

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : De Technologie

DEPARTEMENT: Génie Mécanique

N° :.....



DOMAINE : Science & Technologie

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Construction Mécanique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: BOUBEGRA Lotfi

HAFSI Said

Intitulé

**Elaboration et caractérisation des joints soudés
des aciers**

Soutenu le: 18-06-2018

Soutenu devant le jury composé de:

<i>DR.BEDDA.A</i>	Université Mohamed BOUDIAF - M'Sila	<i>Président</i>
<i>Pr. BENARIOUA.Y</i>	Université Mohamed BOUDIAF - M'Sila	<i>Rapporteur</i>
<i>DR.DEBIH.A</i>	Université Mohamed BOUDIAF - M'Sila	<i>Examineur</i>
<i>DR.BENKHARBACH.H</i>	Université Mohamed BOUDIAF - M'Sila	<i>Examineur</i>

Année universitaire : 2017 /2018

Remerciement

*Je remercie mon Dieu tout de m'avoir
Beaucoup aider pour élaborer ce travail.
Toutes mes infinies gratitudes à mon
Encadreur, Monsieur Pr. Benarioua Younes
Pour son encadrement et ses aides précieuses.
Je tiens aussi à remercier tous les enseignants
qui n'ont préservé aucun effort à fin de
transmettre leur savoir et leur expériences aux
étudiants.
Je tiens à remercier mes amis qui m'ont toujours
Soutenus et qui sans eux ce mémoire n'aura pas
Eu lieu surtout : les amies.*

sommaire

Remerciements.....
INTRODUCTION GENERA:
Chapitre I : Généralité sur le soudage à l'arc électrique	
I.1. INTRODUCTION:	4
I.2. Définition de l'opération de soudage	4
I.3. Les zones principales du soudage.....	4
3.1. La zone I. fondue (ZF).....	5
I.3.2. La zone affectée thermiquement (ZAT ou ZAC).....	5
I.3.3. La zone de liaison.....	5
I.3.4. Le métal de base	6
I.4. Procédés de soudage	6
I. 5. Généralité sur le soudage à l'arc électrique:	6
I.6. Les principaux procédés de soudage à l'arc :	8
I.6.1. Choix du procédé	8
I.6.2. Soudage automatique sous flux solide	9
I.6.3. Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) :	9
Avantages et inconvénients	10
I.6.4. Soudage au plasma	11
Avantages du soudage plasma.....	12
I.6.5. Le procédé MIG / MAG.....	12
Avantages et inconvénients	13
I.6.6. Soudage à l'arc avec l'électrode enrobée (SMAW).....	14
I.6.6.1. Principe du procédé.....	14
I.6.6.2. Techniques du procédé.....	14
I.6.6.3. Avantage du procédé.....	15
I.6.6.4. L'électrode (l'arc).....	15
I.6.6.4.. Rôle de l'enrobage de l'électrode.....	17

Chapitre II : Les aspects de soudage à l'arc électrique

II.1.Introduction	19
II.2.Les aspects thermiques du soudage.....	19
II.2.1.Notion de cycle thermique.....	19
II.2.2.Caractères généraux du cycle thermique	22
II.2.2.1.Notion d'états quasi –stationnaires	22
II.2.3.Cycle thermique du soudage.....	23
II.2.4. Soudage en plusieurs passes	25
II.3.Aspect métallurgique du soudage à l'arc.....	25
II.3.1.Phases métallurgiques:.....	26
II.3.2. Structure globale de solidification	27
II.4. Aspects mécaniques du soudage	28
II.4.1.Déformations et contraintes par le soudage.....	29
II.4.1.1.Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés	29
II.4.1.3.Contraintes résiduelles indirecte.....	29
II.4.1.4.Contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage).....	29
II.4.1.5. contraintes longitudinales dans les assemblages bout à bout	30
II.4.2. Effet des contraintes résiduelles sur l'assemblage soudé	30
II.4.2.1.Résistance statique de l'ensemble	30
II.4.2.2. Les retraits.....	30
II.4.2.2.1.Le retrait longitudinal (RL)	31
II.4.2.2.2.Le retrait transversal (RT)	31
II.4.2.2.3.Le retrait suivant l'épaisseur.....	32
II.4.3. Les déformations liées aux phénomènes de retrait.....	32
II.4.3.1.Les déformations longitudinales.....	32
II.4.3.2.Les déformations dues au retrait transversal	33

Chapitre III : Techniques expérimentales et résultats

III. Procédure expérimental	35
III.1 Procédés du soudage utilisés.....	35

III.2. Matériaux utilisés	37
III.3. Métal de base	38
III.4. Préparation des échantillons et éprouvettes	38
III.5. Essai de traction	39
III.5.1. Description générale d'une machine de traction	40
III.5.2. L'éprouvette utilisée	41
III.6. Préparation des échantillons	42
III.6.1. Le découpage à froid	42
III.6.2. Le polissage	43
III.6.3. Attaque chimique	44
III.6.4. Micrographie	44
III.7. Résultats et interprétations	45
III.7.1. Résultats des essais de traction	46
III.7.2. Résultats de l'analyse métallographique	48
III.8. Conclusion générale	51

LISTE DE FIGURE

Chapitre I

Figure I.1.Les zones principales du soudage.	5
Figure I.2. Classification des procédés de soudage.	7
Figure I. 4.Soudage sous flux solide	9
Figure I. 5.Principe du soudage TIG	10
Figure I. 6.Principe du soudage plasma	12
Figure I. 7.Procédé du soudage MIG.....	13
Figure I. 8.Principe du soudage a l'arc aec electrode énorobées SMAW.....	15
Figure I.9.L'électrode de soudage à l'arc électrique	16

Chapitre II

Figure II.1.Schéma des aspects thermiques, métallurgiques et mécaniques	19
Figure II.3.Répartition thermique dans une soudure	21
Figure II.4.Cycles thermiques le long d'un cordon de soudure	23
Figure II.5.Courbes température/temps	24
Figure II.6.Microstructure de la zone affectée thermiquement	28
Figure II.7. Influence de soudage sur le retrait de déformation	31
Figure II.8.Déférant type de retrait	32
Figure II.9. a) Les déformations longitudinales.....	33
Figure II.10. La rotation angulaire	33

Chapitre III

Figure III.1: Procédé de soudage électrique manuel utilisé.....	35
Figure III.2 : procédé de soudage Semi-automatique MIG	36
Figure III.3. Procédé de soudage électrique manuel utilisé.....	37
Figure III.6: Forme de chanfrein V.....	39
Figure III.7 : Machine de traction W310 machine hydraulique universelle.....	40
Figure III.8: Eprouvette subi un essai de traction.....	41

Figure III.9 : la machine de cisailage des métaux et les échantillons obtenus par soudage AEM et MIG destinés aux observations micrographiques.....	43
Figure III.10 : la machine de polissage.....	44
Figure III.11: Microscopie optique utilisé	45
Figure III.12. Courbe de traction des aciers soudés par AEM pour les chanfreins V, K et X.....	47
Figure III.13 : Courbes de traction des aciers soudés par MIG pour les chanfreins V, K et X	48
Figure III.14 : Microstructure des aciers soudés par AEM pour les chanfreins V, K et X (X200).....	50
Figure III.15 : Microstructure des aciers soudés par MIG pour les chanfreins V, K et X (X200).....	51

INTRODUCTION GENERALE

La réalisation d'assemblages indémontables en fabrication mécanique utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physique ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure désignant alors le joint par lui-même. Le champ d'application de soudage ne se limite pas aux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques on distingue le soudage autogène brasage ainsi que la métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont les pièces à assembler participent à la construction du joint, du brasage dont la constitution du joint est réalisée par l'intervention du seul métal d'apport.

Lors de ce travail deux techniques d'assemblages qui peuvent être apparues lors de ce travail sont le soudage à l'arc électrique manuel et le soudage électrique semi-automatique par MIG (métal inerte gaz). Ces deux procédés sont utilisés pour assembler des pièces de même acier. L'objectif de ce travail est de faire une étude comparative entre ces deux procédés. Après avoir préparé et soudé, les échantillons ont subi la caractérisation soit au point de vue structure et mécanique. Les pièces obtenues par assemblage (MIG) présentent des résultats concluant par rapport les pièces assemblées par l'autre procédé.

Chapitre I :
Généralité sur le
soudage à l'arc
électrique

I.1. INTRODUCTION:

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toute les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées a supporter en service. 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 fusion d'un métal d'apport qui considéré comme joint lié les partie du métal de base à assembler.

I.2.Définition de l'opération de soudage

Le soudage est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.

I.3.Les zones principales du soudage

Quelques soit le procédé de soudage utilisé lors de l'assemblage des pièces métallique quatre zones formant en général le joint ou le cordon de la soudure. Ces quatre zones celles sont la zone fondue, la zone affectée thermiquement par chaleur, la zone de liaison et la zone du métal de base. Elles portent aussi des caractéristiques mécaniques et structurales différentes.

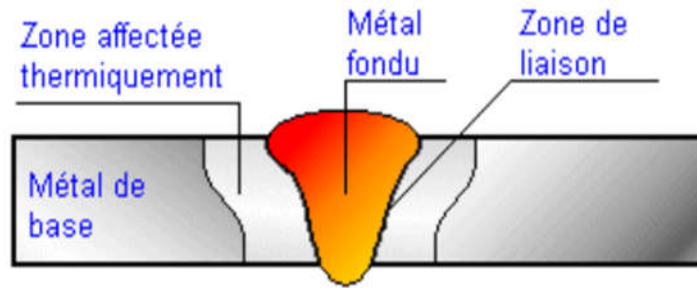


Figure I.1. Les zones principales du soudage. [2]

3.1. La zone fondue (ZF)

La zone fondue où l'état liquide a été atteint 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 composition, 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.

I.3.2. La zone affectée thermiquement (ZAT ou ZAC)

Cette zone se trouve en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

I.3.3. La zone de liaison

La zone de liaison est située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

I.3.4.Le 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. 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. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue.

I.4.Procédés de soudage

Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler. Les procédés de soudage opèrent dans leur majorité par la mise locale des pièces à souder à température de soudage (température de fusion la plupart du temps) au niveau de leur joint, cette mise à température s'effectue soit progressivement, soit globalement dans l'espace et dans le temps au moyen d'une source de chaleur pouvant être associée, pour certains d'entre eux, à un dispositif de pression mécanique s'exerçant pendant le processus de formation de la liaison [1].

I. 5. Généralité sur le soudage à l'arc électrique:

Le soudage à l'arc a été inventé par Weld (d'où son nom anglais «Welding » en 1860, mais la mise en place effective de la soudure par fil n'a pu se faire qu'avec l'invention du dévideur de fil de soudure en 1935. Un courant électrique de caractéristiques définies, nature et intensité, fait jaillir sous une tension donnée un arc entre deux électrodes, au travers d'une colonne de gaz ionisés, appelée plasma d'arc. Dans les procédés de soudage, les plus v courants, l'une des électrodes est constituée par la pièce à souder. La quantité de chaleur dégagée par l'arc électrique permet une fusion instantanée des bords des pièces à

souder et du métal d'apport. Deux phénomènes sont donc mis en œuvre lors du soudage à l'arc

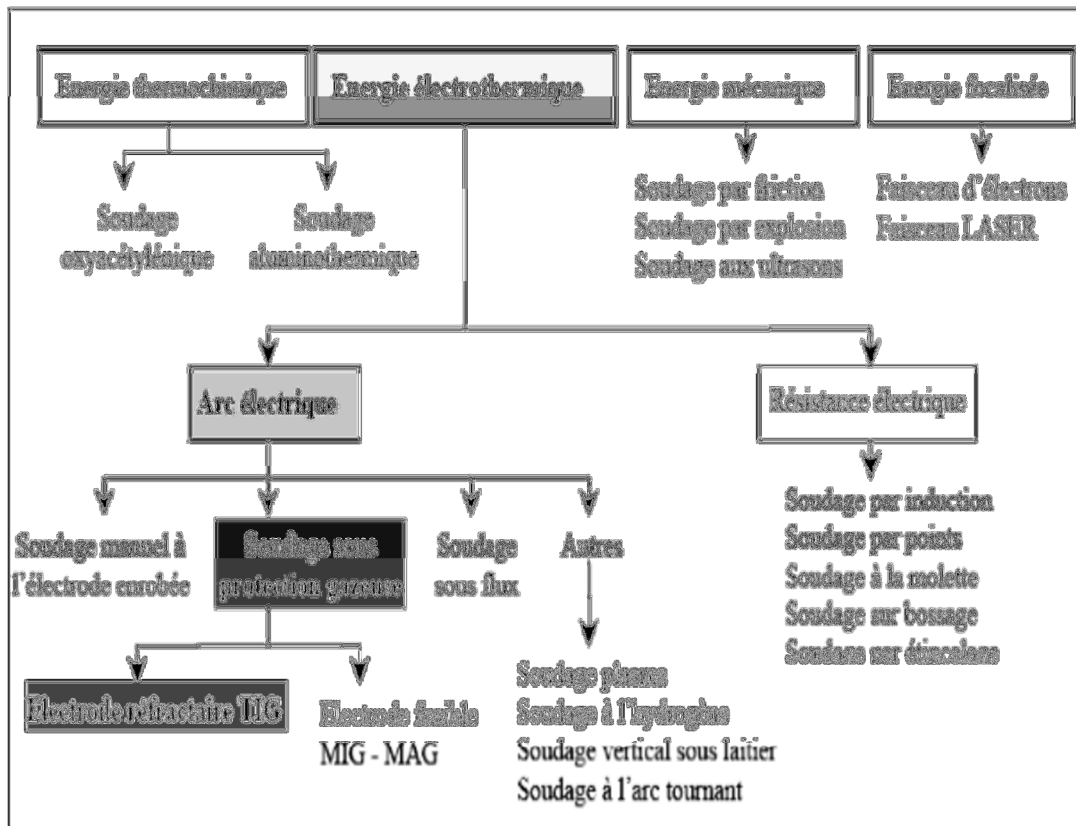


Figure I.2. Classification des procédés de soudage. [1]

- **L'effet thermique** : qui a pour origine la formation d'un arc électrique entre une électrode et les pièces à souder

Le transfert de métal : pour lequel le métal en fusion de l'électrode se propulse à grande vitesse sur la pièce elle-même

Les techniques de procédés de soudage les plus utilisés dans le monde sont les procédés à l'arc et spécifiquement le soudage à l'électrode enrobée qui représente encore plus de 60 % des travaux annuels de soudage dans le monde. On présente dans le tableau II.1 les différents procédés de soudage à l'arc. On s'intéresse particulièrement aux procédés de soudage SMAW et GTAW.

Abréviation	Anglais	Français
SMAW	Shielded Metal Arc Welding	Soudage à l'arc avec électrode enrobées : baguette
GTAW	Gas Tungstene Arc Welding	Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène: TIG
GMAW	Gas Metal Arc Welding	Soudage protection gazeuse: MIG (Métal Inerte Gas: Argon) ou MAG (Métal Active Gas:) CO2
FCAW	Flux Cored Arc Welding	Soudage fil fourré
MCAW	Metal Cored Arc Welding	fil fourré métallique
SAW	Submerged Arc Welding	Soudage sous flux électroconducteur solide: arc submergé
CAW	Carbon Arc Welding	soudage par carbons

Tableau I. 3. Les différents procédés de soudage à l'arc [1]

I.6. Les principaux procédés de soudage à l'arc :

Comme nous intéressons au soudage à l'arc, nous allons définir ces différents procédés cette procédés de choix selon plusieurs facteurs.

I.6.1.Choix du procédé

- ❖ L'épaisseur du matériau à soudée,
- ❖ L'endroit où la soudure doit être faite ;
- ❖ La précision de l'accostage et les possibilités de mauvais alignement
- ❖ L'accès au joint
- ❖ La position de soudage
- ❖ La composition du matériau à soudée

I.6.2. Soudage automatique sous flux solide

Le flux en poudre est déversé en tolos autour du fil électrode. Un arc électrique libre jaillit à l'intérieur du flux assurant la fusion simultanée des pièces à souder et d'un ou de plusieurs fils électrodes (fournissant le métal d'apport). Le transfert du métal dans l'arc de soudage a lieu par goulettes enrobées de flux fondu, protégé par sa gangue de laitier (auto détachable), le métal déposé est lisse et brillant. L'excédent de flux qui n'a pas été fondu est récupéré par aspiration.

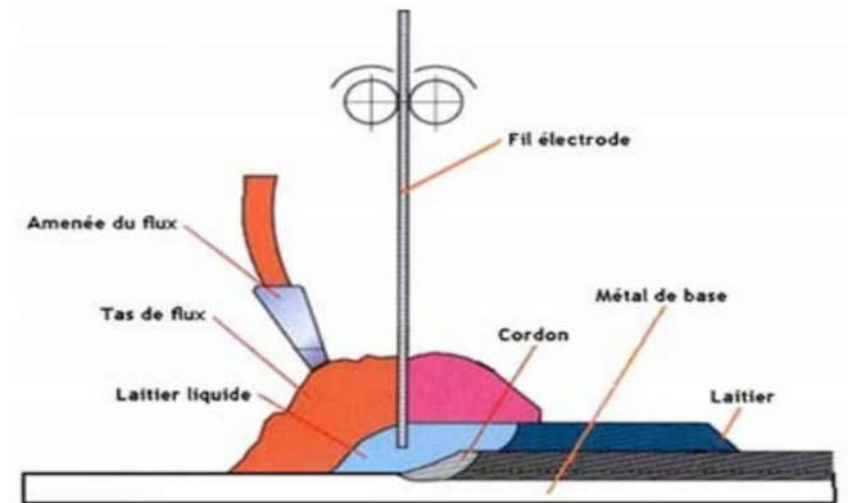


Figure I. 4.Soudage sous flux solide

I.6.3.Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) :

Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique dans une veine de gaz inerte.

L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments des d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité

L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport [5]

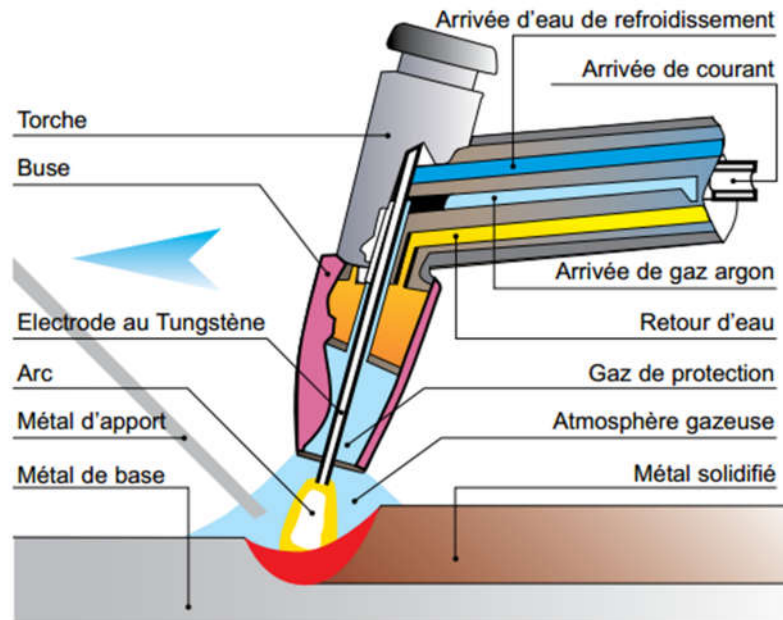


Figure I. 5.Principe de soudage [8].

• Avantages et inconvénients

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier, le nickel de métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures.

De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite. La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et

n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé. Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

I.6.4.Soudage au plasma

Le soudage plasma se caractérise par la transformation à l'état de plasma d'un gaz plasma- gène par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire et la pièce à souder . Ce gaz est confiné mécaniquement et cinétiquement par l'intermédiaire d'une tuyère refroidie, à travers laquelle on l'oblige à passer. La protection du métal en fusion est assurée par un gaz annulaire.

La forte constriction de l'arc obtenue permet de disposer d'une forte densité d'énergie (107W.cm^{-2}). Ce procédé permet de traverser les pièces de part en part et il permet d'accroître les performances du soudage à l'arc conventionnel et d'augmenter la vitesse de soudage et l'épaisseur des éléments à assembler [7].

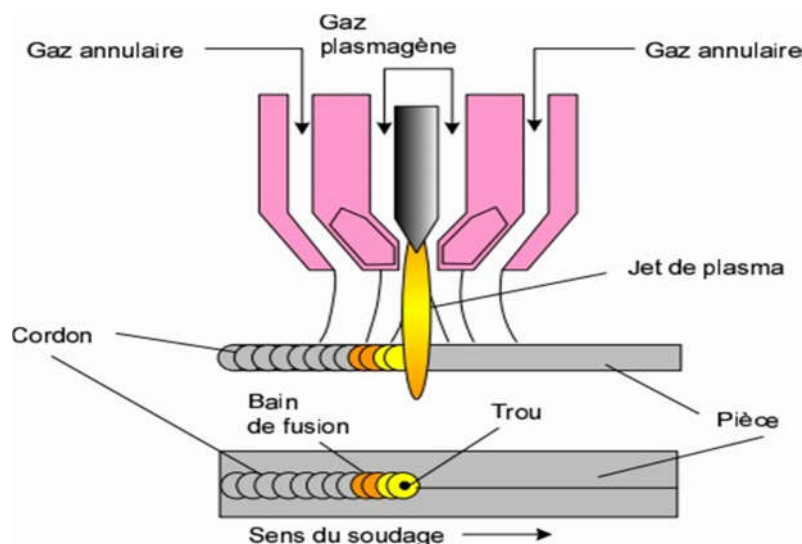


Figure I. 6.Principe du soudage plasma [5].

Avantages du soudage plasma

On peut noter quelques avantages du soudage plasma:

- Possibilité de souder des pièces de très faibles épaisseurs (0,05 mm dans le cas du micro plasma).
- Possibilité d'obtenir de faibles valeurs de pénétration.
- Procède automatisé (précision et qualité dimensionnelles des soudures réalisées).

I.6.5.Le procédé MIG / MAG

L'emploi d'un fil électrode fusible dévidé automatiquement en remplacement de l'électrode réfractaire dans le procédé TIG a donné naissance au procédé MIG / MAG. Dans le procédé MIG (métal inerte gaz), l'atmosphère de protection est inerte. Dans le procédé MAG (métal active gaz), elle est active. Les principaux gaz ou mélange de gaz utilisés sont l'argon et l'hélium en soudage MIG et le CO₂ en soudage MAG. La fusion du fil, ou plus exactement le transfert de métal dans l'arc peut se faire de trois manières: avec courts circuits, en grosse gouttes ou pulvérisation axial ,le mode de transfert dépendant principalement de la nature du gaz utilisé et de la densité de soudage.

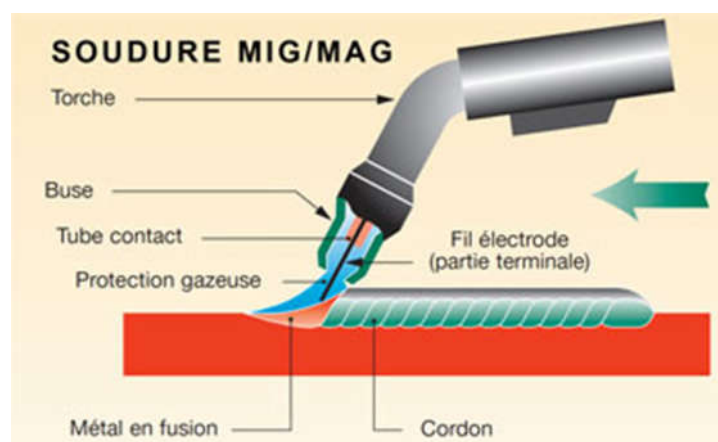


Figure I. 7.Procédé du soudage MIG [3].

Avantages et inconvénients:

Le procédé de soudage MIG soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (ou' il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés. Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution.il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée.

La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible. Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.

I.6.6.Soudage à l'arc avec l'électrode enrobée (SMAW)

I.6.6.1.Principe du procédé

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, (ou un transformateur) permet de produire un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et la pièce. La chaleur dégagée par cet arc électrique fait fondre localement les pièces à souder, créant un bain de fusion, et simultanément l'électrode métallique fournit le métal d'apport. L'atmosphère

gazeuse de l'arc est portée à très hautes températures et est fortement ionisée [13].

L'atmosphère gazeuse ne fournit qu'un faible part de l'énergie calorifique, la tache anodique et surtout la tache cathodique (où se présentent les ions positifs) en fournissant l'essentiel. La tâche anodique à une température qui dépasse (3500°C) pour atteindre celle de la volatilisation du métal d'apport.

I.6.6.2. Techniques du procédé

L'intensité du courant variant entre 30 et 400 ampères en fonction de différents paramètres. Le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur U_0 doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts. [8]

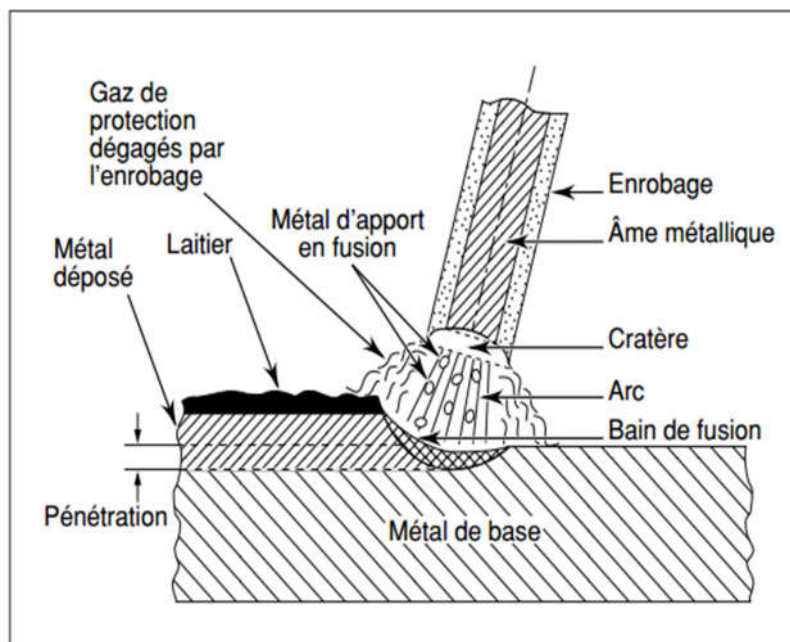


Figure I.8. Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW) [8]

I.6.6.3. Avantage du procédé

Facilité de mise en œuvre toutes positions, utilisation en atelier et à l'extérieur et l'excellente qualité des soudures (enrobage basique, enrobage rutile) ce sont les avantages du procédé de soudage.

I.6.6.4. L'électrode (l'arc)

L'âme : c'est la partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Elle conduit le courant et apporte le métal pour former le cordon de soudure. Elle comporte des éléments d'alliages très proches de ceux du métal de base à souder. Le diamètre est choisi en fonction du taux de dépôt désiré qui dépend à son tour des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Le courant de soudage est fonction du diamètre de l'âme de l'électrode.

L'enrobage : c'est la partie extérieure cylindrique de l'électrode assurant la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. Il est constitué généralement par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Les éléments les plus utilisés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre et graphite.



Figure I.9. L'électrode de soudage à l'arc électrique [14]

Il existe 5 grands types d'enrobage

- **Type A (acide):** oxydes de fer, de ferro-manganèse, silicate...
- **Type O (oxydant):** oxyde de fer, silicate de fer, manganèse, ferroalliages...
- **Type B (basique):** carbonate de calcium, spathfluor, ferroalliages
- **Type C (cellulosique):** matières organiques et cellulose
- **Type R (rutil):** oxyde de titane (95%) ou mélange d'oxyde de titane(50%) et d'oxyde de fer(50%). Les enrobages les plus utilisés actuellement sont de type basique et rutil.

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de Ø 1,6 à Ø 8 mm. La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm. Certaines électrodes peuvent atteindre un mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique). Les électrodes à enrobage basique et rutilo-basique doivent être étuvées dans un four à 300°C Celsius pendant 2 heures. Après étuvage, elles doivent être conservées à une température de 120°C dans des étuves portatives sur le lieu de soudage. Les autres types d'électrodes à enrobage rutil, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60%.

I.6.6.4.. Rôle de l'enrobage de l'électrode

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 , et ralentit le refroidissement et ajoute , dans certains cas , des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure [14]

Chapitre II

Les aspects de soudage à l'arc électrique

II.1.Introduction

Dans ce chapitre on étudie sur les différents aspects du soudage à l'arc électrique (aspects mécanique et thermique et métallurgique) et le couplage entre les différents aspects.

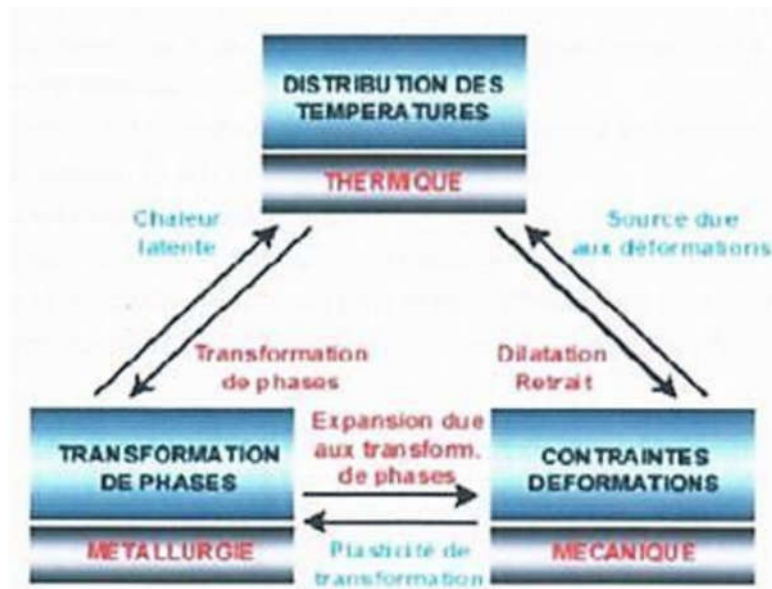


Figure II.1.Schéma des aspects thermiques, métallurgiques et mécaniques [9].

II.2.Les aspects 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 (ex .soudage à l'arc) .

II.2.1.Notion de cycle thermique

L'interprétation de tous les phénomènes résultant d'un effet thermique requiert comme condition nécessaire, la connaissance de la température atteinte. A cette condition de température s'ajoutent une ou plusieurs conditions de temps comme

par exemple, de séjour à température donnée de chauffage ou de refroidissement. pour 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(θ) en fonction du temps (t)[9]

La courbe $\theta =f(t)$ tracée en un point A voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs suivantes (fig. II.2) :

- ✓ La température maximale atteinte θ_m ;
- ✓ Le temps de séjours T_s au-dessus d'une température;
- ✓ La loi du refroidissement traduite par le temps de refroidissement (θ_1, θ_2) entre deux température θ_1 et θ_2 ou par la vitesse de refroidissement V_R à température θ_R

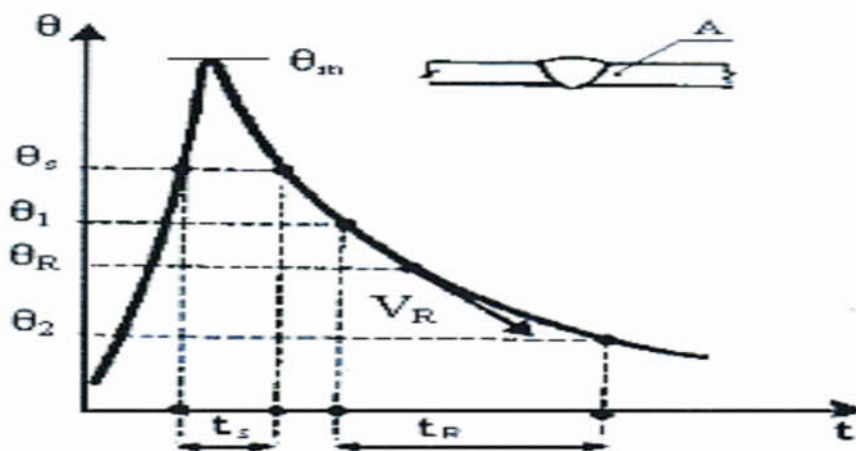


Figure II.2. Cycle thermique de soudage [9]

Ainsi déterminées en un point de l'assemblage, les grandeurs associées au cycle thermique nous permettent d'accéder à la connaissance ou la prévision des phénomènes métallurgiques qui prennent naissance, telles que les modifications de structure ou de transformation à l'échauffement et/ou au refroidissement.

Mais si nous voulons accéder à la répartition topographique aux alentours de la soudure, il nous faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe $\theta_m = f(x)$ donnant la variation de la température maximale θ_m atteinte en chaque point en fonction de la distance x (fig.III.3) chaque phénomène étant caractérisé par la température θ , ce qui permet de la situer grâce à la courbe $\theta_m = f(x)$ la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire.

Pour le soudage des aciers, cette expression est surtout réservée à la zone « austénitisée » par le cycle thermique de soudage c'est-à-dire qui est limitée par les isothermes correspondant au point de transformation A_{c3} (austénitisation complète) et A_{c1} (austénitisation partielle) [9]

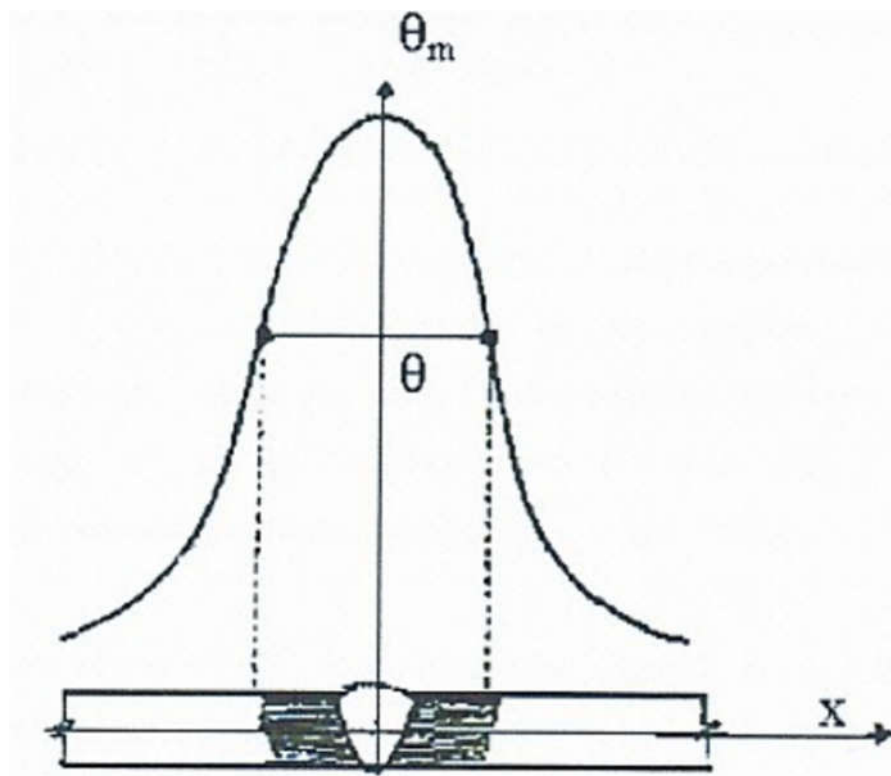


Figure II.3.Répartition thermique dans une soudure [9].

II.2.2.Caractères généraux du cycle thermique

II.2.2.1.Notion d'états quasi –stationnaires

Si nous relevons au moyen de thermocouples ,les courbes $\theta =f (t)$ en des points A_1 ,A_2 etc... située à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distance croissantes de l'origine O de se cordon , supposé amorcé en pleine tôle ,nous obtenons pour chaque parcours expérimenté par rapport à l'origine O de soudure, la disposition décrite par la (fig.II.4) qui conduit aux remarques suivantes:

- ✓ La température maximale atteinte θ_m croit la distance parcourue à
Partie du début du cordon puis se stabilise à une valeur qui devient
Constante tant que la source de chaleur progresse à une vitesse
uniforme et l'énergie demeurent constant ;
- ✓ Aux même temps les lois de refroidissement mesurées par le temps
entre deux températures deviennent identiques comme le sont les
temps de séjours sur non illustrés sur la figure);
- ✓ Autrement dit les courbes $\theta =f (t)$ deviennent superposables, dès
que la source de chaleur a franchi un certain parcours.

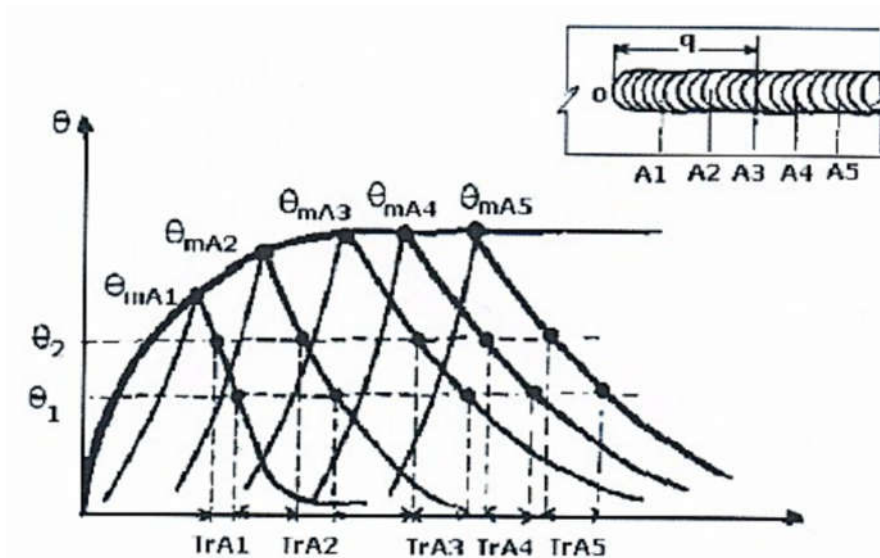


Figure II.4. Cycles thermiques le long d'un cordon de soudure [9].

II.2.3. Cycle thermique du soudage

Grâce à l'existence de l'état quasi-stationnaire nous pouvons limiter notre détermination des courbes température/temps à des points A, B, C... réparties sur une droite XY perpendiculaire à la ligne de soudure tracées à partir d'une position S de source de chaleur.

Quelle que soit cette position de la zone d'état quasi - stationnaire, les résultats seront les mêmes, schématisés par la disposition de la (fig.II.5) qui appelle les remarques la description ci-dessous.

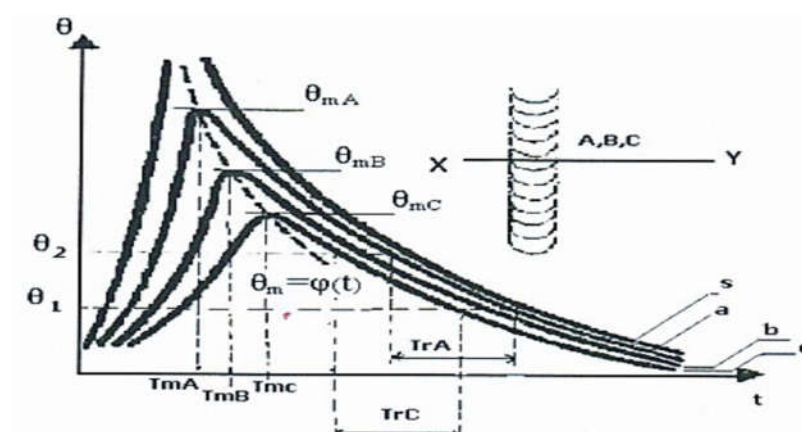


Figure II.5. Courbes température/temps [9].

Les courbes températures temps se situent les unes en dessus des autres au fur et à mesure qu'on augmente la distance entre les point de mesure et la ligne de soudure.

En particulier, les températures maximales atteintes $\theta_m A$, $\theta_m AB, \dots$ qui sont décroissantes de manière plus ou moins abrupte selon le gradient de température qui caractérise le procédé et le mode opératoire étudié. Naturellement toutes les courbes se rejoignent asymptotiquement au niveau de la température initiale du métal de base.

Les températures maximales atteintes θ_{mA} , θ_{mAB}, \dots etc. qui sont décroissantes à partir de la ligne de soudure, sont franchies pour des temps T_{mA} , T_{mB} , etc. qui sont croissants; ce décalage se traduit par la courbe $\theta_m = \theta(t)$ qui sépare les domaines des températures croissantes et décroissantes.

Pratiquement ceci exprime le fait qu'au voisinage de la source de chaleur, les points les plus rapprochés sont déjà en phase de se refroidir à partir de la température maximale qu'ils ont atteinte, alors que les points les plus éloignés sont encore en phase d'échauffement.

On conçoit tout l'intérêt de cette observation si on pense aux phénomènes qui sont commandés par une variation de température (transformation d'une part dilatation et retrait d'autre part) et dont la chronologie est ainsi expliquée. En particulier lorsque nous examinons la coupe transversale d'une soudure, nous voyons des aspects métallurgiques caractéristiques de ces phénomènes mais les structures que nous observons ne sont pas apparues aux mêmes moments.

Compte tenu de la disposition des courbes, la vitesse de refroidissement comptée à partir de la disposition des courbes, la vitesse de refroidissement comptée à partir de la température maximale, décroît lorsque la ligne de soudure croît, mais

les courbes de refroidissement constituent rapidement un faisceau assez serré et on observe par exemple aux points A et C des T_r pratiquement identique entre les températures θ_1, θ_2 situées dans ce faisceau, c'est ainsi qu'on peut parler d'une vitesse ou des temps de refroidissement associée à une condition de soudage, en particulier, pour étudier la transformation de l'acier au refroidissement entre 800°C et 500°C , intervalle de température particulièrement critique dans ce cas [9]

II.2.4. Soudage en plusieurs passes

Les données sur l'aspect du soudage qui ont été indiquées jusqu'à présent ont concerné le soudage par fusion en une seule passe. Examinons maintenant l'évolution de la température au cours des passes ultérieures. Cette évolution dépend principalement de la température initiale, le nombre de passes et de leurs conditions d'exécution, l'intervalle de temps entre passes et la position par rapport à la soudure du point dont on suit variation de la température.

II.3. Aspect métallurgique du soudage à l'arc

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 [9].

II.3.1. Phases métallurgiques:

On appelle phase métallurgique la partie d'un matériau, physiquement distincte, mécaniquement séparable, dont la composition (nature et proportion) et l'organisation atomique (structure cristalline ou autre) des éléments qui la composent ne dépendent que de sa température et de son niveau de pression.

Pour le fer et plus généralement pour tous les corps purs, les différentes phases métallurgiques possibles sont l'état gazeux, l'état liquide ou les différentes variétés allotropiques (structures cristallines) sous lesquelles le corps pur considéré peut exister à l'état solide.

Pour les alliages Fer Carbone, et plus généralement pour tous les aciers, à l'état solide, deux types de phases métallurgiques peuvent être rencontrés les solutions solides et les composés définis. Les solutions solides sont caractérisées par le caractère métallique de leurs liaisons inter atomiques. Elles ont, pour de faibles concentrations de soluté, la même structure cristalline que le solvant.

Elles peuvent être de substitution ou d'insertion. En revanche, dans le cas des composés définis, les liaisons inter atomiques perdent, plus ou moins selon les cas, leur caractère métallique au profit d'un caractère ionique. Leur structure cristalline est différente de celle du solvant et du soluté et, contrairement aux solutions solides pour lesquelles la proportion de soluté peut varier à l'intérieur d'un intervalle de solubilité, ils correspondent à une stœchiométrie fixe [10]

Pour les alliages fer carbone et plus généralement pour les aciers faiblement alliés, on distingue, à l'état solide, quatre phases métallurgique différentes:

- la ferrite qui est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α . Son réseau cristallin est cubique centré.

- la cémentite qui est un carbure de fer de type composé défini de formule stœchiométrique Fe_3C dont la maille est orthorhombique,
- la perlite, mélange hétérogène de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone, peut être lamellaire ou globulaire.
- l'austénite qui est une solution solide d'insertion de carbone dans fer γ dont le réseau cristallin est cubique à face centrée.

Au cours du soudage dont la vitesse de refroidissement est trop rapide, la diffusion de carbone vers l'extérieur de l'austénite n'a pas le temps de se produire, par conséquent le carbone reste emprisonné dans la ferrite. Lorsque n'est valable que pour des évolutions de température très lentes. Alors que les cycles thermiques industriels sont souvent rapides, donc, ces diagrammes ne sont plus applicables pour prévoir la nature exacte des différentes phases. Cependant il est commode d'utiliser ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales au voisinage de la ligne de fusion des structures soudées [10].

II.3.2. Structure globale de solidification

Au cours du soudage par fusion la structure de solidification en zone de fusion se réalise à partir de la structure du métal solide des zones environnantes. La solidification s'établit à l'interface solide-liquide à partir des grains existant à cette interface. Ces grains servent de substrats à partir desquels la croissance débute et se développe selon la direction du gradient maximum de température. Cette direction de croissance est celle de l'avancée du front de solidification afin de dissiper la chaleur latente de solidification vers le métal solide avoisinant. La structure d'une soudure est fortement influencée par les cycles thermiques du soudage. La taille et la forme de l'ancien grain beta que les transformations de phase qui se produisent lors du refroidissement sont des caractéristiques essentielles qui définissent les propriétés mécaniques des assemblages [10].

Selon la nature des métaux de base à assembler et les cycles thermiques appliqués, les microstructures des cordons de soudure, des zones de fusion et des zones affectées thermiquement. La figure (Fig. II.11 a et b) représentée les phases métallurgiques du cordon de soudage dans les différentes zones du soudage figurées dans le chapitre I dont la zone affectée thermiquement présente différentes zone de traitement thermique par recuit qui ont une relation avec le diagramme d'équilibre fer- carbone.

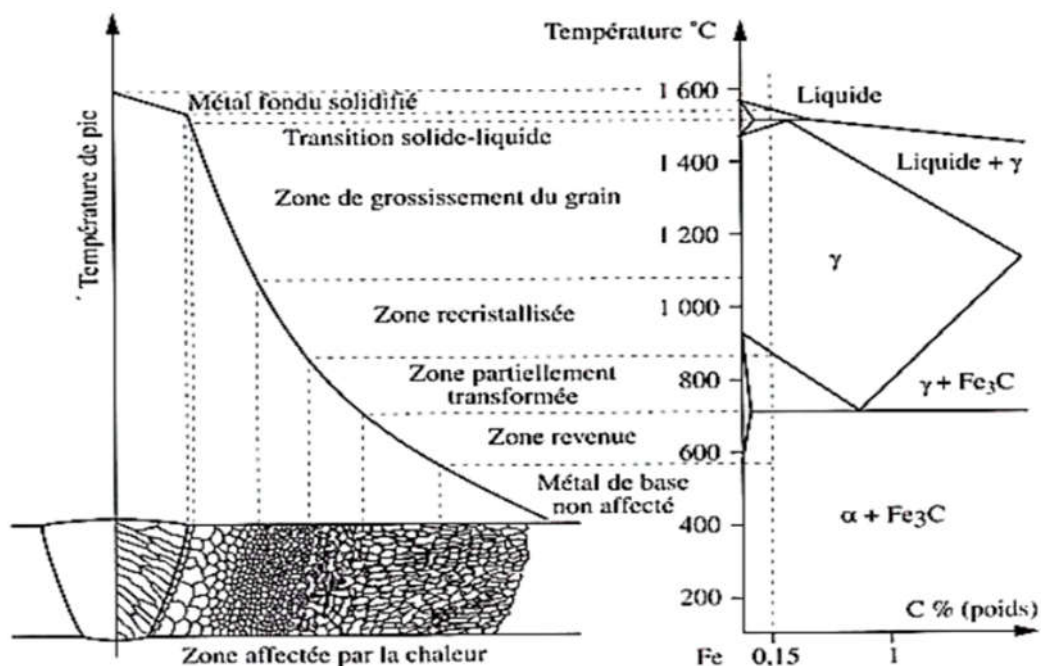


Figure II.6. Microstructure de la zone affectée thermiquement [10]

II.4. Aspects mécaniques du soudage

L'histoire thermique et modifications de microstructures provoquées par le soudage s'accompagnent naturellement d'évolutions importantes des propriétés 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 .

II.4.1.Déformations et contraintes par le soudage

II.4.1.1.Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés

Les déformations de retrait n'étant pratiquement jamais libre, il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé On peut distinguer quatre types de contraintes.

II.4.1.2.Contraintes résiduelles directes

Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

II.4.1.3.Contraintes résiduelles indirecte

Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, que s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.

II.4.1.4.Contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)

Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage. On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence [9].

II.4.1.5. contraintes longitudinales dans les assemblages bout à bout

Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales (σ_L) atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal fondu. Pendant le soudage, la métal de

base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est portée à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où le métal est pratiquement froid ; les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement une traction sur le métal de base. Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords.

II.4.2. Effet des contraintes résiduelles sur l'assemblage soudé

II.4.2.1. Résistance statique de l'ensemble

Les contraintes résiduelles s'auto-équilibrent et l'on admet généralement qu'elles n'ont pas d'influences défavorable sur le comportement statique de l'ensemble, à condition qu'une quantité suffisante de métal déposé assure une résistance convenable (sans fissure, ni amorce de rupture). Il existera toujours à côté de contraintes résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposés et qui agiront dans le sens favorable.

Lorsque de légères déformations plastiques se produisent sous l'effet des charges de service dans les zones les plus sollicitées, les contraintes résiduelles tendent à disparaître.

II.4.2.2. Les retraits

Les déformations de retrait, engendrées par la dilatation empêchée suivent nécessairement la symétrie axiale de la répartition du flux thermique (voir ci-dessous) [11]. Leur apparition est liée aux certains facteurs comme la quantité de chaleur introduite dans le joint soudé, la géométrie du joint, la nature du matériau, les facteurs d'exécution (procédé, nombre de passes, position, ...etc.) et les facteurs de bridage ou d'auto bridage des éléments à souder.

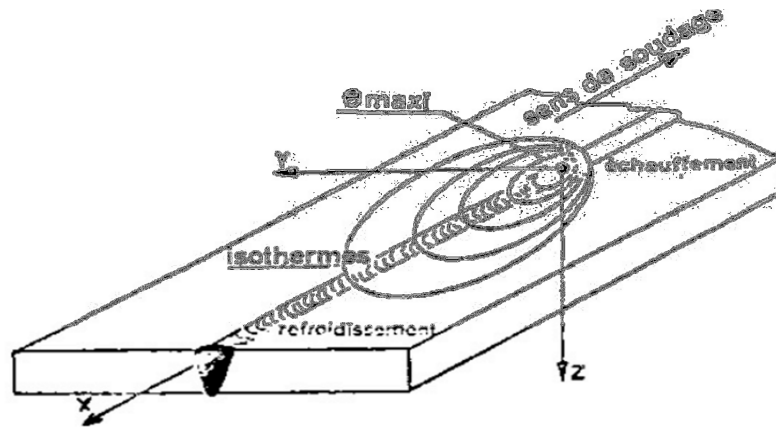


Figure II.7. Influence de soudage sur le retrait de déformation [11].

II.4.2.2.1. Le retrait longitudinal (RL)

Le raccourcissement se produit parallèlement à la direction du cordon de soudure. C'est l'effet de la contraction du métal d'apport qui est prépondérant. Le décalage du cordon de soudure par rapport à l'axe neutre de la pièce, entraîne secondairement une flexion longitudinale.

II.4.2.2.2. Le retrait transversal (RT)

Il se produit perpendiculairement à la direction du cordon de soudure, dans le plan des pièces. Il est lié à la largeur du joint soudé, influencé par la section du métal fondu, la forme des chanfreins, le jeu entre les pièces, le mode opératoire (nombres de passes) et par les facteurs de bridage. Le retrait transversal peut se traduire par un retrait angulaire ($R\alpha$) défini par la rotation des pièces et par l'effet de pliage dû aux écarts des retraits dans les différentes couches en épaisseur des pièces : cordon plus étroit à la racine qu'à la dernière passe [11].

II.4.2.2.3. Le retrait suivant l'épaisseur

Celui-ci peut être négligé car il est peu important. Par contre, il peut dans certains cas, engendrer des contraintes résiduelles importantes propices à la naissance de fissures (fortes épaisseurs).

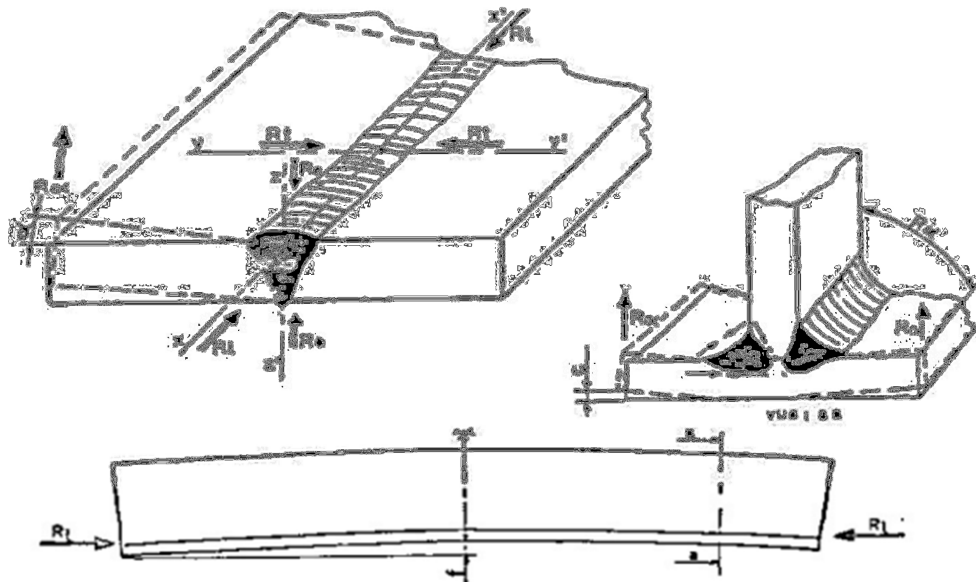


Figure II.8. Défiant type de retrait [11].

II.4.3. Les déformations liées aux phénomènes de retrait

L'étude détaillée d'un ensemble soudé nous permet de déterminer au regard des « mécanismes de retrait » le type et le sens prévisible des déformations.

II.4.3.1. Les déformations longitudinales

Le raccourcissement de la zone soudée peut s'expliquer comme étant la conséquence d'une force dite « de retrait ». La ligne d'application de cette force se trouvant au centre d'inertie de la surface où sont concentrées les contraintes résiduelles de traction. Dans ce cas une compression pure, donc pas de déformation de flexion. C'est une disposition constructive intéressante car elle permet, dans le sens longitudinal, des déformations minimales [11].

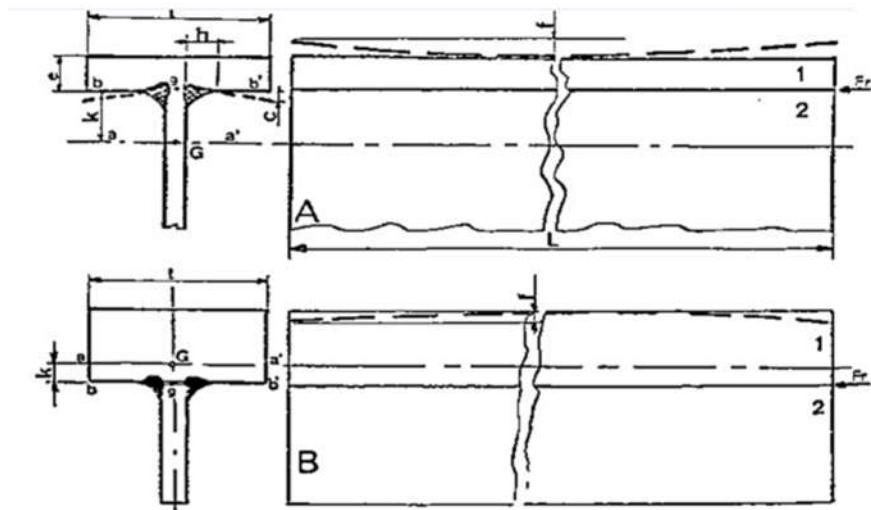


Figure II.9. Les déformations longitudinales

II.4.3.2. Les déformations dues au retrait transversal

II.4.3.2.1. la rotation angulaire ($R\alpha$)

Ce sont les plus faciles à prévoir, par pré-déformation angulaire ou par bridage en position (si le matériau le permet).

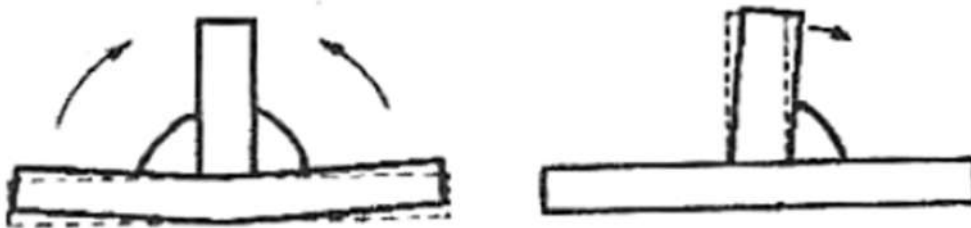


Figure II.10. La rotation angulaire [11].

II.4.3.2.2. L'effet de pliage

Il apparaît dans le cas des cordons d'angle. C'est surtout la largeur (h) du cordon qui provoque l'effet de pliage. Dès que l'épaisseur est suffisante, (c) devient négligeable. L'effet de pliage (c), pour une gorge de valeur (a), est proportionnel à la largeur de l'aile ou de la semelle.

Chapitre III

Techniques expérimentales

et résultats

III. Procédure expérimental

III.1 Procédés du soudage utilisés

Deux procédés de soudage électrique utilisés dans notre étude qui sont le soudage à l'arc électrique manuel classique et le soudage semi-automatique métal sous un gaz inerte MIG. Les deux figures III.1 et III.2 illustrent le schéma et le principe de deux procédés. La chaleur nécessaire à la fusion des pièces à souder est fournie par un arc électrique libre qui jaillit entre l'électrode du métal d'apport et les pièces à assembler. La protection de l'arc et du bain de fusion est assurée par un gaz produit du grillage de la matière enrobant la baguette métallique dans le cas du procédé manuel et par gaz d'argon dans l'autre procédé.

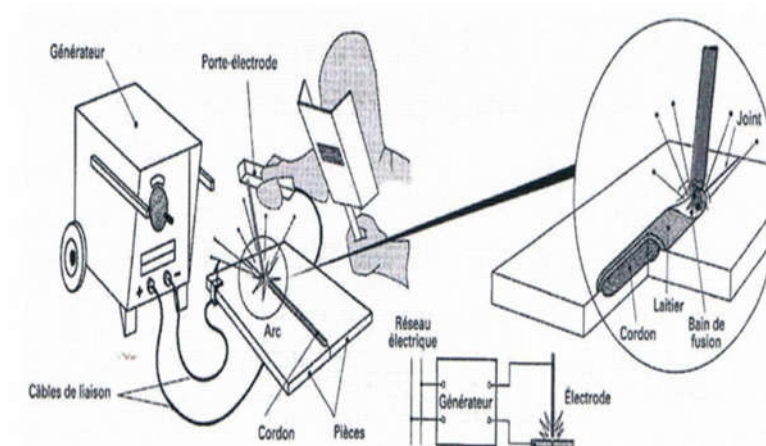


Figure III.1: Procédé de soudage électrique manuel utilisé

En fonction des conditions d'alimentation de l'arc, le transfert du métal se fait soit par pulvérisation, soit sous forme de grosses gouttes obtenues au cours du soudage entre l'extrémité du métal d'apport de l'électrode et le bain en fusion. Selon le mode de transfert, la composition chimique du métal

déposé par rapport à celle du métal d'apport évolue plus au moins par volatilisation ou réaction diverses avec le milieu environnant; il est nécessaire de choisir le métal d'apport et la matière qu'il enrobe. Ces matériaux doivent présenter des caractéristiques compatibles à ce du métal de base.

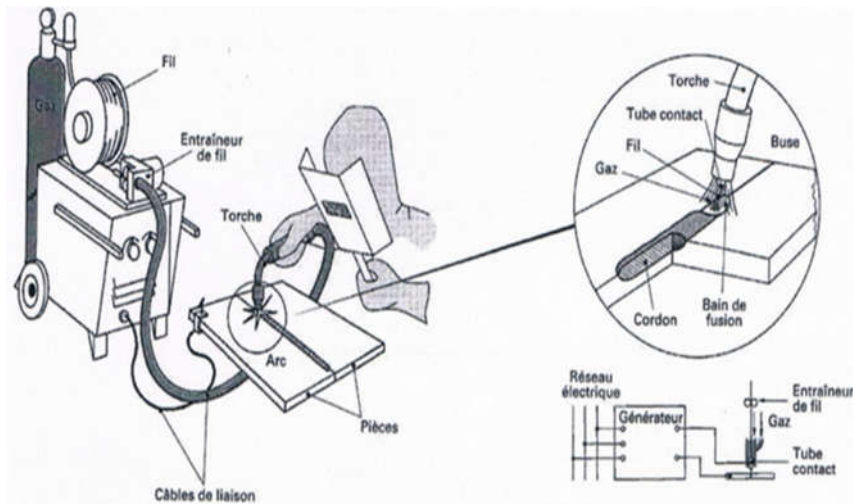


Figure III.2 : procédé de soudage Semi-automatique MIG

L'arc électrique est entretenu par un courant continu à l'aide d'un générateur du courant (poste à souder) figure III.3. Le générateur utilisée c'est un transformateur, auto régulateur, essentiellement constitue par un transformateur qui réalise à lui seul abaissement de la tension, la stabilité et le réglage de l'intensité du courant du courant. Le primaire du transformateur se branche directement sur le secteur d'alimentation (phase du réseau) par l'intermédiaire d'appareil de protection.



Figure III.3. Poste à souder a l'arc électrique utilisé.

Sur le circuit secondaire du transformateur sont disposés les organes de stabilisation et de réglage de l'intensité du soudage. L'une des sortie du secondaire est réuni à l'électrode, l'autre est connecté aux pièces par l'intermédiaire d'un câble de masse relie soit de la table métallique de soudage soit sur les pièces à souder. Un dispositif de réglage de l'intensité du courant comporte alors une self dont on peut faire varier la valeur en déplaçant d'un volant. Le tableau récapitule les caractéristiques techniques de l'appareil de soudage utilisé.

III.2. Matériaux utilisés

Deux types de matériaux sont utilisé lors du procédé de soudage pour assembler deux parties identiques en formant des échantillons qui présentent des éprouvettes destinées d'une façon général aux essais de traction.

III.3. Métal de base

Le métal de base à souder utilisé lors de ce travail est un acier de construction mécanique E335(A60). Les tableaux III.2 et III.3 récapitulent la composition chimique et les propriétés mécaniques de cet acier. Du point de vue général, l'acier du métal de base est conçu pour les applications réclamant une très bonne soudabilité. Il présente aussi des bonnes propriétés physiques et chimiques notamment sa meilleure résistance à la corrosion.

C	S	Mn	P	Si
Non communiqués	0,045 maxi	Non communiqués	0,045 maxi	Non communiqués

Tableau III.4 : Composition chimique % du métal de base.

Rm N/mm ²	Re N/mm ²	A %
590 / 770	305 / 335	6 / 16

Tableau III.5 : caractérisation mécanique de métal de base.

III.4. Préparation des échantillons et éprouvettes

Environ douze pièces d'acier ont été réalisées à l'aide d'un barreau en acier cité auparavant de dimensions de 100 mm de longueur, 30mm de largeur et de 5mm d'épaisseur. Pour chaque pièce. En vue de préparer des éprouvettes, les morceaux d'acier découpés sont sectionnés à trois différents angles d'inclinaison de 45°, pour atteindre à la formation de chanfrein de type V, K et X.

La figure III.6 présente deux morceaux d'acier préparé pour former une éprouvette de traction.



Figure III.6: Forme de chanfrein V

III.5. Essai de traction

L'essai de traction utilisé lors de ce travail pour la caractériser mécaniquement les éprouvettes en acier utilisé. Etant purement uniaxiale du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxiale. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc, nécessaires dans les calculs de structure. Nous donnons ici tous d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les mesures de déformation et de charge appliquée.

III.5.1. Description générale d'une machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile. Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Cette machine de traction comporte un système lié au micro ordinaire, qui permet de mesurer graphiquement et numériquement l'effort appliqué à

l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage.

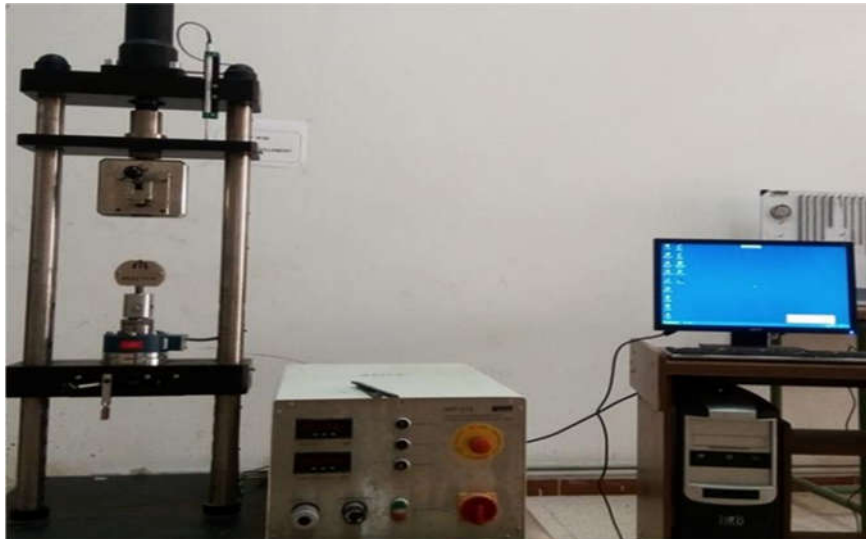


Figure III.7 : Machine de traction W310 machine hydraulique universelle

III.5.2. L'éprouvette utilisée

Les éprouvettes utilisés et destinés pour les essais de traction sont plates. la section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas de ces éprouvettes, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes. Pour éviter toute sorte de contamination chimique du bain fondue au cours du soudage, un suivi d'un nettoyage préalable a été effectué sur les bords des joints à souder pour débarrasser toutes inclusions figurant sur

la surface de contact qui sera responsable aux effets d'adhésion dans la zone de liaison du cordon de la soudure.



Figure III.8: Eprouvette subi un essai de traction

III.6. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons destinés au traitement de Micrographie est divisée en deux étapes, le coupement à froid et le polissage

III.6.1. Le découpage à froid

On effectue un découpage au jet d'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) des pièces d'acier cémentées à l'aide d'une machine de cisailage des métaux figure (III.9). Le but est d'obtenir, après faire la cisaille, des éprouvettes cylindriques avec dimensions déterminées pour les six types d'aciers.

Après avoir préparé par coupement à froid et cémenté des éprouvettes destinées à l'étude microscopique sont monté tout d'abord sur un porte échantillon en acier de forme prismatique creux subissent deux principales opérations:

- le polissage,
- l'attaque révélatrice de la microstructure.

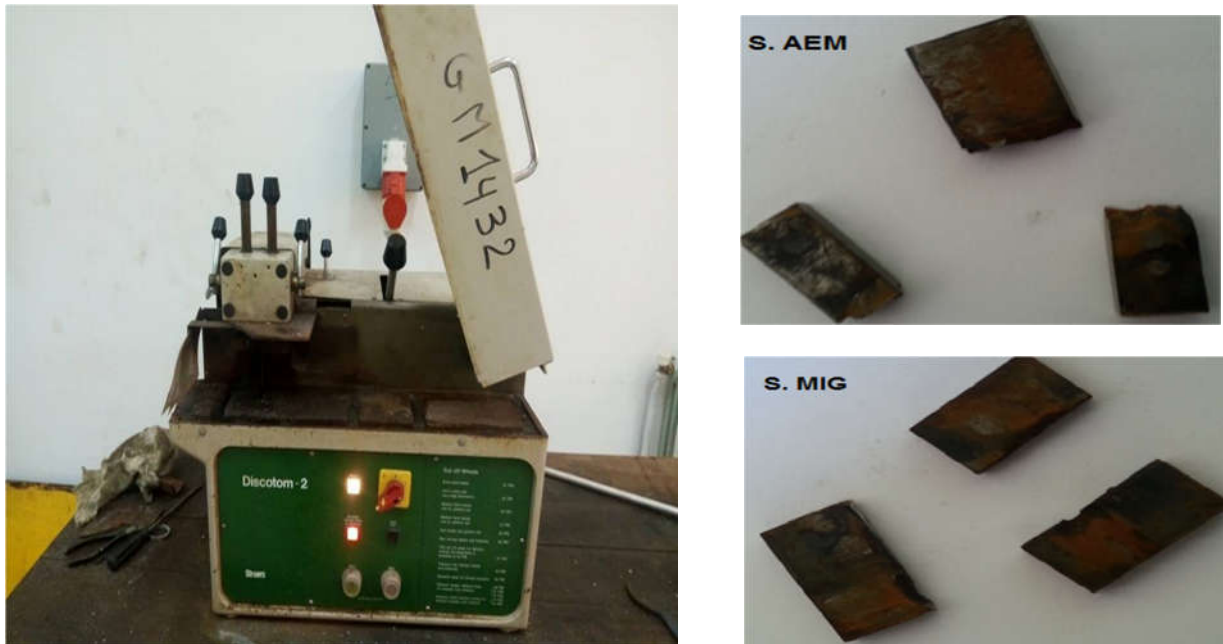


Figure III.9 : la machine de cisailage des métaux et les échantillons obtenus par soudage AEM et MIG destinés aux observations micrographiques

III.6.2. Le polissage

Le traitement de polissage réalisé sur les pièces est un polissage mécanique manuel figure (III.10.). Le polissage proprement dit a pour buts principaux l'obtention d'une surface plane de rugosité minimale, mais également l'élimination de la couche superficielle de l'échantillon dont la microstructure pourrait être non-représentative du matériau (couches d'oxydes ou écrouissage provenant de la découpe...). Le polissage est l'action de polir, de rendre uni et luisant par le frottement. Il est une composante de la finition des pièces mécaniques par laquelle on s'attache non seulement à respecter les cotes imposées, mais en plus à obtenir un bel aspect, un fini ou un état de surface de haute qualité

Un polissage grossier de la surface. Les échantillons sont polis à l'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) avec du papier abrasif en passant vers des grains de plus en plus fins (80, 100, 220, 320, 500, 1000, 1200, 1500, 2000,

25000, 3000, 5000). Entre chaque papier, il faut, croiser la direction de polissage pour un papier donné, on polit toujours dans le même sens, et on croise les sens d'un papier à l'autre, ce qui permet de faire ressortir les rayures résiduelles de l'étape précédente.



Figure III.10 : la machine de polissage

III.6.3. Attaque chimique

L'attaque des échantillons met en évidence la morphologie des grains, les défauts ou irrégularités de la surface, les sous-structures, les précipités, les inclusions, etc. La méthode d'attaque utilisée est l'attaque chimique qui provoque une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains. Pour révéler la structure des couches intérieures des pièces d'aciers cémentés, dans ce travail, on a utilisé le Nital, de composition chimique (HNO_3 (4%) + alcool éthylique), comme réactif. La durée de l'attaque est de 2 à 3 secondes.

III.6.4. Micrographie

Il est fait par un microscope optique qui est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit

observable à l'œil nu. Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais compte tenu de sa faible résolution, il n'est pas possible de l'utiliser pour une observation fine d'objets rugueux de petite taille. Les images sont observées et enregistrées aussi à l'aide d'un PC connecté.



Figure III.11: Microscopie optique utilisé

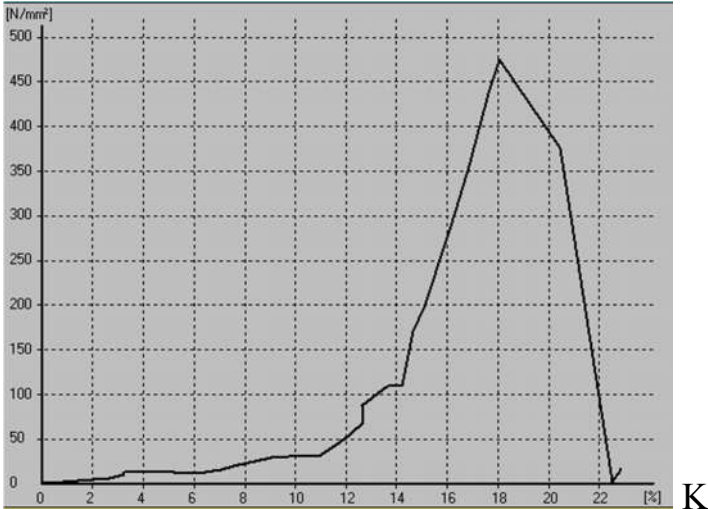
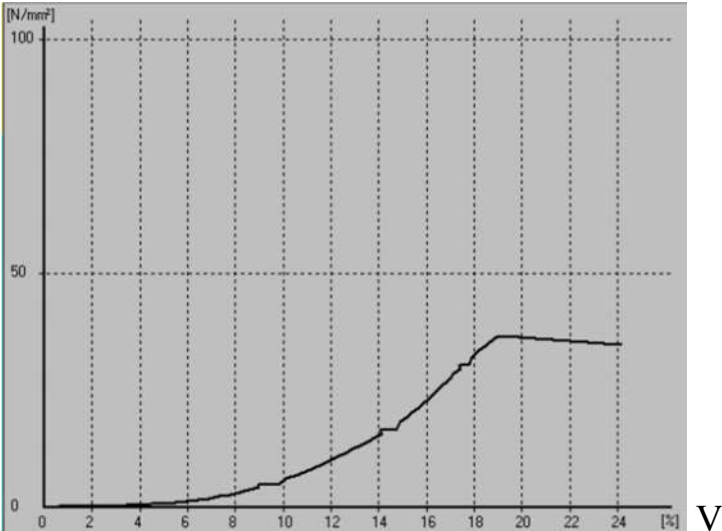
III.7. Résultats et interprétations

Avant d'entamer cette partie de ce chapitre qui représente les résultats et leurs interprétation, il est nécessaire de rappeler le lecteur que la partie de caractérisation concernant les essais de traction et les observation métallographiques relative à ce travail ont été effectués au laboratoire de mécanique de notre département. Les différents dispositifs utilisés soit pour les essais de traction et pour les essais de caractérisation microstructurales ont été indiqués ci-dessus.

Nous allons ensuite faire une présentation et un commentaire à propos des résultats relatifs aux éprouvettes obtenus par procédé de soudage à l'arc électrique manuel et caractérisés mécaniquement à l'aide de l'essai de traction. Pour ceci deux sortes d'éprouvette ont été réalisées par le procédé électrique en variant deux paramètres qui sont l'intensité du soudage et la surface de contact.

III.7.1. Résultats des essais de traction

Les figures suivantes représentent les résultats de l'essai de traction que nous avons effectué sur des éprouvettes soudées par procédé du soudage AEM.



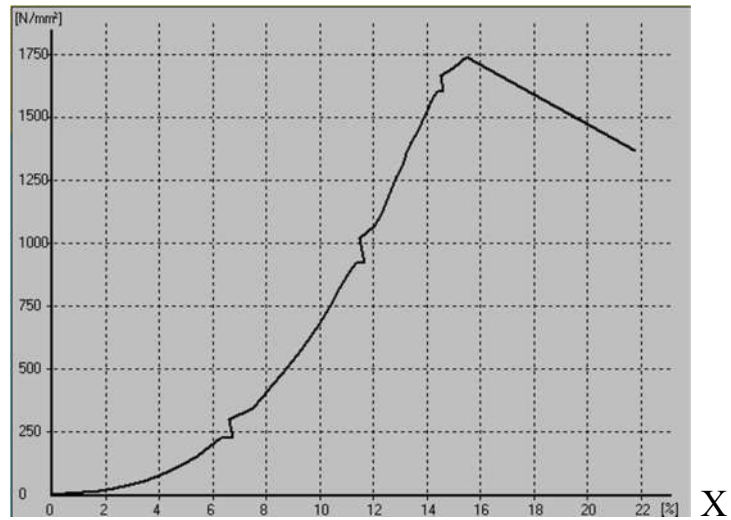
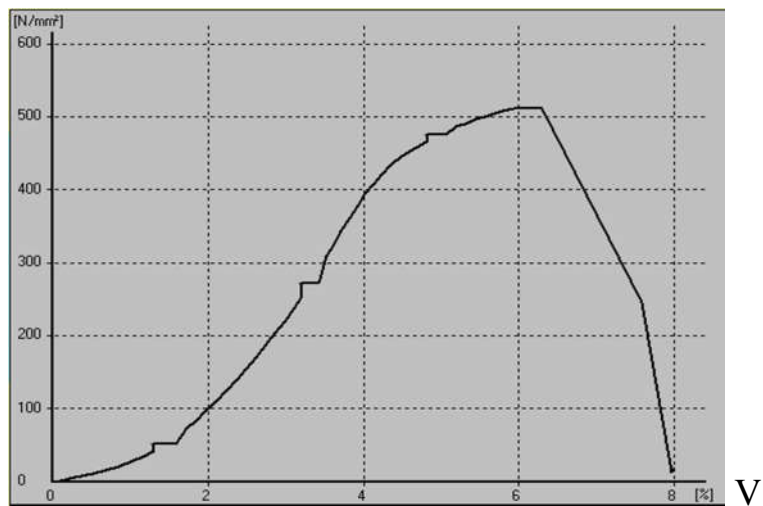


Figure III.12. Courbe de traction des aciers soudés par AEM pour les chanfreins V, K et X

Les suivantes représentent les résultats de l'essai de traction que nous avons effectué sur des éprouvettes soudées par procédé du soudage MIG.



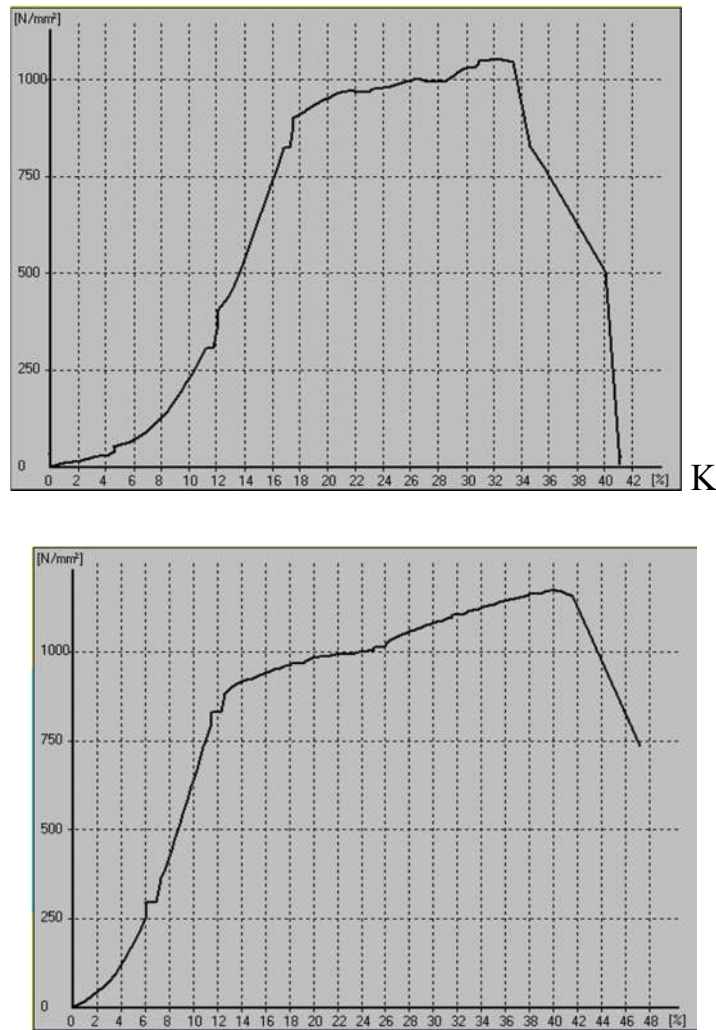
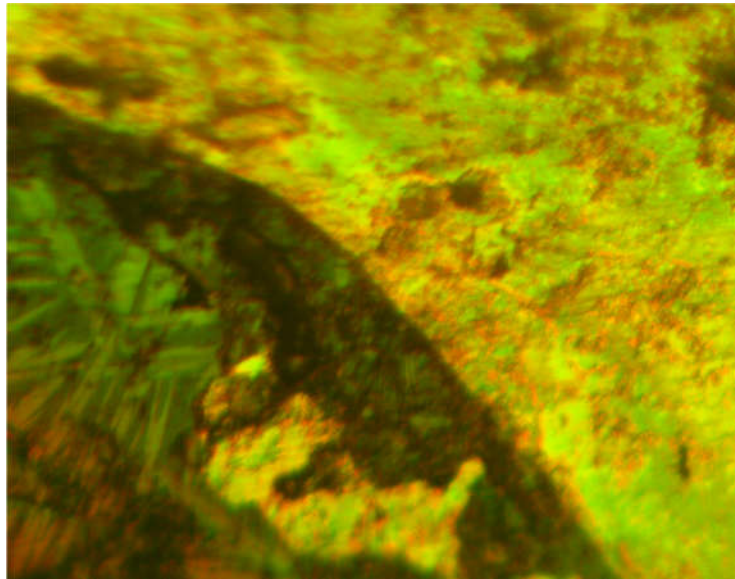


Figure III.13 : Courbes de traction des aciers soudés par MIG pour les chanfreins V, K et X

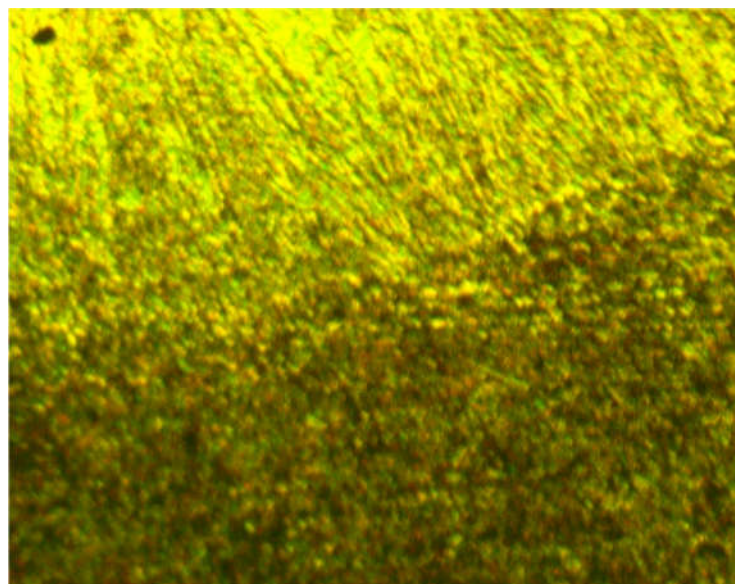
Nous remarquons d'après les courbes obtenues par les deux procédés de soudage que la résistance de traction augmente avec l'augmentation de la surface du contact entre l'acier et le métal d'apport. Ceci est confirmé par la forme du chanfrein X qui présente une surface élevée respectivement par rapport les autres chanfreins K et V. D'après toujours les deux figure et point de vue comparative, les échantillons soudés par MIG présentent des joint plus adhérent au métal de base par rapport aux échantillons par arc électrique manuelle.

III.7.2. Résultats de l'analyse métallographique

Les figures suivantes représentent la microstructure de l'assemblage que nous avons effectué sur des éprouvettes soudées par procédé du soudage à l'arc électrique manuel en variant la forme du chanfrein.



V



K

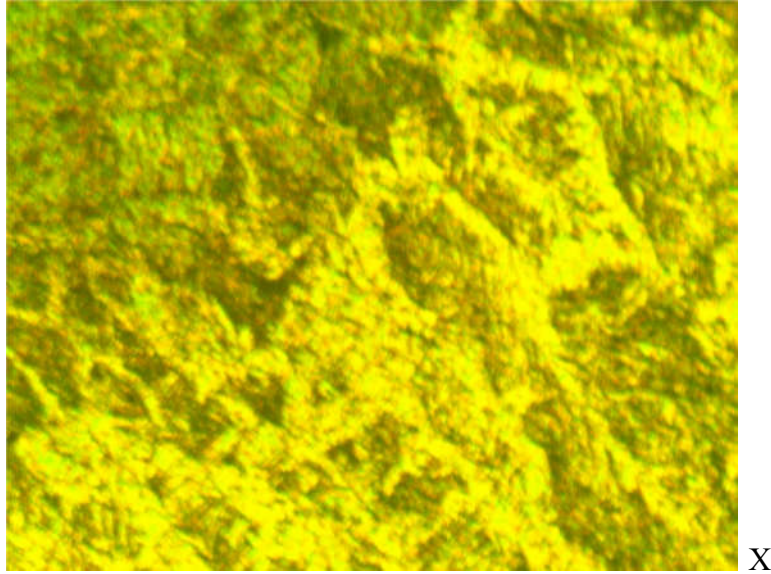
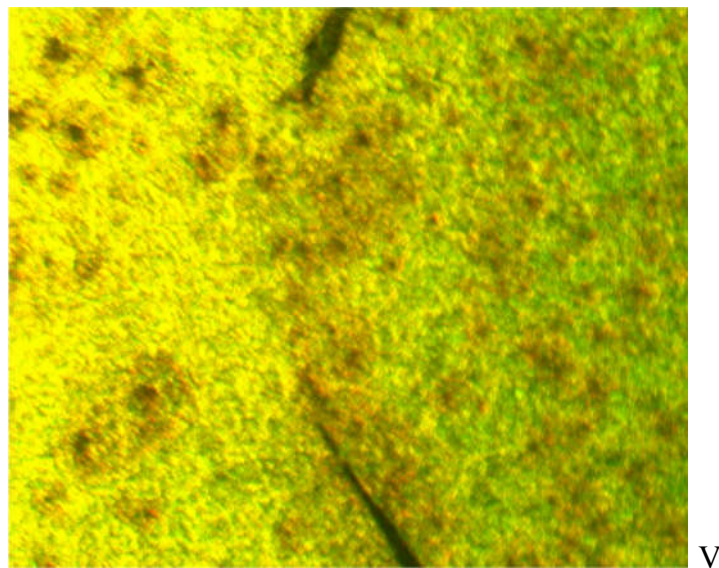


Figure III.14 : Microstructure des aciers soudés par AEM pour les chanfreins V, K et X (X200)

Les figures suivantes représentent la microstructure de l'assemblage que nous avons effectué sur des éprouvettes soudées par procédé du soudage semi-automatique par MIG manuel en variant la forme du chanfrein.



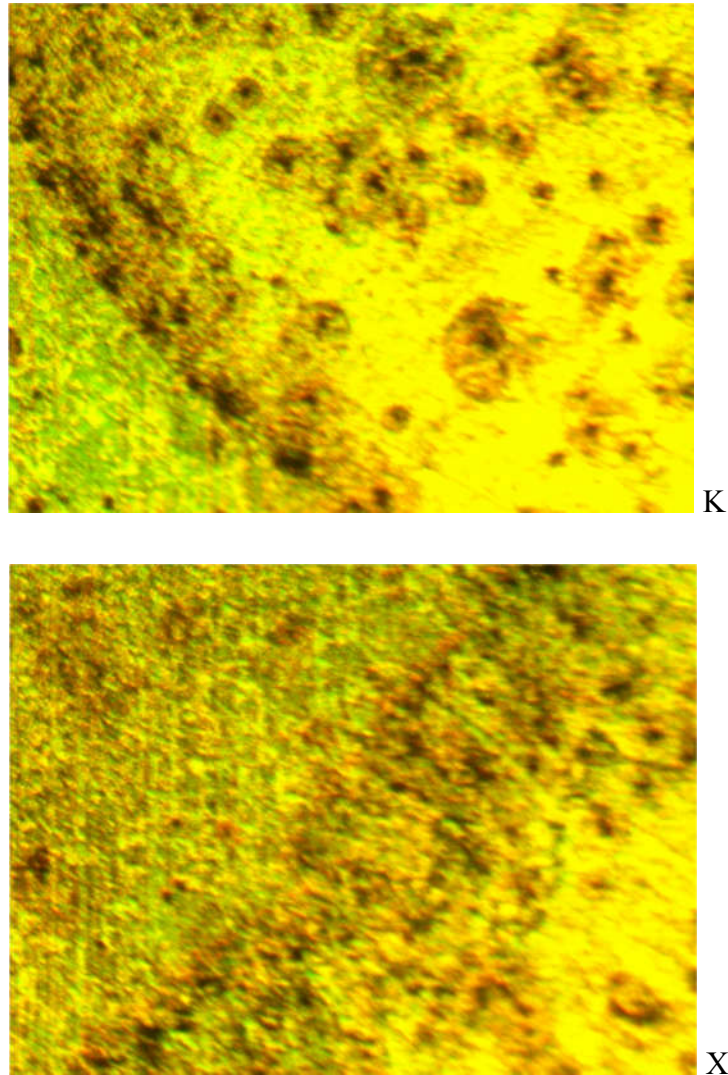


Figure III.15 : Microstructure des aciers soudés par MIG pour les chanfreins V, K et X
(X200)

Nous remarquons d'après les microstructures obtenues par les deux procédés de soudage que le matériau de base et le métal d'apport présentent une meilleure adhérence. Nous remarquons que cette caractéristique est beaucoup plus élevée dans le cas du soudage par MIG (métal sous atmosphère d'argon). Le mode de chanfrein X donne des résultats concluants par rapport aux chanfreins K et V. D'après toujours les deux figures et point de vue comparative, les échantillons soudés par MIG présentent des joints plus adhérents au métal de base par rapport aux échantillons par arc électrique manuelle.

III.8.Conclusion générale

Dans cette étude modeste nous avons réalisé dans le projet de fin d'étude les essais de traction et les observations métallographiques des échantillons d'acier ont été effectués après le processus de soudage par soudage à l'arc électrique manuel et par soudage semi – automatique MIG .

- Nous avons constaté que grâce aux résultats de la comparaison après l'examen métallurgique des éprouvettes, la résistance au soudage augmente en augmentant la surface de contact entre l'acier et le métal d'apport.
- Les matériaux de base et le métal d'apport ont plus d'adhérence dans le cas du soudage MIG, c'est-à-dire que les échantillons soudés de MIG ont plus de joints adhérant aux métaux de base comparés aux échantillons dans le guide électrique d'arc.

Références bibliographiques

- [1]: Ronald CAZES procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Techniques de l'ingénieur, B7700.
- [2]: www.soudeur.com
- [3]: Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de: MASTER CONCEPTION ET PRODUCTIQUE/Optimisation de la vitesse de soudage a l'arc électrique des aciers /HICHEM BEKOUICHE -2013.
- [4]: JEAN-PIERRE PLANCKAERT (Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc).
- [5]: FELFEL OTHMAN (Caractérisation thermomécanique des tubes de faibles épaisseurs de l'acier inoxydable 304L et en alliage d'aluminium soudés par le procédé TIG), école nationale polytechnique, promotion 2006.
- [6]: MAKHLOUF HAMIDE (Modélisation numérique des aciers), 17 juillet 2008.
- [7]: Technique de l'ingénieur : les aciers inoxydables : critère et choix .
- [8] Wikipédia l'encyclopédie libre /matériau
- [9]: DEBIH MOUHAMED (Etude des paramètres technologiques des procédés de soudage à l'arc électrique) ;Université de M'sila 2012 .
- [10]: NGOC THUY TRINH (La Modélisation du Comportement Thermomécanique et Métallurgique des Aciers) l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées: 16 Juin 2008.
- [11]: Rémy AUBON Jean Michel LE MEUR (Etude Expérimentale Des Déformation en soudage) ACADEMIE DE CRETEIL.
- [12]: Lincoln Electric Europe (Le Soudage manuel à l'électrode enrobée)
www.lincolnelectric.eu : FE100.25 01/10

[13] :Ateliers BG / Les 5 types de joints d'assemblage par soudure-2014

[14]: SAADALLAH MESSAUDA (Etude des assemblages soudés manuellement par procédé électrique tôles en acier) ;Université de M'sila 2013 .

ملخص :

في عملنا هذا قمنا بدراسة مدى تأثير العوامل التكنولوجية المساهمة في عملية التلحيم على سلوك منطقة التلحيم ولمعرفة هذا التأثير قمنا بإجراء تجربة الشد عليها مع اختيار العامل الأحسن من بين العوامل التكنولوجية السالفة الذكر .

كلمات مفتاحيه : القوس الكهربائية , التلحيم , الشد...

Abstract :

In this work, we studied the effect of the contributing factors technology in the process of welding on the behavior of the welding and to find out this effect, we conducted a tensile experiment with the selection of the best factor among the aforementioned technological factors.

Keys words : electric arc, welding, tensile ...

Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet des facteurs technologiques qui contribuent au processus de soudage sur le comportement de la soudure et de découvrir cet effet . Pour connaître cet effet, nous avons effectué l'essai de traction avec la sélection du meilleur facteur parmi les facteurs technologiques mentionnés ci-dessus.

Mots-clés : arc électrique, soudage, traction ...