

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de M'sila - Mohamed Boudiaf
Faculté de Sciences Techniques



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

Riyadh Djemla & Abd latif Hadjerssi

Thème

**Étude microstructurale de la zone affectée thermiquement
d'une liaison bi-métallique réalisée par Procédé MIG**

Soutenu le : / ... /

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Zamamouche Radouane	MCB	Président
ZAOUI Moussa	Pr	Encadreur
Saib Cherif	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024
N° d'ordre : GM/...../2024

Remerciements

Ce travail a été réalisé à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila. Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et notre reconnaissance à Monsieur le Docteur **M. Zaoui**, d' avoir proposé ce sujet et avoir consenti tant d'efforts et de temps pour diriger ce travail. Nos sincères remerciements vont également à nos familles et nos amis pour leur soutien, leur compréhension et leur patience tout au long de notre cursus. Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous sommes particulièrement reconnaissants envers ceux qui ont partagé leurs connaissances et leur expertise, ainsi qu'à tous ceux qui ont offert leur soutien moral et technique. Leur contribution a grandement enrichi ce travail et nous leur en sommes extrêmement reconnaissants.

Dédicaces

Nous dédions humblement ce travail à nos chers pères et mères, en témoignage de leur soutien indéfectible, de leur patience et de leur confiance indéfectible en nous.

Leur dévouement et leur soutien sont une source inestimable d'inspiration et de motivation. Que ces mots expriment notre profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont fait et continuent de faire pour nous, ainsi que mes sincères remerciements à tous les membres de notre famille, nos amis du quartier et nos professeurs.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous les membres de la promotion pour leur soutien et leurs encouragements continus.

List des Tableaux

Les Tableaux	Page
List Tableaux de 1^{er} Chapitre	
Tableau I-1 Les différentes classes d'aciers	08
Tableau I-2 Les limites des teneurs en éléments d'alliage	09
List Tableaux de Partie expérimentale	
Tableau IV-1 composition chimique d'acier inoxydable	43
Tableau IV-2 Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable (duplex) métal de base	43
Tableau IV-3 composition chimique d'acier au carbone- A106- (laboratoire essai GTP)	44
Tableau IV-4 Propriétés mécaniques de l'acier au carbone métal de base(A106)	44
Tableau IV-5 Composition chimique du métal d'apport ER 2209	45
Tableau IV-6 composition chimique métal d'apport ER70S-6	45
Tableau IV-7 Propriétés mécaniques de métal d'apport	45
Tableau IV-8 Paramètre de soudage ER 2209	46
Tableau IV-9 Paramètre de soudage ER 2209	46

List des Figures

Les Figures	Page
Figures de 1^{er} Chapitre	
Figure I-1 Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température	02
Figure I-2 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	03
Figure I-3 Microstructure d'un acier eutectoïde	03
Figure I-4 Microstructure d'un acier hypoeutectoïde	04
Figure I-5 une image présente les traitements thermiques des aciers	05
Figure I-6 une image présente de traitement thermique (La Trempe)	06
Figure I-7 une image présente de traitement thermique-unison tek	07
Figure I-8 recuits acier et normalisation par induction	07
Figure I-9 Image présente acier inox 304 ou 316	12
Figure I-10 Trempe à la flamme (au chalumeau)	14
Figure I-11 Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute	14
Figures de 2^{eme} Chapitre	
Figure II-1 Soudage par résistance par point	17
Figure II-2 principe Soudage par résistance par point	18
Figure II-3 Soudage oxyacétylénique	18
Figure II-4 Chalumeau soudeur (OFW)	19
Figure II-5 Chalumeau coupeur (OFC)	20
Figure II-6 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique	20
Figure II-7 Principe du procédé (SMAW)	21
Figure II-8 Circuit électrique du soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	22
Figure II-9 Principe de soudage TIG	23
Figure II-10 Principe de soudage MIG et MAG	24
Figure II-11 Les trois principaux régimes de transfert du métal	25
Figure II-12 Principe de soudage avec fil fourré (sans protection gazeuse)	26
Figure II-13 Principe de soudage avec fil fourré (avec protection gazeuse)	27
Figure II-14 Soudage au plasma.	28
Figure II-15 Soudage par faisceau d'électrons – Schéma de principe	29
Figure II-16 Soudage par faisceau laser	30
Figure II-17 Principe de soudage par friction	31
Figures de 3^{eme} Chapitre	
Figure III-1 Couplage thermo métallurgique et mécanique au cours d'une opération de soudage	33
Figure III-2 Cycle thermique : cas du soudage mono passe	34
Figure III-3 Cycle thermique pour le soudage multi passes	35

Figure III-4 Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes	35
Figure III-5 Cordon de soudure	37
Figure III-6 Variation de la dureté dans un joint soudé	37
Figure III-7 Fissure à chaud (ou de solidification).	38
Figure III-8 Évolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.	39
Figure III-9 Fissure à froid (fissure d'hydrogène)	40
Figures de partie expérimentale	
Figure IV-1 Sens de prélèvement des éprouvettes de traction	47
Figure IV-2 Schéma illustratif du dispositif d'attaque électrolytique	48
Figure IV-3 Microscope optique Carl Zeiss	48
Figure IV-4 Microstructure la ZAT d'acier (2205). GX200	49
Figure IV-5 Microstructure la ZAT de A106 GX200	50
Figure IV-6 Microstructure la ZL d'acier (2205) GX200	50
Figure IV-7 Microstructure la ZL de A106 GX100	51
Figure IV-8 Microstructure la ZL ; ZF; ZAT (2205/A106)	51
Figure IV-9 la microstructure de la soudure hétérogène coté duplex	52
Figure IV-10 la microstructure de la soudure hétérogène coté A106 a) MB, b) ZAT-ZF, c) ZF	53

Sommaire

	Page
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des Figures	
Introduction générale	
Chapitre I: Classification des aciers	
Introduction	01
I.1. Définition d'un acier	01
I.2. Constituants des aciers	02
I.2.1. Diagramme simplifié fer-carbone	03
I.2.2. Acier eutectoïde (0,77 %C)	03
I.2.3. Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)	04
I.2.4. Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)	04
I.3. Traitements thermiques des aciers	04
La Trempe	05
Procédé	06
Le Revenu	06
Le Recuit	07
Différents recuits	08
Classification des aciers	08
La composition chimique	08
Propriétés d'usage ou qualité	08
I.3.1. Aciers non alliés et aciers alliés	09
I.3.2. Aciers de qualité	10
A- Aciers de qualité non alliés	10
A.1. Aciers au carbone pour appareils à pression	10
A.2. Aciers pour emboutissage et pliage à froid	10
B- Aciers de qualité alliés	10
I.3.3. Les aciers spéciaux	11
A- Aciers spéciaux non alliés	11
B- Aciers spéciaux alliés	11
I.3.4. Aciers inoxydables	11
I.4. Traitement de Surface des Aciers	12
I.4.1. Les trempes superficielles	12

a. Trempe à la flamme (au chalumeau)	13
b. Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence	14
I.5. Les traitements thermochimiques	15
I.5.1. La carburation	15
I.5.2. La nitruration	15
I.5.3. La carbonituration	15
Chapitre II: Les Procédés de Soudage	
II.1. Les procédés de soudage	17
II.2. Soudage par résistance par point (RSW)	17
II.2.1. Définition	17
II.2.2. Principe de Soudage par résistance par point	18
II.3. Soudage oxyacétylénique	18
II.3.1. Définition	18
II.3.2. Principe de Soudage oxyacétylénique	19
II.3.3. Soudage (OFW)	19
II.3.4. Brasage (TS et TB)	19
II.3.5. Coupage (OFC)	19
II.3.6. Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique	20
II.4. Soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW)	21
II.4.1. Définition	21
II.4.2. Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées	21
II.4.3. Fondant et gaz de protection	21
II.4.4. Circuit secondaire Dans le procédé SMAW	22
II.5. Soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW)	22
II.5.1. Définition	22
II.5.2. Principe de soudage TIG	22
II.5.3. Gaz de protection	23
II.5.4. Métal d'apport	23
II.5.5. Circuit secondaire	23
II.6. Soudages MIG et MAG (GMAW)	23
II.6.1. Définition	23
II.6.2. Principe de soudages MIG et MAG	24
II.6.3. Régimes de transfert du métal	24
II.6.4. Le transfert par arc pulsé	25
II.7. Soudage avec fil fourré (FCAW)	26
II.7.1. Principe de soudage TIG	26
II.7.2. Soudage sans protection gazeuse	26

II.7.3. Soudage avec protection gazeuse	27
II.8. Soudage au plasma	27
II.8.1 Gaz utilisés	28
II.8.2 Domaines d'application	28
II.9. Soudage par faisceau d'électrons	29
II.9.1. Principe du soudage par faisceau d'électrons	30
II.9.2. Domaines d'application	29
II.10. Soudage par faisceau laser	30
II.10.1 Principe	30
II.10.2 Domaines d'application	30
II.11 soudages par friction	31
II.11.1 Principe	31
II.11.2 Application	31
Chapitre III: La Métallurgie du soudage	
Introduction	33
III.1. Aspect thermique du soudage	33
III.1.2 Cycle thermique du soudage mono passe	33
III.1.2. Cycle thermique du soudage multi passes	34
III.1.3 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage	35
a. Zone fondue (ZF)	36
b. Zone affectée thermiquement (ZAT)	36
III.2 Les défauts des soudages	38
III.2.1 Les fissures	38
III.2.1.1 Fissure à chaud (ou de solidification)	38
III.2.1.2 Fissures à froid (fissures d'hydrogène)	40
a. Méthodes de détection	40
b. Méthode de réparation	40
Chapitre IV: Partie expérimentale	
Introduction	43
IV.1. Matériaux	43
IV.1.1. L'acier inoxydable duplex	43
IV.1.2. Les métaux d'apport	44
IV.2. Préparation des échantillons et éprouvettes	46
IV.2.1. Prélèvement et réalisation des éprouvettes	46
IV.3. Caractérisation métallographique	47
IV.4. Observation métallographique	49
IV.4.1. Examen au microscope optique	49

IV.4.1.1. Examen de la zone affectée thermiquement (ZAT)	49
IV.4.1.2. Examen de la zone de liaison	50
Conclusion	54
Référence	55



CHAPITRE I :

Classification des aciers

Introduction :

Le soudage est largement répandu comme mode d'assemblage. L'évolution constante des procédés vers des méthodes toujours plus performantes garantit la qualité des joints soudés, avec une reproductibilité élevée. La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est devenue une nécessité croissante pour divers secteurs industriels. Une compréhension approfondie des phénomènes intervenant dans les matériaux utilisés, ainsi que des facteurs influençant leur comportement, permet de prévenir les anomalies et de sélectionner les conditions adaptées à leur utilisation.

L'assemblage par soudage est parmi les procédés les plus répandus dans l'industrie mondiale. Son évolution a traversé plusieurs étapes jusqu'à l'avènement de nouveaux procédés tels que le MIG, le MAG, l'ASW, le soudage par faisceau laser, etc. Les pièces assemblées sont soumises à diverses sollicitations telles que la traction, le cisaillement, etc.

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, nous avons abordé une Classification des aciers.
- Le deuxième chapitre, une généralité sur les procédés de soudage.
- Le troisième chapitre, la métallurgie de soudage.

Lors de cette étude ainsi que les métaux d'apports utilisés pour assemblage de ces matériaux. Dans une seconde partie, nous présentons les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation métallurgique des soudures hétérogènes et homogènes élaborées par procédé MIG.

Chapitre I

Classification des aciers

Introduction:

Les aciers demeurent d'une importance capitale dans de nombreux secteurs industriels, allant de l'électroménager à l'automobile en passant par l'aérospatiale et la ferronnerie. En effet, l'histoire de l'évolution technologique des civilisations est étroitement liée au développement des alliages à base de fer et à la facilité avec laquelle ils peuvent être élaborés. Cette importance technologique découle de plusieurs facteurs, notamment :

- Dans la croûte terrestre, les composés contenant du fer sont présents en grande quantité.
- L'extraction, l'affinage, l'obtention des alliages, et la fabrication du fer métallique ainsi que des aciers alliés, sont des processus relativement peu coûteux.
- Les aciers offrent une grande souplesse d'emploi grâce à leur capacité à être façonnés pour obtenir une variété de propriétés mécaniques et physiques. Ceci est réalisé par le biais de traitements thermiques et l'ajout d'éléments d'alliage, permettant ainsi de les adapter à diverses exigences de fabrication et d'utilisation. En termes de performance, les constructions en acier présentent une excellente résistance mécanique, y compris à la torsion et à la traction, ce qui les rend adaptées aux contraintes élevées. De plus, l'acier garantit une longévité exceptionnelle aux structures. Bien qu'ils présentent une certaine sensibilité à la corrosion, cette problématique peut être résolue par différents traitements de surface tels que la peinture, le zincage ou la galvanisation à chaud.

I.1. Définition d'un acier :

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer additionné d'un faible pourcentage titrent moins de 2 % de carbone, qui contiennent en outre certains autres éléments introduits en faibles quantités au moment de leur élaboration. La teneur en carbone a une influence considérable sur les propriétés de l'acier, par rapport à la ductilité, il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé, en outre, par une propriété fondamentale qui est la raison du développement considérable de ses emplois: il (prend la trempe), c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquies une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande. [1]

En dessous de 0,008%, l'alliage est plutôt malléable et on parle de fer, au-delà de 2,14% l'inclusion de carbone sous forme graphite, fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la

résistance mécanique et la dureté de l'alliage, on parle d'aciers (doux, mi-doux, mi-durs, durs,

extra- durs). On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. Les aciers au carbone ordinaires ne contiennent que des concentrations résiduelles en impuretés autres que le carbone et un peu de manganèse, et on parle d'aciers non-alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière on parle alors d'aciers traités. En fonction du nombre d'élément d'alliage ajoutés au fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

I.2. Constituants des aciers: Les constituants de l'acier sont alliés au fer qui est un élément métallique de symbole Fe, de numéro atomique 26, de masse atomique 55,85g/mole. Il est solide à la température ambiante, devient liquide à la température 1538°C et gazeux à la température de 2880°C [2]. Il existe plusieurs formes cristallines, ou allotropies, du fer selon la température (voir Fig. I.1). À basse température, sa structure cristalline est cubique centrée (CC), où les atomes occupent les sommets et le centre d'un cube. Avec un paramètre cristallin de $2,9\text{\AA}$, on l'appelle fer- α . Cette structure est stable jusqu'à une température de 910°C. Aux températures comprises entre celle-ci et 1390 °C, le fer- α se transforme en fer- γ , de structure cristalline cubique à faces centrées (C.F.C.). Au-delà de 1394°C, la structure cristalline stable est de nouveau du type cubique centrée que l'on appelle alors fer- δ .

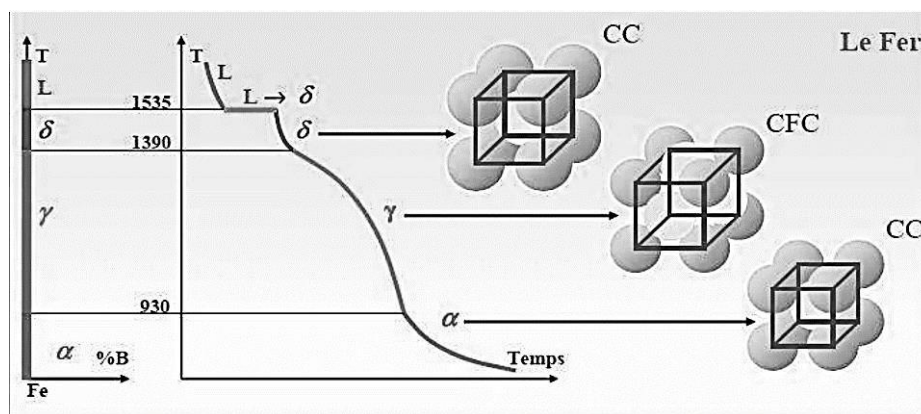


Figure I—Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température

L'existence de deux variétés allotropiques du fer joue un rôle crucial dans les propriétés de l'acier. La différence de solubilité du carbone dans chacune de ces formes est essentielle: elle est nulle ou extrêmement faible dans le fer α , tandis qu'elle est notable dans le fer γ , atteignant environ 2% à 1145°C. La solution de carbone dans le fer est connue sous le nom d'austénite, tandis que la solution très diluée (0,0218% à 727°C) dans le fer α est appelée ferrite. En raison de cette faible solubilité, le carbone forme un troisième constituant, le

carbure de fer (Fe_3C) ou cémentite. Ainsi, à température ambiante, l'acier est composé d'un mélange de ferrite et de cémentite, mais à des températures plus élevées, le fer se transforme en austénite. Le processus de chauffage visant à provoquer cette transformation est appelé austénisation. La présence de carbone entraîne également des modifications de la température à laquelle se produit la transformation, ces modifications étant exprimées dans le diagramme Fer-Carbone.

I.2.1. Diagramme simplifier fer-carbone:

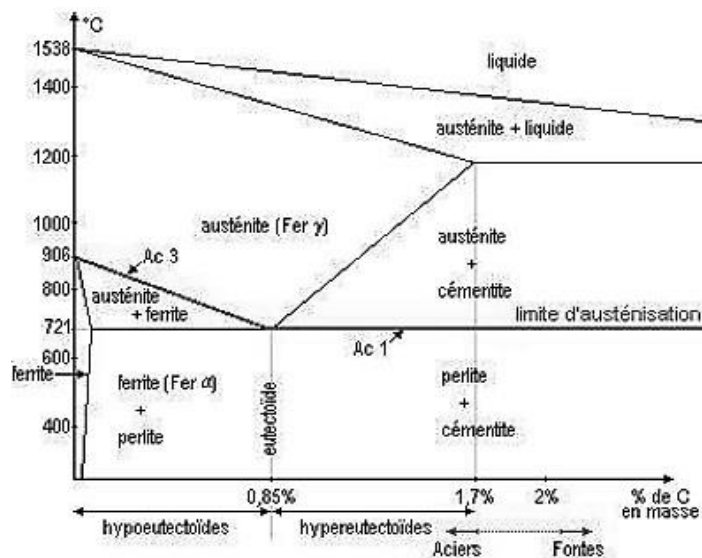


Figure I—2 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

Le diagramme simplifié illustre les domaines d'existence des différents constituants des aciers en fonction de la température et de la teneur en carbone. On désigne les matériaux avec plus de 2% de carbone comme fontes, et ceux avec moins de 1,7% de carbone comme aciers. La ligne AC3-AC1, également connue comme la limite d'austénisation, est également représentée.

I.2.2 Acier eutectoïde (0,77% C): Toute l'austénite initiale se transforme en perlite, un seul constituant de base avec une teneur en carbone de 0,77 %.

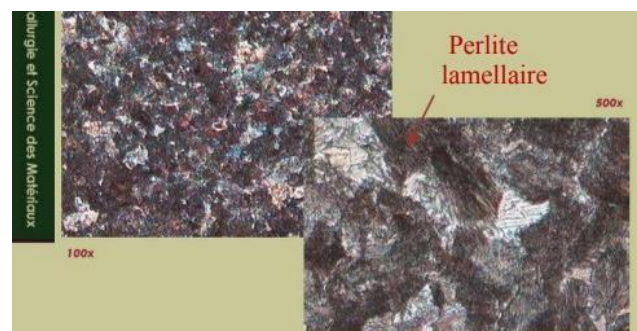


Figure I—3 Microstructure d'un acier eutectoïde. [3]

I.2.3 Aciers hypoeutectoïdes (0.008 à 0.77% C)

Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial. [6]

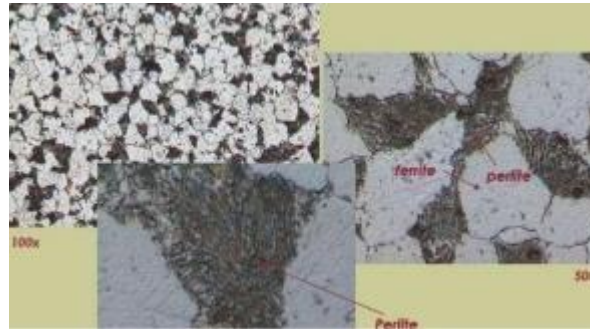


Figure I—4 Microstructure d'un acier hypoeutectoïde. [3]

I.2.4 Aciers hypereutectoïdes (entre 0.77 et 2.11 %C)

Les deux constituants de base sont la perlite et la cémentite. Comme tout le carbone initial ne peut pas être dissous et consommé par la perlite, les atomes de carbone restants se combinent avec le fer pour former de la cémentite, avec des proportions dépendant du pourcentage de carbone initial.

I.3 Traitements thermiques des aciers

Modifie la structure interne d'un acier, influençant les propriétés mécaniques et certaines propriétés physiques et chimiques [4] Traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques

alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. [5]



Figure I—5 une image présente les traitements thermiques des aciers

La Trempe :

La trempe consiste à chauffer l'acier à une température légèrement supérieure à son point de transformation, puis à le refroidir très rapidement. Selon la composition de l'acier, cette opération peut être réalisée à l'air ou dans de l'huile.

La trempe a pour objet d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante, et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce. Pour des raisons économiques (économie d'éléments d'alliage), on admet qu'une certaine proportion de bainite puisse se substituer à la martensite dans la mesure où le revenu est réalisé à une température supérieure à 500 °C. Pour un acier donné, les deux facteurs qui vont conditionner le résultat de la trempe sont : la trempabilité de l'acier dans les conditions d'austénitisation adoptées, les conditions de refroidissement de l'austénite. [4]



Figure I—6 une image présente de traitement thermique (La Trempe)

Procédé: On chauffe la pièce jusqu'à atteindre la température d'austénitisation, puis on la maintient à cette température pour homogénéiser la structure. Ensuite, on refroidit rapidement la pièce en utilisant de l'eau, de l'huile, etc. La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide. Sinon, d'autres constituants plus tendres tels que la bainite ou la perlite se forment.

Le revenu : appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, vise à précipiter le carbone dans des conditions contrôlées pour atteindre un durcissement optimal. Cette opération induit une évolution structurale de l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. En outre, le revenu peut éventuellement transformer l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire lors du refroidissement final. Les paramètres définissant les conditions d'exécution d'un revenu sont :

La température de revenu : C'est la température maximale à laquelle l'acier est chauffé.

La durée du maintien à la température maximale : Il s'agit du temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ou martensito-bainitique est maintenue constante et égale à la température de revenu.

La loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu. Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier.

Différents types de revenu (après trempe) existe:

- Le revenu de détente.
- Le revenu habituel (ou banal).
- Le revenu de durcissement secondaire. [5]



Figure I—7 une image présente de traitement thermique-unison tek

Le Recuit :

Le recuit est un processus qui implique initialement le chauffage d'une pièce à une température élevée, généralement entre 450 ° et 1100 °C. Cette température est sélectionnée en fonction des objectifs spécifiques. Ensuite, la pièce est maintenue à cette température pendant un certain laps de temps avant d'être refroidie de manière appropriée pour obtenir le résultat désiré.

Grâce au recuit, toute déformation du métal est éliminée ou diminuée. Ces contraintes pourraient être des conséquences d'un précédent traitement thermique ou de n'importe quelle action antérieure au traitement en Cours. Le recuit permet d'avoir un métal structuré et prêt à un usinage ou une déformation ultérieure. Le recuit intervient avant et après la formation du métal. [6]



Figure I—8 recuits acier et normalisation par induction.

Procédé : Le procédé implique un chauffage au-dessus de la température d'austénitisation, suivi d'un maintien à cette température pour homogénéiser la structure, et enfin d'un refroidissement lent.

Différents types de recuits :

- Recuit d'homogénéisation : il vise à éliminer l'hétérogénéité chimique des aciers issus de la coulée.
- Recuit de régénération : il permet de raffiner et d'uniformiser la structure métallique.
- Recuit de détente : il est utilisé pour relâcher les contraintes internes après le moulage ou le soudage.
- Recuit de recristallisation : principalement pour les aciers forgés ou écrouis.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en éliminant les composants les plus durs.

Classification des aciers :

Deux critères sont utilisés pour classer les familles d'aciers :

A- La composition chimique : nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ($\leq 1\%$ d'éléments d'alliage), aciers peut allier (teneur de chaque élément d'alliage $\leq 5\%$), aciers très alliés.

B- Propriétés d'usage ou qualité : aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables) C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies dans le Tableau I.1.

Aciers	Non alliés	Alliés
De qualité	Aciers de qualité non alliés	Aciers de qualité alliés
Spéciaux	Aciers spéciaux non alliés	Aciers spéciaux alliés
Inoxydable		Aciers Inoxydables

Tableau I-1 Les différentes classes d'aciers. [4]

I.3.1 Aciers non alliés et aciers alliés : Pour définir ces 2 classes d'aciers, il faut prendre en compte :

- Pour un élément d'alliage autre que le manganèse, la teneur minimale requise est soit celle spécifiée dans l'analyse de la coulée, soit 70 % de la teneur maximale imposée si cette dernière est la seule valeur fixée.
- Pour le manganèse, la teneur minimale exigée est celle spécifiée dans l'analyse de coulée, ou la teneur maximale si cette dernière est la seule valeur fixée. Dans ce cas, la limite prévue dans le tableau suivant est augmentée à 1,80 %.

Les seuils de concentration en éléments d'alliage qui démarquent les aciers non alliés des aciers alliés sont précisés dans le Tableau II.1 Un acier est classé comme allié dès lors qu'il atteint l'une de ces limites.

Élément Spécifié	Limite %
Al	0.30
B	0.008
Cr	0.30
Cu	0.40
Mn	1.65 ⁽²⁾
Mo ⁽¹⁾	0.08
Nb ⁽²⁾	0.08
Ni ⁽¹⁾	0.30
Si	0.60
Ti ⁽²⁾	0.05
V ⁽²⁾	0.10
W	0.30
Zr	0.05
Autres éléments (C, S, P, N....)	0.05

Tableau I-2 Les limites des teneurs en éléments d'alliage

(1) et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4 la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles. (3) Si Mn est défini par un maximum la limite est 1,80.

I.3.2 Aciers de qualité

Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

A. Aciers de qualité non alliés Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux.

Aciers au carbone pour appareils à pression

Aciers non alliés de qualité (Fe/C ou Fe/C/Mn) nécessitant une restauration de leur structure par normalisation (et éventuellement un revenu) après formage à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent répondre à des exigences spécifiques en termes de résistance à la rupture fragile, ainsi que, lorsqu'ils sont utilisés à des températures supérieures à la température ambiante, en termes de limite d'élasticité à chaud et de résistance au fluage.

A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid

Des aciers de haute qualité sont fournis sous forme de produits plats avec des exigences spécifiques de ductilité, d'emboutissage et de finition de surface. En général, les niveaux d'éléments interstitiels dans ces aciers sont réduits autant que possible (sauf parfois pour le phosphore ajouté afin d'augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on trouve ceux destinés à l'emballage, qui nécessitent non seulement une aptitude à l'emboutissage, mais également une propriété inclusionnaire particulière, et parfois une protection spécifique contre la corrosion (notamment avec du fer blanc et du fer chromé).

A- Aciers de qualité alliés

Aciers contenant des éléments d'alliage mais généralement non destinés à un traitement thermique. Cette catégorie comprend :

- Des aciers à grains fins soudables de construction métallique.
- Des aciers pour tôles magnétiques.
- Des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine.
- Des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr.
- Des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu.
- Des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite). [4]

I.3.3 Les Aciers spéciaux : Les aciers spéciaux se distinguent des aciers de qualité par leur plus grande pureté, notamment en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Ils sont principalement conçus pour subir un traitement thermique et se distinguent par leur capacité à y répondre de manière régulière.

A- Aciers spéciaux non alliés : Font partie de cette catégorie :

- Des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu.
- Les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques.
- Des aciers à teneur faible en inclusions.
- Des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit.
- Des aciers dont la résilience KV en long à -50 °C est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers.
- Des aciers pour réacteurs nucléaires avec $\text{Cu} \leq 0,10\%$, $\text{Co} \leq 0,05\%$ et $\text{V} \leq 0,05\%$.
- Des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %.
- Des aciers pour armature de précontrainte du béton. [4]

B- Aciers spéciaux alliés : Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers inoxydables ni des aciers de qualité appartiennent à cette catégorie :

- Les aciers de construction mécanique.
- Certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression.
- Certains aciers résistant au fluage.
- Les aciers pour roulement.
- Les aciers à outils et les aciers à coupe rapide.
- Des aciers aux propriétés physiques spéciales.

I.3.4 Aciers inoxydables : Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Développés industriellement à partir du début du vingtième siècle, la croissance de leur production se poursuit régulièrement. Ces aciers inoxydables, pour des raisons précisées ultérieurement, sont définis comme des aciers titrant plus de 10,5 % de chrome, moins

de 1,2 % de carbone et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliages (norme européenne NF EN 10088-1). Il s'agit donc d'aciers spéciaux très alliés. Dans la normalisation européenne (NF EN 10027) ils sont donc désignés :

- Symboliquement par la lettre X suivie de la teneur en carbone multipliée par 100, des principaux éléments d'alliage selon les symboles de la chimie et de leur concentration en pour-cent (par exemple : X6CrNi18-10). Ces dénominations sont précédées de la lettre G pour les produits moulés. À titre d'information, rappelons que cela correspond à l'ancienne dénomination française Z6CN18-10, qui était suivie de la lettre M pour les nuances moulées.
- De façon alphanumérique par le chiffre 1 suivi de deux chiffres indiquant la famille d'acier et d'un numéro d'ordre à deux chiffres. Dans le cas des aciers inoxydables, les familles d'aciers sont toutes de 40 à 49. Leur désignation sera donc toujours du type 1.4XXX (par exemple, 1.4308 = X5CrNi19-10). Dans la normalisation des États Unis que l'on rencontre souvent, les aciers inoxydables:
 - De type Fe-Cr sont désignés par un chiffre de la série 400 (exemple AISI 430)
 - De type Fe-Cr-Ni sont désignés par un chiffre de la série 300 (exemple AISI 316). [1]



Figure I-9 Image présente acier inox 304 ou 316

I.4 Traitement de Surface des Aciers : [7]

Suivant l'utilisation de la pièce élaborée, ce sont surtout les propriétés de surface qui prédomine (ex : résistance à l'usure). Pour préserver les outils et des accessoires de machines de l'usure et des déformations on cherche à réaliser une grande dureté superficielle à ces pièces.

Dans ces cas, le traitement de surface est préféré afin que le cœur de la pièce conserve une bonne ténacité et que la peau soit plus résistante. Les traitements de surface sont généralement appliqués sur des aciers ordinaires ou des aciers peu chargés en éléments d'addition.

Deux types de traitements de surface peuvent être identifiés :

- Les trempes superficielles modifient la structure de surface des pièces en peau.
- Les traitements thermo-chimiques modifient la composition de surface des pièces.

Remarque: On peut également protéger la surface contre la corrosion en utilisant différentes méthodes :

- Isolation par revêtement étanche,
- Protection par un métal résistant à l'oxydation,
- Protection par modification chimique en surface, et
- Protection par électrode de sacrifice.

I.4.1 Les trempes superficielles : Ces opérations impliquent une austénitisation rapide de la surface de la pièce, suivie d'une trempe. Ce processus concerne une épaisseur de quelques millimètres de la pièce.

Les méthodes les plus pratiques pour le chauffage superficiel sont:

- Le chauffage au chalumeau.
- Le chauffage par induction électrique.

Cette technique est préférable car elle permet un réglage plus précis de la pénétration de la chaleur et elle est automatisable.

I-a) Trempe à la flamme (au chalumeau): La surface de la pièce est portée en quelques secondes au-delà de 900°C à l'aide d'un chalumeau ou d'un jeu de brûleurs judicieusement répartis, puis trempée plus ou moins violemment selon l'épaisseur relative chauffée.

La profondeur durcie peut varier entre un millimètre et la pleine section de la pièce (typiquement jusqu'à 75 mm) selon la durée d'interaction de la flamme et l'efficacité du refroidissement vis-à-vis de la trempabilité de l'acier.

Les différents procédés de trempe à la flamme sont soit :

- De type stationnaire.
- Soit de type au défilé (de proche en proche)

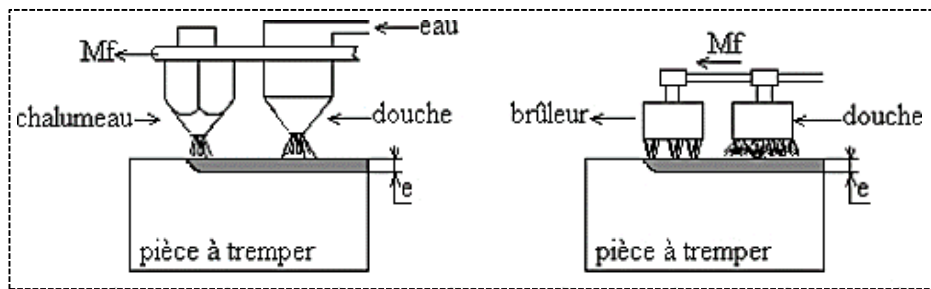


Figure I—10 Trempe à la flamme (au chalumeau)

I-b) Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence :

La pièce à traiter est exposée, soit statiquement soit en mouvement, à un champ électromagnétique généré par un inducteur alimenté en courant haute fréquence, généralement de quelques kHz à 400 kHz. Cela entraîne le chauffage de la pièce par effet Joule et conduction thermique.

Le refroidissement se fait par trempe sous douche d'eau, celle-ci:

- Remplaçant l'inducteur (dans un procédé statique).
- S'opère juste derrière l'inducteur (procédé au défilé).
- Cela conduit à un durcissement martensitique sur des couches superficielles (~ 0,5 à 5 mm).

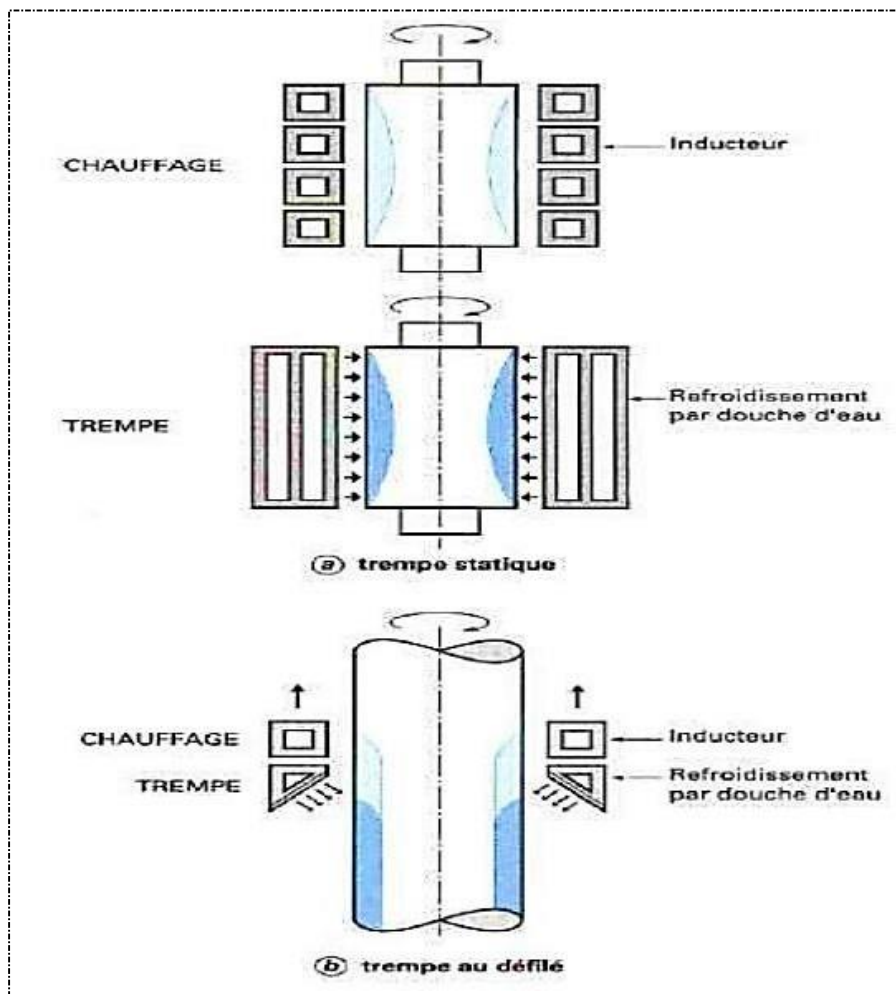


Figure I—11 Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute.

I.5 Les traitements thermochimique:

Ces procédés impliquent une modification de la microstructure de la peau de la pièce, créant ainsi un gradient de composition chimique. Cette technique permet à la peau de se durcir par trempe, tandis que le cœur de la pièce reste souple et ductile. Habituellement, ce gradient de composition est obtenu par la diffusion d'un métalloïde (comme le carbone, l'azote ou les deux) à des profondeurs d'environ 1 à 2 mm.

Les traitements les plus courants sont ceux de cémentation, qui consistent à introduire superficiellement du carbone ou de l'azote (ou les deux) dans un acier. Ce processus transforme la surface de l'acier en un matériau fortement carboné, prêt à être trempé. On distingue trois principaux types de traitement de surface dans ce domaine.

- Carburation (diffusion du carbone).
- Nitruration (diffusion de l'azote).
- Carbonitruration (diffusion des deux).

I.5.1 La carburation :

Les agents de cémentation sont des matières solides, liquides ou gazeuses qui, à des températures du domaine austénitique de l'acier, peuvent libérer du carbone.

I.5.2 La nitruration :

La solubilité de l'azote dans le fer α atteint 0,4 % à 590°C, et sa dissolution se fait typiquement entre 500 et 550°C. L'ammoniac sous forme gazeuse est l'agent de nitruration le plus communément utilisé.

Avant de saturer le fer à 0,4 %, l'azote a tendance à former des nitrures finement dispersés. Les duretés superficielles résultant de la nitruration sont supérieures à celles obtenues par carburation.

L'épaisseur de la zone traitée est minimale : 0,2 mm pour un traitement de 10 heures à 525°C et 0,6 mm pour 60 heures à 525°C. Ces dimensions réduites sont déterminées par la température du traitement.

Étant donné que la nitruration agit sur le fer α et que le durcissement est exclusivement attribuable à la formation de nitrure, aucun traitement thermique supplémentaire n'est requis.

I.5.3 La carbonitruration :

Il s'agit d'une diffusion simultanée de carbone et d'azote en surface, un traitement très similaire à la carburation appliqué au fer. Les milieux de carbonitruration comprennent des bains de cyanures ou des mélanges gazeux. Les propriétés de la couche traitée se situent entre celles obtenues par carburation et nitruration.



CHAPITRE II :

Les Procédés de Soudage

II.1 Procèdes de soudage :

Au centre de ce travail exhaustif se trouvent les principaux procédés de soudage, qui sont nombreux :

- Le Soudage par résistance par point (RSW).
- La flamme oxyacétylénique (OXW).
- Le soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW).
- Le soudage TIG (pour Tungsten Inert Glas) (GTAW).
- Les soudages MIG et MAG (GMAW).
- Le soudage avec fil fourré (FCAW).
- Le soudage au plasma.
- Le soudage par faisceau d'électrons.
- Le soudage par faisceau laser.
- Le soudage par friction.

II.2 Soudage par résistance par point (RSW) :

II.2.1 Définition :

Le soudage par point est de loin le plus répandu des deux. Il sert pour l'assemblage de tôles minces destinées à la fabrication de meubles en métal, de boîtiers métalliques, de casiers et d'étagères ainsi que de treillis faits de tiges métalliques (paniers d'épicerie, grilles, présentoirs, etc). L'industrie de l'automobile fait souvent appel à des robots pour effectuer le soudage par résistance par point. L'assemblage d'un véhicule automobile peut nécessiter de 10 000 à 15 000 points de soudure par résistance. [8]

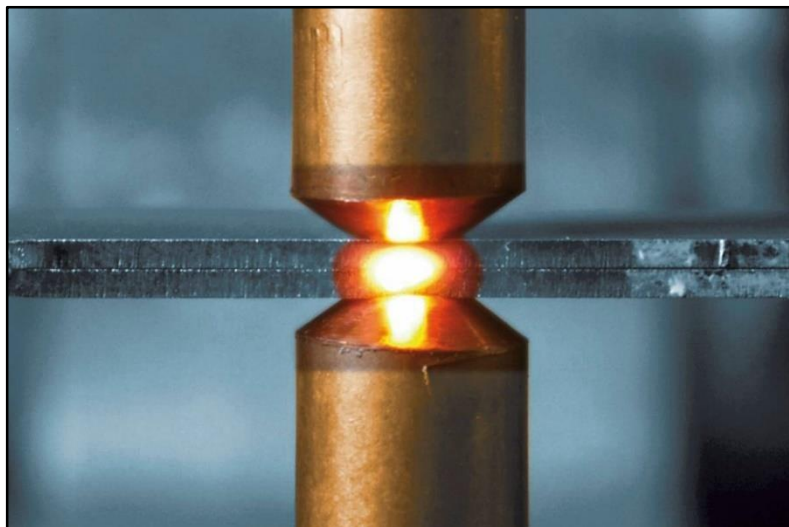


Figure II-1 Soudage par résistance par point.

II.2.2 Principe de Soudage par résistance par point :

Le procédé de soudage par résistance consiste à faire passer un courant électrique entre deux électrodes sans produire d'arc électrique. Placées de chaque côté des deux pièces minces à fusionner, les électrodes laissent passer le courant, ce qui élève la température et amorce la fusion du métal. Le soudage se produit sous l'effet de la chaleur, du temps et de la pression qu'exercent les électrodes. Le poste de soudage par résistance consiste en un transformateur électrique qui fonctionne sur le courant alternatif (CA), il produit un courant de forte intensité, de plusieurs milliers d'ampères à une faible tension d'environ 10 volts. [8]

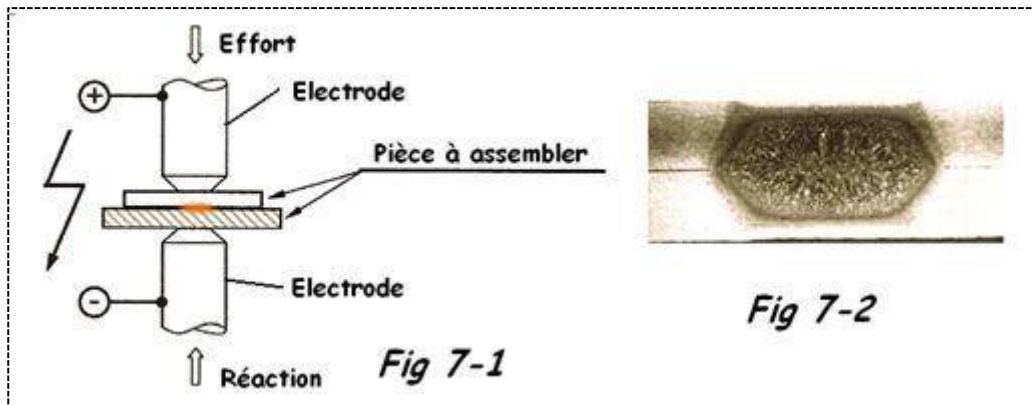


Figure II-2 principe Soudage par résistance par point.

II.3 Soudage oxyacétylénique :

II.3.1 Définition :

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) est l'un des procédés de soudage les plus anciens et a longtemps été le plus répandu. Beaucoup moins utilisé aujourd'hui, il a toujours le triple avantage de sa polyvalence, de sa simplicité de mise en œuvre et du faible coût du matériel nécessaire. Il convient parfaitement pour les travaux de réparation ou de construction ou encore pour le soudage de tubes et de structures faits de matériaux (comme la fonte) particulièrement sujets à la fissuration, avec des parois de 0,5 à 6 mm d'épaisseur. Il est également très utilisé pour la soudure de métaux non ferreux ainsi que pour le placage ou le rechargement dur, mais aussi pour le coupage, le chauffage et le redressement à la flamme. [9]

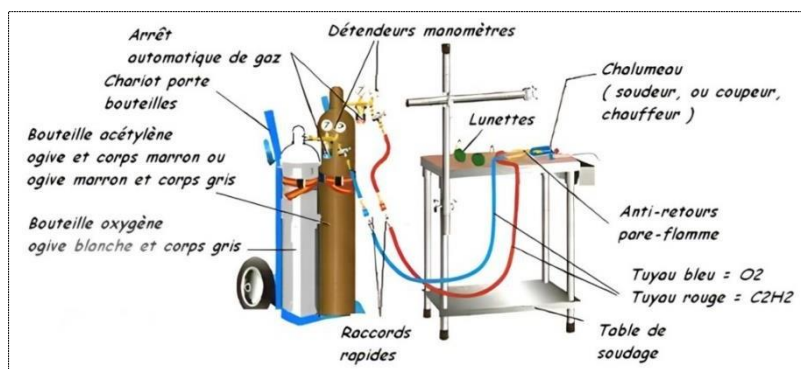


Figure II-3 Soudage oxyacétylénique.

II.3.2 Principe de Soudage oxyacétylénique : [8]

Ce procédé utilise : l'oxygène et un gaz combustible, le plus souvent l'acétylène ou le propane. La combustion des gaz qui sortent du mélangeur du chalumeau produit une flamme qui peut atteindre des températures de 3 100 °C à 3 500 °C (5 600 °F à 6 330 °F). [8]

II.3.3. Soudage (OFW) :

Les pièces à souder sont fusionnées lors du processus de soudage, pouvant être complété manuellement avec l'ajout de métal d'apport à l'aide d'une baguette de soudure. Dans les applications industrielles, le soudage à l'oxygaz est rarement utilisé, étant remplacé par des procédés plus performants. Le chalumeau ou la torche, qui génère et guide le jet de gaz enflammé, est l'appareil principal. Il régule les gaz et les mélanges selon les proportions désirées, tandis que la buse, à l'extrémité du chalumeau, dirige les gaz.

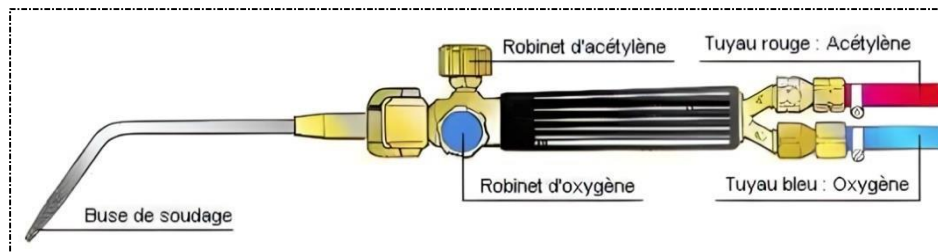


Figure II-4 Chalumeau soudeur (OFW).

II.3.4 Brasage (TS et TB) :

Pour le brasage, il n'est pas nécessaire de faire fondre le métal de base, car la fusion du métal d'apport, ayant un point de fusion inférieur à celui du métal de base, est suffisante. Le métal d'apport est chauffé et laissé couler sur un décapant (flux) appliqué à la surface à souder. En général, un décapant en pâte est utilisé, permettant de nettoyer le métal à braser tout en améliorant l'adhérence du bain de fusion. Le brasage au gaz est fréquemment employé en plomberie pour créer des joints entre deux canalisations, ainsi que pour la réparation d'outils et d'équipements.

II.3.5 Coupage (OFC) :

La méthode la plus courante est le coupage au chalumeau, principalement utilisé pour travailler l'acier doux. Elle implique de diriger une flamme sur la pièce à couper, en y ajoutant un jet d'oxygène pur, ce qui provoque la fusion du métal et la séparation de la pièce. Le chalumeau coupeur se différencie du chalumeau soudeur par une ouverture centrale dans la buse, permettant le passage du jet d'oxygène.

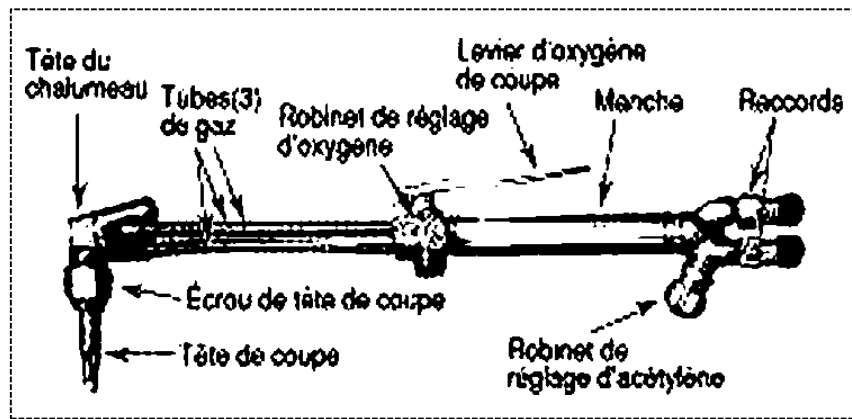


Figure II-5 Chalumeau coupeur (OFC).

II.3.6 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique : [10]

Flamme neutre ou normale : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse. Cette flamme est utilisée pour le soudage de l'acier et des cuivres.

Flamme oxydante : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sèment. Le panache est plus lumineux. Cette flamme est utilisée pour le soudé-brasage, le soudage des laitons et du bronze.

Flamme carburante : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. Cette flamme légèrement carburante est utilisée pour le soudage des alliages d'aluminium, du plomb, du zinc et des fontes. Une flamme fortement carburante est utilisée pour le revêtement de stellite.

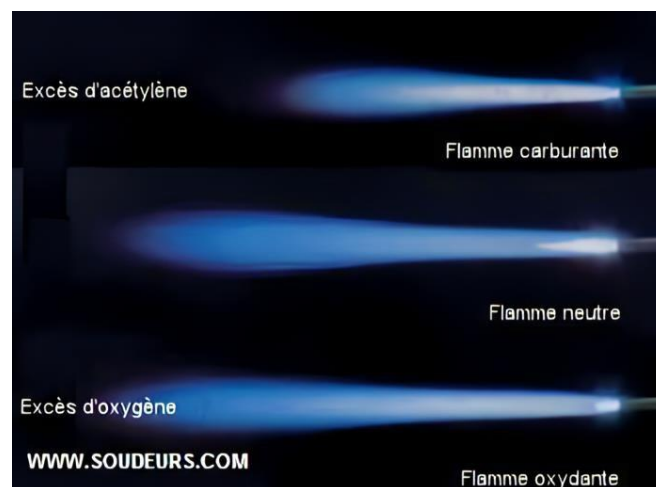


Figure II-6 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique.

II.4 Soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW) :

II.4.1 Définition :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE / MMA / SMAW /111) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme 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]

II.4.2 Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées : [8]

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée exige l'utilisation manuelle d'une baguette. Une fois l'arc amorcé, la température très élevée, soit de 5 500 °C à 6 650 °C (9 990 °F à 12 000 °F), fait fondre l'électrode et une partie du métal de base. Le remplacement de l'électrode se fait manuellement.

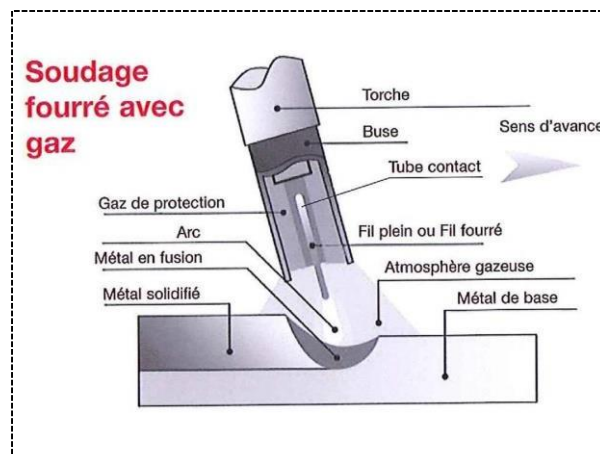


Figure II-7 Principe du procédé (SMAW).

II.4.3 Fondant et gaz de protection :

La différence entre l'électrode utilisée dans le procédé SMAW et celle employée dans le FCAW réside dans leur composition. Dans le SMAW, l'électrode contient une âme métallique enrobée de fondant. Lorsque la chaleur est appliquée, le fondant libère des gaz protecteurs qui entourent le bain de fusion, tout comme dans le FCAW. Cependant, ce procédé présente un inconvénient commun avec le FCAW : il crée une couverture solide, appelée laitier, qui doit être éliminée, généralement en utilisant un marteau ou un outil pneumatique. Contrairement au FCAW, les gaz protecteurs ne sont pas nécessaires, car les gaz produits par la combustion du fondant assurent la protection du bain de fusion.

II.4.4 Circuit secondaire Dans le procédé SMAW :

La tension de l'arc électrique du circuit secondaire peut varier de 17 à 45 volts et le courant, de 10 à 550 ampères. Ce procédé fonctionne tant sur le courant direct que sur le courant alternatif.

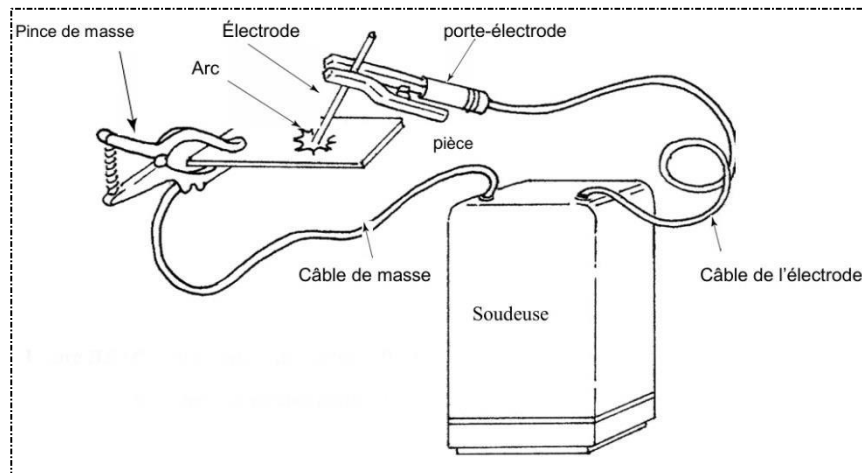


Figure II-8 Circuit électrique du soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).

II.5. Soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW) :

II.5.1 Définition :

Le procédé GTAW permet de souder la plupart des métaux et des alliages commerciaux, en particulier l'acier inoxydable et l'aluminium. Il est également utilisé lorsque les soudures sont soumises à des contrôles de qualité stricts. Par exemple, on l'utilisera pour faire la première passe de soudure des tuyauteries à haute pression, puis on appliquera le FCAW ou le GMAW pour la deuxième passe. Le GTAW est un procédé lent, bien adapté à des tôles de moins d'un quart de pouce d'épaisseur.

II.5.2 Principe de soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW) :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène InertGas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungstène arc welding) (Fig.5.). L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires [12].

A l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base, on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport (éventuel) formant ainsi le joint soudé après refroidissement. Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène. [13]

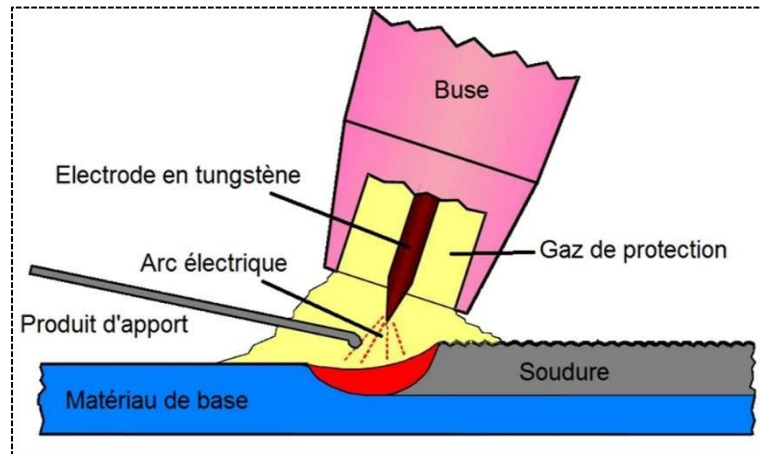


Figure II-9 Principe de soudage TIG.

II.5.3 Gaz de protection :

Le bain de fusion est souvent protégé en utilisant des gaz inertes tels que l'hélium, l'argon, ou une combinaison des deux.

II.5.4 Métal d'apport :

Le soudeur manipule la baguette de métal d'apport d'une main et la torche de l'autre. L'électrode en tungstène est utilisée pour diriger le courant électrique. Cependant, à force de toucher le métal de base pour amorcer l'arc électrique, la pointe de l'électrode s'arrondit, obligeant le soudeur à l'aiguiser régulièrement. Certains préfèrent opter pour une amorce à haute fréquence afin de réduire la fréquence d'aiguisage. L'aiguisage de la pointe des électrodes est généralement effectué à l'aide d'une meule d'établi ou, dans certains cas, par aiguisage chimique. Une pointe bien aiguisée garantit une plus grande précision et une soudure de meilleure qualité.

II.5.5 Circuit secondaire :

Le courant électrique dans le circuit secondaire peut varier de 1 à 500 ampères en courant continu et de 5 à 500 ampères en courant alternatif, tandis que le voltage s'ajuste automatiquement selon les paramètres du poste de soudage.

II.6 Soudages MIG et MAG (GMAW) : [14]

II.6.1 Définition :

Ces deux procédés s'appliquent au soudage des métaux ferreux et non ferreux. Les symboles MIG et MAG ont été adoptés par l'Institut international de la soudure. Ils sont par conséquent d'un emploi universel.

- MIG (Métal inerte gaz) : pour le soudage sous gaz inerte, avec fil électrode consommable.
- MAG (Métal actif gaz) : pour le soudage sous gaz actif CO₂ ou plus souvent argon + CO₂ avec fil électrode consommable.

II.6.2 Principe de soudages MIG et MAG (GMAW) :

Ce type de soudage est un procédé dans lequel la fusion du métal destiné à former la soudure est produite principalement par la chaleur d'un arc établi et maintenu entre un fil électrode consommable et la pièce à souder (Fig. II.10).

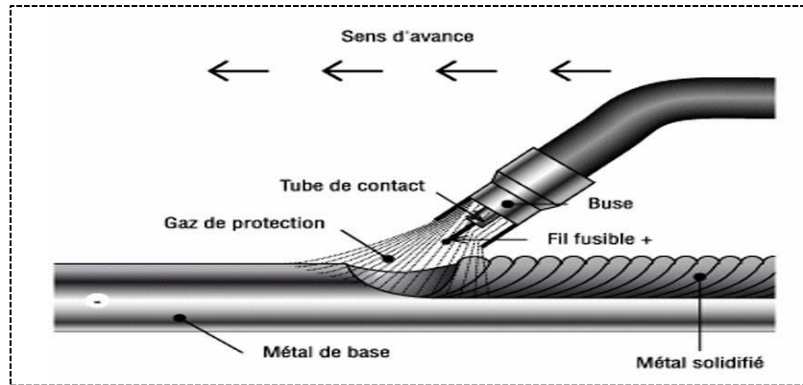


Figure II-10 Principe de soudage MIG et MAG.

Le fil est automatiquement dévidé à une vitesse appropriée pour compenser sa fusion et maintenir la longueur d'arc optimale. Cette opération peut être réalisée avec ou sans l'utilisation d'un flux gazeux. Dans les deux cas, le soudeur conserve un contrôle visuel continu sur l'arc et le bain de fusion.

Selon le type de gaz de protection utilisé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est identifié par des acronymes spécifiques :

- Le procédé MAG (Métal Active Gaz), qui fait appel à un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO₂), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂), ou encore d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O₂).
- Le procédé MIG (Métal Inerte Gaz), qui utilise un gaz inerte, tel que l'argon (Ar), l'hélium (He), ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

II.6.3 Régimes de transfert du métal :

Suivant l'importance des courants, des tensions utilisées ainsi que des gaz de protection il a été mis en évidence trois principaux régimes de transfert du métal en fonction de la fusion du fil et du dépôt de métal constituant la soudure (Figure II.11) :

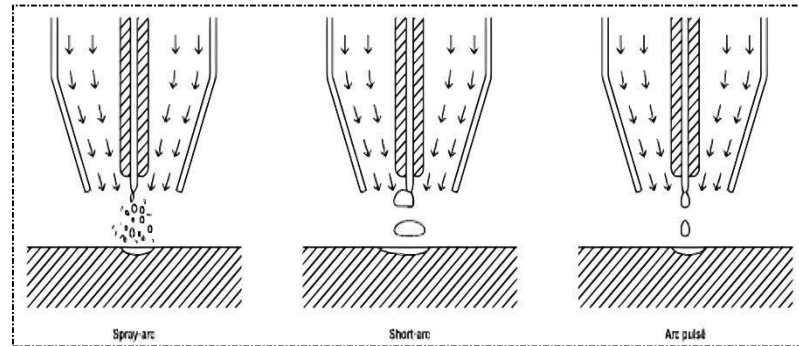


Figure II-11 Les trois principaux régimes de transfert du métal.

II.6.3.1 Le régime de forte intensité (transfert par pulvérisation axiale) appelé spray-arc :

Le métal est transféré sous forme de fines gouttelettes pulvérisées, bien plus petites que le fil lui-même. Ce mode de transfert permet d'atteindre des vitesses de soudage élevées, une pénétration appréciable et un rendement de dépôt élevé. Cependant, le bain de fusion est trop chaud et trop fluide, ce qui rend le soudage en position et sur des tôles fines difficile voire impossible. Pour utiliser ce mode de transfert, des courants de soudage élevés (supérieurs à 200 A) et des tensions de 25 à 35 V sont nécessaires.

II.6.3.2 Le régime de faible intensité (transfert par courts-circuits successifs) appelé également short-arc :

Ce procédé se différencie significativement du précédent, car il repose sur l'établissement d'une série de courts-circuits (entre 60 et 200 par seconde). Les intensités utilisées sont relativement basses, allant de 30 à 200 A, tandis que les tensions d'arc varient entre 14 et 20 V.

Le fil s'immerge périodiquement dans le bain de fusion, déclenchant un court-circuit et la fusion de son extrémité à mesure que le courant augmente. Ce mode de transfert se caractérise parfois par des projections abondantes et des risques de collage du fil pendant les courts-circuits. Il est utilisé pour souder des matériaux de faible épaisseur, facilitant le travail en position et permettant l'exécution de passes de fond de chanfrein sans recourir à un support inversé.

II.6.4 Le transfert par arc pulsé :

Ce nouveau mode de transfert découle de l'émergence de nouvelles générations de générateurs MIG. Il se situe dans une plage de tensions intermédiaires (20-26V), où l'arc est naturellement instable. Cependant, l'ajout d'un courant pulsé permet de stabiliser l'arc et d'assurer un transfert régulier des gouttelettes de métal. Cette technique, développée vers 1965, offre une excellente pénétration, améliore l'aspect et la compacité du dépôt, tout en éliminant les projections. Ces avantages encouragent l'utilisation du procédé

MIG pour des productions de haute qualité et représentent un progrès significatif pour la robotisation en soudage.

II.7 Soudage avec fil fourré (FCAW) :

II.7.1 Principe : Avec ou sans gaz de protection, ce procédé de soudage est similaire au soudage MIG ou MAG, à la différence que le fil d'apport est tubulaire et rempli d'un flux similaire à la poudre qui compose l'enrobage d'une électrode, tant par son rôle que par ses propriétés. Il existe deux méthodes de fabrication des fils fourrés : l'étirage (pour les fils tubulaires) ou le formage par passage entre des galets (pour les fils plissés ou sertis).

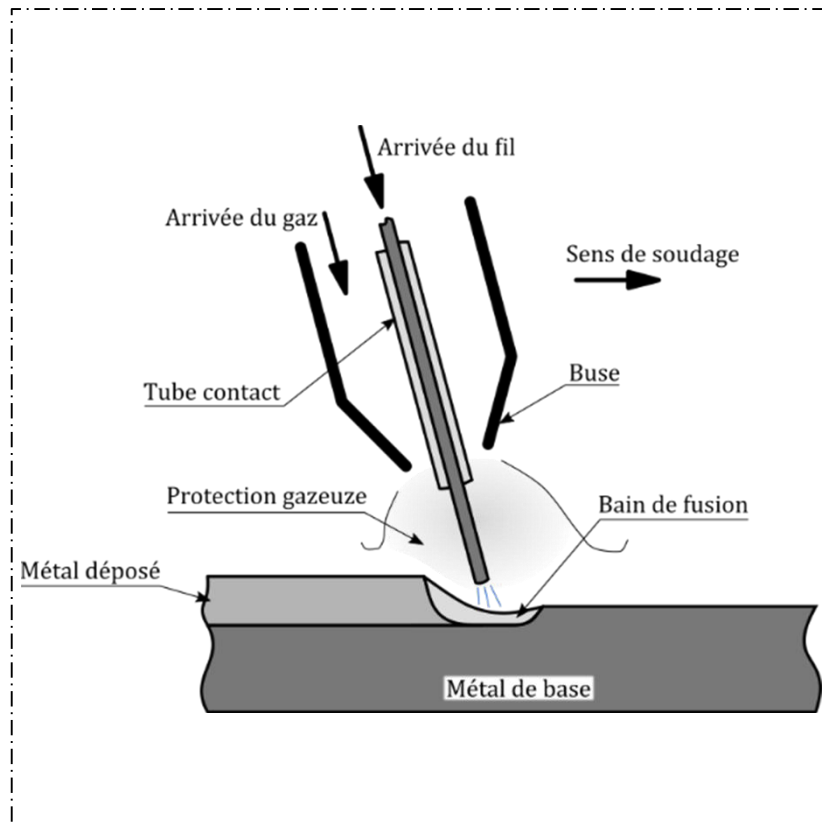


Figure II-12 Principe de soudage avec fil fourré (sans protection gazeuse).

II.7.2 Soudage sans protection gazeuse :

Actuellement, l'utilisation de fils fourrés sans protection gazeuse gagne en popularité en raison de ses nombreux avantages. Sans besoin de circuits de gaz de protection, il est possible d'utiliser des longueurs de fil plus importantes à l'extrémité du guide-fil, facilitant ainsi la soudure dans des espaces restreints. La fusion est protégée par le laitier et une atmosphère protectrice générée par le flux à l'extrémité du fil-électrode. Cependant, en raison de la production significative de fumées, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs de capture et d'extraction des fumées. Grâce à l'absence de préoccupation concernant la perturbation du flux de gaz de protection, les tests avec des torches aspirantes se sont révélés très satisfaisants.

II.7.3 Soudage avec protection gazeuse :

D'un point de vue technique, les soudures effectuées avec des fils-électrodes fourrés présentent une qualité élevée, combinant des vitesses de dépôt rapides et une excellente pénétration. Les meilleurs fils fourrés affichent des propriétés mécaniques comparables à celles des fils pleins. Sur le plan opérationnel, ils sont attrayants en raison de la réduction significative des risques de collage et de la facilité de soudage dans diverses positions. Sur le plan économique, les fils fourrés offrent un taux de dépôt jusqu'à une fois et demie supérieure à celui des fils pleins, indépendamment du facteur de marche, ce qui contribue à réduire les coûts de la main-d'œuvre, le poste le plus coûteux. Les performances avérées du courant pulsé dans le soudage MAG avec des fils pleins ont incité à explorer cette approche avec des fils fourrés. En effet, le soudage avec des fils pleins présente une grande stabilité dans le transfert de métal, une réduction des projections et une amélioration de la soudabilité dans toutes les positions, réduisant ainsi considérablement les risques de collage.

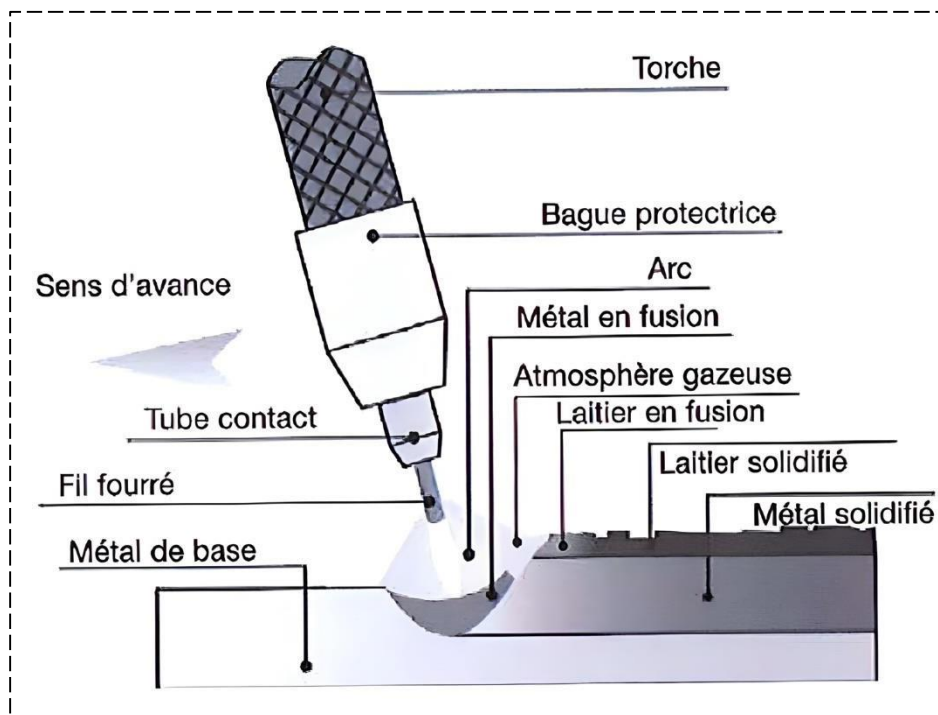


Figure II-13 Principe de soudage avec fil fourré (avec protection gazeuse).

II.8 Soudage au plasma :

Définition :

Le terme "plasma" fait référence à un gaz ionisé, donc conducteur, à haute température et globalement neutre. Le soudage au plasma est un procédé dérivé du TIG, caractérisé par la formation d'un arc très concentré et de haute densité énergétique, résultant de la contraction thermomécanique et électromagnétique de la colonne de gaz à l'extrémité de l'électrode de tungstène. Les températures atteintes dans ce processus sont extrêmement élevées, atteignant jusqu'à 20 000 °C.

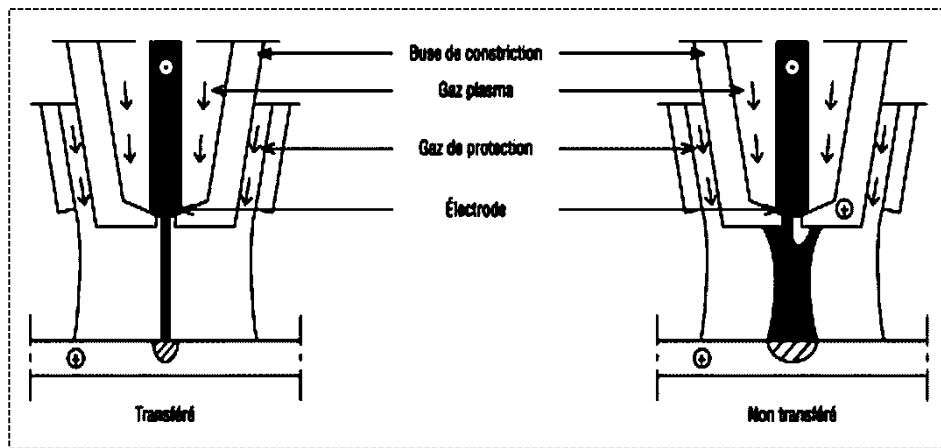


Figure II-14 Soudage au plasma.

II.8.1 Gaz utilisés : Pour effectuer une soudure, l'utilisation d'un gaz "plasmagène" tel que l'argon, l'hélium, ou des mélanges comme l'argon-hydrogène ou l'argon-hélium est nécessaire. Un autre gaz de protection, généralement composé d'un mélange d'argon et d'hydrogène, est également utilisé pour jouer un rôle similaire à celui du soudage TIG.

II.8.2 Domaines d'application :

Ce type de soudage à haute énergie est principalement utilisé en automatisation et permet de souder des pièces jusqu'à une épaisseur de 10 mm. En revanche, le soudage à basse énergie, tel que le "mini ou micro-plasma", est généralement réservé aux tôles fines, dont l'épaisseur varie entre 1/100 et 8/10 mm, et peut être réalisé soit manuellement, soit automatiquement. Lorsqu'il est nécessaire d'utiliser un métal d'apport, un dispositif de dévidage supplémentaire est requis. La plupart des matériaux soudables avec le procédé TIG peuvent être soudés avec une torche plasma, à l'exception de l'aluminium.

II.9 Soudage par faisceau d'électrons :

II.9.1 Principe du soudage par faisceau d'électrons :

Cette méthode implique l'utilisation d'un faisceau d'électrons dans un environnement sous vide (10^{-2} à 10^{-5} Pascal), dirigé vers le joint à souder. Lorsque les électrons entrent en contact avec les pièces, leur énergie cinétique se convertit en énergie thermique, induisant ainsi la fusion des matériaux (voir Figure II.15).

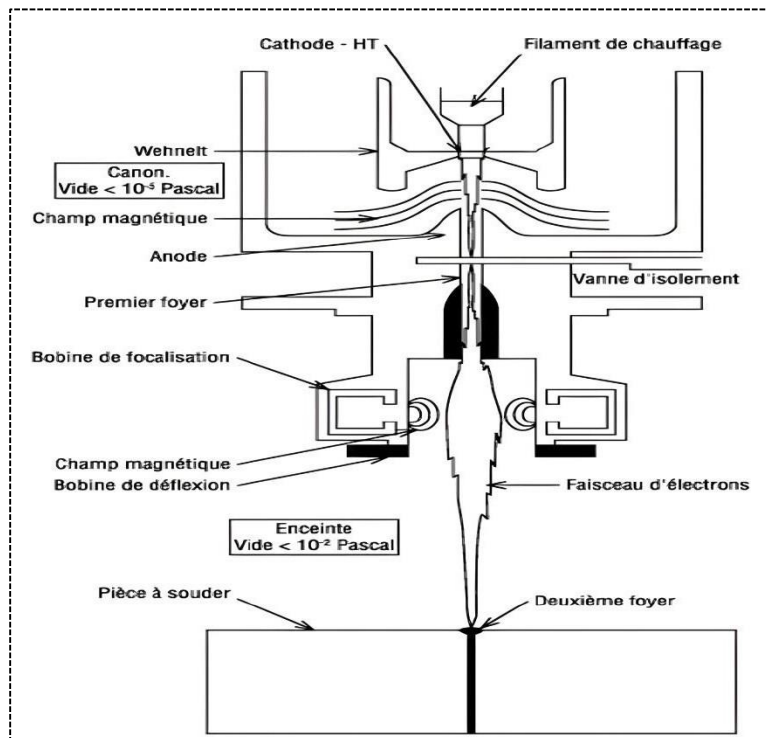


Figure II-15 Soudage par faisceau d'électrons – Schéma de principe.

Le vide maintenu dans les chambres de soudage garantit une qualité exceptionnelle des assemblages en favorisant l'élimination des gaz dissous dans le métal en fusion, ce qui empêche toute oxydation superficielle des métaux. La concentration très élevée d'énergie du faisceau d'électrons, oscillant entre 25 et 50 kW par mm, agit plus rapidement que la propagation de la chaleur à travers le métal, permettant ainsi d'obtenir des soudures avec des bords pratiquement parallèles et un rapport pénétration/largeur pouvant aller jusqu'à 40. Le métal fond sous l'effet de cette énergie, créant un passage qui se referme immédiatement derrière le faisceau grâce aux forces de tension superficielle. La zone affectée par la chaleur est réduite au minimum, ce qui limite les déformations.

II.9.2 Domaines d'application :

Ces caractéristiques rendent ce procédé applicable au soudage de pièces pré-usinées dans divers secteurs industriels tels que la mécanique, l'automobile, l'aéronautique et le nucléaire. Il convient à une plage d'épaisseurs allant de quelques centièmes de millimètres à environ 300 mm, et peut être utilisé pour quasiment tous les types de métaux, en particulier ceux sensibles à l'oxygène. De plus, il permet l'assemblage de plusieurs pièces différentes alignées les unes par rapport aux autres.

II.10 Soudage par faisceau laser :

II.10.1 Principe : Le soudage au laser, tout comme le soudage par faisceau d'électrons, est classé parmi les procédés de soudage qualifiés de « haute énergie » (voir Figure II.16).

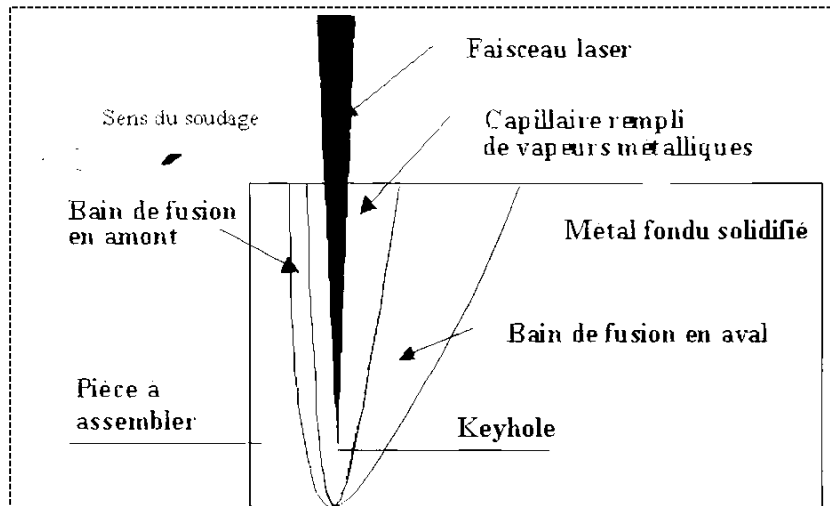


Figure II-16 Soudage par faisceau laser.

Tout comme le découpage laser, le soudage utilise une lumière monochromatique cohérente pour générer des densités d'énergie élevées, ce qui provoque la fusion ou la vaporisation localisée de la plupart des matériaux visés. Cela est réalisé en concentrant le faisceau lumineux à travers une lentille de focalisation. Cette concentration permet d'atteindre des densités de puissance dépassant le MW/cm² au point d'impact.

Contrairement aux méthodes conventionnelles, les procédés à haute énergie ne chauffent pas simplement la surface des matériaux à souder pour induire la fusion vers l'intérieur de la pièce. Au lieu de cela, ils tirent parti de la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques. Cette formation de capillaire permet un transfert direct de l'énergie au cœur du matériau, ce qui se traduit par des cordons de soudure plus profonds que larges.

II.10.2 Domaines d'application :

Ce procédé, résolument moderne, est largement adopté dans l'industrie, notamment en mode automatique, pour le soudage de pièces devant éviter les effets thermiques significatifs. En limitant les déformations et les modifications métallurgiques, il est idéal pour des pièces d'une épaisseur allant de 0,5 à 5 mm, et pour des puissances dépassant les 10 kW, adaptées à des épaisseurs supérieures à 10 mm.

II.11 Soudage par friction :

II.11.1 Principe : Le principe du soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation, en énergie calorifique produite par friction à l'interface des éléments à assembler (Figure II.17).

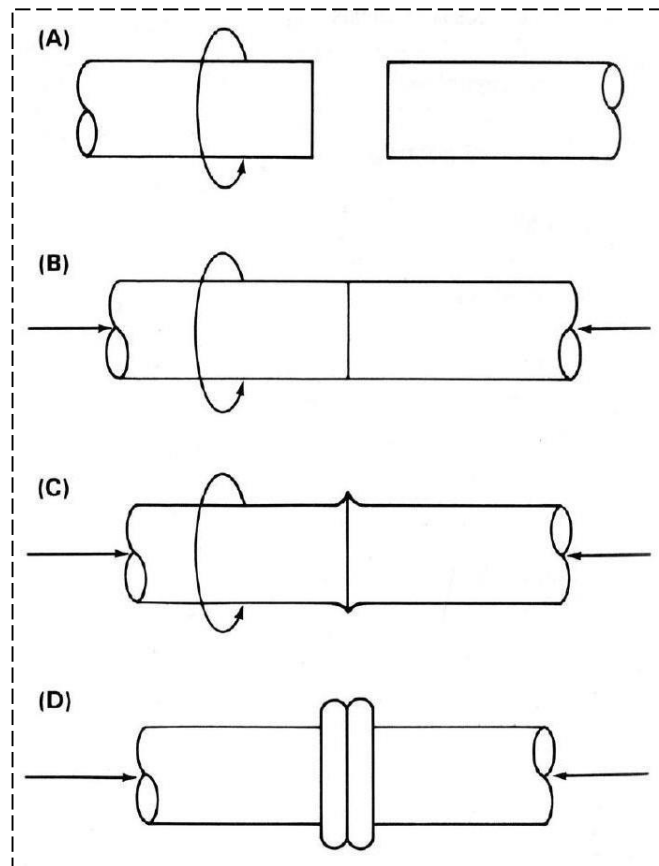


Figure II-17 Principe de soudage par friction.

Les pièces, souvent de forme cylindrique, sont pressées l'une contre l'autre et l'une d'entre elles est mise en rotation. Cette rotation crée du frottement à l'interface, générant ainsi la chaleur nécessaire au processus de soudage. Lorsque la zone de jonction atteint un état de plasticité suffisant sous l'effet de la chaleur, la rotation est interrompue et une force axiale est appliquée pour forger la liaison. Le cycle se déroule comme suit :

- a- Une des pièces est en rotation et l'autre est fixe.
- b- Les deux pièces sont mises en contact avec une pression axiale.
- c- La pression augmente et l'interface est amenée à l'état plastique.
- d- La rotation est arrêtée et on applique une pression supplémentaire de forgeage.
- e- Reste à enlever le bourrelet par tournage si nécessaire.

II.11.2 Application :

Les caractéristiques distinctives de ce mode de soudage, sans fusion ni dilution, offrent la possibilité d'assembler des matériaux métalliques qui posent des défis métallurgiques avec d'autres méthodes. Il est également le choix privilégié pour réaliser une soudure autogène de haute qualité.



CHAPITRE III :

La Métallurgie du soudage

Introduction : la métallurgie est une science ancienne qui a débuté lorsque nos ancêtres ont commencé à utiliser des outils en métal il y a des milliers d'années. Elle a parcouru un long chemin depuis que les hommes des cavernes ont découvert que lorsqu'on chauffait des pierres, des grumeaux sombres restaient dans le foyer. Ces grumeaux étaient durs et solides et ils ne savaient pas pourquoi - la magie noire était née. Aujourd'hui, les métallurgistes explorent les structures atomiques des métaux. La métallurgie du soudage est la dernière application de la métallurgie. [15]

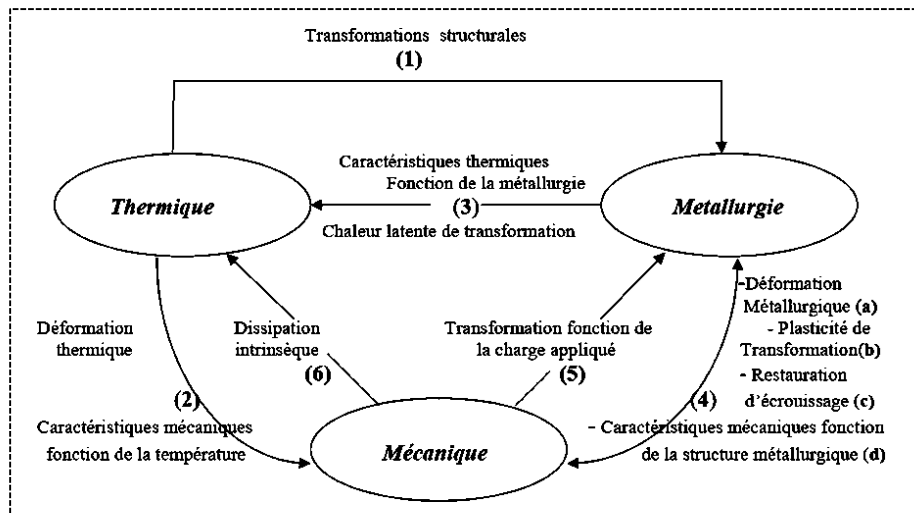


Figure III-1 Couplage thermo métallurgique et mécanique au cours d'une opération de soudage [15].

III.1. Aspect thermique du soudage : Le soudage, caractérisé par l'usage d'une source de chaleur, généralement mobile mais parfois fixe (comme dans le soudage par résistance), dont la nature et la puissance déterminent les possibilités pratiques d'utilisation, induit des montées en température rapides là où il est appliqué, souvent dépassant celles correspondant à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Ainsi, pour anticiper ou interpréter les effets métallurgiques du soudage, il est crucial de considérer la vitesse d'échauffement, surtout lors de la simulation du cycle thermique de soudage pour reproduire les structures résultantes.

La brièveté du séjour à la température maximale, qui avoisine souvent la température de fusion, accentue l'impact de l'échauffement rapide. Le gradient de température induit par la localisation de l'échauffement entraîne généralement une vitesse de refroidissement élevée, influencée non seulement par le procédé de soudage utilisé mais également par le mode opératoire pour son application. Par conséquent, toute analyse métallurgique des effets du soudage doit être précédée d'une étude thermique approfondie pour être éclairée. [16]

III.1.2. Cycle thermique du soudage mono passe : Le cycle thermique d'une opération de soudage à passage unique se caractérise par un chauffage rapide jusqu'à une température proche de celle de fusion, suivi d'une cinétique de refroidissement dépendante des paramètres opératoires :

- Energie de soudage
- T_e de procédé
- Epaisseur de la pièce

Pour définir la loi de refroidissement, divers paramètres peuvent être pris en compte :

- Vitesse moyenne = Vitesse à une température donnée : $(d\theta / dt)_{\theta} = \theta_1$
- Temps de passage entre deux températures : $\Delta t_{\theta_2\theta_1} = t_{\theta_1} - t_{\theta_2}$

Pour choisir un paramètre de refroidissement, il doit être indépendant de tout autre paramètre. (D'après

L'Institut de Soudure I R S I D) :

- Le temps écoulé entre 800 C° et 500C°
- Le temps écoulé entre 700 C° et 300C°

Ces deux paramètres de refroidissement influent sur la microstructure (voir Fig. III.2). Deux autres paramètres, à savoir la vitesse de refroidissement à partir de 300°C et le temps écoulé entre 300°C et 100°C, sont pris en compte par les Japonais pour évaluer les conditions d'hydrogénation des soudures, c'est-à-dire leur propension à la fissuration à froid. Ces deux paramètres reflètent les conditions de refroidissement dans la plage de transformation de l'austénite et permettent d'évaluer la ZAT (zone affectée thermiquement), où les fissures peuvent se former.

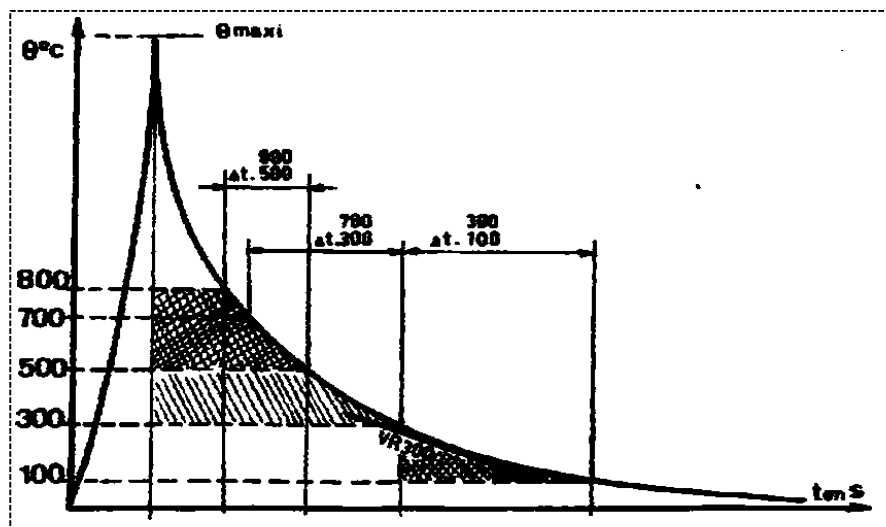


Figure III-2 Cycle thermique : cas du soudage mono passe. [17]

III.1.2. Cycle thermique du soudage multi passes : Au voisinage de la première passe on observe les cycles thermiques les plus sévères, par rapport à la température maximale atteinte et la rapidité du refroidissement. Les passes suivantes provoquent à cet endroit des cycles de plus en plus atténués. Lorsque le temps entre les passes est inférieur à une certaine valeur qui dépend des conditions de soudage, **Figure III.3** la température minimale au point A augmenté à chaque passe. Suivant la disposition des passes, une même température (exemple: dans les aciers) peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finalement observée en cette région est le résultat de la succession des cycles correspondants. Le dépôt d'une passe modifie la structure de la passe précédente (ou des passes précédentes), en produisant sur celle-ci un recuit ou un revenu de la structure. Voir **Figure III.4** représentant les modifications dues au cycle thermique pour le soudage multi passes.

Cette observation vaut aussi bien pour la ZAT que pour le métal fondu, lui aussi réchauffé et, s'il y a lieu, transformé au cours des passes successives. La notion de pré et post chauffage, qui concerne essentiellement la première et la dernière passe, doit être complétée par la notion de température entre passes. Cette température est définie comme étant la température atteinte au refroidissement par le métal déposé avant le dépôt de la passe suivante. Elle est à la fois température de préchauffage pour la passe suivante et température minimale du post-chauffage pour les passes précédentes. [18]

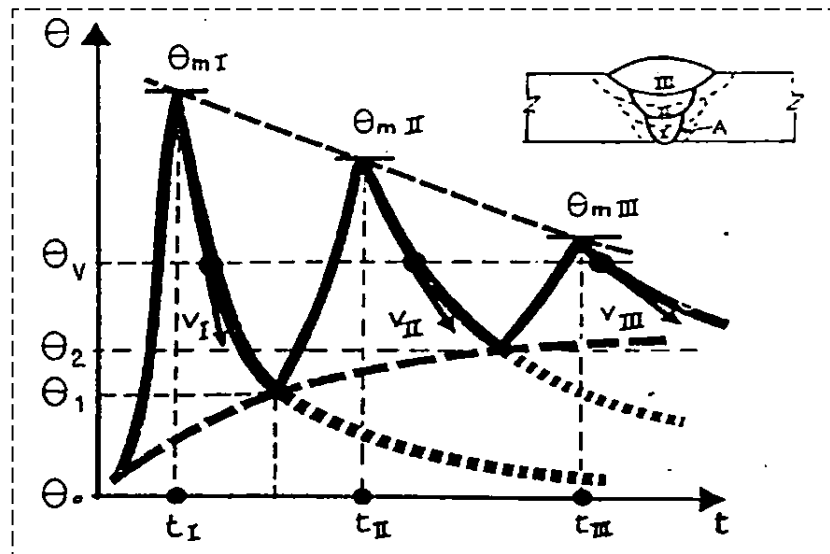


Figure III-3 Cycle thermique pour le soudage multi passes.

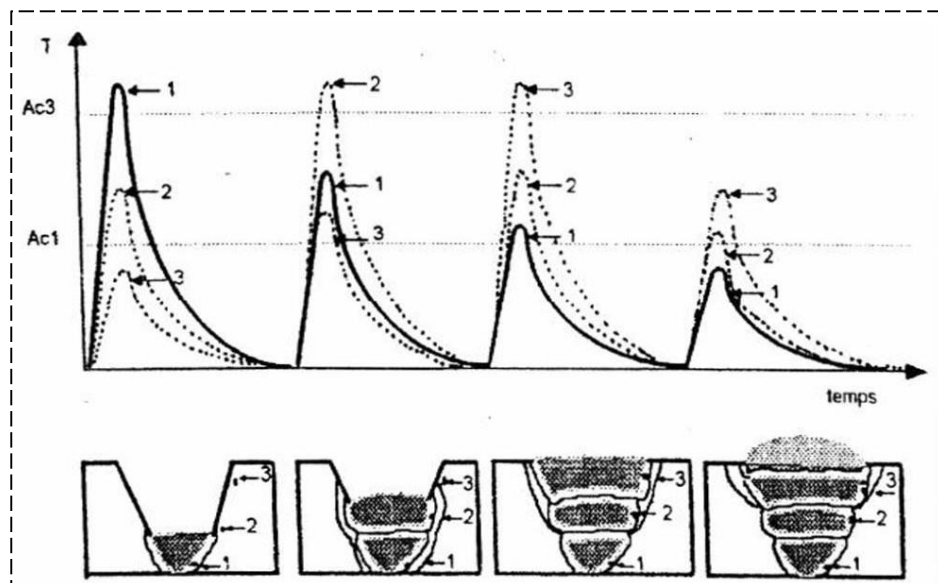


Figure III-4 Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.

III.1.3 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage : Au cours d'un cycle thermique de soudage, un acier inoxydable austénitique ne subira une transformation structurale que si sa température a dépassé 1100 °C environ. Les propriétés mécaniques de la zone soudée sont très fortement liées à la structure métallurgique obtenue après l'opération de soudage.

Le déplacement du volume thermique provoque, perpendiculairement à la ligne de fusion, des changements microstructuraux dans le métal de base. Ces modifications dépendent de la température maximale atteinte et de la cinétique de refroidissement en

ce point. On distingue dans une soudure d'acier. Inoxydable austénitique, après son retour à la température ambiante, et à partir de l'axe du cordon, successivement les zones suivantes. [19]

a. Zone fondue (ZF) : C'est le volume qu'occupe le métal fondu après solidification dans les soudures par fusion. [20] La zone fondue se solidifie à l'état austéno-ferritique ou totalement ferritique et sa transformation ferrite (δ) austénite n'est généralement pas complète par suite de la rapidité du refroidissement à haute température. Une certaine proportion de ferrite δ subsiste donc à la température ambiante.

Cette proportion est d'autant plus élevée que le refroidissement à haute température ($> 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$) a été plus rapide. Par suite des ségrégations issues de la solidification, cette ferrite δ est à la fois dans les espaces inter dendritiques et dans les axes des dendrites. L'austénite par ailleurs ne subit aucune transformation jusqu'à son retour à la température ambiante. [21] Le métal fondu au cours du soudage a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles d'un même métal élaboré d'une manière classique. Ceci est dû aux déformations importantes auxquelles il est soumis et au refroidissement rapide du joint soudé.

b. Zone affectée thermiquement (ZAT) : La zone affectée par la chaleur ou thermiquement, ZAC ou ZAT (appelée aussi, en anglais « Heat Affected Zone », est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur de soudage.[15] Dans cette zone affectée par la chaleur, il apparaît de très forts gradients de température qui évoluent rapidement dans le temps. On peut distinguer :

- **Zone de surchauffe :** C'est la partie de la ZAT la plus proche de la zone fondue, elle est appelée ZAT surchauffée ou ZAT de haute température, la température dans cette zone a dépassé $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ et le métal a subi plus ou moins partiellement la transformation austénite ferrite (δ) (La quantité de ferrite (δ) restant néanmoins toujours faible). La rapidité du refroidissement peut impliquer l'existence d'une certaine proportion de ferrite (δ). Cette zone devrait subir un grossissement exagéré des grains ce qui provoque une dégradation des propriétés mécaniques et ceci en fonction de la température et du temps de surchauffe. Mais il faut noter que l'existence d'une structure biphasée à haute température limite très sensiblement le grossissement des grains. [23]
- **Une partie voisine de la zone de surchauffe :** La température atteinte pendant ce cycle se situe généralement entre environ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dans cette plage, le métal subit un nouveau traitement d'hypertrempe et reste donc dans un état austénitique similaire à celui du métal de base.
- **Une partie enfin dont la température maximale :** A été comprise entre 500 et $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ et dans laquelle les carbures de chrome ont pu précipiter aux joints des grains d'austénite. Les transformations microstructurales dans la ZAT sont contrôlées par les procédures de soudages et les compositions chimiques des alliages. Pour une composition donnée, la microstructure de la ZAT est contrôlée en imposant des cycles

thermiques, des épaisseurs définies, et des températures d'interphases et de préchauffage.

Dans la ZAT surchauffée, pour certaines vitesses de refroidissement (ou de soudage), des réactions peuvent se produire telle que la formation des nitrures dans le cas où la formation de l'austénite est incomplète. Plus la vitesse de refroidissement sera lente, plus la transformation de la ferrite en austénite aura le temps de se réaliser. Pour des vitesses lentes, le risque de précipitation des carbures apparaîtra, les principaux facteurs qui contrôlent la précipitation sont : [24]

- La composition chimique de l'alliage.
 - Les conditions de préchauffage.
 - Le temps de maintien aux hautes températures, et le cycle thermique total.
- **Métal de base (MB)** : C'est le métal des pièces à assembler, ou la partie qui n'a pas été affecté par la chaleur de soudage. Les figures III.5 et III.6 représentent les différentes zones d'un cordon de soudure et la variation de dureté dans un joint soudé respectivement. [24]

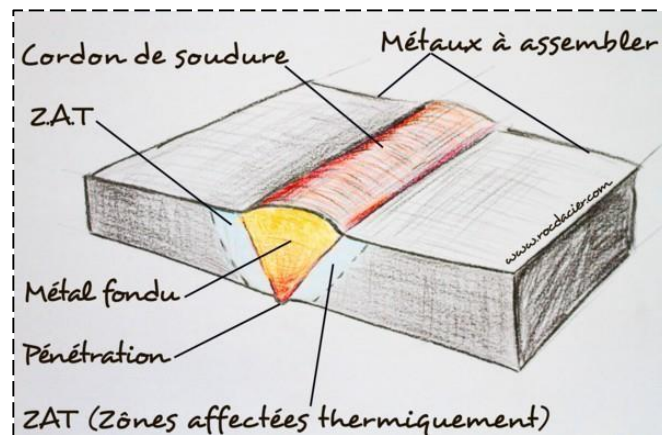


Figure III-5 Cordon de soudure.

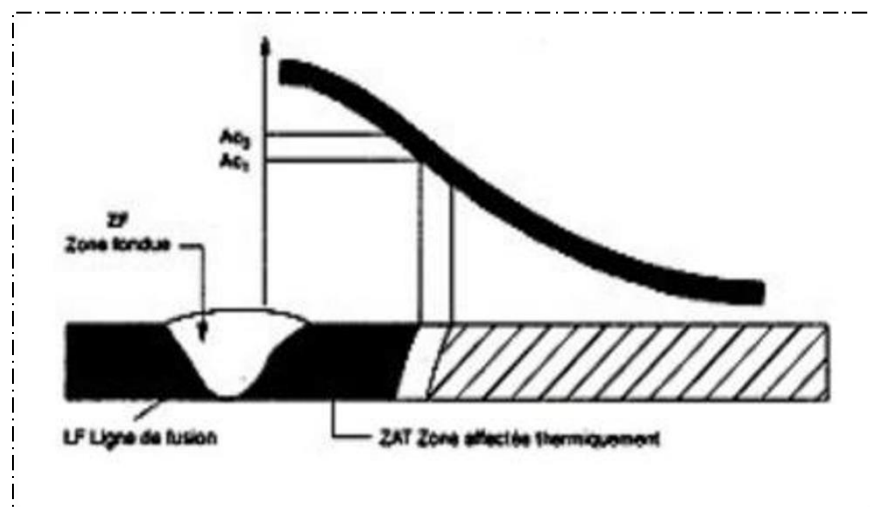


Figure III-6 Variation de la dureté dans un joint soudé.

III.2 Les défauts des soudages :

III.2.1 Les fissures : Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le Métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [25]

III.2.1.1 Fissure à chaud (ou de solidification) : Il s'agit d'une fissure généralement localisée au centre de la section transversale d'une soudure (qu'il s'agisse d'une soudure d'angle ou bout à bout), pouvant s'étendre en surface et se propager longitudinalement. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à haute température (voir Figure III.7).

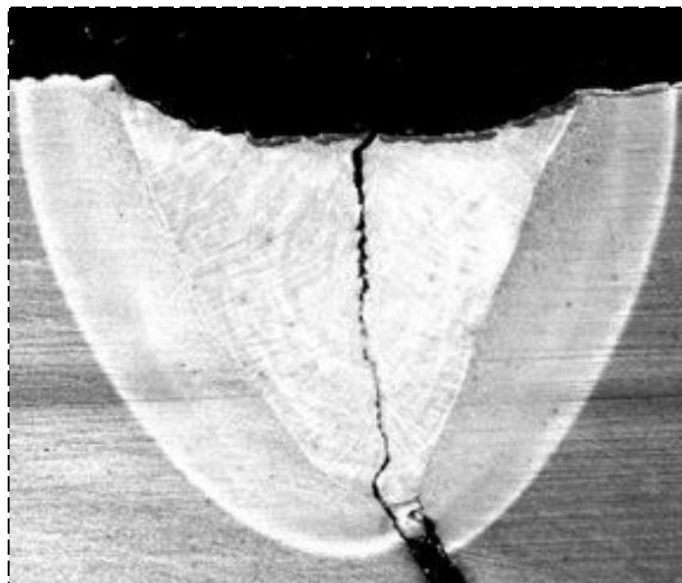


Figure III-7 Fissure à chaud (ou de solidification).

Causes possibles : Un retrait transversal excessif se produit principalement pour les cordons ayant un rapport profondeur/largeur supérieur à deux. Ce phénomène est courant dans les procédés à haute densité de courant comme le soudage sous flux et le soudage MAG.

- Une concentration élevée en carbone, phosphore ou soufre dans le métal de base peut entraîner la formation de fissures inter-dendritiques en raison

de la dilution entre le métal de base et le métal déposé. Les impuretés se logent là où la solidification se produit en dernier lieu, et les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (voir Figure III.8). Il est important de noter que la migration des impuretés augmente avec la température, ce qui constitue un effet indésirable du préchauffage.

- Un écartement excessif entre les pièces à assembler, notamment dans le cas des soudures d'angle.
- Les soudures d'angle présentant une concavité significative peuvent parfois manquer de résistance pour absorber les contraintes de retrait habituelles.
- Les transformations allotropiques désignent les changements de structure cristalline qui surviennent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier. Étant donné que ces transformations s'accompagnent de variations de volume et de solubilité de certains éléments, elles engendrent des tensions internes et peuvent conduire à la formation de composants fragiles.

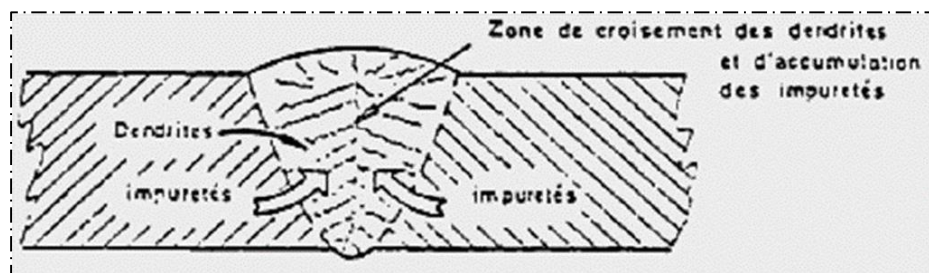


Figure III-8 Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

Méthodes de détection :

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage.
- Pour détecter les fissures internes, on effectue généralement un examen par ultrasons ou radiographie.

Méthode de réparation : Supprimer la partie défectueuse de la soudure jusqu'à 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure, puis procéder à une réparation par soudage.

Mesures préventives :

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0.05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.

III.2.1.2 Fissures à froid (fissures d'hydrogène) : Ce type de fissure se forme sous l'effet de contraintes dans le métal, généralement aux alentours de la température ambiante. Elles se situent habituellement dans des zones de transition avec une structure trempée et peuvent s'étendre jusqu'à la soudure elle-même. La diffusion de l'hydrogène joue souvent un rôle contributif. Parfois, ces fissures n'apparaissent que plusieurs heures après les travaux de soudage (voir Figure III.9).

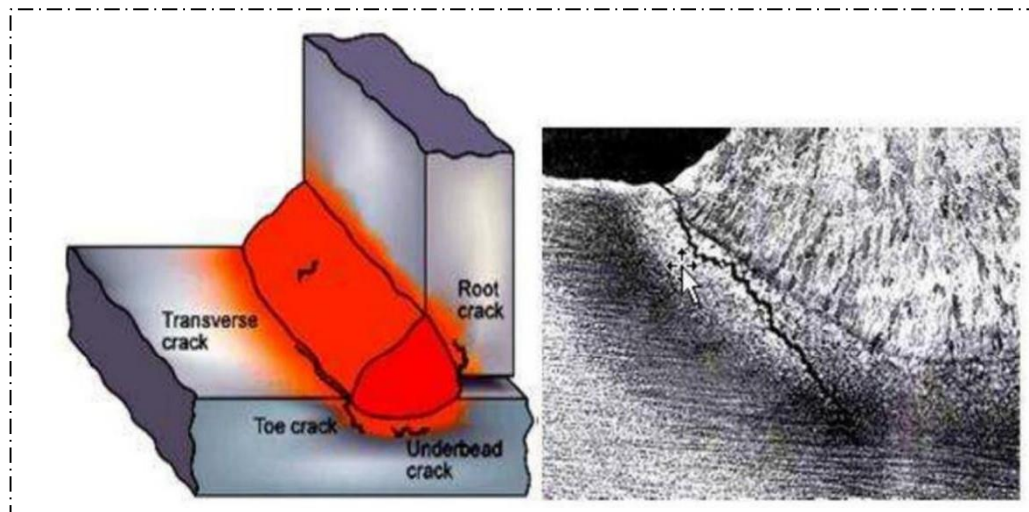


Figure III-9 Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

- **Causes possibles :** La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement, caractérisée par une structure trempée, est une source potentielle de fissuration. Les pores d'hydrogène présents ont une pression élevée, pouvant conduire à la formation de fissures. L'hydrogène peut provenir de l'humidité présente dans ou sur les produits de soudage, ainsi que d'autres contaminants tels que la peinture, l'huile ou les oxydes.

La probabilité de fissuration est également accrue avec l'augmentation du carbone équivalent et de l'épaisseur du matériau. De plus, de grands écarts, un faible régime thermique ou l'absence de préchauffage peuvent également être des facteurs contributifs.

a. Méthodes de détection :

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage.
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

- b. Méthode de réparation :** Pour remédier à la situation, il est recommandé de retirer la partie défectueuse de la soudure sur une distance de 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure, puis de procéder à une réparation par soudage. Chaque réparation doit être précédée d'un préchauffage adéquat et effectuée avec un apport calorifique approprié lors du soudage, afin de prévenir toute nouvelle fissuration.

Mesures préventives :

- Privilégier l'utilisation de produits de soudage à faible teneur en hydrogène. Assurez-vous de bien sécher les électrodes avant le soudage, en particulier celles avec un enrobage basique.
- En cas de préchauffage, assurez-vous de chauffer l'intégralité de la section à la température requise.
- Suivez rigoureusement la procédure qualifiée pour les aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.



CHAPITRE IV:
Partie expérimentale

Introduction :

Pour caractériser les assemblages soudés de manière exhaustive, plusieurs techniques expérimentales sont utilisées. Les étapes de soudage et les méthodes de caractérisation mécanique et métallurgique sont essentielles pour comprendre et améliorer la qualité des assemblages soudés, en particulier pour les nuances étudiées. Ceci est dans le but de maîtriser et d'améliorer la qualité et l'aspect des assemblages soudés par le procédé MIG (Metal Inert Gaz).

IV.1. Choix des matériaux :

IV.1.1. Présentation de l'Acier E36

L'acier E36 est un type d'acier utilisé principalement dans le domaine de la construction chaudronnée, notamment pour la fabrication de structures métalliques et de pièces soudées. Sa composition chimique typique et ses caractéristiques mécaniques en font un matériau privilégié pour des applications où la ductilité et la résistance sont cruciales.

IV.1.1.1. Composition chimique

Le tableau 4.1 représente la composition chimique de l'acier de base E36 selon la norme AFNOR standard.

Tableau 4.1 : *Composition chimique de l'acier E36*

Les éléments Chimiques	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	V	S	P	Al
Composition selon AFNOR	0,16	0,025	0,023	1,20	0,36	0,013	≤0,02	0,010	0,028	0,029

IV.1.1.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau 4.2 représente les caractéristiques mécaniques de l'acier de base E36 selon la norme AFNOR standard.

Tableau 4.2 : *Caractéristiques mécaniques de l'acier E36*

Nuance	Re min (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
E36	353	510-608	20

IV.1.2. Présentation de l'acier A60

L'acier A60 est un type d'acier de décolletage spécialement conçu pour une usinabilité optimale, grâce à l'ajout contrôlé de plomb et de soufre dans sa composition chimique. Cette composition particulière confère à l'acier A60 des propriétés mécaniques adaptées aux besoins de l'industrie horlogère, de l'automobile, de la construction mécanique, ainsi que d'autres applications nécessitant une haute précision et une bonne usinabilité.

IV.1.2.1. Composition chimique

Le tableau 4.3 représente la composition chimique de l'acier de base A60 selon la norme AFNOR standard.

Tableau 4.3: *Composition chimique de l'acier A60*

Les éléments chimiques	C	P	S	N	Fe
Composition selon AFNOR	0.1	0.045 max	0.045 max	0.014	Le reste

IV.1.2.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau 4.4 représente les caractéristiques mécaniques de l'acier de base A60 selon la norme AFNOR standard.

Tableau 4.4: *Caractéristiques mécaniques de l'acier A60*

Nuance	Re min (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
A60	334	588	15

IV.2. Présentation du métal d'apport

Les fils ER70S-6 sont en effet des choix populaires pour le soudage de l'acier peu allié sous protection gazeuse. Leur revêtement cuivré aide à assurer une conductivité électrique stable pendant le processus de soudage, tandis que leur résistance à la corrosion les rend adaptés à une variété d'environnements. De plus, leur capacité à produire des soudures de qualité avec peu de projections en fait des options fiables pour de nombreuses applications industrielles et artisanales.

IV.2.1. Composition chimique du métal d'apport ER70S-6 :

Le tableau 4.5 représente la composition chimique du métal d'apport selon la norme AFNOR

Tableau 4.5 : *Composition chimique du métal d'apport*

Matières des fils (%)	C	Mn	Si	P	S	Cu
	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035	≤0.50

IV.2.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport ER70S-6 :

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport ER70S-6 sont rassemblées dans le tableau ci dessous.

Tableau 4.6 : Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon AFNOR)

Emballage	Taille	Bobine de fils		Poids net
		φ0.8~1.6 (mm)	D100mm, D200mm, D270mm, D300mm, K300mm	
Facultés mécaniques du métal	Limite d'élasticité conventionnelle $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Résistance à la traction σ_b (Mpa)	Ratio d'étirage δ_5 (%)	Energie d'impact AKV (J)
	≥ 420	≥ 500	≥ 22	≥ 27 (-29)
Diamètre du fil (mm)	$\phi 1.2$			
Courant de soudage (AMP)	80 à 350			



Fig IV-1. Bobine de métal d'apport AWS: ER70S-6

IV.3 - Réalisation des maquettes de liaisons bimétalliques acier acier A60 /acier E36

IV.3.1 Préparation des plaquettes

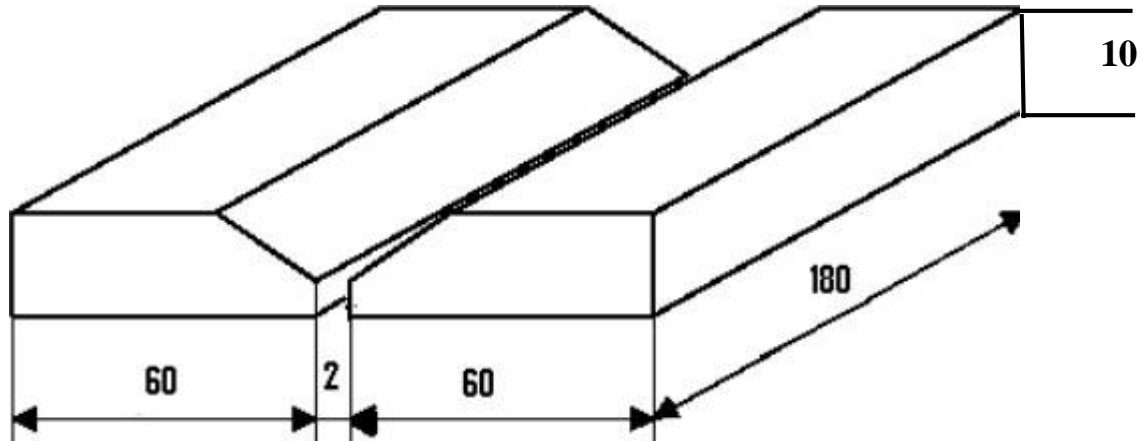


Fig IV.2 : Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier A60 et acier E36 sous forme de tôles de 10mm d'épaisseur.

IV.3.2. Soudage des plaquettes

Le soudage utilisé dans ce travail est du type soudage à l'arc sous protection de gaz inert avec fil électrode fusible de diamètre 1,2mm (métal d'apport).

Compte tenu de l'épaisseur des plaquettes (10 mm), la réalisation du joint soudé a nécessité un soudage multi passes avec l'utilisation des paramètres qui sont ceux de la fiche technique de l'entreprise.

Tableau 4.7 : paramètres de soudage

Les passes	Courant de soudage U (Volt)	Vitesse de défilement du fil (métal d'apport)
1 ^{er} passe (passe de Pénétration)	Tension U = 21.1Volts	V = 3.5 m/mn
2 ^{eme} passe	Tension U = 27 Volts	V = 5 m/mn
3 ^{eme} passe	Tension U = 28 Volts	V = 5.3 m/mn
4 ^{eme} passe	Tension U = 32.5 Volts	V = 6.5 m/mn



Fig IV.3 : Forme de la plaquette soudée

IV.3.3. Préparation des échantillons et éprouvettes :

Avant découpage des éprouvettes, un contrôle visuel des cordons de soudures est nécessaire pour localiser les éprouvettes d'essais.

Le cordon est considéré comme correct dès qu'une géométrie de joint correcte et régulière est obtenue et qu'aucune projection ne se produit sur l'assemblage. En effet, pour atteindre une bonne résistance le cordon doit présenter une géométrie n'introduisant pas de concentration de contrainte.

IV.2.1. Prélèvement et réalisation des éprouvettes :

Le découpage et usinage des éprouvettes a été effectué au niveau des ateliers d'usinage.

Les éprouvettes sont prélevées dans le sens transversal au cordon de soudure.



Figure IV.4 - Éprouvettes de microstructure

IV.4. Caractérisation métallographique :

Avant l'analyse de la microstructure Chaque échantillon subi les opérations suivantes :

- a- **Enrobage** : Enrobage des échantillons dans une résine thermodurcissable afin de mieux les manipuler durant l'opération de polissage. La figure montre une photo de l'enrobeuse de marque STRUERS utilisée.



Figure IV.05 : Enrobeuse

- b- **Polissage** : Le polissage est effectué à l'aide d'une polisseuse et a pour but d'éliminer l'irrégularité de surface et donne une surface plus ou moins lisse, La polisseuse utilisée est montrée dans le figure IV-6

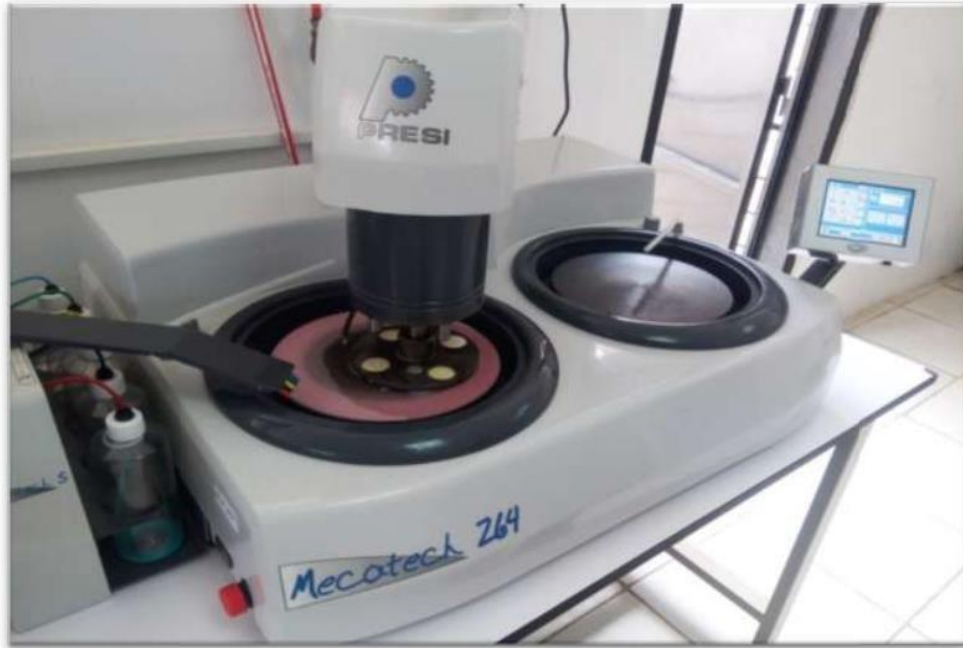


Fig IV. 6 : Polisseuse

Le polissage a été fait en deux étapes :

b.1. Pré polissage : Il a été fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fins. Le polissage est fait sous eau (ou avec arrosage) pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon.

Granulométries du papier abrasif utilisé : 280-400-600-800 1000-1200-2800. Une durée de polissage que l'on peut estimer 5 minutes par granulométrie.

b.2. Polissage de finition : afin de donner à nos échantillons un effet miroir, on utilise une polisseuse de finition avec une poudre alumine.

C- Attaque chimique : on a deux différentes sorte d'attaque chimique qui sont :

- Attaque chimique des soudures homogène A106/A106 la solution chimique est la suivante, le natal (HNO_3).
- Attaque électrolytique de soudure homogène duplex / duplex.

Cette attaque est réalisée à température ambiante avec des durées allant de 60 à 90s sous une tension de 4.5V dans un bain contenant de (NaOH).

IV.3.5. Microscopie optique :

L'appareillage utilisé pour l'acquisition des images est un microscope optique équipé d'une caméra numérique reliée à un micro-ordinateur, équipée d'un logiciel installé pour l'acquisition et le traitement des images.

Pour l'observation de l'évolution de la microstructure après chaque réparation dans la ZAT, la zone fondue (ZF), la zone de liaison (ZL) et le métal de base (MB), nous avons fait un balayage de ces zones à trois niveaux parallèles équidistants, en commençant par le plus faible grossissement, tel que 100X, suivi progressivement par de plus élevés pour évaluer les caractéristiques de base de la microstructure

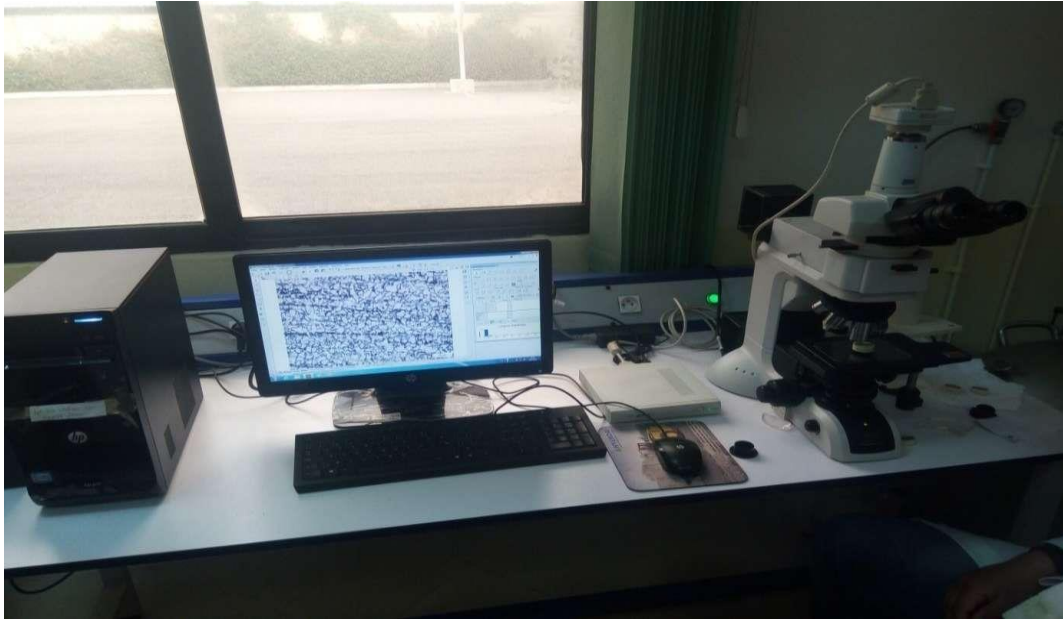


Figure IV.7: Microscope optique

IV.4. Observation métallographique :

L'observation métallographique est une technique utilisée en métallographie pour étudier la structure interne des métaux et des alliages. Elle implique généralement la préparation d'échantillons métalliques, suivie de leur observation sous un microscope optique ou électronique. Cette méthode permet d'analyser la microstructure du matériau, y compris la taille des grains, la distribution des phases, les défauts de structure, etc. Les informations obtenues grâce à l'observation métallographique sont cruciales pour comprendre les propriétés physiques et mécaniques.

IV.4.1. Examen au microscope optique :

IV.4.1.1. Examen du métal de base :

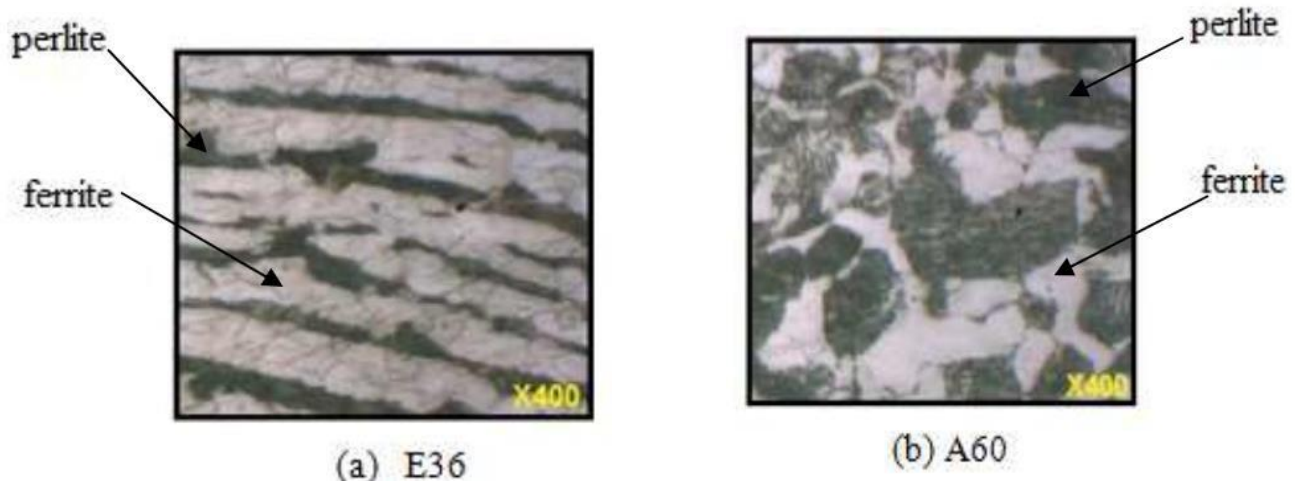


Fig- IV.8 – Microstructure des métaux de base E36 et A60

Les aciers E36 et A60 sont des matériaux couramment utilisés en construction mécanique, chacun ayant des caractéristiques spécifiques qui les rendent appropriés pour des usages généraux.

Microstructure de l'acier E36

L'acier E36 présente une microstructure ferrito-perlitique avec une faible proportion de grains perlitiques alignés en bandes, en raison de sa faible teneur en carbone. Cette orientation des grains dans le sens du laminage est typique des aciers faiblement carbonés et contribue à leurs propriétés mécaniques, notamment la ductilité et la résistance à la traction.

Microstructure de l'acier A60

L'acier A60, quant à lui, présente une microstructure classique ferrito-perlitique, caractérisée par des grains de ferrite α (en blanc sur la micrographie). Et des colonies de perlite, composées de ferrite et de carbure de fer (Fe_3C), apparaissant en noir.

- **Grains de ferrite α** : Ces grains apparaissent en blanc sur la micrographie. La ferrite α est une phase de fer pur avec une faible teneur en carbone, conférant une bonne ductilité à l'acier.
- **Colonies de perlite** : Ces zones noires représentent un mélange de ferrite et de carbure de fer, formant une structure lamellaire typique de la perlite. La perlite contribue à la dureté et à la résistance mécanique de l'acier.
- **Microstructure** : Les deux aciers présentent une microstructure ferrito-perlitique, mais l'acier A60 a des grains de ferrite α polyédriques et des colonies de perlite bien définies, typiques des aciers avec une teneur en carbone plus élevée que l'acier E36.

IV.4.1.2. Examen de la zone affectée thermiquement :

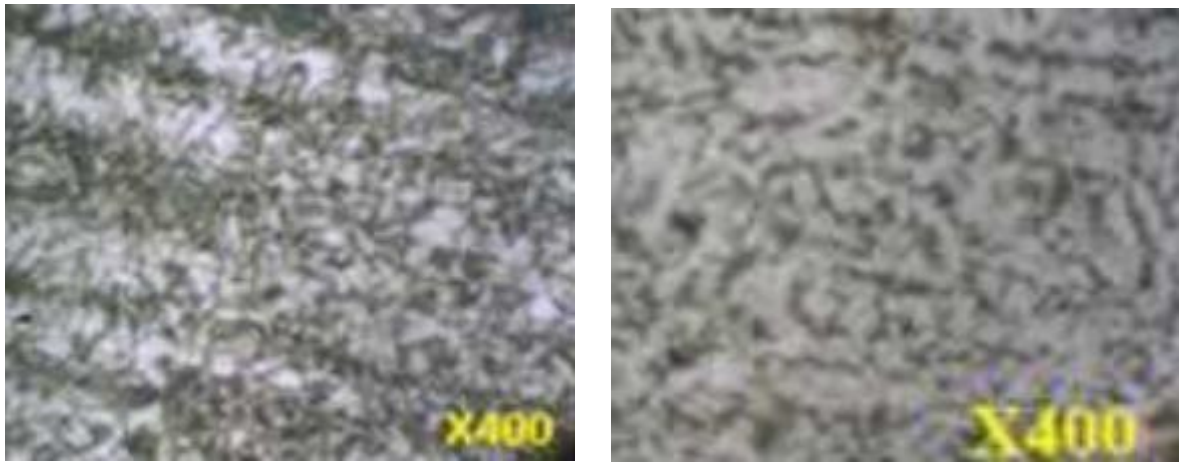


Fig- IV.8 – Microstructure de la zone affectée pour l'acier E36

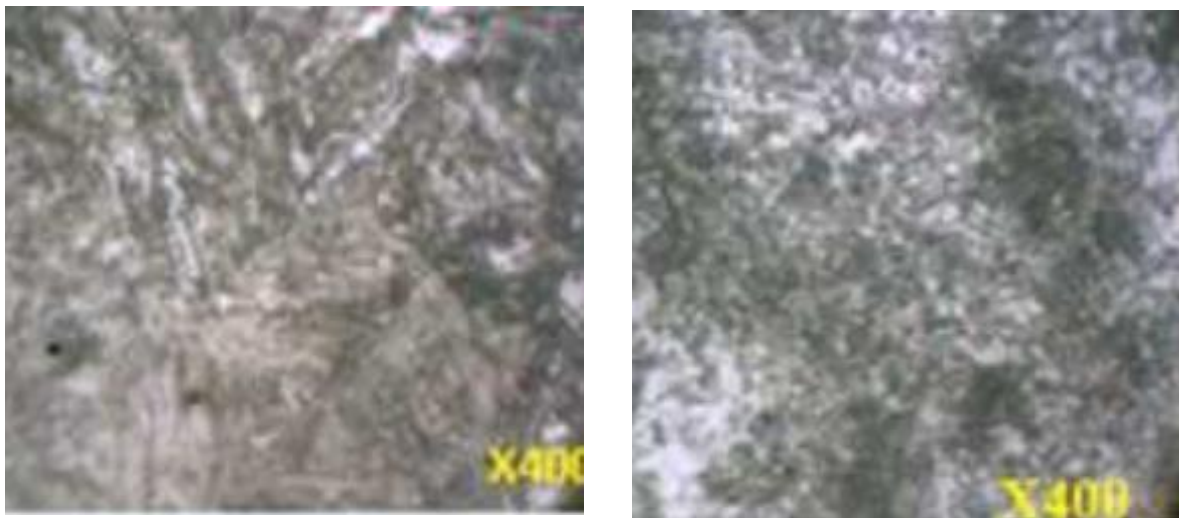


Fig- IV.9 – Microstructure de la zone affectée pour l'acier A60

Lors de la transformation structurale due à la soudure, les zones affectées thermiquement (ZAT) des métaux subissent des changements significatifs dans leur microstructure.

Dans la ZAT de l'acier A60

La zone affectée thermiquement de l'acier A60 montre une structure principalement martensitique. La martensite est une phase dure et fragile formée par la transformation rapide de l'austénite (à haute température) lors du refroidissement rapide, typique des aciers à haute teneur en carbone.

En plus de la martensite dominante, de petits grains de bainite apparaissent. La bainite est une phase qui se forme à des températures intermédiaires, entre celles de la perlite et de la martensite, et elle est moins dure que la martensite mais plus dure que la perlite.

Avec l'augmentation de l'énergie de soudage, le taux de martensite diminue légèrement, ce qui favorise l'apparition de plus de bainite. Cela s'explique par un refroidissement moins rapide, permettant à la bainite de se former avant que l'acier ne se transforme en martensite.

Dans la ZAT de l'acier E36

La ZAT de l'acier E36 présente principalement une structure bainitique. Cela est dû à la plus faible teneur en carbone de l'acier E36, qui favorise la formation de bainite plutôt que de martensite lors du refroidissement après soudure. Des îlots de martensite sont présents dans la structure bainitique. La martensite dans l'acier E36 est moins dominante en raison de la teneur en carbone plus faible, mais elle apparaît dans les régions où le refroidissement est le plus rapide. Au centre de la ZAT, la structure est un mélange de martensite et de bainite, reflétant des variations de température et de vitesse de refroidissement dans cette zone.

Avec l'augmentation de l'énergie de soudage, la structure reste principalement bainitique. Cependant, dans la zone centrale, la structure montre des aspects bainitiques avec l'apparition de la ferrite. La ferrite, une phase ductile, se forme à des températures plus basses ou lors de refroidissements plus lents, ce qui peut se produire avec une énergie de soudage plus élevée.

La différence majeure entre les aciers A60 et E36 dans leurs transformations structurelles réside dans leur teneur en carbone. L'acier A60, avec une teneur plus élevée en carbone, a tendance à former plus de martensite, tandis que l'acier E36, avec moins de carbone, favorise la formation de bainite. Une énergie de soudage plus élevée entraîne un refroidissement plus lent, ce qui diminue la formation de martensite et favorise la formation de phases plus ductiles comme la bainite et la ferrite. La présence de martensite dans les ZAT des deux aciers augmente la dureté mais peut diminuer la ductilité, tandis que la bainite offre un bon compromis entre dureté et ductilité. L'apparition de ferrite dans l'acier E36 à haute énergie de soudage pourrait améliorer la ductilité à certaines zones.

En conclusion, la microstructure des ZAT des aciers A60 et E36 varie considérablement en fonction de la teneur en carbone et de l'énergie de soudage, influençant ainsi les propriétés mécaniques des matériaux après soudure.

IV.4.1.3. Examen de la zone Fondue :



Fig- IV.10 – Zone Fondue pour l'acier E36



Fig- IV.11 – Zone Fondue pour l'acier A6

La ZF est caractérisée par des grains colonnaires, formés lors de la solidification du métal fondu. Ces grains sont allongés dans la direction du gradient thermique le plus fort, généralement perpendiculairement à la ligne de fusion. Les grains colonnaires résultent de la croissance dirigée du front de solidification. Cette croissance est contrôlée par le gradient thermique et la vitesse de solidification.

En raison de sa teneur plus élevée en carbone, l'acier A60 peut présenter une proportion plus élevée de dendrites d'austénite. La présence de carbone favorise la formation de phases dures comme la martensite si le refroidissement est rapide après solidification. Avec une teneur en carbone plus faible, l'acier E36 peut montrer une plus grande proportion de ferrite colonnaire dans la ZF. La formation d'austénite dendritique est moins prononcée, et la transformation ultérieure peut inclure davantage de bainite en raison de la composition chimique.

La ZF des aciers A60 et E36 présente des caractéristiques microstructurales distinctes, avec des grains colonnaires de ferrite et des dendrites d'austénite formées lors de la solidification. La teneur en carbone et les paramètres de soudage influencent fortement ces microstructures, affectant ainsi les propriétés mécaniques finales des soudures.

IV.4.1.4. Examen de la zone de liaison :

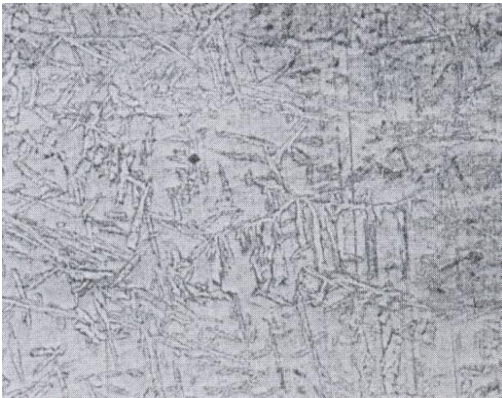


Fig- IV.12 – Zone de liaison pour l'acier E36



Fig- IV.13 – Zone de liaison pour l'acier A60

Lors du soudage, la zone surchauffée (ZL) se trouve entre la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT). Elle subit des températures élevées mais ne fond pas complètement. Cette zone est cruciale car elle subit des transformations microstructurales importantes en raison des gradients thermiques élevés.

La ZL de l'acier E36 est caractérisée par une densité relativement faible de grains austénitiques comparée à la ZF et la ZAT. Cette différence est due au gradient thermique élevé dans cette zone, entraînant des transformations rapides.

Pendant le chauffage, l'acier E36 dans la ZL subit une transformation complète en ferrite. La ferrite se forme parce que l'acier E36, avec sa faible teneur en carbone, favorise la formation de cette phase à haute température. Lors du refroidissement, les grains d'austénite peuvent se reformer en fonction des conditions de refroidissement, mais leur densité reste faible en raison de la rapide montée en température et du refroidissement ultérieur.

Dans la ZL de l'acier A60, on observe la présence de grains de grande taille à côté de grains plus fins. Cette variation de taille de grain indique une surchauffe importante de cette zone pendant le soudage. La surchauffe entraîne une croissance des grains en raison de la diffusion accrue à haute température. Les grains de grande taille se forment dans les zones où la température a été la plus élevée et le temps de maintien à cette température a été suffisamment long pour permettre une croissance significative des grains. Les grains plus fins peuvent se former lors du refroidissement rapide, où la recristallisation et la nucléation de nouveaux grains peuvent se produire.

En conclusion, la ZL des aciers E36 et A60 montre des transformations microstructurales distinctes en raison des différences de teneur en carbone et des gradients thermiques élevés. Ces transformations influencent directement les propriétés mécaniques des matériaux après le soudage, affectant la performance globale des joints soudés.

CONCLUSION GENERALE :

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs observations clés peuvent être faites concernant la soudabilité et les transformations microstructurales des aciers A60 et E36 lors du soudage :

- L'acier A60 présente des défis significatifs en termes de soudabilité en raison de sa teneur élevée en carbone. Cela conduit à une formation accrue de phases dures et fragiles telles que la martensite, rendant difficile l'obtention de soudures de haute qualité.
- La présence de martensite augmente la dureté de la ZAT, mais diminue la ténacité et augmente le risque de fissuration à froid.
- **Trois zones distinctes :**
 - Les assemblages soudés sont constitués de trois zones hétérogènes : la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone fondue (ZF) et le métal de base.
 - La ZAT est la plus sensible en raison de la transformation des grains sous l'effet des températures élevées.

Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

Microscopie et Phases Observées

- **Microstructure de la ZAT :**
 - La microscopie révèle que la ZAT de l'acier A60 est principalement martensitique, indiquant une transformation rapide et des conditions de refroidissement sévères.
 - La ZAT de l'acier E36 présente une structure principalement bainitique avec des îlots de martensite, résultant en une combinaison équilibrée de dureté et de ductilité.
- **Changements métallurgiques :**
 - Le soudage multipasses peut provoquer des changements significatifs dans la structure métallurgique et les propriétés mécaniques le long du joint soudé.
 - Ces changements sont principalement dus aux cycles thermiques répétitifs du soudage, qui peuvent affecter la taille des grains, la formation de phases et les tensions résiduelles dans le matériau.

Les observations indiquent clairement que la soudabilité de l'acier A60 est plus difficile en raison de sa teneur élevée en carbone, ce qui entraîne la formation de martensite dure et fragile dans la ZAT. En comparaison, l'acier E36, avec sa teneur en carbone plus faible, présente une meilleure soudabilité, montrant principalement des structures bainitiques dans la ZAT avec une combinaison favorable de dureté et de ductilité. Les cycles thermiques induits par le soudage, en particulier lors du soudage multipasses, jouent un rôle crucial dans les transformations microstructurales et les propriétés mécaniques des zones soudées, soulignant l'importance de contrôler les paramètres de soudage pour optimiser la qualité des soudures.

Références bibliographiques

- [1] A. ROOS, «Précis De Métallurgie Appliquée». Edition Technisa Documentation Lavoisier (1982).
- [2] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.. extrait de mémoire (Etude mécanique et microstructurale de structure En acier ordinaire E36 soudée par 2 types de soudage (MIG et électrode enrobée), MEMOIRE DE FIN D'ETUDE 2021 . university of Msila
- [3] Christine BRASSINE Laboratoire 1 : Article Métallographie page 39 à 42.
- [4] Guy Murry, 2004, Aide Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris.
- [5] M. Wiest, E.Kassa, W.Davas, J.C.O Nielsen and H.Ossberger :assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact.wear.
- [6] Recuit: <https://www.ats-ffa.org/traitements-thermiques/>.
- [7] Licence professionnelle - Génie Civil et construction - Pr. M. KADDAMI – FSTS page 97 à 103.
- [8] AUTEUR Caroline Godin, ing, livre (guide multi prévention soudage-coupage).
- [9] Auteur klas weman, livre procédés de soudage, Dunod page 15.
- [10] Article technique : <https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-brasage-et-le-soudage-la-flamme-oxyacetylenique-341/>.
- [11] Article technique: <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-l-arc-e-e-mma-smaw-111-263/>.
- [12] Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG,MIG,MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- [13] R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOÛT1995.
- [14] article documentaire "Le soudage des aciers de construction".
- [15] CAVALLO Nathalie "contribution a la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors.
- [16] H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995. Granjon, H. (1995). Bases métallurgiques de soudage>>. 2ème édition. Publication du soudage et de ses applications. Paris.
- [17] W.Kurz, J.P.Mercier, Introduction à la science des Matériaux, 1991
- [18] [12/25] Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spéculs, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009)
- [19] C.LEYMONIE, R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970 P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988
- H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [20] R. VARISELLAZ. Soudage élément de conception et de réalisation, Dunda 1987.
- [21] P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988 H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [22] Ramoulât, Thèse de Doctorat, ENSAM. Paris, (2007).
- [23] M. Beltsy, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Ellipses, (2006-2007). H.Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Bejaia, (2006).

[24] Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spécules, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009), extrait de mémoire (Etude mécanique et microstructurale de structure En acier ordinaire E36 soudée par 2 types de soudage (MIG et électrode enrobée), memoire de fin d'étude 2021 . université de Msila .

[25] : H.Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Bejaïa, (2006). [12/25]

Cabris et V. Pierre, Granularité laser et interférence de spécules, Bulletin
Del'UniondesPhysiciensN°101,p.1101-1121,(20

