de faire relâcher plus ou moins complètement les tensions résiduelles dues aux opérations thermiques ou mécaniques antérieures.
- **Le recuit de globulisation**(ou sphéroïdisation), qui donne à l'acier une structure la plus homogène possible avec des carbures globulaires très favorable pour la déformation ou la frappe à froid.
- **La normalisation**, dont le but est d'effacer des précipitations de carbures aux joints de grains, néfastes pour les propriétés d'emploi.
- **Le recuit d'adoucissement**, qui atténue l'état des contraintes le plus complètement possible, sans changer la structure de trempe

Chapitre III: Matériaux étudiés et techniques expérimentales

III.1. Matériaux étudiés :

Pour réaliser cette étude nous avons choisi l'acier de nuance BS2 (P265NB) conforme à la norme EN 10120, l'épaisseur de matériau 2.58 ± 0.13 mm. L'acier utilisé dans l'industrie de bouteilles à gaz B13, à l'entreprise (SNS) Batna.

III.1.1. Compositions chimique de l'analyse de coulée en %:

La composition chimique de l'analyse de coulée de cet acier est donnée dans le tableau suivant:

Tableau III.3: Analyse chimique sur la coulée. [34]

Nuance d'acier		C max	Si max	Mn min	P max	S Max	Al min	N max	Nb max	Ti Max
Désignation Symbolique	Désignation Numérique									
P265NB	1.0423	0.19	0.25	0.40	0.025	0.015	0.020	0.009	0.050	0.03

III.1.2 . Caractéristiques mécanique:

Les caractéristiques mécaniques sont indiquées dans le tableau suivant:

Tableau III.4: Caractéristiques mécanique de métal étudié.

Acier		Limite supérieure d'écoulement R_{eH} min MPa	Résistance à la Traction R_m min Mpa	Allongement après rupture pour une épaisseur t de produit(en mm) $T < 3$ ($L_0 = 80$ mm) %	Température normalisation (à titre indicatif)°C
Désignation Symbolique	Désignation Numérique				
P265NB	1.0423	265	410 – 500	24	890 – 930

III.2 . Metal d'apport:

Le métal d'apport est un fil d'acier cuivré EN756-S1 le diamètre du matériau d'apport est 1.6 mm, La composition chimique de métal d'apport est donnée dans le tableau suivant (Tableau II.4).

Tableau III.5: Compositions chimique de métal d'apport. [4]

Eléments	Teneur en pourcentage	
	Minimum	Maximum
C	0,06	0,12
Mn	0,40	0,60
P	-	0,025
S	-	0,025
Si	-	0.01

III.3 . Procédé de soudage: SAW (soudage automatique à arc électrique immergé sous flux solide) :

Le soudage circulaire de deux embouts du bouteille à gaz est effectué par procédé automatique, l'arc créé entre le fil et la pièce à souder est protégé par une couche de flux. Cette couche de flux protège le bain de fusion de la contamination (oxydation du bain) et concentre l'apport d'énergie dans le joint. Le flux fond, se mêle intimement au bain de fusion, avec une action des oxydantes, purifiante et enrichissante sur le métal en fusion, puis remonte à la surface du bain de métal pour former le laitier. [35]



Figure III.12: Procédé de soudage SAW.

Caractéristiques d'arc:

Le diamètre des fils utilisés en procédé arc submergé est 1.6 mm, le type de courant de soudage et le courant contenu avec une polarité positif (500A, 31V).

III.4 .Traitement thermique de recuit :

Pour cette étude nous avons utilisés trois température déférents après de soudage circulaire sur la diamètre extérieure de deux embouts du bouteille à gaz.

Tableau III.6: Température utilisés

T 1	T 2	T 3
870C°	920C°	970C°

III.5. Traitement thermique:

Toutes les bouteilles seront soumises après soudage à un traitement thermique de recuit de normalisation à 920 °C, pendant 5min.

Et comme le montre la Figure II.10 elles séjourneront en suite dans une chambre de refroidissement dans une atmosphère calmé de telle sorte que la température n'atteigne pas 300 °C à la sortie du four pendant 20 min. [4]



Figure III.13: Four CARBOLITE GERO (30-3000C°)

III.6. Présentation schématique de la bouteille à gaz et des zones de prélèvement des échantillons étudiées:

La Figure III.14 montre clairement la zone de prélèvement dans la bouteille de nos échantillons.

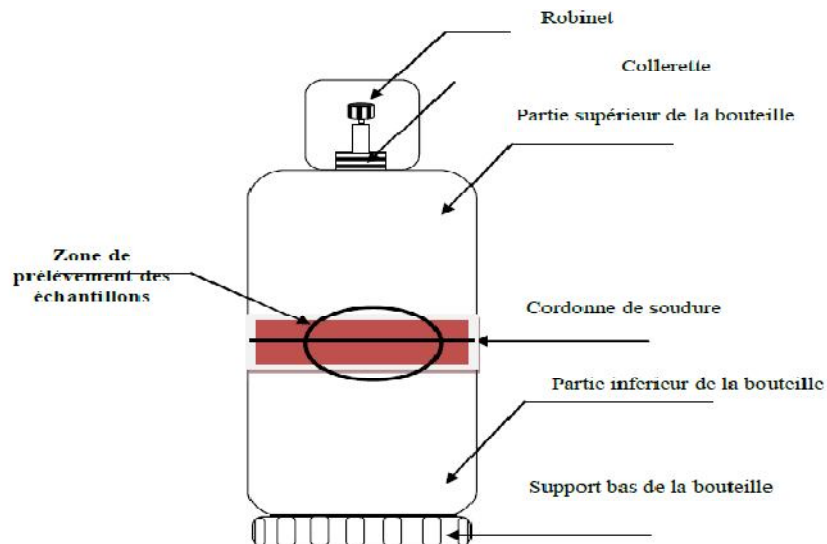


Figure III.14: Schéma de la bouteille spécifiant la zone de prélèvement des échantillons.

III.7. Présentation des soudures étudiées:

Les soudures étudiées le long de toutes les expérimentations engagées dans ce présent manuscrit ont été réellement réalisées selon le repère de la Figure III.15.

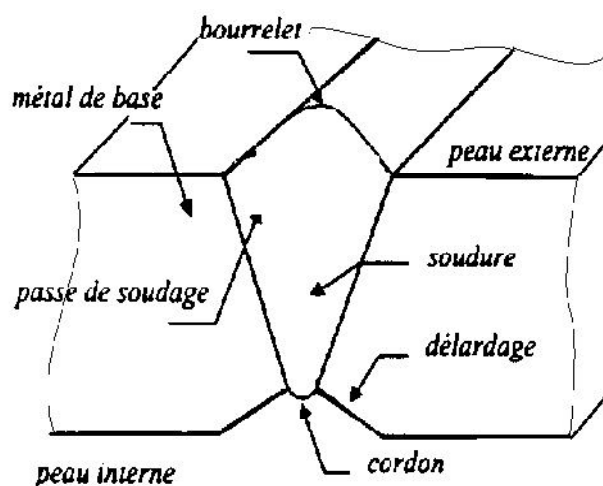


Figure III.15: Repère de référence. [4]

III.8 . Prélèvement des échantillons et éprouvette:

Le découpage et usinage des échantillons pour les observations métallographiques, les mesures de micro dureté et éprouvettes des essais traction a été effectué au niveau des ateliers d'usinage de BAG Batna.

III.9. Découpage et polissage:

Le découpage s'effectue à froid à l'aide d'une scie pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau. les échantillons sont découpés de manière transversales [4] de longueur 5 cm.



Figure III.16: Type d'échantillon prélevé de la bouteille à gaz B11/13.

Les échantillons sont polis mécaniquement avec du papier abrasif de granulométrie croissante 120-180-320-400-600-800-1200 et ensuite avec un papier de finition et à l'aide d'une pâte diamantée de 1 μ m.

III.10 . L'attaque chimique :

Pour les observations aux microscopes optiques. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée, séchés, puis attaqués chimiquement par le Nitale. C'est une solution composée de 96% d'éthanol et de 4% d'acide nitrique, la durée d'attaque varie entre 20 et 45 secondes.

III.11 . Moyens utilisés:

III.11.1 Microscope optique:

L'utilisation du microscope optique nous à permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons. Les observations métallographiques sont effectuées

sur un microscope (Figure II.14). Cette technique nous permet d'observer les phases et de commenter leurs morphologies respectives. l'appareil utilisé est un microscope optique type (OLYMPUS CX40).



Figure III.17: Microscope Optique type OLYMPUS CX40

III.11.2 .Essai de la micro dureté:

La micro dureté est la résistance qu'une matière donnée s'oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur choisi comme référence.

Les essais de mesure de micro dureté par pénétration se font par l'application d'une charge connue, d'une sphère en métal dur ou d'une pyramide en diamant, normalement sur une face plane polie de l'échantillon à tester.

Il y a plusieurs méthodes de mesure de la micro dureté: Brinell, Rockwell et Vickers. Dans notre étude, nous avons choisi la méthode Vickers, la charge appliquée est de 500g.

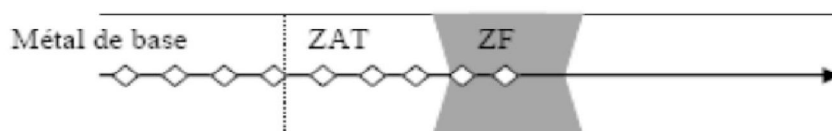


Figure III.18: Schéma de position de la micro dureté appliqué.

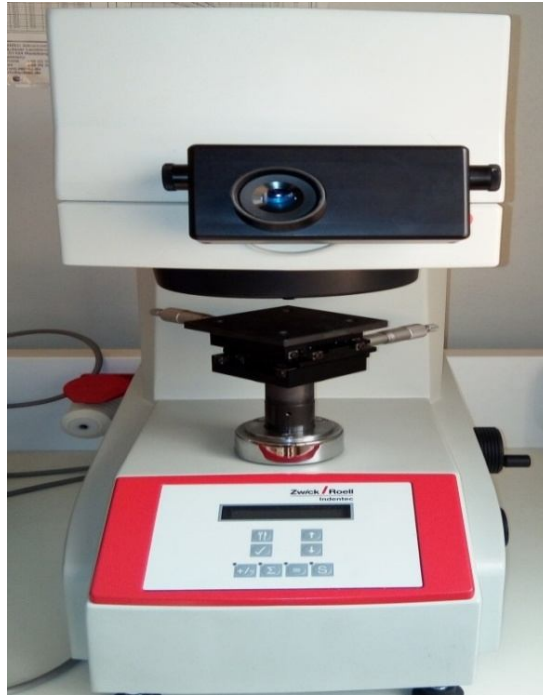


Figure III.19: Micro uromètre de type ZWICK ROELL.

III.11.3 .Essai de traction:

Six (06) éprouvettes, de longueur de 200mm et de 25mm de largeur, sont prélevées de chaque configuration d'assemblage (homogène et hétérogène) dans le sens transversal au cordon de soudure.

- **Usinage des éprouvettes:**

Toutes les éprouvettes de traction ont été préparées selon la norme européenne (NF EN 1442+A1).

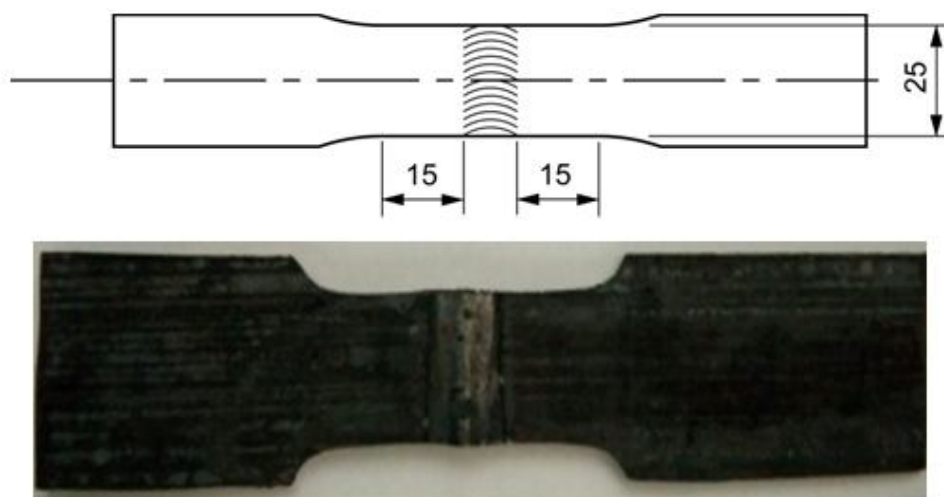


Figure III.20: Éprouvette pour l'essai de traction.

- **Equipement utilisé pour l'essai de traction:**

L'essai de traction est réalisé sur une machine électromécanique **ZWICK ROELL Z050**. l'essai conduit dans l'air et température ambiante (20 -24 °C). l'appareil est doté d'un logiciel lié à la machine de traction.



Figure III.21: Machine de traction ZWICK ROELLZ050 BAG-BATNA.

Chapitre IV: Résultats et interprétations

Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats de l'étude de l'acier (acier BS2) après soudage SAW et aussi après soudage et traitement thermique.

IV.1. Caractérisation Structurale :

IV.1.1. Echantillon soudé sans traitement thermique :

IV.1.1.1. La micrographie du métal de base (MB):

L'observation au microscope optique du métal de base (acier BS2) a montré une structure Ferito-perlitique. La matrice de base est composée de grains ferritiques. D'autre part, on constate bien des colonies de perlite mais avec une quantité plus faible par rapport à la phase ferritique car notre acier est à faible pourcentage au carbone (0.19 %). On a remarqué aussi que les grains ferritiques sont orientés dans un sens privilégié, c'est le sens de laminage de la tôle utilisée dans la fabrication de la bouteille gaz [35].

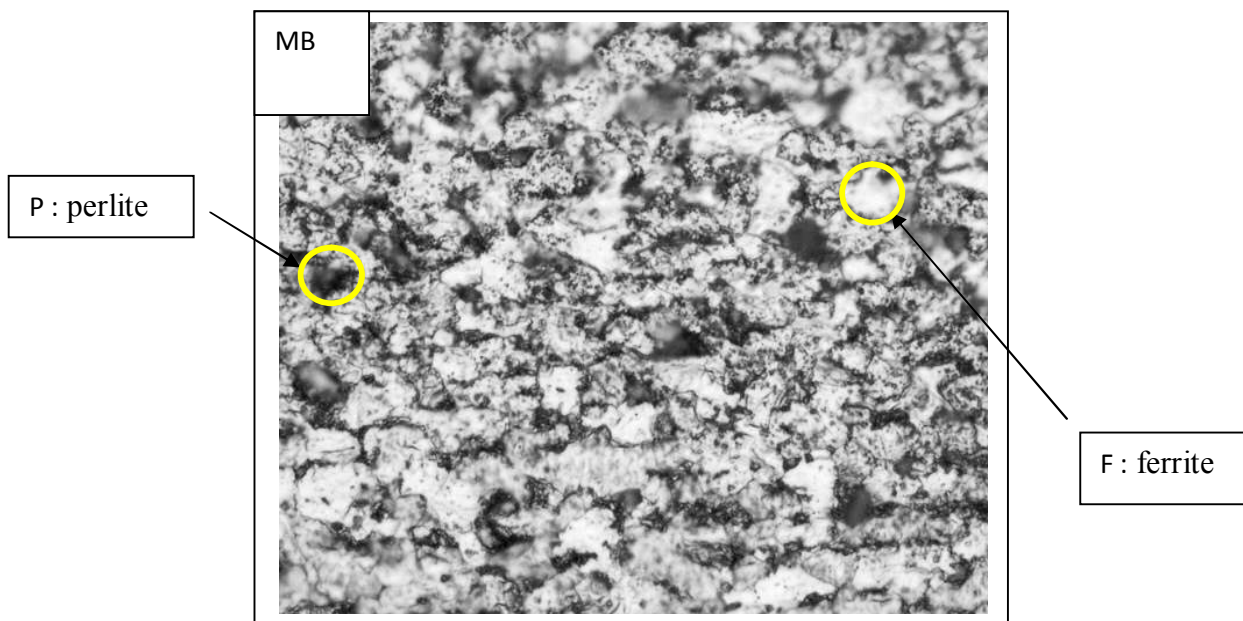


Figure IV.22 : Microstructure de métal de base (acier BS2) observé par microscope optique. (X500)

IV.1.1.2. La micrographie de différentes zones de soudage :

Dans cette partie d'étude on va présenter les microstructures de toutes zones du joint soudé comme montre la figure :

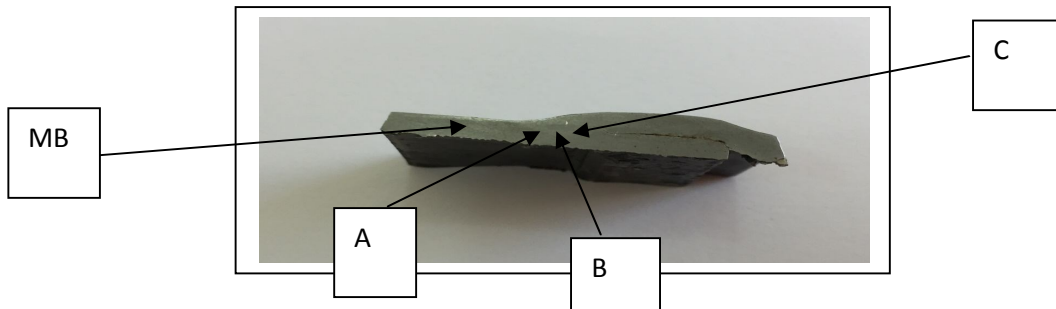


Figure IV.23: Les différentes zones du joint soudé.

IV.1.1.3. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

La figure IV.24. Zone à grains fin, la structure est fine et à grains moins orientée. Cette zone associée à un pic de température légèrement supérieur à A_{c3} (diagramme d'équilibre Fe-C). La Zone à gros grains associée à un chauffage à une température très élevée ($T > 1100^{\circ}\text{C}$). Les microstructures très fines présentent d'excellentes propriétés mécaniques (résistance de la traction et dureté). Une diminution de la résistance mécanique dans les zones à gros grain [36]. Sur les Figure montrent respectivement les micrographies de la tôle soudée et révèlent comme prévu des textures morphologiques marquées de la ferrite. [37]

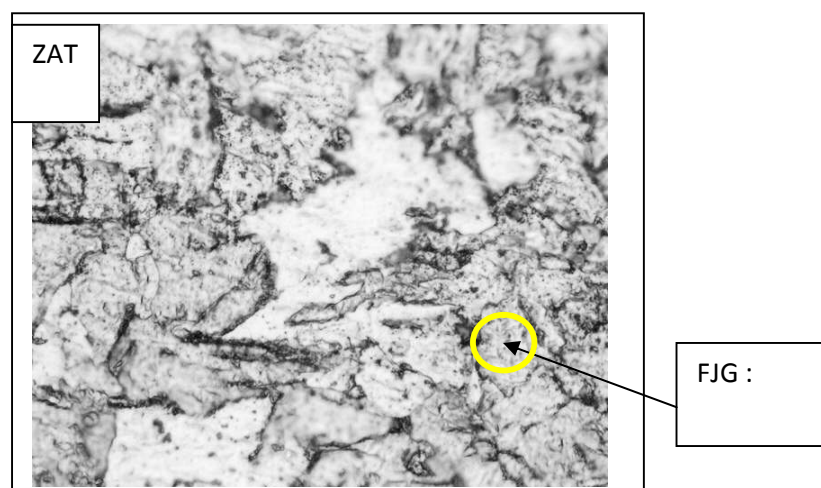


Figure IV.24 : Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé Par microscope optique. (X500)

IV.1.1.4. La micrographie de la zone fondue (ZF) :

On note qu'au centre du joint soudé se trouve la zone fondue (ZF). C'est elle qui est passée à l'état liquide durant l'exécution de la soudure. Dans le cas de soudage SAW, nous avons vu plusieurs microstructures à cause des successives. De plus, les microstructures apparaissent lors d'une première passe peuvent être se changer de façon notable par les passes suivantes (La figure IV.25) représente les principales microstructures de la zone fondue.

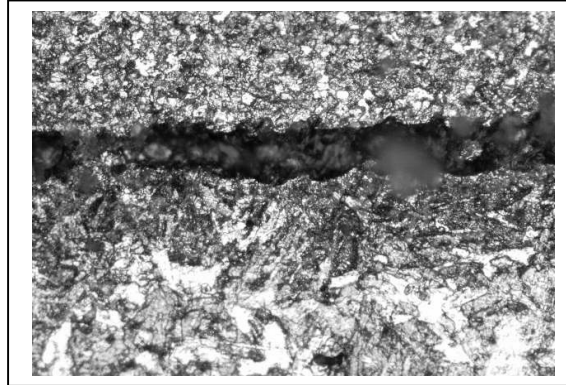


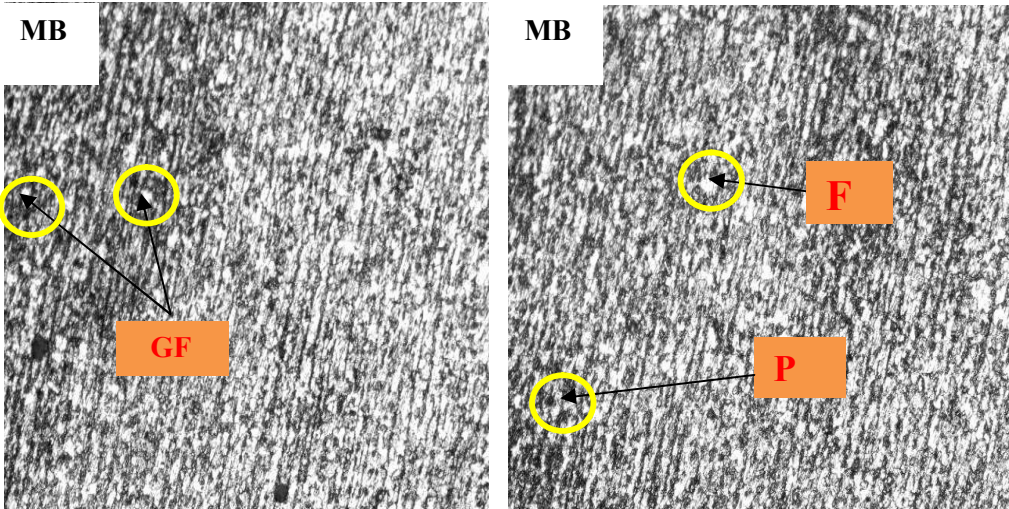
Figure IV.25 : les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique.
(X500)

- ✓ La Figure IV.25.A, représente une structure ferritique avec des gros grains plats (GP), qui s'appellent (ferrite proeutectoïde)
- ✓ La Figure IV.25.B représente une structure ferritique avec une faible proportion de perlite (P), on remarque aussi l'existence des gros grains (GG) et des grains fins ferritique (GFF).
- ✓ La Figure IV.25.c, montre la ferrite aciculaire (FA)[38].

IV.1.2.Echantillon soudé traité thermiquement à 870°C pendant 5mn :

IV.1.2.1.La micrographie du métal de base(MB) :

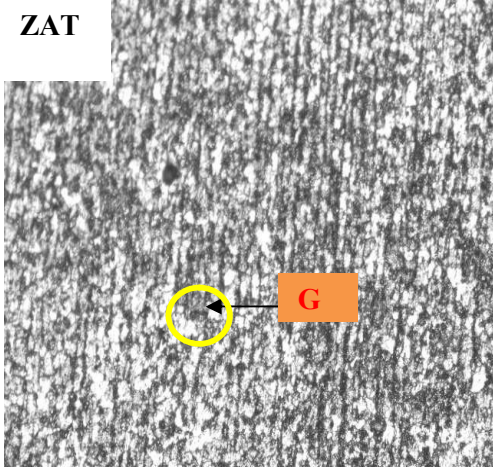
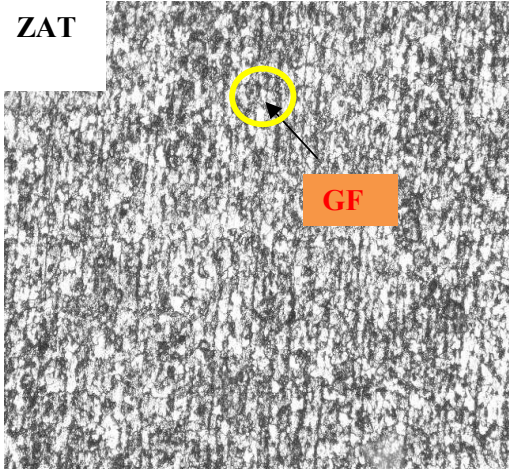
Après un traitement thermique à 870°C pendant 5mn, le microscope optique révèle dans le métal de base une structure ferrito-perlitique avec une proportion des grains fins comme le montre la figure suivante.

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 870°C , t= 5min</p>	
	<p>Figure IV.26 : Microstructure de métal de base observé par microscope optique (GFF : grain fine ferrite , P : perlite). (X500)</p>

IV.1.2.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

Figure IV.27 Montre les différentes microstructures dans la zone affectée thermiquement après une zone un traitement à 870°C pendant 5 mn.

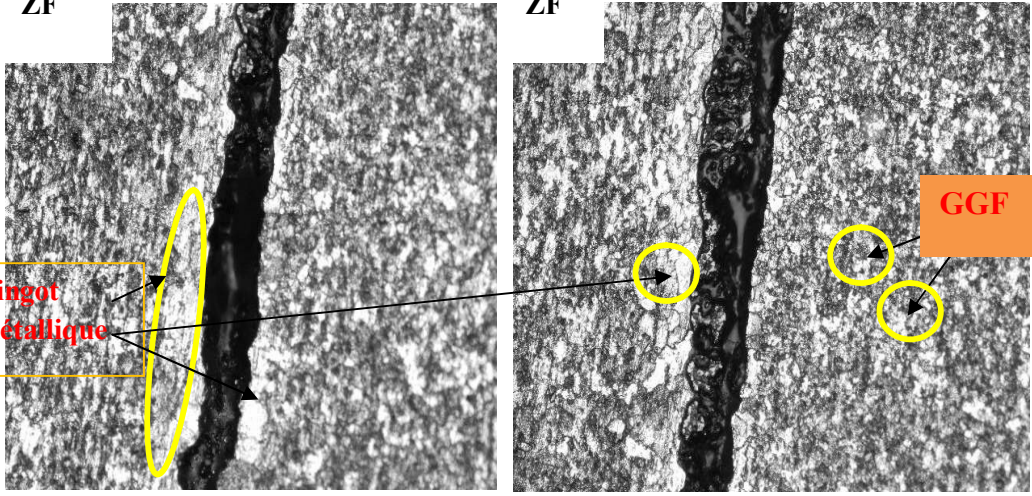
Figure IV .27 Représente la microstructure de la ZAT, où on constate une zone à gros grains et grains fins et autre zone à des grains.

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 870°C , t= 5min</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>ZAT</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>ZAT</p>  </div> </div>
<p>Figure IV.27 : Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique (GGF : gros grains ferrite). (X500)</p>	

IV.1.2.3. La micrographie de la zone fondue (ZF) :

La figure IV.28 Montre les différentes microstructures dans la zone fondue après une zone un traitement à 870°C pendant 5 mn.

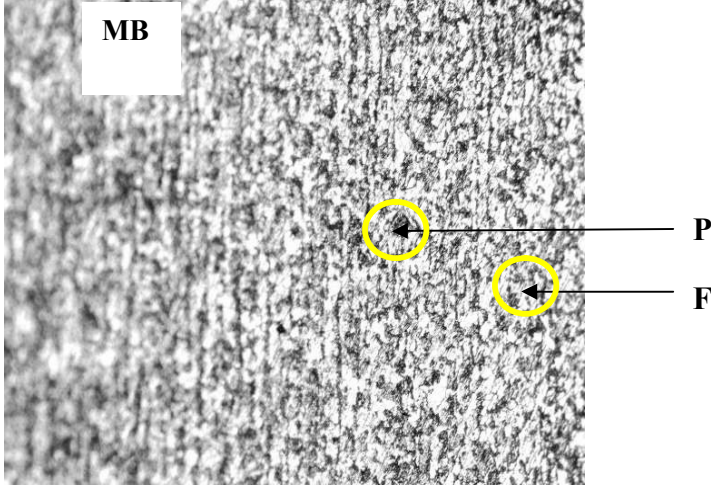
Figure IV. 28 représente les microstructures de la ZF, où on constate une zone à grains sous forme lingot métallique et autre zone à gros grains.[39]

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 870°C , t= 5min</p>	 <p>The figure consists of two side-by-side optical micrographs of a molten zone (ZF). The left micrograph shows a dark, vertical, elongated metallic ingot (labeled 'Lingot métallique' in red text with a yellow oval) surrounded by a lighter, granular matrix. The right micrograph shows a similar structure but highlights large grains (labeled 'GGF' in red text with a yellow box) in the matrix, indicated by yellow circles and arrows. The labels 'ZF' are present above each micrograph.</p>
<p>Figure IV.28 : les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500)</p>	

IV.1.3.Echantillon soudé traité thermiquement à 920°C pendant 5mn :

IV. 1.3.1.La micrographie du métal de base (MB) :

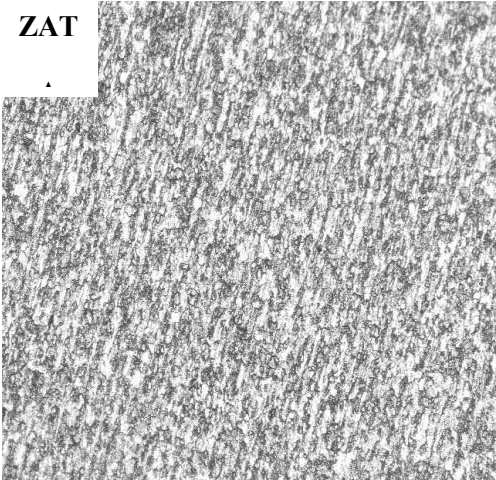
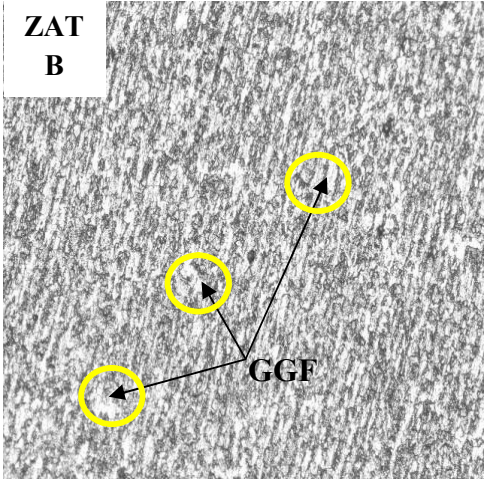
Après un traitement thermique à 920°C pendant 5mn, le microscope optique révèle dans le métal de base une structure ferrito-perlitique avec une grande proportion des gros grains comme le montre la figure suivante. Ce qui veut dire que ce traitement a provoqué un grossissement des grains.

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 920°C , t= 5min</p>	
	<p>Figure IV.29 : Microstructure de métal de base observé par microscope optique. (X500)</p>

IV. 1.3.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

La Figure IV.30 illustre les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique après un traitement thermique à 920°C pendant 5mn tel que

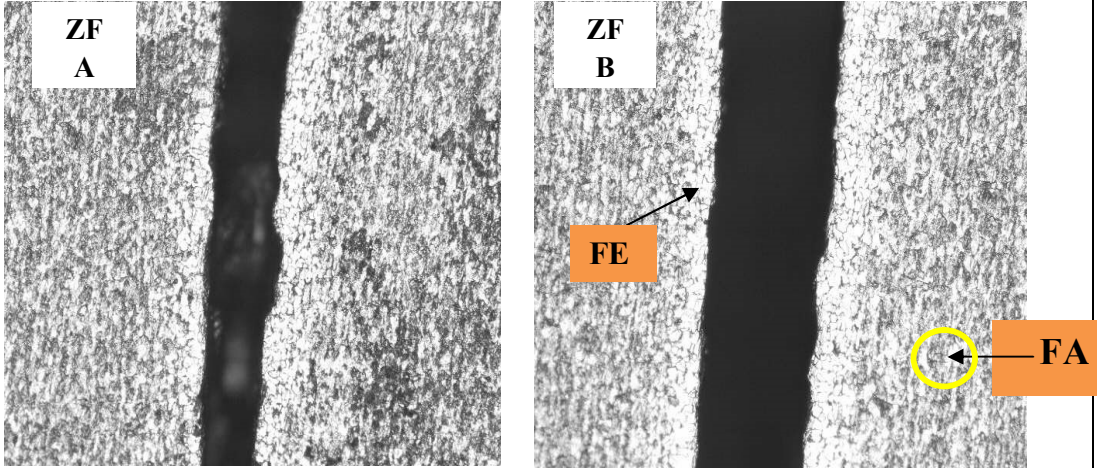
- ✓ La figure IV.30.A montre une structure très proche au métal de base (F : ferrite et P : perlite) .
- ✓ La figure IV.30.B montre une zone à grains fins et autre zone à des gros grains.

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 920°C , t= 5min</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>ZAT</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>ZAT B</p>  </div> </div>
<p>Figure IV.30 : Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique. (X500)</p>	

IV. 1.3.3.La micrographie de la zone fondue(ZF) :

La Figure IV. 31 .A, représente une structure ferritique avec une proportion en perlite, on remarque aussi l'existence des grains fins ferritique.

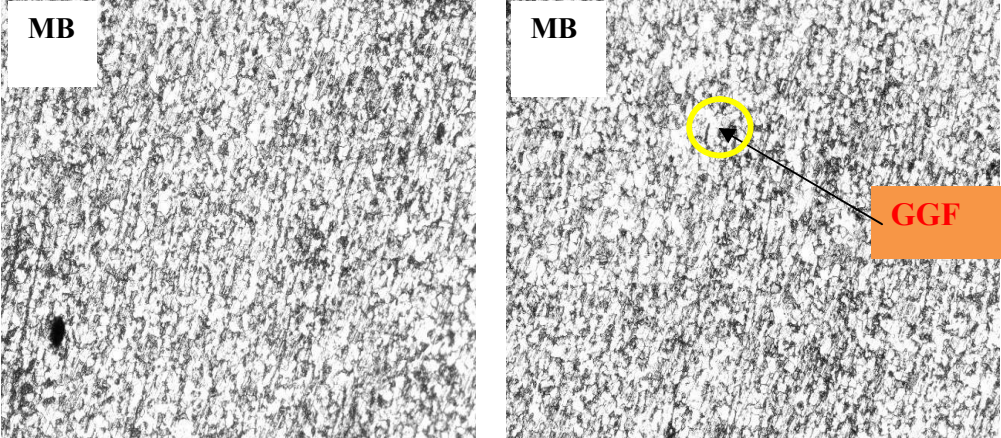
La Figure IV .31.B, montre la ferrite aciculaire. Avec une présence des grains ferritique qui s'appellent (Ferrite Equiaxe) et une nouvelle structure ferritique s'appelle ferrite de aciculaire (FA).[36] Donc, on peut dire que ce traitement thermique est intéressant du point de vue mécanique.[40]

Echantillons Traité	Microstructures
<p>T= 920°C , t= 5min</p>	
	<p>Figure IV.31: les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500)</p>

IV.1.4.Echantillon soudé traité thermiquement à 970°C pendant 5mn :

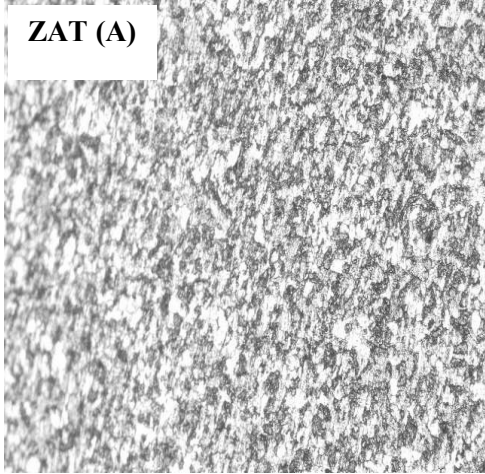
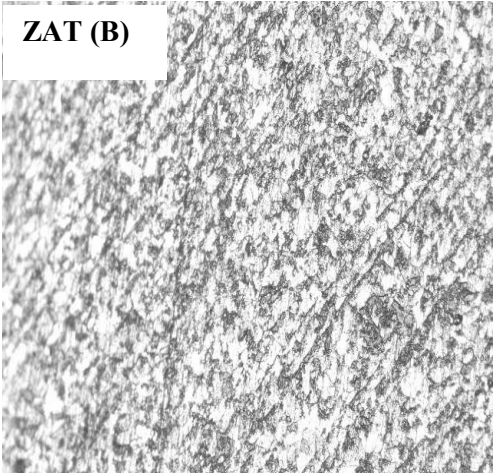
IV.1.4.1.La micrographie du métal de base (MB):

Après un traitement thermique à 970°C pendant 5mn, le microscope optique révèle dans le métal de base une structure ferrito-perlitique avec une proportion des grains gros comme le montre la figure suivante. Ce qui veut dire que ce traitement a provoqué un grossissement des grains.

Echantillons Traités	Microstructures
<p>T= 970°C , t= 5min</p>	
<p>Figure IV.32 : les Microstructures de la métal de base observé par microscope optique. (X500)</p>	

IV.1.4.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

La Figure IV.33 illustre Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique après un traitement thermique à 970°C pendant 5mn tel que La figure IV .33.A montre une zone à grains fins et la figure IV.33.B montre une zone à grains fins et autre zone à des gros grains.

Echantillons Traités	Microstructures
<p>T= 970°C , t= 5min</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>ZAT (A)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ZAT (B)</p> </div> </div>
	<p align="center">Figure IV.33: Les microstructures de la zone affectée thermiquement observé par microscope optique. (X500)</p>

IV.1.4.3. La micrographie de la zone fondue (ZF) :

La Figure IV .34 .A, représente une structure Ferrite Equiaxe (FE) avec une présence des grains fins.

La Figure IV .34.B, représente une structure ferritique avec des gros grains.

Echantillons Traités	Microstructures
<p>T= 970°C , t= 5min</p>	<p>The figure consists of two side-by-side optical micrographs of a melted zone (ZF). Both images show a dark vertical line representing the melted zone. The left image shows a fine, equiaxed ferrite (FE) structure with small grains, and a larger, coarser grain (GG) is also visible. The right image shows a ferritic structure with much larger, coarse ferritic grains (GGF) and a coarse grain (GG). Labels 'FE', 'GG', and 'GGF' are placed in orange boxes with arrows pointing to the respective features. Yellow circles highlight specific grain boundaries or features in both images.</p>
	<p>Figure IV.34: les Microstructures de la zone fondue observé par microscope optique. (X500)</p>

IV.2. Les Mesures de micro-dureté:

Les mesures de micro-dureté Vickers ont été réalisées sur les éprouvettes dans le sens de la coupe transversale du cordon de la tôle soudée et de la tôle soudée et recuite dans les zones (métal de base (MB), zone affectée thermiquement (ZAT), zone de fusion (ZF)).

Les figures. 35,36,37 et 38, suivantes représentent les résultats des essais de micro-dureté à travers les différents traitements thermiquement de soudage étudiés.

La figure IV.35 montre la courbe de micro-dureté Vickers de l'acier BS2 après soudage et non traité. On remarque.

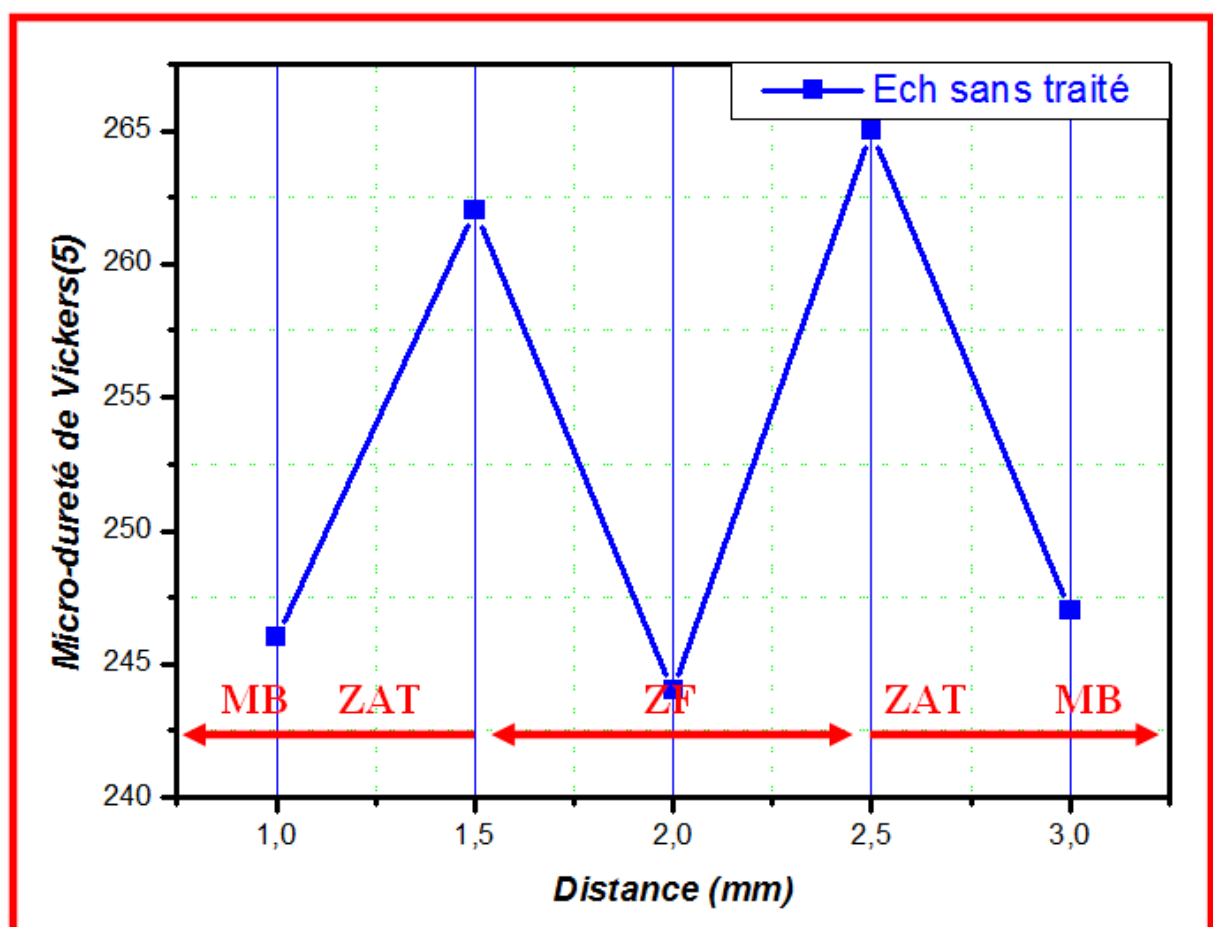


Figure IV.35: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et non traité

La figure.36 montre la courbe de micro-dureté Vickers de l'acier BS2 après soudage et aussi après traitement thermique de 5mn à 870°C. Il est clair que la plus grande valeur de micro-dureté est enregistrée au niveau de la zone fondue (ZF) où sa valeur est de 150 HV.

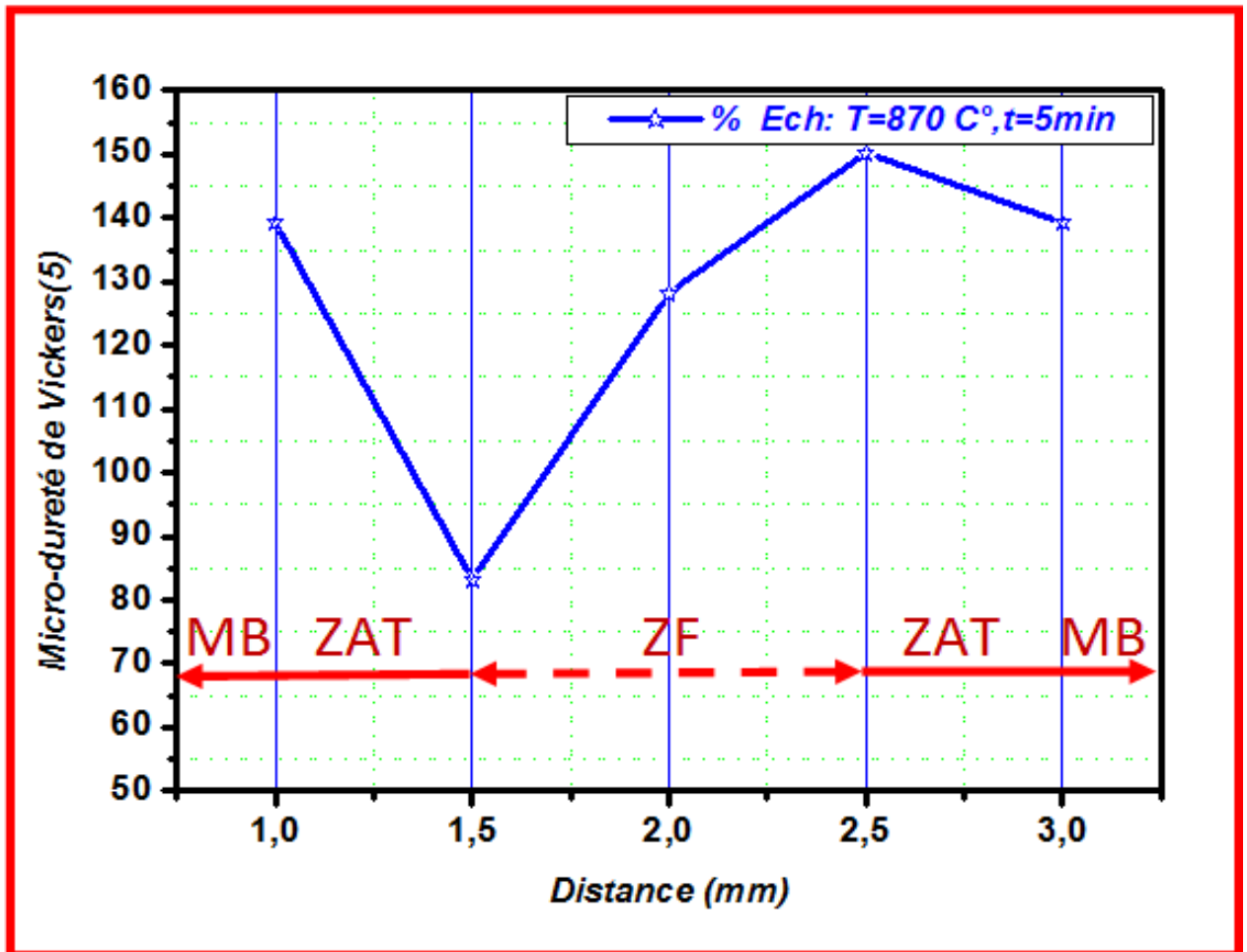


Figure. IV.36: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 870°C pendant 5mn.

La figure.37 montre la courbe de micro-dureté Vickers de l'acier BS2 après soudage et aussi après traitement thermique de 5mm a 920°C. Nous remarquons une diminution de micro-dureté (125 HV) dans la Zone Fondue (ZF) par rapport à la Zone Affecte Thermiquement (ZAT) qui apparemment présente une augmentation de micro-dureté (165 HV).

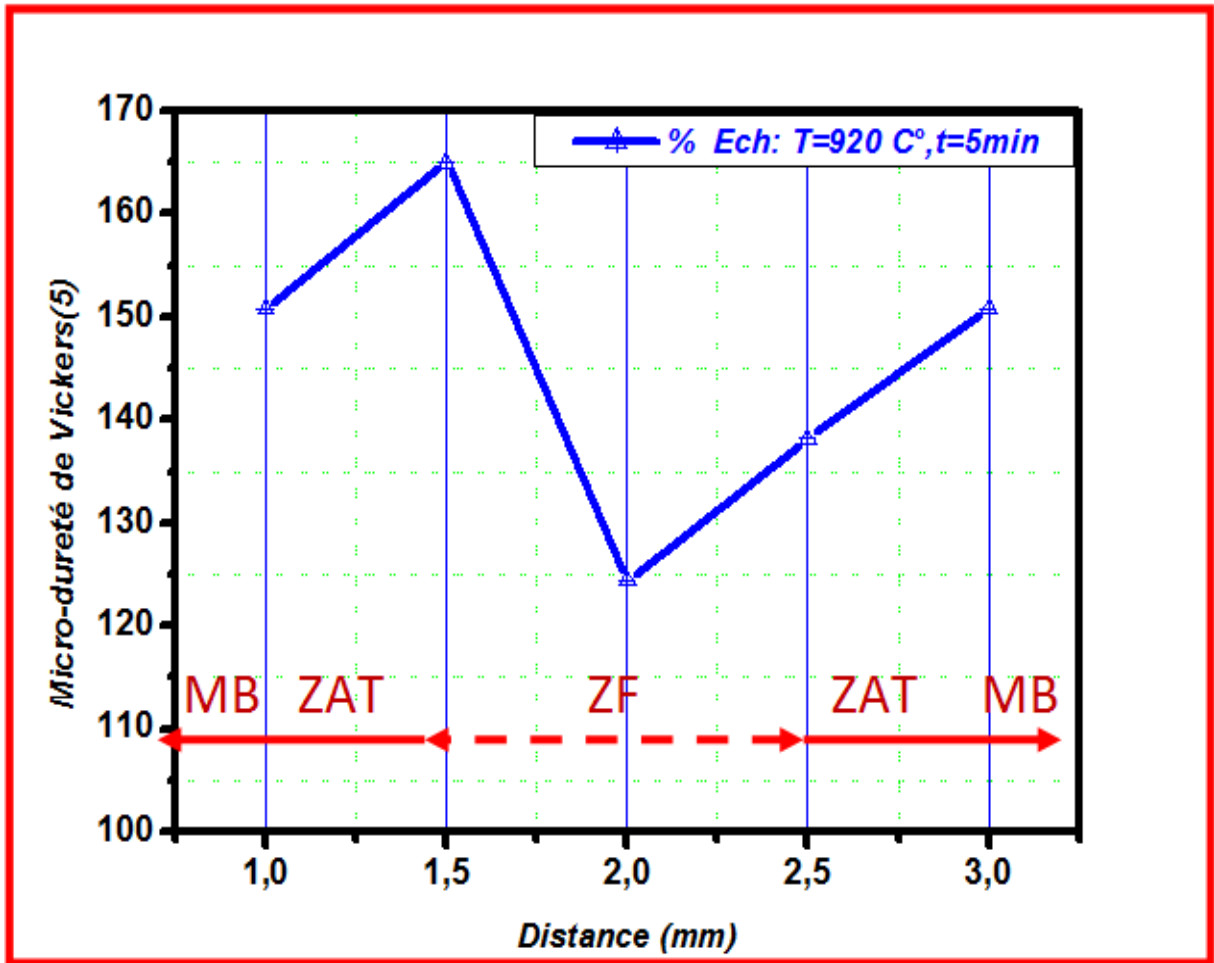


Figure. IV.37: Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 920°C pendant 5mn..

La figure.38 montre la courbe de micro-dureté Vickers de l'acier BS2 après soudage et aussi après traitement thermique de 5mn à 970°C. On remarque bien que le joint soudé a une micro-dureté un peu élevée par rapport au métal de base.

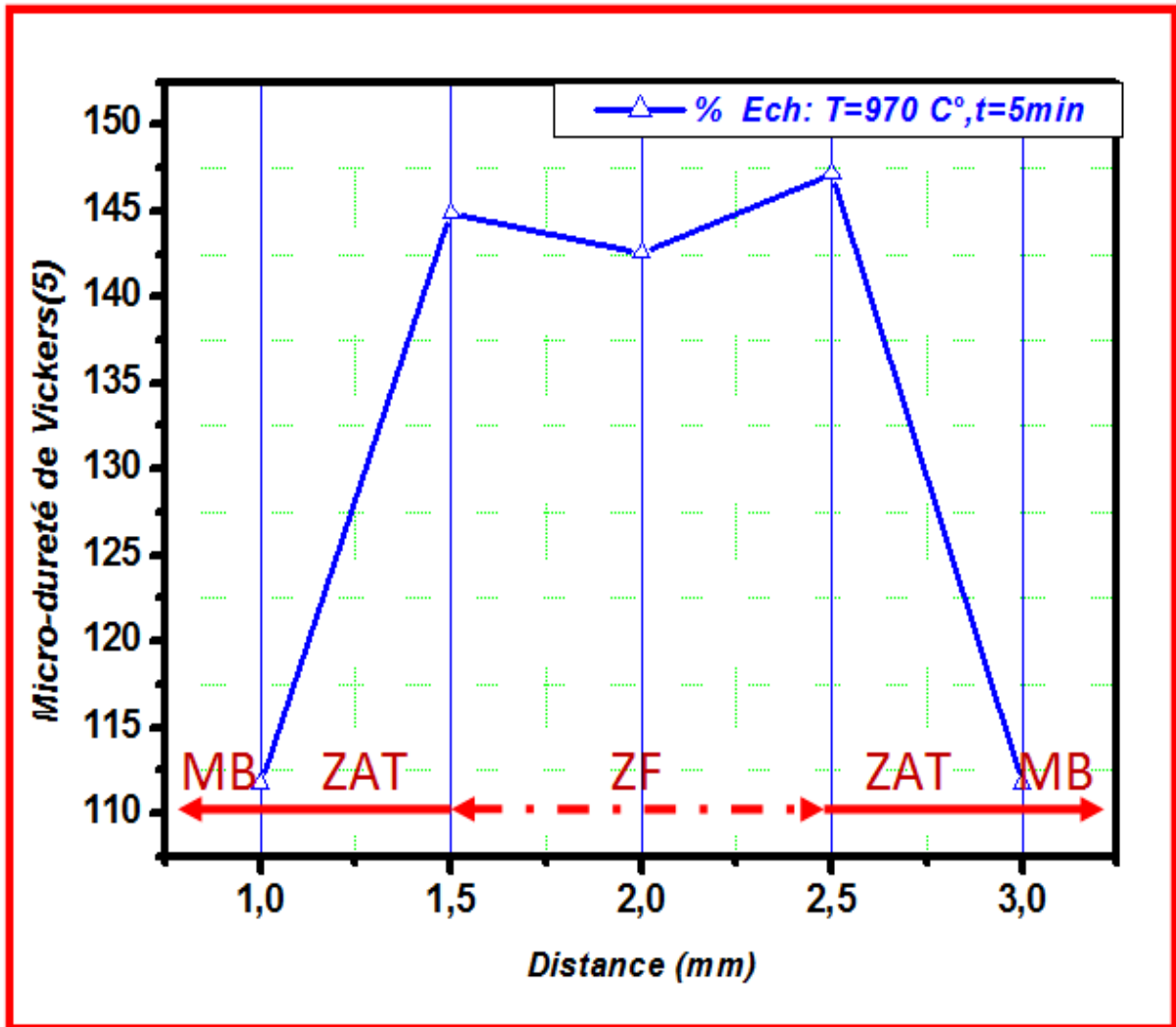


Figure. IV.38 : Courbe de micro-dureté Vickers de l'acier après soudage et traitement thermique à 970°C pendant 5mn.

La figure (39) : montrent superposition des courbes de micro-dureté de la tôle soudée non traitée et la tôle soudée traitée, remarqué la micro- dureté maximale se trouve dans la ZAT. Mais dans la présente étude, la variation des propriétés mécaniques à travers la soudure peut être attribuée à plusieurs facteurs, principalement aux contraintes internes résiduelles piégés au cours du soudage.[4]

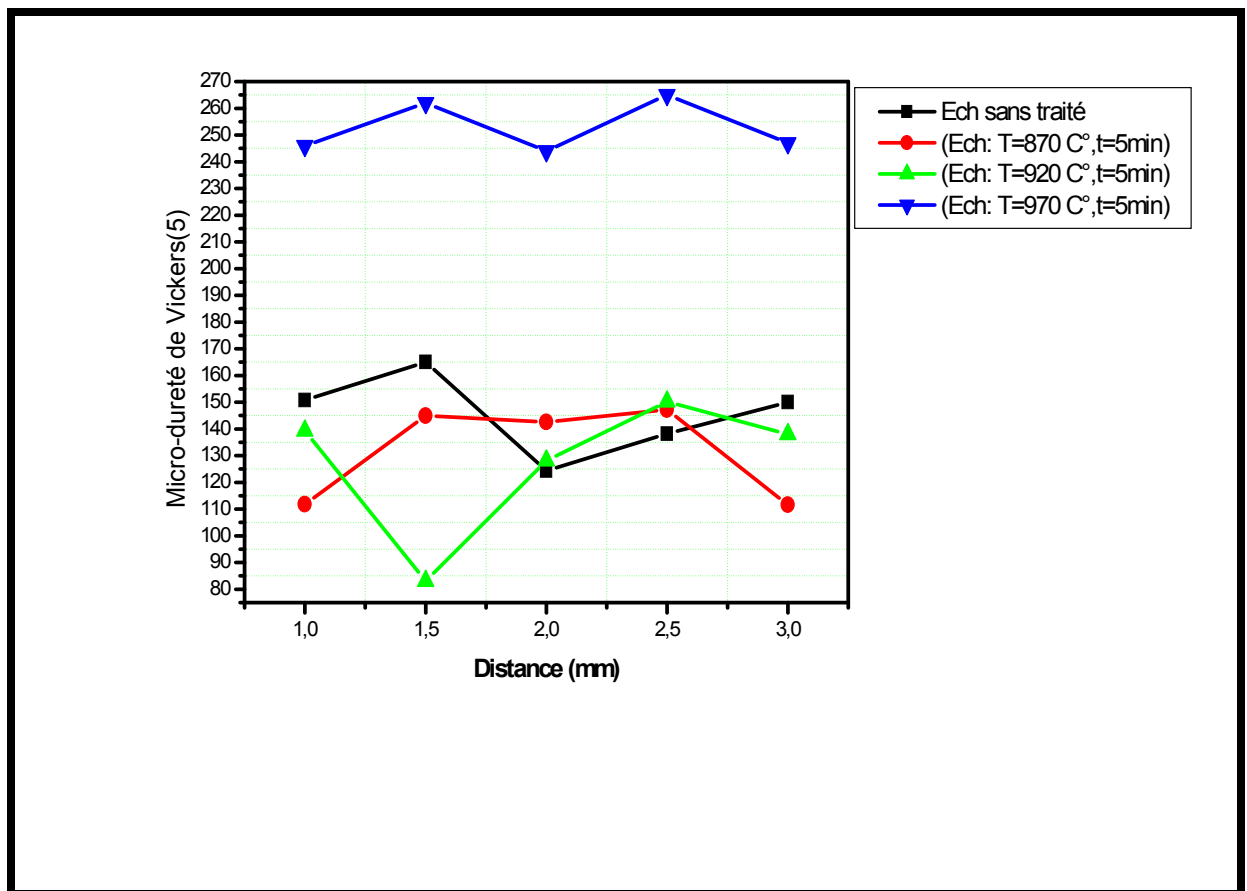


Figure. IV.39 : Superposition des courbes de micro-dureté de la tôle soudée non traitée et la tôle soudée traitée.

IV.3. Caractérisation mécanique:

L'objectif de cette caractérisation est d'étudier l'effet de variation des traitements thermiques sur la microstructure et le comportement mécanique des joints soudés

IV.3.1. Essai de traction:

Nous avons obtenu les résultats dans le Tableau IV.6, et les courbes de traction dans les figures (40, 41, 42, 43).

Tableau IV.7 : Résultats des essais de traction.

Acier	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Section (mm ²)	R _e (limite élastique) MPa	Charge (N)	R _m MPa
Tôle d'acier BS2	20	2.55	63.75	336	29580	464
Acier soudé et traité à 870°C	25	2.75	68.75	356	33756,25	491
Acier soudé et traité à 920°C	25	2.75	68.75	315	32450	472
Acier soudé et traité à 970°C	25	2.76	69	309	30015	435

Le tableau ci-dessus représente les résultats d'essais de traction sur de la tôle BS2 et des éprouvettes soudées et traitées avec différents températures (870 ,920 ,970) °C.

A partir du tableau IV.6, nous observons aussi que la limite d'élasticité et la résistance à la rupture du cordon soudé et traitéeà température 870°C sont supérieures à ceux du cordon soudé et traitée à920 et 970°C.

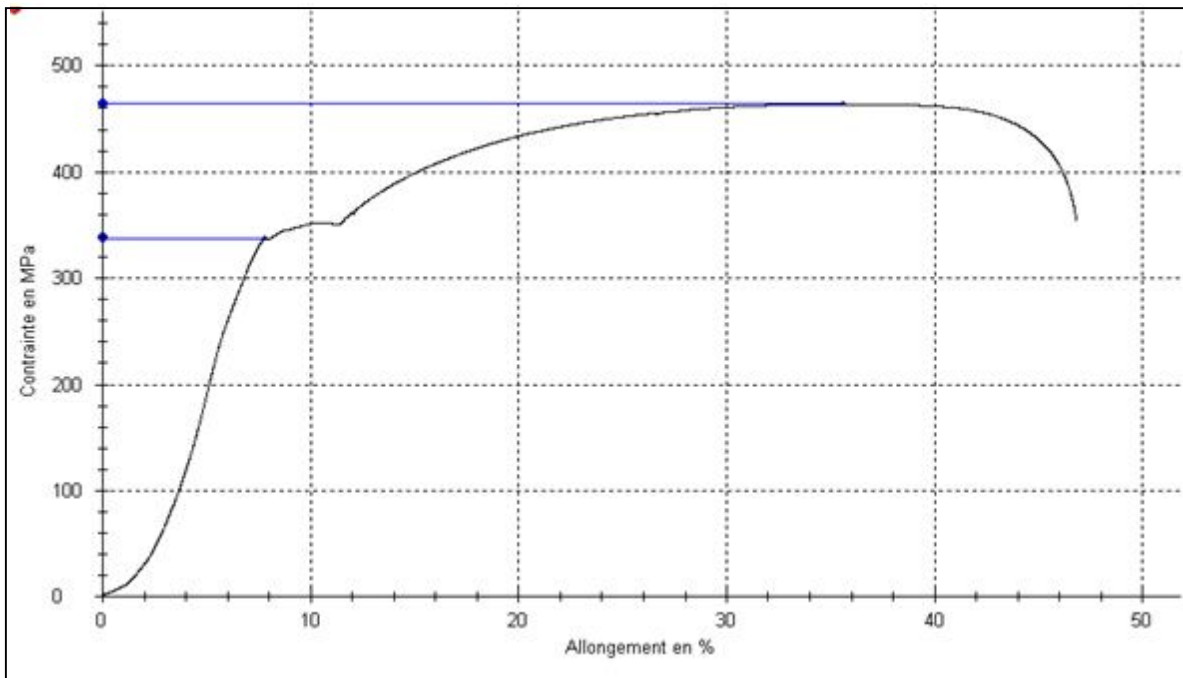


Figure. IV.40 : Courbe de traction de la tôle BS2(2.58mm).

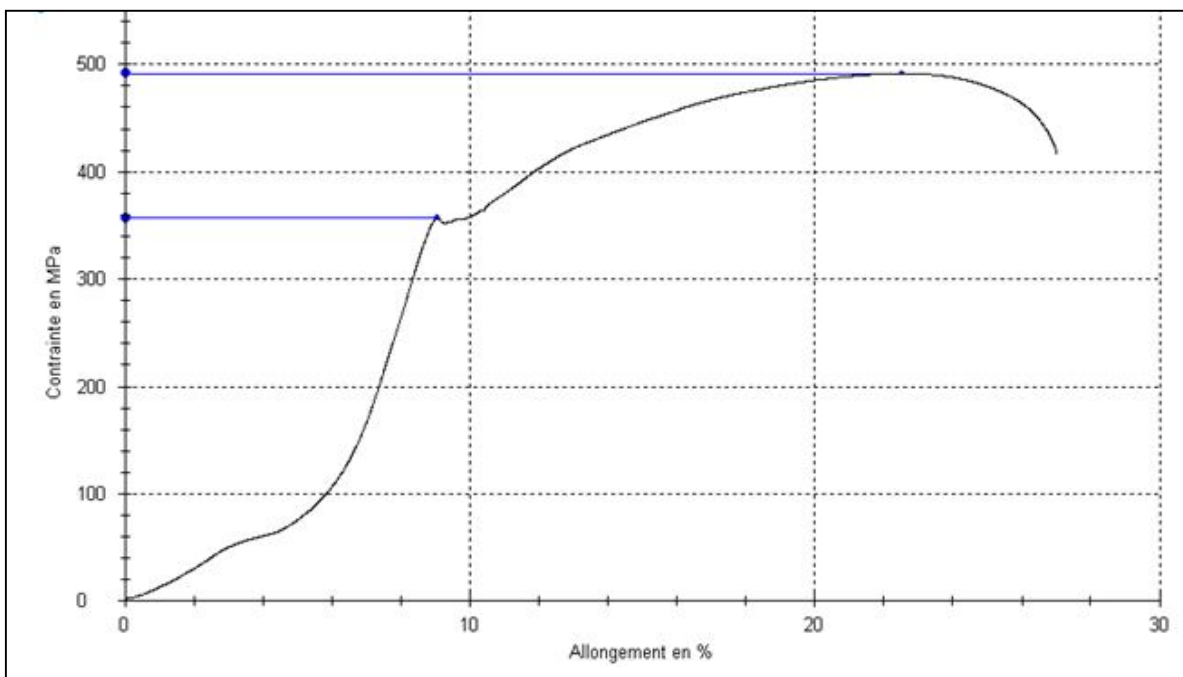


Figure. IV.41: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 870°C.

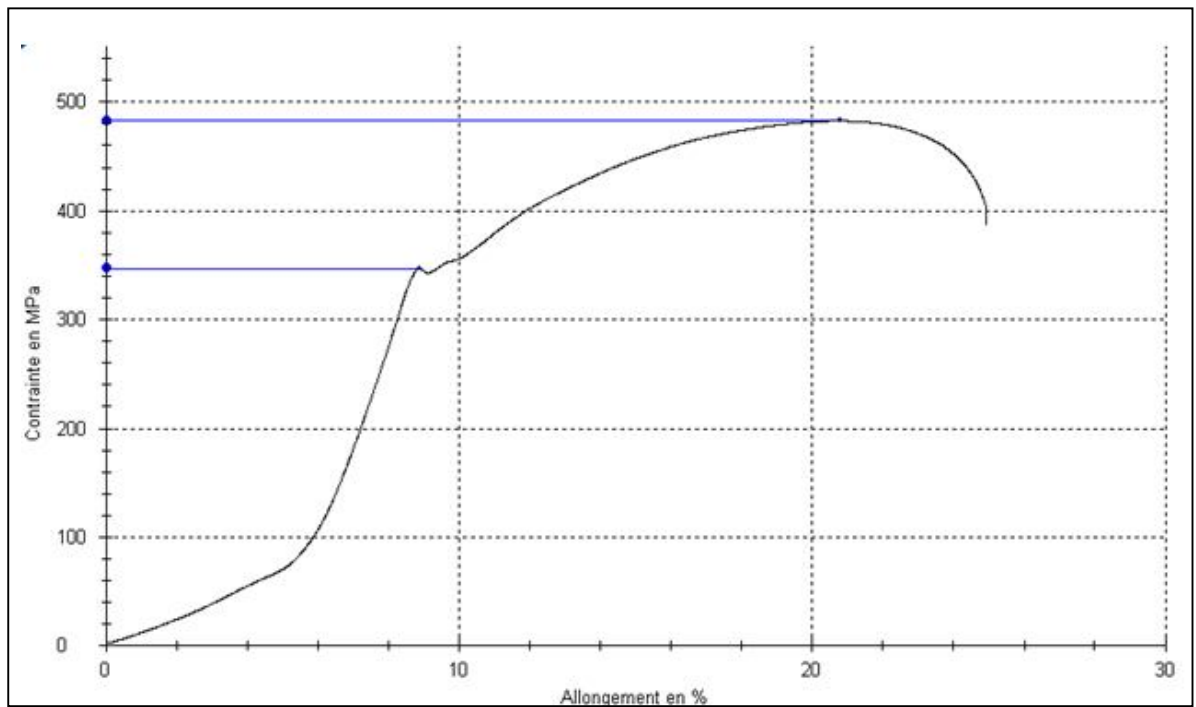


Figure. IV.42: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 920°C

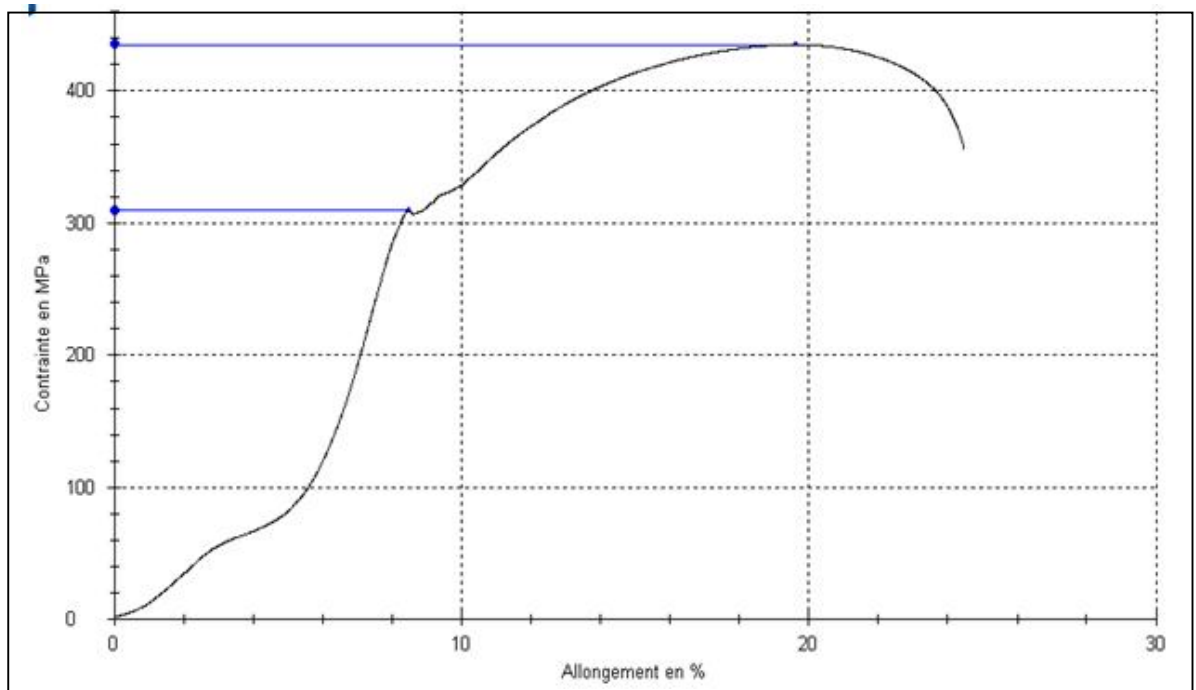


Figure. IV.43: Courbe de traction de la tôle soudée et traitée à 970°C

A partir des courbes de traction des figures 40-43, on constate que les éprouvettes de traction soudées et traitées montrent pratiquement le même comportement mécanique lors de la déformation engendrée par l'essai de traction. On observe également qu'il y a un phénomène d'adoucissement révélé par les valeurs de la limite à la rupture qui diminuent à chaque fois on augmente la température de traitement par palier de 50°C. Les valeurs de la limite à la rupture R_m ont diminué de 491 à 435 MPa en augmentant la température de 870 à 970°C. De même pour les valeurs de la limite élastique qui ont baissé de 356 à 309 MPa.

Quant à la figure 43, l'éprouvette de la tôle BS2 présente des caractéristiques mécaniques de traction dont les valeurs sont proches des valeurs des propriétés de traction de l'éprouvette soudée et traitée à 970°C. Ceci indique que ce traitement thermique a permis d'atténuer les effets néfastes de soudage en minimisant les contraintes mécaniques internes résultantes.

CONCLUSION GENERALE :

Le travail présenté dans ce mémoire, traite essentiellement et sous différents aspects, le comportement métallurgique d'un acier BS2 après un soudage SAW (soudage électrique à l'arc) suivi d'un traitement thermique afin d'améliorer des propriétés jugées importantes.

Dans ce cadre, plusieurs techniques de caractérisations ont été utilisées afin d'investiguer le comportement de ce métal, telles que : la microscopie optique, la Micro-dureté Vickers et l'essai de traction. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a permis de tirer certains commentaires dont le plus important est cité ci après.

Une variation des tailles des grains qu'on a remarqués par les observations optiques réalisées, qui montrent clairement plusieurs zones différentes de part et d'autre de la ZF avec des proportions de phases différentes : Petite (P), Grain fine ferritique (GFF), Gros grains ferritiques (GGF), faible quantité de ferrite equiaxe (FE) et de ferrite acciculaire (FA).

Dans la région de la ZAT, les grains sont plus fine et gros grains ferritique que ceux du métal de base et la structure des grains dans la ZF sont moins homogène que celle du métal de base, en raison du taux de refroidissement après le soudage. La micro-dureté du joint soudé est élevée au niveau du joint soudé par rapport à l'acier BS2 avant soudage.

Des différents courbes sont obtenus par l'essai de traction qui donnent plusieurs informations sur les résistances mécaniques, les systèmes et qui existent à la résistance de traction des différentes zones (MB, ZAT, ZF) dans le joints soudés des substrats étudiés.

D'après les résultats obtenus dans le dernier chapitre nous avons trouvés qu'ils existent trois échantillons qui sont les suivant:

- traité 870°C pendant 5 min
- traité 920°C pendant 5min
- traité 970°C pendant 5min

Le traitement thermique de l'acier BS2 soudé a donné une dureté homogène entre les différentes zones.

Références bibliographiques

- [1] G.BERANGER, G.HENRY, G. SENZ. "livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [2] A.ROOS, B.MILET. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation- Lavoisier (1982)
- [3] B. THOMAS, J.H.SCHMITT. "Durcissement des Aciers : Role de la microstructure, Techniques de l'ingénieur", M 4341, 2002.
- [4] D. CHEMS-EDDINE. Thèse Doctorat "Effet de la soudure sur la structure de l'acier", Université Mohamed Khieder– Biskra. 2011.
- [5] J.BARRALIS & G.MAEDER " Précis de métallurgie (élaboration, structure / propriétés et normalisation) " 5^{ème} édition Nathan année 1990.
- [6] J.PAUL BAILON, J.MARIE DORLOT."Des matériaux", 3^{ème} édition 2000-2001.
- [7] J. BARALIS, G. MAEDER Précis de Métallurgie, (élaboration, structures-propriétés et normalisation), 5^{ème} édition, Nathan, 1990.
- [8] GUELAI Noussaiba Comportements mécaniques
Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation, Mémoire de MASTER, Université de Biskra, 2016.
- [9] C. FERDINAND " Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires " thèse doctorale de l'institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.
- [10] Guy MURRY "Soudage et soudabilité métallurgique des métaux". Techniques de l'ingénieur, (M 0715- 4), 1994
- [11] Roland CAZES "Soudage à l'arc" Techniques de l'ingénieur (B 7730- 10 -11).
- [12] J. G.HICKS " Conception des assemblages soudés " édition Eyrolles année 1981
- [13] W. F. SAVAGE, E. F. NIPPES, "A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloy Steel" Welding Journal Research Supplement (1976), p. 260s-268s.
- [14] W. F. SAVAGE, C. D LUNDIN, A. HARONSON, "Weld Metal solidification mechanics" Welding Journal Research Supplement 44 (1965), p.175s-181s.
- [15] A. F. GIAMEI, E. H. KRAFT, F. D. LEMKEY, "New trends in Materials Processing,American Society for Metals", Metals Park, OH (1976), p 48.
- [16] A. MICHEL. "Pièces mécaniques soudées (rappels et définitions)". Technique

d'ingénieur, (BM 5 185), 2006.

[17] DRISS. KERRICH, Thèse Doctorat "Contribution a l'étude du paramétrage du procédé de soudage TIG (sans métal d'apport et avec apport de fil chaud) : application aux cas des éprouvettes tubulaires, l'université des sciences & techniques de LILLE, 1997.

[18] Welding Handbook, seventh edition, volume 1. Fundamentals of welding. American Welding Society, Miami, Florida, 1976.

[19] C.E. JACKSON "The science of arc welding". Welding Journal, January 1975, res. supp. pp. 129s-140s.

[20] R.W. NILES and JACKSON C.E. Wei thermal efficiency of the GTAW process. Welding Journal, January 1975, res. supp. pp. 25s-32s.

[21] R. E. SUNDELL SOLOMON H.D., HARRIS L.D., WOJCIK L.A., SAVAGE W.F et WALSH O. W. Minor element affects on gas tungsten arc weld penetration. Contract No MEA-8208950, December 1983. General Electric Company, Shenectady, New York 12301.

[22] P. BURGARD and HEIPPLE C. R. Interaction between impurities and welding parameters in determining GTA weld shape. Welding Journal, June 1986, res. supp. pp. 150s -155s.

[23] R. E. SUNDELL, CORREA S. M. HARRIS L. P., SOLOMON H.D., WOJCIK L.A, SAVAGE W. F. and WALSH D. W. Minor element affects on gas-tungsten-arc weld penetration. Interim report, contract no. M.E.A-8208950, march 1985.

[24] W.F SAVAGE, STRUNCK S.S and ISHIKAWA Y. The effect of electrode geometry in gas tungsten arc welding. Welding Journal, November 1965 res. supp. pp. 489s-496s.

[25] J. A LIPTAK Gas tungsten arc welding heavy aluminium plate. Welding Journal, June 1965, res. supp. pp. 276s - 281 s.

[26] : C. Bonnet ; « Le Soudage Métallurgie et Produits » ; thèse de doctorat, 2001.

[27] : R. BAUS, W. CHAPRAU, Application du soudage aux constructions, 1979.

[28] : Mécanosoudage , ISBN 2-85400-146-X, 1989.

[29] : « Notice d'utilisation pour la simulation numérique » ; code_aster ; N : 1191 ; P : 1/24, 2009.

[30] : S. Benoît ; « Étude expérimentale et numérique des distorsions de structures mécano-soudées » ; Thèse de doctorat ; École centrale Paris ; France, 2006.

- [31] H.GRANJON ; « Bases métallurgiques de soudage » ;Publication du soudage et de ses applications ; Paris,1995.
- [32] Robert LÉVÊQUE " Traitements thermiques dans la masse des aciers à outils"
- [33] Philippe POUPEAU " Traitements thermiques des métaux et alliages"
- [34] Documents techniques de fabrication de la bouteille à gaz B11/13 SNS BAG Batna.
- [35] Oualid BEZZIOU, Effet de la variation des vitesses de soudage à l'arc électrique sur les propriétés mécanique et la structure métallurgie de l'acier BS2, Mémoire de MASTER, Université de Biskra, 2018.
- [36] A.BILAT. Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en acier à haute grade ; thèse de doctorat ; Ecole de mines de Paris, 2007.
- [37] Ghadab Samir, Evaluation des paramètres mécaniques après le procédé de soudage, Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de MASTER, Département de Génie Mécanique,2012.
- [38] C, DERFOUF ; effet de la soudure sur la structure de l'acier ; thèse de doctorat ; université de Biskra.2011.
- [39] Z.BOUMERZOUG. Traitement thermique des matériaux, cours de 2eme année License métallurgie, université de Biskra, 2012.
- [40] LEBZA Hamza, Soudage des pipelines, Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de: MASTER, Département de Génie Mécanique,2014.

Résumé

L'objectif de ce projet de fin d'étude est l'étude de l'effet du traitement de recuit sur les caractéristiques structurales et mécaniques d'un acier faiblement allié de type BS2 soudé utilisé pour la fabrication de bouteille à gaz au niveau de l'entreprise BAG (Batna). Pour cela, nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales de caractérisation et de mesure tels que : Le microscope optique, la microduremètre et l'essai de traction.

Mots clés: Acier BS2, Microstructure, ZAT, Joint soudé, Soudage, Traitement thermique, Microdureté, Essais de traction.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة دراسة تأثير اختلاف درجات الحرارة على الخصائص الميكانيكية و البنية المعدنية للفولاذ BS2

ولهذا قمنا باستخدام عدة تقنيات تجريبية :المجهر الضوئي ، درجة الصلادة و تجارب الجذب.

نستطيع تلخيص النتائج التجريبية المتحصل عليها في:

- تم التعرف على المناطق المكونة لمكان التلحيم كالمنطقة المذابة و المنطقة المتأثرة حراريا الناتجة عن التلحيم تم كذلك ملاحظة عدة بنيات في هذه المناطق مثل حجم الحبيبات.

- تشكيل الفريت FE و FA عند درجة الحرارة 920°C.

- يتم الحصول على أفضل صلادة عند منطقة تلحيم ZAT

- يتم الحصول على أفضل تليين عند درجة الحرارة 920°C.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ BS2، التلحيم، المعالجات الحرارية، درجة الصلادة، الجذب، المجهر الضوئي.