

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Résumé

ملخص

Abstract

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre 1 : Soudage à l'arc

1. Introduction	02
2. Bref historique de soudage	02
3. Définition de soudage	03
3.1. Soudage (défini précédemment)	03
3.2. Brasage (au-dessus de 450°C) ou le brasage tendre (au dessous de 450°C)	03
3.3. Soudo-brasage	04
4. Classification des procédés de soudage	04
4.1. Soudage par fusion	06
4.2. Soudage par pression.....	07
5. Soudage à l'arc	07
5.1 L'arc électrique	07
5.2 Nature de courant	09
5.2.1. Courant continu	09
5.2.2 Courant alternatif	09
5.3. Procédés de soudage à l'arc	09
5.3.1. Soudage à l'électrode enrobée	09
5.3.1.1. Définition	09
5.3.1.2. Domaines d'application et avantages	10
5.3.2. Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre (Submerged Arc Welding, SAW)	10
5.3.2.1. Définition	10

5.3.2.2. Domaines d'application et avantages	10
5.3.3. Soudage à électrode de tungstène non fusible ou avec électrode réfractaire (Tungstun Inert Gas, TIG)	10
5.3.3.1. Définition	10
5.3.3.2. Domaines d'application et avantages	11
5.3.4. Le soudage avec électrode fusible (GasMetal Arc Welding, GMAW)	11
5.3.4.1. Définition	11
5.3.4.2. Domaines d'application et avantages	11
6. Le procédé de soudage MIG/ MAG	12
6.1. Les principaux modes transfert du métal en MIG/MAG.....	14
6.1.1. Transfert par court-circuit (short arc)	14
6.1.2. Transfert par pulvérisation axiale (projected spray)	15
6.1.3. Transfert globulaire (globulartransfer)	16
6.2. Paramètre de soudage en MIG/MAG	18
7. conclusion	18

Chapitre 2 : les aciers inoxydables

1. Introduction	19
2. Généralités.....	19
3. Historique.....	19
4. Propriétés et applications	20
5. Classification des aciers inoxydables	20
5.1. Aciers inoxydables ferritiques	20
5.2. Aciers inoxydables martensitiques	20
5.3. Aciers inoxydables Austénitiques	21
5.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques	22
5.5. Aciers inoxydables à durcissement	22
6. Soudage des aciers inoxydables	22
6.1. Soudage des Aciers Inoxydables Standards Austénitique	23
6.2. Soudage des Aciers Inoxydables Ferritiques-Austenitiques	23
6.3. Soudage des Aciers Inoxydables Ferritiques	24
6.4. Soudage des Aciers Inoxydables Martensitiques	25
7. Traitements thermiques des aciers inoxydables.....	25
8. Conclusion	26

Chapitre 3 : Etude expérimentale

1. Introduction	27
2. Matériaux utilisés	27
2.1. Matériau d'étude 304L	27
2. 2. Le métal d'apport.....	28
3. Géométrie des éprouvettes et caractérisations mécaniques.....	28
4. Choix du paramètre de soudage MAG pour l'acier inoxydable 304L	32
5. Conclusion.....	34

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

1. Introduction.....	35
2. Mécanisme de rupture	35
3. Effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique	35
4. Conclusion	43

Conclusion et perspectives	44
---	-----------

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre 1 : Soudage à l'arc

Figure 1.1 : Classification des procédés de soudage	05
Figure 1.2 : Zones principales d'une soudure par fusion	06
Figure 1.3 : Schéma d'un arc électrique	08
Figure 1.4 : Installation de soudage MIG/MAG	12
Figure 1.5 : Transfert par court-circuit : a) Transfert par court circuit pur, b) Transfert par transition de métal, c) Transfert par court circuit forcé	15
Figure 1.6 : Transfert de métal par pulvérisation [11] : a) Transfert par pulvérisation axiale, b) Transfert à veine droite, c) Transfert à veine rotative	16
Figure 1.7 : Transfert globulaire [11] : a) Transfert globulaire pur, b) Transfert globulaire repoussé	17
Figure 1.8 : Carte des modes de transfert de métal	17

Chapitre 2 : les aciers inoxydables

Figure 2.1 : Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304	21
Figure 2.2 : Diagramme Schaeffler	22

Chapitre 3 : Etude expérimentale

Figure 3.1 : Machine 600 KN pour d'essai de traction	29
Figure 3.2a : Dimension des éprouvettes de traction	29
Figure 3.2b : Eprouvettes de traction réalisées en 304 L	30
Figure 3.3a : Courbes de traction charge / Déplacement pour de éprouvettes de 2mm.....	30
Figure 3.3b : Courbes de traction Charge / Déplacement pour des éprouvettes de 3mm.....	31
Figure 3.4a : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations pour des éprouvettes de 2mm	31
Figure 3.4b : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations pour des éprouvettes de 3mm	32
Figure 3.5 : Assemblages soudé par MAG des éprouvettes 304L	33
Figure 3.6 : Poste de soudage MAG.....	34

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

Figure 4.1 : effet de courant de soudage sur les évolutions de charge/ déplacement, t=2mm.....	36
Figure 4.2 : Effet de courant de soudage sur les évolutions de Charge /Déplacement ; t=3mm.....	37

Figure 4.3. : Effet de courant de soudage sur la charge maximale de rupture pour $t=2\text{mm}$ et $t=3\text{mm}$	37
Figure 4.4 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 100 (A)	38
Figure 4.5 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 125 (A)	38
Figure 4.6 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 150 (A)	39
Figure 4.7 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 200 (A)	39
Figure 4.8 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 225 (A)	40
Figure 4.9 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement une intensité de 250 (A)	40
Figure 4.10 : les éprouvettes de qui subit à l'essai de traction	42

Liste des Tableaux

Chapitre 2 : les aciers inoxydables

Tableau 2.1 : Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables	26
---	----

Chapitre 3 : Etude expérimentale

Tableau 3.1 : Composition Chimique de l'acier 304 L	28
--	----

Tableau 3.2 : Propriété Physique de l'acier 304 L	28
--	----

Tableau 3.3: Composition chimique de l'acier inoxydable 308 LSi.....	28
---	----

Tableau 3.4 : Les différents essais de soudage MAG pour les éprouvettes en acier inoxydable 304L	33
---	----

Liste des Abréviations

TIG: Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (Tungsten Inert Gas).

MMA: Soudage à l'arc à l'électrode enrobée (Manual Metal Arc Welding).

EE : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

SAW: Soudage à l'arc submergé (Submerged Arc Welding).

GMAW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG(135) (Gas Metal Arc Welding, GMAW).

GMAW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG(131) (Gas Metal Arc Welding, GMAW)

Introduction générale

Introduction générale

L'objectif de ce travail est la caractérisation mécanique des joints soudés à clin en aciers inoxydables par le procédé semi automatique MAG.

Le soudage MIG/MAG est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans différentes industries : automobile, mécano soudés, assemblages métalliques. Il présente l'avantage d'être plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais, économique et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les assemblages métalliques. Les aciers inoxydables de type 304 L sont très bien adaptés pour les applications d'assemblages métalliques avec un compromis intéressant entre résistance et masse volumique, un coût de fabrication raisonnable et une bonne aptitude au soudage MIG /MAG.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux procédés de soudage ainsi que les principes de réglage et de contrôle des énergies en soudage à l'arc.

Le second chapitre introduit les notions générales relatives aux aciers inoxydables suite à une recherche bibliographique.

Le troisième chapitre traite une étude expérimentale dans le but de relier les caractéristiques mécaniques et géométriques du cordon soudé.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

Ce travail se termine par une conclusion générale et une perspective.

Chapitre 1

Soudage à l'arc

Chapitre 1 : Soudage à l'arc

1. Introduction

Contrairement aux idées courantes, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire révolution. Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage a compté parmi les modes d'assemblage les plus répandus en industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique tel que : les bateaux, trains, aviation, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

2. Bref historique de soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{ème} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux s'est fait par forgeage. Les premières techniques utilisaient l'électricité comme source d'énergie tel que le soudage à l'arc en acier jusqu'à l'invention d'arc enrobé en 1904 ou soudage par résistance. Dans la même période, l'arrivée de l'oxyacétylénique utilisant l'acétylène et l'oxygène (soudage au gaz) pour produire une flamme aller jusqu'à 3100°C permet de constituer un joint entre les parties à soudé après la solidification du bain de fusion.

En 1930, l'arrivée du soudage à électrode fusible facilite l'automatisation de dévidage, surtout ce qui concerne le soudage à l'arc submergé. Dès 1940, les scientifiques d'États-Unis ont essayé de protéger l'arc par un gaz inerte dont ils sont réussis à amorcer l'arc sans fusion de l'électrode de tungstène (sans matériau d'apport), le procédé est appelé TIG (tungsteninertgas). Le procédé MIG (Metal Inert Gas) est apparait quelque années plus tard en 1950, il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continue et l'argon ou l'hélium comme gaz de protection, dont leur remplacement par CO₂ donne la naissance du procédé MAG (Metal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons en 1958, permet de réaliser une pénétration étroite et profonde, vient associer avec le procédé laser en 1980, le soudage devenu majoritaire à coté du rivetage [1,2].

3. Définition de soudage

Le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, de manière à assurer la continuité des forces de liaisons interatomiques (ou moléculaires) de type métallique, de la géométrie et des caractéristiques physiques des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation du métal d'apport répond à deux besoins : tout d'abord, il est nécessaire pour combler l'écart entre les pièces assemblées et d'autre part, il est aussi nécessaire pour changer la composition métallographique de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, le terme « soudage » désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudure, et celui « soudure » désigne alors le joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles [3, 4].

Le champ d'application de soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques [5]. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène (assemblage deux matériaux de base de même composition sans métal d'apport), homogène (les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature), et hétérogène (l'un au moins des trois matériaux, d'apport ou de base, est différent des autres) [1]. Les trois techniques d'assemblages peuvent être utilisées [2,5] :

3.1. Soudage (défini précédemment)

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et de la température atteinte [6].

3.2. Brasage (au-dessus de 450°C) ou le brasage tendre (au dessous de 450°C)

Opération consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité (l'écartement entre les pièces <0.5mm) d'un métal d'apport fondu dans un joint à recouvrement. Le métal d'apport utilisé doit avoir un point de fusion inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas pendant l'opération.

3.3. Soudo-brasage

C'est une technique assai récente combine les principes des deux précédentes et destinée à l'assemblage des tôles minces et revêtus. Cette technique se rapproche du soudage par son mode opératoire où le joint est réalisé en position bout à bout ou en angle, et du brasage par l'utilisation de métal d'apport dont leur température de fusion est plus basse à celle de l'un des métaux de base. Parmi les principaux avantages offerts par cette technique d'assemblage, on peut citer:

- Fabrication facile et économique des assemblages complexes ;
- Assemblage de pièces sans fusion entre elles, ce qui donne la possibilité de jonction des matériaux ayant des propriétés métallurgiques ou physico-chimiques différentes ;
- Possibilité d'assemblage des matériaux de différentes épaisseurs ;
- Possibilité de préserver la couche protectrice des matériaux assemblés (par exemple, galvanisation) ;

4. Classification des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Bien qu'ils soient nombreux, la classification des différents procédés de soudage peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction entre parties assemblées. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler sans action mécanique volontaire utilisant une source de chaleur telle que la flamme, l'arc électrique, plasma etc., pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion mais par une action mécanique (frottement, pression). La classification des différents procédés de soudage présenté dans la Figure 1.1

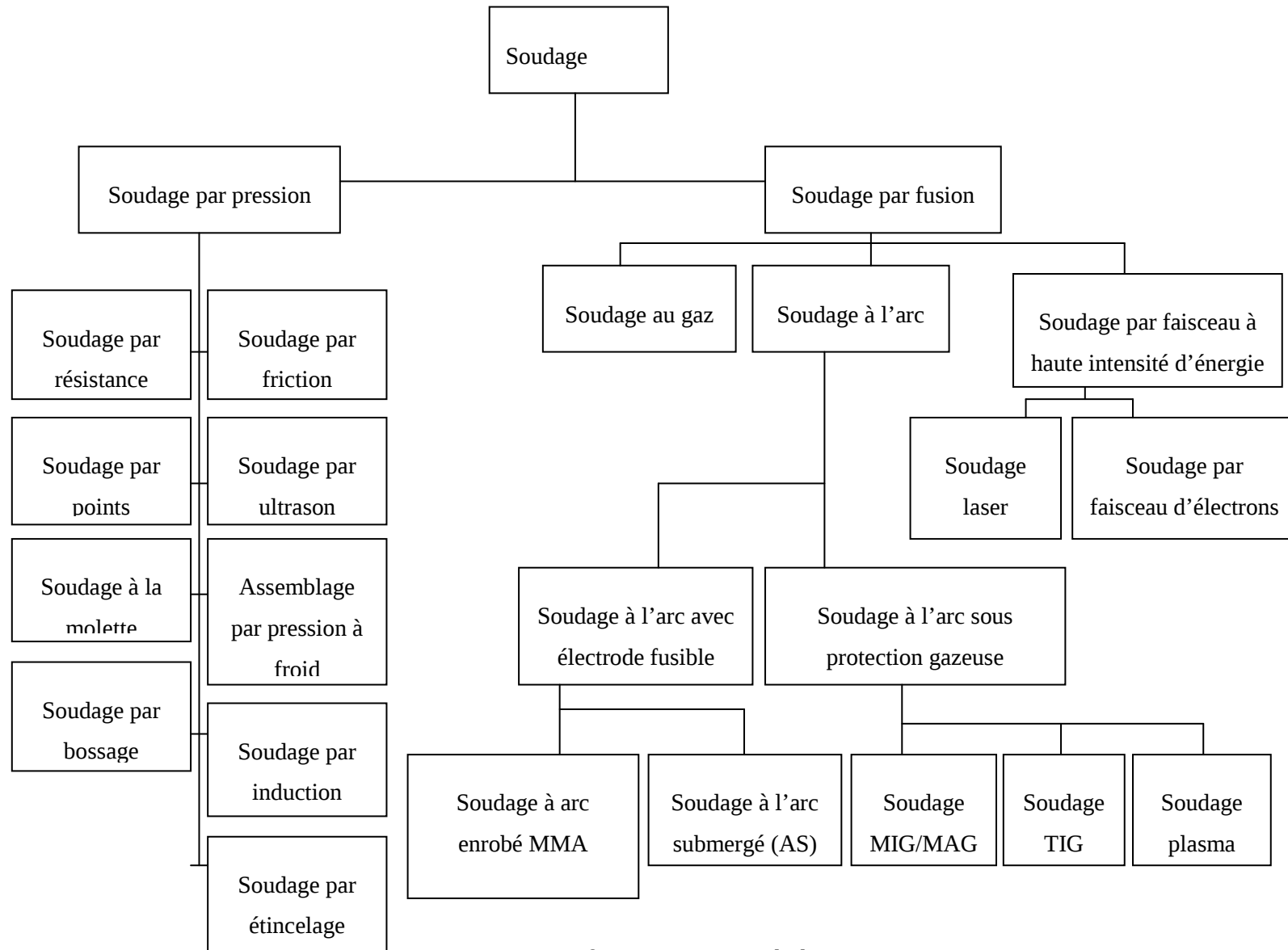


Figure 1.1 : Classification des procédés de soudage[16].

4.1. Soudage par fusion

Il consiste à fondre partiellement les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie tel que la flamme oxyacétylénique, l'effet Joule, ou de l'arc électrique. Le métal fondu devient après solidification une soudure. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure typique d'une soudure s'est composée de six zones principales (Figure 2.2) [4].

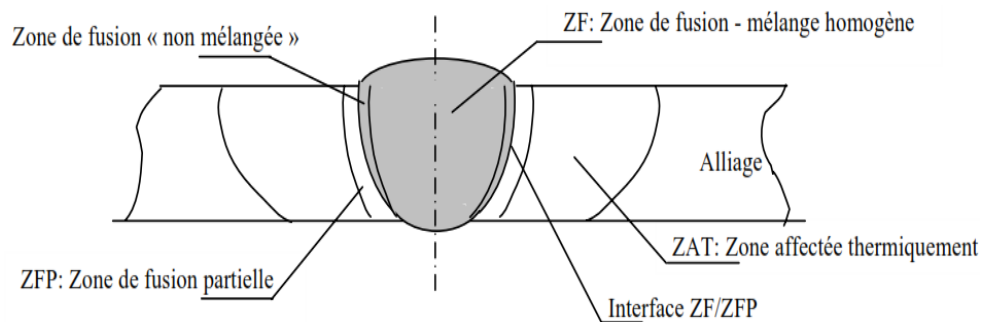


Figure 1.2 : Zones principales d'une soudure par fusion.

- **La zone fondue (ZF)**

La région chauffée au-dessus de la température du liquidus (l'état liquide a été atteint). Sa composition chimique après solidification, dépend principalement de celles du métal de base et du métal d'apport et du cycle thermique subit. On peut distinguer au sein de cette zone des gradients de concentration (ségrégation) de la partie la plus chaude vers celle la moins.

- **La zone de liaison (ZL) ou zone de fusion partielle (ZFP)**

Cette zone directement adjacente à l'interface de soudure, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface de début de la solidification du métal fondu.

- **La zone affectée thermiquement (ZAT)**

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

- **Interface ZF/ZFP**

C'est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée délimité le bain de fusion.

- **Le métal de base**

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

- **La zone non mélangée**

C'est la zone étroite à l'extrémité du bain de fusion dans laquelle la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente de celle du métal de base.

4.2. Soudage par pression

Le soudage par pression regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une force suffisante provoquant une déformation plus ou moins plastique à froid ou à chaud assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure [7].

5. Soudage à l'arc

Tous les procédés de soudage ont besoin de la chaleur pour produire la jonction entre les parties soudées par la formation d'une liaison au niveau atomique. Le soudage à l'arc est un terme délimite l'ensemble des procédés de soudage utilisent un arc électrique comme source de chaleur pour fondre et joindre les métaux sans actions extérieures. La chaleur générée est généralement localisée en un point où la liaison est désirée. D'après le schéma de classification des procédés de soudage on constate qu'un grand nombre de procédés utilisent l'arc électrique comme source de chaleur en raison de sa concentration et facilité de contrôle. Il est important de rappeler que ce n'est pas toute la chaleur générée par le générateur est transférée au métal pour produire la soudure, mais il y a une perte due aux projections, dissipations par convection, radiations et conduction aux surfaces adjacentes.

5.1. L'arc électrique

Un arc électrique se compose d'une décharge à forte intensité soutenue par une colonne gazeuse thermiquement ionisée appelée le plasma entre l'électrode et les pièces à assembler. Ces pôles sont portés à un potentiel différent convenable, à l'aide d'une source de courant,

engendrant un flux d'électrons entre l'anode et la cathode. Le phénomène peut s'expliquer par le fait que les électrodes incandescentes émettent des électrons cathodiques attirés par l'anode positive. Ces électrons rencontrent et basculent les atomes du gaz environnant. Pour une énergie suffisante, la petite bille-électron excite la grosse sphère-atome qu'elle rencontre. Alors, un ou plusieurs électrons périphériques de cet atome changent de niveau. En retournant à son niveau initial, l'énergie de l'électron déplacé se dissipe sous forme lumière (émission d'un photon) accompagnée par une augmentation de la température à un niveau, allant jusqu'à 2000°C, permettant la fusion de métal. Si l'énergie est plus intense, l'électron de l'atome est arraché complètement et au lieu d'un atome neutre il apparaît un électron négatif et un ion positif, autrement dit, l'arc ionise le gaz qu'il traverse le rendant ainsi conducteur [8]. Puisque le bombardement électronique se fait sur l'anode celui-ci est plus chaud que la cathode. L'arc est composé de trois zones distinctes :

- **La zone cathodique** : reçoit les ions positifs et elle est émettrice d'électrons. Il en résulte une brusque variation de potentiel à proximité de la cathode ;
- **La zone anodique** : qui est soumise au bombardement électronique. La variation de potentiel est là aussi très brusque ;
- **La colonne d'arc** : dite aussi colonne de plasma, qui relie les deux tâches en formant un conducteur gazeux. Dans cette partie de l'arc, la chute de tension est faible et linéaire. La Figure 1.3. présente schéma d'un arc électrique.

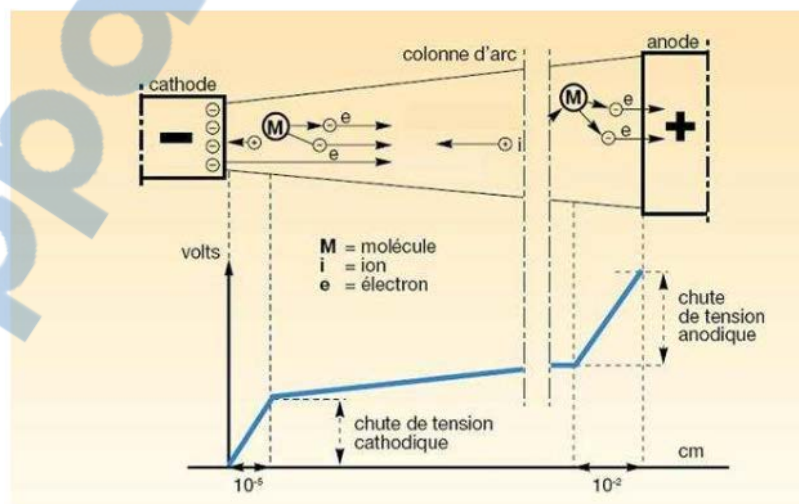


Figure 1. 3: Schéma d'un arc électrique [9]

5.2. Nature de courant

Selon le type de métal à souder et la nature de courant peut être continu ou alternatif.

5.2.1. Courant continu

Le courant continu permet un amorçage et maintient de l'arc faciles mais il nécessite un redressement du courant de distribution presque toujours alternatif. L'autre difficulté de ce type de courant est le soufflage magnétique dont l'arc se comporte comme un conducteur mobile est dévié par le champ magnétique induit par le courant de soudage.

5.2.2. Courant alternatif

Le courant alternatif présente l'avantage d'éviter le besoin de redresser le courant de distribution étant lui aussi alternatif. Il suffit de le faire passer dans un transformateur pour abaisser sa tension. Les alternances induisent dans la pièce métallique des courants Foucault dont son champ est antagoniste du champ induit par le courant de soudage ce qui empêche le soufflage magnétique. L'inconvénient principal est que l'arc en alternatif est moins stable car il se refroidit à chaque alternance lorsque le courant s'annule. Pour y remédier une augmentation de fréquence de courant de distribution est exigée.

5.3. Procédés de soudage à l'arc

Selon la nature de l'électrode (baguette, fil fusible ou tige réfractaire) et la nature du milieu protégeant (gaz ou vapeurs) vis-à-vis de l'atmosphère ambiante, le soudage à l'arc regroupe quatre procédés principaux :

5.3.1. Soudage à l'électrode enrobée EE

5.3.1.1. Définition

Se conduisant à la main et appelé également soudage manuel (Manual Metal Arc Welding, MMA). L'électrode enrobée est formée d'une âme métallique, généralement identique au métal constituant la pièce à souder, entourée d'un enrobage d'une autre substance. Selon les besoins de limiter l'oxydation rendant le cordon poreux et la nitruration diminuant sa résilience, l'enrobage peut être un oxydant, un acide, un basique ou un cellulosique. Il a pour but de faciliter l'amorçage de l'arc, protéger le métal et le cordon contre toute réaction avec l'air, ainsi que stabiliser et guider l'arc grâce à un retard à la fusion.

5.3.1.2. Domaines d'application et avantages

- Le soudage à l'électrode enrobée est une technique de soudage très répandue ;
- Encombrement du poste à souder réduit : avantage sur chantier,
- Soudabilité :
 - Aciers, inox, aluminium ;
 - Procédé manuel ;
 - Investissement faible.
- Domaines d'application : tôlerie, construction navale, construction mécanique (châssis, ensemble mécano-soudé, ...), charpente métallique, réservoirs,

5.3.2. Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre (Submerged Arc Welding, SAW)

5.3.2.1. Définition

Utilisant comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue. L'arc jaillit à l'intérieur du flux en poudre versé en talus autour du fil d'électrode assurant la protection de l'oxydation et de refroidissement rapide du bain de fusion.

5.3.2.2. Domaines d'application et avantages

- Utiliser en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs de 2 mm jusqu'à 200/300 mm.
- Matériaux utilisés : acier carbone, acier inoxydable, acier base nickel.
- Domaines d'application : charpente métallique, chaudronnerie, tuyauterie industrielles.

5.3.3. Soudage à électrode de tungstène non fusible ou avec électrode réfractaire (Tungstun Inert Gas, TIG)

5.3.3.1. Définition

C'est le procédé de soudage à l'arc utilisé souvent dans la construction aéronautique. L'électrode infusible est faite de tungstène pur, très réfractaire, ou thorée (allié à 1 ou 2% de thorium) portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire de gaz protecteur nécessairement inerte (argon, hélium) pour protéger le bain de fusion de l'atmosphère ambiante. L'utilisation du mélange des deux gaz est aussi possible afin d'obtenir un compromis entre leurs effets, dont l'argon permettant une meilleure stabilité du bain et l'hélium une meilleure pénétration. L'emploi de ces gaz onéreux et le faible rendement du soudage TIG rendent ses applications réservées aux métaux nobles comme les aciers inoxydables, les alliages de nickel, d'aluminium, de magnésium ou de titane d'épaisseur 0.3- 4mm en tout position. Il est

cependant possible de réaliser un apport de métal en introduisant directement dans le bain de fusion un fil sous forme de baguettes entraînée manuellement ou sous forme de fil d'apport en alimentation automatique.

5.3.3.2. Domaines d'application et avantages

- Le TIG est une technique de soudage très répandue surtout sur les faibles épaisseurs ;
- Soudabilité :
 - Aciers, inox, aluminium,...
 - Procédé manuel, mais automatisable.
- Domaines d'application : tôlerie, agroalimentaire, construction mécanique fine (châssis, ensemble mécano-soudé, ...), aéronautique, réparation de fissures, ...
- Faible encombrement de la torche de soudage.

5.3.4. Soudage avec électrode fusible (GasMetal Arc Welding, GMAW)

5.3.4.1. Définition

L'arc est entretenu entre le métal à souder et une électrode également métallique, donc fusible, sert à la fois de conducteur pour le courant et de métal d'apport et qui est amenée sous forme de fil continu entraîné automatiquement depuis un dévidoir. L'utilisation d'un gaz de protection inerte (Ar, He) le sigle MIG (Metal Inert Gas) s'appliquant essentiellement pour le soudage de l'aluminium. Avec le remplacement de l'hélium ou de l'argon par le CO₂, plutôt actif, on parle de soudage MAG (Metal Active Gaz) réservé pour les aciers courants. Le procédé MIG est dit semi-automatique car le courant, le gaz de protection, et le fil électrode sont amenés automatiquement à la torche que l'opérateur tient en main. Il est dit automatique si la torche est guidée par une machine.

Parmi ces procédés de soudage à l'arc, nous retiendrons le dernier pour réaliser les assemblages de cette étude. En pratique, ce procédé s'applique pour des épaisseurs de soudage plutôt faibles à moyennes (1 à 15 mm) avec des vitesses opératoires allant jusqu'à 1 m/min.

5.3.4.2. Domaines d'application et avantages

- Le MIG est une technique de soudage très répandue ;
- Soudabilité :
 - Aciers, inox, aluminium, ...
 - Procédé manuel, mais automatisable.

- Domaines d'application : tôlerie, construction navale, construction mécanique (châssis, ensemble mécano-soudé, ...), charpente métallique, ponts, engins de levage, réservoirs.

6. Le procédé de soudage MIG/ MAG

Découvert au cours de la deuxième guerre mondiale, le développement du procédé MIG/MAG visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il est prévenu de devenir, selon le Bureau Canadien de Soudage, le procédé le plus utilisé dans le monde. Aujourd'hui, ce procédé est applicable dans la chaudronnerie légère, la petite et moyenne mécano-soudure ainsi que dans la construction automobile sous sa forme semi-automatique mais surtout automatique.

Les principaux éléments constituant une installation de soudage MIG/MAG sont représentés dans la Figure 1. 4.

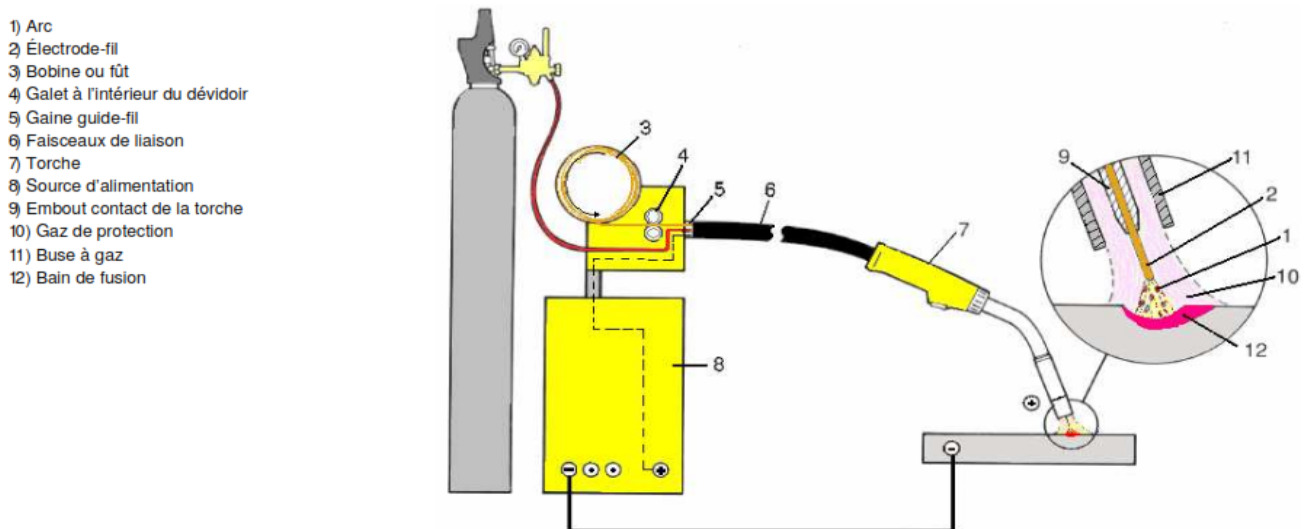


Figure 1. 4 : Installation de soudage MIG/MAG [10].

La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatiquement entrainant le fil vers la sortie de la buse à gaz de la torche à travers la gaine guide-fil jusqu'au tube contact. Une alimentation en gaz ou mélange de gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur. Lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et la pointe du fil électrode touche la pièce à souder, le circuit électrique se ferme et permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il crée un arc électrique entre l'électrode et les pièces à

assembler sous l'effet de l'énergie de différence de potentiel. Les électrons jaillissent de la cathode sont attirés par l'anode, s'accélèrent sous l'action du champ et ionisent les atomes du gaz environnant le rendant ainsi conducteur. En écartant l'électrode de quelques millimètres, le processus s'entretient en créant une réaction en chaîne et crée un arc continu d'énergie suffisante pour fondre d'une part l'électrode constituant le métal d'apport qui produit après refroidissement le cordon et d'autre part localement le métal de base par régime de court-circuit (short arc) ou de pulvérisation axial (spray arc) ou globulaire (free flyé).

La distance déterminée entre l'extrémité de l'arc et le tube contact porte le nom de la partie terminale ou stick-out, tandis que la hauteur libre de l'arc électrique porte le nom de longueur d'arc qui doit être suffisante pour éviter un échauffement excessif du tube contact. Le fil libre ne doit pas être trop long afin d'éviter l'échauffement du fil par effet joule.

On parle de polarité directe ou négative si la torche est reliée sur la borne électrique de sortie négative (cathode). Elle dite inverse ou positive si l'électrode est anode. Puisque l'anode est plus chaud que la cathode, le soudage MIG utilise souvent une polarité inverse afin de faciliter la fusion de la pièce et d'obtenir un bain de fusion régulier.

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil fusible présente de nombreux avantages :

- Forte productivité par rapport au soudage à électrode enrobée et TIG ;
- Grande vitesse de soudage (gain de temps) ;
- Taux de dépôt de métal important ;
- Limitation des déformations ;
- Nombre de reprises de soudure limité ;
- Pas de laitier à enlever.
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques ;
- Soudage dans toutes les positions ;
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit ;
- Procédé automatisable et utilisable en robotique ce qu'évite la fatigue de l'opérateur.

Les inconvénients de ce procédé synthétisés comme suit:

- Entretien fréquent et minutieux ;
- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures ;

- Les économies de temps réalisées avec ce procédé peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate dont le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.

6.1. Les principaux modes transfert du métal en MIG/MAG

Quelle que soit la nature du courant et la polarité, le métal fondu se déplace toujours de l'électrode vers la pièce, même lorsqu'il s'agit du soudage au plafond. Ce phénomène paradoxal avec la présence de la gravité peut s'expliquer par l'effet de pincement. Dans tous les conducteurs, les régions périphériques sont attirées vers la partie centrale ce qui favorise l'accroissement de pression tendant à arracher le métal liquide de son support. En fonction du niveau de l'énergie de soudage (tension et intensité) et le principe de détachement du métal fondu, les modes de transfert de métal peuvent classifier comme suit :

6.1.1. Transfert par court-circuit (short arc)

Pour des faibles intensités (50-200 A) et tensions (15-20 V) de soudage l'arc s'établit étant très court et le transfert de métal se fait par régime court-circuit. Le dépôt du métal se fait de manière discontinue par une succession très rapide de court-circuit (de 50 à 200 par seconde) entre le fil et le bain de fusion (Figure 1.5a). La goutte formée par effet Joule grossit jusqu'à venir en contact avec le bain de fusion, à ce moment, l'arc s'éteint, la tension s'effondre au minimum et inversement l'intensité augmente grâce au passage direct du courant dans le métal à travers le pont métallique formé entre le bain de fusion et l'électrode. Au fur et à mesure au déplacement de la gouttelette vers le bain de fusion, le pont métallique liant les deux parties se rétrécit et par conséquent l'effet de pincement augmente provoquant le détachement de la goutte accompagné par une brusque élévation de tension et une baisse concomitante d'intensité. Ensuite, l'arc se rétablit et le phénomène recommence. Puisque le dégagement de la chaleur est plus faible et le métal étant déposé et non pas projeté sur la pièce, le bain de fusion sera plus calme, étroit et se solidifie rapidement. Ce procédé convient donc bien pour souder les tôles minces et réduire les déformations dues à l'échauffement.

En cas où le courant de soudage pendant le court circuit prend le bas niveau, le transfert de métal se fait par la transition de métal fondu (bridging transfer) sans répulsion ni génération de projections (Figure 1.5b). Le détachement des gouttes est gouverné par la tension superficielle, réduisant l'effet de pincement.

La régulation de la fréquence de court-circuit et l'augmentation de la vitesse de dévidage de fil (10-12 m/min) donne la naissance de transfert de métal par court circuit forcé (forced short-circuiting) (Figure 1.5c). Puisque le transfert est contrôlé par un fort effet de pincement, le taux de transfert est plus grand et les gouttelettes n'ont pas assez de temps pour atteindre des gros volumes.

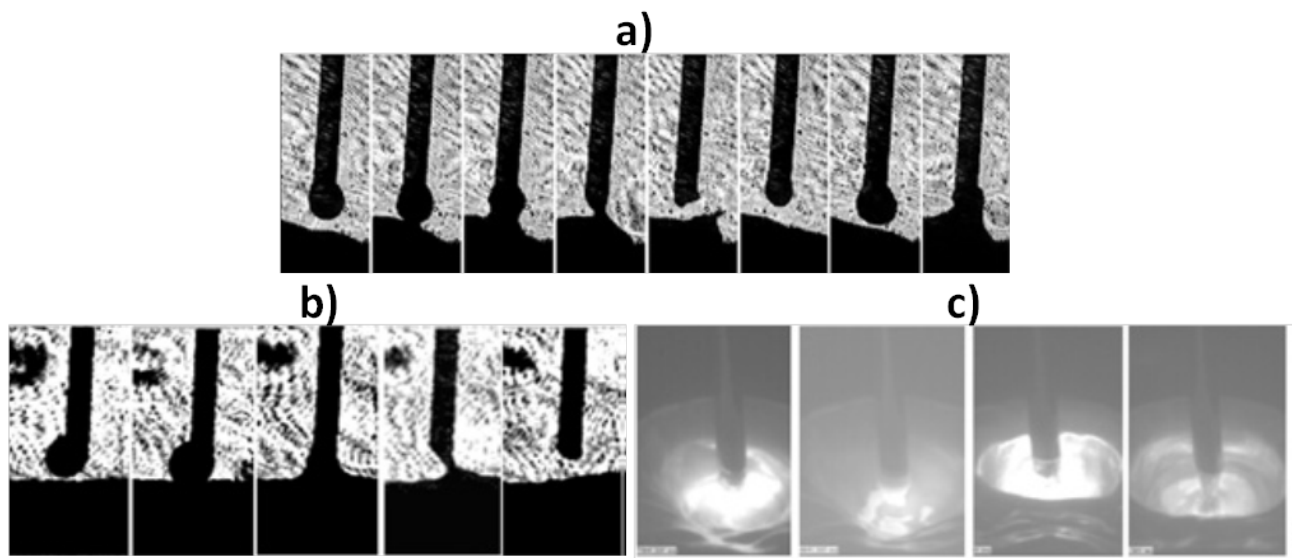


Figure 1.5 : Transfert par court-circuit : a) Transfert par court circuit pur, b) Transfert par transition de métal, c) Transfert par court circuit forcé [11].

6.1.2. Transfert par pulvérisation axiale (projected spray)

Pour une énergie de soudage plus élevée (> 200 A et de 20 à 40 V), l'arc devient plus long, stable et l'extrémité du fil prend une forme conique allongée (Figure 1.6). Sous l'effet de l'augmentation impressionnante des forces électromagnétiques, le métal fondu subit à un effet de pincement très fort lui permet de se transférer sous forme de très fines gouttelettes (de diamètres inférieurs ou égaux à celui du fil) projetées en direction du bain de fusion à grande vitesse (centaines de gouttes par minute) suivant l'axe du fil sans court circuit. Le cordon résultant étant plus important et plus profond avec moins de projections.

Avec une augmentation de l'intensité au-dessus de celle de pulvérisation axiale, le métal se transfère sous forme veine coulée (streaming spray). Le bout de fil d'apport se chauffe jusqu'à se qu'il prend la forme d'une veine droite orientée vers le bain fondu. Au bord, des fines gouttelettes se forment et se détachent avec une fréquence supérieure à celle de pulvérisation axiale (Figure 1.6b). Au-delà de l'intensité de transfert à veine coulée, le transfert à veine liquide rotative (rotating spray) intervient. Le surchauffe de fil d'apport due à l'augmentation

excessive de l'intensité de soudage effile la veine liquide beaucoup plus. Sous l'effet des forces radiales asymétriques et des forces azimutaux, la veine s'oriente vers le bain de fusion en mouvement spirale provoquant le détachement de gouttelettes dans la direction tangentielle avec beaucoup de projections (Figure 1.6c).

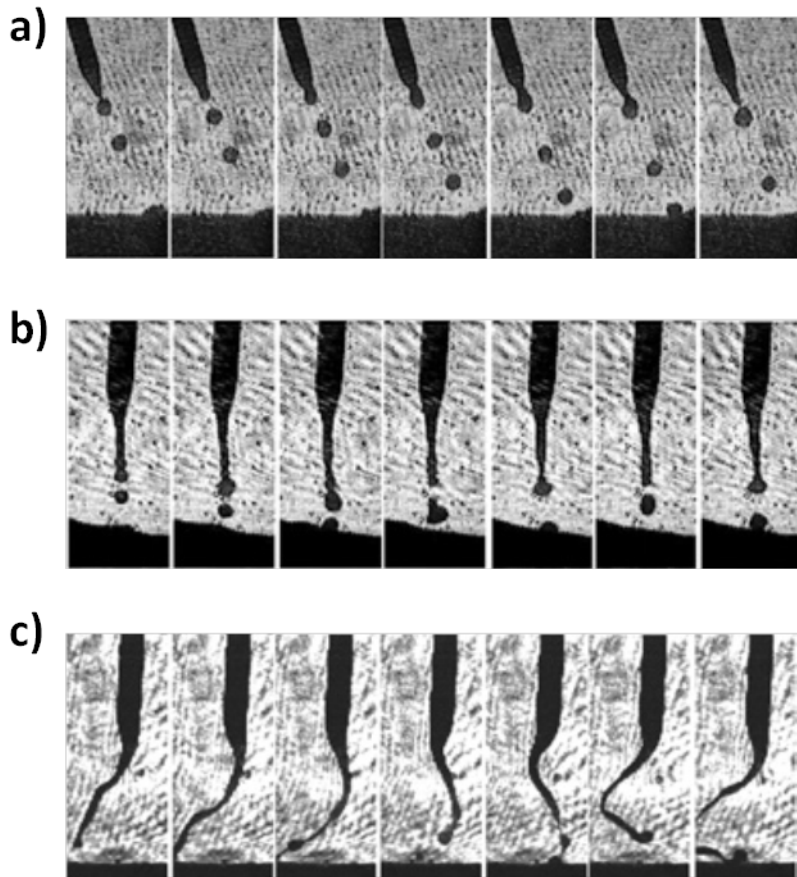


Figure 1.6: Transfert de métal par pulvérisation [11] : a) Transfert par pulvérisation axiale, b) Transfert à veine droite, c) Transfert à veine rotative.

6.1.3. Transfert globulaire (globulartransfer)

Ce régime est obtenu avec une intensité inférieure à celle du courant de soudage par pulvérisation et une tension supérieure à celle du soudage à l'arc court circuit. Il se caractérise par un transfert de métal très lent (1 à 10 goutte par seconde) sous forme de larges gouttelettes (diamètre de goutte 1.5 à 3 fois plus grand que celui de fil d'apport) grossissent lentement jusqu'à leur détachement erratique lorsque la gravité accompagnée par l'effet de pincement excèdent la tension superficielle tenant la goutte au bout de fil (Figure 1.7a). La goutte suit alors une trajectoire irrégulière qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode instable génère de nombreuses projections et une faible profondeur de pénétration.

Pour certaines conditions de soudage (type de gaz, polarité ...), la tache de l'arc électrique devient étroite et se concentre autour de gouttelette générant une force répulsive. Cette force pousse la goutte vers le bain de fusion et suscite leur détachement sous l'effet de son propre poids. Ce mode de transfert s'appelle « globulaire repoussé (globular pelled) » (Figure 1.7b).

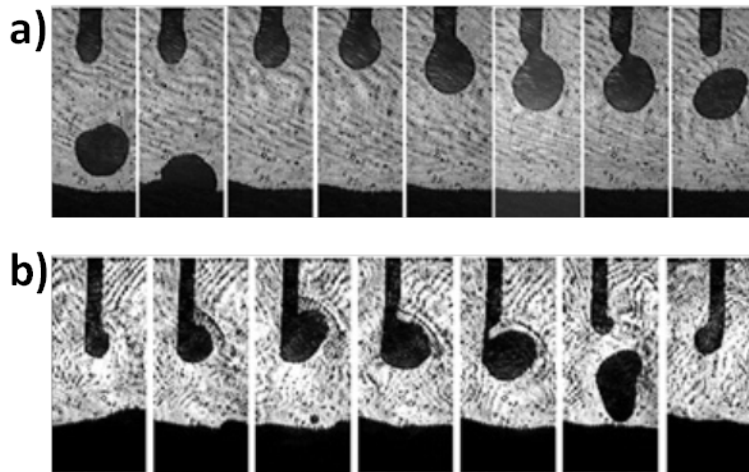


Figure 1.7 : Transfert globulaire [11] : **a)** Transfert globulaire pur, **b)** Transfert globulaire repoussé.

Le regroupement de tous les modes de transfert en fonction de tension et intensité dans un seul diagramme, appelé carte de transfert (Figure 1.8), facilite et améliore la connaissance et la compréhension des différents modes de transfert ainsi le niveau énergétique de chacun. Le transfert globulaire est séparé à celui par pulvérisation par une zone de transition de courant.

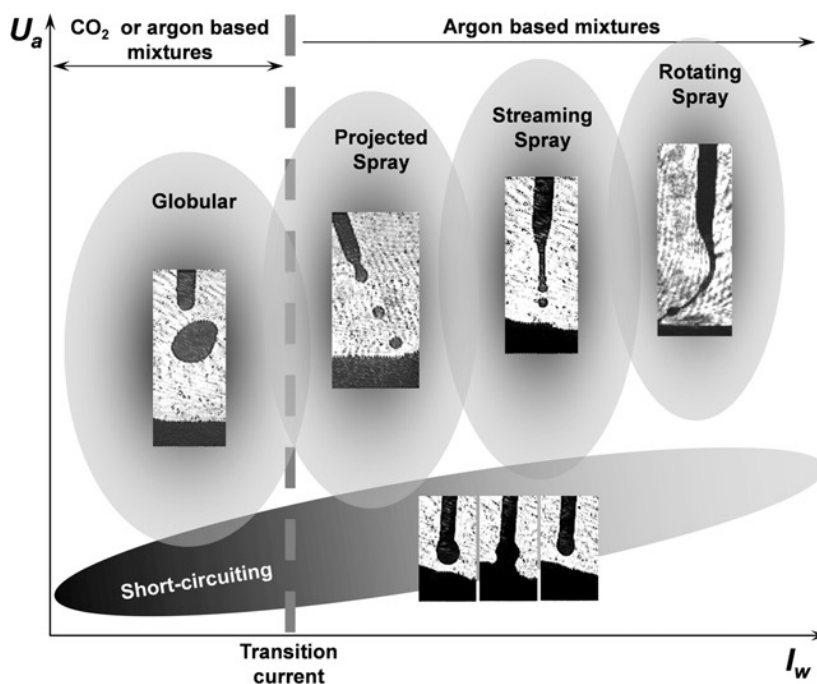


Figure 1.8 : Carte des modes de transfert de métal [11].

6.2. Paramètre de soudage en MIG/MAG

Le procédé de soudage GMAW dépend d'un certain nombre de facteurs :

- la tension de soudage (longueur d'arc) ;
- la vitesse de dévidage (contrôle de l'intensité I_s) ;
- la valeur de la self ;
- la longueur de fil sorti ;
- le sens d'avance.

7. Conclusion

Les procédés de soudage sont aussi divers que variés suivant les principes et les buts recherchés. Les procédés de soudage les plus utilisés sont les EE, TIG et MIG/MAG. Suite aux travaux de recherche déjà entamés tels que les procédés de soudage de tôles galvanisées par points, le procédé MIG pour différents métaux de base, ce travail est orienté vers l'utilisation du procédé de soudage MAG pour la caractérisation mécanique d'un joint soudé à clin pour un assemblage de tôles inoxydables.

Chapitre 2

les aciers inoxydables

Chapitre 2 : les aciers inoxydables

1. Introduction

Les aciers inoxydables sont utilisés dans des applications importantes comme matériau de construction dans divers environnements agressifs tels que dans l'industrie chimique, le dessalement et les déchets d'usines de traitement de l'eau et dans l'industrie pétrolière en raison de son excellente résistance à la corrosion générale, adéquates à des propriétés mécaniques à haute température, fabricabilité bonne et la soudabilité.

2. Généralités

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 10,5 % de chrome et des éléments d'alliage comme le carbone, le nickel, le molybdène, le silicium, etc. Selon le pourcentage de ces éléments, la structure d'acier en condition d'emploi sera martensitique, austénitique ou ferritique.

3. Historique

Les aciers inoxydables sont nés au début du 20^e siècle. Leur résistance à la corrosion est due à une teneur en chrome d'au moins 12%. Ces aciers permettent de répondre aux problèmes de corrosion sévère (industrie chimique, eau de mer...) ainsi qu'à la corrosion douce lorsque toute contamination est interdite (industrie agroalimentaire, pharmacie, industrie nucléaire...). Ils permettent aussi de résoudre les problèmes d'aspect de surface en milieu atmosphérique (bâtiment, mobilier...).

La fin du 19^e siècle Brustlein et Boussingault ont, chacun de leur côté, mis en évidence le rôle du chrome sur la résistance à l'oxydation des alliages ferreux. Au tout début du 20^e siècle, Goldschmidt développe les premières nuances d'aciers inoxydables à bas carbone. Les grandes familles d'aciers inoxydables se développent progressivement.

Dès 1909, les principales nuances de base d'aciers martensitiques, ferritiques et austénitiques connues actuellement sont élaborées. Il faudra attendre 1931 pour voir apparaître les premières nuances d'aciers austéno-ferritiques.

Au contraire des aciers martensitiques qui sont formés par trempe de la phase austénitique, pour les nuances ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques, les transformations de phase

ne touchent qu'une partie mineure du matériau. La phase principale reste principale. Leurs propriétés ne peuvent être améliorées par une trempe.

4. Propriétés et applications

La principale propriété des aciers inoxydables est leur excellente résistance à la corrosion. Cette propriété donne au matériau une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux. A cette propriété fondamentale, s'ajoutent les caractéristiques mécaniques intéressantes comme la résistance mécanique, la ductilité et la ténacité. L'acier inoxydable est donc considéré comme le matériau de choix dans les domaines alimentaire, médical, ménager et nucléaire.

5. Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables constituent une grande famille d'alliages métalliques qui ont tous en commun de posséder du fer et du chrome. Suivant leur teneur en chrome et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent une large gamme de propriétés. Dans la suite, nous allons brièvement décrire les différentes structures d'acier inoxydable.

5.1. Aciers inoxydables ferritiques

Les alliages fer-chrome sont ferritiques à toutes températures. Pour une teneur en chrome donnée, il suffit pour cela que la concentration en carbone soit limitée. Ainsi s'expliquent les deux familles d'aciers inoxydables dits ferritiques pour deux niveaux de chrome ; le premier à basse teneur en chrome est bas de gamme en corrosion ; le deuxième au contraire est considéré haut de gamme. Dans tous les cas, ces nuances peuvent contenir des additions de molybdène pour améliorer la résistance à la corrosion, du titane ou de l'aluminium pour augmenter le caractère alpha gène.

5.2. Aciers inoxydables martensitiques

Pour obtenir une structure martensitique, il faut nécessairement, au contraire, entrer dans la boucle γ pour tremper la structure austénitique. Par conséquent, la teneur en carbone doit être d'autant plus forte que la concentration en chrome est élevée. Cela explique les trois premières familles de nuances martensitiques. Les teneurs en chrome augmentant, le premier est considéré comme bas de gamme en corrosion, le deuxième a une résistance moyenne, le troisième est haut de gamme. Par contre, on sait aussi que les martensites des aciers sont d'autant plus dures et fragiles que leur teneur en carbone est élevée. Par suite, le premier groupe évoqué sera relativement peu fragile, facile à mettre en œuvre, à souder ou à mouler par exemple ; le deuxième sera beaucoup plus difficile à utiliser car plus fragile (soudage délicat avec pré-et post-chauffage) ; quant au dernier, très fragile, il est très difficile à mettre

en œuvre et en particulier impossible à souder. Ces trois familles ne présentent donc pas de composition haut de gamme en corrosion, facile à mettre en œuvre. Cela explique la quatrième famille. On note une teneur en chrome élevée, des concentrations en carbone basses. Une addition de nickel remplace l'effet gamma gène du carbone et agrandit la boucle γ . Des additions éventuelles de molybdène et de cuivre ont pour but d'améliorer la résistance à la corrosion.

5.3. Aciers inoxydables Austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent, en général, de 0,02% à 0,1% de carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel, 2 à 5% de molybdène et d'autres éléments d'addition comme le cuivre, le silicium, le titane, le niobium. Les éléments d'addition permettent d'améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques du matériau. Depuis quelques décennies, le nickel coûteux, est progressivement remplacé par l'azote grâce à des procédés d'élaboration qui améliore sa solubilité dans l'acier liquide (Lacombe, Baroux, & Béranger, 1990). Les nuances les plus couramment utilisées, souvent appelées nuances austénitiques standards, sont les nuances 1.4301 (connue sous l'appellation américaine 304) et 1.4401 (connue sous l'appellation américaine 316). Elles contiennent 17 à 18 % de chrome et 8 à 11 % de nickel. La nuance 1.4301 convient pour des sites ruraux, urbains et légèrement industriels alors que la nuance 1.4401, qui est plus fortement alliée, est bien adaptée à des sites industriels ou en atmosphère marine.

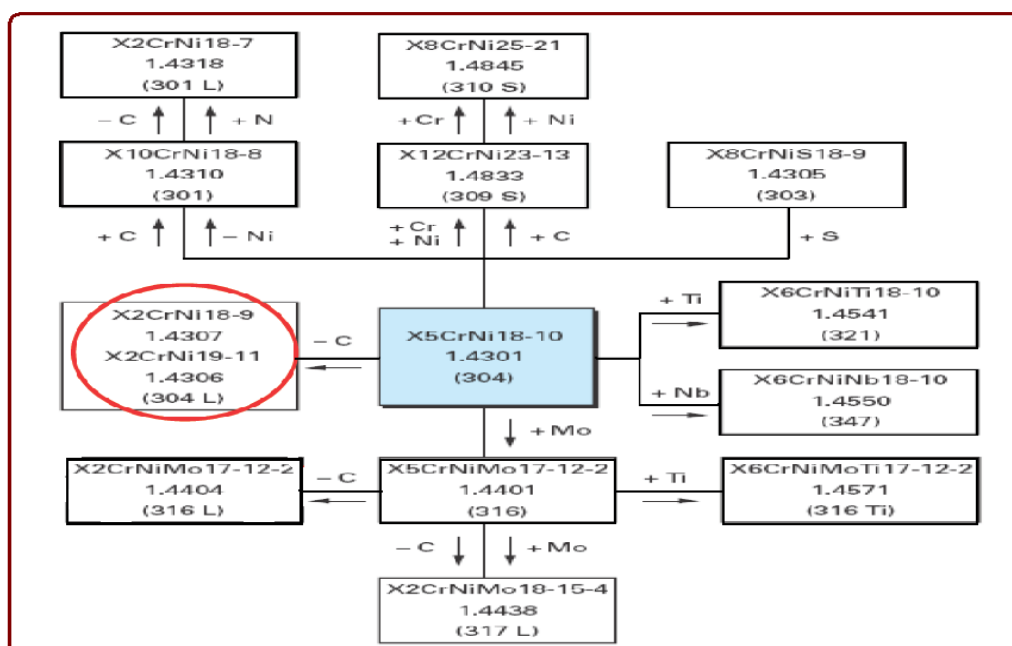


Figure 2.1 : Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304[13].

5.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques

Des alliages avec la composition en (Cr, Ni, Mo, et Si) sont équilibrés pour obtenir par un traitement thermique une structure mixte constituée de ferrite (70 à 50%) et d'austénite (30 à 50%). Cet état confère à ces aciers d'excellentes performances comme la ductilité, la ténacité et la résistance à la corrosion.

5.5. Aciers inoxydables à durcissement

Les caractéristiques mécaniques de cette famille d'aciers inoxydables sont obtenues à l'issue d'un traitement de durcissement secondaire suivi d'un traitement thermique de trempe ou d'hypertrempe.

6. Soudage des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables et les aciers résistants à la température peuvent être soudés par des méthodes de soudage par fusion et par pression qui sont utilisées chez les aciers non-alliés et faiblement alliés en dehors de quelques limitations. Le procédé de soudage des aciers inoxydables et résistants à la température peut changer selon les propriétés exigées du métal de base à souder, par exemple de la corrosion et la résistance à la température. Il faut que le matériau de soudage à utiliser soit de la même composition avec celle du métal de base et plus hautement allié pour quelques applications. La Figure 2.1 présente le diagramme de Schaeffler.

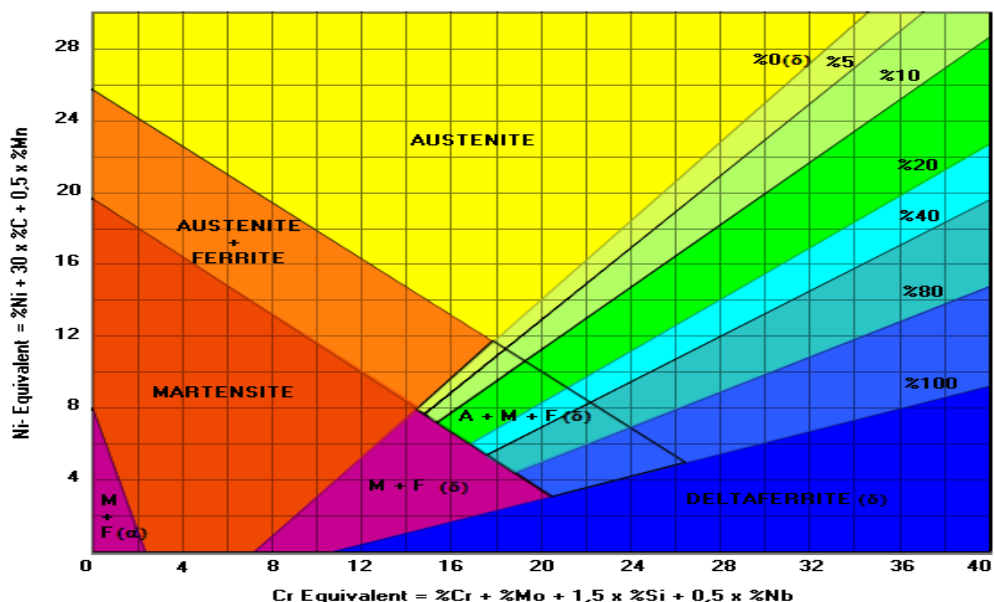


Figure 2.2: Diagramme de Schaeffler.

6.1. Soudage des Aciers Inoxydables Austénitiques

- Le métal de soudage contient de ferrite delta du taux entre 4% et 12 % (5 -15 FN), par conséquent il est résistant à la fissure chaude,
- Si on exige des joints soudés de ne pas être magnétiques, d'avoir une haute résistance à la corrosion ou résistance aux températures basses, on doit choisir les métaux de soudage entièrement austénitiques,
- Le taux du mélange avec le métal de base doit être tenu sous 40% et il faut tenir l'émission d'azote basse lors de soudage afin d'éviter la diminution du taux de ferrite delta, si possible,
- Il ne faut pas appliquer un chauffage en avant, il faut que la température entre passes soit 150°C au minimum,
- Il faut débiter les arcs dans les embouts de soudage,
- Le ferrite delta est une phase magnétique,
- On peut joindre des aciers austénitiques inoxydables avec Cr-Ni avec des aciers austénitiques inoxydables avec Cr-Ni-Mo, mais quand la résistance à la corrosion est tenue compte il faut préférer le matériau de soudage au même joint.

6.2. Soudage des Aciers Inoxydables Ferritiques-Austenitiques

- Les aciers de ce type avec deux phases telles que Ferrite Delta et austénite sont appelés des aciers inoxydables duplexent. Ces aciers peuvent être joints par les soudages de fusion. Les joints soudés peuvent travailler à 250°C au maximum. Dû à la formation des phases fragiles à 475°C la ténacité diminue aux températures entre 250°C et 900°C,
- Pour limiter le taux de la ferrite delta dans le métal de soudage aux matériaux de soudage avec le même taux d'alliage de l'azote (N) que le métal de base, la quantité du nickel est un peu plus élevée que celle de l'azote. Il faut tenir le mélange aux joints réalisés avec les aciers inoxydables à taux bas de nickel, en dessous de 40%. Souder sans utiliser de métal supplémentaire est possible seulement si on effectue procédé de recuit dissolvant et de trempe à l'eau,

- Il faut souder sans pré recuit, les températures entre passes ne dépassent pas 250°C (aux aciers contenant environ 23 % de Cr) ou 150°C (aux aciers contenant environ 25 % de Cr),
- On peut choisir une entrée de chaleur un peu plus haute que celle des aciers inoxydables. Selon la méthode de soudage et l'épaisseur du matériau, on peut faire soudage avec une entrée de chaleur de 5 à 25 kJ/cm aux aciers à 23% Cr et avec une entrée de chaleur de 2 à 15 kJ/cm aux aciers à 25% Cr,
- Les aciers contenant une grande quantité de ferrite delta ont tendance pour la fissuration par l'hydrogène. Par conséquent, l'émission de l'hydrogène doit être tenue le plus basse possible lors de soudage (il faut assécher les électrodes avant l'usage et ne pas utiliser les gaz contenant de l'hydrogène).

6.3. Soudage des Aciers Inoxydables Ferritiques

- Les aciers inoxydables ferritiques ont tendance pour la croissance du grain aux températures supérieures à 950°C. Sa structure de grands grains cause la diminution en ténacité, qui ne peut atteindre le même niveau avec aucun traitement thermique,
- Alors, il faut faire soudage avec une faible entrée de chaleur (faible courant de soudage, usage minimal d'électrode, soudage droite ou peu oscillé),
- La température de passage de la fragilité à la ductilité détecté par l'essai de résilience entaillée, est égale environ à la température ambiante chez les aciers inoxydables ferritiques. Afin de maintenir la rupture et les tensions après soudage au minimum à la zone influencée par la température, il faut appliquer du prérecuit et des températures entre les passes à 200 à 300°C,
- A cause du risque de la fissure froide, il faut tenir bas l'émission de l'hydrogène lors de soudage (il faut assécher les électrodes avant l'usage et ne pas utiliser les gaz contenant de l'hydrogène),
- On préfère des soudages de multiple passes lors usage des matériaux de soudage avec haute ténacité et d'une composition chimique différente (austénitique ou alliages de Ni-Cr) Si on demande l'harmonie de couleur avec le métal de base et un plus faible contenu en nickel, la passe couvercle est effectuée avec un matériau de soudage de la même composition avec le métal de base,

- Le recuit effectué aux 700 - 800°C augmente la ténacité de la zone influencée par la chaleur et celle du métal de soudage, diminue les tensions qui augmentent après soudage et amène la résistance à la corrosion entre grains au même niveau.

6.4. Soudage des Aciers Inoxydables Martensitiques

- Ces aciers ont la propriété de durcissement à l'air et ont une capacité limitée d'être soudés. Afin de maintenir la dureté à un niveau bas à la zone influencée par la température, il faut choisir le pré recuit et des températures entre les passes à 200 à 300°C,
- Les aciers contenant plus de carbone que 0.2% ne conviennent pas aux structures soudées.
- Tempérer à 700°C juste après soudage augmente la ténacité du joint soudé et diminue les tensions qui augmentent après soudage,
- A cause du risque de la fissure froide, il faut tenir bas l'émission de l'hydrogène lors de soudage (il faut assécher les électrodes avant l'usage et ne pas utiliser les gaz contenant de l'hydrogène),
- Si un métal de soudage de même couleur que celle du métal de base et qui ne contient pas de nickel est demandé, la passe recouvrement peut être faite d'un métal supplémentaire de la même composition et qui ne contient pas du nickel,
- Aux aciers à grand taux de carbone, on utilise en général des matériaux de soudage austénitiques qui ont une composition différente selon DIN 8556; en plus, selon DIN 1736 on peut aussi utiliser les matériaux de soudage d'alliage Ni-Cr.

7. Traitements thermiques des aciers inoxydables

Tous les types de traitements sur les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion ont pour but de rendre la répartition en chrome du métal la plus homogène possible en évitant toute précipitation de phases riches en chrome. Nous présentons dans le tableau 2.1 les principaux types de traitements thermiques pour les aciers inoxydables. D'autre part, il est possible par un traitement thermique adapté d'acquérir des caractéristiques mécaniques ou une dureté non négligeables. En général, les traitements thermiques pratiqués ont des conséquences sur les propriétés suivantes : la résistance à la corrosion, les propriétés mécaniques (résistance, ductilité, fragilité), l'état de surface (oxydation superficielle), et sur la stabilité dimensionnelle.

Tableau 2.1. : Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables
[14].

Traitement thermique	Objectifs	Processus métallurgiques mis en œuvre
Homogénéisation	Diminuer l'ampleur des ségrégations. - Obtenir une phase homogène.	Maintien à haute température (diffusion des éléments ségrégés, dissolution de précipités ou de phases intermétalliques).
Durcissement	Augmenter les caractéristiques mécaniques.	- Austénitisation puis transformation martensitique. -Durcissement secondaire par précipitation.
Adoucissement	- Augmenter la ductilité. - Diminuer la fragilité.	- Élimination des dislocations par restauration ou recristallisation. - Coalescence et globularisation des précipités. - Grossissement de grain. -Transformations de phase.
Détente	Éliminer une partie des contraintes résiduelles	- Par abaissement de la limite d'élasticité avec la température. -Par relaxation des contraintes (fluage).
Traitements superficiels	Augmenter la dureté en surface.	Apport d'interstitiels.
Désensibilisation	Supprimer la sensibilité à la corrosion intergranulaire due aux carbures de chrome.	Homogénéisation de la teneur en chrome autour des carbures (diffusion).

8. Conclusion

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans l'industrie pétrolière, pour la production et le transport de pétrole brut ou de gaz, dans l'industrie chimique, dans le domaine maritime, la médecine...Ces aciers sont très intéressants, aussi bien pour leur résistance à la corrosion que pour leurs propriétés mécaniques, ainsi que pour un coût de production raisonnable.

Dans le chapitre suivant, On fait une étude expérimentale sur les caractéristiques mécaniques et géométriques du cordon soudé.

Chapitre 3

Etude expérimentale

Chapitre 3 : Etude expérimentale

1. Introduction

Le procédé de soudage MAG (Métal Active Gaze) est réalisé par une poste soudure de type PM-500PT- HYL. Des tôles de 2 mm et 3mm d'épaisseur, l'acier inoxydable 304L étudié. sont utilisées le métal d'apport (aciers inoxydables 308LSi) d'un fil de diamètre 1.2mm, intensité variable (100-125-150-200-225-250 (A)).

2. Matériaux utilisés

2.1. Matériau d'étude 304L

L'acier utilisé dans cette étude est un acier inoxydable AISI 304L – DIN 1.4307-X2CrNi18.9 AFNOR Z3CN19 09 utilisé sous la forme de tôle d'épaisseur (2mm et de 3mm), conforme à la norme EN10130, Il existe de nombreux types différents d'aciers inoxydables. Tous ne conviennent pas aux applications de construction, en particulier lorsqu'on envisage le soudage.

On compte cinq groupes fondamentaux d'aciers inoxydables, classés selon leur structure métallurgique : ce sont les groupes, ferritique, martensitique, duplex, durcis par précipitation et austénitique [13].

De cette dernière famille (austénitique) appartient notre métal à étudier 304L, il a plusieurs spécifications, une résistance à la corrosion moyenne, intermédiaire entre celle du 302 et 316 se forme facilement à froid (pliage, étampage, emboutissage.) Cependant son taux d'écrouissage très important nécessite des équipements adaptés. L'écrouissage a pour conséquence de rendre cet acier légèrement magnétisable. Lorsque cet acier est maintenu à des températures entre 500°C et 900°C , il y a risque de formation de phase, aux conséquences nocives pour l'aptitude à la corrosion. un recuit consécutif sera alors nécessaire pour dissoudre cette phase suivi d'un refroidissement rapide pour éviter toute nouvelle précipitation. Une trempe n'est nécessaire que pour les pièces de grande dimension, il est aisément soudable par tous les procédés et aucun traitement thermique n'est nécessaire après soudage. Les soudures devront être décapées mécaniquement ou chimiquement puis passivées il est utilisé pour un grand nombre d'applications, industrie chimique et alimentaire, visserie, matériel de transport [18].

Tableau 3.1 : Composition Chimique de l'acier 304 L

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>N</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>
0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	17.5-19.5	0.11	8-10	Reste

Tableau 3.2 : Propriété Physique de l'acier 304 L

Densité (Kg.m ³)	Résistivité électrique (Ω.m)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Module Elastique (GPa)	Coefficient dilatation				
					100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
7,90	0,73	500	15	200 à 200°C	16	16.5	17	17.5	18

2.2. Le métal d'apport

Le métal d'apport utilisé est l'acier inoxydable 308 L Si (EN ISO 14343-A : G19 9 L Si), sous la forme d'une bobine de fil de diamètre 1,2 mm. Ce type de métal d'apport présente une bonne résistance à la corrosion et bonnes propriétés mécaniques.

Tableau 3.3. : Composition chimique de l'acier inoxydable 308 l Si.

C%	Si%	Mn%	Ni%	Cr%	S%	P max%	Fer%
0.025	0.90	1.80	10.00	20.50	0.02	0.02	Reste

3. Géométrie des éprouvettes et caractérisation mécanique

La réalisation des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction 600 KN (figure 3.1). L'essai de traction est exécuté sur des éprouvettes plates d'épaisseur « E = 2 mm et 3 mm » dont les dimensions sont données par figure 3.2a). Quatre éprouvettes à chaque épaisseur ont été réalisées pour ce type d'essai (Figure 3.2b). Les essais de traction menés (quatre essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements (figure 3.3a.3b) Les

caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure 3.4a et figure 3. 4b.



Figure 3.1: Machine 600 KN pour d'essai de traction (labo génie civile fac technologie)

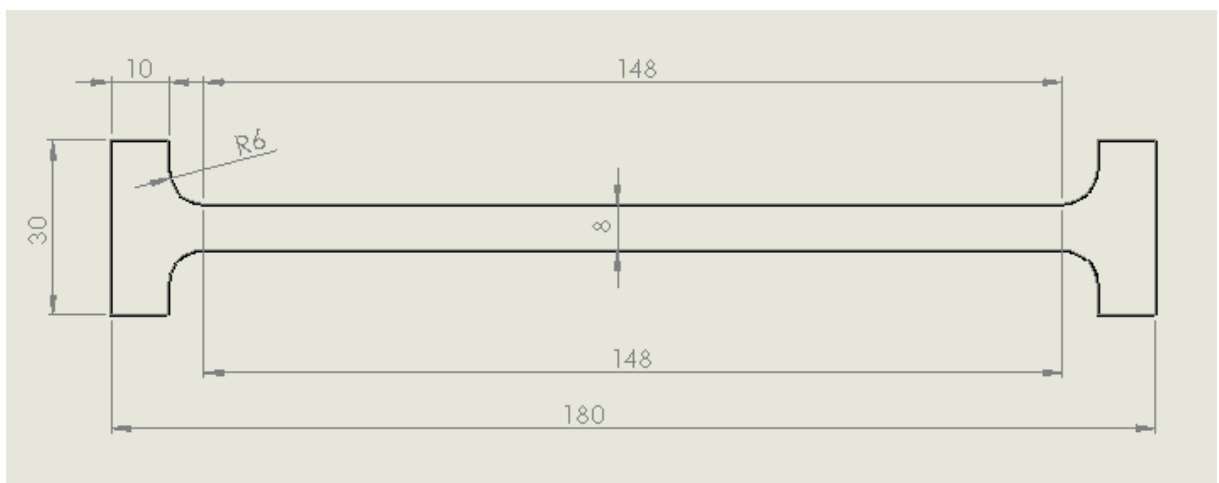


Figure 3.2a: Dimension des éprouvettes de traction



Figure 3.2b : Eprouvettes de traction réalisées en 304 L

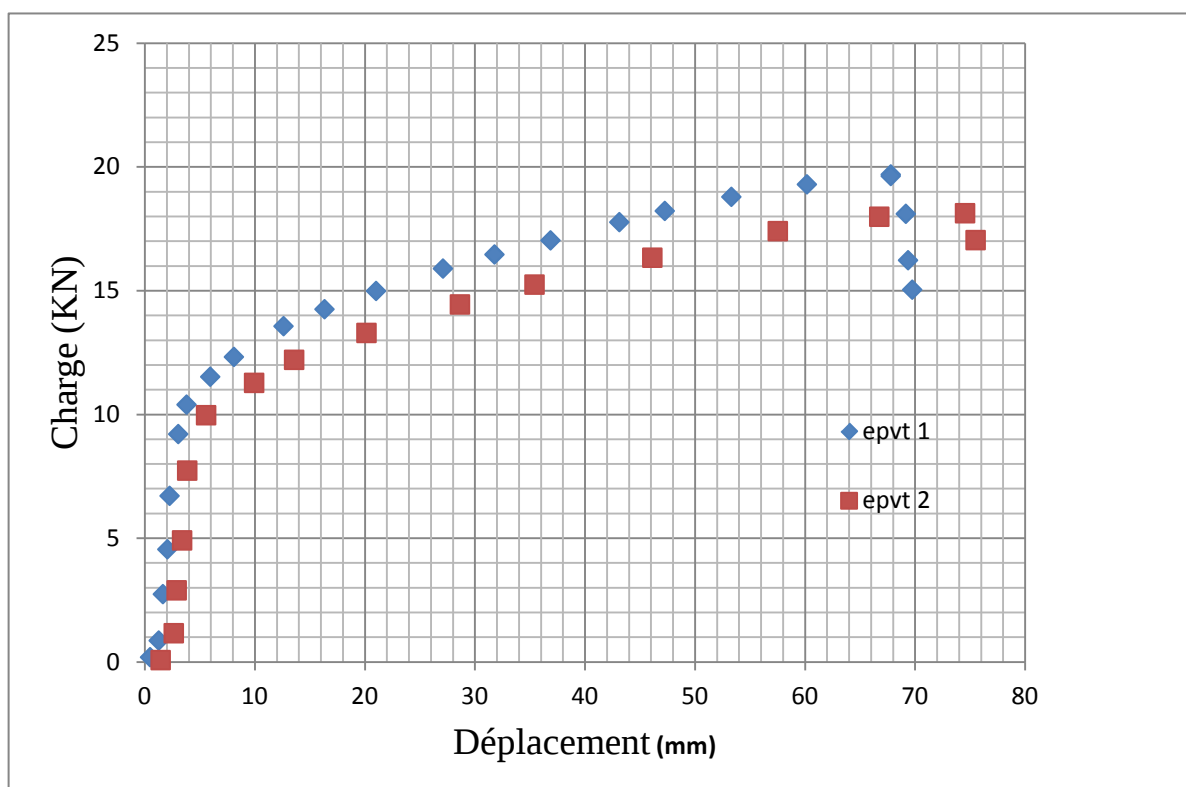


Figure 3.3a : Courbes de traction charge / Déplacement pour de éprouvettes de 2mm.

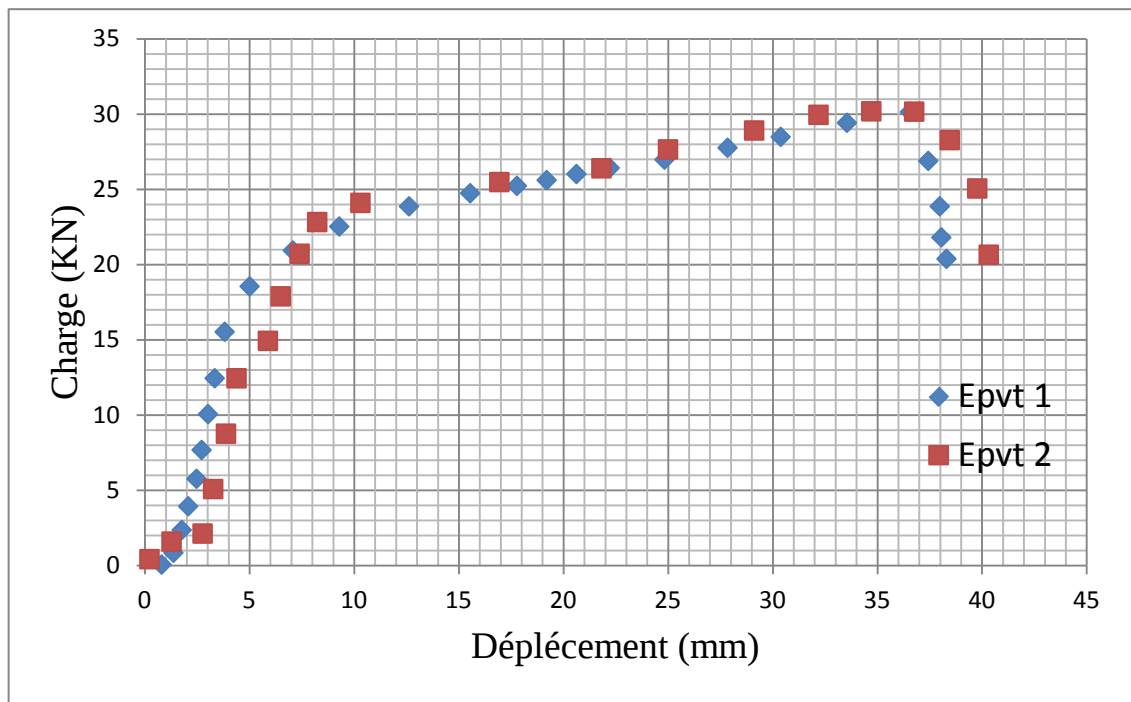


Figure 3.3b : Courbes de traction Charge / Déplacement pour des éprouvettes de 3mm.

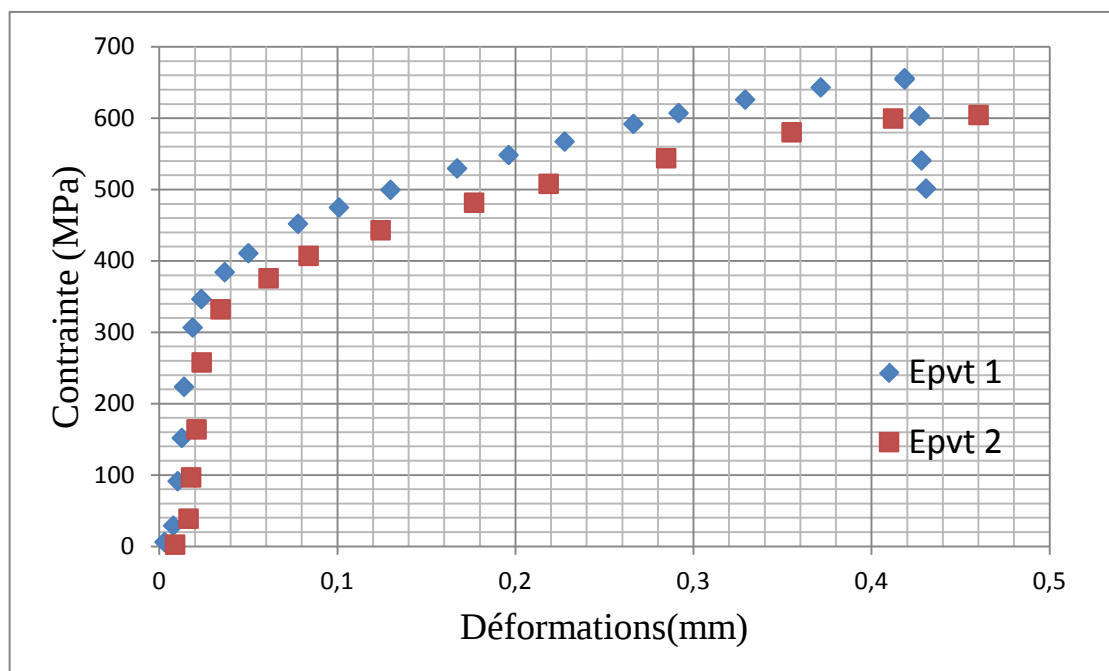


Figure 3.4a : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations pour des éprouvettes de 2mm

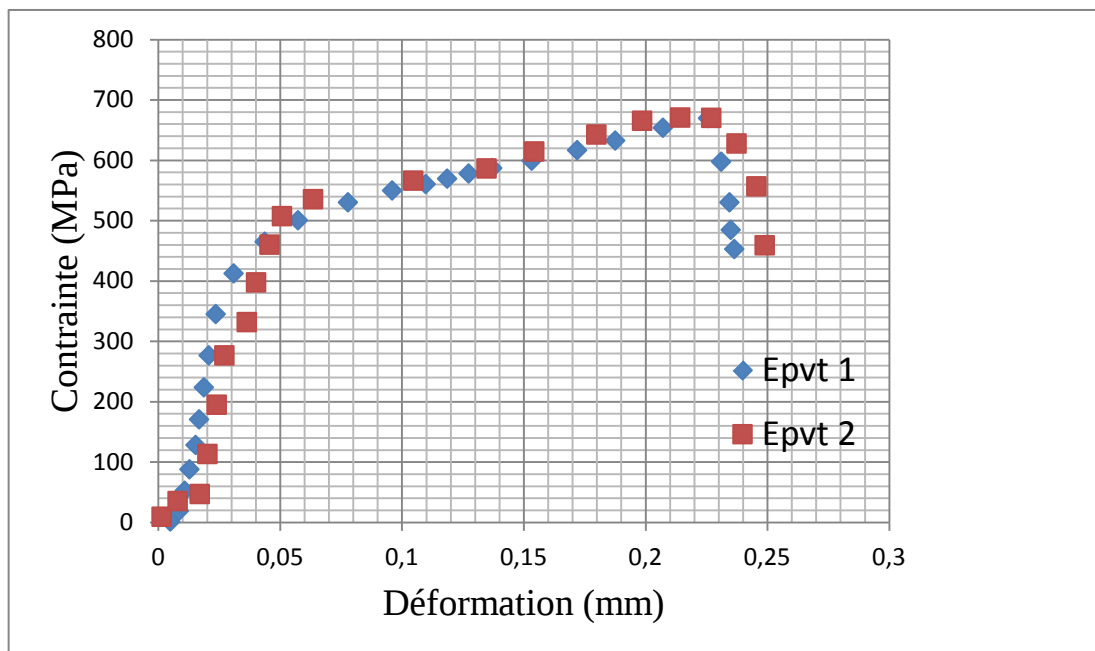


Figure 3.4b : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations pour des éprouvettes de 3mm.

4. Choix du paramètre de soudage MAG pour l'acier inoxydable 304L

Le bon fonctionnement du procédé MAG repose sur l'équilibre entre la vitesse de dévidage du fil et la vitesse de fusion. Pour un fil et un gaz donné, cet équilibre dépend de:

- La tension d'arc U ;
- l'intensité du courant de soudage I ou la vitesse de fil V_f ;
- La valeur de la self ;
- La longueur de fil sorti ;
- Le sens d'avance.

L'assemblage réalisé par le procédé MAG entre deux plaques en acier 304L est montré par (la Figure 3.5) la dimension 'A' représente la longueur de superposition par recouvrement. Le poste de soudage utilisé est de type « PM-500PT- HYL » (Figure 3.6). Les paramètres de soudage de l'acier 304L sélectionnés pour le plan expérimental selon la longueur de recouvrement sont présentés sur le tableau 3.5.

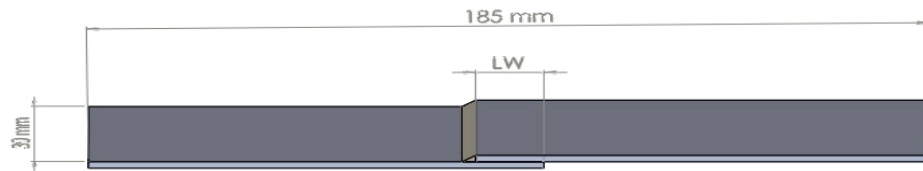


Figure 3.5 : Assemblages soudés par MAG des éprouvettes 304L.

Tableau 3.4. : Les différents essais de soudage MAG pour les éprouvettes en acier inoxydable 304L

Eprouvettes de 2mm						
CO ₂ gaz de protection						
1.2 mm diamètre de fil						
	V _d (min/mm)	I(A)	U(V)	Temps (min)	Longueur (cm)	V _s (min/cm)
1	2.2	100	17	0.13	0.30	2.3
2	2.8	125	17	0.11	0.3	2.7
3	3.8	150	17	0.08	0.30	3.75
4	6	200	20.6	0.04	0.30	6
5	7.2	225	23.4	0.05	0.30	7.5
6	7.9	250	25.1	0.03	0.30	10
Eprouvettes de 3mm						
CO ₂ gaz de protection						
1.2 mm diamètre du fil						
	V _d (min/mm)	I(A)	U(V)	Temps (min)	Longueur (cm)	V _s (min/cm)
7	2.2	100	17	0.14	0.30	2.1
8	2.8	125	17	0.20	0.3	1.5
9	3.8	150	17	0.13	0.30	2.3
10	6	200	20.6	0.11	0.30	2.72
11	7.2	225	23.4	0.08	0.30	3.75
12	7.9	250	25.1	0.06	0.30	5



Figure 3.6 : Poste de soudage MAG.

5. Conclusion

Les assemblages réalisés à clin en utilisant le procédé MAG sont destinés aux essais de caractérisation mécanique de cisaillement par traction.

Les éprouvettes à tester sont assemblées subissent des variations de courant, celles –ci influent sur la vitesse de dévidage de fil et la tension sortie.

Chapitre 4

Résultats et discussions

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'apporter un comportement mécanique des assemblages soudés de procédé MAG. les éprouvettes sont sollicitées en traction où les cordons sont soumis en cisaillement par traction.

Le mécanisme de rupture ainsi que le comportement mécanique du joint soudé sont étudiés sous l'influence de la variation du courant de soudage.

2. Mécanisme de rupture

Les cordons de soudures d'un assemblage à clin subissent des efforts des cisaillements le mécanisme de rupture dépend principalement des défauts dans le cordon et de la taille de la zone fondue. Ces derniers affectent la tenue mécanique de l'assemblage et le module de rupture.

Dans tous les cas, la rupture s'amorce en racine de cordon, sous l'effet des concentrations de contraintes produites dans cette zone, accentuées par la rotation de l'interface de liaison. La résistance est principalement déterminée par la taille des porosités formées dans le cordon au voisinage de l'interface. Le cordon présente de larges porosités, et les fissures sont amorcées en racine du cordon. Dans ce cas la rupture se produit sous faibles charges. La propagation de la fissure se produit ensuite, selon les cas :

- dans le cordon, perpendiculairement à la direction de traction ;
- les longs de l'interface jusqu'à la séparation complète de l'éprouvette, lorsque l'énergie linéique de soudage est plus faible, et ne produit pas de grosses porosités dans le cordon.

3. Effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique

En soudage MAG, il est généralement perçu, que la fusion du fil électrode, en courant continu et polarité positive (le fil constitue alors l'anode), est vérifiée par l'effet joules compétent sur la partie terminale du fil (stick out), et la chaleur de condensation des électrons que reçoit l'extrémité du fil. La vitesse de fusion du fil augmente alors avec l'intensité de soudage, en suivant généralement une loi polynomiale.

Les courbes de traction sur éprouvettes réalisées avec différents courants de soudage (figure 4.1 et 4.2) illustrent le comportement mécanique des assemblages soudés pour des essais de

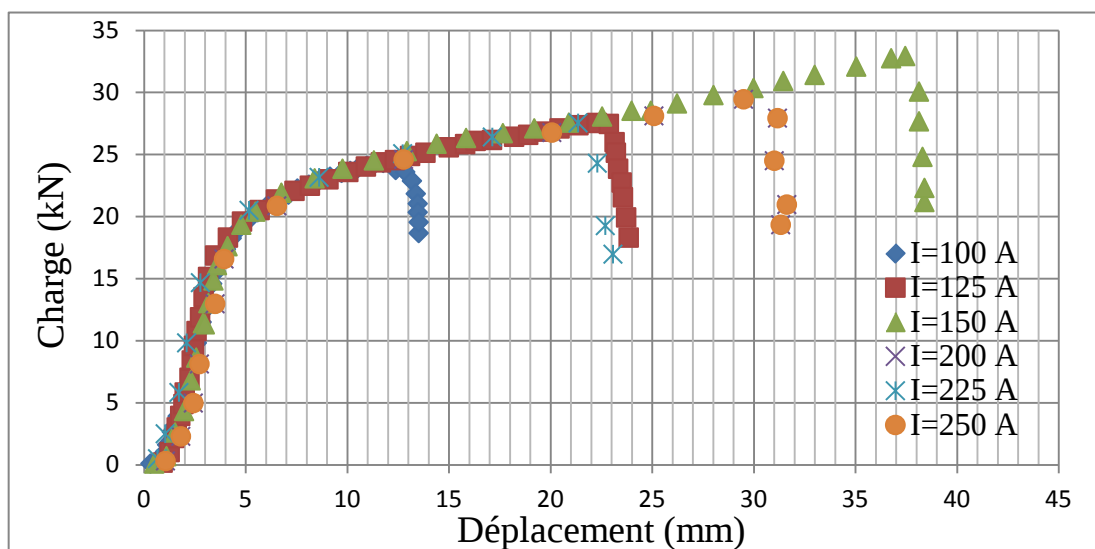
cisaillement par traction que représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement respectivement pour des intensité 100, 125, 150, 200, 225 et 250 (A) et pour une des épaisseur de 2 mm et ,3 mm).

L'augmentation de l'intensité de courant augmente la zone de la déformation plastique mais instable. On remarque toujours que la zone de la déformation plastique est plus étendue pour 150 (A). La zone de déformation plastique a diminué pour les courants de soudages 225 et 250(A).

L'effet du courant de soudage sur la charge maximale de rupture pour les deux épaisseurs est représenté par la figure 4.3. L'allure générale montre une augmentation de la charge de rupture avec l'augmentation du courant de soudage jusqu'à 150(A). Afin de mieux comprendre certaines interactions des paramètres de soudage et leurs phénomènes aléatoires, des essais statistiques sont nécessaires et accompagnés par des analyses des surfaces de ruptures au niveau des interfaces.

Les figures 4.6 à 4.9 illustrent les effets de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement. On remarque que les assemblages d'épaisseur de 2 mm présentent une large zone de déformation plastique par rapport des assemblages d'épaisseur de 3 mm. Par contre les charge de rupture sont important dans le cas d'un assemblage des tôles de 3mm par rapport aux assemblages des tôles de 2 mm (figure 4.2 et figure 4.3).

Les images des assemblages rompus cisaillement par traction sont données par la figure 4.10. La présence de défaut en fin de soudure fait propager la fissure dans le sens inverse de l'exécution de cordon soudure.



**Figure 4.1 : effet de courant de soudage sur les évolutions de charge/ déplacement,
E=2mm**

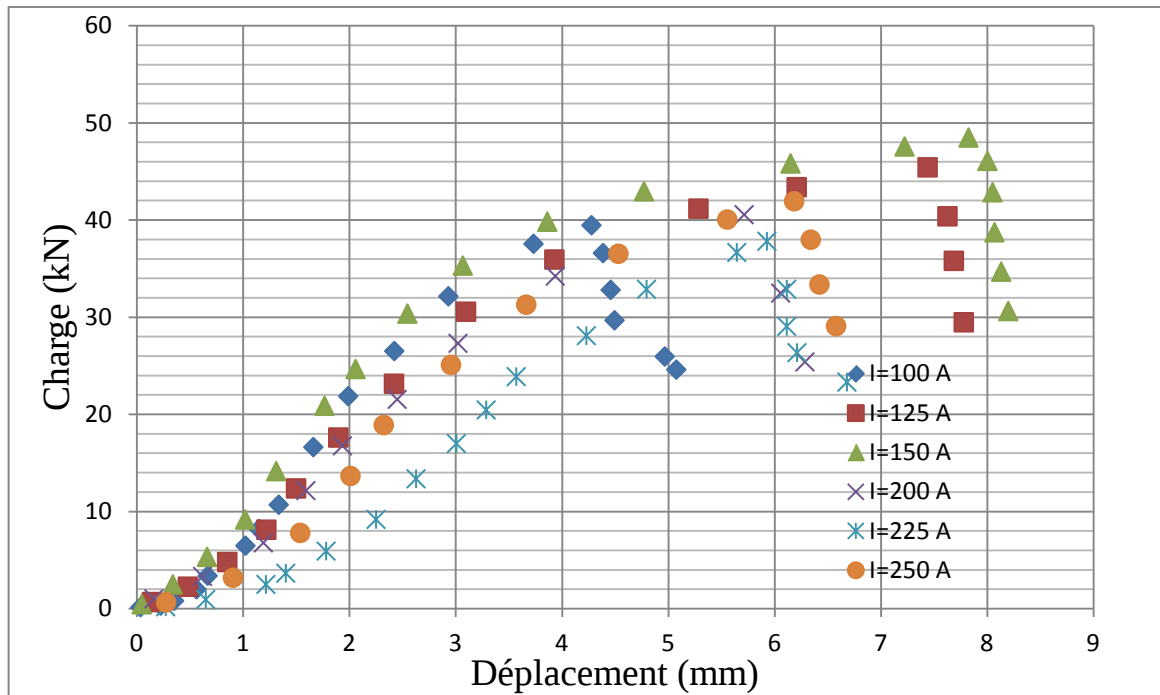


Figure 4. 2 : Effet de courant de soudage sur les évolutions de Charge /Déplacement ;
E=3mm

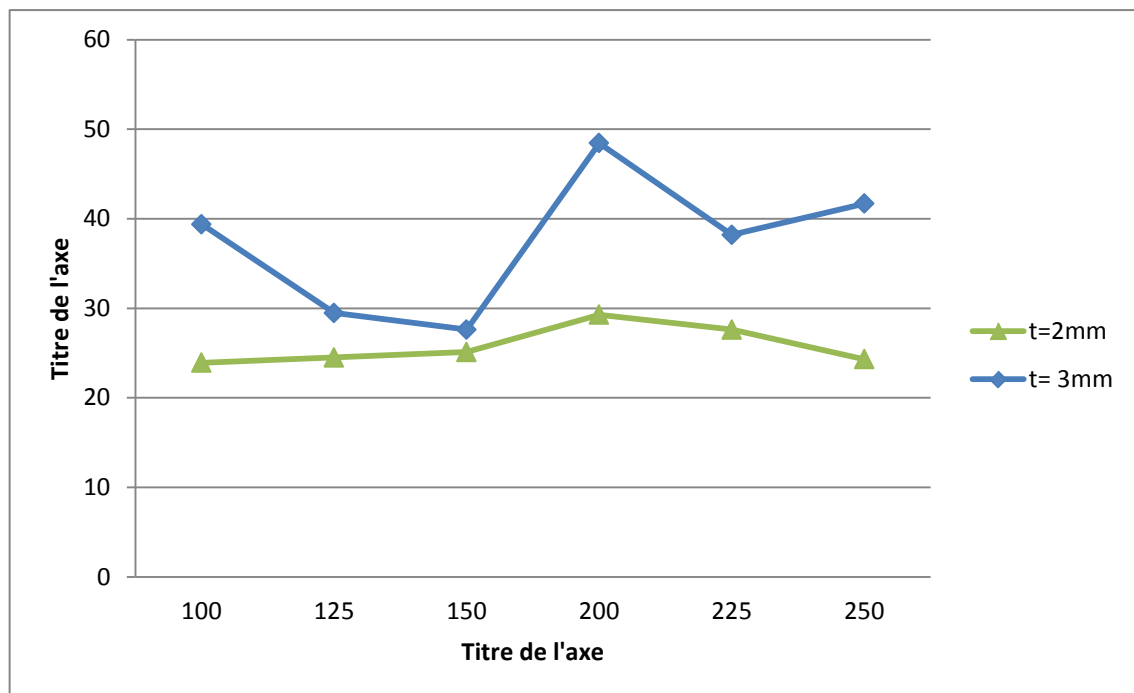


Figure 4.3. : Effet de courant de soudage sur la charge maximale de rupture pour t=2mm et
E=3mm.



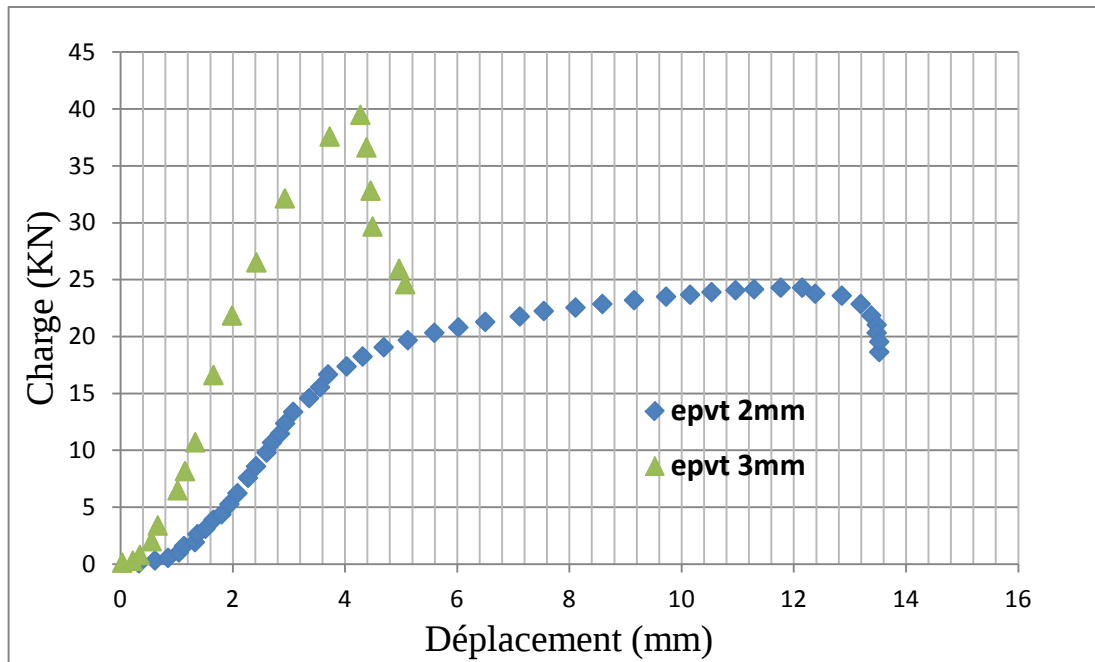


Figure 4.4 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 100 (A)

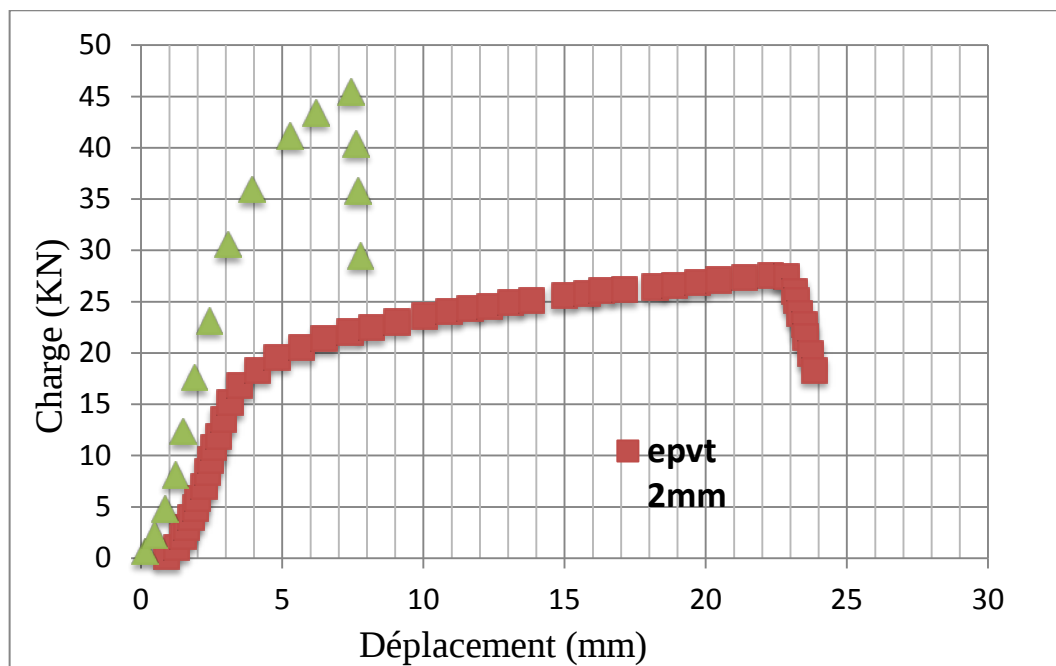


Figure 4.5 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 125 (A)

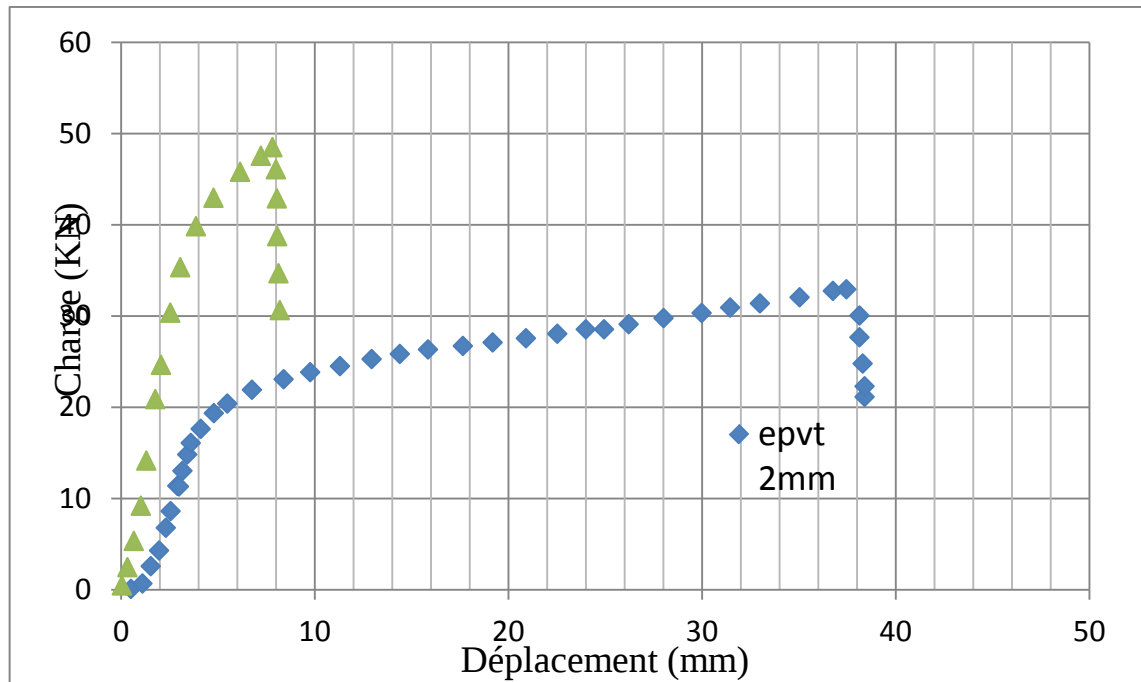


Figure 4.6 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 150 (A)

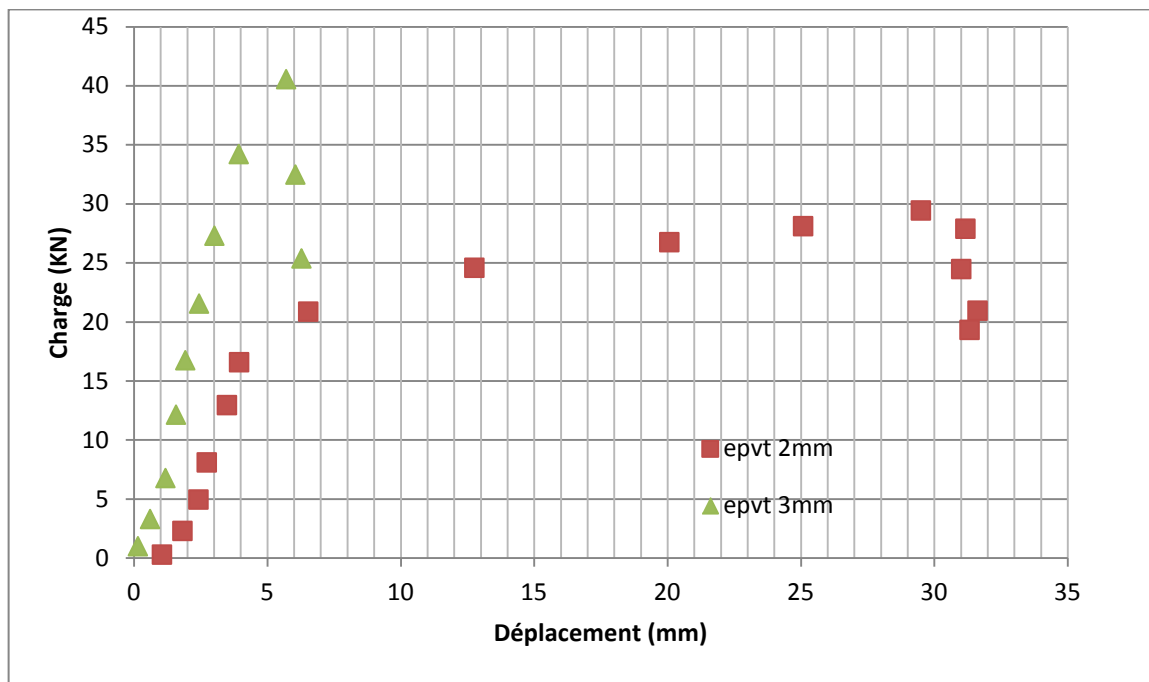


Figure 4.7 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 200 (A)

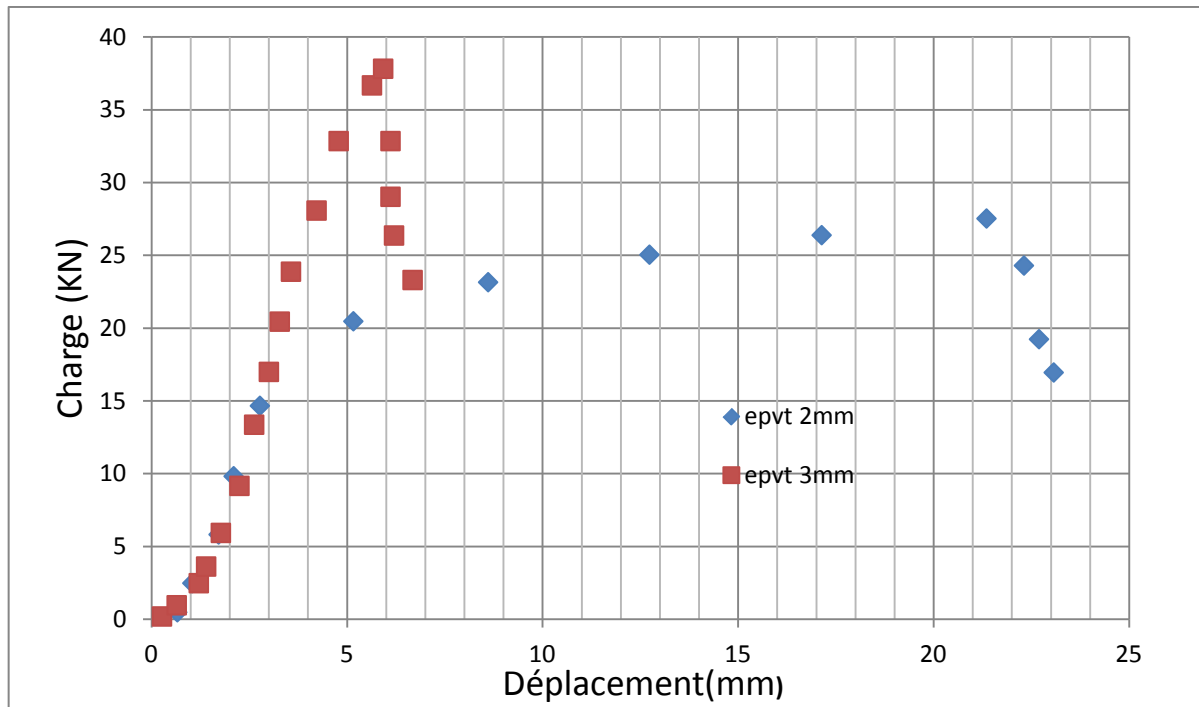


Figure 4.8 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement pour une intensité de 225 (A)

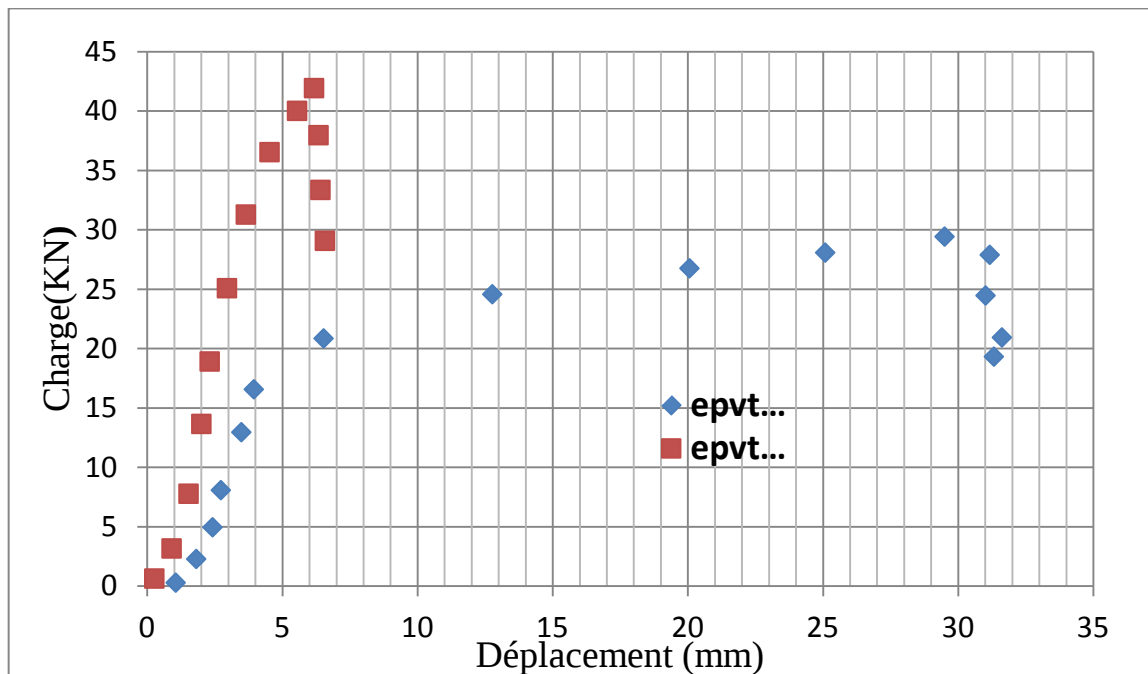


Figure 4.9 : effet de l'épaisseur sur le comportement charge/déplacement une intensité de 250 (A)



100(A), 3mm



100 (A), 2mm



125 (A) , 3mm



125 (A), 2mm



150(A), 3mm



150(A), 2mm



200(A), 3mm



200(A), 2mm



225'(A), 3mm



225(A), 2mm



250(A), 3mm



250(A), 2mm

Figure 4.10 : les éprouvettes de qui subit à l'essai de traction.

4. Conclusion

Les essais de cisaillement par traction montrent les courbes charge/déplacement (caractérisations mécaniques sont effectuées par la variation des courants de soudage.

Au de là du courant de soudage 150(A) l'étendue de la déformation plastique est réduite.

La résistance à la rupture augmente avec l'augmentation du courant de soudage.

La résistance à la rupture est réduite à partir du courant de soudage 200(A).

La rupture se fait la longue de cordon soudure.

Le mécanisme de rupture dépend du défaut.

Conclusion et perspective

Conclusion et perspectives

L'objective présente une étude expérimentale de l'effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique des joint soudés par procédé MAG (Métal Active Gaz) de l'acier inoxydable 304L. La première partie regroupe la description des procédés de soudage à l'arc et spécialement le soudage sous protection gazeuse avec électrode fusible (MIG/MAG) et des généralités sur les aciers inoxydables. La deuxième partie décrit l'étude des assemblages des aciers inoxydables « AISI 304L – DIN 1.4307-X2CrNi18.9 AFNOR Z3CN19.09 » pour deux types d'épaisseur.

Suite aux essais effectués, il a été déduit que :

- Les essais de cisaillement par traction montrent les courbes charge/déplacement (caractérisations mécaniques sont effectués par la variation des courants de soudage ;
- au de là du courant de soudage 150(A) l'étendue de la déformation plastique est réduit ;
- Résistance à la rupture augmente avec l'augmentation du courant de soudage ;
- La résistance à la rupture est réduit aparté de courant de soudage 200(A) ;
- La rupture se fait la longue de cordon soudure ;
- Le mécanisme de rupture dépend du défaut ;

Perspectives

- Etude de la forme des défauts sur la rupture des assemblages soudés à clin ;
- Etude de la résistance à la fatigue.

Références bibliographiques

- [1] R. BLONDEAU, procédés et application industrielle du soudage, LAVOISIER 2001, Paris.
- [2] Klas Weman, aide-mémoire : procédés de soudage, Dunod paris 2005, pour la traduction française.
- [3] Roland CAZES, Procédés de soudage (Principes généraux et critères de choix), technique d'ingénieur B 7 700.
- [4] Alain MICHEL, Pièces mécaniques soudées (Rappels et définitions), technique d'ingénieur BM 5 185.
- [5] PERRY Nicolas. Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage à TIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, thèse de doctorat 2000.
- [6] Emilie LE GUEN, Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique, thèse de doctorat 2010.
- [7] AMRI BRAHIM, Effet d'hystérésis de la dilatation thermique sur les contraintes résiduelles dues au soudage, mémoire de fin d'étude 2008.
- [8] S. Belakhowsky. Théorie et pratique du soudage. PYC-Edition 1973, Paris.
- [9] Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG, chapitre 2. Généralités physiques sur l'arc électrique sous protection gazeuse, pages 13-14. Air Liquide Welding, 2004.
- [10] Dan Erlandsson. Les fondamentaux du procédé MIG/MAG, Soudage - MIG/MAG. ESAB AB Welding Equipment AB, Laxå, Sweden 2007.
- [11] Danut Iordachescu, Luisa Quintino. Short communication :Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. Materials Processing Technology 2 0 2 (2 0 0 8) 391–397.
- [12] PX PRECIMET SA : Sélection des fiches techniques

[13] OUCHEN Mohamed, Effet du pH du milieu sur la corrosion de l'acier inoxydable 304L, soutenu le 01/10/2013.

[14] Maher SHAIRA, Caractérisation non destructive de la transformation martensitique de l'acier 304L induite par déformation cyclique, Soutenue le 1er décembre 2006 devant la commission d'examen.

[15] Hao Wang,a,b, Hongyang Jing,a,b, Lei Zhao,a,b, Yongdian Han,a,b, Xiaoqing Lv,a,b, Lianying Xua,b, Uniaxial ratcheting behaviour of 304L stainless steel and ER308L weld joints, Materials Science & Engineering, Materials Science & Engineering A 708 (2017) 21–42.

[16] Bachir Mezrag ,Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT, HAL Id: tel-01244380, Submitted on 15 Dec 2015.

[17] Webgoogle , Ecoxper séparateur hydrocarbure, contact@ecoxper.com, 2016.

[18] Webgoogle .les métaux d'apport et électrodes tungstène les métaux d'apport ,2018 .