

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Sciences des matériaux

Caractérisation de l'impact de la structure soudée sur
les propriétés mécaniques d'un acier inoxydable austénitique

Par

ABADA Mourad

:

Devant le jury composé de :

Pr M. HADJI	Professeur,	U. de Blida	Président
M. ZERGOUG	Maître de Recherche,	CSC 'Chéraga'	Examineur
Pr M.BOUABDALLAH	Professeur,	E.N.P	Rapporteur
B.BOUYOUSFI	Chargé de cours,	U. de Blida	Co-rapporteur

Blida, Juin 2008

Résumé

Les aciers inoxydables, de part leur stabilité structurale et résistance à la dégradation sous l'action des milieux corrosifs trouvent des applications de plus en plus variées. Dans ce travail, on se propose de réaliser des soudures en TIG sous trois différentes formes c'est-à-dire sans apport de métal, avec métal d'apport TGX et avec métal d'apport baguette 304 L pour deux types d'épaisseurs (1mm et 1,5mm).

Les essais mécaniques de traction, dureté ainsi que l'observation métallographique des différentes zones de soudures en acier 304L, ont montrées de façon plus claire l'influence des paramètres de soudage sur les propriétés mécanique des aciers inoxydables austénique en particulier la limite élastique, la charge à la rupture et l'allongement jusqu'à la rupture.

Abstract

The rust proof steels, of leaves their structural stability and resistance to the determination under a corrosifs filed action, find applications more and more vary. In this work, we propose to realise a TIG welding under three differents types such as, without metal of contribution, metal contribution 304L, and metal of contribution stick 304L, with of two types of thickness (1mm, 1,5mm) of the rust proof steel.

The traction mechanical test and metallographic observation for differents welding zones on 304L showed way clearer the influence of parameters of welding over the mechanical proprieties of steel rust proof austenities in particular the elastic limit, the load rupture the elongation to the rupture.

Mots clés : acier inoxydable austénitique, soudage TIG, traction et déformation, ...

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier infiniment mon dieu tout puissant pour l'aide qu'il m'a apporté pour la réalisation de ce modeste travail. Je remercie mes parents pour le courage et le soutien morale.

Je remercie Monsieur M. Bouabdallah professeur à l'ENP d'Alger, sans qui je n'aurais pu mener à bien mon mémoire dans des meilleures conditions. Je le remercie une autre fois pour m'avoir honoré en acceptant d'être mon rapporteur.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur B. Bouyousfi, chargé de cours à l'Université Saad Dahleb de Blida, qui, en me proposant cette étude, m'a accordé sa confiance. Grâce à son dynamisme et son sérieux, a rendu ce travail fort agréable. Je le remercie pour son soutien et pour m'avoir fait profiter de son expérience et de sa grande compétence. J'ignore comment vous exprimer ma profonde reconnaissance, j'espère que cette étude en sera la preuve.

Je suis honorée de la présence au titre de président de jury de Monsieur M. Hadji, professeur à l'Université Saad Dahleb de Blida.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur Y. Benkedda, Professeur à l'Université de Blida, pour m'avoir honoré en acceptant d'examiner ce travail.

Je remercie également Monsieur, M.Zergoug, maître de recherche au CSC de Chéraga, et Monsieur, A. Brahimi, chargé de cours à l'Université Saad Dahleb de Blida, pour avoir accepté de critiquer mon travail et d'avoir bien voulu participer au jury.

Enfin, et sans oublier, un grand merci à ma chère épouse pour le soutien et le réconfort qu'elle m'a apportés, ainsi qu'à mes deux filles Mayssa et Nour – el - Houda

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Diagramme d'équilibre Fer – Chrome	11
Figure 1.2	Le détail de la boucle γ	12
Figure 1.3	l'influence du Ni sur la boucle γ	12
Figure 1.4	Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome à des températures inférieures à 850C.....	13
Figure 2.1	Classification des procédés de soudage.....	22
Figure 2.2	Sources thermiques et densité.....	23
Figure 2.3	Zone affectée thermiquement d'un cordon de soudure.....	25
Figure 2.4	Procédé de soudage en T I G.....	27
Figure 2.5	La torche de soudage.....	27
Figure 2.6	Présentation schématique de la torche double flux.....	33
Figure 2.7	Comparaison entre une torche et une torche plasma.....	33
Figure 2.8	Comparaison entre l'arc TIG et le jet plasma.....	34
Figure 2.9	Vue schématique du keyhole en soudage plasma.....	35
Figure 2.10	Procédé de soudage en M.I.G/MAG	38
Figure 3.1	Micrographie du métal de base	41
Figure 3.2	Présentation des tôles avant et après soudage	43
Figure 3.3	Principe de fonctionnement d'une machine de traction	44
Figure 3.4	Diagramme conventionnel de traction	44
Figure 3.5	Dimensions de l'éprouvette utilisée à la traction	45
Figure 3.6	Visualisation des grilles pendant la déformation	46
Figure 3.7	Vue de l'échantillon d'examen après polissage et enrobage	48
Figure 3.8	Attaque chimique électrolytique	49
Figure 3.9	Représentation schématique de l'essai de Vickers	50
Figure 3.10	Profil de micro dureté	51
Figure 4.1	Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I= 38A e=1.5 mm	54
Figure 4.2	Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I= 48A e=1.5 mm	54
Figure 4.3	Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I= 58A e=1.5 mm	55
Figure 4.4	Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I= 60A e=1.5 mm	55
Figure 4.5	Micrographie d'une éprouvette horizontale I=58 A e=1.5mm	56
Figure 4.6	Zone fondue d'une éprouvette V soudée à I= 60A e=1.5 mm	56

Figure 4.7	Représentation des trois zones d'un cordon de soudure	57
Figure 4.8	Vue de l'échantillon d'examen après polissage et enrobage.....	58
Figure 4.9	Profil de micro - dureté pour I= 38 A	58
Figure 4.10	Profil de micro - dureté pour I= 48 A	59
Figure 4.11	Profil de micro - dureté pour I= 58 A	59
Figure 4.12	Profil de micro - dureté pour I= 60 A	60
Figure 4.13	Représentation de la micro – dureté dans les trois zones	61
Figure 4.14	Courbe de rupture par traction d'une éprouvette non soudée pour e =1,5 mm	62
Figure 4.15	Courbe de rupture par traction d'une éprouvette soudée pour e =1,5 mm	62
Figure 4.16	Éprouvette soudée déformée à 27%	64
Figure 4.17	Variation de la déformation en fonction de la position x	64
Tableau 1.1	Propriétés mécaniques des aciers inoxydables	20
Tableau 2.1	Critère visuel d'oxydation.....	24
Tableau 2.2	Constantes physiques importantes des gaz de soudage	30
Tableau 2.3	Paramètres opératoires typiques en soudage plasma	37
Tableau 3.1	Composition chimique du métal de base 304L.....	40
Tableau 3.2	Caractéristique mécanique du 304L.....	40
Tableau 3.3	Composition chimique du métal d'apport.....	42
Tableau 3.4	Désignation et composition de la solution d'attaque électrolytique	49
Tableau 4.1	Les valeurs d'intensités de courant choisis	53
Tableau 4.2	Dimensions de la ZA et ZF	57
Tableau 4.3	Caractéristiques des éprouvettes à l'essai de traction	63
Tableau 4.5	Variation de déformation élémentaire d'une éprouvette soudée déformée à 27%	65

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	5
INTRODUCTION	8
1. PROPRIETES GENERALES DES ACIERS INOXYDABLES.....	11
1.1. Introduction	11
1.2. Système fer chrome et ses dérivés.....	12
1.2.1. Système fer chrome	12
1.2.2. Système fer chrome nickel	13
1.3. Les différentes familles des aciers inoxydables	14
1.3.1. Les aciers inoxydables martensitiques	15
1.3.2. Les aciers inoxydables ferritiques	16
1.3.3. Les aciers inoxydables austénitiques	17
1.3.4. Les aciers inoxydables austéno-ferritique	19
1.4. Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables.....	20
1.5. Propriétés mécaniques des aciers inoxydables	21
2. GENERALITES SUR LE SOUDAGE	22
2.1. Introduction	22
2.2. Les différentes techniques de soudage	23
2.3. Principaux procédés de soudage à l'arc	24
2.4. Evaluation de la qualité d'une soudure	25
2.5. Caractéristiques métallurgiques des soudures	26
2.5.1. Zone affectée thermiquement	26
2.6. Soudage à électrode réfractaire T I G	27
2.6.1. Les électrodes	29
2.6.2. Le gaz d'assistance	29
2.6.3. Les gaz de protection.....	30
2.7. Avantages et inconvénients du soudage TIG	31
2.8 Alternatives au soudage TIG	33
2.8.1. La torche double flux	33
2.8.2. Le soudage plasma	34
2.8.3. Le procédé MIG	38
2.9. Les procédés utilisés pour le soudage des aciers inoxydables	39

3. TECHNIQUES EXPERIMENTALES	41
3.1. Introduction	41
3.2. Identification du métal de base	41
3.3. Choix du métal d'apport	43
3.4. Soudage des éprouvettes	43
3.5. Essais mécaniques	44
3.5.1. Principe de l'essai de traction.....	44
3.5.2. Eprouvette utilisée lors de l'essai de traction jusqu'à la rupture	46
3.5.3. Méthode de calcul de la déformation contrôlée	47
3.6. Caractérisation mécanique	48
3.6.1. Méthodes d'examen métallographiques	48
3.6.2. Essai de dureté	51
3.6.3. Essai de micro - dureté	51
4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	53
4.1. Introduction	53
4.2. Choix des intensités de courant	53
4.3. Caractérisation métallographique	53
4.3.1. Analyse micrographique	54
4.3.2. Analyse macrographique	57
4.4. Caractérisation mécanique.....	58
4.4.1. Essai de micro – dureté	58
4.4.2. Essai de traction	61
4.4.3. Essai de la déformation contrôlée	64
CONCLUSION.....	67
REFERENCES	68

Introduction

Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine révolution, pour ne pas dire révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge de bronze, ce n'est que depuis le 20^{ième} siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis solidification de matériaux pour constituer un assemblage par soudage. Il faut pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation de structures ou bâtis.

On commence alors à parler de mécano- soudage or les seuls procédés industrialisés de façon importante sont la soudure oxyacétylénique et la soudure à l'électrode enrobée. Au fur et à mesure de la maîtrise des sources thermiques (arc électrique, laser, plasma d'arc, faisceau d'électrons...) et des systèmes automatisés, les différents procédés ont gagné en fiabilité et en qualité de réalisation. Les ensembles mécano - soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications.

Mais, il s'il ne demeure pas moins indispensable de continuer à faire évoluer ces techniques, et surtout, de mieux appréhender l'ensemble des phénomènes, nombreux et complexe, qui interviennent au cours du soudage.

Ainsi, bien que les robots de soudage et autres systèmes de réalisations automatisés, soient de plus en plus performants, les soudeurs restent irremplaçable, car seuls capables de s'adapter à l'ensemble des facteurs qui viennent perturber la bonne réalisation d'une soudure. En effet, les systèmes de calculs et de prédictions des paramètres opératoires servent d'aide à la décision mais ne peuvent remplacer l'expérience et la dextérité d'opérateurs manuels.

Parmi l'ensemble des procédés, le soudage TIG est utilisé pour des réalisations délicates qui requièrent des qualités d'assemblage optimales. Il met en jeu un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et les pièces à souder dans une veine d'argon. L'électrode et la zone fondue sont protégées contre la pollution ambiante par l'atmosphère inerte. Le soudage TIG est ainsi un procédé de prédilection dans des secteurs aussi variés que le nucléaire, l'aéronautique, les industries chimiques, et agroalimentaires.

En dépit de ces qualités et sa large application, le procédé TIG souffre d'un lourd handicap : sa faible productivité, tout particulièrement dans le cas des pièces de fortes épaisseurs. En effet au delà de 3 mm, il est nécessaire de réaliser une préparation des bords à assembler (chanfreins) et d'utiliser du métal d'apport en soudage multi passes. Ceci est principalement dû au faible rendement d'arc résultant de l'absence de transfert de métal, ainsi qu'à la formation au sein du bain métallique de courants de convections centrifuges, défavorables à une forte pénétration des soudures. L'accroissement du nombre de passes multiplie les risques de défaut, augmente les déformations, accroît la zone thermiquement affectée et rend ce procédé lent et peu productif, non compétitif par rapport à d'autres procédés à arc comme MIG.

Pour rendre le procédé de soudage TIG plus concurrentiel passe inévitablement par une augmentation des épaisseurs soudables en seul passe. Il paraît alors intéressant de disposer d'un procédé simple permettant d'étendre la gamme des pénétrations accessibles en soudage TIG. Actuellement, il existe une technique assez développée appelée ATIG, qui utilise le même matériel que le procédé TIG (générateur, électrode, torche, gaz). Cette technique utilise un flux solide, déposé avant soudure, qui sera actif tant sur l'arc que sur le bain, de le but de favoriser la pénétration des volumes fondus et réaliser des plus fortes épaisseurs soudées.

L'objectif visé par ce travail est de mettre en évidence l'impact du procédé de soudage TIG sur les caractéristiques mécaniques de l'assemblage. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser des soudures sur des tôles d'épaisseur variant de 1.0 à 1.5 mm, en acier inoxydables austénitique (304 L), avec des paramètres variables du procédé. Le choix de ces aciers, vu qu'ils trouvent des applications de plus en plus large dans les plus sensibles industries.

Pour mener notre travail, nous présenterons dans une première partie l'état de l'art et la problématique propre au procédé de soudage TIG et MIG, les origines des faibles pénétrations accessibles, les influences des variations des éléments d'alliages du métal de base sur la soudabilité et les solutions existantes pour améliorer ce type procédé TIG.

Suivra la partie concernant la métallurgie de soudage et les différents phénomènes intervenant durant l'opération de soudage, puis nous présenterons le comportement globale des aciers inoxydables en soudage.

Enfin, nous présenterons la démarche expérimentale suivie par la caractérisation des cordons de soudure. Ceci nous conduira à mettre en évidence les effets importants des conditions de soudage sur la morphologie finale du cordon de soudure et sur ces caractéristiques mécaniques finales.

Chapitre 1

Propriétés générales des aciers inoxydables

I.1. Introduction

L'instabilité des métaux et alliages du point de vue thermodynamique (c'est-à-dire la possibilité de produire des combinaisons métalliques « métal + oxyde »), est la cause principale des phénomènes de corrosion. Economiquement cette dernière provoque des pertes dues aux détériorations subit par le métal.

Le remède à ce phénomène consiste à séparer les surfaces métalliques actives du milieu environnant. L'existence spontanée d'une limite de phase métal / environnement détermine les deux limites de phase c'est-à-dire métal/couche recouverte et couche recouverte/environnement. C'est la composition chimique appropriée de la couche de protection qui confine à l'acier ou l'alliage sa grande résistance chimique.

L'acier est un alliage de fer, de carbone et d'autres éléments. Selon la définition de la norme EN 10020, il est inoxydable lorsqu'il contient au maximum 1,2% de carbone et au moins 10,5% de chrome, et qui peut contenir des éléments d'additions qui vont apporter des caractéristiques différentes, et une grande variété de propriétés. Parmi les influences des éléments d'alliage, on cite le nickel dont il suffit que 8% pour élargir le domaine austénitique jusqu'à la température ambiante.

Les aciers inoxydables sont donc des alliages à base de fer, ayant la propriété de résistance à plusieurs types de corrosion tout en gardant des caractéristiques structurales et mécaniques élevés d'où leurs utilités et leurs importance dans les domaines de l'industrie.

De ce fait l'élément chrome constitue jusqu'à nos jours le métal d'addition le plus important pour les inoxydables. Son introduction dans les aciers améliore

sensiblement la résistance à la corrosion, et au-delà de 12% il exerce une action décisive sur ce phénomène de corrosion [1],[4].

1.2. Système fer chrome et ses dérivés

1.2.1. Système fer chrome

Le diagramme binaire complet à l'équilibre fer - chrome (Figure 1.1) montre que l'existence de la phase γ est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « boucle γ ». Cette situation étant due au chrome qui, compte tenu de sa structure cristallographique (ayant une structure CC), favorise le développement du domaine α .

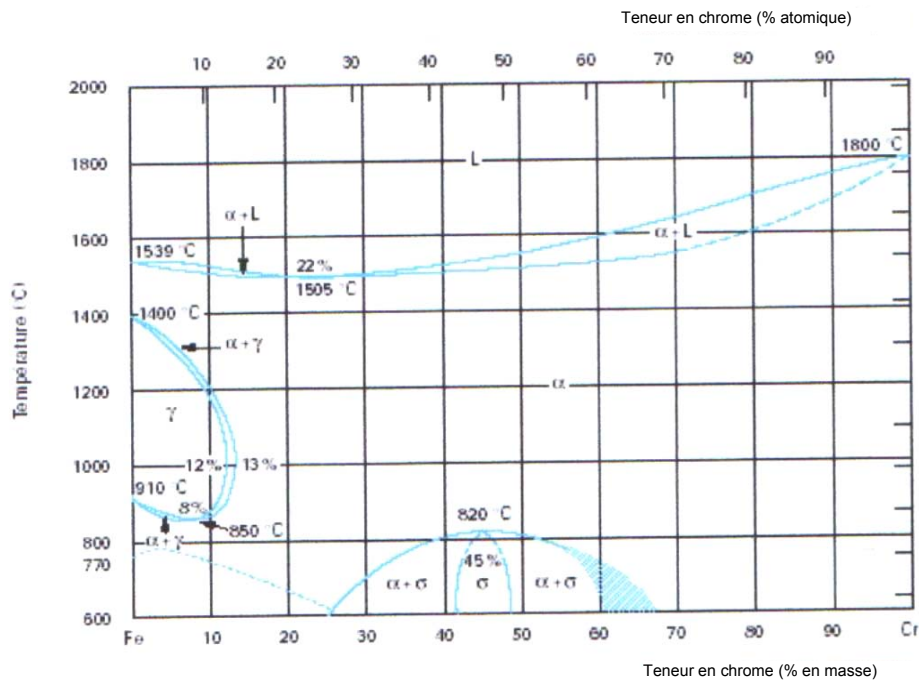


Figure 1.1 : Diagramme d'équilibre Fer - Chrome

Le détail de la boucle γ (Figure 1.2), montre que, pour des teneurs en chrome inférieures à 10,5%, l'alliage Fe - Cr subit au chauffage une transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et inversement au refroidissement. Pour des teneurs en chrome supérieures à 11,5%, seul le domaine α existe.

L'alliage métallique ne subit aucun changement de phase et reste donc ferritique (phase α). Entre une teneur en chrome comprise entre 10,5 et 11,5 %, les deux phases γ et α coexistent sous la forme d'une structure mixte ou biphasée $\alpha + \gamma$.

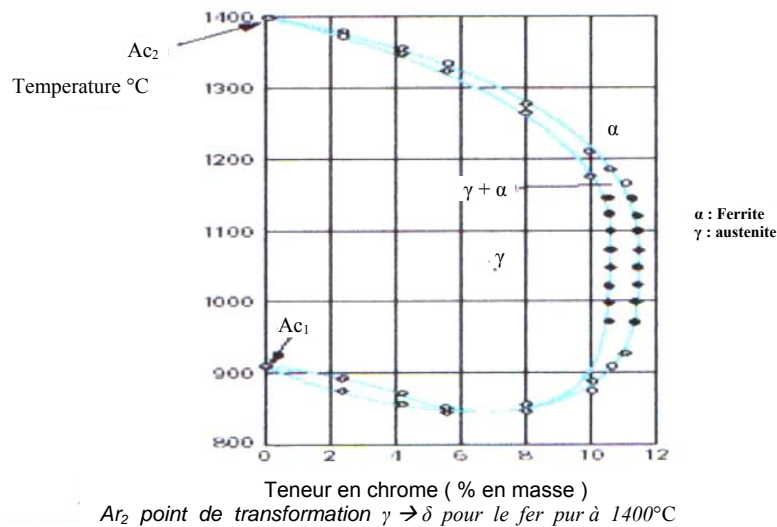


Figure 1.2 : le détail de la boucle γ

1.2.2. Système fer chrome nickel

Le nickel, élément gammagène, élargit le domaine d'existence de la phase austénitique. La Figure 1.3 qui est une coupe du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni montre le déplacement de la boucle γ vers les teneurs élevées en chrome lorsqu'on augmente la teneur en nickel. Mais généralement, il est remarquable qu'il faille une teneur beaucoup plus importante en Ni pour élargir la boucle γ qu'il n'en faut avec l'addition de carbone ceci démontre que le carbone à un pouvoir gammagène beaucoup plus prononcé que le nickel [4].

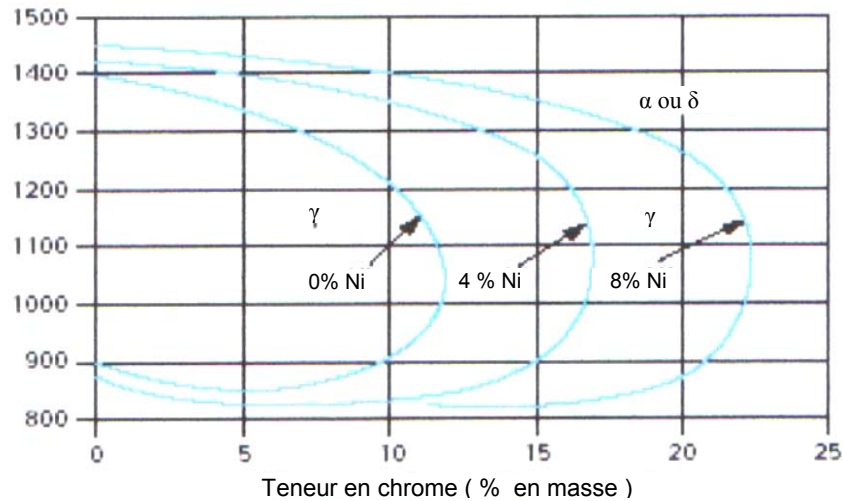


Figure 1.3 : l'influence du Ni sur la boucle γ

Dans la partie basse de diagramme fer chrome, entre 600 et 880 °C (Figure 1.4) apparaît une nouvelle phase appelée sigma (σ) fragilisante de composition entre 45 et 50% Cr et de structure quadratique. En dessous de 820°C se produit une démixtion ou encore une décomposition de la phase α (CC) en deux phase α et α' de même structure mais de teneurs en Cr différentes.

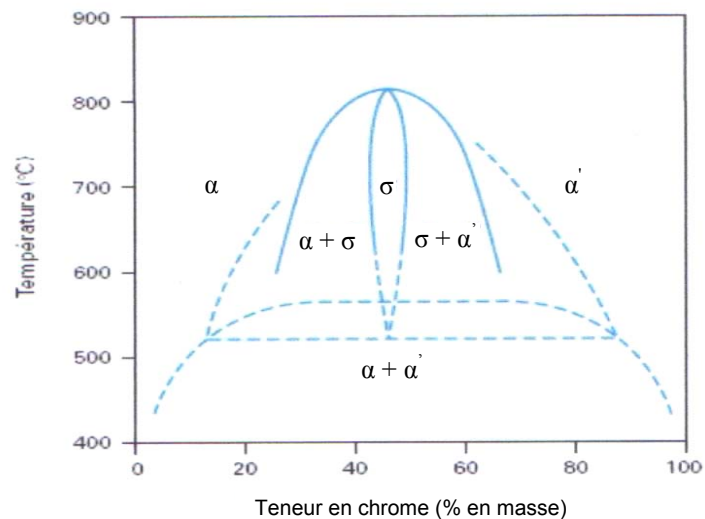


Figure 1.4 : Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome à des températures inférieures à 850

I.3. Les différentes familles des aciers inoxydables

Les familles d'aciers inoxydables sont nombreuses et variées. Ce sont des aciers fortement chargés en chrome et en nickel dont la principale qualité est leur résistance à la corrosion. Cependant, ils ne sont pas exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel dans la passivation de ces alliages, les teneurs supérieures à 12% favorisent la protection en surface des pièces. C'est un élément alphasène qui, combiné avec d'autres éléments d'additions, va favoriser l'existence à la température ambiante de phases comme la ferrite, l'austénite ou la martensite (Figure.1.1).

L'opération de soudage requiert une grande technique afin de ne pas détériorer les différentes propriétés du métal de base (mécaniques et anticorrosives). Du fait de la diversité des aciers inoxydables, les différentes précautions opératoires sont propres à chaque famille de matériau.

1.3.1 Les aciers inoxydables martensitiques

La teneur en chrome des aciers inoxydables martensitique est comprise entre 12 et 17%. Ils sont caractérisés par une très grande aptitude à prendre une trempe. Si le revenu est réalisé entre 350 et 575°C, il conduit à un abaissement de la ductilité et de la résilience provoqué par un durcissement secondaire issu de la formation de carbures $Cr_{23}C_6$ qui s'accompagne de la diminution de la résistance à la corrosion. Les aciers inoxydables martensitiques conduisent dans le cas du soudage à des risques de fissuration à froid ou à des criques causés par la trempabilité élevée de l'acier. Il y a de plus, un risque de fragilisation par hydrogène de la zone affectée thermiquement qui a subi la trempe. Pour prévenir cela on peut alors :

- Limiter la teneur en carbone entre 0.15% à 0.20 %.
- Utiliser un métal d'apport qui conduit après dilution à un cordon austénitique ou austéno-ferritique ductile.

- Préchauffer les pièces à assembler (250-300°C) et réchauffer l'assemblage après soudage (300°C - 400°C) afin de réduire l'écart de température entre le métal de base et zone fondue. L'effet de la trempe en sera réduit, mais les coûts induits par ce procédé peuvent être importants.
- Faire un traitement complet de trempe et revenu (ou un simple revenu de relaxation vers (650-750°C).
- Assurer une bonne protection contre la diffusion de l'hydrogène.

1.3.2 Les aciers inoxydables ferritiques

Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par une absence de transformation alpha Gamma au chauffage. Ils ne peuvent donc pas prendre la trempe. Par contre ils sont sensibles au grossissement de grains consécutif au chauffage, ce qui diminue leur ductilité et leur ténacité. Comme pour les alliages de titane, on ne peut régénérer leur structure par de simples traitements thermiques, mais par des traitements thermomécaniques.

A l'instar des aciers inoxydables austénitiques, ils sont sensibles à la corrosion intergranulaire. De plus, il y a risque d'apparition de phase σ (550°C à 800°C pour des aciers contenant plus de 20% de chrome), ou de précipitation de phase α' (après maintien vers 475°C) qui vont fragiliser les aciers ferritiques. Or, ces deux phases n'apparaissent qu'après un maintien prolongé en température. Elles ne vont donc pas affecter la soudabilité du matériau, contrairement au risque de corrosion intergranulaire.

On distingue trois groupes d'aciers inoxydables ferritiques :

- Les aciers contenant environ 12% de chrome et pour lesquels la teneur en carbone est limitée à 0.08%. L'addition d'aluminium, élément alpha gène, empêche, chez eux, la formation d'austénite au chauffage et facilite le soudage.

- Les aciers contenant 17% de chrome, pour lesquels la teneur en carbone est limitée à 0.1%. Ils sont difficilement soudables : lorsqu'elles sont portées à plus de 950°C, les zones voisines du cordon de soudure deviennent fragiles et sujettes à la corrosion inter granulaire. Ceci peut être limité par addition de titane ou de niobium (éléments fortement carburigènes qui forment des carbures de titane ou de niobium ou des carbonitrides qui fixent le carbone et empêchent la formation de carbures de chrome).

- Les aciers qui contiennent de 20% à 30% de chrome. Ces aciers font preuve d'une excellente résistance à l'oxydation, particulièrement à haute température ; ils sont dits réfractaires.

Pour palier les inconvénients liés au soudage, on peut :

- Se limiter aux procédés qui emploient la plus faible énergie de soudage ou les énergies de soudage spécifiques les plus fortes ou effectuer un post-traitement thermique (recuit vers 750°C - 850°C) afin de corriger une trempe martensitique partielle et désensibiliser la Z.A.T. vis à vis de la corrosion intergranulaire (sans toutefois régénérer le grain),

- Utiliser un métal d'apport austénitique ou de même composition que le métal de base.

Bien que les nuances stabilisées au titane ou niobium soient moins sensibles au grossissement de grains, il faut rester vigilant car une sur-stabilisation peut entraîner des risques de fissuration du joint.

1.3.3 Les aciers inoxydables austénitiques

Le principal élément d'addition, jusqu'alors présenté, est le chrome, élément fortement alpha gène qui conduit à une structure ferritique avec ou sans austénitisation au chauffage.

L'ajout de nickel, élément fortement gamma gène, va favoriser la présence, à température ambiante, de la structure austénitique. Cette nuance constitue la majeure partie de la production d'aciers inoxydables (60% à 70% de la production mondiale). Ses propriétés mécaniques et sa formabilité sont remarquables tout comme sa résistance à la corrosion dans de très nombreux milieux corrosifs.

La structure cubique à faces centrées ne fait pas craindre de transition ductile fragile d'où leur emploi à très basse température (stockage de gaz liquéfié). De plus, leur résistance à la corrosion et à l'oxydation permet un usage à haute température (jusqu'à 900°C ou 1000°C selon les nuances). Seuls des traitements mécaniques (écrouissage par exemple) permettent de durcir ces aciers qui ne subissent pas de transformations structurales. Ils sont toutefois sensibles au grossissement de grains, mais restent ductiles de part leur structure cubique faces centrées. Enfin, on ne risque pas de subir des effets de fragilisation.

L'ajout de 2% à 4% de molybdène augmente nettement la résistance à la corrosion dans la plupart des milieux et en particulier dans les milieux chlorés (atmosphère marine).

Les aciers inoxydables austénitiques sont facilement soudables et ne présentent pas, en principe, de fragilisation de la Z.A.T. Il peut cependant apparaître une sensibilisation à la corrosion inter granulaire à laquelle on peut remédier grâce à :

- Un choix de traitements thermiques : on évite le domaine critique par hyper trempe (notons que l'on peut désensibiliser le métal par régénération en réchauffant au-delà de 1000°C suivi d'un refroidissement rapide),

- Une utilisation de nuances à bas carbone (teneurs voisines de 0.03%), la précipitation des carbures devient négligeable,
- L'utilisation des nuances stabilisées au titane ou niobium, éléments fortement carburigènes qui évitent la formation de $Cr_{23}C_6$.

De plus, il peut se produire des phénomènes de fissuration à chaud qui apparaissent au cours du refroidissement au dessus de 1100°C - 1200°C. Les fissures sont alors inter dendritique et suivent le joint de solidification dans le cordon de soudure. Pour les nuances stabilisées au niobium, il arrive qu'elles affectent le métal de base au voisinage du cordon. Ceci est dû à des ségrégations durant la solidification, conduisant à un enrichissement des joints en structures à bas point de fusion, élargissant l'intervalle de solidification. Les éléments néfastes sont le plomb, le soufre, le niobium et le bore qui constituent des eutectiques à bas point de fusion.

On cherche alors à minimiser la présence de ces éléments, mais aussi à former entre 3% et 6% de ferrite dans le cordon (leur solubilité dans la ferrite étant supérieure à leur solubilité dans l'austénite). De plus, la ferrite formée est plus ductile que l'austénite, permet de relaxer les contraintes résiduelles.

Notons enfin que le risque de soufflures dans le cordon n'est pas négligeable, en présence d'oxygène et surtout d'hydrogène. Pour remédier à ce problème, il faut assurer une bonne protection gazeuse des soudures avec un gaz de protection faiblement chargé en hydrogène, ainsi qu'une préparation propre des champs à souder (absence d'humidité, de graisse, de calamine).

1.3.4 Les aciers inoxydables austéno – ferritique

En augmentant la teneur en chrome (entre 18% et 28%) et en limitant la teneur en nickel (de 6% à 9%), on obtient des aciers inoxydables dont la structure à l'ambiante est mixte, composée de ferrite et d'austénite. Ils sont couramment

appelés aciers inoxydables duplex. Leurs propriétés mécaniques sont excellentes; ils n'ont pas la fragilité des aciers ferritiques et leur limite élastique peut être, après traitement thermique, trois fois supérieure à celle des aciers austénitiques (revenu provoquant un durcissement structural). De plus, ils font preuve d'une excellente tenue à la corrosion, en particulier la corrosion sous contrainte, par fatigue et par cavitation. Ils sont également beaucoup moins sensibles que les aciers austénitiques à la formation de criques en soudage, par contre leur mise en forme est beaucoup moins aisée.

I.4. Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables

Chaque élément d'addition allié au fer peut soit jouer un rôle particulier sur les caractéristiques générales, soit un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'addition sont présents dans la composition finale. Le rôle particulier des principaux éléments additionnés à un acier peut se résumer suit :

- **Le chrome (Cr)** : C'est un élément stabilisateur du fer α . Il est carburigène il est la cause de la passivation de l'acier et constitue, au delà de 12 % l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables.
- **Le molybdène (Mo)** : C'est un éléments alpha gène. Il améliore la résistance à la corrosion des aciers inoxydables en milieu réducteurs. En présence d'ions halogènes, il améliore en particulier la résistance à la corrosion par piqûres. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud.
- **Le silicium (Si)** : C'est un élément également alpha gène. Il améliore la résistance à l'oxydation à chaud.
- **Le vanadium (V)** : Elément alpha gène, il élève la résistance mécanique à chaud.
- **Le titane (Ti)** : Elément alpha gène, il se combine (dans les aciers ferritiques et austénitiques) avec le carbone pour former un carbure de titane dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion inter cristalline.

- **Le niobium (Nb)** : C'est un élément alpha gène. Il se combine également avec le carbone et s'oppose à la corrosion inter granulaire.
- **Le nickel (Ni)** : C'est un élément gamma gène. Il est l'élément principal avec le chrome dans les aciers inoxydables austénitiques. Il améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension.
- **Le manganèse (Mn)** : Élément gamma gène, il rend difficile la transformation de l'austénite en martensite α dans les aciers Cr-Ni et lors de sollicitations mécaniques aux basses température.
- **Le carbone (C)** : Il stabilise le fer γ . C'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers pour des raisons de corrosion chimique la teneur en C est dans la plupart des cas maintenu très basse.
- **L'azote (N)** : Stabilisateur d'austénite, il s'agit comme le carbone. Dans les aciers austénitiques, il accroît les caractéristiques mécaniques sans compromettre les valeurs de la ténacité
- **Le cuivre (Cu)** : Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid.
- **Le soufre (S)** : Il améliore l'usinabilité par enlèvement de copeaux, l'augmentation de sa teneur remet en cause la résistance à la corrosion.

I.5. Propriétés mécaniques des aciers inoxydables

Pour résumer, le Tableau 1.1 présente les principales nuances d'aciers inoxydables et leurs propriétés mécaniques minimales requises (selon la norme ASTM)

Tableau 1.1 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables

nomenclature	Composition moyenne				Etat	Propriétés mécaniques		
	%C Divers	%Cr	%Ni			Rp Mpa	Rm Mpa	A (%)
Martensitiques					Trempe			
410	< 0,15	12,5	-	-	Et	700	1000	20
420	> 0,15	13	-	-	revenu	1375	1760	10
440-B	0,75 à 0,95	17	-	-	A 400° C	1900	1950	3
Ferritiques	< 0,08	13	-	0,2 Al	RECUIT	275	450	25
405	< 0,12	17	-	-				
430	< 0,20	25	-	< 0,25				
446	N							
Austénitiques	< 0,15	17	7	-	RECUIT	275	750	50
301	< 0,08	19	9	-				
304	< 0,08	17	12	2,5 Mo				
316	< 0,03	17	12	2,5 Mo				
316 L	< 0,08	18	11	Nb ou				
347	Ta				275	655	45	

Chapitre 2

Généralités sur le soudage

2.1. Introduction

La réalisation d'assemblages démontables en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage. Qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler.

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques, ou des plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont les pièces à assembler participent à la construction du joint du brasage dont la constitution de ce dernier est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport [1]. Trois techniques d'assemblage peuvent être ainsi clairement définies :

- **Le soudage** : Opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de nature très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut ou ne pas être utilisé.
- **Le brasage** : Opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.
- **Le soudo-brasage** : Technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

Le brasage et le soudo-brasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. De tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

Nous nous contenterons ici de présenter les différentes techniques de soudage, par le biais des sources thermiques, en détaillant particulièrement le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) qui fait l'objet de cette étude. Nous porterons un intérêt particulier à la formation du bain de fusion aux différentes actions internes et externes au volume fondu qui régissent la morphologie finale du cordon de soudure, et notamment les effets de quelques éléments d'alliages sur la soudabilité.

2.2. Les différentes techniques de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres les continuités métalliques est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure 2.1.

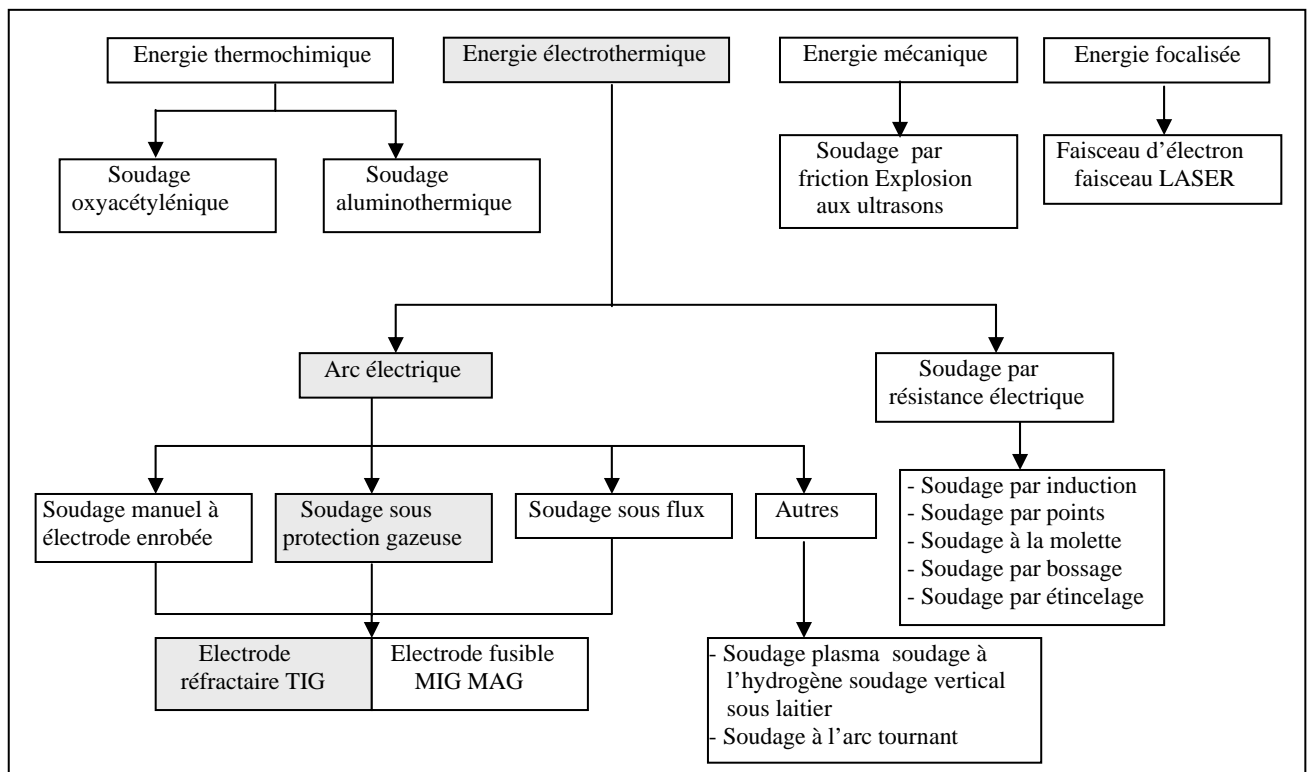


Figure 2.1 : Classification des procédés de soudage

La conséquence de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources pour comparer les procédés entre eux en terme d'énergie spécifique (par unité de surface) :

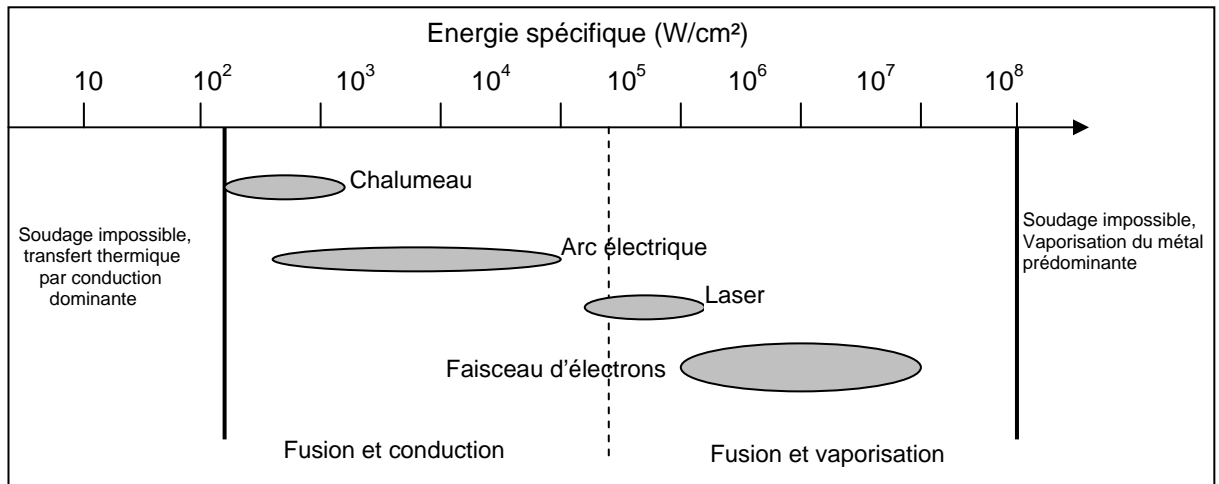


Figure 2.2 : Sources thermiques et densité

Il ressort que l'arc électrique a des densités d'énergies moyennes et que leur rendement va varier suivant que l'on ait ou non un transfert de métal. En effet ce dernier facteur conditionne nettement le rendement de l'arc mais surtout le taux de dépôt de métal. Le taux de transfert de métal dépend de ce qu'on appelle tension de surface des différents éléments entrant en composition du métal. Par exemple, le carbone se liquéfie au delà de $4230^{\circ}K$ alors que l'acier fond à partir de $1800^{\circ}K$, il est donc sans effet sur la tension de surface des aciers.

2.3. Principaux procédés de soudage à l'arc

C'est le mode le plus couramment utilisé vu le nombre de variantes qu'il comporte et au tournage de produit soudé, il y a six procédés qui utilisent l'arc électrique [2]. Ils se caractérisent par deux éléments essentiels :

- La nature de l'électrode (baquette, fil fusible ou tige réfractaire).
- La nature du milieu (gaz ou vapeurs dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante

Comme exemple de ces procédés de soudage à l'arc, on peut cité par exemple :

- Soudage à l'arc avec électrode enrobée.
- Soudage automatique sous flux électro-conducteur solide.
- Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG ou MAG).
- Soudage au plasma.
- Soudage à l'électrode réfractaire (TIG).

2.4. Evaluation de la qualité d'une soudure

Le code ASME « Boiler and Pressure Vessels » section IX (qualification de la soudure), détaille les procédures et résultats qui doivent être atteints pour la construction de récipients sous pression.

Les essais de pliage mettent particulièrement en évidence les problèmes liés à la ductilité des cordons soudés. Or, la conservation d'une bonne ductilité est garante de la qualité des assemblages réalisés. La couleur de la soudure peut aussi être utilisée comme indicateur de la qualité de la protection (elle caractérise le degré d'oxydation de la surface). Ainsi, si le cordon réalisé n'a pas un aspect métallique argenté, il y a contamination du matériau qui nécessite intervention (Tableau 2.1)

Tableau 2.1 : Critère visuel d'oxydation

Couleur de la soudure	Origine et traitement
Jaune paille clair Jaune paille foncé Bleu clair	Oxydation de surface Eliminer par un brossage Brosse métallique neuve à fil inoxydable
Bleu foncé Gris bleu Gris Blanc (dépôt poudreux)	Contamination du métal La soudure doit être entièrement éliminer et refaite correction des protections gazeuses.

Les essais de dureté comparés entre le cordon et le métal de base sont aussi parfois utilisés comme critère de qualité de la soudure. La variation de dureté entre un cordon non contaminé et le métal de base ne doit pas dépasser 30 points sur l'échelle des duretés Vickers ou Brinell (5 points pour Rockwell B). Le code ASME suggère que si la dureté diffère de plus de 40 points Vickers, il y a une contamination excessive de la soudure. Cette dernière doit être complètement supprimée et refaite. Enfin, le code de construction impose que chaque soudure subisse un ressuage ainsi qu'une analyse radiographique pour détecter la présence de porosités.

2.5. Caractéristiques métallurgiques des soudures

Il est important de comprendre les rôles particulièrement critiques que jouent la zone fondue et les zones affectées thermiquement (ZAT) dans le cadre de réalisations soudées. Ces zones vont être les sources de défauts auxquels il va falloir remédier. Nous nous contenterons ici de rappeler rapidement leurs origines et nous nous limiterons à des problèmes courants pour le soudage des aciers inoxydables.

2.5.1 Zone affectée thermiquement

L'énergie nécessaire à la fusion du métal et le cycle thermique qui s'en suit (brusque solidification) viennent modifier la structure du matériau avoisinant le cordon de soudure. On peut distinguer, dans le cas des aciers, quatre régions dont la constitution et la microstructure dépendent de la température maximale atteinte et du refroidissement (Figure.II.3). Elles sont comprises entre le métal de base et le cordon soudé (lieu de fusion puis re solidification du métal).

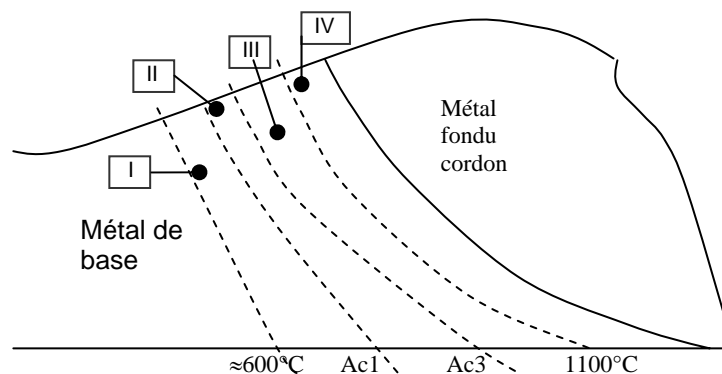


Figure 2.3 : Zone affectée thermiquement d'un cordon de soudure

Zone I : La température est comprise entre 600°C et Ac₁. Il peut y avoir précipitation, revenu ou globularisation, suivant l'état initial de l'acier.

Zone II : La température est comprise entre Ac₁ et Ac₃, les modifications sont importantes. L'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de structure au refroidissement. Ceci correspond au début de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Zone III : La température est comprise entre Ac₃ et 1100°C. Après refroidissement, on obtient des structures normalisées ou des structures grossières selon la température maximale atteinte.

Zone IV : La température est comprise entre 1100 °C et la température de fusion. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité du métal est considérablement augmentée et les structures obtenues dans cette zone après refroidissement varient depuis des structures ferrito - perlitiques aciculaires très grossières jusqu' à des structures bainitiques ou martensitiques pour les vitesses de refroidissement les plus élevées.

Les zones sous cordon sont le lieu de traitement thermiques très rapides à haute température (austénitisation au-delà de 1200°C). Elles sont à l'origine de la majorité des problèmes de soudabilité métallurgique causés par des phénomènes de plasticité différentielle (créant, par exemple, des variations de dureté importantes sur quelques millimètres). Il sera donc très important de limiter l'étendue de cette zone pour diminuer ou annuler le risque de ces défauts.

2.6. Soudage à électrode réfractaire T I G

Le soudage à électrode réfractaire est appelé soudage TIG (Tungstène Inert Gaz). L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur, un débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires (Figure 2.4)

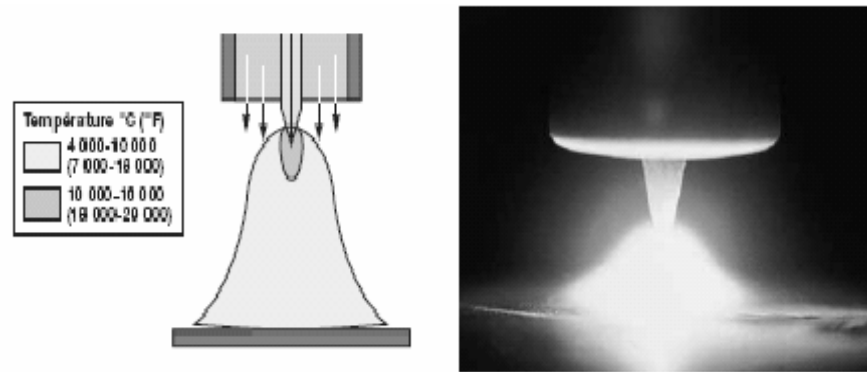


Figure 2.4 : Procédé de soudage en TIG

Le soudage TIG produit une fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. L'apport de métal est réalisé en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Le mode d'entraînement du fil jusqu'au bain de fusion est l'une des caractéristiques importante du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrode fusible. La figure 2.3 montre l'aspect d'une torche de soudage TIG.

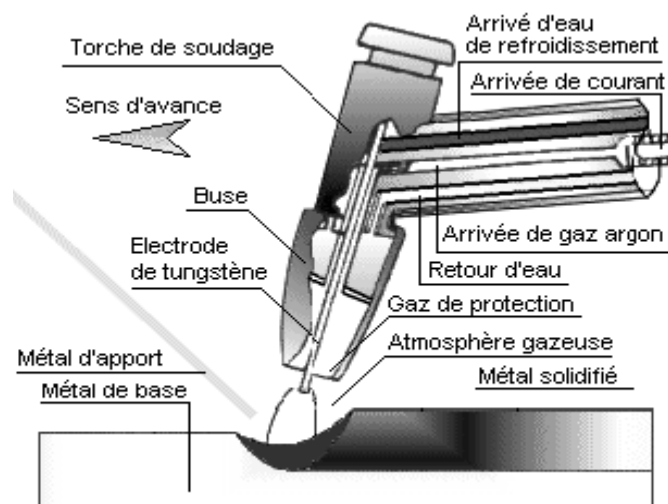


Figure 2.5 : La torche de soudage

2.6.1 Les électrodes

Suivant la nature des électrodes, et principalement de ses éléments d'addition, on peut obtenir un effet thermoïonique plus ou moins important. Le tungstène ne devient thermoïonique qu'au voisinage de sa température de fusion (3410°C). Ainsi, si l'ajout d'éléments d'alliages permet d'obtenir un effet thermoïonique à plus faible température, la densité, la quantité d'électrons et la stabilité de l'arc en seront améliorées. Les éléments d'addition sont en général des oxydes métalliques dont les fonctions de travail sont basses. [1]

On utilise classiquement des électrodes de tungstène thorines (l'oxyde de thorium ThO_2 est allié à 1 ou 2%) qui permettent d'augmenter la capacité de courant généré (+20%), la durée de vie des électrodes et de limiter les risques de contamination du bain. Ces électrodes offrent un amorçage d'arc facile et favorisent une bonne stabilité d'arc. La géométrie de l'électrode est conservée au cours du soudage en courant continu direct, ce qui permet de garder optimaux les paramètres géométriques qui, comme nous le verrons, influent sur la qualité d'arc et de la soudure.

Cependant, le thorium, au cours du soudage, devient légèrement radioactif. Aussi, pour pallier cet inconvénient des éléments comme le cérium (CeO_2), l'yttrium (Y_2O_3) ou le lanthane (La_2O_3) sont peu à peu introduits comme palliatifs au thorium. Les caractéristiques sont alors sensiblement identiques aux électrodes thorines. [2],[3]

Ainsi, par un choix judicieux d'électrode, peut-on favoriser l'apparition d'une émission thermoïonique qui augmentera la densité et la stabilité d'arc et prolongera la durée de vie des géométries d'électrodes choisies.

2.6.2 Le gaz d'assistance

Ce gaz qui débite par la torche à souder est indispensable lors du soudage TIG. Son effet sur l'arc électrique et le bain de fusion, essentiel, va varier suivant sa nature. Il va servir de protection gazeuse du bain et de l'électrode mais va stabiliser l'arc électrique. De plus, il influence la morphologie du bain et les propriétés du métal fondu. Il donc important de connaître les gaz utilisés et leur effet sur le procédé de soudage et le cordon réalisé.

2.6.3. Les gaz de protection

Les propriétés physiques et chimiques du gaz vont conditionner son efficacité à protéger le bain fondu et l'électrode en tungstène de la pollution atmosphérique (oxygène, hydrogène ou azote). Cette pollution peut se traduire par la mise en solution d'hydrogène dans le bain fondu qui va dégazer au cours de la solidification et créer des porosités rédhibitoires pour les cordons soudés. Il peut aussi apparaître des oxydes ou des nitrures solubles ou non dans le bain, qui vont diminuer le taux d'éléments d'addition (exemple : le chrome, dans le cas des aciers inoxydables).

Les principaux gaz de protection sont :

- **L'argon** : c'est le gaz le plus couramment utilisé en soudage TIG. Totalement inerte et relativement lourd, il assure une excellente protection du bain et de l'électrode. Par contre la présence d'un film d'oxydes ou de dépôts de surface réduit son efficacité. Enfin, son faible potentiel d'ionisation facilite l'amorçage de l'arc et se traduit par une colonne d'arc plutôt conique.
- **L'hélium** : comme l'argon, l'hélium est chimiquement inerte mais a une densité très faible. Il faut donc débiter trois fois plus d'hélium pour obtenir une protection équivalente à celle de l'argon, or son coût est supérieur. Ce qui explique sa faible utilisation en soudage TIG. De plus, son potentiel d'ionisation élevé conduit à un amorçage d'arc qui se révèle difficile mais les énergies incidentes sont plus importantes comparativement à l'argon et permettent d'éviter les défauts de fusion. Par conséquent, les vitesses de soudage associées sont plus élevées et peuvent compenser le surcoût d'utilisation de l'hélium.
- **Les gaz actifs** : l'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont parfois utilisés, en faibles proportions en combinaison avec l'argon ou l'hélium.

Tableau 2.2 : Constantes physiques importantes des gaz de soudage

Eléments	Potentiel d'ionisation (eV)	Densité (Kg/m ³)
Argon	15.75	1.784
Hélium	24.58	0.187
Hydrogène	13..59	0.083
Azote	14.54	1.161
Oxygène	13.61	1.326
Dioxyde de carbone	-----	1.977

L'oxygène est choisi pour répondre à deux fonctions qui sont de stabiliser l'arc mais surtout de modifier les tensions de surface du métal fondu et ainsi éviter les défauts surfaciques comme les caniveaux initiateurs de concentrations de contraintes. Cependant, la présence en faible proportion d'oxygène peut être bénéfique à la soudure, mais un taux excessif conduit à la détérioration irrémédiable des propriétés du métal soudé

L'hydrogène, quant à lui, grâce à sa conductivité thermique élevée, donne une tension d'arc plus élevée, favorable à une meilleure pénétration et à une section fondue plus importante. Cependant, le rapport géométrique pénétration sur largeur de bain diminue très nettement par cet ajout. Par ailleurs, l'hydrogène, très réducteur, est utilisé pour diminuer la couche d'oxydes en surface du bain.

Pour ce qui est de l'azote, il sert, entre autre à maîtriser les structures formées au cours de la solidification par exemple, l'ajout de l'azote favorise la présence de ferrite dans la cas de soudure d'aciers duplex austéno-ferritique. Le taux d'azote, permet également d'affiner la taille de grains austénitiques des aciers austénitiques à haute limite d'élasticité [3].

2.7. Avantages et inconvénients du soudage TIG

➤ Avantages

La grande qualité des soudures obtenues par le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse en fait un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux. Il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après la soudure.

Le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal. De plus, les soudures se font sans l'emploi du laitier, éliminant ainsi les inclusions de laitier. Le chauffage des pièces s'effectue sur une petite surface, le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage, relativement élevée.

En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. Le dépôt de soudure est très dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels les alliages de titane et le zirconium. Enfin, le procédé est idéal aussi pour effectuer des réparations et de petites séries de fabrication de pièces.

➤ **Inconvénients**

Procédé de soudage lent, il nécessite souvent les deux mains du soudeur. De plus, il n'est pas vraiment avantageux pour le soudage sur tôles épaisses. Il exige un équipement plus considérable que certains autres procédés.

- Équipement dispendieux
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement.
- Déformations des pièces soudées.

Les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquences, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint.

2.8. Alternatives au soudage TIG

Il semble donc opportun, à ce stade, de proposer des alternatives au soudage TIG appliqués aux fortes épaisseurs, soit en changeant de procédé avec le soudage plasma, soit en modifiant la conception des torches TIG, c'est le cas des torches double flux. L'utilisation du procédé TIG, objet de cette étude, par une simple utilisation d'un flux solide activant qui permet avec le même matériel de doubler les plages de pénétrations accessibles.

Les procédés à haute densité d'énergie, comme le Laser, le faisceaux d'électrons (F.E) ou le soudage plasma, permettent de réaliser des assemblages de fortes épaisseurs sans métal d'apport. Les densités d'énergies, supérieures à 10^5 w/cm², permettent la formation d'un capillaire de vapeurs métalliques, appelé keyhole, au sein de la pièce à souder. L'énergie thermique est alors transférée au métal sur toute la hauteur du capillaire depuis l'intérieur de la pièce. Il y aura donc minimisation des pertes par conduction et par rayonnement donnant lieu à un transfert de chaleur beaucoup plus efficace et permettant d'utiliser des vitesses de soudage plus importantes.

Comparativement aux procédés de soudage à l'arc classiques (TIG ou MIG), les volumes fondus et les zones thermiquement affectées sont réduits. La morphologie caractéristique de ces cordons est en forme de « clou » présentant une profondeur de pénétration très supérieure à sa largeur. Ainsi, les déformations, les modifications structurales et donc les traitements post-opératoires sont diminués et souvent annulés.

Néanmoins, les installations Laser ou F.E. sont très onéreuses (plusieurs millions de francs) et nécessitent d'assurer un volume de production important pour rentabiliser ces investissements. Ainsi cherche-t-on par d'autres moyens à améliorer le soudage TIG.

2.8.1. La torche double flux

Pour améliorer cette efficacité, nous avons vu qu'il est possible d'intervenir sur le gaz d'assistance pour concentrer l'arc. La torche double flux est une extension de cette idée simple cherchant à réaliser une constriction d'arc avec une seconde veine gazeuse en périphérie de l'arc initié entre l'électrode et la torche (Figure II.6).

Les gaz utilisés sont classiques en soudage TIG, c'est-à-dire de l'argon ou l'hélium comme gaz axial et de l'argon ou un mélange argon hydrogène ou argon hélium comme gaz annulaire. On obtient ainsi un refroidissement annulaire de la zone ionisée qui concentre la densité d'arc et donc améliore l'efficacité du soudage TIG. Le gain de pénétration ou de vitesse est de 20% ce qui permet de passer 4mm d'épaisseur sur les aciers inoxydables en une seule passe sur préparation à champs droits contre 3.5 mm en TIG. Cependant, les gains de soudage restent relativement peu importants et ne permettent d'améliorer que très légèrement le champ d'application du soudage TIG.

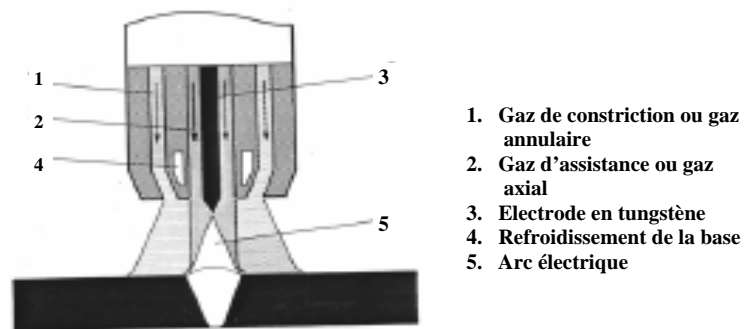


Figure 2.6 : Présentation schématique de la torche double flux

2.8.2. Le soudage plasma

Le soudage plasma est une extension du soudage TIG dont la densité d'énergie et la vitesse d'éjection du plasma sont plus importantes. Ceci est obtenu en forçant le plasma d'arc (créé entre une électrode de tungstène et la buse de constriction ou la pièce) à s'évacuer au travers d'un orifice par un jet de gaz (Figure 2.7).

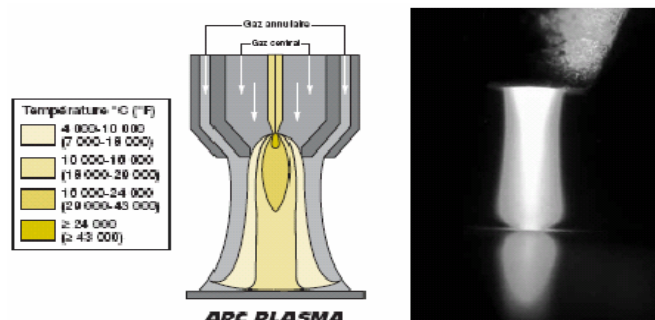


Figure 2.7 : Présentation du jet en plasma

Le gaz sortant de l'orifice est ionisé par l'arc électrique et éjecté au travers de la buse de constriction pour former le jet de plasma. S'ajoute en plus un gaz de protection en périphérie de la buse, qui limite la pollution du bain métallique. On distingue deux modes de fonctionnement appelés arc transféré ou arc non transféré, suivant que l'arc est réalisé entre l'électrode et la pièce à souder ou qu'il est établi entre l'électrode et la buse de constriction.

Le mode par arc transféré fournit une énergie incidente plus importante couplant l'énergie du plasma et de l'arc; c'est le mode couramment utilisé en soudage. Le mode d'arc non transféré permet de ne pas faire entrer la pièce dans le circuit électrique (soudage de pièces non conductrices) mais fournit une énergie moins concentrée que précédemment; il est principalement utilisé pour la découpe.

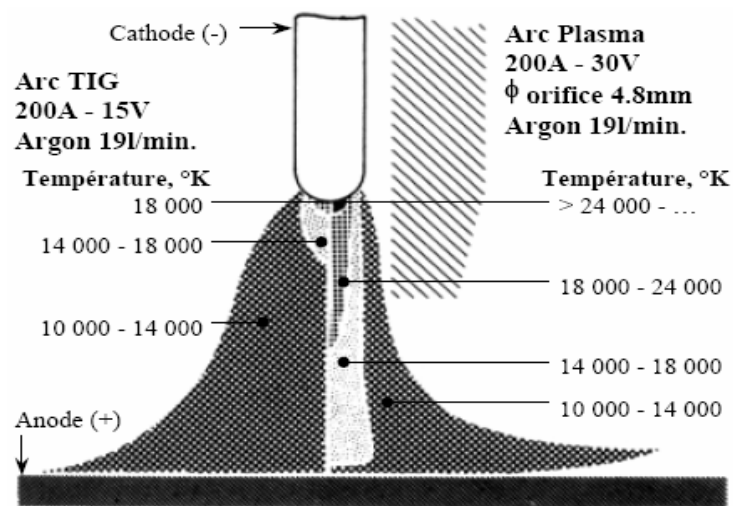


Figure 2.8 : Comparaison entre l'arc TIG et le jet plasma

Le jet de plasma a pour propriété d'être rigide et orientable. Contrairement à l'arc TIG qui est attiré par le conducteur le plus proche, il peut être dirigé par la torche. De plus, il subit peu l'influence de champs magnétiques extérieurs et est peu sensible à la variation de longueur d'arc (ou plutôt hauteur de torche) qui est critique dans le cas du soudage TIG.

Les densités de courant importantes et la concentration d'énergie conduisent à des températures au sein du plasma qui sont supérieures à celles présentes dans l'arc (Figure 2.9) [7].

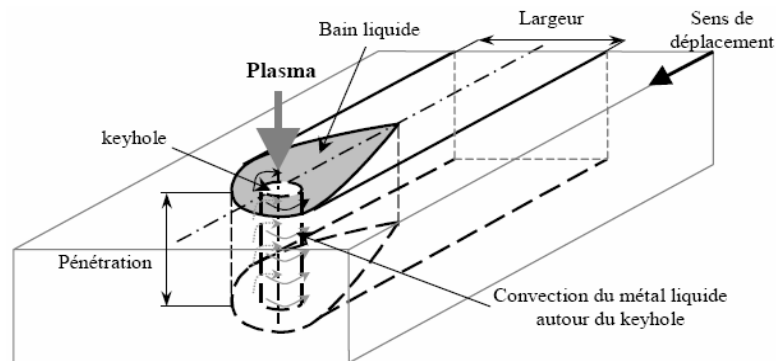


Figure 2.9 : Vue schématique du keyhole en soudage plasma

Résumons maintenant les différents avantages de ce procédé par rapport au soudage TIG :

- La concentration d'énergie accrue permet d'utiliser des vitesses opératoires plus grandes ou des intensités plus faibles pour une profondeur de pénétration souhaitée. Les pénétrations maximales sont plus importantes qu'en TIG, permettant de réaliser de nombreuses applications en une passe, sans préparations de bords, ni de métal d'apport.
- Le volume fondu et la zone thermiquement affectée sont plus étroits (le ratio pénétration sur largeur est amélioré dépassant largement les valeurs obtenues en TIG : $P/L > 1$). Ceci réduit les contraintes de retrait et donc les déformations (jusqu'à 50% de réduction). De plus, la zone fondue est symétrique réduisant les déformations transverses.
- La stabilité et la rigidité d'arc sont améliorées et le jet de plasma est partiellement orientable.
- L'apport de métal est facilité par la distance relativement importante entre la torche et le bain et par l'absence d'électrode.

- Les variations de position de torche influent peu sur la morphologie de bain ou la concentration thermique facilitant le travail en position en mode non keyhole.

Cependant, il existe un certain nombre de limitations à ce procédé qui sont :

- La faible tolérance face au défaut d'alignement des pièces à souder ainsi que face aux variations de jeu dans le plan de joint. Ceci est dû à la « finesse » de la source thermique et impose une révision des préparations de bords.
- Les paramètres en soudage plasma sont plus nombreux (type et intensité d'arc, tension d'arc, géométrie et diamètre d'orifice de constriction, débit et nature de gaz d'orifice et de protection, diamètre et position de l'électrode dans la buse de constriction, hauteur de plasma) et ont des fenêtres d'utilisation relativement réduites.
- Le soudage manuel est généralement plus difficile à réaliser à cause d'une torche plus encombrante à utiliser qu'en soudage TIG, ce qui augmente la difficulté à stabiliser le keyhole.
- Les positions de soudage en mode keyhole sont généralement réduites à la position à plat.
- La buse de constriction doit être entretenue et régulièrement inspectée pour assurer une qualité de soudage rigoureuse.
- Le coût d'investissement initial est dix fois plus important qu'en TIG et nécessite une plus grande technicité des opérateurs.

Les épaisseurs soudables maximales sont de 6mm pour les aciers au carbone et les aciers inoxydables avec des vitesses opératoires de l'ordre de 35cm/min (contre 4mm en TIG pour 15cm/min) et de 12mm pour les alliages de titane à 25cm/min (contre 3mm en TIG pour 15cm/min) (Tableau 2.3).

Les gains de pénétration s'expliquent par une densité d'énergie plus importante permettant de réaliser des assemblages en mode keyhole qui sont insensibles aux courants de convection de type Marangoni. Les écoulements de métal liquide s'effectuent de l'avant vers l'arrière du bain.

Cependant, la présence de ce keyhole couplé à une rapide solidification, du fait du faible volume de métal fondu, peut conduire à la présence abusive de porosités dans le bain voire de défaut de type cavité longitudinale caractérisé par la présence d'un tunnel continu dans l'axe de la soudure.

Tableau 2.3 : Paramètres opératoires typiques en soudage plasma

Matériaux	Epaisseur Mm	Intensité A	Tension V	Vitesse Cm/min	Diamètre Orifice mm	Débit gazeux l/min	
						orifice	protection
Aciers au carbone	3,2	185	28	30	4,4	6	28
Aciers faiblement	4,3	200	29	25	5,4	6	28
Alliés	6,4	275	33	35	5,4	7	28
Aciers inoxydables	2,4	115	30	60	4,4	3	17
	3,2	145	32	75	4,4	5	17
	4,8	165	36	42	5,4	6	21
	6,4	240	38	35	5,4	8	24

Le soudage sans métal d'apport exigera une préparation très soignée et parfois la mise en place d'un insert. Le positionnement des pièces à assembler devra être assuré à l'aide d'un montage surtout si l'on soude sans métal où si l'on assemble des éléments de faible épaisseur.

2.8.3. Procédé MIG

Ce procédé fait intervenir une électrode fusible sous forme d'un fil continu la protection du métal fondu chaud étant assurée par un courant de gaz inerte. Le fil électrode contient les éléments d'alliage nécessaires à la réalisation de la composition du métal fondu.

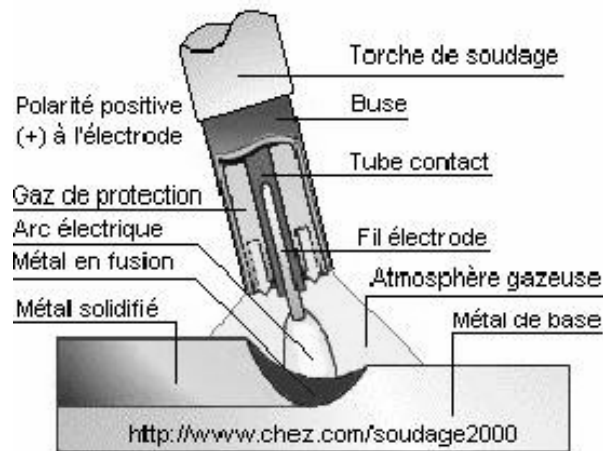


Figure 2.10 : Procédé de soudage en M.I.G / MAG

Les métaux d'apport utilisables pour le soudage MIG des aciers inoxydables austénitiques sont du même type que ceux employés en soudage TIG cependant, leur teneur en silicium est légèrement plus élevée pour améliorer la désoxydation du bain et le mouillage du métal de base. Le diamètre de fil du métal d'apport est de 1 mm.

➤ Conditions de soudage

En soudage MIG, trois procédures peuvent être employées chacune met en jeu un mode différents de fusion et de transfert du métal d'apport. Le soudage MIG permet une bonne adaptation aux situations en offrant une procédure rapide à grande pénétration et une procédure à faible énergie pour les premières passe et les soudages en position ainsi pour le soudage des produits minces dont on veut limiter la déformation. La procédure utilisant l'arc pulsé, bien qu'exige un matériel, doit permettre de réaliser de judicieuses combinaisons des possibilités des deux procédures.

2.9. Les procédés utilisés pour le soudage des aciers inoxydables

Les procédés T.I.G. (Tungsten Inert Gas), M.I.G. (Metal Inert Gas), le soudage plasma, le Faisceau d'Electrons et le LASER sont couramment utilisés et parfois même le soudage par friction. La soudure TIG permet de réaliser des joints en bout à bout sans

métal d'apport pour des épaisseurs de tôle allant jusqu'à 3mm. Les épaisseurs supérieures nécessitent des préparations de bords (chanfreins) et du métal d'apport. Il faut impérativement éviter que l'électrode ne touche le bain de fusion pour éviter toute absorption de tungstène.

Comme nous l'avons déjà dit, il faut assurer une protection du cordon de soudure et du métal adjacent jusqu'à ce que la température soit descendue sous 430°C afin d'éviter la contamination par l'air. Le soudage TIG ou MIG utilise de l'argon ou de l'hélium pour fournir une protection efficace qui se décompose en trois parties :

- La protection primaire du lit de fusion (effectuée par la buse de la torche TIG), la protection secondaire du cordon de soudure refroidissant et de la Z.A.T. (effectuée par un traînard de protection solidaire de la torche de soudage).
- La protection envers pour la face opposée de la soudure et de la Z.A.T. (traînard envers qui peut être mobile avec la torche).

Il arrive fréquemment que l'on réalise les soudures dans des boîtes à gants, zones hermétiquement fermées ou en surpression de gaz de protection, évitant les encombrants traînards.

Chapitre 3

Techniques Expérimentales

3.1. Introduction

L'étude proposée traite et perfectionne la compréhension du changement des différentes caractéristiques dans le cas de soudage TIG d'un acier inoxydable 304L avec comme métal d'apport le TGX 308L. Elle a pour but de caractériser les cordons de soudure obtenue par ce procédé. Elle permet d'établir les changements de ces nuances sur des plaques minces de différentes formes de cordon selon l'intensité du courant de soudage suivi d'une étude mécanique et métallurgique. Pour cela, on va présenter une synthèse sur les métaux de base et puis le matériel et les techniques expérimentales misent en jeu pour parcourir à ce but.

3.2. Identification du métal de base

La nuance du métal de base est de type AISI 304L. C'est un acier inoxydable austénitique, destiné au soudage avec une teneur en ferrite allant de 5 à 15% (norme ASTM). Des analyses de la composition du métal de base ont été faites au laboratoire de CSC de Chéraga. Ces résultats sont conformes avec ceux de la norme ASTM (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Composition chimique du métal de base 304L

Eléments	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	N	P	S
Teneur (%)	0,033	22	5,37	2,38	1,57	0,36	0,20	0,20	0,018	0,016

Ainsi, les caractéristiques mécaniques de notre acier sont représentées dans le Tableau 3.2 ci-dessous :

Tableau 3.2 Caractéristique mécanique du 304L

Rp (0,2) (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%	Masse volumique	Module D'élasticité Traction (10 ³ N/mm ²)

270	620	56	7,9	184
-----	-----	----	-----	-----

➤ **Aspect micrographique :**

La figure 3.1 montre la micrographie du métal de base. On voit qu'il se forme une matrice austénitique granulaire qui contient une certaine quantité de ferrite au niveau des joints des grains.

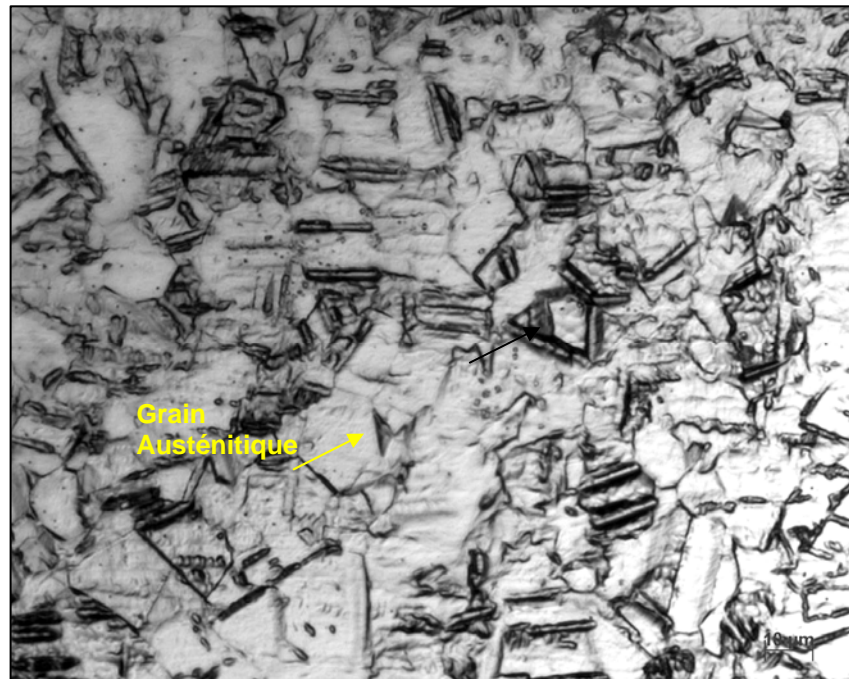


Figure 3.1 : Micrographie du métal de base

➤ **Calcul du taux de ferrite :**

Plusieurs formules ont été proposées pour calculer le pourcentage de ferrite dans les aciers austénitiques. Cette valeur est indispensable pour avoir une idée sur le taux de ferrite présent dans le métal de base. Dans notre cas on utilise la formule de **Tomas** :

$$\delta (\%) = (Ni)_{\max} - (Ni \%)$$

$$\text{Avec : } (Ni)_{\max} = 1/12 (Cr + 2Mo - 16)^2 - 1/2Mn + 30(0,10 C) + 12$$

D'où on aura $\delta (\%) = 21,8$

3.3. Choix du métal d'apport

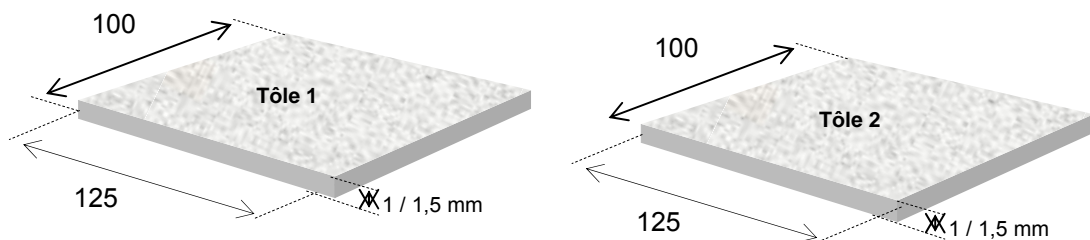
La nuance du métal d'apport utilisé est de type AISI 308 de diamètre 2mm. Ce dernier est choisi à cause de sa composition chimique et ces propriétés mécaniques pour que la teneur en ferrite déposer sur le métal soit de l'ordre de 10 à 20 %. Ce qui est très favorable pour diminuer le risque de fissuration dans la soudure. Le TGX 308L possède une composition chimique semblable à celle du métal de base, avec une teneur plus en Carbone ce qui favorise une bonne soudabilité. L'analyse chimique de notre métal d'apport a été réalisée au CSC de Chéraga (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Composition chimique du métal d'apport.

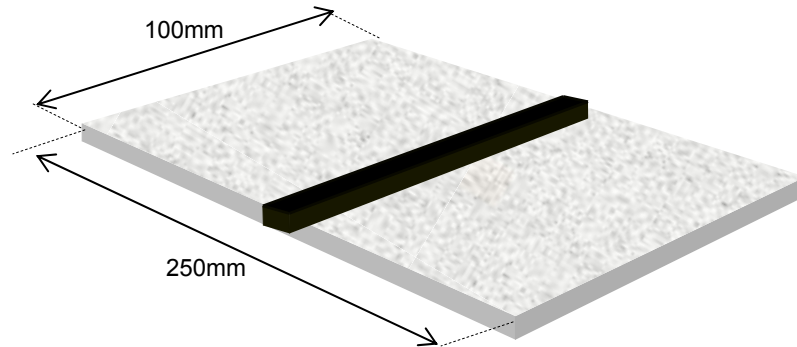
Eléments	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	N	P	S
Teneur (%)	0,039	22,25	8,55	3,29	1,57	0,39	0,1	0,10	0,001	0,008

3.4. Soudage des éprouvettes

Tous les procédés de soudage conventionnels peuvent être utilisés pour réaliser des travaux de soudures sur les aciers inoxydables. Dans notre cas, nous avons choisi le soudage TIG manuel. Ce dernier a l'avantage de la réalisation des cordons lisses, d'un belle aspect, exempts de défaut de surface et possédant une bonne compacité. De plus, il est conseillé pour le soudage des épaisseurs minces.



a\ dimensions des tôles avant soudure



b\ dimensions des tôles après soudure

Figure 3.2 : Présentation des tôles avant et après soudage

3.5. Essais mécaniques

L'objectif du travail présenté, est d'étudier les différentes caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, caractéristique d'élasticité et capacité d'allongement) de nos éprouvettes en acier inoxydable austénitique 304L soudés avec métal d'apport le TGX 308L. Pour réaliser cette étude, on a procédé à trois types d'essais mécaniques qui sont :

- Essais de traction jusqu'à la rupture
- Essais de déformation avant rupture
- Essais de micro-dureté

3.5.1. Principe de l'essai de traction

L'essai de traction est exécuté sur une éprouvette de forme et de dimensions déterminées. Un effort croissant, de façon continue, est exercé suivant l'axe de cette éprouvette, jusqu'à la rupture. L'éprouvette de traction se compose d'un corps prismatique de section circulaire ou rectangulaire, prolonger à ses extrémités par deux têtes permettant de la saisir dans les systèmes d'amarrage de la machine de traction.

Une machine de traction se compose de trois parties qui sont :

- Organe de fixation de l'éprouvette comportant deux parties, l'une fixe et l'autre mobile.
- Organe producteur de l'effort agissant sur la partie mobile
- Organe mesureur et enregistreur.

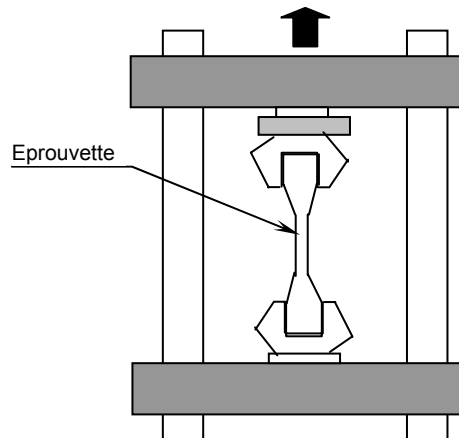


Figure 3.3 : Principe de fonctionnement d'une machine de traction

L'organe enregistreur fournit un diagramme « effort - déformation » sur lequel on observe trois principales phases qui sont (Figure 3.4):

- **Phase élastique** : L'éprouvette se déforme sous l'action de la charge et revient approximativement à sa longueur initiale si la charge est supprimée (ligne OB).
- **Phase plastique** : Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles (ligne BC).
- **Phase de striction** : La rupture de l'éprouvette qui est représentée par la lettre D.

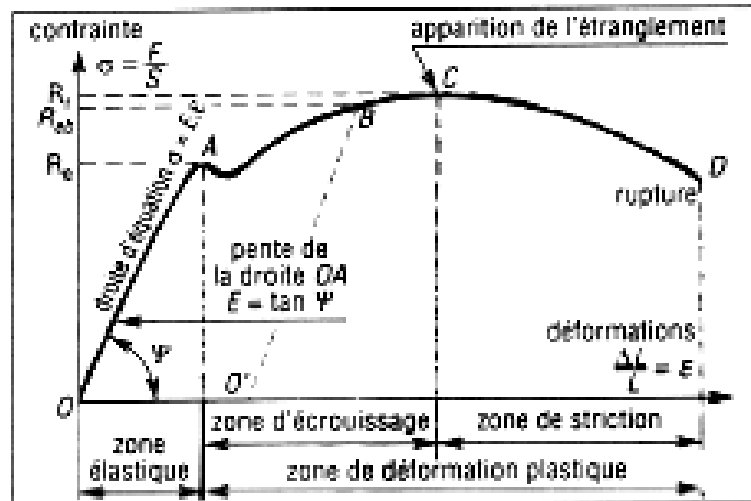


Figure 3.4 : Diagramme conventionnel de traction

L'essai de traction définit un ensemble de caractéristiques dont les principales sont :

- Limite d'élasticité : $Re = \frac{F_e}{S_0}$ avec : $\begin{cases} F_e : \text{Effort de la limite élastique} \\ S_0 : \text{Section initial } S_0 \end{cases}$

- Résistance à la rupture : $R_r = \frac{F_r}{S_0}$ avec : $\begin{cases} F_r : \text{Effort de l'effort rupture} \\ S_0 : \text{Section initial } S_0 \end{cases}$

- Allongement à la rupture : $R_r = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$ avec : $\begin{cases} L_u : \text{Longueur après rupture} \\ L_0 : \text{Longueur initiale} \end{cases}$

- Module d'élasticité ou module de Young : $E = \frac{F_r \cdot L_0}{S_0 \cdot a}$

avec a : l'allongement de la limite élastique

- La striction Z : C'est la variation de la section de l'éprouvette après rupture.

$$R_r = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad \text{avec : } \begin{cases} S_u : \text{Section de l'éprouvette après rupture} \\ S_0 : \text{Section de l'éprouvette initiale} \end{cases}$$

3.5.2. Eprouvette utilisée lors de l'essai de traction jusqu'à la rupture

L'éprouvette utilisée dans nos essais de traction est de forme rectangulaire et non comme en règle générale des éprouvettes à des têtes d'amarrage plus large que la partie calibrée à cause de l'épaisseur de notre tôle qui ne dépasse pas les 2mm. Les dimensions de notre éprouvette sont schématisées dans la figure ci-dessous :

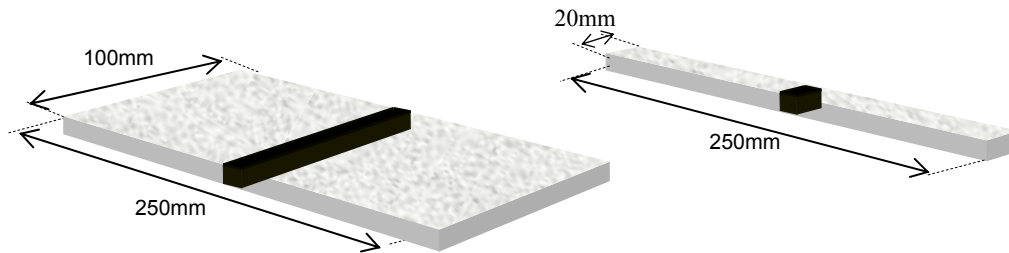
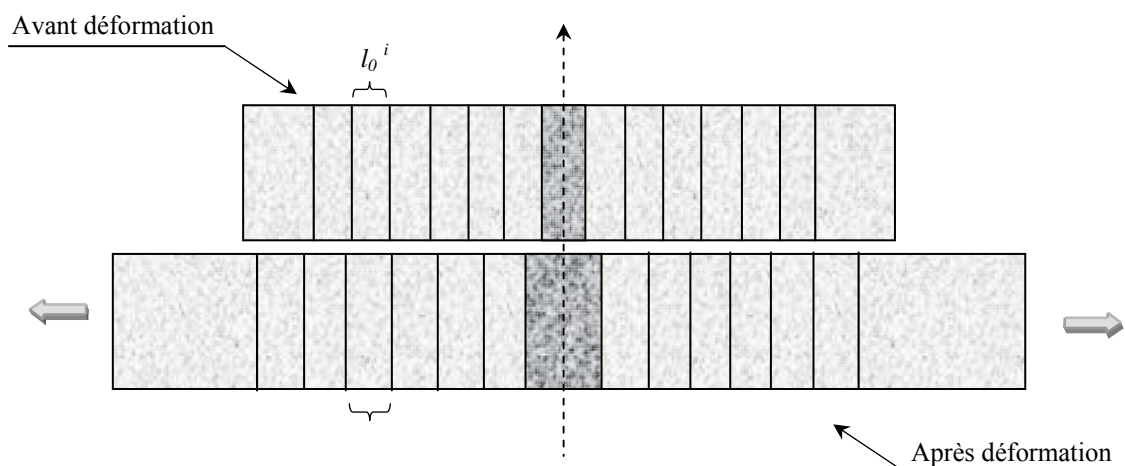


Figure 3.5 : Dimensions de l'éprouvette utilisée à la traction

3.5.3. Méthode de calcul de la déformation contrôlée

Lors de l'essai de traction, les ruptures des éprouvettes soudées se produisent généralement loin de la soudure à condition que cette dernière est faite selon les normes requiert.

Au cours de ce travail, on va proposer une méthode expérimentale de calcul de la déformation (inférieure à la déformation correspondant à la rupture) de l'éprouvette soumise à la traction, afin de prouver que la répartition du taux de déformation n'est pas la même en tout point de l'éprouvette.



$$\varepsilon_i = \frac{l^i - l_0^i}{l_0^i}$$

Figure 3.6 : Visualisation des grilles pendant la déformation

Cette méthode consiste en premier lieu, à faire un maillage c'est-à-dire traçage des grilles sur une couche de peinture déposée sur la surface de l'éprouvette des deux côtés de la soudure (zone fondue). Par la suite, l'éprouvette subit des déformations avant sa rupture. A la fin, on évolue l'écartement des mailles ou déplacement des grilles avant et après l'essai grâce à des logiciels spécifiques (CorelDraw, Autocad,...).

Le calcul de l'allongement total de l'éprouvette se fait grâce à la formule suivante :

$$\varepsilon_{TOT} = \frac{1}{n} \sum_i^n \varepsilon_i \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} n : \text{Nombre des grilles élémentaire} \\ \varepsilon_i : \text{Allongement des grilles} \end{array} \right.$$

3.6. Caractérisation mécanique

3.6.1 Méthodes d'examen métallographiques

La connaissance des propriétés des matériaux passe par la détermination des phases qui le composent, quand à leurs formes, leur distribution et leur qualité. Ces paramètres sont regroupés sous le nom de structure du matériau. La définition de la structure va dépendre de l'agrandissement auquel on observe, et il est donc important de préciser, lorsque l'on parle de structure, s'il s'agit de structure macroscopique ou microscopique.

a/- Macrographie

L'examen macroscopique (examen à l'œil nu) ou macrographique (examen avec une optique comme une binoculaire) permet de relever la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. Le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle, par dissolution à vitesse inégale, les hétérogénéités physiques et chimiques de la surface métallique examinée.

b/- Micrographie

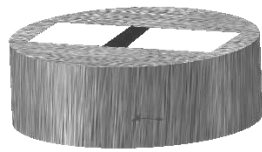
Cet examen a pour but de mettre en évidence la structure de l'échantillon (les changements structures dus à l'échauffement dans le cas des assemblages soudés) lors de l'observation au microscope optique. Les échantillons utilisés sont relevés de la tôle soudée selon l'axe (XY).

- ***Préparation de l'échantillon d'examen***

Les éprouvettes sont prises à partir des tôles soudées, la coupe est réalisée dans le sens transversal de la soudure, avec lubrification pour éviter l'échauffement. La surface à examiner est d'abord la surface naturelle de la pièce, c'est-à-dire sa périphérie est cassures éventuelles.

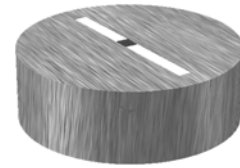
- ***Polissage de l'échantillon d'examen***

Le pré-polissage de la surface à examiner est réalisé avec une polisseuse sous eau et de disque abrasifs de granulométrie d'environ P200-P400-P600-P800-P1000-P1200. La vitesse de rotation est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. L'échantillon subit une rotation de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes. La durée de polissage est environ 2 minutes par granulométrie (Figure 3.7)



a) Echantillon placé horizontalement
verticalement

(T_H)



b) Echantillon placé

(T_V)

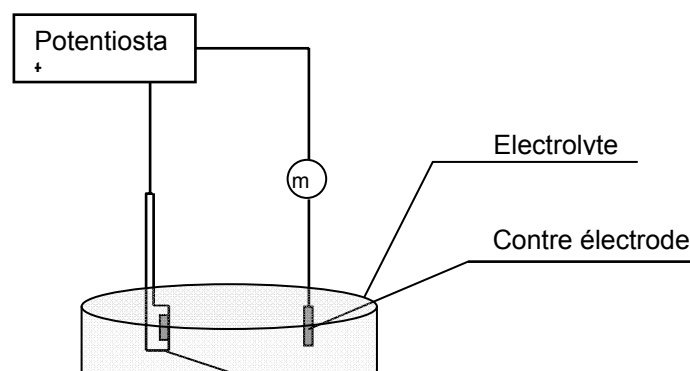
Figure 3.7 : Vue de l'échantillon d'examen après polissage et enrobage

- **Attaque chimique de l'échantillon d'examen**

L'attaque chimique est la dernière des opérations, elle vient après le polissage de finition. Elle permet de révéler les phases existantes au niveau de la microstructure de l'acier. Une fois que les surfaces des échantillons sont polies (état miroir), on procède à l'attaque chimique, la solution d'attaque défère d'un alliage à l'autre.

- **Attaque électrolytique**

Dans ce travail, on a utilisée l'attaque électrolytique, la dissolution électrochimique est de même type que la dissolution chimique, mais elle bénéficie d'un paramètre supplémentaire « le facteur électrique ». L'attaque électrolytique s'effectue avec un appareillage qui se compose d'un Becher de 1 à 2 litres contenant l'électrolyte avec un échantillon (anode) placé à quelques centimètres de la cathode en acier inoxydable (Figure 3.8).



+ -

Figure 3.8 : Attaque chimique électrolytique

Le tableau ci-dessous représente la désignation et la composition de notre solution d'attaque électrolytique

Tableau 3.4 : Désignation et composition de la solution d'attaque électrolytique

Désignation	Composition	Domaine d'application
Solution aqueuse d'acide oxalique	- 10 g d'acide oxalique - 100 ml d'eau Durée d'attaque électrolytique de 2 à 5 mn sous une tension de 9V	Examen de la structure des aciers inoxydables

3.6.2. Essai de dureté

Que ce soit pour une dureté Brinell, Rockwell ou Vickers, l'essai consiste à appliquer sur un échantillon, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable). La dureté est proportionnelle au quotient de la force « F », par l'aire « S » de la surface déformée par le pénétrateur sur le matériau. L'essai de micro-dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structurale. Elle permettra par la suite de limiter le nombre d'éprouvettes de tractions nécessaires à une caractérisation complètes des propriétés plastiques des différents états de structure. Dans notre cas, l'essai utilisé est la méthode Vickers, qui convient bien à des grands intervalles les plus faibles au plus élevées (Figure 3.9).

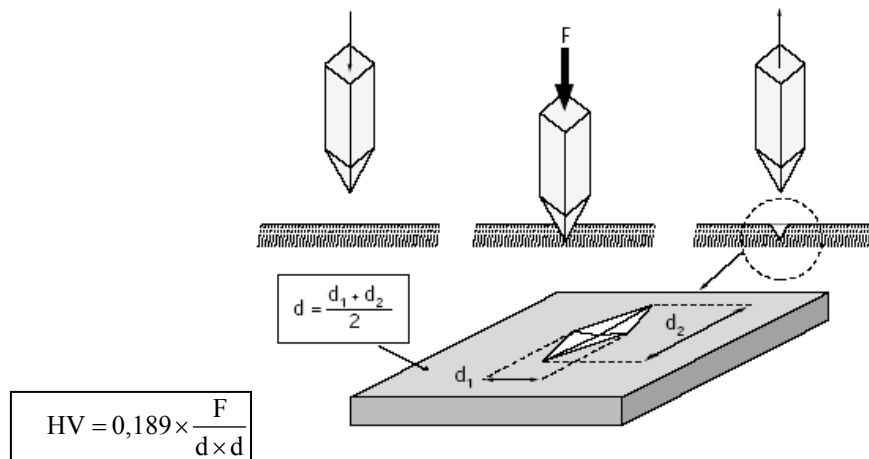


Figure 3.9 : Représentation schématique de l'essai de Vickers

3.6.3. Essai de micro-dureté

Une bonne précision dans une surface donnée dont il y a une possibilité de changement de phase ou d'existence des composés intermétalliques ou de carbures, nécessite un essai de micro-dureté. L'établissement du profil de micro dureté a pour but de confirmer et de compléter l'examen micrographique.

- La charge : $F = 200 \text{ gf}$
- Le Pas : $P = 250 \text{ } \mu\text{m}$

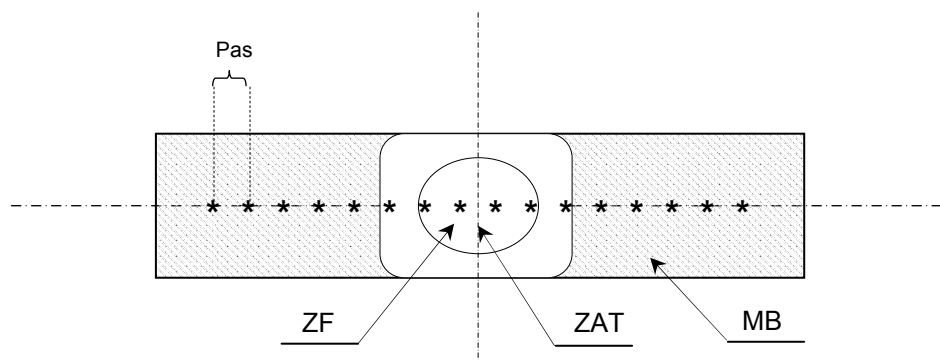


Figure 3.10 : Profil de micro durezza

La lecture des micro-durezza est obtenue gràce à un dispositif de lecture microscopique incorporé à un microscope. Donc l'utilisateur de ce microscope doit introduire les deux diamètres de l'empreinte comme lecture. Ces données à leur tour seront stockées dans une mémoire machine. Cette dernière et gràce à des pièces intelligentes calculent automatiquement la micro durezza. Ce procédé demeure efficace gràce à des précisions des résultats obtenus presque le seul risque d'erreur est la lecture de la part de l'utilisateur. Donc de cette façon, on a relevé pour chaque échantillon des résultats représentés dans des tableaux.

Chapitre 4

Résultats et interprétations

4.1. Introduction

Les résultats expérimentaux présentés dans ce travail sont interprétés en fonction des différents paramètres qui interviennent dans la réalisation d'un joint de soudure lors d'une séquence de soudage par TIG. Ces paramètres sont, l'intensité du courant de soudage variant dans une fourchette allant de 38A à 60A, ainsi que l'épaisseur des tôles a souder 1mm et 1,5mm.

4.2 Choix des intensités de courant.

Etant donné que notre travail consiste à étudier l'influence de l'intensité de courant sur les propriétés structural et mécanique du cordon de soudure, les intensités ont été choisies de telle manière à couvrir en plage assez importante (38 – 60 A) avec des intervalles de 10 ampères en moyenne, en prenant en considération la faisabilité et la possibilité de réaliser l'assemblage. Le tableau ci-dessous montre les différentes valeurs.

	Epaisseurs (mm)	Intensité (A)
Eprouvette 1 (H +V)	1.5	38
Eprouvette 2 (H +V)	1.5	48
Eprouvette 3 (H +V)	1.5	58
Eprouvette 4 (H +V)	1.5	60

Tableau 4.1 Les valeurs d'intensités choisis

4.3. Caractérisation métallographique

Dans cette partie on va représenter la microstructure des cordons de soudure des éprouvettes obtenues pour les intensités de courants (Tableau 4.1) et la macrostructure de l'éprouvette du cordon de soudure obtenue avec une intensité de courant de 60 A.

4.3.1. Analyse micrographique

Les figures ci – dessous représentent les différentes zones (zone fondue, zone de liaison, la zone affectée thermiquement et le métal de base) des cordons de soudure.

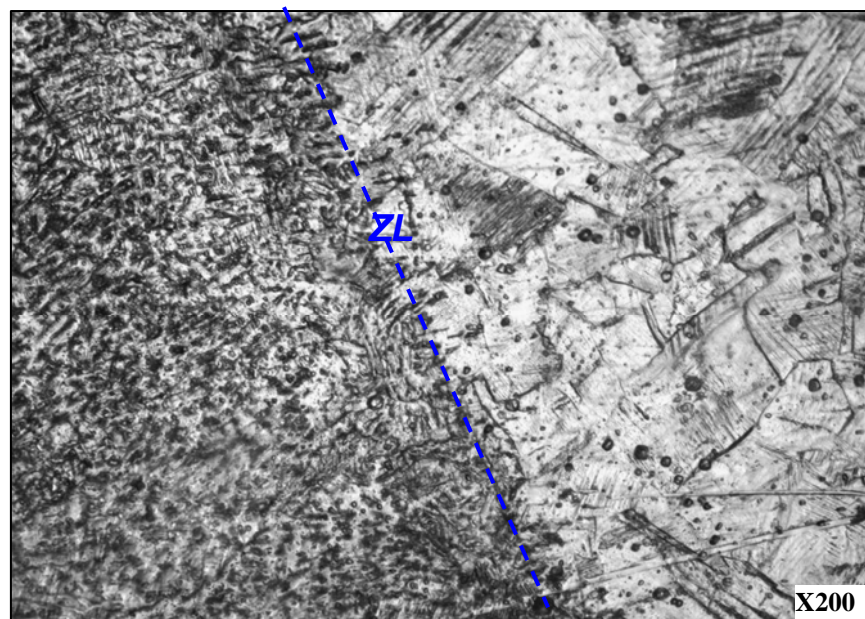


Figure 4. 1 : Micrographie optique d'une éprouvette soudée à $I= 38A$ avec $e=1,5$ mm

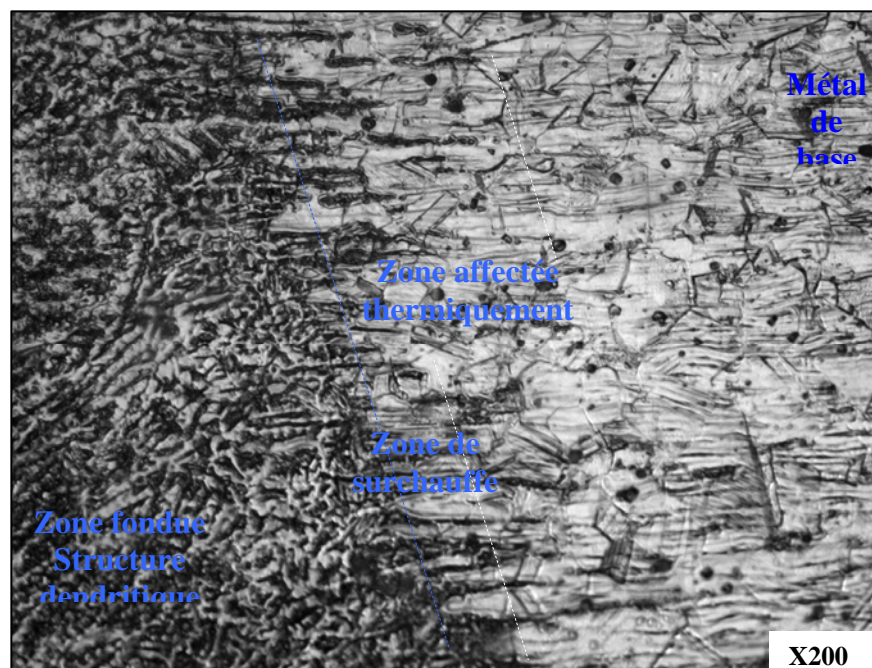


Figure 4. 2 : Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I=48A avec
e=1,5mm

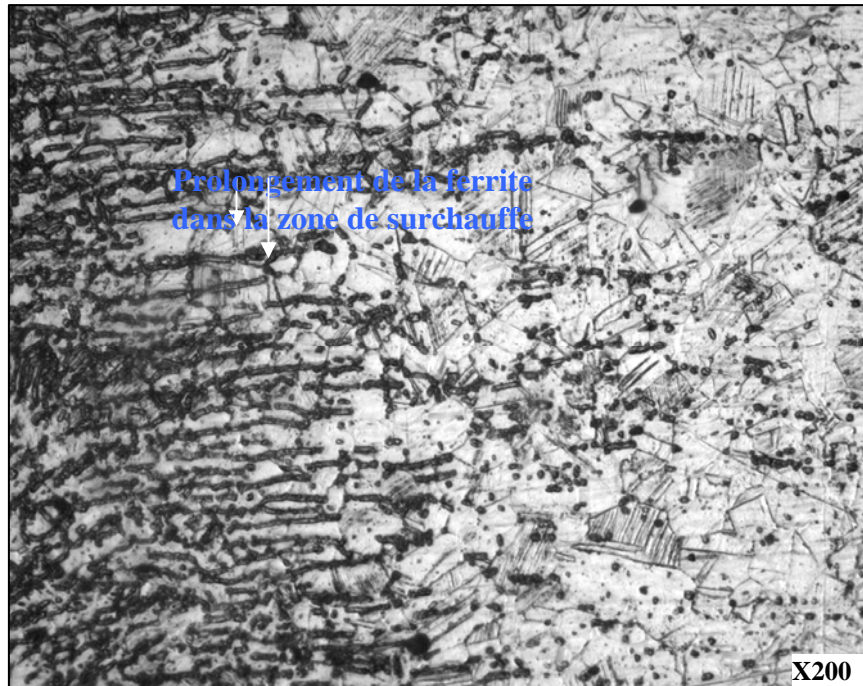


Figure 4. 3 : Micrographie optique d'une éprouvette soudée à I=58 A avec
e=1.5mm

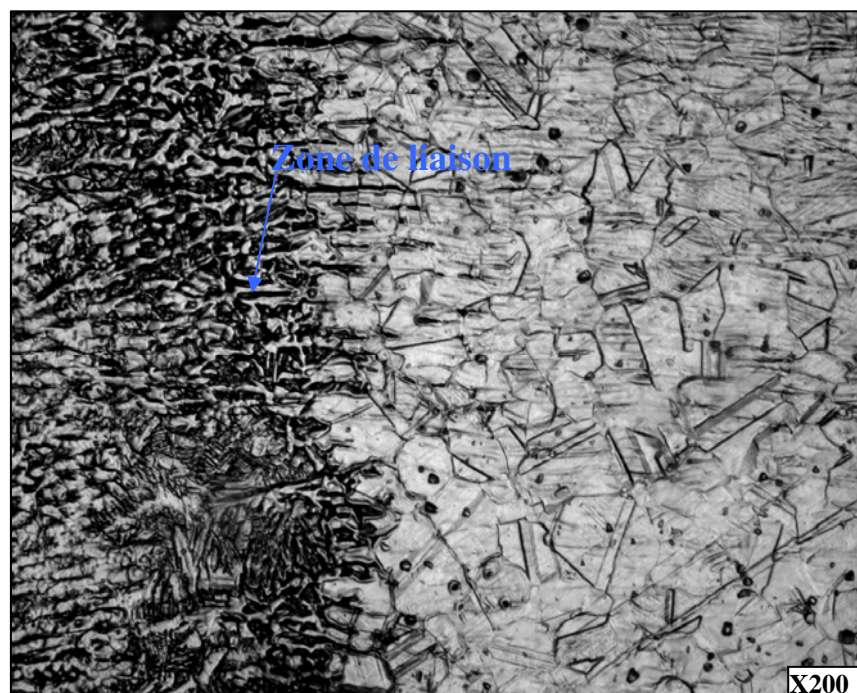


Figure 4. 4 : Micrographie optique d'une éprouvette soudée à $I= 60A$ avec $e=1.5$ mm

Nous remarquons la présence d'un étendu de la phase ferritique au niveau de la zone de surchauffe (ZAT surchauffé) et un grossissement de grain relativement remarquable. Pour les ampérages les plus élevés le prolongement de la ferrite sous forme de bandes est plus remarquable cela peut être explique par l'apport de chaleur qui est plus important pour les intensité les plus élevées

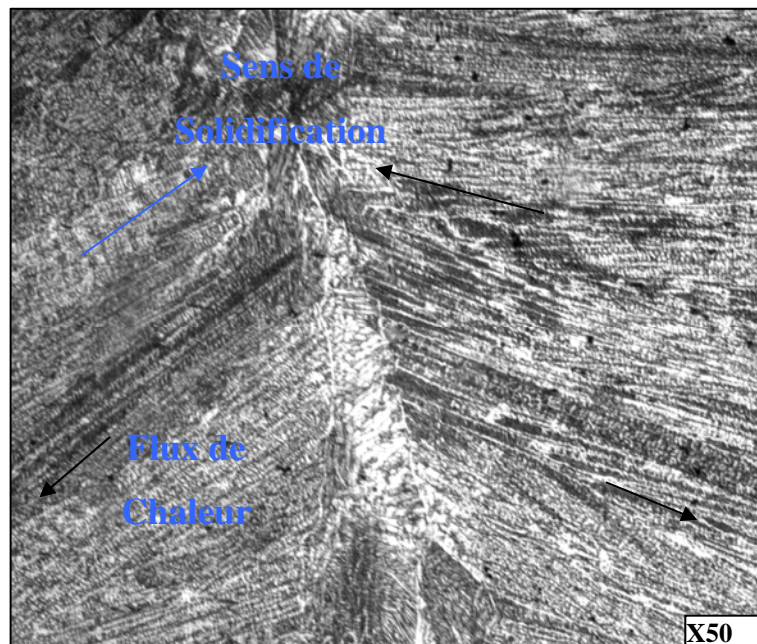


Figure 4. 5 : Micrographie d'une éprouvette horizontale soudée à $I=58 A$ avec $e=1.5mm$

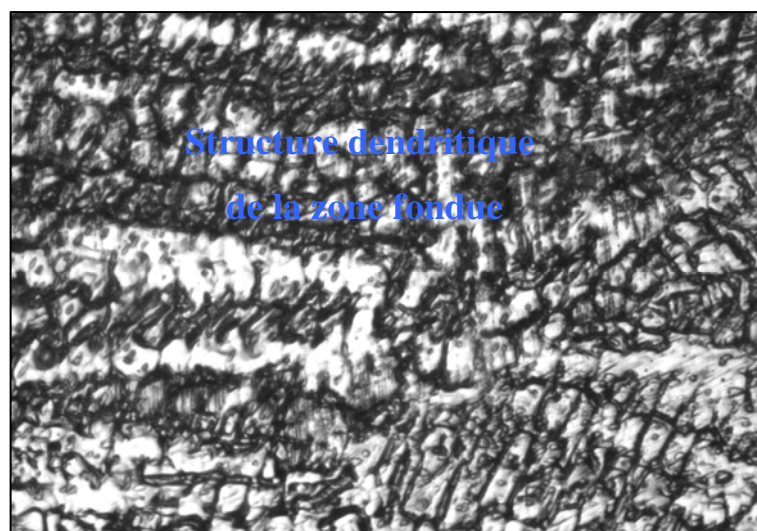


Figure 4. 6 : Zone fondue d'une éprouvette verticale soudée à $I = 60A$ avec $e = 1,5$ mm

Les Figures 4.5 et 4.6 représentent les micrographies prises dans le sens horizontal du cordon. Dans la Figure 4.5, on représente une micrographie d'une structure dendritique dans laquelle on remarque un sens privilégié des dendrites dirigés le sens de solidification orienté généralement suivant le sens de la propagation du flux de chaleur. La Figure 4.6 représente la structure dendritique brute de solidification ;

4.3.2. Analyse macrographie

Les joints soudés sont constitués de trois zones principales; la Zone fondue (ZF), la Zone affectée thermiquement (ZAT) et le Métal de base (MB). Ces dernières sont représentées dans la figure ci-dessous :

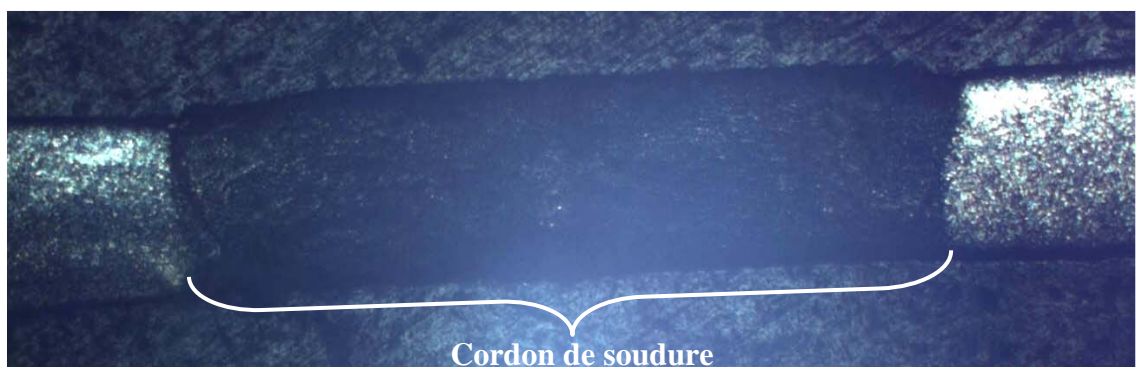


Figure 4. 7 : Représentation des trois zones d'un cordon de soudure

D'après l'observation macrographique (Figure 4.7), les dimensions des différentes zones du cordon de soudure sont données dans le tableau suivant :

±

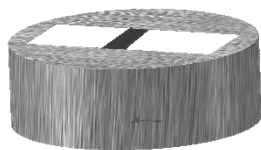
Tableau 4.2 : Dimensions de la ZAT et ZF d'un cordon de soudure

	Eprouvette Soudée I = 30 A	Eprouvette Soudée I = 58 A	Eprouvette Soudée I = 60 A
Z F (mm)	1,85 ± 2,00	1,50 ± 2,00	1,80 ± 1,90
Z A T (mm)	1,5 ± 1,70	2,50 ± 2,70	1,80 ± 2,00

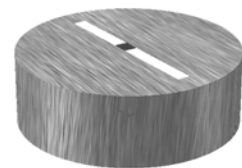
4.4. Caractérisation mécanique

4.4.1. Essais de micro – dureté

Pour mettre en évidence l'influence de l'intensité de courant de soudage sur la dureté du joint soudé, des mesures de micro – dureté Vickers ont été prises pour des éprouvettes soudées à différentes intensité de courant (I=38A, 48A, 58A et 60A). Pour une étude plus profonde des échantillons de cordon de soudure ont été prélevés dans le sens horizontal c'est-à-dire parallèle au cordon de soudure, ainsi que dans le sens vertical (perpendiculaire au cordon de soudure). Les essais de micro – dureté ont été réalisées en suivant un profil de point partout de la zone fondue (ZF) vers le métal de base (MB).



a\ Echantillon placé horizontalement (T_H)
(T_V)



b\ Echantillon placé verticalement

Figure 4.8 : Vue de l'échantillon d'examen après polissage et enrobage

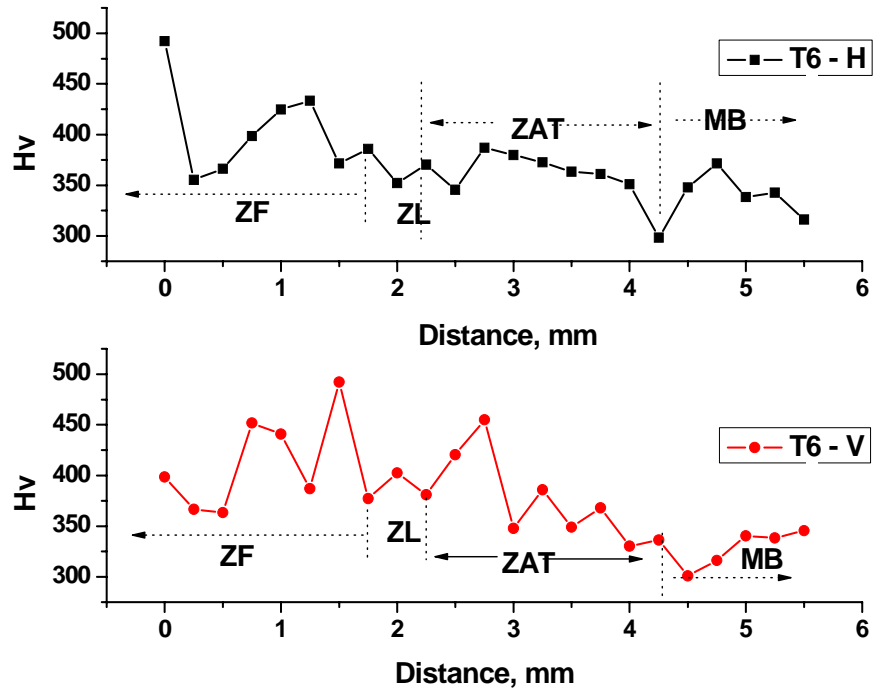


Figure 4.9 : Profile de micro - dureté pour $I=38\text{ A}$ et $e=1,5\text{ mm}$

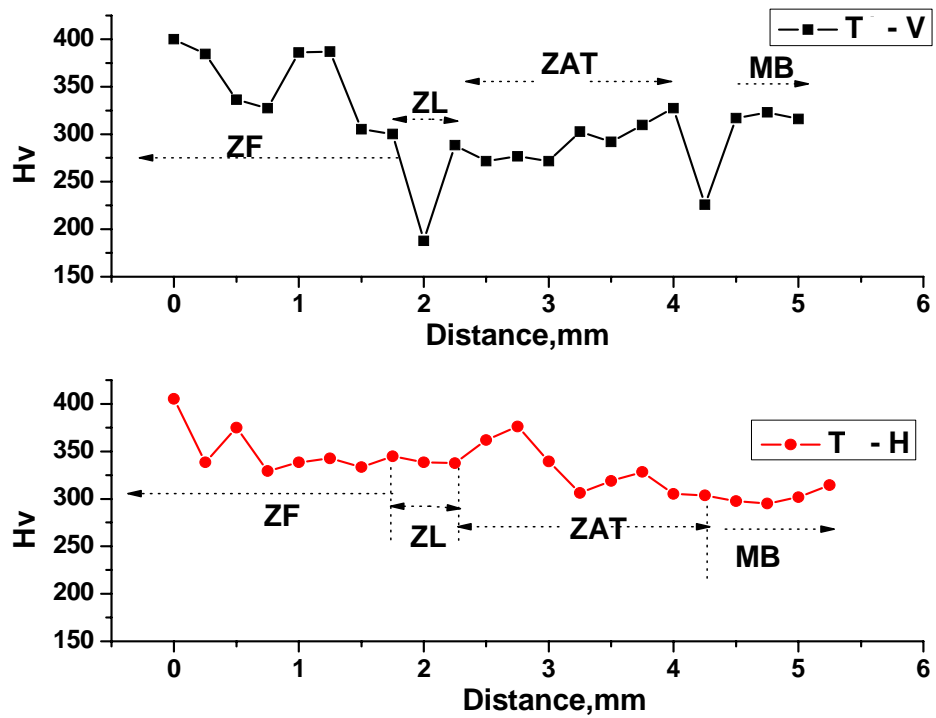


Figure 4.10 : Profile de micro - dureté pour $I=48\text{ A}$ et $e=1,5\text{ mm}$

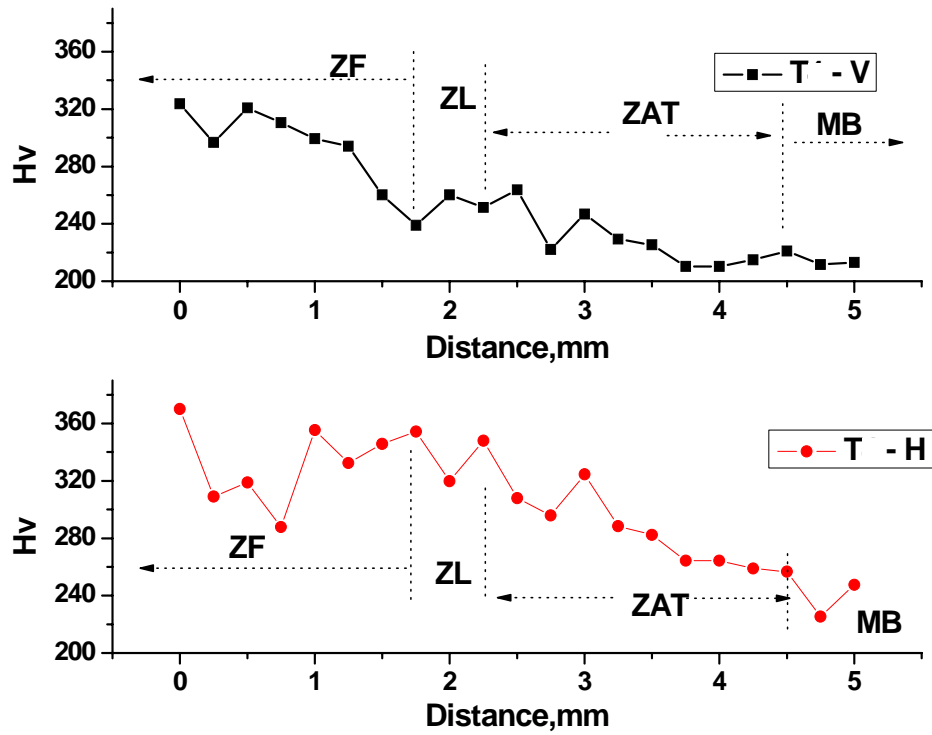


Figure 4.11 : Profile de micro - dureté pour $I= 58$ A et $e = 1,5$ mm

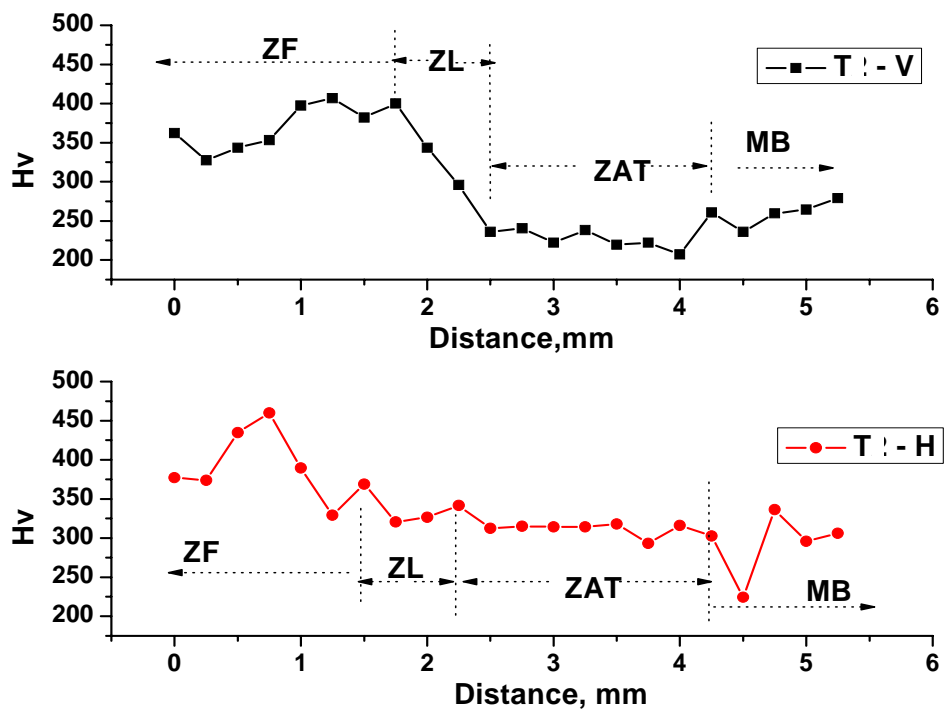


Figure 4.12 : Profile de micro - dureté pour $I= 60$ A et $e = 1,5$ mm

La dureté observée au niveau du métal de base pour toutes les éprouvettes dans le sens vertical sont plus élevées que celles indiquées pour la phase austénitique en générale, par contre les valeurs prisent dans le sens horizontal sont dans la marge des 300 Hv. Les valeurs de duretés les plus élevés sont localisée au niveau de la zone fondue, cette élévation de dureté est due à la structure de la zone fondue qui, dans les aciers inoxydables austénitique se solidifie selon un mode ferritique, c'est-à-dire la structure finale après solidification est obtenue par une transformation totale du liquide en ferrite delta puis suivi d'une transformation à l'état solide de la ferrite vers l'austénite, une proportion élevée de ferrite résulte de ce fait, d'autre par les orientations multiples des dendrites dans des directions divers accentue le durcissement. On examinant tous les profils moyen on remarque un durcissement au niveau de la ZF. Les fluctuations des valeurs sont observées, à cause de l'hétérogénéité locale de la structure (densité des joints des grains, présence d'inclusions ou des précipités.

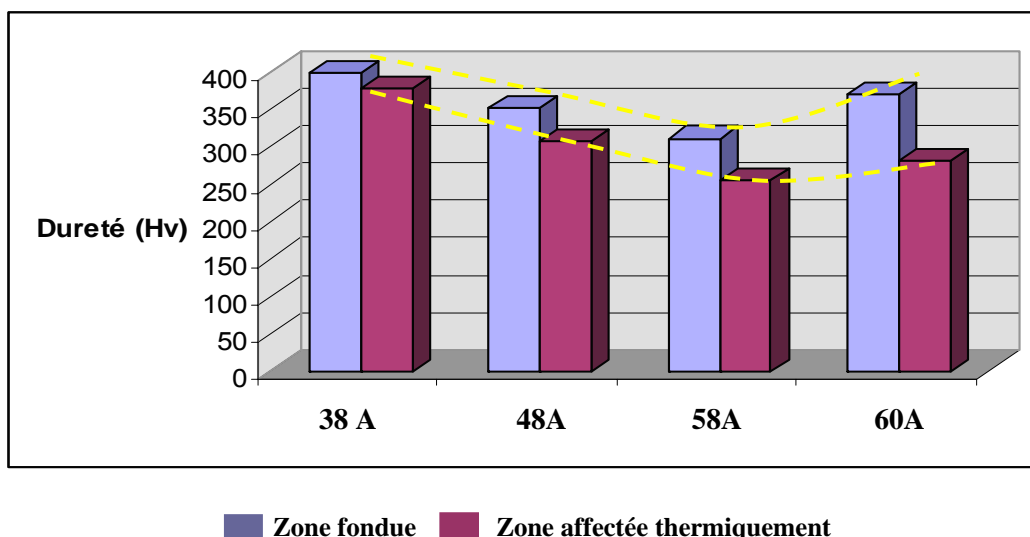


Figure 4. 13 : Représentation de la micro – dureté dans les trois zones
Dans le sens horizontal

L'allure de l'histogramme de la figure 4.12, montre que la dureté diminue lorsqu'on augmente l'intensité de courant de soudage par TIG de notre acier inoxydable 304L jusqu'à l'intensité de 60A où une augmentation de la dureté est remarquée. Pour les intensités de courant de soudage 48A et 58A, la dureté est comprise entre 300 et 350 Hv qui est proche de la dureté du métal de base. Ces valeurs d'intensités assurent donc une continuité des propriétés du joint soudé. On conclut, si on veut avoir un bon cordon de soudure pour un acier inoxydable 304L avec le procédé TIG, il est recommandé de choisir une intensité de courant de soudage comprise entre [48A,58A].

4.4.2. Essai de traction

D'après les résultats de la micro – dureté obtenus précédemment, on a remarqué que si on veut avoir un bon cordon de soudure pour un acier inoxydable 304L avec le procédé TIG, il est recommandé de choisir une intensité de courant de soudage comprise entre [48A,58A]. C'est pourquoi, on a choisi de faire l'essai de traction pour une éprouvette soudée avec une intensité de courant $I=58A$ et une épaisseur $e=1,5mm$.

Les résultats de tractions jusqu'à la rupture effectués sur différentes éprouvettes sont donnés ci-dessous :

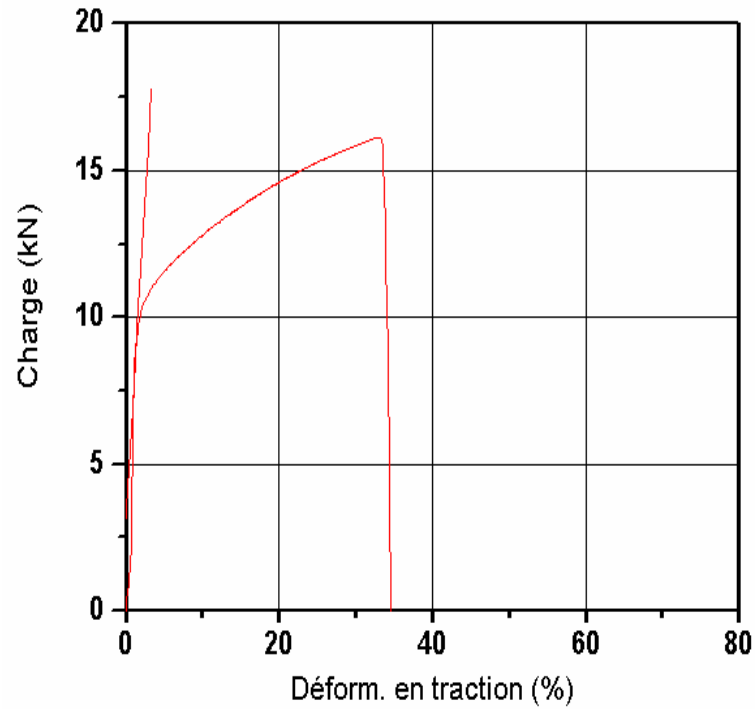


Figure 4.14 : Courbe de rupture par traction d'une éprouvette non soudée pour $e = 1,5$ mm

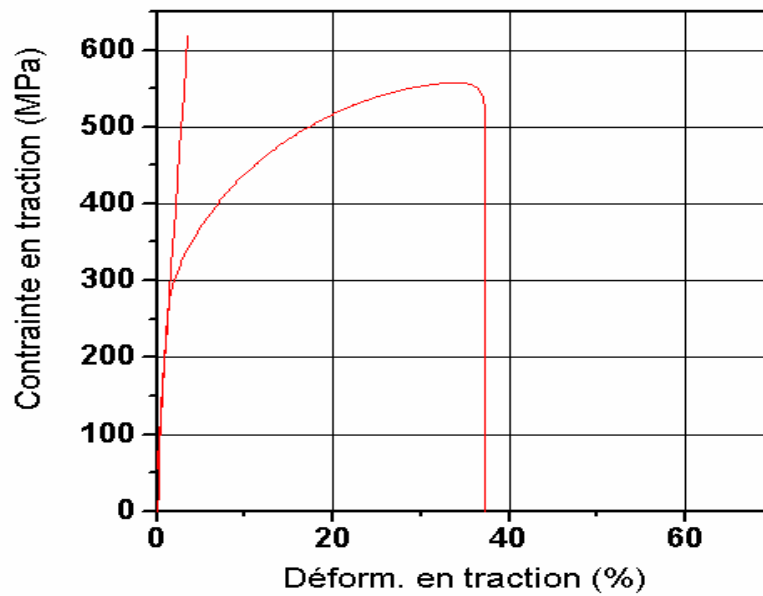


Figure 4.15 : Courbe de rupture par traction d'une éprouvette soudée pour $e = 1,5$ mm

Tableau 4.3 : Caractéristiques des éprouvettes données par l'essai de traction

Eprouvette	Epaisseur (mm)	Dureté (Hv)	Contrainte max (Mpa)	Déformation à la rupture (%)
Non Soudée	1,5	300 - 370	533 - 545	52 - 53
Soudée	1,5	350 - 450	560 - 565	32 - 38

D'après les résultats de l'essai de traction de l'éprouvette d'épaisseur 1,5mm soudée avec une intensité de 58A, on a trouvé que la contrainte maximale varie entre [550,565] et pour l'allongement à la rupture entre [32,38]. Alors que pour une structure non soudée (métal de base) où la contrainte maximale varie entre [533,545] et pour l'allongement à la rupture entre [52,53]. On constate que la contrainte maximale de l'éprouvette soudée est nettement supérieure à celle de l'éprouvette non soudée. Alors que pour l'allongement on voit bien qu'elle est supérieure dans le cas de l'éprouvette non soudée par rapport au cas de soudée. Ce qui confirme les résultats de la micro – dureté.

4.5. Essai de la déformation contrôlée

Un essai mécanique de déformation selon le mode de chargement décrit ultérieurement a été réalisés sur une éprouvette de forme rectangulaire soudée par TIG a donné les résultats présentés dans le tableau et le graphe suivant :

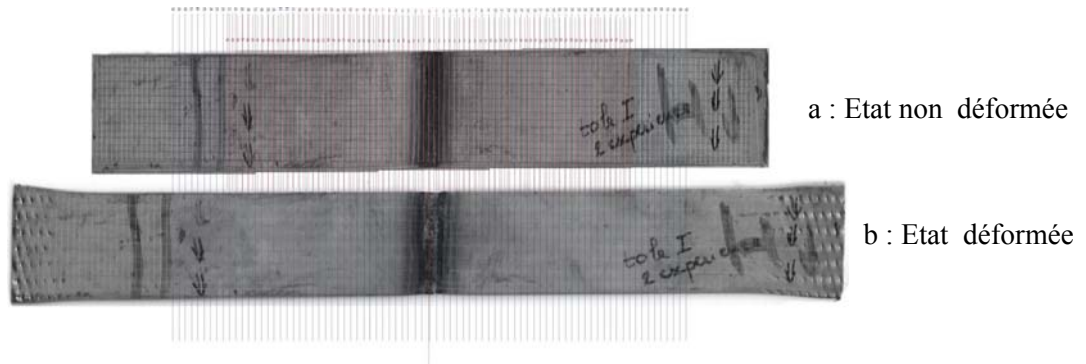


Figure 4.16 : Eprouvette soudée déformée à 27%

Le tableau 4.5 donne les valeurs de la déformation en fonction de la position x. Ainsi, ces valeurs peuvent être illustrées dans le graphe de la figure 4.17

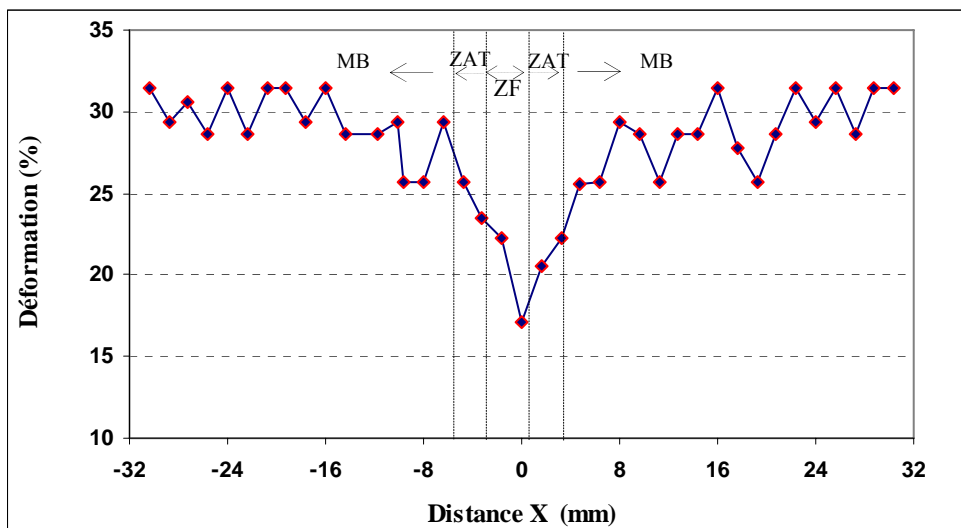


Figure 4.17 : Variation de la déformation en fonction de la position

Tableau 4.5 : Variation de déformation élémentaire d'une éprouvette soudée déformée à 27%

Position X (mm)	Tailles des mailles (mm)		Déformation Élémentaire (%)
	Avant déformation	Après déformation	
-30,40	3,5	4,4	31,43
-28,80	3,4	4,4	29,41
-27,20	3,6	4,5	30,56
-25,60	3,5	4,5	28,57
-24,00	3,5	4,4	31,43
-22,40	3,5	4,5	28,57
-20,80	3,5	4,4	31,43
-19,20	3,5	4,4	31,43
-17,60	3,4	4,4	29,41
-16,00	3,5	4,4	31,43
-14,40	3,5	4,5	28,57
-11,80	3,5	4,5	28,57
-10,20	3,4	4,4	29,41
-9,60	3,5	4,4	25,71
-8,00	3,5	4,4	25,71
-6,40	3,4	4,4	29,41
-4,80	3,5	4,4	25,71
-3,20	3,4	4,2	23,53
-1,60	3,6	4,4	22,22
0,00	3,5	4,4	17,14
1,60	3,4	4,1	20,59
3,20	3,6	4,4	22,22
4,80	3,4	4,3	25,58
6,40	3,5	4,4	25,71
8,00	3,4	4,4	29,41
9,60	3,5	4,5	28,57
11,20	3,5	4,4	25,71
12,80	3,5	4,5	28,57
14,40	3,5	4,5	28,57
16,00	3,5	4,4	31,43
17,60	3,6	4,6	27,78
19,20	3,5	4,4	25,71
20,80	3,5	4,5	28,57
22,40	3,5	4,4	31,43
24,00	3,4	4,4	29,41
25,6	3,5	4,4	31,43
27,2	3,5	4,5	28,57
28,8	3,5	4,4	31,43
30,4	3,5	4,4	31,43

Le calcul de l'allongement total de l'éprouvette se fait grâce à la formule suivante :

$$\varepsilon_{TOT} = \frac{1}{n} \sum_i^n \varepsilon_i \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} n : \text{Nombre des grilles élémentaire} \\ \varepsilon_i : \text{Allongement des grilles} \end{array} \right.$$

D'où on aura $\varepsilon_{TOT} = 27,99 \%$

La figure 4.17, montre la variation de la déformation en fonction de la distance x de l'éprouvette soudée d'épaisseur de 1.5mm. On remarque que la plus faible déformation est observée au niveau de la zone fondue (ZF) puis elle augmente tout on s'éloignons de la ZF vers la ZAT, puis elles se stabilise dans le métal de base. Ces résultants coïncidents bien avec ceux de la dureté. La différence de déformation d'une zone à une autre s'explique par les transformations structurales qui ont lieu au cours de soudage, induisant microstructures propres à chaque zone, c'est la raison pour laquelle la rupture se localise loin du cordon de soudure. En effet, la microstructure de la zone fondue possède une solidification dendritique avec un taux de ferrite supérieur à celui du métal de base.

CONCLUSION

L'évolution de la formation d'un joint de soudure et les changements associés à cette formation au cours d'une soudure par TIG de tôles minces a fait l'objet de plusieurs travaux analytiques et expérimentaux. Ces travaux effectués permettent de mieux comprendre l'effet des différents paramètres qui interviennent dans la formation d'un cordon de soudure, afin de pouvoir optimiser les conditions qui déterminent une qualité de joint de soudure répondant aux caractéristiques mécaniques les plus appropriées.

Dans notre travail, on a abordé deux volets principaux afin de pouvoir analyser l'évolution du cordon de soudure réalisé par le procédé TIG des tôles d'acier inoxydable 304L.

Le premier volet est consacré à la réalisation pour différents ampérages du cordon de soudure avec un métal d'apport TGX 308L pour deux types d'épaisseurs 1mm et 1,5mm sur l'acier inoxydable. Le deuxième volet du travail consiste à l'étude métallurgique, traction et la déformation.

Les résultats expérimentaux, montrent que le meilleur ampérage se situe dans l'intervalle [48A,58A]. Dans ce domaine, les valeurs de la micro – dureté des trois zones en l'occurrence la zone fondue (ZF), la zone de liaison (ZI) et le métal de base (MB) sont très proches ce qui assurent donc une continuité du métal pour les deux épaisseurs 1mm et 1,5mm. L'étude de la traction montre que la contrainte maximale d'une éprouvette soudée est nettement supérieure celle de l'éprouvette non soudée. Alors que pour l'allongement on voit bien qu'elle est supérieure dans le cas de l'éprouvette non soudée par rapport au cas de l'éprouvette soudée. Ce qui confirme les résultats de la micro – dureté.

L'étude de la déformation a montré que cette dernière augmente de la zone fondue vers le métal de base en passant par la ZAT ce qui prouve que la rupture si elle aura lieu sera localisée dans le métal de base. Ceci confirme la bonne qualité du cordon de soudure réalisé. Une étude plus poussée de l'intensité de courant localiser dans l'intervalle [48A,58A] permet de donner avec plus de précision l'ampérage optimale pour le soudage

REFERENCES

1. Saf , “Les procédés de soudage,” Centre de formation du soudage, N°1515-9406, 1994.
2. Cetim., “Mécanosoudage,” ISBN 2-85400-146-X, 1989.
3. J.F.Lancaster , “The Physics of Welding,” Pergamon Press, ISBN 0-08-030554-7, 1983.
4. C.R.Heiple, J.R.Roper , “Effect of Selenium on GTAW Fusion Zone Geometry,” Welding Research Supplement, PP.143-145, August 1981.
5. K.C.Mills, B.J.Keene, R.F.Brooks, A.Olusanya, “The Surface Tension of 304 and 316 Type Stainless Steel and their Effect on Weld Penetration,” Proc. Centenary conference metallurgy department, University of Strachclyde, Glasgow, June 1984.
6. G.Lo , “PhD Dissertation,” Rensselaer polytechnic Institute, Troy, Ny, August 1986.
7. C.R.Heiple, J.R.Roper , “Effect of SO₂ Shielding Gas Addition on GTA Weld Shape Welding,” Welding Research Supplement, PP.159-162, 1985.
8. G.W.Oyler, R.A.Matuszek , C.R.Gaar , “Why some heats of stainless steel may not weld,” Welding Journal 46, December 1967.
9. S.M.Gurevich, Ya.Yu.Kompman, Yu.K.Novikov , “Technological Possibilities of Electroslag Welding of Titanium Alloys,” Int. Conference on Titanium, , PP.1259-1279, Moscow, 1976.
10. “Gas Tungsten Arc Welding,” American Welding Society, Welding Handbook, 8th Edition, Vol II, ISBN : 0-87171-354-3, PP.73-107, 1991.
11. A.Debugne L.Z., “Caractéristique de l’électrode de tungstène en soudage TIG,” Soudage et Techniques Connexes, Vol.50 - N° 11/12, PP.9-32, Nov./Dec, 1996.
12. J.K.Key, J.W.Chan, M.E.Mcilwain , “Process Variable Influence on Arc Temperature Distribution, “ Welding Research Supplement, PP.179-184, July, 1983,
13. K.C.Mills, B.J.Keen , “Factor Affecting Variable Penetration”, Internationals Material Reviews, Vol.35, N°4, PP.185-216, 1990.
14. J.Binard, “Etude de l’influence de la nature et de la forme des électrodes réfractaires sur la forme du bain de fusion,” Rapport d’étude n°213, CREUSOT-LOIRE, Centre d’Application des Techniques de Soudage, Août 1979.
15. W.Savage, S.Strunck, Y.Ishikawa, “The Effect of Electrode Geometry on Gas Tungsten Arc Welding,” Welding Journal Research Supplement, , PP.489 – 496, November, 1965.

16. S.Marya, A.Elahouel, F.Le Maitre, "Effect of process parameters on GTA welding of Titanium TA6V alloys," Proc. 6th World conference on Titanium, Cannes, Ed. de Physique, PP.1221-1226, juin, 1988.
17. A.Elahouel, "Contribution au soudage du titane et de son alliage TA6V - Etude technologique et métallurgique," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1990.
18. G.Habchi, S.Marya , "Effect of electrode geometry on the weld solidification cracking of two stainless steels in GTA welding," Scripta Metallurgica, Vol 20, PP. 207-213, 1986.
19. G.Habchi, "Étude métallographique de la fissuration solidification des quelques aciers inoxydables austénitiques et de quelques alliages d'aluminium en relation avec les paramètres de soudage TIG," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Juillet, 1984.