



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

**BENCHTIOUI Zid & MERIKHI Abdellah**

### Thème

**ETUDE D'ELABORATION ET CARACTERISATION DES JOINTS  
D'ASSEMBLAGE OBTENUS SUR DES ACIERS PAR PROCEDES  
DE SOUDAGE ELECTRIQUE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZAMMAMOUCHE. R.	MCB	Président
BENARIOUA. Y	PRO	Encadreur
MOUSSAI. T	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023

## ***Remerciements***

*Avant tout nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage et la force pour surmonter les difficultés durant notre étude.*

*Ce fut pour nous une grande chance que de pouvoir préparer ce mémoire de l'université Med Boudiaf m'sila.*

*Nos premiers remerciements s'adressent à notre encadreur*

*Pro **Y. BENARIAOUA** pour la qualité de son encadrement, Ses compétences et ses conseils nous tenons à remercier tous les membres de jury de soutenance.*

*Un grand merci aussi à toutes les personnes qui ne sont pas citées et qui ont néanmoins contribuées à ce travail.*

# إهداء

نحمد الله عز وجل الذي وفقنا في إتمام هذا البحث العلمي والذي ألهمنا الصحة والعافية والعزيمة، فالحمد لله حمدا كثيرا، نتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى كل من قدم لنا العون و التوجيهات و المعلومات القيمة التي ساهمت في إطراء موضوع دراستنا في جوانبها المختلفة كما نتقدم بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنه مناقشه الموقرة دون نسيان مديري ومعلمي ومتعلمي التعليم الثانوي ومديرية التربية والتعليم لولاية المسيلة، ولا ننسى تقديم الشكر الجزيل لكل الأساتذة المحترمين و الأستاذات بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة ، نقول لكم شكرا جزيلا على كل مجهوداتكم.

بن شتيوي زيد

# إهداء

إلى من أفضلها على نفسي ولم لا فلقد ضحت من أجلي، ولم تدخر جهداً في سبيل  
إسعادي على الدوام (أمي الحبيبة).  
نسير في دروب الحياة، ويبقى من يسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه  
صاحب الوجه الطيب والأفعال الحسنة، فلم يبخل على طيلة حياته (والدي العزيز)  
إلى أصدقائي وجميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون وفي أصعدة  
كثيرة.  
أقدم لكم هذا البحث وأتمنى أن يحوز على رضاكم

مريخي عبد الله

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b>	08
<b><u>Chapitre I : Les aciers et leurs soudabilités</u></b>	09
<b>I- Introduction :</b>	10
<b>I.1- Les Aciers au carbone</b>	10
<b>I.1.1 Éléments <math>\alpha</math>-gènes et <math>\gamma</math>-gènes</b>	11
<b>I.1.2 Les aciers non alliés</b>	12
<b>I.1.3 Constitution à l'état recuit</b>	13
<b>I.A.1 Microstructures des aciers :</b>	14
<b>I.B.1 Évolution des aciers en fonction des exigences relatives à la soudabilité</b>	17
<b>I.B.1.a Evaluation de la qualité d'une soudure</b>	17
<b>I.B.1.b Caractéristiques métallurgiques des soudures</b>	18
<b>I.B.2 Evolution de la composition chimique</b>	19
<b><u>Chapitre II : Soudage électrique</u></b>	22
<b>II.1. Introduction :</b>	23
<b>II.2. Définition de l'opération de soudage</b>	23
<b>II.3. Les zones principales du soudage</b>	23
<b>II.3.1. La zone fondue (ZF)</b>	24
<b>II.3.2. La zone affectée thermiquement (ZAT ou ZAC)</b>	24
<b>II.3.3. La zone de liaison</b>	24
<b>II.3.4. Le métal de base</b>	24
<b>II.4. Procédés de soudage</b>	24
<b>II.5. Généralité sur le soudage à l'arc électrique</b>	25
<b>II.6. Les principaux procédés de soudage à l'arc</b>	26
<b>II.6.1. Choix du procédé</b>	27

<b>II.6.2. Soudage automatique sous flux solide</b>	27
<b>II.6.3. Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas )</b>	27
<b>II.6.4. Soudage au plasma</b>	29
<b>II.6.5. Le procédé MIG / MAG</b>	30
<b>II.6.6. Soudage à l'arc avec l'électrode enrobée (SMAW)</b>	31
II.6.6.1. Principe du procédé	31
II.6.6.2. Techniques du procédé	31
II.6.6.3. Avantage du procédé	32
II.6.6.4. L'électrode (l'arc)	32
<b><u>Chapitre III : Aspects de soudage</u></b>	35
<b>III.1. Introduction</b>	36
<b>III.2. Les aspects thermiques du soudage</b>	36
III.2.1. Notion de cycle thermique	36
III.2.2. Caractères généraux du cycle thermique	38
III.2.2.1. Notion d'états quasi –stationnaires	38
III.2.3. Cycle thermique du soudage	39
III.2.4. Soudage en plusieurs passes	41
<b>III.3. Aspect métallurgique du soudage à l'arc</b>	41
III.3.1. Phases métallurgiques	42
III.3.2. Structure globale de solidification	43
<b>III.4. Aspects mécaniques du soudage</b>	44
III.4.1. Déformations et contraintes par le soudage	44
III.4.1.1. Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés	44
III.4.1.1.1. Contraintes résiduelles directes	45
III.4.1.1.2. Contraintes résiduelles indirecte	45

<b>III.4.1.1.3. Contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)</b>	45
<b>III.4.1.1.4. Contraintes longitudinales dans les assemblages bout à bout</b>	45
<b>III.4.1.2.1. Résistance statique de l'ensemble</b>	45
<b>III.4.2.2. Les retraits</b>	46
<b>III.4.2.2.1. Le retrait longitudinal (RL)</b>	46
<b>III.4.2.2.2. Le retrait transversal (RT)</b>	46
<b>III.4.2.2.3. Le retrait suivant l'épaisseur</b>	47
<b>III.4.3. Les déformations liées aux phénomènes de retrait</b>	47
<b>IV.1 Procédés du soudage utilisés</b>	51
<b>IV.2. Matériaux utilisés</b>	53
<b>IV.3. Métal de base</b>	53
<b>IV.4. Préparation des échantillons et éprouvettes</b>	54
<b>IV.5. Essai de traction</b>	54
<b>IV.5.1. Description générale d'une machine de traction</b>	55
<b>IV.5.2. L'éprouvette utilisée</b>	55
<b>IV.6. Préparation des échantillons</b>	57
<b>IV.6.1. Le découpage à froid</b>	57
<b>IV.6.2. Le polissage</b>	58
<b>IV.6.3. Attaque chimique</b>	59
<b>IV.6.4. Micrographie</b>	59
<b>IV.1. Résultats et interprétations</b>	61
<b>V.1.1. Résultats des essais de traction</b>	61
<b>V.1.1. Résultats des essais de traction</b>	61
<b>V.1.1.1. COURBES DE TRACTION</b>	61

<b>V.1.1.2. FORCES AUX POINT DE STRICTION ET DE RUPTURE</b>	62
<b>V.1.1.3. ALLONGEMENTS AUX POINT DE STRICTION ET DE RUPTURE</b>	65
<b>Conclusion générale</b>	67
<b>Résumé</b>	68
<b>Références Bibliographiques</b>	69

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.01:</b> Diagramme Fer – Carbone.	10
<b>Figure I.02 :</b> Effets des éléments alphagène et gammagène.	12
<b>Figure I.03 :</b> Constituant du diagramme à l'état recuit.	13
<b>Figure I.04 :</b> Diagramme microstructural de l'acier au refroidissement.	14
<b>Figure I.05 :</b> Mode de changement structural des états I II et III.	15
<b>Figure I.06 :</b> Déplacement du point eutectoïde.	16
<b>Figure I.07 :</b> Allure des limites d'élasticité de quelques aciers au carbone.	20
<b>Figure II.01 :</b> Les zones principales du soudage.	23
<b>Figure II.02 :</b> Classification des procédés de soudage.	25
<b>Figure II. 04 :</b> Soudage sous flux solide.	27
<b>Figure II.05 :</b> Principe de soudage TIG.	28
<b>Figure II.06 :</b> Principe du soudage plasma.	29
<b>Figure II.07 :</b> Procédé du soudage MIG.	30
<b>Figure II.08:</b> Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW).	32
<b>Figure II.09:</b> L'électrode de soudage à l'arc électrique.	33
<b>Figure III.01:</b> Schéma des aspects thermiques, métallurgiques et mécaniques.	36
<b>Figure III.02:</b> Cycle thermique de soudage.	37
<b>Figure III.03:</b> Répartition thermique dans une soudure.	38
<b>Figure III.04:</b> Cycles thermiques le long d'un cordon de soudure.	39
<b>Figure III.05:</b> Courbes température/temps.	40

<b>Figure III.06:</b> Microstructure de la zone affectée thermiquement.	44
<b>Figure III.07:</b> Influence de soudage sur le retrait de déformation.	46
<b>Figure III.08:</b> Déférant type de retrait.	47
<b>Figure II.09:</b> Les déformations longitudinales.	48
<b>Figure III.10:</b> La rotation angulaire.	48
<b>Figure IV.1:</b> Procédé de soudage électrique manuel utilisé.	51
<b>Figure IV.2 :</b> procédé de soudage Semi-automatique MIG.	52
<b>Figure IV.3:</b> Poste à souder a l'arc électrique utilisé.	52
<b>Figure IV.4:</b> Forme de chanfrein V.	54
<b>Figure IV.5 :</b> Machine de traction Z100 machine hydraulique universelle.	55
<b>Figure IV.6:</b> Les éprouvettes utilisés	56
<b>Figure IV.7:</b> Eprouvette subi un essai de traction	56
<b>Figure IV.8 :</b> la machine de cisailage des métaux	57
<b>Figure IV.9 :</b> la machine de polissage	58
<b>Figure IV.10 :</b> Liquide l'attaque chimique	59
<b>Figure IV.11:</b> Microscopie optique utilisé	60
<b>Figure IV.12:</b> Courbe de traction des aciers soudés pour les échantillons 1.2 et 3.	62
<b>Figure IV.13:</b> Courbe de traction des aciers soudés pour les échantillons 4.5 et 6.	63
<b>Figure IV.14:</b> Variation de la force de traction aux points de striction et rupture avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM.	64
<b>Figure IV.15:</b> Variation de la force de traction aux points de striction et rupture avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM.	65
<b>Figure IV.16:</b> Variation de l'allongement aux points de striction et rupture avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM.	65

**Figure IV.17:** Variation de l'allongement aux points de striction et rupture avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage MIG.

66

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.01 :</b> Tableau des compositions typiques des aciers au carbone.	11
<b>Tableau I.02 :</b> Constituant des aciers en fonction des teneurs en carbone.	13
<b>Tableau I.03:</b> Indicateur de la soudure.	18
<b>Tableau I.04 :</b> Variations des limites d'élasticité des aciers au carbone.	21
<b>Tableau II.01 :</b> Les différents procédés de soudage à l'arc.	26
<b>Tableau IV.1 :</b> Composition chimique % du métal de base.	53
<b>Tableau IV.2 :</b> caractérisation mécanique de métal de base.	53

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

# Introduction Générale

De nombreuses industries réalisent des assemblages d'éléments métalliques par soudage (chaudronnerie, menuiserie métallique, construction navale, offshore, ferroviaire et automobile,). Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristique des métaux utilisés.

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

Parmi les procédés de soudage par chauffage, on trouve le soudage à l'arc électrique, cette technique est la plus utilisée pour assembler deux pièces en acier.

Ce mémoire contient quatre chapitres, précédé par une introduction générale pour préparer ce qui sera traité :

- ❖ Chapitre I : Les aciers et leurs soudabilités.
- ❖ Chapitre II : Soudage à électrique.
- ❖ Chapitre III : Aspects de soudage.
- ❖ Chapitre IV : Procédé expérimentale et Résultats.

Et enfin nous avons résumé ce travail par une conclusion générale.

***Chapitre I***  
***Les aciers et leurs soudabilités***

## I- Introduction :

Le fer est un des métaux connus depuis longtemps, on l'extrait et on le travaille depuis des milliers d'années, la production intensive des aciers date du XIXe siècle, à partir des aciers au carbone (qui représentent encore 90 % de la production d'acier), on a développé toute une gamme d'aciers alliés :

- Les aciers faiblement alliés (contenant jusqu'à 5 % de chrome, de nickel etc.),
- Les aciers inoxydables (contenant typiquement 18 % de chrome et 8 % de nickel)
- Les aciers durs pour outillage (fortement chargés en chrome, molybdène, tungstène, vanadium et cobalt).

### I.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 (Figure I.01).

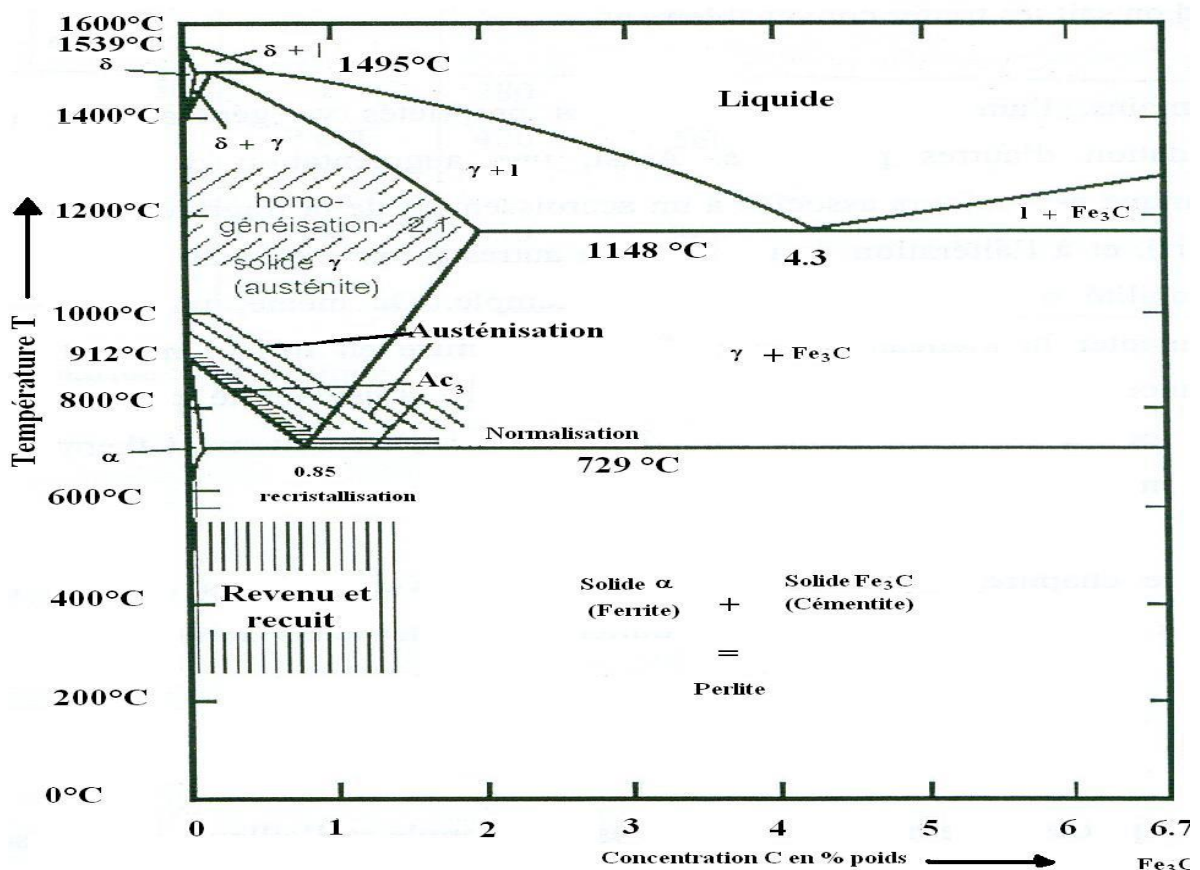


Figure I.01: Diagramme Fer – Carbone [1].

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 (voir tableau I.01).

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.

**Tableau I.01** : Tableau des compositions typiques des aciers au carbone [1].

Nous nous limiterons dans notre étude des aciers, aux aciers au carbone, or nous connaissons un peu les transformations qui se produisent dans les aciers et les microstructures qu'elles génèrent.

Donc, nous essaierons de regrouper ces connaissances et les utiliser pour conférer aux aciers des propriétés mécaniques déterminées.

### I.1.1 Éléments $\alpha$ -gènes et $\gamma$ -gènes :

D'après la Figure I.02, la mise en solution solide des éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points  $A_3$  et  $A_4$ , cette modification est importante et on a classé les éléments en considérant leur influence sur la position de ces points [1].

Un élément alphagène est un élément qui stabilise la phase CC. Par conséquent il élève la température du point  $A_3$  et abaisse celle du point  $A_4$

Un élément gammagène est un élément qui stabilise la phase CFC.

Par conséquent il abaisse la température du point  $A_3$  et élève celle du point  $A_4$

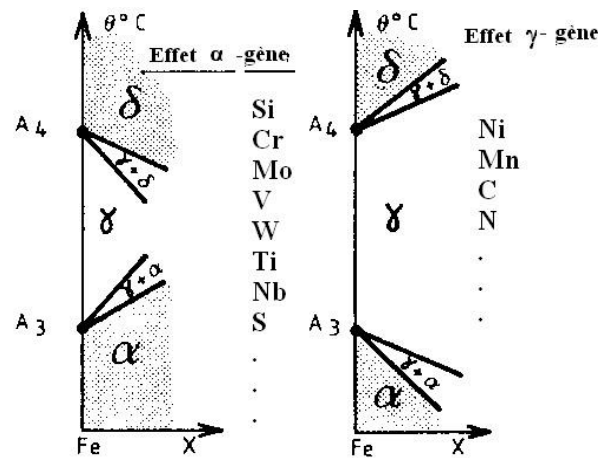


Figure I.02 : Effets des éléments alphagène et gammagène [1].

### I.1.2 Les aciers non alliés :

Cette famille d'aciers non alliés concerne tous les alliages dont la teneur en Carbone est inférieure à 2 %, on constate aussi que les teneurs en éléments normaux d'élaboration Mn, Si, S, P, Cu, Al ainsi que N et O (quelques millièmes %) sont relativement faibles. Ceci explique qu'on puisse utiliser le binaire Fe-C dont les frontières sont peu déplacées par la présence de ces divers éléments.

Ceux-ci sont soit en solution solide (ex. : P, Si, Mn) soit en combinaison dans des inclusions (ex. : MnS, FeS, SiO<sub>2</sub>, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> etc.).

Malgré leurs basses teneurs, les éléments « résiduels » affectent considérablement le comportement mécanique.

**Le Phosphore (P)** : diminue ductilité et ténacité, sa ségrégation aux joints de grains ainsi que celle de Sn, Sb, As est la cause principale de la fragilité de revenu de certains aciers.

**Le Soufre (S)** : sous forme d'inclusions allongées de MnS diminue les propriétés selon le travers court de certains produits.

**L'Azote (N)** : diminue ductilité et ténacité, sa migration interstitielle vers le cœur des dislocations conduit au vieillissement de certains aciers à température ambiante.

**I.1.3 Constitution à l'état recuit :**

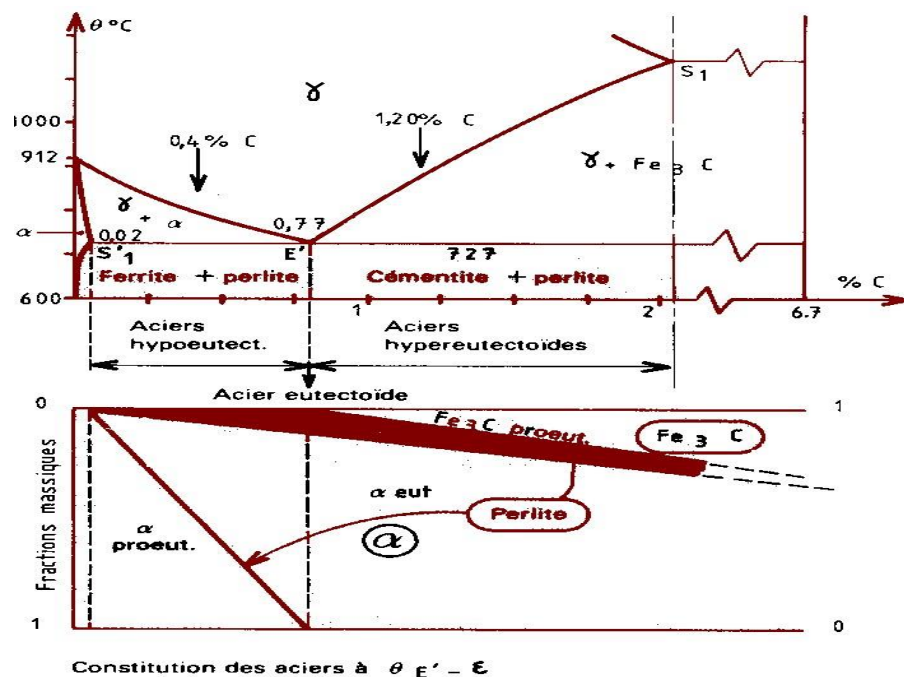
Le diagramme binaire Fe-C métastable est utilisé pour décrire la constitution des aciers non alliés à l'état recuit, la question qui se pose est pourquoi le recuit est appliqué sur les aciers ?

Parce que c'est le traitement qui a pour but d'amener le métal dans un état proche de l'équilibre. Donc en première approximation, la constitution des aciers non alliés à la température ambiante est particulièrement simple.

La Figure I.02 illustre les conclusions du diagramme de phases résumées ci-dessous et le tableau I.02 expose les différentes phases en fonction du pourcentage de Carbone.

Teneur en carbone	Constitution
$0 < \% C < 0,02 (S_1')$	Ferrite + Cémentite
$0,02 < \% C < 0,77(E')$ hypoeutectoïdes	Ferrite proeutectoïde + perlite
$\% C = 0,77(E')$ eutectoïde	Perlite
$0,77 < \% C < 2,11 (S_1)$ hypereutectoïdes	Cémentite proeutectoïde + perlite

**Tableau I.02 :** Constituant des aciers en fonction des teneurs en carbone [1].



**Figure I.03 :** Constituant du diagramme à l'état recuit [1].

### I.A.1 Microstructures des aciers :

Le diagramme de phases permet de déterminer la nature des constituants susceptibles de se former : il ne permet en aucun cas d'en prévoir la morphologie qui définit la microstructure du métal.

Cette microstructure dépend des conditions de germination et de croissance des diverses phases est essentiellement fixée par les conditions de refroidissement [1].

L'augmentation de la vitesse de refroidissement conduit à des structures de plus en plus fines, aussi bien des grains ferritiques (polygonaux équiaxes → polygonaux irréguliers → aciculaires) que perlitiques.

Le contrôle de la vitesse de refroidissement est donc un moyen de contrôler la microstructure de l'acier [1].

La Figure I.04 décrit une partie du diagramme fer – carbone plus précisément le cas d'un acier hypoeutectoïde (donc ferrito - perlitique) à 0,4 % C, les considérations suivantes ont été simplifiées.

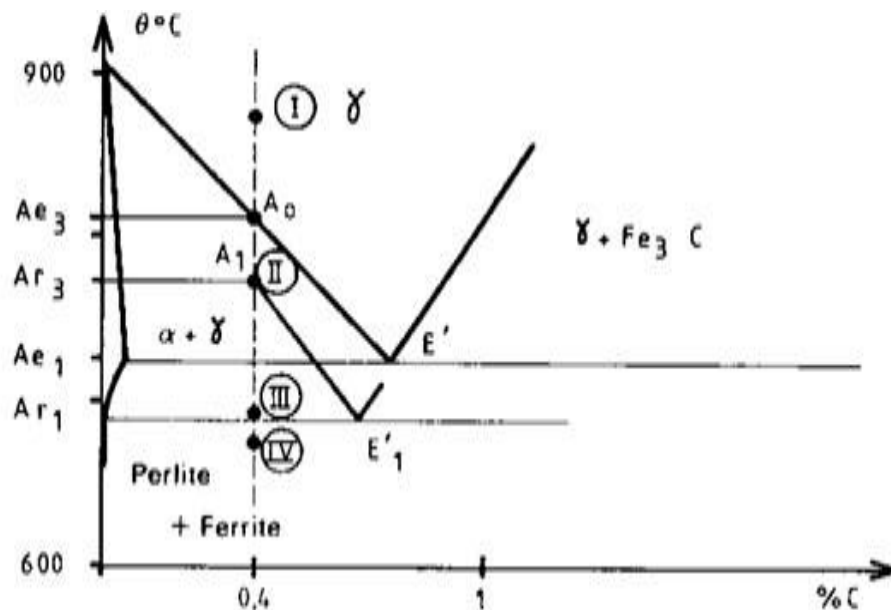
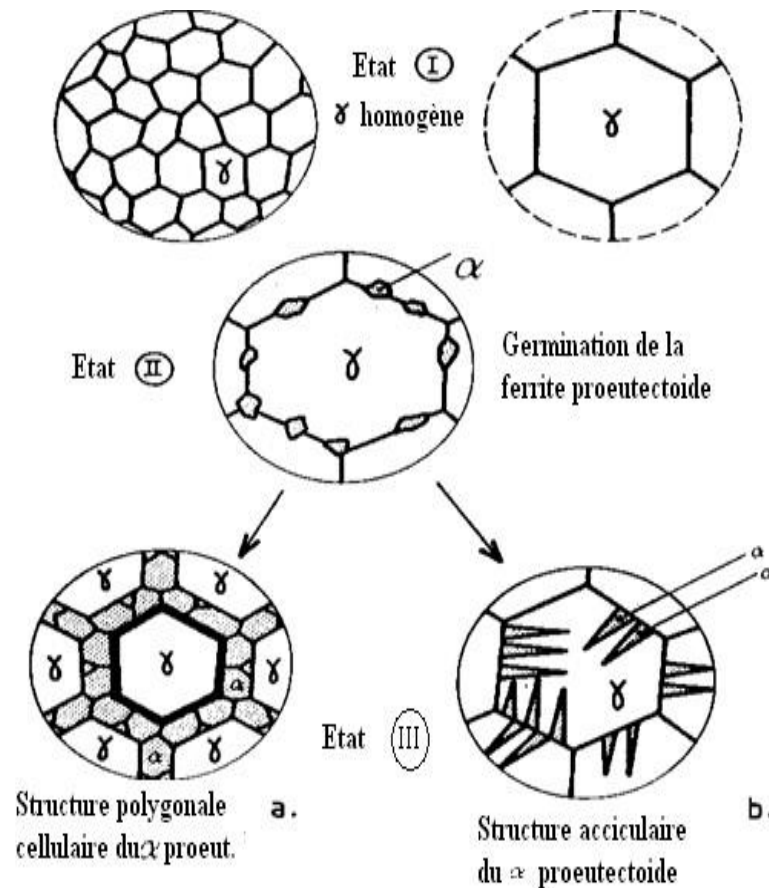


Figure I.04 : Diagramme microstructural de l'acier au refroidissement [1].



**Figure I.05** : Mode de changement structural des états I II et III [1].

En (I) dans le domaine austénitique la structure est polycristalline monophasée, caractérisée par une grosseur de grain  $\gamma$  déterminée par les conditions d'austénitisation

En (II) lorsque la température atteint  $Ar_3$  ( $Ae_3$ ), caractéristique de la vitesse de refroidissement utilisée, la germination de la phase ferritique  $\alpha$  commence (Figure I.05). Cette **germination** à lieu en général aux joints de grains austénitiques, en effet ce phénomène est énergétiquement favorisé sur une interface déjà existante.

La croissance des cristaux de ferrite proeutectoïde dépend de la vitesse de transfert de l'énergie thermique produite par la transformation ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) et de la vitesse de diffusion du carbone, en excès par rapport à la limite de solubilité dans la ferrite.

Pour des vitesses de refroidissement faibles et des grains austénitiques petits, les cristaux ferritiques pourront prendre la forme polygonale normale et conduire à une répartition cellulaire de la ferrite en (III) a.

Pour des vitesses de refroidissement élevées et des grains austénitiques grossiers, les cristaux ferritiques se développent sous forme de plaquettes qui permettent d'augmenter les vitesses de diffusion thermique et du carbone. En outre la diffusion du carbone est maximale parallèlement à  $\{111\} \gamma$ , il ya une relation cristallographique entre  $\{111\} \gamma$  et  $\{110\} \alpha$ , Les plaquettes apparaissent donc parallèles à des directions déterminées donnant naissance à une répartition aciculaire ou de Widmenstätten. Les structures aciculaires (III) b sont caractéristiques des zones surchauffées, au voisinage des joints soudés et dans les aciers moulés bruts de moulage.

A la traversée de la ligne eutectoïde  $A_{r1}$ , l'austénite restante en (III) subit la transformation perlitique et est remplacée entièrement par des colonies de perlite. (Figure I.06)

L'espacement inter-lamellaire  $\Delta$  dans la perlite dépend de l'écart ( $A_{e1} - A_{r1}$ ), donc de la vitesse de refroidissement. On a mis en évidence une relation du type :  $\lg \Delta = a - b / T(A_{r1})$ , Montrant que  $\Delta$  décroît lorsqu' $A_{r1}$  s'abaisse donc lorsque  $V_r$  croît. Ainsi  $\Delta$  : varie de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres.

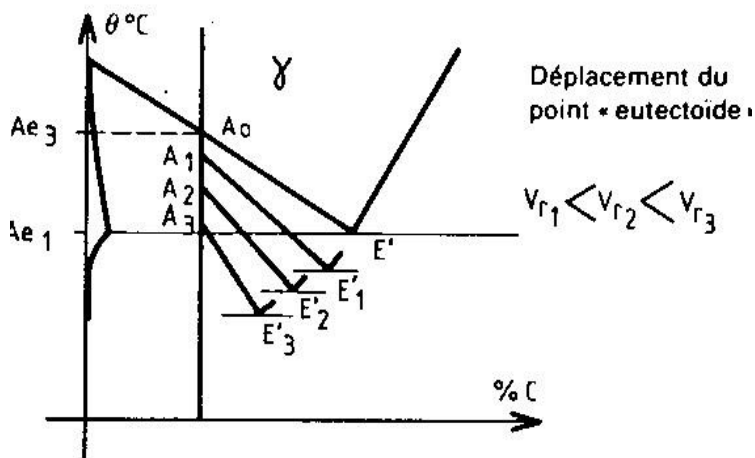


Figure I.06 : Déplacement du point eutectoïde [1].

Le diagramme ci-dessus correspond à une vitesse de refroidissement déterminée. Au fur et à mesure que  $V_R$ , augmente,  $E'_1$  se déplace vers le bas et vers la gauche (c.-à-d.) il y a appauvrissement de la perlite en carbone et diminution de la quantité de ferrite pour un acier donné.

Ce fait rend illusoire toute détermination de la teneur en carbone d'un acier non parfaitement recuit par appréciation micrographique de la fraction surfacique de la perlite.

**I.B.1 Évolution des aciers en fonction des exigences relatives à la soudabilité :**

La problématique est que dans la construction soudée la phrase suivante « le carbone est l'ennemi du soudeur » apparaît dans la littérature technique comme un adage, en effet, la fragilisation due à la surchauffe ou l'hydrogène motive la fissuration à froid sont les problèmes de soudabilité, ces derniers s'amplifient lorsque la teneur en carbone de l'acier augmente c'est-à-dire, lorsque la limite d'élasticité et la résistance du produit concerné s'élèvent, le rapport résistance / teneur en carbone / soudabilité est inéluctable.

Et si on se fie à ce qu'indique le diagramme fer-carbone pour un même état, qui est généralement l'état recuit, une augmentation de la résistance est obtenu au prix d'une élévation de la teneur en carbone donc d'une aggravation des problèmes de soudabilité [2].

Vu le développement de la construction soudée cela impliqué des spécifications de plus en plus exigeantes concernant la résistance et la ductilité, il a fallu rechercher des solutions compatibles avec les spécifications et les caractéristiques de soudabilité. D'où une évolution concernant d'une part la composition chimique et d'autre part l'état de livraison des produits les solutions proposées s'inspirant de l'une de ces voies ou des deux.

**I.B.1.a Evaluation de la qualité d'une soudure :**

D'après Y. Ito, et M. Nakanishi [3], le code ASME, « Boiler and pressure vessels », section IX (qualification de la soudure), détaille les procédures et résultats qui doivent être atteints pour la construction de récipients sous pression. Les essais de pliage mettent particulièrement en évidence les problèmes liés à la ductilité des cordons soudés.

Or, la conservation d'une bonne ductilité est garante de la qualité des assemblages réalisés.

La couleur de la soudure peut aussi être utilisée comme indicateur de la qualité de la protection (elle caractérise le degré d'oxydation de la surface) , des teintes d'interface jaune ou bleu clair peuvent à la rigueur être admises , toute trace d'oxyde blanc doit entraîner l'élimination de la soudure car un rechargement éventuel ne pourrait lui restituer une qualité correcte, l'absorption d'oxygène et d'azote étant irréversible (Tableau I.03).

<b>Couleur de la soudure</b>	<b>Origine du traitement</b>
------------------------------	------------------------------

Jaune paille claire Jaune paille foncé Bleu clair	Oxydation de surface. Eliminer par un brossage avec une brosse métallique neuve à fil inox.
Bleu foncé Gris bleu Gris Blanc (dépôts poudreux)	Contamination du métal. La soudure doit être entièrement éliminée et refaite après correction des protections gazeuses

**Tableau I.03:** Indicateur de la soudure [3].

Les essais de dureté comparatifs entre le cordon et le métal de base sont aussi parfois utilisés comme critère de qualité de la soudure. La variation de dureté entre un cordon non contaminé et le métal de base ne doit pas dépasser 30 points sur l'échelle des duretés Vickers ou Brinell (5 points pour Rockwell B).

Le code ASME suggère que si la dureté diffère de plus de 40 points Vickers, il y a une contamination excessive de la soudure, cette dernière doit être complètement supprimée et refaite. Enfin, le code de construction, impose que chaque soudure subisse un ressuage ainsi qu'une analyse radiographique pour détecter la présence de porosités.

### **I.B.1.b Caractéristiques métallurgiques des soudures :**

Au cours du soudage, la fusion et le possible ajout de métal d'apport modifient l'histoire thermique du métal et donc :

- L'orientation et la grosseur des grains dans la zone fondue et la Z.A.T.,
- Les cinétiques de transformations de phases dans la Z.A.T. et dans les dépôts en soudure multipasse,
- La pollution par des éléments interstitiels.

Tous ces cycles thermiques s'effectuent très rapidement. Or, les connaissances métallurgiques sur les alliages de titane sont basées sur des traitements thermiques longs et lents [4] & [5]. L'affinement de grains étant impossible, la maîtrise de la structure de solidification et la taille des grains créées sont très importantes. L'état structural du métal de base dans ce processus joue un rôle primordial. En effet, la germination des grains à l'interface solide-liquide

s'effectue épit axialement et leur taille moyenne est régie par la croissance compétitive durant la solidification. Les directions privilégiées de croissance sont celles dont l'axe de croissance [100] est parallèle à la direction d'écoulement de la chaleur, ce qui conduit à une croissance accrue de certains grains. On peut alors indiquer que les procédés à très haute densité d'énergie (Laser, faisceau d'électrons, plasma) favorisent l'obtention de grains fins dans leurs cordons de soudure.

Il faut pour cela utiliser une énergie calorifique minimale et chercher à avoir un bain au rapport P/L élevé [4]. Les structures observées dans la zone fondue et dans la Z.A.T. sont aiguillées, en raison de la traversée du domaine  $\beta$  après soudage. De plus, il y a peu à craindre des problèmes de fissuration de solidification (fissuration à chaud) ou de micro-ségrégation car les principaux éléments d'alliage (V, Mo, Cr, Zr) ont des coefficients de répartition proches de l'unité (c'est-à-dire que leur intervalle de solidification est très faible).

### **I.B.2 Evolution de la composition chimique :**

La recherche de produits qui à résistance égale possède une teneur en carbone plus faible que celle des produits où n'interviennent que le carbone s'est traduite par l'apparition des aciers au (C – Mn) ou (C - Mn – Si).

Pour de tels aciers livrés à l'état normalisé (c'est-à-dire refroidis à l'air après laminage) l'influence des éléments Mn et Si s'exerce d'une part sur la transformation de l'austénite au refroidissement, d'autre part sur la résistance des constituants de sorte que l'addition de ces éléments en quantité modérée permet, à résistance égale, d'abaisser la teneur en carbone.

Mais l'influence du manganèse sur le pouvoir trempant de ces aciers se manifeste aussi lors de leur soudage ce qui a motivé le coefficient attribué à cet élément dans la formulation du carbone équivalent (par exemple  $C + Mn/6$ ), si bien que la teneur maximale en manganèse est demeurée fixée aux environs de 1,2 %.

Pour contourner l'obstacle ainsi rencontré, il fallait faire intervenir un mécanisme de renforcement de l'acier qui remplace partiellement celui que permet le diagramme (Fe – C) tout en n'agissant pas sensiblement sur le pouvoir trempant.

Une solution a été trouvée sous la forme des aciers dits « dispersoïdes » ou « micro-alliés » qui comportent en très faibles proportions, des éléments d'additions (Al, Nb, V, Ti) dont le plus utilisé est le niobium qui interviennent à des teneurs de quelques centièmes pour cent. Le

mécanisme de l'action de ces éléments s'explique par leur affinité pour le carbone ou l'azote, avec lesquels ils forment des composés du type carbures nitrures ou carbonitrures, composés qui sont insolubles dans l'austénite au-dessous de 900°C ainsi que, dans la ferrite.

Cette variation de solubilité rend possible un mécanisme de durcissement de la ferrite d'où un gain de limite d'élasticité, cependant que la quantité de perlite se trouve réduite par rapport à celle que l'on trouve dans un acier ordinaire, pour lequel tout le carbone participe à la transformation de l'austénite au refroidissement. En même temps, ce mécanisme contribue à un affinage du grain, surtout si le produit considéré a été obtenu par laminage contrôlé, ce qui se traduit par une amélioration de la ductilité [2].

Ainsi la présence d'éléments dispersoïdes permet, à limite d'élasticité égale, une moindre teneur en carbone, d'où une meilleure soudabilité, illustrée par l'allure des courbes dureté/temps de refroidissement ou bien à teneur en carbone égale, une limite d'élasticité plus élevée, et ceci sans que la dureté maximale soit affectée, on note seulement une légère augmentation de la trempabilité (Figure I.07) [2].

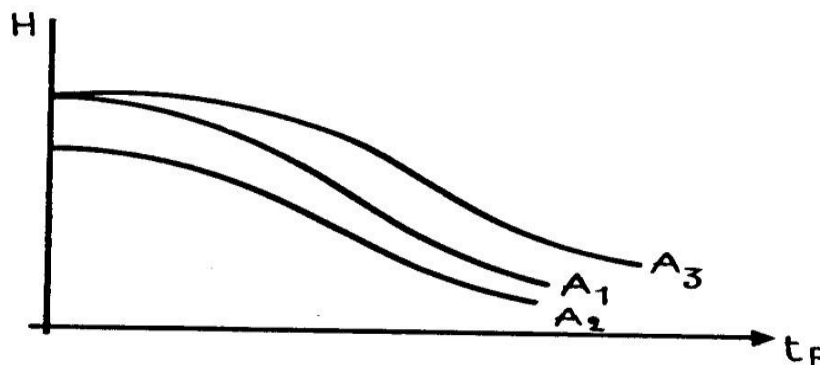


Figure I.07 : Allure des limites d'élasticité de quelques aciers au carbone [2].

Le tableau I.4 donne une idée numérique détaillée sur le comportement des courbes de la (Figure I.07) [2].

<b>Acier</b>	<b>C</b>	<b>Nb</b>	<b>R<sub>e</sub></b>
<b>A<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>Sans</b>	<b>R<sub>e1</sub></b>
<b>A<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>2</sub> &lt; 1</b>	<b>Avec</b>	<b>R<sub>e2</sub> = R<sub>e1</sub></b>
<b>A<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>3</sub> = C<sub>1</sub></b>	<b>Avec</b>	<b>R<sub>e3</sub> &gt; R<sub>e1</sub></b>

**Tableau I.04** : Variations des limites d'élasticité des aciers au carbone [2].

***Chapitre II :***  
***Soudage électrique***

## II.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 à 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 parties du métal de base à assembler.

## II.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.

## II.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.

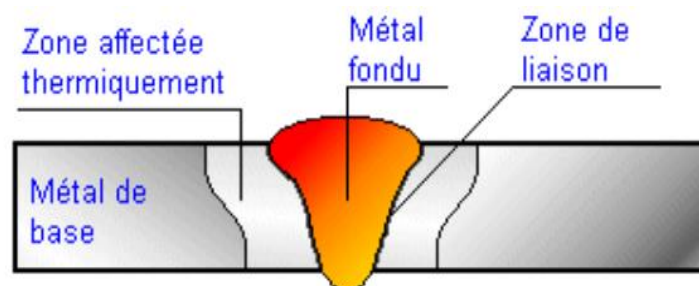


Figure II.01 : Les zones principales du soudage. [4].

### **II.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.

### **II.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.

### **II.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.

### **II.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.

## **II.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 [4].

## II.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.

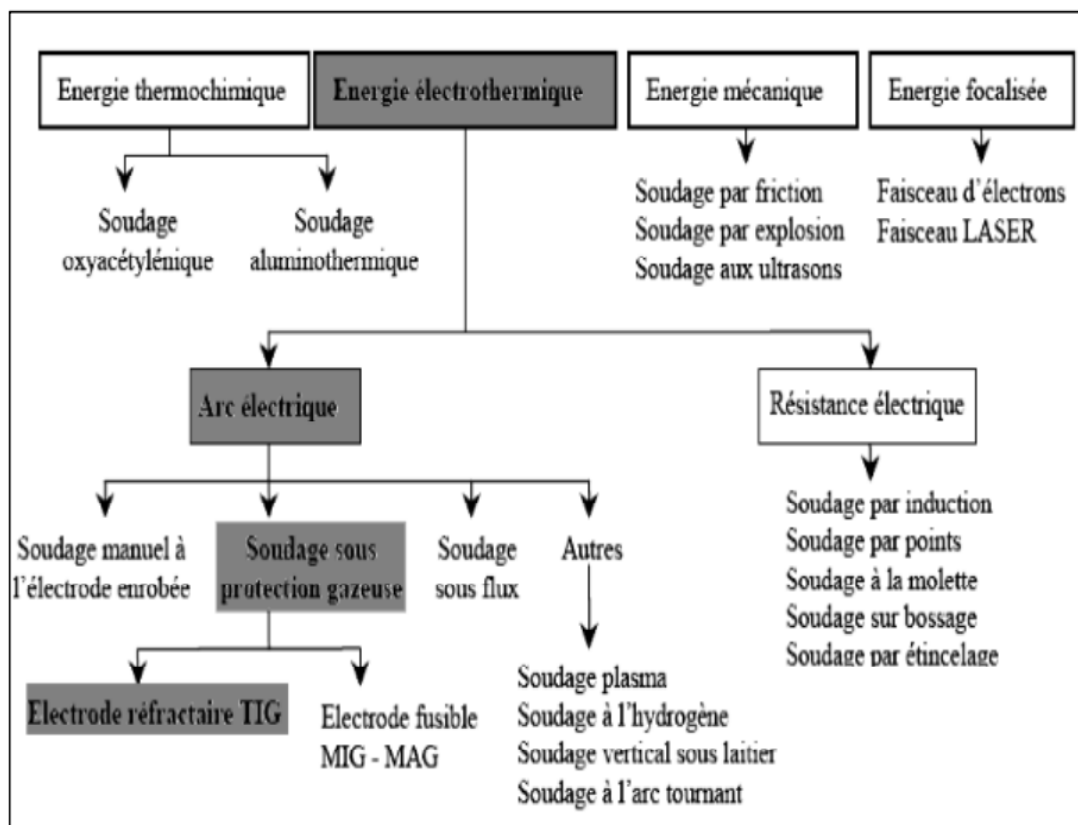


Figure II.02 : Classification des procédés de soudage [5].

- *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 annuelles 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.

<b>Abréviation</b>	<b>Anglais</b>	<b>Français</b>
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 II.01** : Les différents procédés de soudage à l'arc [5].

## II.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.

### II.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.

### II.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.

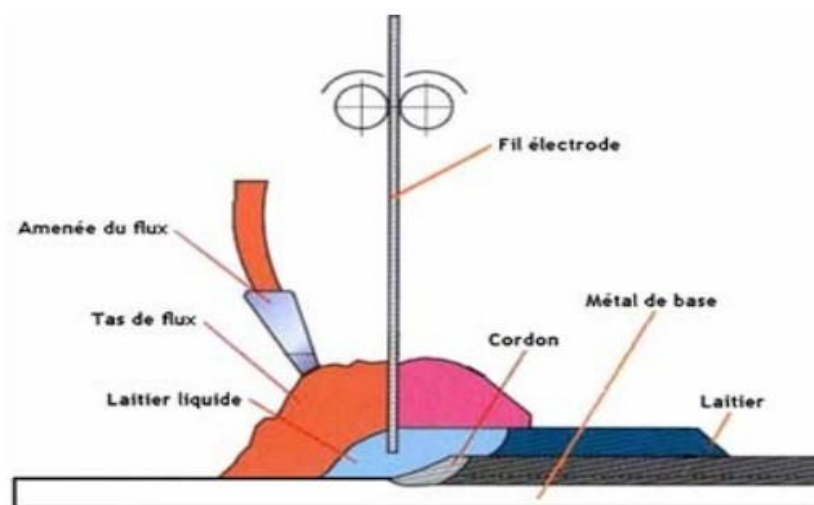


Figure II. 04 : Soudage sous flux solide [6].

### II.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 t

horium 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 [6].

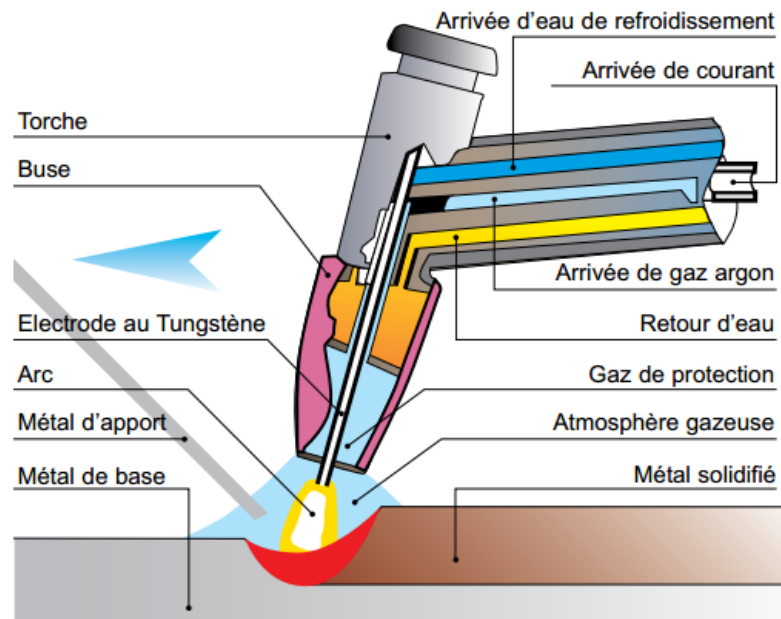


Figure I.05 : Principe de soudage TIG [7].

#### • Avantages et inconvénients

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

#### II.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 ( $107\text{W.cm}^{-2}$ ). 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 [8].

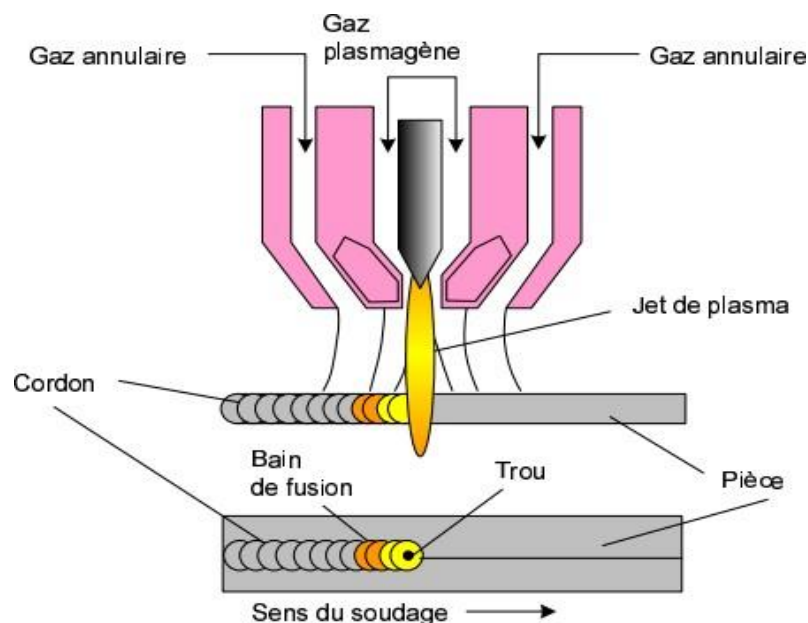


Figure II.06 : Principe du soudage plasma [6].

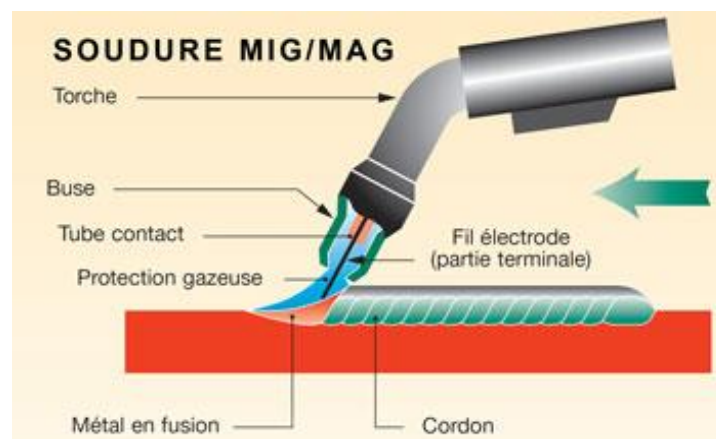
### Avantages du soudage plasma

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 automatiser (précision et qualité dimensionnelles des soudures réalisées).

### II.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 MAG (métal inerte gaz), l'atmosphère de protection est inerte. Dans le procédé MIG (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 CO<sub>2</sub> 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 axiale, le mode de transfert dépendant principalement de la nature du gaz utilisé et de la densité de soudage.



**Figure II.07 :** Procédé du soudage MIG [9].

### 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.

### **II.6.6. Soudage à l'arc avec l'électrode enrobée (SMAW)**

#### **II.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 [10].

L'atmosphère gazeuse ne fournit qu'une 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.

#### **II.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. [11].

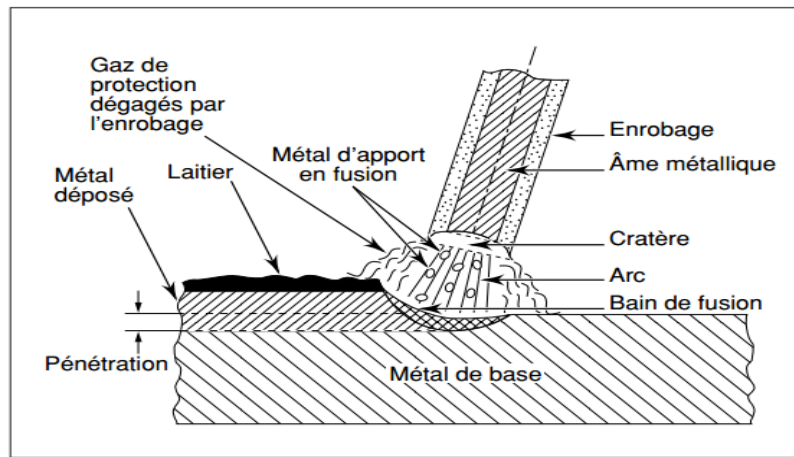


Figure II.08: Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW) [10].

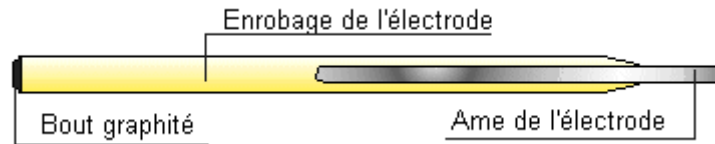
### II.6.6.3. Avantage du procédé

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

### II.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 II.09:** L'électrode de soudage à l'arc électrique [12].

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 (rutile):** 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 rutile.

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de  $\varnothing$  1,6 à  $\varnothing$  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 rutile-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 rutile, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60%.

#### II.6.6.4.2. 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 [12].

***Chapitre III :***  
***Aspects de soudage***

### III.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.

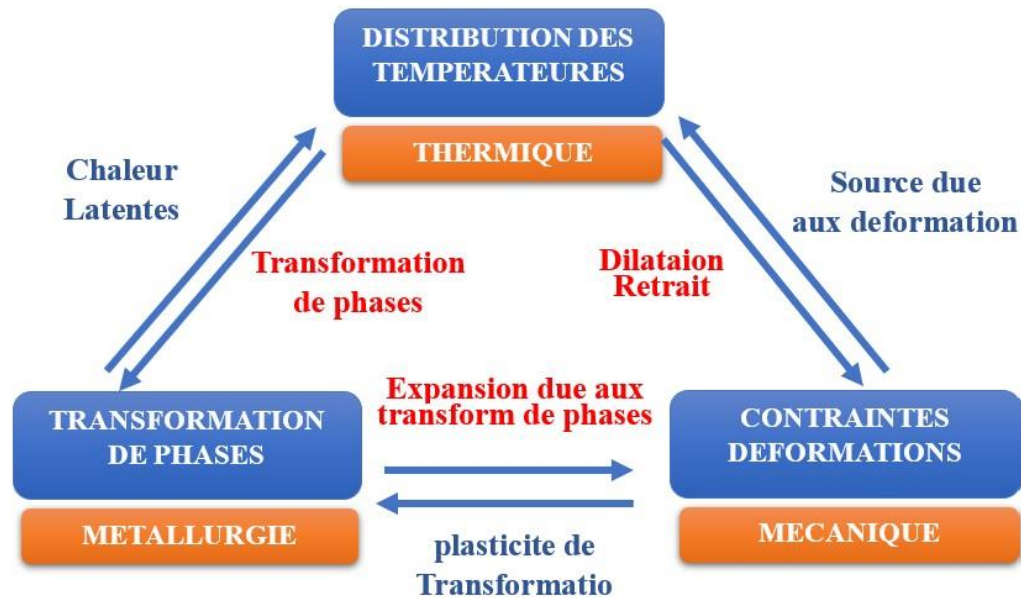


Figure III.01: Schéma des aspects thermiques, métallurgiques et mécaniques [13].

### III.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).

#### III.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 donnée de l'assemblage il faut connaître le cycle thermique de soudage ,c'est à dire la variation de la température( $\theta$ ) en fonction du temps (t) [13].

La courbe  $\theta = f(t)$  tracée en un point A voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs suivantes (figure. III.02) :

- ✓ La température maximale atteinte  $\theta_m$ ;
- ✓ Le temps de séjours  $T_s$  au-dessus d'une température;
- ✓ La loi du refroidissement traduite par le temps de refroidissement ( $\theta_1, \theta_2$ ) entre deux température  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ou par la vitesse de refroidissement  $V_R$  à température  $\theta_R$

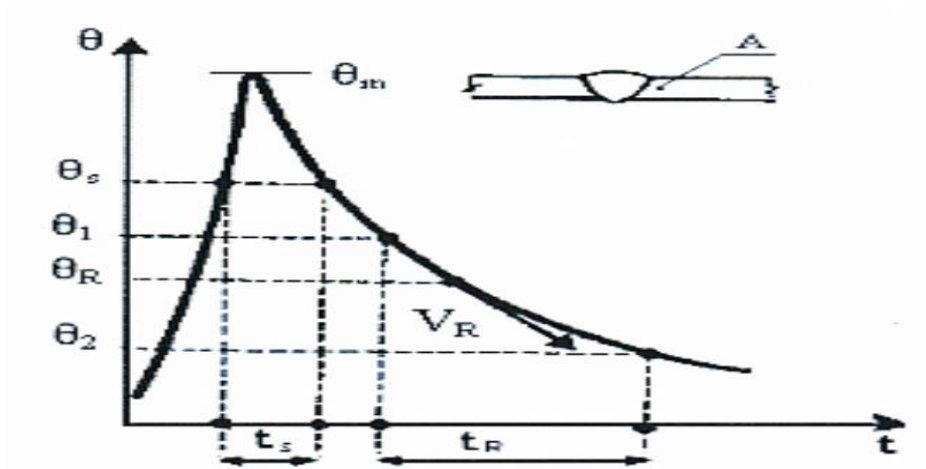


Figure III.02: Cycle thermique de soudage [13].

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 fait connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe  $\theta_m = f(x)$  donnant la variation de la température maximale  $\theta_m$  atteinte en chaque point en fonction de la distance  $x$  (figure.III.03) chaque phénomène étant caractérisé par la température  $\theta$ , ce qui permet de le 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  $Ac_3$  (austénitisation complète) et  $Ac_1$  (austénitisation partielle) [13].

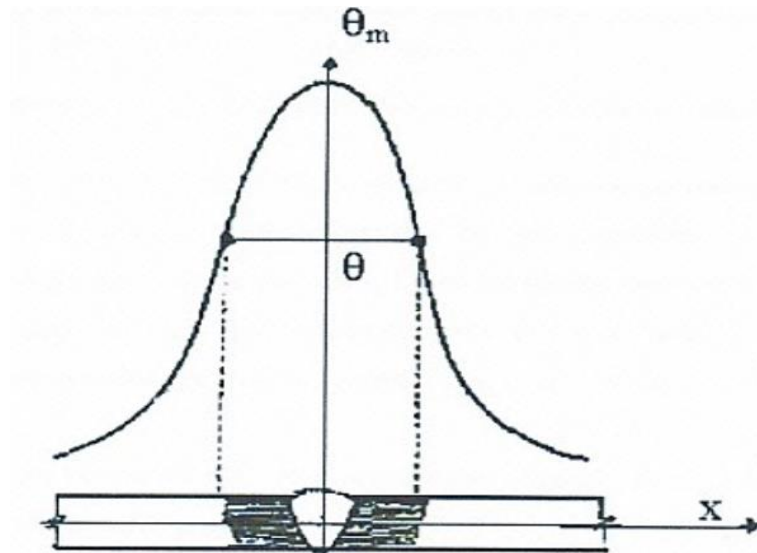


Figure III.03: Répartition thermique dans une soudure [13].

## III.2.2. Caractères généraux du cycle thermique

### III.2.2.1. Notion d'états quasi –stationnaires

Si nous relevons au moyen de thermocouples ,les courbes  $\theta = f (t)$  en des points A1 ,A2 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.III.4) qui conduit aux remarques suivantes:

- ✓ La température maximale atteinte  $\theta_m$  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.

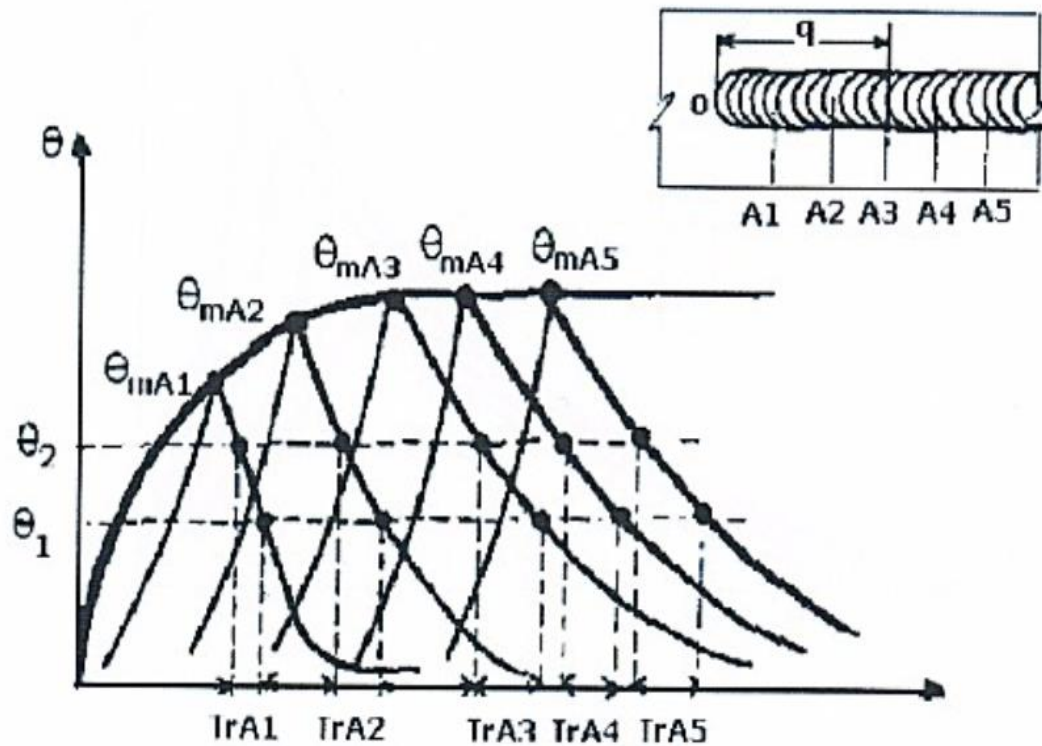


Figure III.04: Cycles thermiques le long d'un cordon de soudure [13].

### III.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 (figure.III.05) qui appelle les remarques la description ci-dessous.

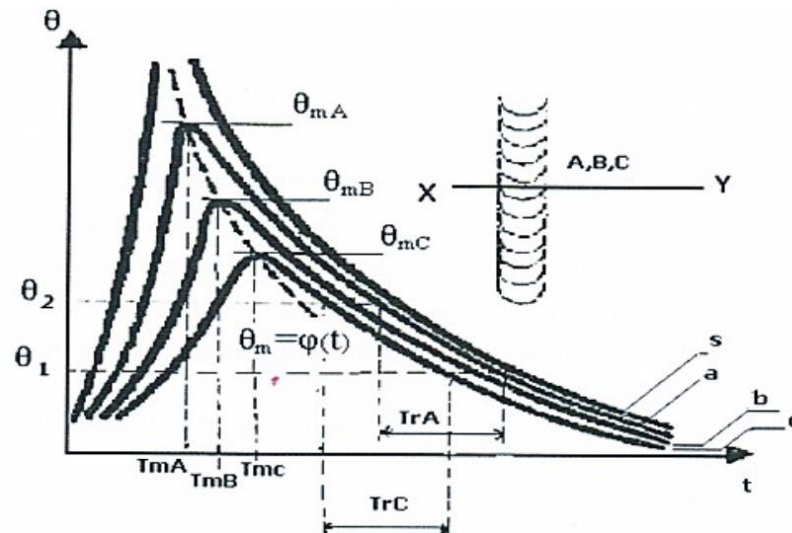


Figure III.05: Courbes température/temps [13].

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

En particulier, les températures maximales atteintes  $\theta_{mA}$ ,  $\theta_{mB}$ ,... 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  $\theta_{mA}$ ,  $\theta_{mB}$ ,...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 croit, 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  $\theta_1, \theta_2$  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  $800^\circ\text{C}$  et  $500^\circ\text{C}$ , intervalle de température particulièrement critique dans ce cas [13].

#### III.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.

### III.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 [13].

#### III.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, 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 [14].

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  $\alpha$ . 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  $\gamma$  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 [14].

### **III.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 [14].

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. III.061 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 zones de traitement thermique par recuit qui ont une relation avec le diagramme d'équilibre fer- carbone.

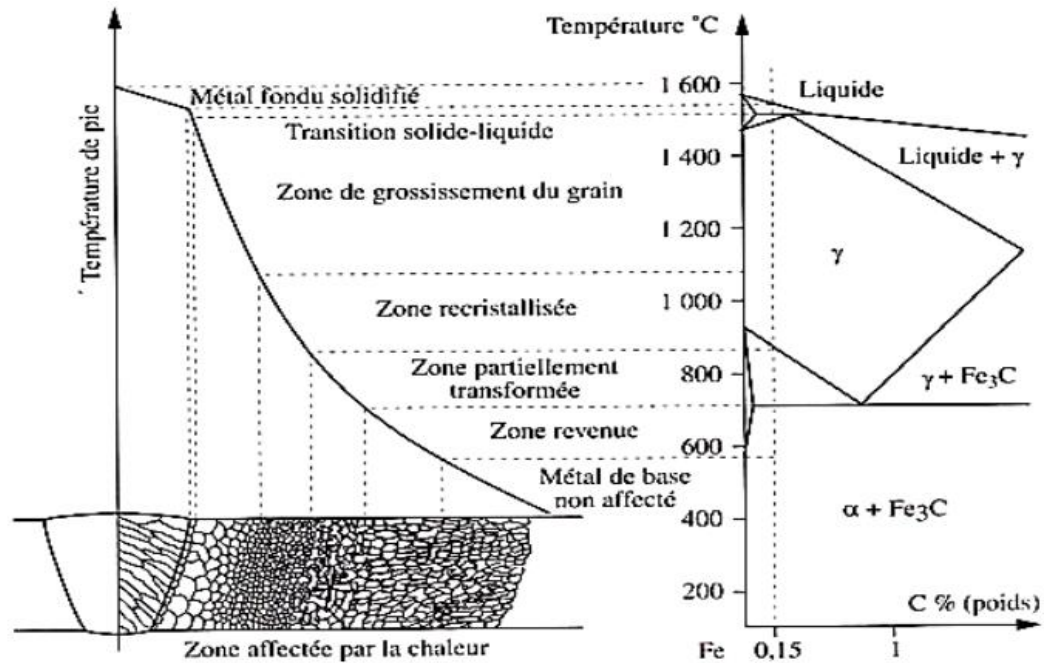


Figure III.06: Microstructure de la zone affectée thermiquement [14].

## III.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.

### III.4.1. Déformations et contraintes par le soudage

#### III.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.

#### **III.4.1.1.1. 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.

#### **III.4.1.1.2. 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.

#### **III.4.1.1.3. 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 [15].

#### **III.4.1.1.4. 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 ( $\sigma_L$ ) 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.

### **III.4.1.2. Effet des contraintes résiduelles sur l'assemblage soudé**

#### **III.4.1.2.1. 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 coté de contraintes résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposé 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 .

### III.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) [15], 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.

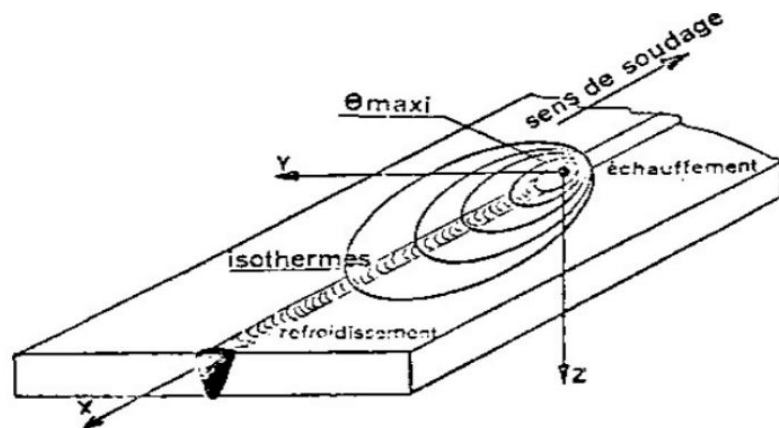


Figure III.07: Influence de soudage sur le retrait de déformation [15].

#### III.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.

#### III.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 [15].

#### 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).

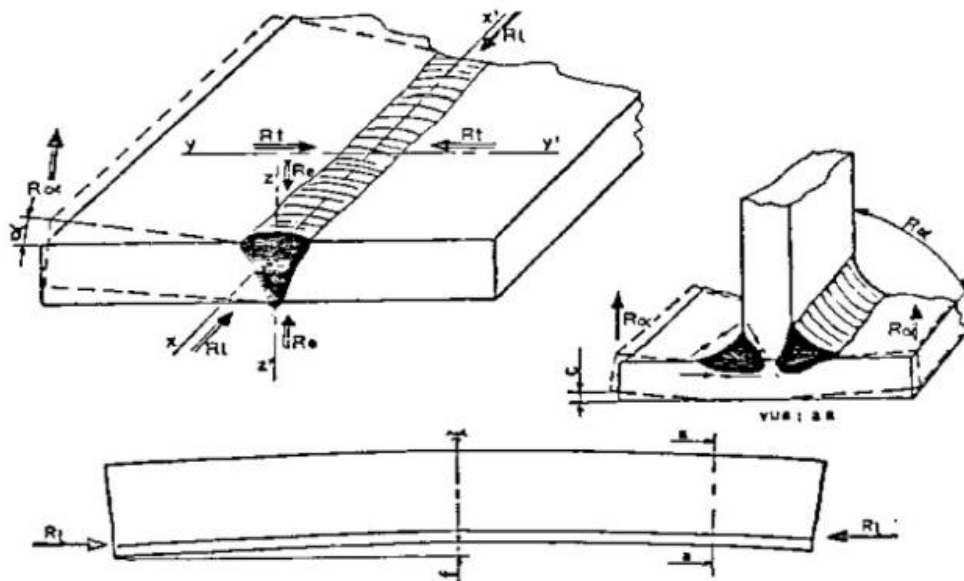


Figure III.08: Déformations de retrait [15].

### III.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.

#### a) 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 [15].

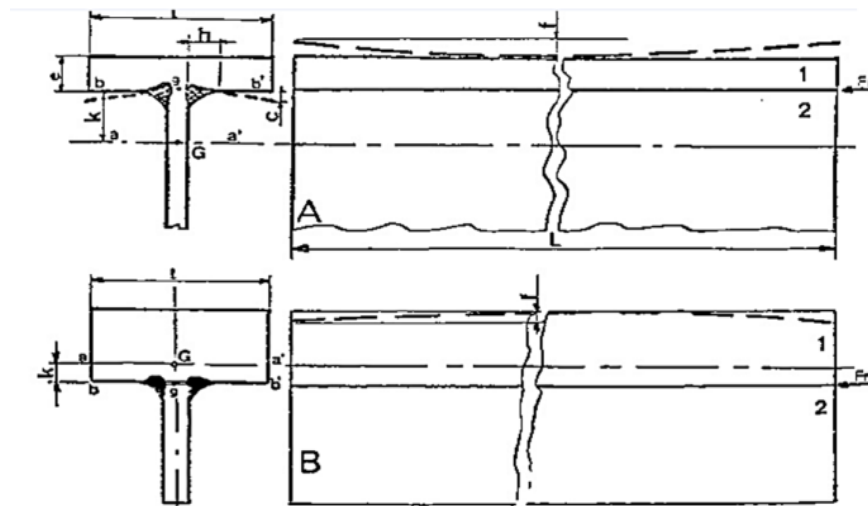


Figure II.09: a) Les déformations longitudinales

## b) Les déformations dues au retrait transversal

### 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).

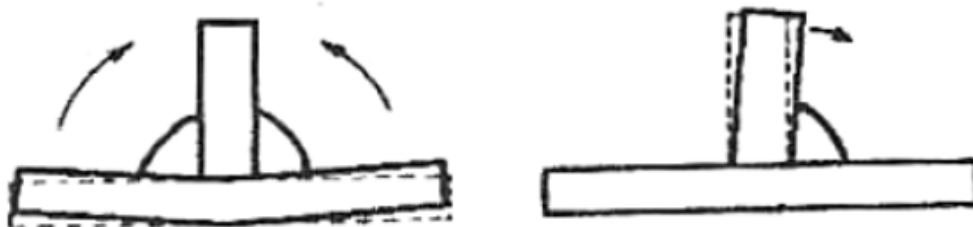


Figure III.10: La rotation angulaire [15].

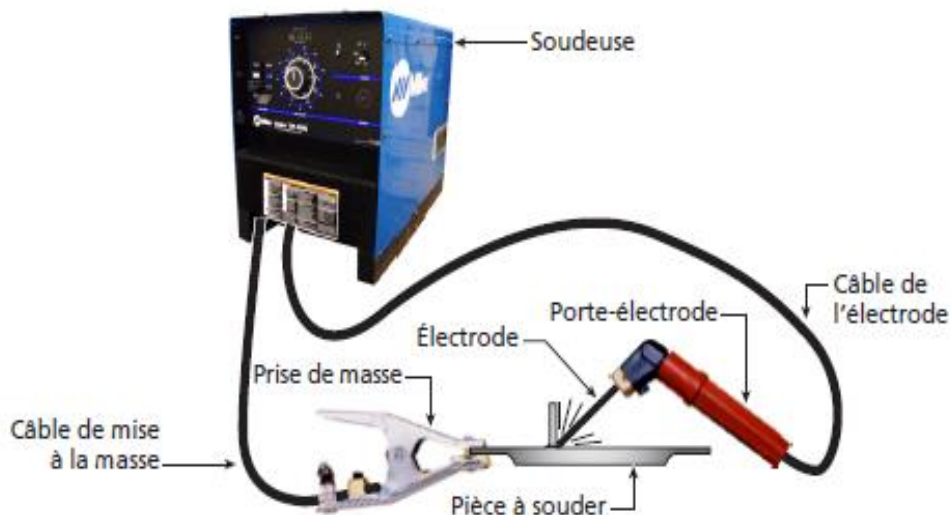
### 2- L'effet de pliage

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 IV :***  
***Partie expérimentale***  
***Et Résultats***

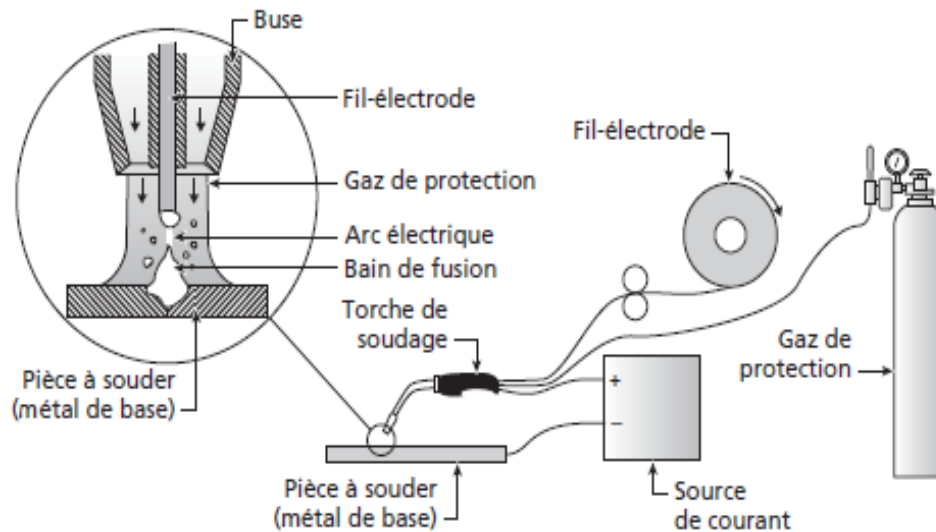
## IV.1 Procédés du soudage utilisés

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 IV.1 et IV.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 IV.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 ou 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 IV.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 IV.3. Le générateur utilisé c'est un transformateur, auto régulatrice, 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 IV.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 sorties du secondaire est réunie à l'électrode, l'autre est connecté aux pièces par l'intermédiaire d'un câble de masse relié 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.

## IV.2. Matériaux utilisés

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

## IV.3. Métal de base

Le métal de base à souder utilisé lors de ce travail est un acier de construction mécanique (A60) et (E36). Les tableaux IV.1 et IV.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.

**Tableau IV.1 :** Composition chimique de l'acier E36.

Les éléments chimiques	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	V	S	P	Al
Composition selon AFNOR	0,17	0,0275	0,025	1,365	0,365	0,013	≤0,02	0,010	0,028	0,0295

**Remarque :** l'acier E36 présente une bonne soudabilité.

**Tableau IV.2 :** caractérisation mécanique de métal de base E36.

Nuance	R <sub>m</sub> (Mpa)	R <sub>e min</sub> (Mpa)	A(%)
E36	510/608	353	20

**Tableau IV.3:** Composition chimique de l'acier A60.

Les éléments chimiques	C	Si	Mn	P	S	Fe
Composition selon AFNOR	0.65 0.75	0.10 0.40	0.50 0.90	Max 0.07	0.15 0.25	Solde

**Remarque :** l'acier A60 présente une faible soudabilité.

**Tableau IV.4:** Caractéristiques mécaniques de l'acier A60.

Nuance	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e min</sub> (MPa)	A (%)
A60	588-706	334	15

#### IV.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 80 mm de longueur, 20mm de largeur et de 10mm 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 30°, 45°, 60° pour atteindre à la formation de chanfrein de type V. La figure IV.6 présente deux morceaux d'acier préparé pour former une éprouvette de traction.



**Figure IV.4:** Forme de chanfrein V

## **IV.5. Essai de traction**

L'essai de traction utilisé lors de ce travail pour caractériser mécaniquement les éprouvettes en acier utilisé. Étant purement uni axiale 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 uni axiale. 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 tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les mesures de déformation et de charge appliquée.

### **IV.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 ordinateur, 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.



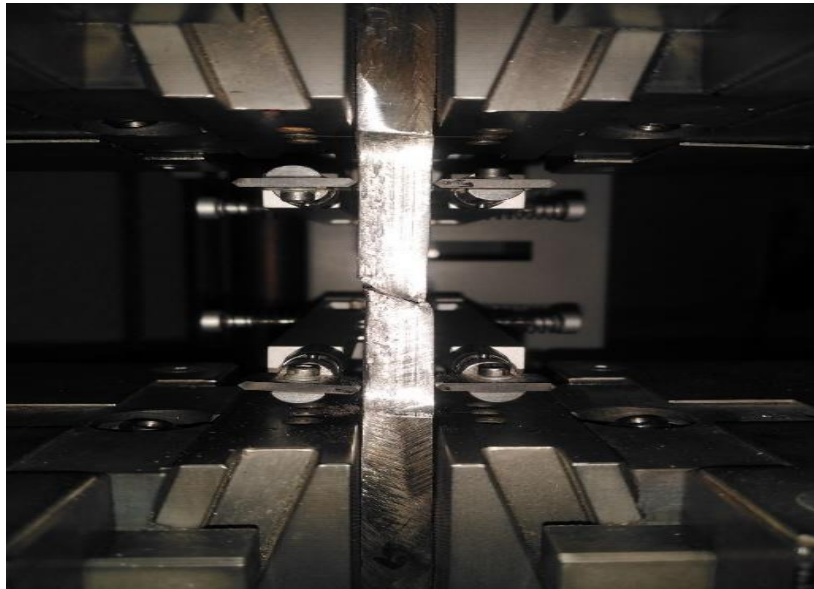
**Figure IV.5 :** Machine de traction Z100 machine hydraulique universelle

### IV.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 IV.6:** Les éprouvettes utilisés



**Figure IV.7:** Eprouvette subi un essai de traction

## IV.6. Préparation des échantillons

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

### IV.6.1. Le découpage à froid

On effectue un découpage au jet d'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) des pièces d'acier à l'aide d'une machine de cisailage des métaux figure (IV.8). Le but est d'obtenir, après faire la cisaille, des éprouvettes avec dimensions déterminées pour les deux types d'aciers.

Après avoir préparé par coupage à froid et cémenté des éprouvettes destinées à l'étude microscopique sont montées 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 IV.8 :** la machine de cisailage des métaux

### IV.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 IV.9 :** la machine de polissage

### IV.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 ( $\text{HNO}_3$  (4%) + alcool éthylique), comme réactif. La durée de l'attaque est de 2 à 3 secondes.



**Figure IV.10 :** Liquide l'attaque chimique (NITAL).

#### **IV.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 IV.11:** Microscopie optique utilisé

## V.1. Résultats et interprétations

Avant d'entamer cette partie de ce chapitre qui représente les résultats et leurs interprétations, il est nécessaire de rappeler le lecteur que la partie de caractérisation concernant les essais de traction et les observations métallographiques relative à ce travail ont été effectués au laboratoire de mécanique d'université " Sétif ", 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.

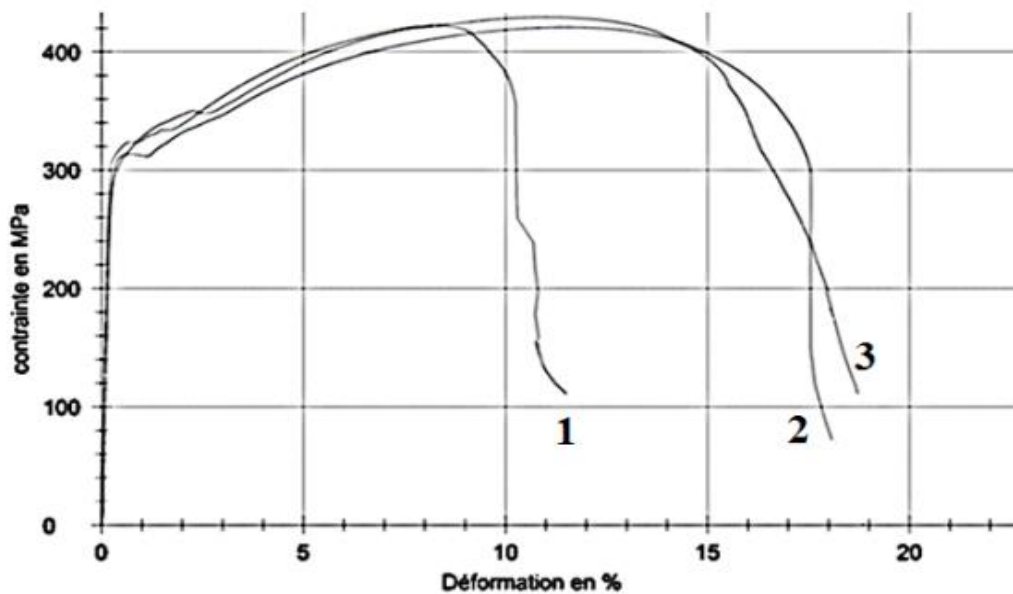
### V.1.1. Résultats des essais de traction

Pratiquement nous avons préparé 12 éprouvettes soudées par deux procédés de soudage cités et ceci pour faire une étude comparative entre ses deux procédés et de voir aussi l'influence de certains paramètres technologiques comme la nature du matériau à souder et le type de chanfrein sur l'assemblage. Parmi les 12 échantillons préparés et soudés, la moitié de ce nombre qui ont subi des essais de traction au laboratoire des matériaux de l'université de Sétif. Les figures IV-12 et IV-13 représentent les courbes obtenues par les essais de traction que nous avons effectués sur des éprouvettes soudées par procédé du soudage à l'arc électrique manuel et soudage semi-automatique sous un gaz inerte MIG.

#### V.1.1.1. COURBES DE TRACTION

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  $60^\circ$  qui présente une surface élevée respectivement par rapport aux autres chanfreins  $30^\circ$  et  $45^\circ$ . 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.

La notation des échantillons 1, 2 et 3 indiqués dans la figure sont respectivement comme suit : 1 correspond l'éprouvette d'acier avec un chanfrein 30, 45 et 60 soudée par procédé AEM. Nous remarquons que l'allure des deux courbes de l'échantillon 2 et 3 presque similaire au point de vue de forme par rapport la courbe de l'échantillon 1. Les échantillons 2 et 3 présentent un domaine plastique élevé par rapport à l'échantillon 1 et cela veut dire que ce dernier a subi des défauts au niveau du joint soudé.

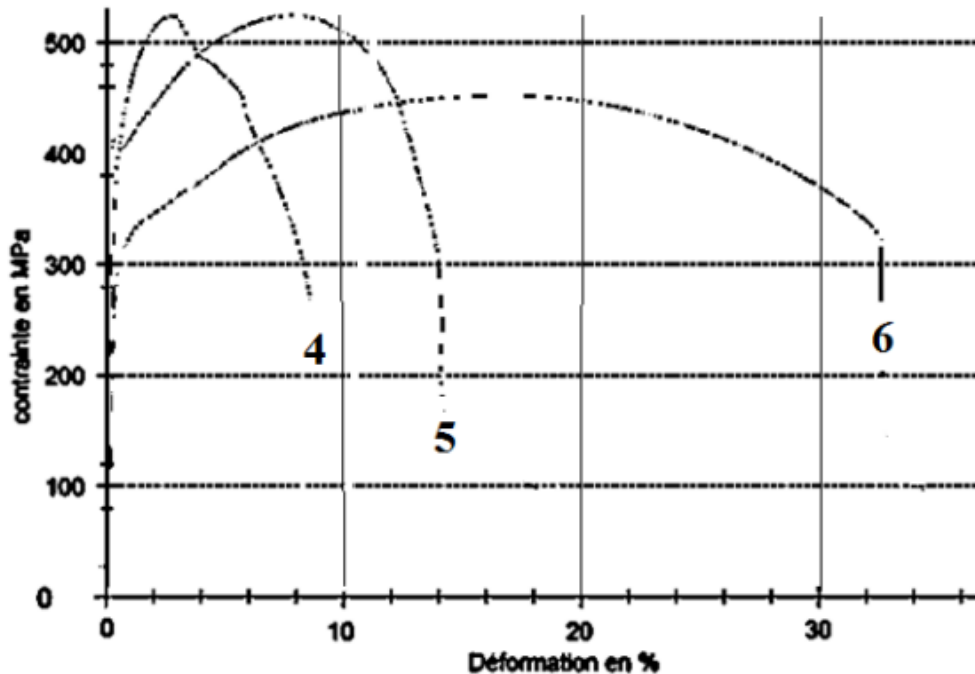


**Figure IV.12:** Courbe de traction des aciers soudés pour les échantillons 1, 2 et 3

La notation des échantillons 1, 2 et 3 indiqués dans la figure sont respectivement comme suit : 1 correspond l'éprouvette d'acier avec un chanfrein 30, 45 et 60 soudée par procédé AEM. Nous remarquons que l'allure des deux courbes de l'échantillon 2 et 3 presque similaire au point de vue de forme par rapport la courbe de l'échantillon 1. Les échantillons 2 et 3 présentent un domaine plastique élevé par rapport à l'échantillon 1 et cela veut dire que ce dernier a subi des défauts au niveau du joint soudé.

La notation des échantillons 4, 5 et 6 indiqués dans la figure ci-dessus sont respectivement correspondent aux éprouvettes d'acier avec un chanfrein 30, 45 et 60 soudée par procédé MIG. Nous remarquons aussi que l'allure des deux courbes de l'échantillon 4 et 5 presque

similaire au point de vue de forme par rapport la courbe de l'échantillon 6. L'échantillon 6 présente un domaine plastique très élevé par rapport à l'échantillon 5 qui possède à son tour un domaine plastique élevé par rapport à l'échantillon 4 et cela veut dire que le type de chanfrein joue un rôle important à ce propos.

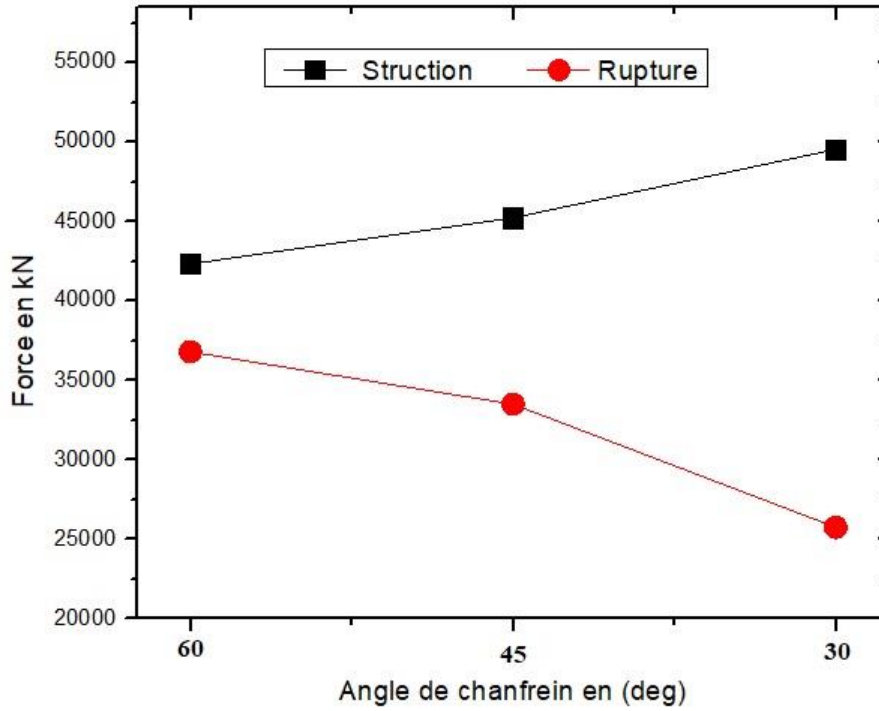


**Figure IV.13:** Courbe de traction des aciers soudés pour les échantillons 4.5 et 6

Donc quand l'angle de chanfrein augmente le domaine plastique de courbe de traction des pièces assemblées par soudage augmente ce qui explique que la surface de contact entre le métal d'apport et le métal de base est augmentée.

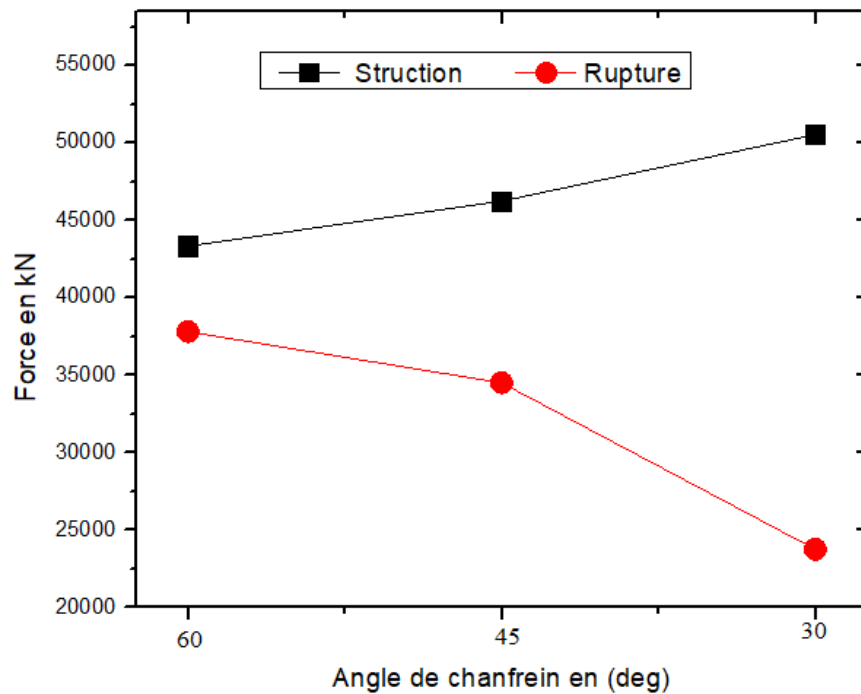
#### V.1.1.2. FORCES AUX POINT DE STRICTION ET DE RUPTURE

La figure IV.14 et IV.15 présentent respectivement la variation de la force de traction pour le point de striction et le point de rupture des éprouvettes assemblés par procédés de soudage à l'arc électrique manuel AEM et MIG et pour différents angles de chanfrein 30, 45 et 60.



**Figure IV.14:** Variation de la force de traction aux points de striction et rupture

Avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM



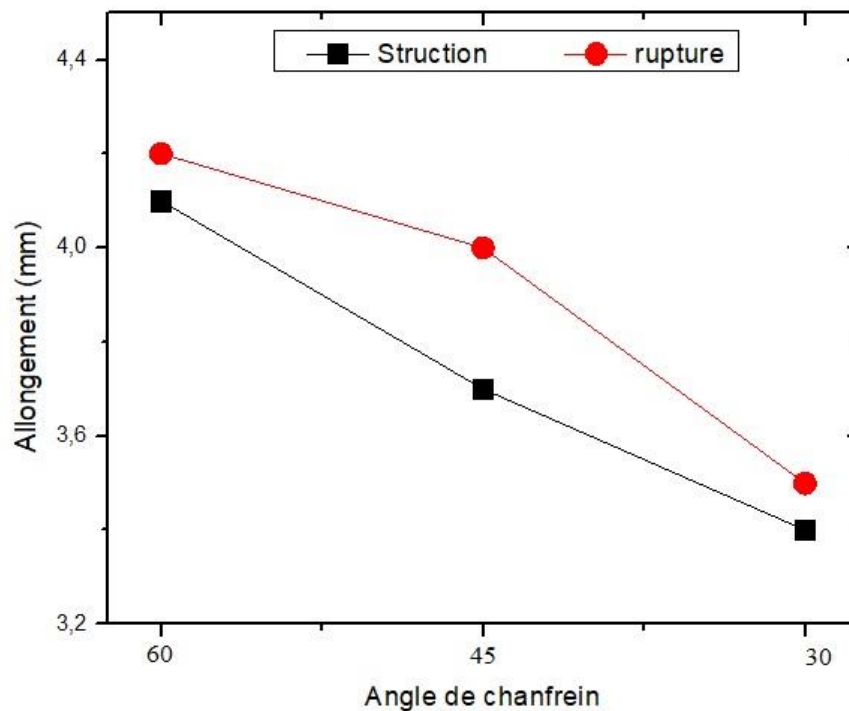
**Figure IV.15:** Variation de la force de traction aux points de striction et rupture

Avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM

Les deux figures sont identiques au point de vue de forme. Nous remarquons que pour les deux procédés de soudage utilisés, la force de striction augmente avec l'augmentation de l'angle du chanfrein et c'est cas contraire pour la force de rupture.

### V.1.1.3. ALLONGEMENTS AUX POINTS DE STRICTION ET DE RUPTURE

La figure IV- 16 et IV- 17 présentent respectivement la variation de l'allongement subit par la traction des éprouvettes pour le point de striction et le point de rupture des assemblés par procédés de soudage à l'arc électrique manuel AEM et MIG et pour différents angles de chanfrein 30, 45 et 60.

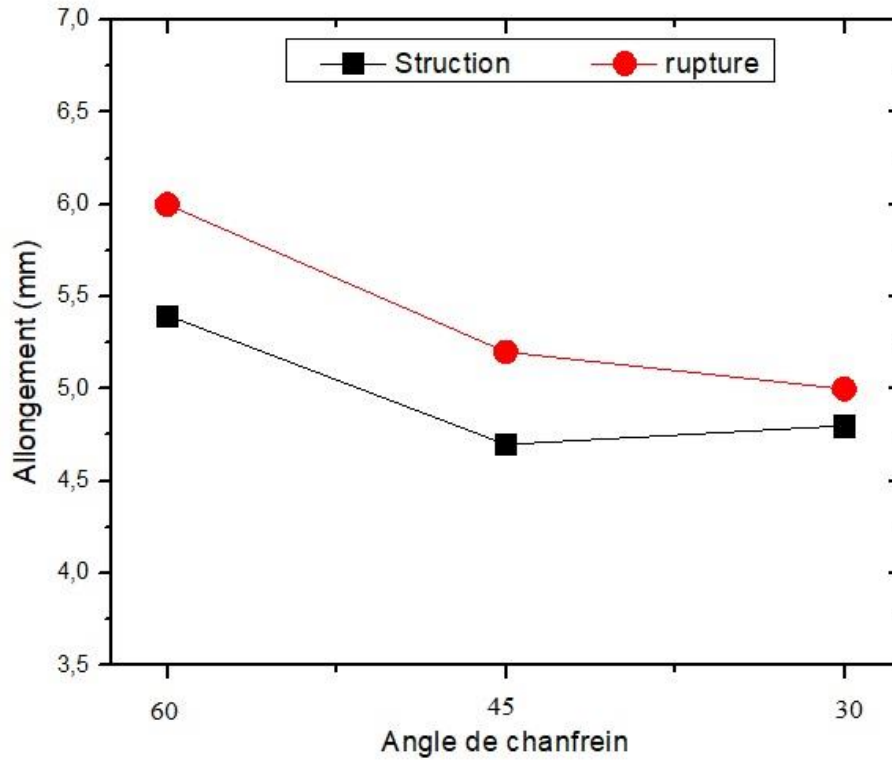


**Figure IV.16:** Variation de l'allongement aux points de striction et rupture

Avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage AEM.

Nous remarquons que pour le procédé de soudage AEM, l'allongement aux points de striction et de rupture diminue avec l'augmentation de l'angle du chanfrein. Pour le procédé MIG, l'allongement correspond aux points de striction et rupture diminue dans le

domaine d'angle de chanfrein situé entre 30 et 45. Au-delà de 45 jusqu'à 60 l'allongement présente un état stationnaire.



**Figure IV.17:** Variation de l'allongement aux points de striction et rupture  
Avec l'angle de chanfrein pour le procédé soudage MIG.

## Conclusion générale

Dans cette étude modeste nous avons réalisé dans le projet de fin d'étude les essais de traction 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 adhérent aux métaux de base comparés aux échantillons dans le guide électrique d'arc.

ملخص:

في عملنا هذا قمنا بدراسة مدي تأثير العوامل التكنولوجيا المساهمة في عملية التلحيم على سلك منطقة التلحيم ولمعرفة هذا التأثير قمنا بإجراء تجربة الشد عليها مع اختيار العامل الأحسن من بين العوامل التكنولوجيا 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 contribuant 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 ...

## Références Bibliographies

- [1] **J. BARRALIS & G. MAEDER** « Précis de métallurgie (élaboration, structure / propriétés et normalisation) » 5<sup>ème</sup> édition Nathan année 1990.
- [2] **H. GRANGON** « Bases métallurgiques du soudage » édition Eyrolles année 1979.
- [3] **Y. ITO, M. NAKANISHI**, «Study on Charpy impact properties of weld metals with submerged arc welding» Sumitomo Search 1976, 15, p: 42–62.
- [4] **Ronald CAZES procédés de soudage** : principes généraux et critères de choix, Techniques de l'ingénieur, B7700.
- [5] **WWW.SOUDEUR.COM**
- [6] Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de : MASTER
- [7] **CONCEPTION ET PRODUCTIQUE**/Optimisation de la vitesse de soudage a l'arc électrique des aciers /HICHEM BEKOUICHE -2013.
- [8] **JEAN-PIERRE PLANCKAERT** (Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc).
- [9] **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.
- [10] **MAKHLOUF HAMIDE** (Modélisation numérique des aciers), 17 juillet 2008.
- [11] **Technique de l'ingénieur** : les aciers inoxydables : critère et choix.
- [12] **Wikipédia l'encyclopédie libre /matériau.**
- [13] **DEBIH MOUHAMED** (Etude des paramètres technologiques des procédés de soudage à l'arc électrique) ; Université de M'sila 2012.
- [14] **NGOC THUY TRINH** (La Modélisation du Comportement Thermomécanique et Métallurgique des Aciers) l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées : 16 Juin 2008.
- [15] **Rémy AUBON Jean Michel LE MEUR** (Etude Expérimentale Des Déformation en soudage) ACADEMIE DE CRETEIL.