

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme de master en Génie Mécanique
Option : Matériaux et traitement des surfaces

Thème :

**Soudage MIG et TIG des aciers inoxydable 316L et 310s
avec traitement thermique**

Présenté par :

Dirigé par : Mr. Abada. M

Hayane Abdelhafid

Co-dirigeant: Mr. A. Haddad

ANNEE UNIVERSITAIRE 2013/2014

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....1

Chapitre 1

Généralité sur l'acier inoxydable

I.1 Introduction et historique.....2

I.2 Les Familles des aciers inoxydables.....3

I.2.1 Aciers inoxydables martensitiques3

I.2.2 Aciers inoxydables ferritiques.....3

I.2.3 Aciers inoxydables austénitiques.....4

I.2.4 Aciers inoxydables austénoferritiques.....4

I.3 Propriétés mécaniques des aciers inoxydables.....5

I.4 Rôles des éléments d'addition.....6

a) Le chrome.....6

b) Le carbone.....6

c) Le nickel.....6

d) Le manganèse.....6

e) Le molybdène et le cuivre.....6

f) Le tungstène.....6

g) Le titane.....6

h) Le niobium.....7

i) Le silicium.....7

I.5. Domaines d'utilisation des aciers inoxydable.....7

I.5.1 Équipements pour l'industrie.....7

I.5.2 Électroménager et coutellerie.....7

I.5.3 Industrie automobile.....8

I.5.4 Industrie des transports terrestre et maritimes.....8

I.5.5 Les Tubes.....	8
I.5.6 Bâtiment.....	8
I.6 Les procédés utilisés pour le soudage des aciers inoxydables.....	9
I.7 Caractéristiques métallurgiques du 316L.....	9
I.7.1 Structure métallurgique du 316L, 310S et composition chimique.....	10
I.8 Les Traitements Thermiques.....	11
I.8.1 Introduction	11
I.8.2 Définitions des traitements thermiques.....	11
I.8.3 Les principales étapes dans les traitements thermiques	12
a) Chauffage des pièces.....	12
b) les principaux modes du traitement thermique	13
I.9 Les différents traitements thermiques	13
I.9.1 La trempe.....	13
I.9.2 Le revenu.....	13
I.9.3 Les traitements d'adoucissements	14
• Le Recuit.....	14

Chapitre 2

Généralités sur le soudage

II.1 Introduction.....	14
II.2 Procédés de soudage.....	16
II.2.1 Définition	16
a) Le brasage	16
b) Le soudo brasage.....	16
c) Représentation macrographique d'une soudure	17
II.3 Les Classifications des procédés de soudage.....	19

II.4 Les différents procédés des soudages.....	20
II.4.1 le procédé TIG.....	20
• principe du soudage TIG	20
II.4.2 Le soudage par friction.....	21
II.4.3.Le Procédé SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	22
II.5 Le soudage MIG/MAG.....	23
II.5.1 Histoire de procédé de soudage MIG/MAG	23
II.5.2 Le procédé MIG/MAG	23
• Définition et principe du soudage MIG-MAG.....	23
• Le procédé MAG.....	24
• Le procédé MIG.....	25
II.5.3 Gaz de protection.....	25
• Argon(Ar).....	26
• Hélium (He).....	26
• Dioxyde de carbone (CO ₂).....	26
• Hydrogène (H ₂).....	26
• Oxygène (O ₂).....	26
• Azote(N ₂).....	26
II.6 Les Avantages et Les Inconvénients.....	27
II.7 Les paramètres opératoires et physiques induits par le soudage MIG /MAG.....	28

Chapitre 3

Partie expérimentale

III.1 Introduction.....	29
III.2 Identification du métal de base.....	29
III.3 Préparation des échantillons pour le soudage.....	30
III.3.1 Etape de coupe d'une tôle.....	30
• Matériau utilise 316L et 310s.....	30

III.3.2 Traitement thermique	31
• Principe de traitement thermique	31
III.4. Opération de soudage	31
III.4.1. Matériel utilisé	32
• Générateur de courant	32
• Gaz utilise	32
• La Torche	33
• Le Métal d'apporte	33
III.4.2 Principe et paramètres du soudage MIG.....	34
• Parametres de soudage	34
III.5 Les pièce soudées par soudage MIG.....	34
III .5.1.1 ^{er} etape thaitement thermique puis soudage MIG.....	34
III.5.2.2 ^{eme} etape sans traitement thermique	35
III.5.3.3 ^{eme} etape soudage MIG puis un traitement thermique	36
III.6 Opération de la micrographique.....	36
III.6.1 Enrobage.....	36
III.6.2 Polissage.....	37
III.6.3. Attaque chimique	39
III.6.4. Analyse micrographique.....	39
III.7. Les essais mécaniques	40
III.7.1. Essai de la microdureté	40
• Introduction	40
III.7.2. Essais de la microdureté	40
III.8. Opération d'essai de résilience	42
III.8.1.Introduction.....	42
III.8.2 Définition	42

Chapitre 4

Interprétation des résultats

IV.1 Introduction	44
IV .2 Observation micrographique	44
IV .3 L'essai de microdureté	45
IV .4 Essais de résilience.....	60
Conclusion générale	64
Les Références.....	66

Liste des tableaux et figures

Les tableaux

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables	4
Tableau I.2 : Limites de composition chimique de l'acier 316L et 310s.....	9
Tableau II.1: les avantages et les inconvénients.....	26
Tableau III.1 : Composition chimique du métal de base 316L et 310s.....	28
Tableau III.2 : caractéristique mécanique du 316L et 310s.....	28
Tableau III.3 : la composition chimique de métal d'apporte ER316LSi.....	32
Tableau III.4 : Caractéristiques techniques (Pièce + Equipement).....	33
Tableau III.5 : Parametres de soudage de 1 ^{ere} etape(T.T puis le soudage MIG).....	34
Tableau III.6 : Parametres de soudage de 2 ^{eme} etape(sans T.T).....	34
Tableau III.7 : Parametres de soudage de 3 ^{eme} etape(soudage MIG puis un T.T).....	35
Tableau IV.1 : Les résultats de micro dureté sans T.T.....	45
Tableau IV.2 la moyenne des résultats de micro dureté sans T.T.....	45
Tableau IV.3 : Les résultats de micro dureté avec T.T pue le soudage MIG	46
Tableau IV.4 la moyenne des résultats de micro dureté avec T.T pue le soudage MIG.....	46
Tableau IV.5 : Les résultats de micro dureté avec le soudage MIG puis un T.T.....	47
Tableau IV.6 la moyenne des résultats de micro dureté avec le soudage MIG un T.T.....	47
Tableau IV.7 : Les résultats de micro dureté avec le soudage TIG un T.T.....	48
Tableau IV.8 : la moyenne des résultats de micro dureté avec le soudage TIG un T.T.....	48
Tableau IV.9 : Les Résultats de l'essai de résilience.....	60

Les Figures

Chapitre I : les aciers inoxydable

Figure I.1 : cycle des traitements thermiques.....	11
Figure I.2 : Le traitement de revenu	13

Chapitre II : Le procédé de soudage

Figure II.1 : Cordon de soudure.....	16
Figure II.2 : Classification des procédés de soudage.....	18
Figure II.3 : Sources thermiques et densités d'énergie.....	19
Figure II.4: Principe de l'application de la torche du procédé TIG.....	20
Figure II.5: Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	21
Figure II.6 : Procédé de soudage en MIG/MAG.....	23
Figure II.7 : principe du soudage MIG.....	24

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 : Machine de Guillotine	29
Figure III.2 : photo 1(316L) et photo 2 (310s).....	29
Figure III.3 : four utilisé.....	30
Figure III.4 : trempe à l'air 316L et 310s.....	30
Figure III.5 : Poste de soudage MIG (MigC340 PRO).....	31
Figure III.6 : gaz d'argon (jaune)	31
Figure III.7 : Torche utilise pour le soudage MIG.....	32
Figure III.8 : métal d'apporte ER316LSi	32
Figure III.9 : les pièce subit un traitement thermique puis le soudage MIG.....	34
Figure III.10 : les pièces soudées sans T.T	34

Figure III.11 les pièces soudées puis un traitement thermique.....	35
Figure III.12 Machine enrobeuse.....	36
Figure III.13 : Talons de soudure enrobée par la résine.....	36
Figure III.14 : Polisseuse	37
Figure III.15 : 1 ^{ère} Etape de Polissage	37
Figure III.16 : 2 ^{ème} Etape de Polissage (Finition).....	37
Figure III.17 : Après polissage le cordon de soudure enrobé par la résine.....	38
Figure III.18 : Microscope optique.....	38
Figure III.19 : Caractéristiques de l'essai.....	40
Figure III.20 :L'appareil de microdureté.....	40
Figure III.21 : Empreinte de pénétrateur.....	40
Figure III.22 : Eprouvette normalisée avec une entaille de forme V.....	41

Chapitre IV : Les Résultats et interprétations

Figure IV.1: micro dureté MB 316L-310s avec le soudage MIG et TIG un T.T.....	49
Figure IV.2 : micro dureté de métal de base 316L avec le soudage MIG et TIG un T.T.....	49
Figure IV.3: micro dureté MB 310s avec soudage MIG et TIG un T.T.....	49
Figure IV.4 : micro dureté ZAT 316L- 310s avec soudage MIG et TIG un T.T.....	50
Figure IV.5 : micro dureté ZAT 316L- 316L avec soudage MIG et TIG un T.T.....	50
Figure IV.6 : micro dureté ZAT 310s-310s avec soudage MIG et TIG un T.T.....	51

Figure IV.7: micro durezza ZF 316L-310s avec soudage MIG et TIG un T.T.....	51
Figure IV.8 : micro durezza ZF 316L-316L avec soudage MIG et TIG un T.T.....	52
Figure IV.9 : micro durezza ZF 310s-310s avec soudage MIG et TIG un T.T.....	52
Figure IV.10 : micro durezza MB 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	53
Figure IV.11: micro durezza MB 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	53
Figure IV.12: micro durezza MB 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	54
Figure IV.13 : micro durezza ZAT 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	54
Figure IV.14 : micro durezza ZAT 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	55
Figure IV.15 : micro durezza ZAT 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis un soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	55
Figure IV.16: micro durezza ZF 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	56
Figure IV.17: micro durezza ZF 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	57
Figure IV.18: micro durezza ZF 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	57
Figure IV.19: micro durezza à différents zone (MB, ZAT, ZF) sans T.T.....	58

Figure IV.20: micro dureté à différents zone (MB, ZAT, ZF) TT puis le soudage MIG.....	58
Figure IV.21: micro dureté à différents zone (MB, ZAT, ZF) soudage MIG puis un T.T.....	59
Figure IV.22 : Les Résultats de l'essai de résilience à différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).....	61
Figure IV.23 : Les Résultats des essais de résilience à l'étape de soudage MIG et TIG puis un Traitement thermique.....	62

Introduction générale

Dans le cadre de cette étude, une analyse sur l'acier inoxydable sera élaborée. Les deux aciers inoxydables 316L et 310s, qui contiennent Cr et Ni comme principaux éléments d'addition, possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques et bénéficient d'un bon durcissement structural, via une décomposition complexe faisant intervenir aussi bien des phases stables que métastables. Son utilisation dans le domaine de l'industrie aéronautique est l'automobile etc.

Lors du processus de soudage en TIG et MIG du matériau, un gradient de température se crée entre le métal de base et la zone fondue. Ainsi, les variations de gradient de température vont engendrer des structures métallographiques et des caractéristiques mécaniques diverses dans les différentes zones du cordon de soudure. Elle nécessite aussi l'utilisation des essais de microdureté et de résilience afin d'évaluer la qualité de la soudure, de caractériser l'interaction entre le matériau et le procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'évolution de la microstructure et de la texture dans les soudures de l'acier inoxydable austénitique et l'évolution des propriétés mécaniques à 316L, 310s et de mettre en évidence l'effet des traitements thermiques sur ces deux caractéristiques.

Cette étude comporte 4 chapitres, qui sont :

- Introduction générale.
- **Chapitre I :** Dans ce chapitre une recherche bibliographique sur les aciers inoxydables et les familles des aciers inoxydables et les domaines d'utilisation des aciers inoxydables.
- **Chapitre II :** Dans ce chapitre une recherche bibliographique sur la généralité sur le soudage et les différents procédés de soudage et les comportements de soudage MIG et TIG.
- **Chapitre III :** Dans ce chapitre on étudie le comportement expérimental du procédé de soudage en TIG et les comportements des aciers inoxydables 316L et 310s.
- **Chapitre IV :** Dans ce chapitre une interprétation des résultats des essais mécaniques est élaborée.
- Une conclusion générale.

Chapitre I

Les aciers inoxydables

I.1 Introduction et historique :

L'acier inoxydable, couramment appelé acier inox ou inox, a un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, médecine, chirurgie, etc. C'est une famille d'aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité.

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires).

C'est en 1821 que Berthier introduisit cet élément dans les aciers destinés à l'industrie de coutellerie. Par la suite, il constata que le fer allié au chrome devenait plus résistant aux acides et cette résistance augmentait avec la concentration en chrome. A la fin du 19ème 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.

Les grandes familles d'aciers inoxydables se développent progressivement. Dès 1909, les principales nuances de base d'aciers martensitique, ferritique et austénitique connues actuellement sont élaborées.

Il faudra attendre 1931 pour voir apparaître les premières nuances d'aciers austéno-ferritiques. Ceux-ci ont été découverts par erreur par Hochmann lors d'essais de corrosion intergranulaire sur des éprouvettes censées être en acier inoxydable austénitique 18-8. Il remarqua que certaines de ces éprouvettes résistaient mieux que d'autres à la corrosion intergranulaire. [1]

I.2 Les Familles des aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables peuvent être classés de diverses manières selon les critères de classification considérés (la composition chimique, les méthodes d'élaboration, la structure du demi-produit final avant utilisation). La classification qui est de loin la plus utilisée est celle tenant compte de la structure qui, associée à la composition chimique, permet de définir le plus complètement les grandes familles d'aciers inoxydables que sont :

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grandes familles possédant chacune leurs propres caractéristiques.

- Les aciers inoxydables austénitiques
- Les aciers inoxydables martensitiques
- Les aciers inoxydables ferritiques
- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques également appelés « duplex »

I.2.1 Aciers inoxydables martensitiques :

La phase martensite est d'une grande dureté, donc peu ductile. Il s'ensuit que les aciers inoxydables martensitiques ne sont pas adaptés au formage à froid ; ils sont surtout utilisés en coutellerie où la mise en forme relève essentiellement du matriçage ou de l'estampage. On peut néanmoins considérer qu'ils peuvent subir des pliages légers (on peut redresser une lame de couteau tordue).

I.2.2 Aciers inoxydables ferritiques :

Les aciers inoxydables ferritiques contiennent de 11 à 27% de chrome et peu de nickel. Ils ne peuvent pas être durcis par traitement thermique mais peuvent l'être modérément par écrouissage. Ces aciers sont magnétiques et ont une ductilité moyenne et une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation [4].

Ils ont, comme leur nom l'indique, une structure ferritique qui les rapproche des aciers doux préalablement étudiés ; ils se prêtent donc bien à l'emboutissage. On distingue deux catégories :

- les aciers dits semi-ferritiques
- les aciers stabilisés au titane ou au niobium

Les aciers ferritiques peuvent être, à des degrés variables, sujets à deux défauts d'aspect apparaissant après formage, qui peuvent obliger à polir les pièces atteintes : la vermiculure due à la présence d'un palier de limite d'élasticité et le cordage, ou encore chiffonnage, qui

consiste en une hétérogénéité de déformation longitudinale résultant de ségrégations. Les aciers stabilisés y sont moins sensibles.

Il est souhaitable de ne pas mettre en forme ces aciers à des températures inférieures à 20 ou 30°C car ils présentent alors un risque de fragilité.

Leurs utilisations principales se retrouvent dans les articles ménagers, l'électroménager (cuves de lave-linge), les éviers (emboutis avec un film plastique mince pour éviter leur endommagement), les ballons à eau chaude, etc.

I.2.3 Aciers inoxydables austénitiques :

La particularité de ces aciers réside en deux caractéristiques découlant de leur structure :

- la phase austénitique, cubique à faces centrées, possède de nombreux systèmes de plans de glissement actifs, ce qui lui confère une grande ductilité et l'absence de fragilité même aux températures cryogéniques ;
- cette austénite est instable à la température ordinaire et tend à se transformer, durant la déformation, en martensite (en fonction du taux de nickel et de carbone). L'apparition de ce constituant dur renforce l'alliage et lui permet de supporter de très grandes contraintes, donc recule l'apparition de la rupture (d'où un grand allongement).

I.2.4 Aciers inoxydables austénoferritiques :

On les appelle aussi Duplex. Ils contiennent beaucoup de chrome (plus de 20 %) et peu de nickel (4 à 8 %) et ne sont pas, de ce fait, complètement austénitiques.

Leurs caractéristiques mécaniques sont très élevées et les destinent à des applications structurelles telles que les chaudrons de voitures de chemin de fer. Leur ductilité relativement limitée ne permet que le cintrage, pliage ou profilage.

Il semble cependant que leur avantage économique et leur très bonne résistance à la corrosion intergranulaire et par piqures doivent conduire à un plus large développement dans les années à venir.

I.3 Propriétés mécaniques des aciers inoxydables :

Pour résumer, le Tableau I.1 présente les principales nuances d'aciers inoxydables et leurs propriétés mécaniques minimales requises (selon la norme ASTM)

nomenclature	Composition moyenne				Etat	Propriétés mécaniques		
	%C	%Cr	%Ni	Divers		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					RECUIT			
405	< 0,08	13	-	0,2 Al		275	450	25
430	< 0,12	17	-	-		345	650	25
446	< 0,20	25	-	< 0,25 N		350	560	20
Austénitiques					RECUIT			
301	< 0,15	17	7	-		275	750	50
304	< 0,08	19	9	-		250	580	55
316	< 0,08	17	12	2,5 Mo		290	580	50
316 L	< 0,03	17	12	2,5 Mo		260	550	50
347	< 0,08	18	11	Nb ou Ta	275	655	45	

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables [11]

I.4 Rôles des éléments d'addition :

a) Le chrome

C'est l'élément qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion. Conformément à la norme européenne EN 10088, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone. [6]

b) Le nickel

Le Nickel favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience. A éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

c) Le manganèse

Il est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel [10].

d) Le molybdène et le cuivre

Ces deux éléments qui améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.

e) Le tungstène

Le W améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

f) Le titane

Il doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) avant que ne se forme le carbure de chrome préservant de ce fait le caractère inoxydable de l'acier en évitant l'appauvrissement en chrome de la matrice aux abords des zones carburées.

g) Le niobium

Le point de fusion du niobium beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

h) Le silicium

Cet élément cristallogènes joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré chaud. [2]

I.5 Domaines d'utilisation des aciers inoxydables :

I.5.1 Équipements pour l'industrie :

Les équipements pour les industries chimiques/pétrochimiques, agroalimentaires et pharmaceutiques sont pour l'essentiel des appareils chaudronnés travaillant généralement à la pression atmosphérique mais qui, dans le cas des réacteurs, peuvent être soumis à des pressions élevées.

La résistance à la corrosion de la nuance doit être élevée ce qui justifie, dans certains cas, d'utiliser des alliages austénitiques comportant une addition de molybdène. Si l'on craint un possible phénomène de corrosion sous contrainte, l'emploi d'une nuance austénoferritique de type X2CrNiMoN22-5-3 est recommandé [10].

I.5.2 Électroménager et coutellerie :

Ce vaste domaine du ménager et de l'électroménager (appareils électroménagers, ustensiles ménagers, platerie, couverts) n'est pas homogène en termes de choix de nuance. Par contre, quelle que soit la nuance retenue, elle devra présenter un état de surface permettant un lavage facile afin d'éviter tout risque de rétention d'origine bactérienne. En général, le niveau de résistance à la corrosion peut être qualifié de moyen. Par contre, certaines pièces sont sévèrement embouties. Dans ce cas, le recours à une nuance austénitique (alliage : Fe-Cr-Ni) de type X5CrNi18-10 est absolument nécessaire. Pour les éléments peu conformés et assemblés mécaniquement ou par collage, l'emploi de la nuance X6Cr17 est généralement suffisant pour résister à la corrosion du milieu environnant [10].

Dans le domaine de la coutellerie, la qualité de coupe de la lame est l'élément déterminant.

I.5.3 Industrie automobile :

Il s'agit du système d'échappement, de décoration, d'organes de sécurité et d'éléments de structure. Dans la ligne d'échappement d'une voiture automobile, la nuance ferritique X2CrTi12 reste majoritaire. Pour des considérations d'esthétique relatives à des parties visibles et éviter la prise d'une patine [10].

La décoration automobile est du domaine exclusif des nuances ferritiques à 17 % de chrome avec ou sans addition de molybdène et stabilisées au niobium pour les éléments devant être profilés puis cintrés.

Dans les organes de sécurité, l'application principale est le gonfleur pour « air bag ». C'est en général une pièce réalisée par usinage à partir de barres ou par emboutissage à partir de flans en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10. [2]

I.5.4 Industrie des transports terrestres et maritimes :

Il s'agit des wagons et voitures ferroviaires, des conteneurs citernes et citernes routières, et des conteneurs frigorifiques.

Dans ce secteur l'allègement est un critère de premier ordre notamment dans le cas des voitures ferroviaires majoritairement réalisées à l'aide de la nuance X2CrNi18-7 qui permet d'obtenir, d'une part, des limites d'élasticité élevées à l'état écroui et, d'autre part, une excellente soudabilité. [10]

I.5.5 Les Tubes :

Pour les tubes destinés au transport de fluides appelés aussi tubes corrosion, la nuance la plus utilisée est l'austénitique. Pour les milieux plus agressifs, on utilisera la nuance austénitique et, dans certains cas particuliers, l'alliage austénoferritique.

La majorité des tubes utilisés étant soudés longitudinalement, il sera alors nécessaire de leur faire subir un traitement d'hypertrempe afin qu'il recouvre leur structure métallurgique d'origine. Si ce traitement est fait sous atmosphère oxydante, il sera suivi d'une opération de décapage et d'un traitement de passivation.

I.5.6 Bâtiment :

Il s'agit d'un très vaste domaine dans lequel l'acier inoxydable est utilisé aussi bien à l'extérieur (couverture, murs rideaux, entrées d'immeubles, mobilier urbain) qu'à l'intérieur des immeubles (décoration, escaliers mécaniques, cage d'ascenseurs, escaliers).

On le trouve également sous la forme de conduits de fumée rigides ou souples lorsqu'il s'agit de réhabilitation de cheminées anciennes.

I.6 Les procédés utilisés pour le soudage des aciers inoxydables :

Les procédés T.I.G (Tungstène Inerte Gaz) M.I.G (Métal Inerte Gaz), le soudage plasma, le faisceau d'Electrons et le Laser sont couramment utilisés et parfois même le soudage par friction.

I.7 Caractéristiques métallurgiques du 316L :

L'acier 316L est un acier inoxydable austénitique. Cet acier est utilisé dans le domaine de la production d'énergie électronucléaire, de par ses propriétés de résistance à des sollicitations mécaniques, chimiques et thermiques sévères. Le 316L est l'acier constitutif des tuyauteries de fortes sections des circuits de refroidissement des centrales nucléaires de type REP, généralement soudées par TIG avec un grand nombre de passes. Cet acier possède une matrice austénitique stable de la température ambiante jusqu'à sa température de fusion, il n'y a donc pas lors du soudage de transformations structurales à l'état solide dans la Zone Affectée Thermiquement(ZAT).

La particularité des aciers inoxydables est la présence de chrome (>12%), qui favorise la résistance dans les milieux oxydants, en assurant la formation d'une couche de passivité. Grâce à l'ajout de différents éléments d'alliage en plus du chrome, il est possible d'obtenir une grande variété d'aciers inoxydables, qui diffèrent tant par les caractéristiques métallurgiques que par les propriétés thermo-physiques ou mécaniques. Ces caractéristiques peuvent également être modifiées par des traitements thermiques et ou mécaniques particuliers. La famille des aciers austénitiques dont fait partie le 316L est l'une des grandes familles d'acier inoxydable. On trouve dans cette famille les aciers 316, 321, 347, ou encore l'acier 304 ou acier « 18-8 », le plus fréquemment rencontré.

I.7.1 structure métallurgique du 316L, 310s et composition chimique :

Les aciers inoxydables type 316L et 310s sont constitués d'une matrice austénitique Fer-Chrome-Nickel, c'est à dire un réseau d'atomes de fer cubique face centrés(CFC), avec des atomes en solution solide d'insertion (comme le carbone ou l'azote) et des atomes en solution solide de substitution (Molybdène, silicium, manganèse...). Des impuretés (souffre, phosphore) sont également présentes en faible quantité. Les limites de composition du 316L et 310s sont données dans le tableau ci-dessous :

compo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
316L	0,03	0,5	2	0,035	0,025	18	12,5	2,70	0,08
310s	0.08	0.40	0.7	0	0	25.0	20.0	0.40	

Tableau I.2 : Limites de composition chimique de l'acier 316L et 310s [6]

D'une manière générale, certains éléments chimiques seront dits gamma-gènes, car ils auront tendance à stabiliser la phase austénitique. C'est le cas du Nickel, dont la teneur supérieure à 12% dans le 316L assure la stabilité de la structure austénitique de 20°C à la température de fusion (1450°C environ).

Les éléments dit gamma gènes sont ceux, à de rares exceptions près, qui ont une structure Cubique Faces Centrées (CFC), comme l'austénite. Ce sont : Ni, Mn, Co, Cu, Ti... Le Carbone et l'azote sont également des éléments gamma gènes puissants, même en faible quantité. A l'inverse les autres éléments sont dits alpha gènes. Les éléments alpha gènes, de structure Cubique Centrée (CC) sont : Cr, Si, Mo,... La définition d'élément alpha gènes comme le Chrome, et gamma gènes comme le Nickel permet de définir un « équivalent chrome » et un « équivalent nickel » [4]

- Les aciers inoxydable austénitique type 310s au chrome réfractaire Bonne résistance à l'oxydation à chaud et au fluage jusqu'à 850°C Amagnétique à l'état hypertrempe. Domaines d'application Nombreuses applications à chaud : pièces de fours, chaudières, vannes à gaz chaud, appareils de distillation.

I.8 Les Traitements Thermiques :

I.8.1 Introduction :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

I.8.2 Définitions des traitements thermiques :

Par traitement, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont aussi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier : limite élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques. [6]

Donc on définit que les traitements thermiques est effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de :

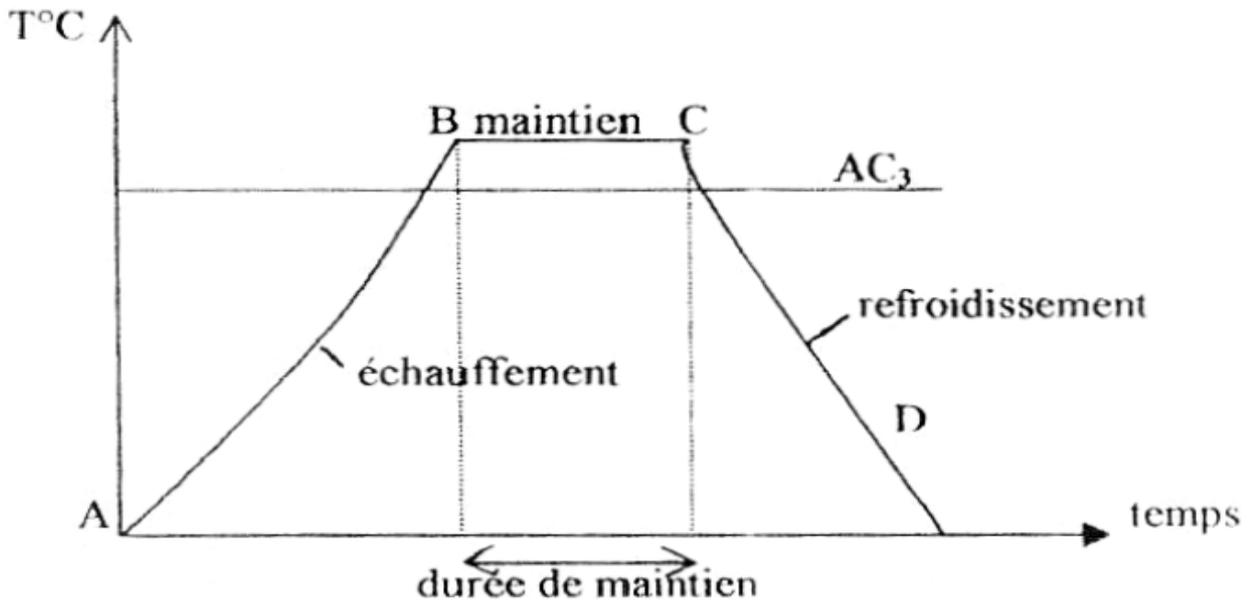


Figure I.1 : cycle des traitements thermiques

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

I.8.3 Les principales étapes dans les traitements thermiques :

a) Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité.

b) Les principaux modes du traitement thermique

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit.
- La normalisation.
- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement.

I.9 Les différents traitements thermiques :

I.9.1 La trempe :

La trempe est un traitement thermique qui consiste à refroidir rapidement une pièce à partir d'un état structural de référence, en général monophasé, donc homogène. Il a, pour objectif, d'inhiber les transformations contrôlées par la diffusion. Le contrôle de la structure définitive est plus facile par trempe suivie d'un chauffage.

Le refroidissement est obtenu par la mise en contact avec un fluide réfrigérant :

La vitesse locale de refroidissement dépend donc essentiellement de la conductibilité thermique du matériau et de la position du point d'observation par rapport à la source froide. L'efficacité de la trempe dépend donc de la comparaison entre vitesse de refroidissement et vitesse de diffusion : plus la vitesse de diffusion sera faible, plus l'épaisseur de matériau trempé sera grande. Le matériau aura, une bonne trempabilité ainsi, les aciers au carbone ont une mauvaise trempabilité, car le carbone, élément interstitiel à une grande vitesse de diffusion : l'addition d'élément d'alliage ralentit la diffusion par conséquent, amélioré la trempabilité.

I.9.2 Le revenu :

Le revenu se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe. Il permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté (en favorisant la dissolution de certains composés fragiles tels que les carbures) et les contraintes thermiques internes obtenues lors de la trempe. On chauffe à une température inférieure à celle d'austénitisation, puis on refroidit plus ou moins rapidement. Dans certains cas (alliages à durcissement structural) le revenu permet après trempe d'augmenter les caractéristiques mécaniques.

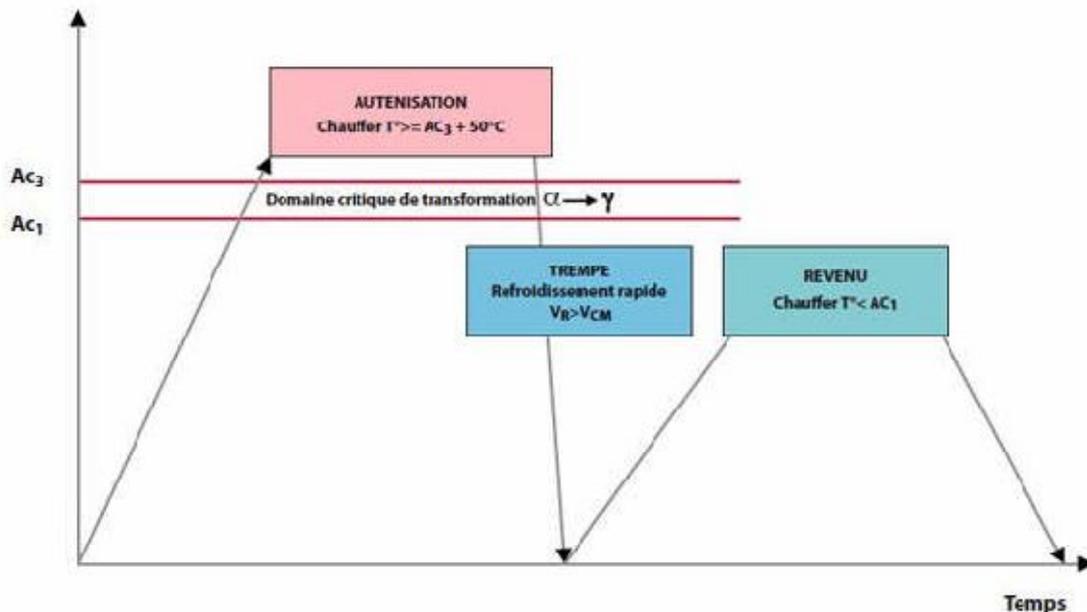


Figure I.2 : Le traitement de revenu

Température du revenu = 220° à 350°

I.9.3 Les traitements d'adoucissements :

- **Le Recuit :**

Opération thermique qui annule les effets des traitements thermiques ou mécanique antérieurs.

➤ **But de recuit**

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes.

Chapitre II

Généralités sur le soudage

II.1 Introduction :

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, assemblage, fromage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux).

. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assemblé contrairement au rivetage, 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 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 soudage des métaux est une technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées. La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport. Beaucoup de métaux sont soudables moyennant des études préalables et la mise au point de modes opératoires spécifiques ; citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

II.2 Procédés de soudage :

II.2.1 Définition :

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

Le soudage est aussi une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il est dit homogène quand ces deux pièces, ainsi que l'état du métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et hétérogène dans les autres cas. Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. [1]

a) Le brasage :

Une 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.

b) Le soudobrasage :

Une 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 soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

c) Représentation macrographique d'une soudure :

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones (Figure II.1) :

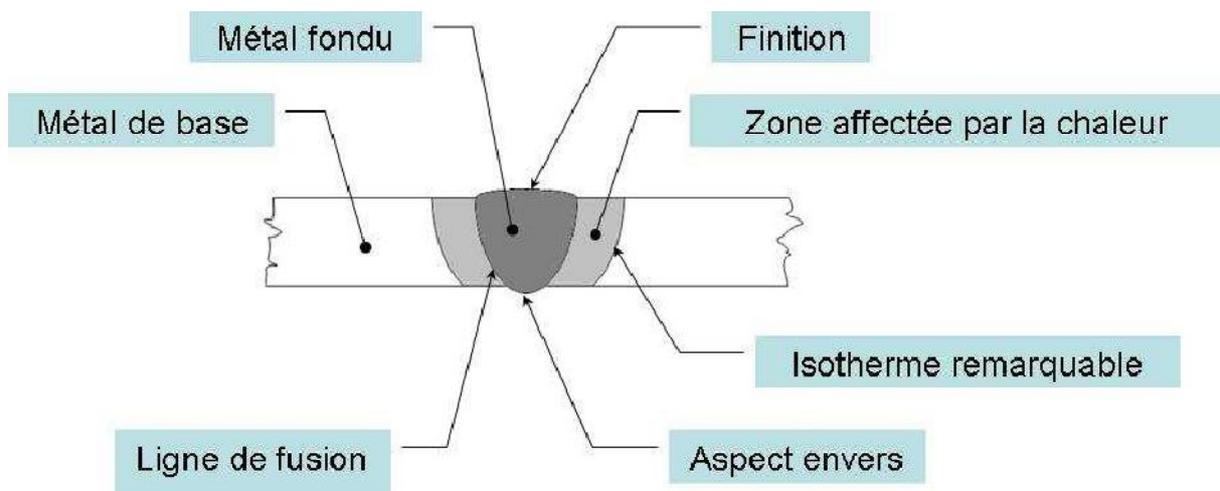


Figure II.1: Cordon de soudure

- **La zone fondue** : (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.
- **La zone affectée thermiquement** : (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la

composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

- **La zone de liaison** : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.
- **Le métal de base** : au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.
- La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celle du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.
- Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait :
 - des rapides changements de température (élévation de température et refroidissement),
 - du faible temps de maintien de la température maximale,
 - de la localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.
 - Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.
- Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :
 - Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
 - Le couple métal d'apport – gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.

- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée. [3]

II.3 Les Classifications des procédés 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 la continuité métallique est obtenue sans fusion par effet purement mécanique. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme représenté sur la Figure (II.2).

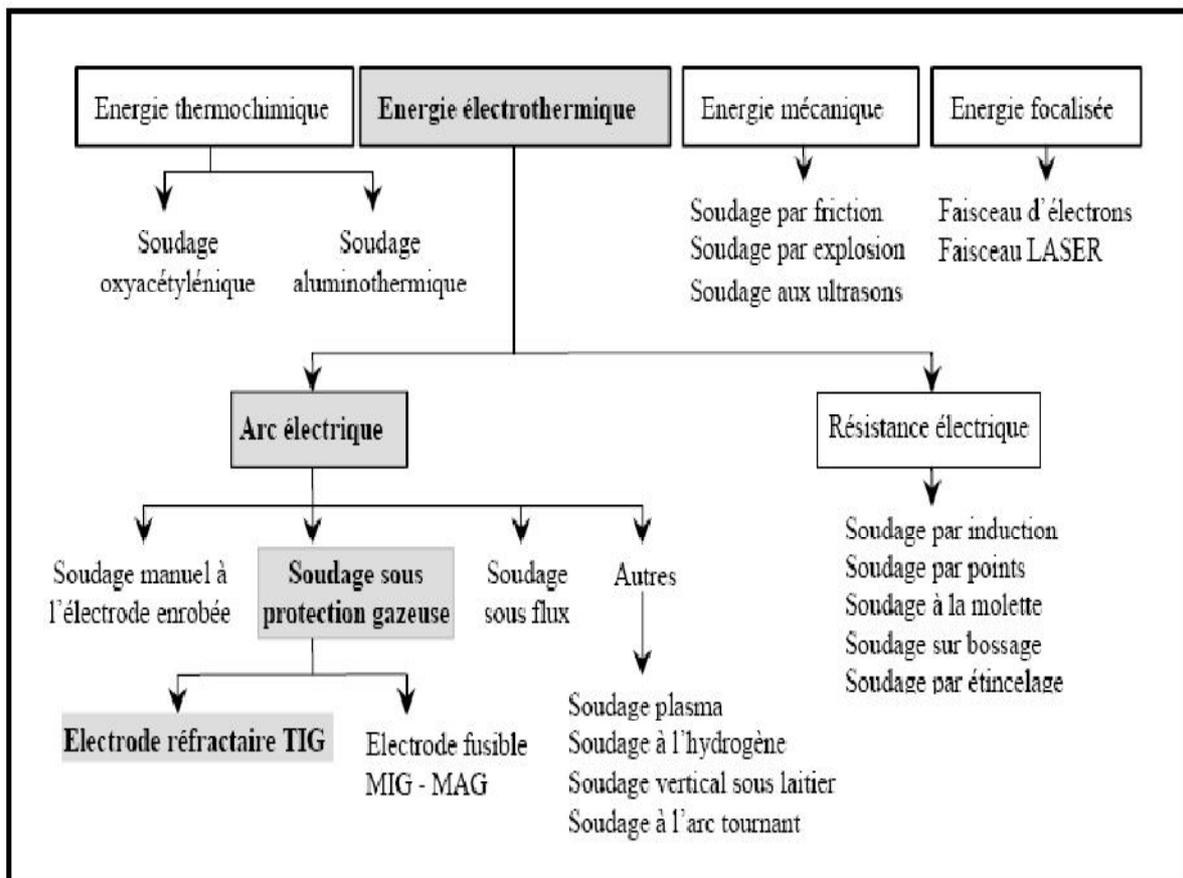


Figure II.2 : Classification des procédés de soudage [1]

La conséquence directe de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources (Figure II-3). Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre e

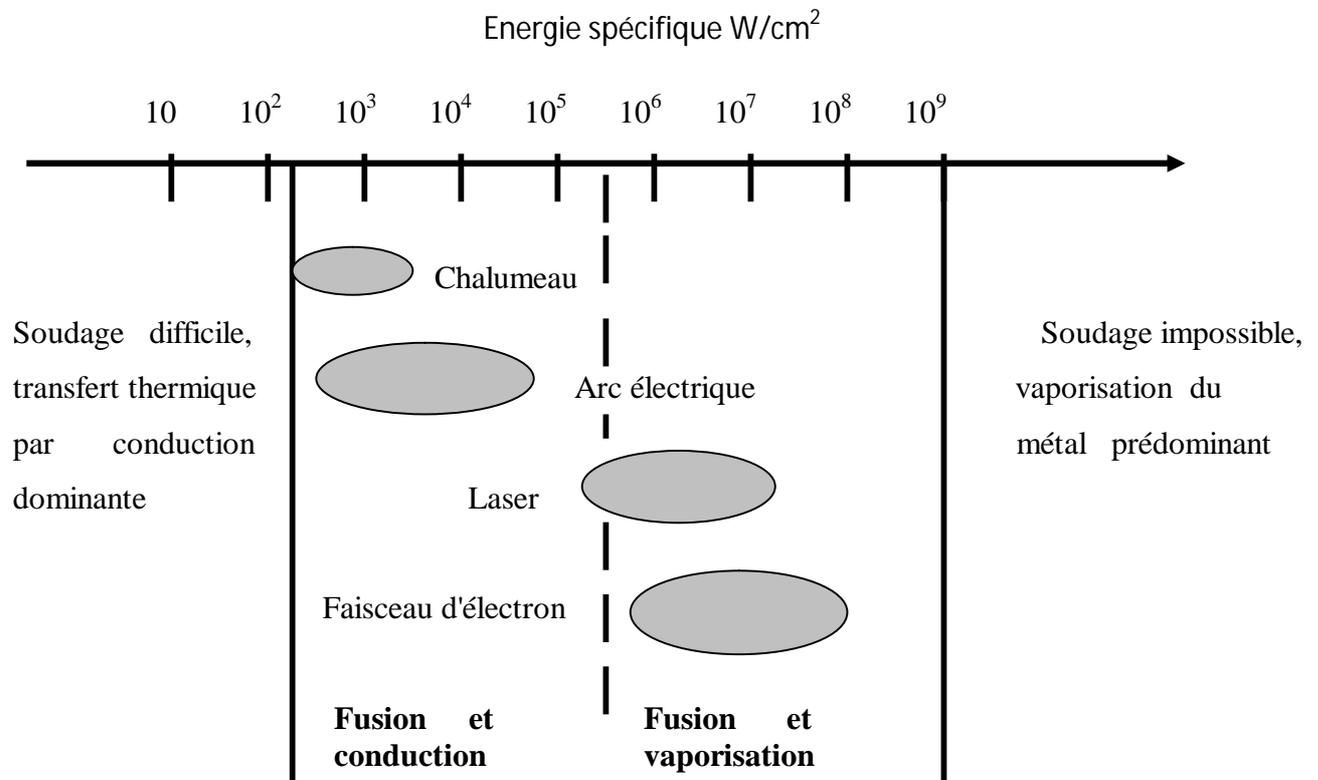


Figure II.3 : Sources thermiques et densités d'énergie [3]

II.4 Les différents procédés des soudages :

II.4.1 Le procédé TIG :

- **principe du soudage TIG :**

Le soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz), également appelé GTAW (Gaz Tungstène Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est à dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder.

L'électrode et le bain fondu sont protégés contre l'oxydation de l'air par un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur. Parfois un mélange Argon-Hélium est utilisé pour augmenter la pénétration du bain de fusion, l'ajout d'Hélium permettant d'augmenter la

tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation plus élevé de celui-ci. L'Hydrogène, parfois présent dans le mélange gazeux, joue un rôle similaire à l'Hélium.

Le TIG est un procédé facilement mécanisable. Il est très utilisé, entre autre, dans l'industrie nucléaire pour la réalisation des tuyauteries de circuit primaire des centrales nucléaires de type REP. Le TIG est en effet bien adapté pour la fabrication de tubes roulés soudés en acier inoxydable austénitique. Dans ce cas on utilise le courant continu avec pôle positif relié à la pièce à souder (polarité directe), qui permet de localiser le plus grand apport de chaleur sur le métal à fondre. [4]

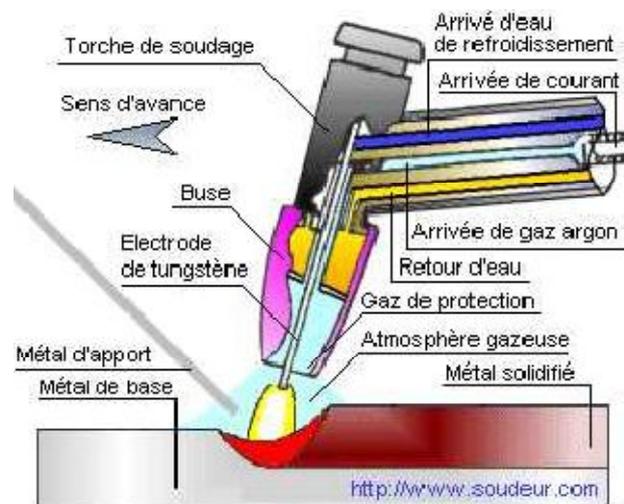


Figure II.4: Principe de l'application de la torche du procédé TIG. [8]

II.4.2 Le soudage par friction :

Le soudage par friction utilise la déformation relative des deux pièces à souder pour produire des interfaces non-contaminées. En même temps, l'énergie dissipée par frottement chauffe les interfaces pour faciliter leurs cisaillements. Pour des géométries cylindriques, le mouvement est en général fait par une rotation ce qui permet de garder pendant tout le cycle de soudage un alignement précis. Les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre de manière que le mouvement relatif produise de la chaleur par frottement. Ensuite, la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Cela produit un joint forgé par déformation coordonnée.

Il existe plusieurs façons pour réaliser ce mouvement relatif :

- Une partie tourne, l'autre est fixée,

- Les deux pièces tournent en sens opposé,
- Les deux pièces tournent avec la même vitesse et une troisième pièce placée au centre reste immobile (sorte de métal d'apport)

II.4.3. Le Procédé SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

Le soudage manuel avec électrode enrobée est surtout utilisé pour toute sorte de petites soudures, des petites séries, de la géométrie non standard etc. La portabilité et le faible coût de l'équipement sont les avantages de cette méthode. Principalement, des aciers de construction non et faiblement alliés et, pour une moindre part, les aciers inoxydables sont soudés avec les électrodes enrobées.

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Un poste de soudage est connecté à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder (figure II.5). Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

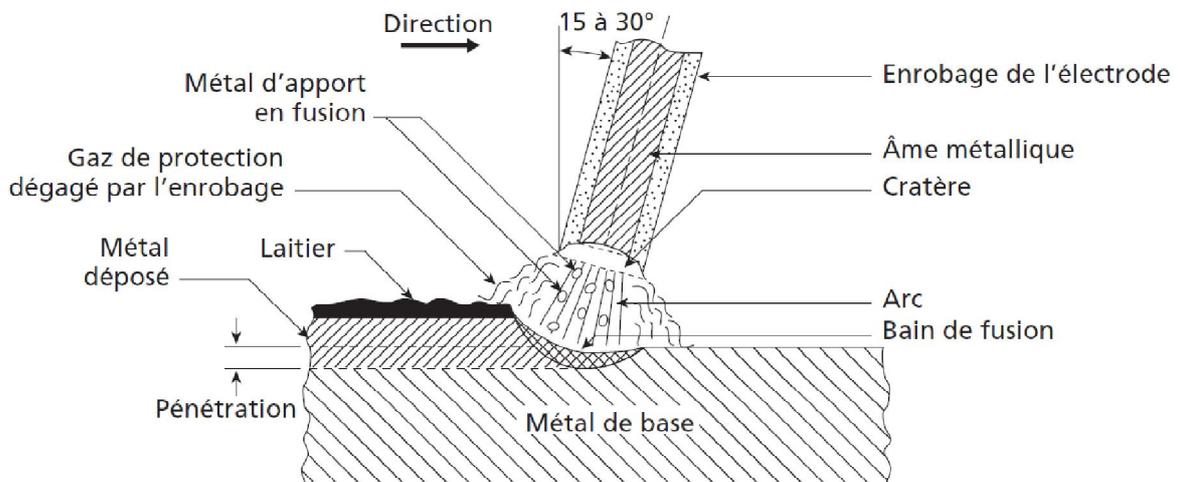


Figure II.5 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) [12]

II.5 Le soudage MIG/MAG :

II.5.1 Histoire de procédé de soudage MIG/MAG :

Le procédé MIG est apparu aux États-Unis au cours des années 1940, pour le soudage de navires militaires en aluminium.

L'argon ou l'hélium servaient de gaz de protection (inerte).

Dès que le dioxyde de carbone a pu être utilisé comme en gaz de protection actif (MAG), il a pu servir au soudage de l'acier.

Au début, le soudage était effectué afin de produire des soudures d'angle à plat mais il impliquait de nombreuses projections de soudure.

L'arrivée des sources d'alimentation, de fils d'apport plus fins et l'utilisation de mélanges gazeux (c.à.d. argon et dioxyde de carbone) ont permis de réduire les projections et de souder dans quasiment toutes les positions.

Ce procédé est apparu en Europe dans les années 1960. Cette percée sur le plan industriel, pour le soudage MIG/MAG, s'est produite au cours des années 1960. Ce procédé s'est développé et s'est amélioré grâce à de nouveaux fils d'apport, à de meilleures sources d'alimentation et à des gaz de protection.

II.5.2 Le procédé MIG/MAG :

- **Définition et principe du soudage MIG-MAG :**

Le procédé de soudage MIG/MAG (ou GMAW - Gas Metal Arc Welding) consiste à créer un arc électrique entre un fil fusible provenant d'une bobine et les pièces à souder, tout en protégeant l'arc et le bain de fusion par une atmosphère protectrice gazeuse. Cette atmosphère peut être inerte (Argon) ou active (CO₂ ou un mélange Argon/CO₂). Le dévidage en continu du fil de la bobine jusqu'à la torche est assuré par un dévidoir. Les fils concernés sont à la fois les fils pleins (ou nus) et les fils fourrés avec gaz (FCAW-G).

Enfin, comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, le procédé MIG/MAG s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

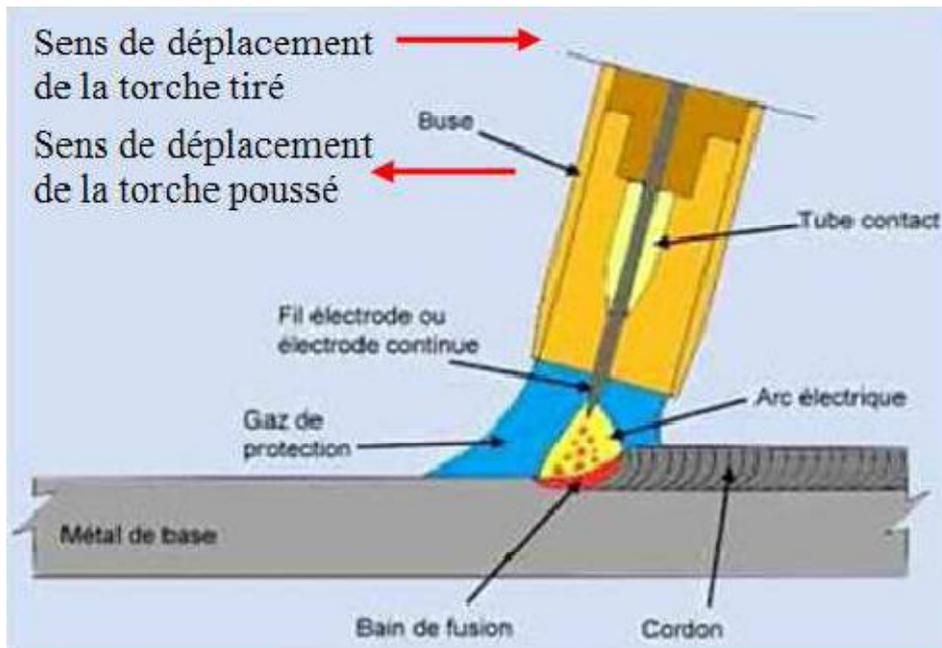


Figure II.6 : Procédé de soudage en MIG/MAG [1]

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base.

Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage, où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée. Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

- **Le procédé MAG :**

(Métal Active Gaz) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO₂), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O₂).

- **Le procédé MIG :**

(Métal Inerte Gaz) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients.

- 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 améliore désoxydation du bain et le mouillage du métal de base. Le diamètre de fil du métal d'apport est de 1 mm.

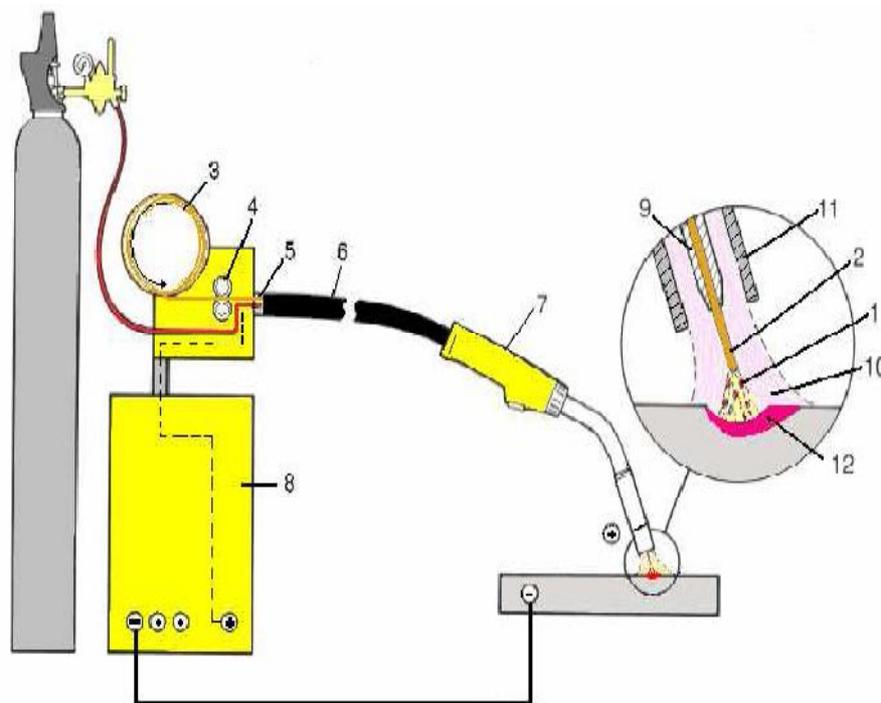


Figure II.7 : principe du soudage MIG

II.5.3 Gaz de protection [13] :

Le gaz de protection protège la soudure contre l'oxydation et les inclusions de laitier dues à la présence d'oxygène (même à l'état résiduel), mais aussi contre le risque de porosités résultant du piégeage de l'azote à mesure que le bain de fusion refroidit (l'azote perdant

progressivement sa solubilité). Les propriétés du joint et, notamment, la pénétration et la géométrie du cordon dépendent pour une large part du gaz de protection.

Les gaz employés dans l'immense majorité des cas peuvent être de **l'argon**, de **l'hélium** ou un mélange des deux. Ces gaz influent sur la facilité d'amorçage de l'arc (plus facile sous argon car sa tension d'ionisation est plus faible que celle de l'hélium), la forme du cordon, la profondeur de pénétration, la vitesse de soudage (les vitesses élevées sont plutôt réservées aux mélanges majoritaires en hélium).

- **Argon(Ar)**

L'argon est le gaz de protection le plus répandu. C'est un gaz inerte qui, ne réagissant pas chimiquement avec d'autres matériaux, convient parfaitement pour le soudage de matériaux comme l'aluminium ou l'acier inoxydable. Si l'on ajoute un maximum de 20% de CO₂ à de l'argon, on obtient une meilleure pénétration en réduisant le risque de manque de fusion.

- **Hélium (He)**

Comme l'argon, l'hélium est gaz inerte. Améliore l'apport de chaleur au joint. Mélangé à de l'argon, il augmente la vitesse de soudage et améliore la pénétration des plaques de cuivre ou d'aluminium épaisses : il compense en effet les pertes de chaleur par diffusion dues à la forte conductivité thermique de ces métaux.

- **Dioxyde de carbone (CO₂)**

Le dioxyde de carbone pur convient pour le soudage à l'arc court. C'est un gaz bon marché et bien adapté au soudage de l'acier galvanisé.

- **Hydrogène (H₂)**

On peut ajouter de l'hydrogène en faible quantité afin d'améliorer l'apport de chaleur et d'augmenter la vitesse de soudage (tout comme avec l'hélium, mais à moindre coût).

- **Oxygène (O₂)**

Utilisé en faible quantité d'appoint, l'oxygène contribue à stabiliser l'arc en soudage MIG.

- **Azote(N₂)**

L'azote peut être utilisé comme élément d'alliage dans les aciers austéno-ferritiques. L'ajout d'une faible quantité d'azote au gaz de protection permet de compenser les pertes lors du soudage.

II.6 Les Avantages et Les Inconvénients de soudage MIG/MAG :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Forte productivité. - Grande vitesse de soudage (gain de temps). - Large gamme d'épaisseur. - Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques. - Soudage dans toutes les positions. - Commande très rapide et exacte offrant des avantages : excellentes propriétés de soudage avec stabilité d'arc grâce au contrôle du procédé de soudage, compensation de l'énergie secteur, réglage mini. Très bas, de nombreuses fonctionnalités en soudage pulsé, commande à distance et stabilité du procédé. - Peut être facilement réglé pour du multi-procédé. 	<ul style="list-style-type: none"> - 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 ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, 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. - Peu de possibilités d'utilisation en extérieur dans la mesure où le gaz de protection doit être protégé des courants d'air.

Table II.1: les avantages et les inconvénients

II.7 Les paramètres opératoires et physiques induits par le soudage MIG /MAG :

Pour le procédé de soudage MIG-MAG, différents paramètres opératoires peuvent être ajustés pour une optimisation des performances. Ces paramètres ont une influence sur la géométrie des cordons de soudure :

- Vitesse de soudage : l'augmentation de la vitesse de soudage à une intensité fixe conduit à des bains fondus moins pénétrés. En augmentant la vitesse de soudage, on diminue aussi la largeur du cordon, la surépaisseur et la dilution.
- Courant : l'augmentation du courant de soudage conduit à une élévation de la température à la surface de la pièce ce qui induit une influence sur les caractéristiques géométriques du cordon de soudure.
- Tension : l'augmentation de la tension de soudage entraîne une modification de la géométrie des cordons de soudure. On peut noter que la tension d'arc doit être maintenue constante et/ou régulée avec précision.
- Matériau et diamètre du fil d'apport : le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Le diamètre du fil est défini par la quantité de matière que l'on souhaite apporter.
- Vitesse d'avance du fil d'apport : la vitesse d'avance du fil d'apport définit la quantité de matière apportée.
- Gaz de protection et son débit : le gaz de protection va permettre de définir les différentes phases de mode du détachement du fil (court-circuit, globulaire et spray). Par exemple, la composition du gaz va permettre de diminuer la phase de régime globulaire qui est un mode instable de l'arc. La composition du gaz joue aussi un rôle sur la protection du matériau à souder (éviter l'oxydation).
- Angle d'inclinaison de la torche : l'inclinaison de la torche de soudage influence essentiellement la géométrie de l'arc.
- Distance entre la buse de sortie de fil et la pièce à souder : cette distance définit la hauteur d'arc qui influe sur la répartition de l'arc.
- Sens de déplacement de la torche : tiré ou poussé (Figure II.6).

Chapitre III

Matériaux et procédure expérimentales

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une étude sur les aciers inoxydable austénitiques 316L et 310s est présentée, en plus une étude expérimentale sur le procédé de soudage MIG et TIG, et le comportement mécanique d'acier inoxydable seront expliqués.

III.2 Identification du métal de base

La nuance du métal de base est de type 316L et 310s. Ce sont des aciers inoxydables austénitiques, destiné au soudage avec une haute teneur en chrome. Et la composition chimique des aciers sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
316L	0,03	0,5	2	0,035	0,025	18	12,5	2,70	0,08
310s	0.08	0.40	0.7	0	0	25.0	20.0	0.40	

Tableau III.1 Composition chimique du métal de base 316L et 310s

Ainsi, les caractéristiques mécanique des notre aciers sont représentées dans le tableau ci-dessous :

	Dureté (HV)	R _m (N/mm ²)	A%	R _p (0.2) (N/mm ²)	Masse volumique
316L	270	650	35	300	8
310s	170	530	<50	210	7,9

Tableau III.2 caractéristique mécanique du 316L et 310s [6]

III.3. Préparation des échantillons pour le soudage:

III.3.1. Etape de coupe d'une tôle :

La préparation des éprouvettes se fait en découpant les tôles des l'aciers inoxydables 316L et 310s par un appareil industriel (**Guillotine**) en deux plaques de forme rectangulaires de dimension (15x 20) cm et (15 x 12) cm de l'épaisseur (2.5) mm.



Figure III.1 : Machine de Guillotine

- Matériau utilise 316L et 310s :

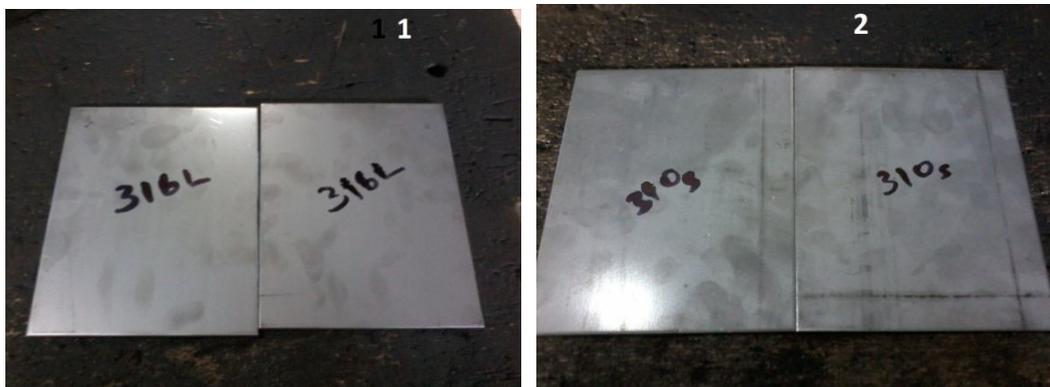


Figure III.2 : photo 1(316L) et photo 2 (310s)

III.3.2. Traitement thermique :

- **Principe de traitement thermique :**

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée.

On chauffe les pièces dans le four à température 1000 °C avec une durée de maintien variable, qu'elle dépend de la géométrie de la pièce. Elle est en général entre 15 et 30 minutes. Pour cette opération on a pris 30 min durée de maintien.



Figure III.3: four utilisé

Refroidissement :

But :

Transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus durs. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée.

La méthode de refroidissement de cette expérience est un refroidissement à l'air.

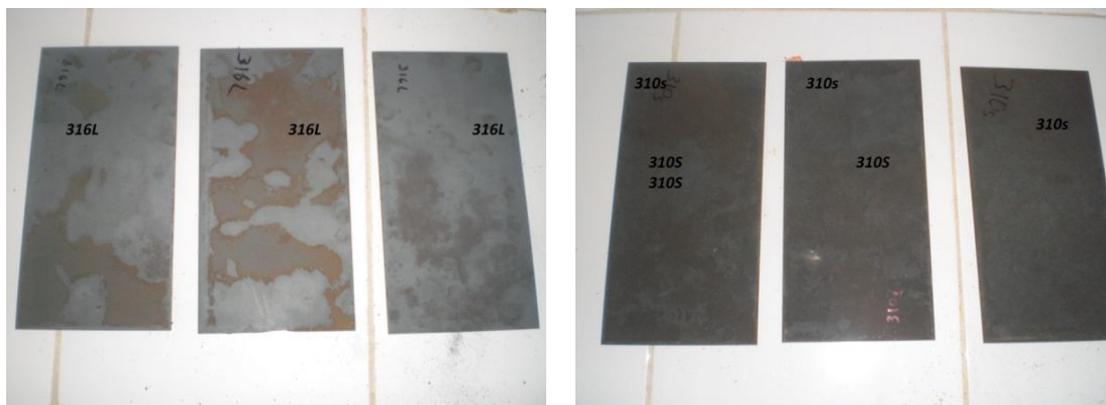


Figure III.4: trempe à l'air 316L et 310s

III.4. Opération de soudage :

III.4.1. Matériel utilisé :

- **Générateur de courant :**



Figure III.5 : Poste de soudage MIG (MigC340 PRO).

Les générateurs de courant utilisés en soudage MIG sont les mêmes que ceux utilisés en soudage à l'arc avec électrodes enrobées et leur rôle est identique mais ces derniers ne sont utilisables en soudage MIG qu'à condition de leur adjoindre un certain nombre d'organe de commande et de stabilisation de l'arc. Ces générateurs doivent comme en soudage électrique à l'arc avec électrode enrobées, posséder une caractéristique plongeante.

- **Gaz utilisé :**

On utilise des gaz inertes en soudage MIG pour protéger le métal en fusion contre les agents oxydants de l'atmosphère ambiante ; Ainsi, on emploie l'argon pour la protection de l'endroit du bain de fusion et de l'électrode.



Figure III.6 gaz d'argon (jaune)

- **La Torche :**

Selon l'importance des courants utilisés, on peut employer des torches à refroidissement naturel. Elles peuvent supporter des intensités de 225 Ampères.



Figure III.7: Torche utilise pour le soudage MIG.

- **Le Métal d'apporte :**

La nuance du métal d'apport utilisé est de type ER 316LSi de diamètre 1mm. Ce dernier est choisi à cause de sa composition chimique et ces propriétés mécaniques.

La composition chimique de métal d'apporte qui présente dans le table suivante :

Eléments	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu
Teneur (%)	0.03 Max	1.0-2.5	0.65-1	18-20	11-14	0-03 Max	0-03 max	2-3	0.75 Max

Table III.3 : la composition chimique de métal d'apporte ER316LSi



Figure III.8 : métal d'apporte ER316LSi

III.4.2 Principe et paramètres du soudage MIG :

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base. Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage, où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée.

- **Paramètres de soudage :**

Soudage en MIG sous gaz d'argon avec métal d'apport ER316LSI.

Les éprouvettes	Diamètre de métal d'apport (mm)	Épaisseur de métal de base (mm)	Diamètre de la buse (mm)	Débit d'Argon pour soudage (l/mn)	Courant (A)	Temps de soudage (S)	Longueur de cordon de soudure (cm)
316L-316L	1	2.5	5	18	31-340	55	19
316L-310S	1	2.5	5	18	31-340	45	19
310S-310S	1	2.5	5	18	31-340	47	19

Tableau III.4 : Caractéristiques techniques (Pièce + Equipement).

III.5. Les pièces soudées par soudage MIG :

III .5.1.1^{er} étape traitement thermique puis soudage MIG :

Les paramètres de soudage MIG des aciers inoxydables 316L et 310s homogène, hétérogène de 1^{ère} étape : traitement thermique puis soudage MIG.

l'échantillon	Le temps de soudage(s)	Longueur de cordan de soudure (cm)	de	La vitesse de soudage(cm/s)
316L-316L	55	19		0.34
310s-310s	47	19		0.4
316L-310s	45	19		0.42



Figure III.9 : les pièces subissent un traitement thermique puis le soudage MIG.

III.5.2.2^{ème} étape sans traitement thermique :

- Soudage homogène et hétérogène 316L et 310s :

L'échantillon	Le temps de soudage(s)	Longueur de cordan de soudure (cm)	de	La vitesse de soudage(cm/s)
316L-316L	28	15		0.53
316L-310s	26	15		0.57
310s-310s	26	15		0.57



Figure III.10 : les pièces soudées sans T.T.

III.5.3.3^{eme} etape soudage MIG puis un traitement thermique :

- Soudage homogène et hétérogène 316L et 310s :

L'échantillon	Le temps de soudage(s)	Longueur de cordon de soudure (cm)	La vitesse de soudage(cm/s)
316L-316L	28	15	0.53
316L-310s	25	15	0.6
310s-310s	27	15	0.55



III.11 Figure : les pièces soudées puis un traitement thermique.

III.6. Opération de la micrographique :

III.6.1. Enrobage :

- Avant de faire l'enrobage en prépare les échantillons de cordon de soudure :
- Découpé trois morceaux de cordon de soudure se forme rectangulaire de dimension de (25x10) mm avec une Guillotine.
- L'enrobage se fait avec une machine **ENROBEUSE**.



Figure III.12 : Machine enrobeuse.



Figure III.13 : Talons de soudure enrobée par la résine.

III.6.2 Polissage :

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique avec une **POLISSEUSE** Cette étape permet d'obtenir une surface très lisse (la plus lisse possible et sans rayure).

Le polissage comportant trois stades :



Figure III.14 : Polisseuse.

Un polissage grossier à l'aide des disques de papiers abrasifs en carbure de silicium (SiC). Ce polissage se fait selon une granulométrie décroissante des grains de SiC qui varie de 80 à 1200.



Figure III.15 : 1^{ère} Etape de Polissage.

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3



Figure III.16: 2^{ème} Etape de Polissage (Finition).



Figure III.17 : Après polissage le cordon de soudure enrobé par la résine.

III.6.3. Attaque chimique :

Après le polissage, l'échantillon subit une attaque chimique avec une solution de (HNO_3 , HCL , Glycérol). Le rôle de l'attaque chimique est de donner une bonne visibilité à l'échantillon pendant l'analyse microscopique.

III.6.4. Analyse micrographique :

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions qui s'y trouvent lors de l'observation au microscope optique.



Figure III.18 : Microscope optique.

III.7. les essais mécaniques :

Le but de ces essais est de contribuer à l'évaluation de la qualité d'un assemblage, de caractériser l'interaction entre un matériau et un procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

III.7.1. Essai de la microdureté :

- **Introduction :**

Les essais de dureté représentent une grande utilité pour notre étude en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la productibilité et la fidélité des résultats. Ceci explique le grand nombre de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons. Les essais les plus courants se font par pénétration. Dans l'essai de la micro dureté, la mesure de la dureté nécessite des essais sous très faible charge, dont la profondeur ne dépasse pas 1/10 de l'épaisseur de l'échantillon. Le principe des essais de dureté consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à évaluer. A charge constante, on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est moins dur. La dureté H s'exprime par le rapport de la force (F) sur la surface de l'empreinte (S).

III.7.2. Essais de la microdureté :

On aurait tendance à exprimer H en méga pascals, mais, pour insister sur le caractère conventionnel de l'essai de dureté, celle-ci est exprimée sans dimension. L'essai de dureté utilisé pour notre cas est l'essai Vickers. Il consiste dans un laps de temps bien déterminé à imprimer dans la pièce à évaluer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, sous une charge F, et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

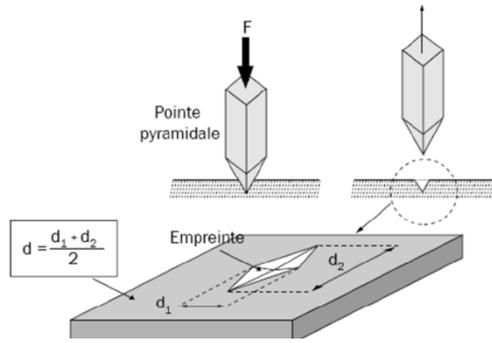


Figure III.19 : Caractéristiques de l'essai.

L'essai s'est déroulé au niveau de labo SDM à département de génie mécanique à l'université AMMAR THELIDJI A LAGHOUATE.



Figure III.20 : L'appareil de microdureté.



Figure III.21 : Empreinte de pénétrateur.

Nous avons effectué un essai de microdureté sur les éprouvettes. La procédure s'est affectée tout en balayant la zone affectée thermiquement et la zone fondue et métal de base. Cet essai a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone.

III.8. Opération d'essai de résilience :

III.8.1.Introduction :

L'un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un matériau est fournie par l'essai de résilience sur des éprouvettes entaillées, décrit dans la norme NF EN 10045. Le principe consiste à rompre, d'un seul coup à l'aide d'un mouton CHARPY, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine alors l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

III.8.2 Définition :

La résilience est l'énergie en (Joule/Cm²) nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette placée sur deux appuis.

$$K_{cv} = K_c / S \text{ (J/Cm}^2\text{)}$$

K_{CV} : La résilience.

K_c: Energie d'impact absorbée.

S : Section à l'entaille de l'éprouvette.

- Avant d'entamer l'expérience, des éprouvettes entaillées (forme V) furent préparées conformément aux normes.

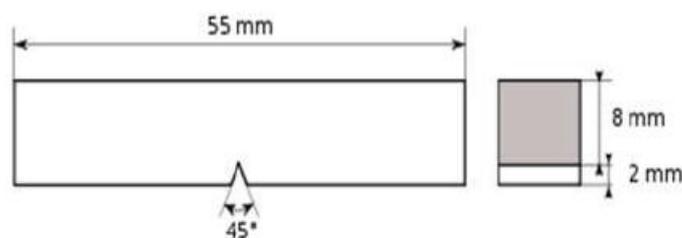


Figure III.22 : Eprouvette normalisée avec une entaille de forme V

L'essai s'est déroulé au niveau de centre de recherche et l'électricité de SONALGAZ à Dali-Brahim à Alger.

- Afin d'exploiter convenablement les résultats des essais de résilience, il est nécessaire de s'intéresser préalablement aux particularités des essais de résilience, à l'évolution des propriétés mécaniques de notre matériau et à son mode de rupture en fonction des conditions particulières des essais de résilience.

L'application de l'essai de résilience peut avoir certains avantages comme:

- Préparation facile.
 - Facilité de l'application de cet essai.
-
- Pour chaque échantillon, une rupture lui est appliquée. Celle-ci diffère selon les conditions de travail et selon les paramètres utilisés. Mais ce phénomène de la rupture diffère lors de l'expérience et lors de la théorie.

En théorie, le phénomène de la rupture dynamique est complexe.

En pratique, le phénomène d'une contrainte critique est aussi complexe à déterminer.

Chapitre IV

Les Résultats et interprétations

IV .1.Introduction :

Ce chapitre comprend la présentation, l'interprétation, la discussion des résultats expérimentaux obtenus dans les différentes expériences. Ces microstructures concernent les différentes zones obtenues après le procédé de soudage TIG et MIG.

Ainsi, le comportement de notre matériau lors des procédés de soudage TIG et MIG sera mieux connu, et de même pour le comportement mécanique de ce matériau.

IV .2.Observation micrographique :

La multitude d'attaques chimiques que nous avons préparée et essayée, ne nous a pas permis d'observer la structure microscopique lors de l'observation au microscope optique à cause de l'attaque chimique, l'opération à été reproduit trois fois mais sans conséquence sur la révélation de cette dernière les trois produit de l'attaque chimique ont été choisis suivant les normes de l'attaque chimique pour les aciers inoxydables.

L'acier inoxydable étudié étant à propriétés et utilisation spécifiques, il aurait fallu persévérer dans la recherche de l'optimisation des conditions de préparation et d'application de l'attaque chimique.

IV .3.L'essai de microdureté :

Nous avons effectué un essai de microdureté sur les éprouvettes soudées. La procédure s'est effectuée tout en balayant le métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue. Cet essai a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone.

On a pris comme paramètres :

-La charge = 500g.

-Le temps (t) =10s.

Les résultats et les moyennes obtenus sont présentés sous forme des tableaux :

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	523.4	490.1	472.5- 463	593	531.8
	515.4	485	540- 542.2	600	532.6
		476	596-603. 3	602	
316L-316L	532	570.6	619- 630.2	544.7	528
	485	595.7	580- 575.5	595.4	555.5
		536	644.3- 655.4	508.8	
310s-310s	279	.2280	271.5-306	336.7	287
	263	306.4	389- 414.8	303.7	288.2
		331.6	461.8- 486.8	355.4	

Tableau IV.1 Les résultats de micro dureté sans T.T

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	519	483	536	598	531
316L-316L	508	567	617	549	541
310s-310s	271	305	388	331	287

Tableau IV.2 la moyenne des résultats de micro dureté sans T.T

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	195.4	203.5	250- 240.4	263	295.7
	222	238.2	248.4-247.5	230.8	206
		269	260- 244.2	272.5	
316L-316L	239	267.8	357.3- 390.5	259.6	273
	274.5	284.3	359.3- 373	300	263.1
		256.9	379.8- 337.6	270	
310s-310s	298.7	247	278-310	262.2	279
	272.1	251.2	295- 303.8	282.8	285.2
		265.3	285.7- 276		

Tableau IV.3 Les résultats de micro dureté avec T.T puis le soudage MIG

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	208	255	248	236	250
316L-316L	257	269	366	276	268
310s-310s	285	254	291	272	282

Tableau IV.4 la moyenne des résultats de micro dureté avec T.T puis le soudage MIG

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	318.7	337.4	283.7- 305.4	302.2	331
	310	271.3	339-284	343.8	338.7
		325	296-320	310	
316L-316L	256.3	299.1	302. 3- 317	306.4	274
	287.7	327	309.8- 323.3	313	329.5
		310	310-312	321	
310s-310s	303	295.5	293.7- 319.4	292.1	306
	310.6	321.5	315- 313.6	316	313.6
		309	297-299	300	

Tableau IV.5 Les résultats de micro durezza avec le soudage MIG puis un T.T

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	324	311	304	318	324
316L-316L	272	312	312	313	301
310s-310s	306	308	306	302	310

Tableau IV.6 la moyenne des résultats de micro durezza avec le soudage MIG puis un T.T

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	203.8	251.3	344.8- 294	239.7	274
	216.7	260	297.8- 308,1	261	267.2
			261-285 ,5	302.7	
316L-316L	217.6	250	357- 309	242	225.3
	246.7	267	312- 289.8	259.3	237
		270	326.4		
310s-310s	226.1	237.1	264 – 297.5	267.8	237.4
	261.2	248.8	302 – 306.5	272.1	249.1
		263	312.6		

Tableau IV.7 Les résultats de micro dureté avec le soudage TIG puis un T.T.

	MB_{310s}	ZAT_{310s}	ZF	ZAT_{316L}	MB_{316L}
316L-310s	210	255	298	267	270
316L-316L	231	262	318	250	231
310s-310s	243	249	296	269	243

Tableau IV.8 la moyenne des résultats de micro dureté avec le soudage TIG puis un T.T.

HV (dureté)

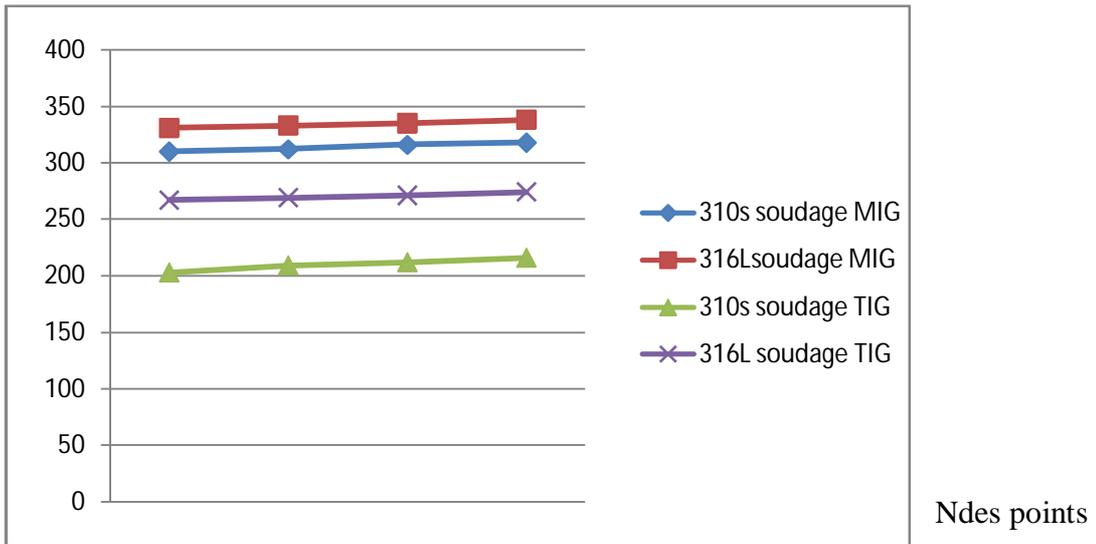


Figure IV.1: micro dureté MB 316L-310s avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

HV (dureté)

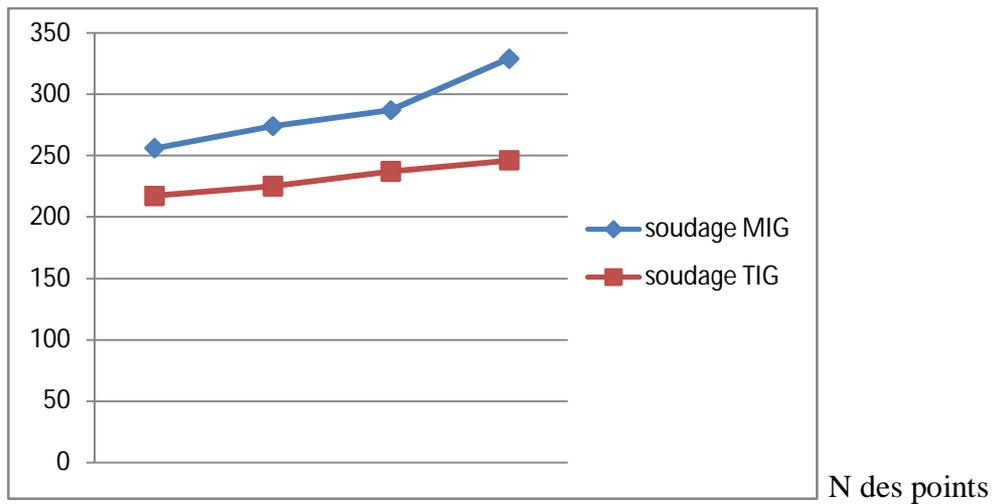


Figure IV.2 : micro dureté de métal de base 316L avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

HV (dureté)

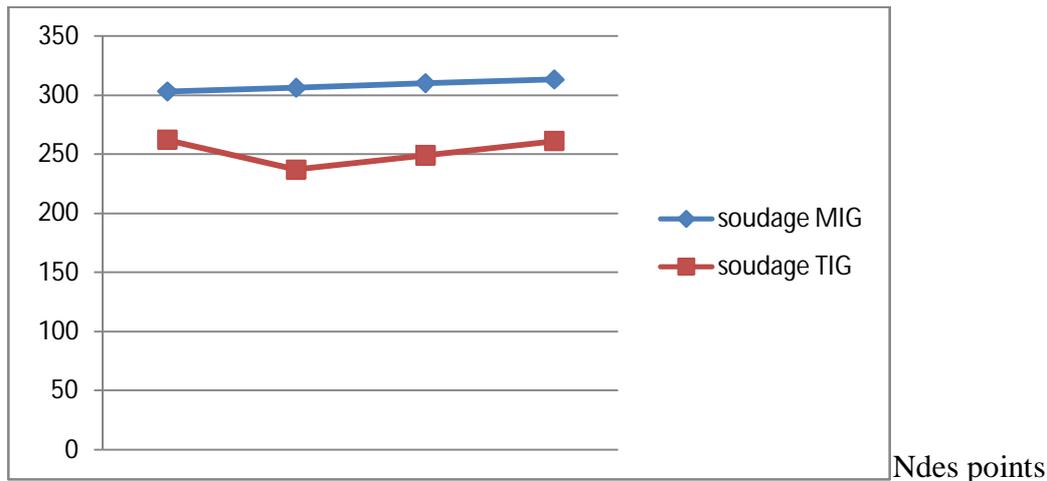


Figure IV.3: micro dureté MB 310s avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

- Dans la nuance de l'acier 310s on a observé que la dureté augmente pour la pièce soudé par MIG puis un traitement thermique que celle de la pièce soudé par TIG.
- Dans la nuance de l'acier 316L on a observé que la dureté augmente pour la pièce soudé par MIG puis un traitement thermique que celle de la pièce soudé par TIG.
- On remarque aussi léger augmentation de la dureté pour l'acier 316L par rapport à l'acier 310s avec zone de métal de base.
- La microdureté de soudage MIG est supérieur par rapport que la microdureté de soudage TIG pour les deux aciers à cause de l'énergie de soudage TIG plus grande par rapport au soudage MIG qui provoque un changement sur la microstructure de métal de base (grossissement des grains).

HV (dureté)

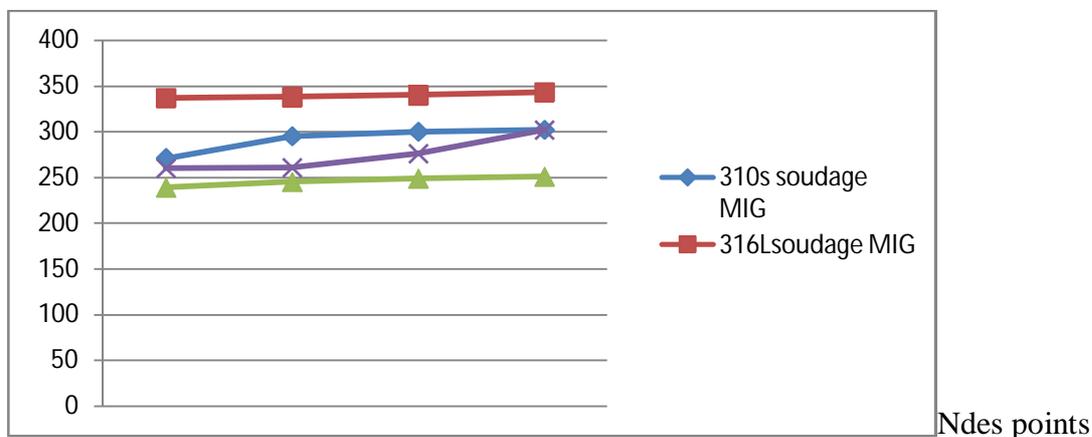


Figure IV.4 : micro dureté ZAT 316L- 310s avec le soudage MIG et TIG puis un T.

HV (dureté)

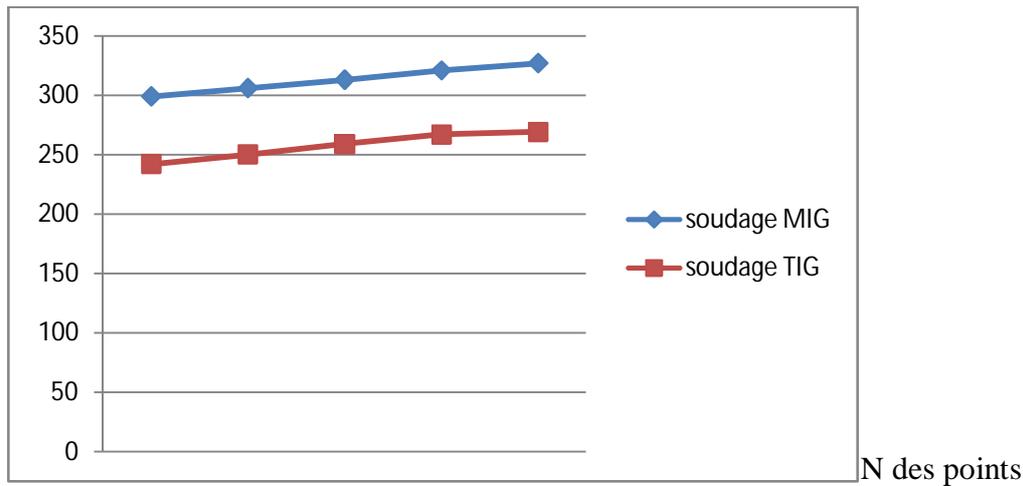


Figure IV.5 : micro dureté ZAT 316L- 316L avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

HV (dureté)

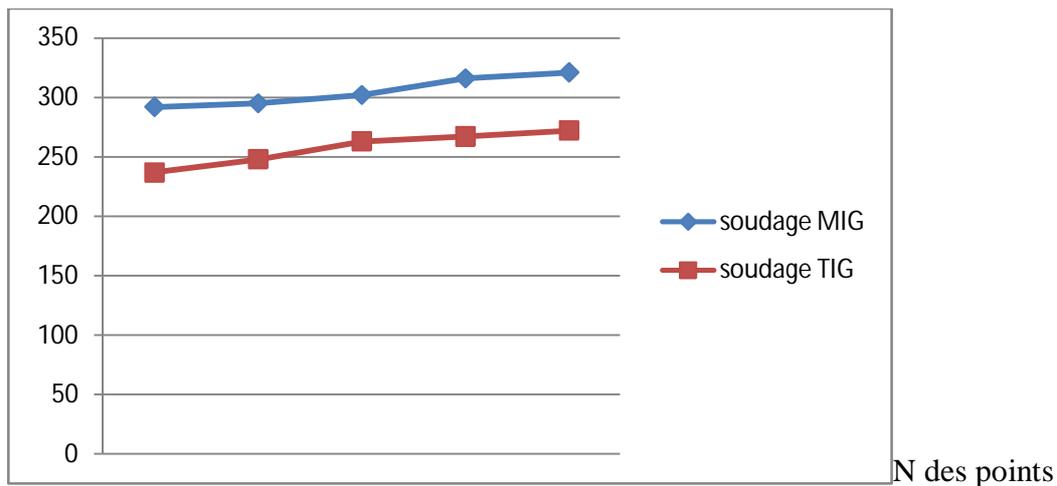


Figure IV.6 : micro dureté ZAT 310s-310s avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

- On a remarque que la microdurée de la ZAT a 316L augment pour la pièce soudé par MIG puis un traitement thermique que celle la pièce soudé par TIG.
- On a remarque que la microdurée de la ZAT a 310s augment pour la pièce soudé par MIG puis un traitement thermique que celle la pièce soudé par TIG.
- L'application de traitement thermique puis le soudage MIG et augment la microdurée de la nuance 316L et 310s.

HV (dureté)

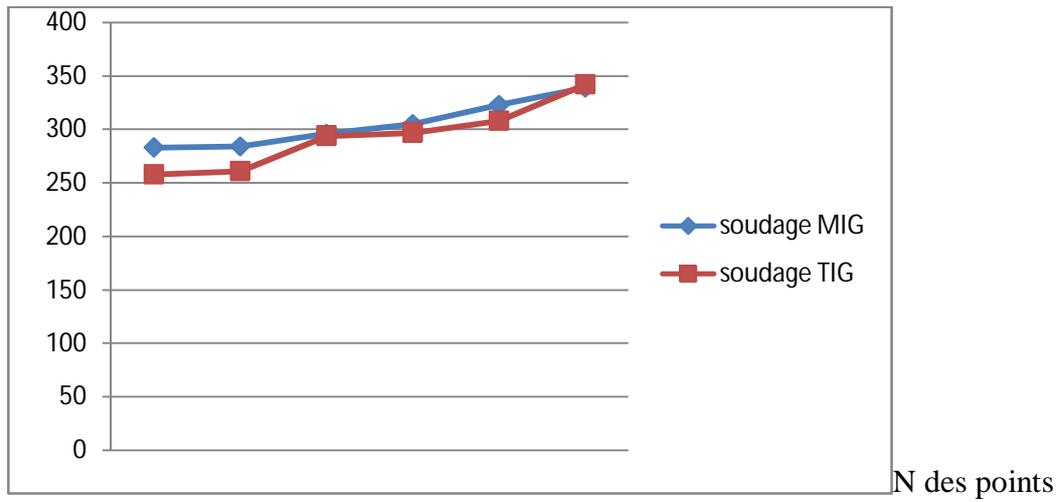


Figure IV.7: micro dureté ZF 316L-310s avec le soudage MIG et TIG puis une T.T

HV (dureté)

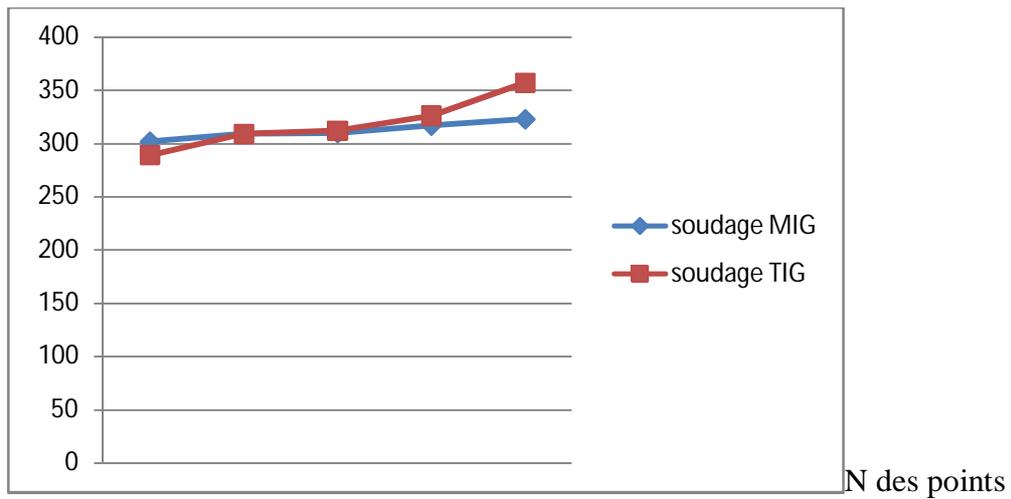


Figure IV.8 : micro dureté ZF 316L-316L avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

HV (dureté)

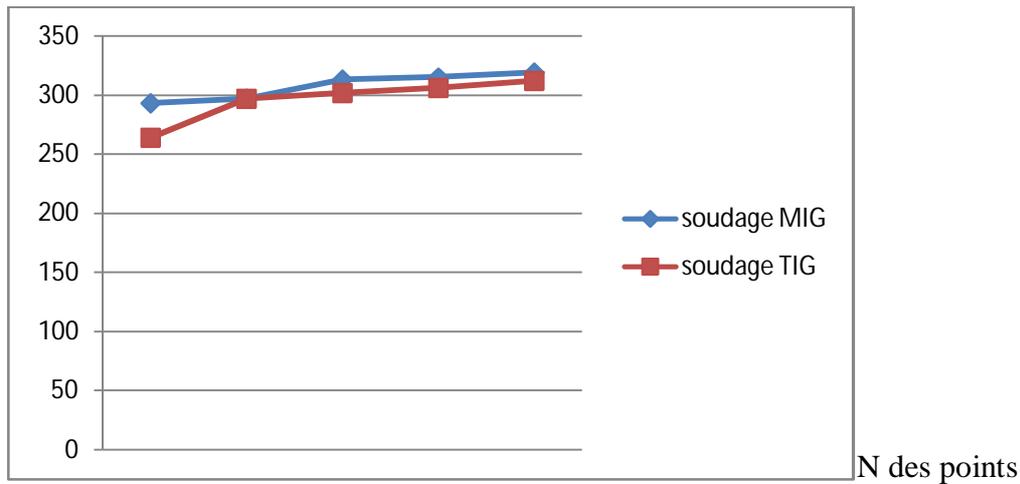


Figure IV.9: micro dureté ZF 310s-310s avec le soudage MIG et TIG puis un T.T

- Les teneurs des compositions chimiques du métal de base et le métal d'apport forment un mélange dans le bain de fusion et donnent une microstructure plus dure par rapport au métal de base, plus l'effet de cycle thermique qui change les propriétés mécanique et augmente la dureté.
- On remarque que la valeur de micro dureté de ZF de soudage MIG est supérieur par rapport à la micro dureté de ZF de soudage TIG pour les deux aciers à cause des éléments d'addition de métal d'apport qui modifie les températures de transformation des phases et décalent les courbes de TTT.

HV (dureté)

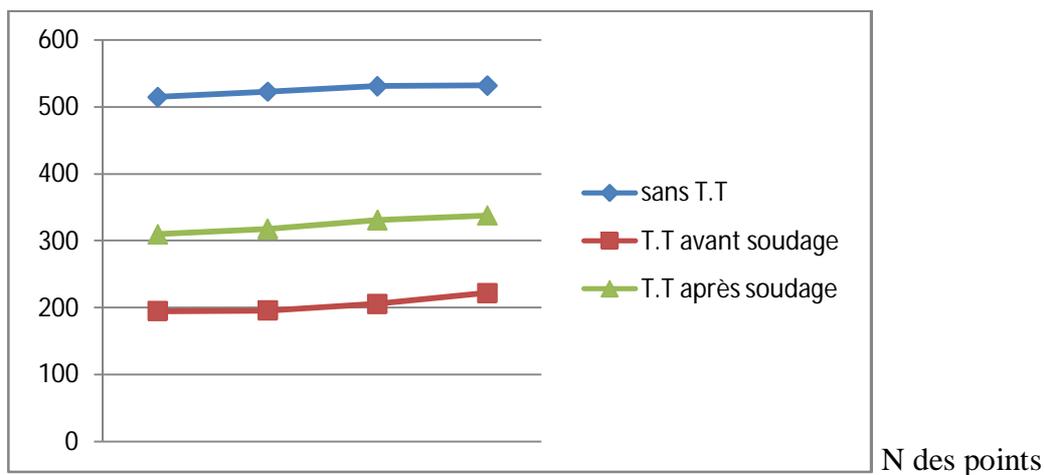


Figure IV.10 : micro dureté MB 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T.puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

HV (dureté)

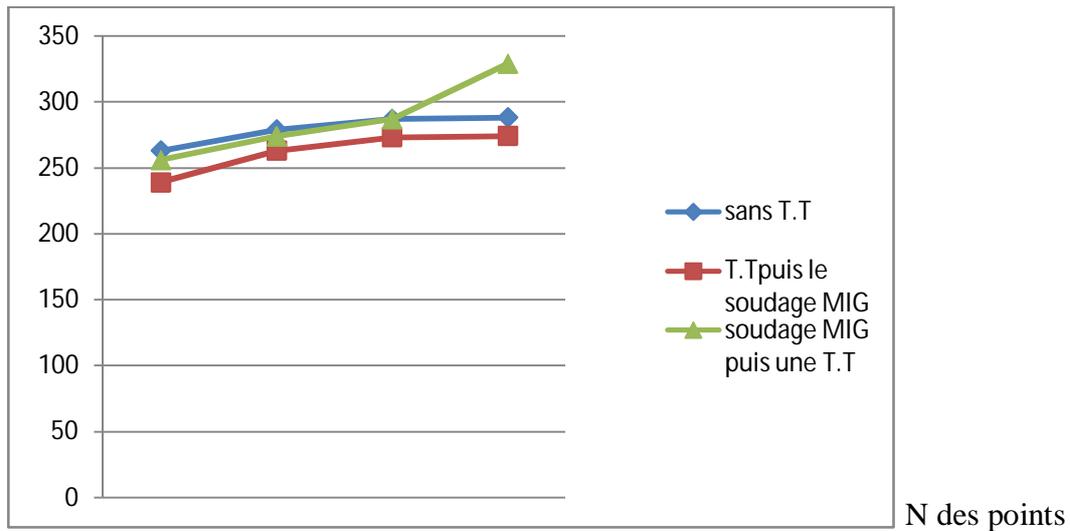


Figure IV.11: micro dureté MB 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis une T.T)

HV (dureté)

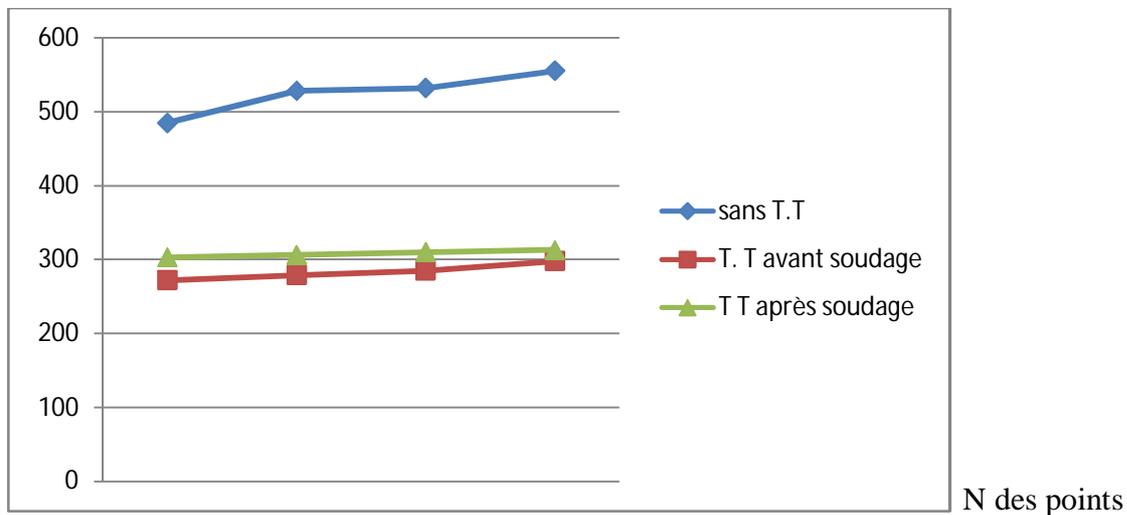


Figure IV.12 : micro dureté MB 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T.puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

- On remarque qu'à l'état brut la microdureté 316L est supérieur à l'acier 310s, d'après les recherches bibliographiques est notre étude on remarque que une relation entre la théorie et expérimentale est approuvé.

- Traitement thermique conduit à une diminution de la microdureté par rapport à l'état brut pour les deux aciers 316L et 310s à cause de phénomène d'adoucissement (recuit).

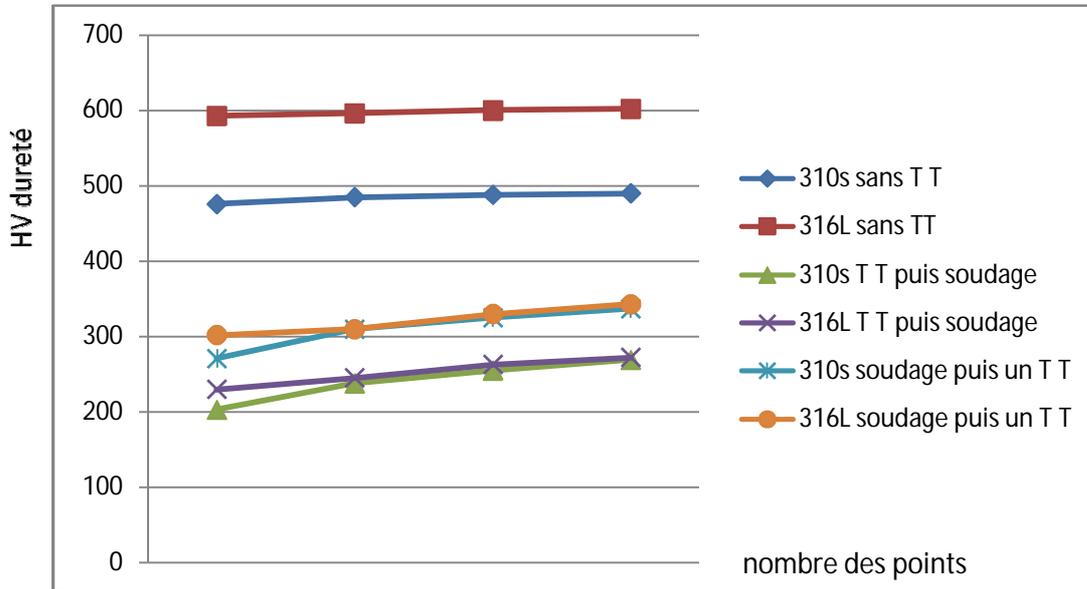


Figure IV.13 : micro dureté ZAT 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

HV (dureté)

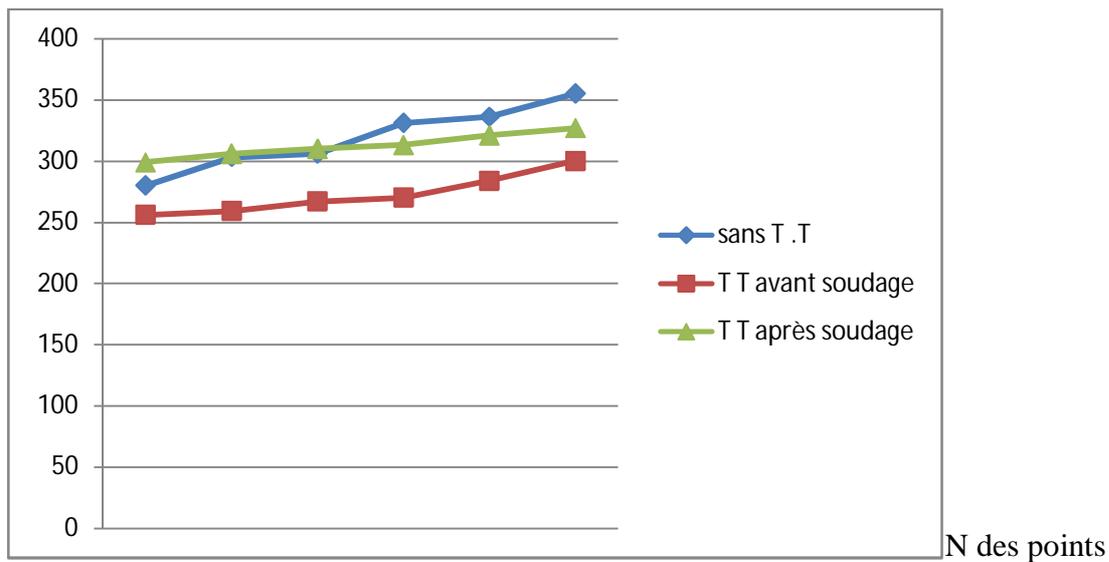


Figure IV.14 : micro dureté ZAT 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

HV (dureté)

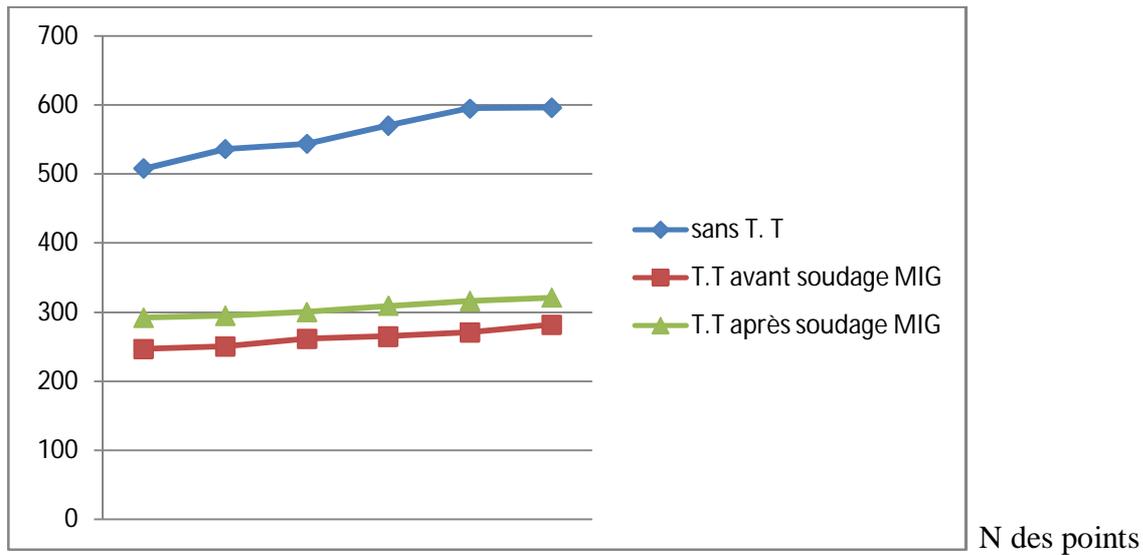


Figure IV.15 : micro dureté ZAT 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

- D'après la figure IV.13 on a remarque que 316L a l'étape brute présente une plus grande dureté par rapport aux autres aciers traités et non traités.
- Généralement on remarque que quelque soit l'opération soudage puis un T.T et T.T puis le soudage à chuter la microdureté.
- On constate que l'opération de soudage puis T.T à un effet remarquable sur l'augmentation de la dureté par rapport au procédé T.T puis soudage MIG ceci peut être expliqué par l'effet de T.T puis soudage qui élimine les effets des cycles thermiques d'opération de soudage et affine les grains.

HV (dureté)

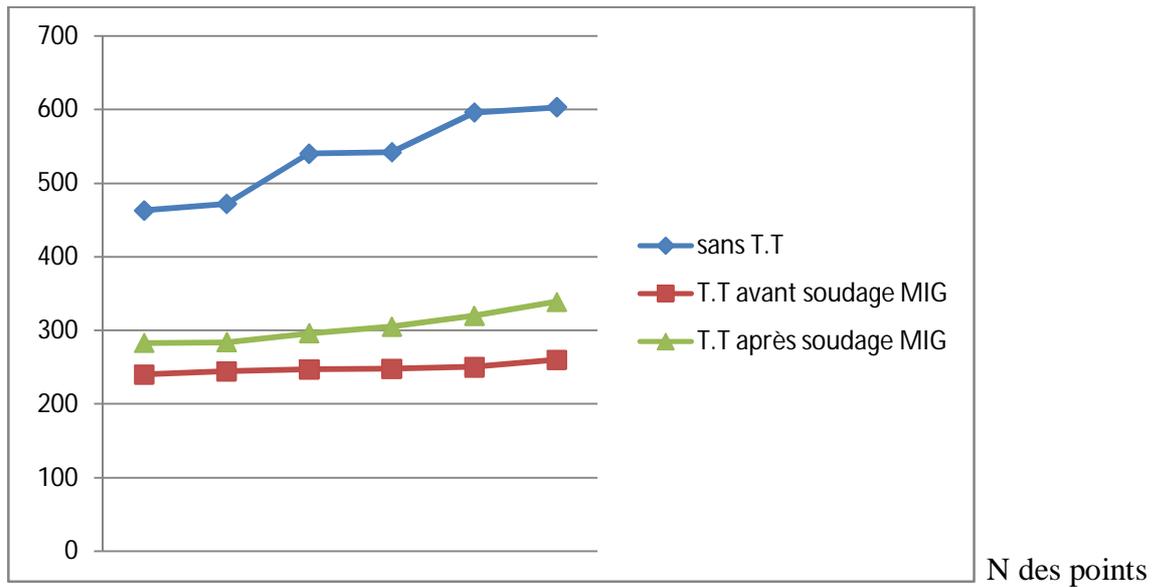


Figure IV.16: micro dureté ZF 316L-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

HV (dureté)

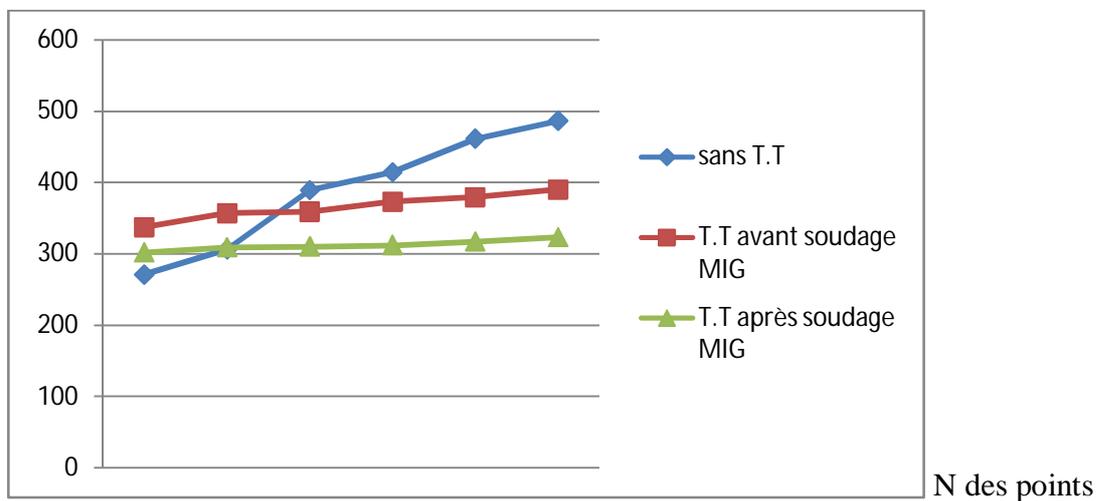


Figure IV.17: micro dureté ZF 316L-316L avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

HV (dureté)

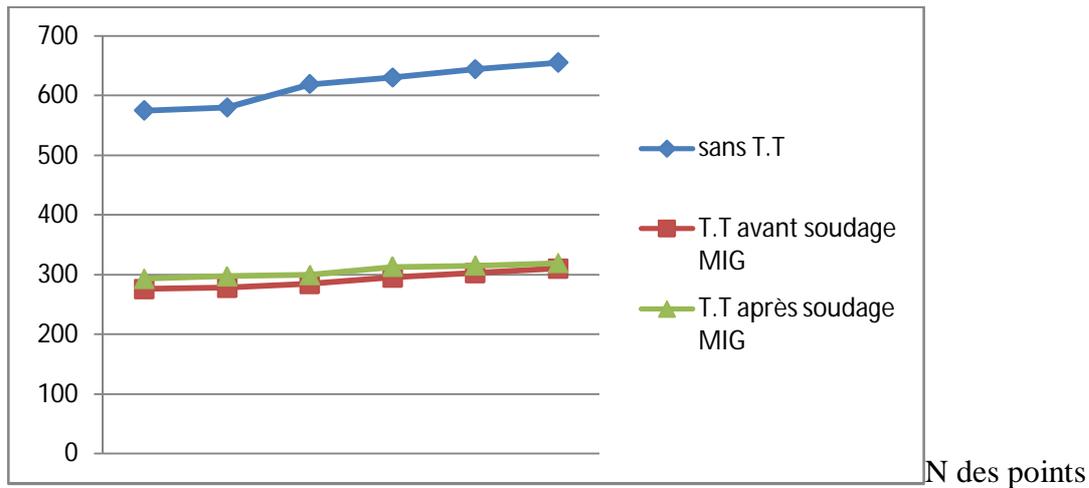


Figure IV.18: micro dureté ZF 310s-310s avec différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T)

- Les teneurs de composition chimique de métal de base et métal d'apport forment un mélange dans le bain de fusion et donnent une microstructure plus dure par rapport au métal de base, plus l'effet de cycle thermique qui change les propriétés mécanique et augmente la dureté.
- Traitement thermique conduit à une diminution de la microdureté par rapport à l'état brut pour les deux aciers 316L et 310s à cause de phénomène d'adoucissement (recuit).

HV (dureté)

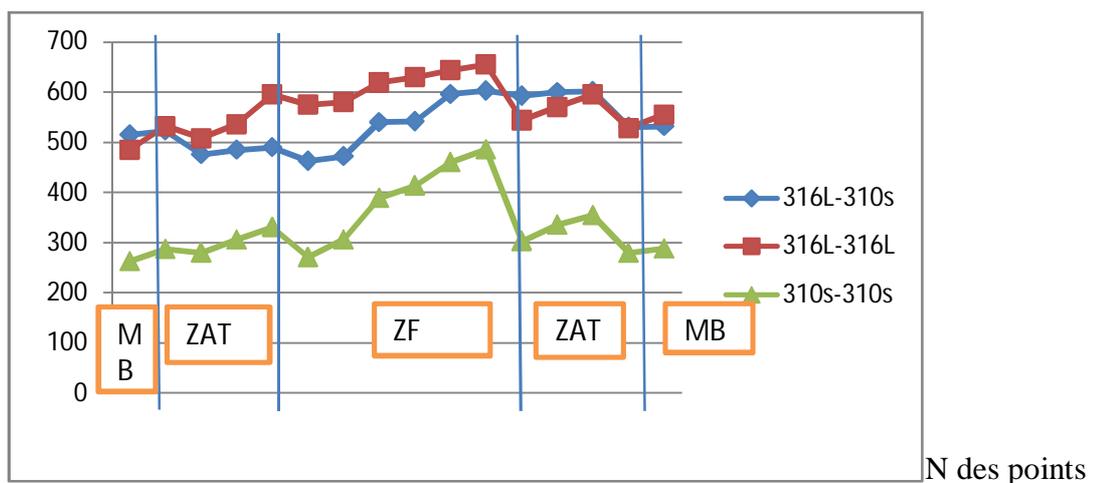


Figure IV.19: micro dureté à différents zone (MB, ZAT, ZF) à l'état sans T.T

HV (dureté)

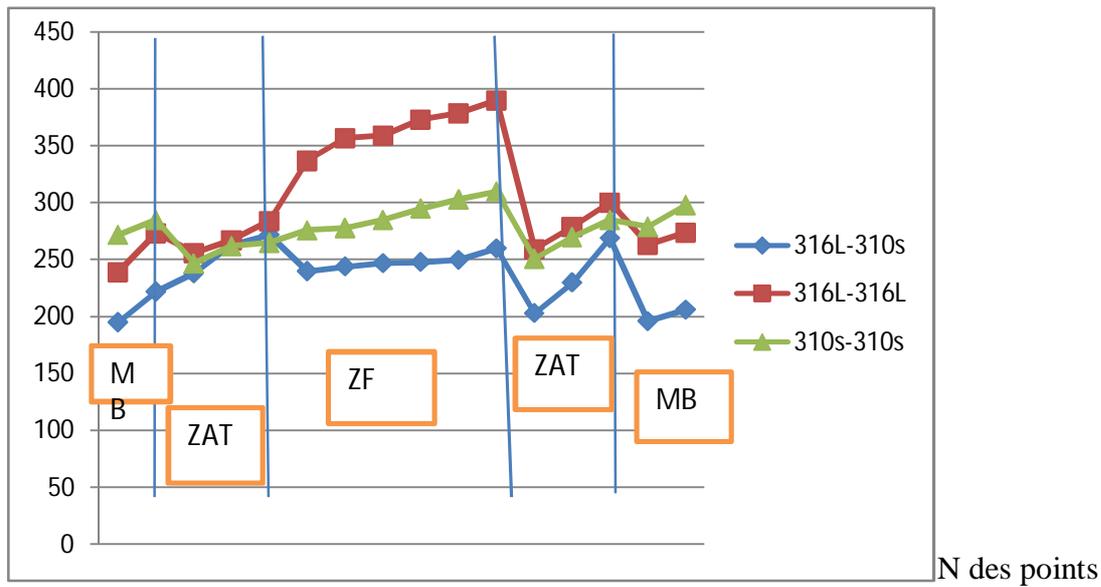


Figure IV.20: micro dureté à différents zone (MB, ZAT, ZF) à T.T puis le soudage MIG

HV (dureté)

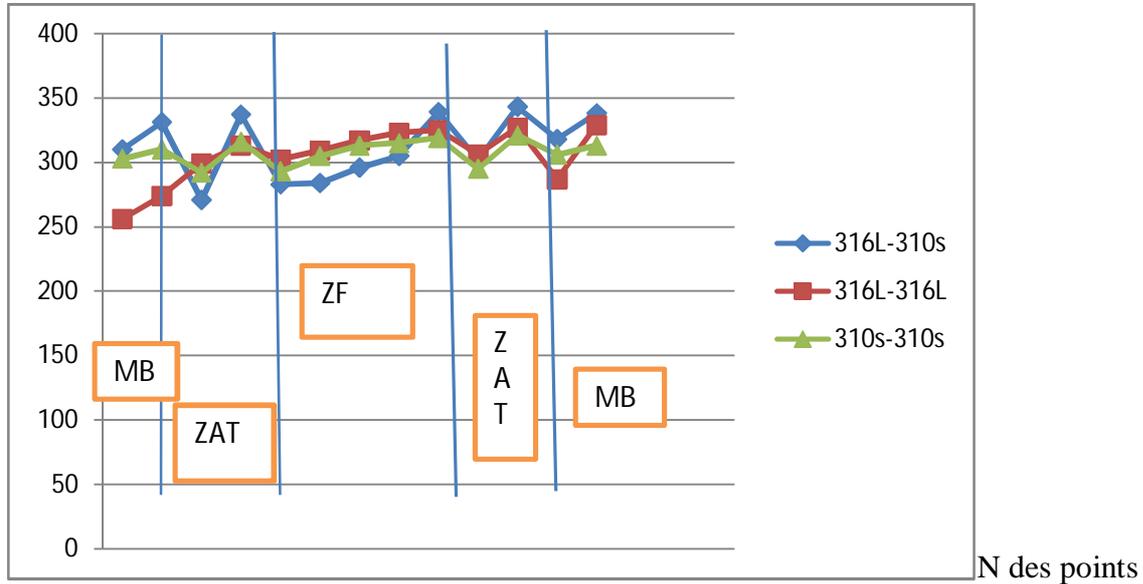


Figure IV.21: micro dureté à différents zone (MB, ZAT, ZF) à soudage MIG puis un T.T

- On remarque que la microdureté de la zone fondue est toujours maximale avec les deux aciers est varié pour chaque zone a l'autre, est aussi a l'étape sans traitement thermique et traitement thermique puis le soudage MIG.

IV .4.Essais de résilience :

La formule de résilience :

$$K_{CV} = K_C / S \text{ (J/Cm}^2\text{)}$$

K_{cv} : La résilience.

K_C: Energie d'impact absorbée.

S : Section à l'entaille de l'éprouvette.

Les résultats obtenus des essais de résilience sont présentés sous forme de tableau :

	L'éprouvette	Energie absorbée K _C (joule)	Section S (cm ²)	Résilience K _{CV} (J/cm ²)	
Sans T.T	316L-310s	40	0.2	200	Non cassé
	316L-316L	26	0.2	130	Non cassé
	310s-310s	27	0.2	135	Non cassé
T.T.puis le Soudage MIG	316L-310s	29	0.2	145	Cassé
	316L-316	42	0.2	210	Non cassé
	310s-310s	24	0.2	120	Cassé
Soudage MIG Puis une T.T	316L-310s	49	0.2	245	Cassé
	316L-316L	23	0.2	115	Cassé
	310s-310s	30	0.2	150	Non cassé
Soudage TIG Puis une T.T	316L-310s	38	0.2	190	Non cassé
	316L-316L	50	0.2	250	Non cassé
	310s-310s	31	0.2	155	Cassé

Tableau IV.5 : Les Résultats des essais de résilience.



Les éprouvette sans traitement thermique



Les éprouvette avec T.T puis le soudage MIG



L'éprouvettes de soudage MIG puis un T.T



L'éprouvettes de soudage TIG puis un T.T

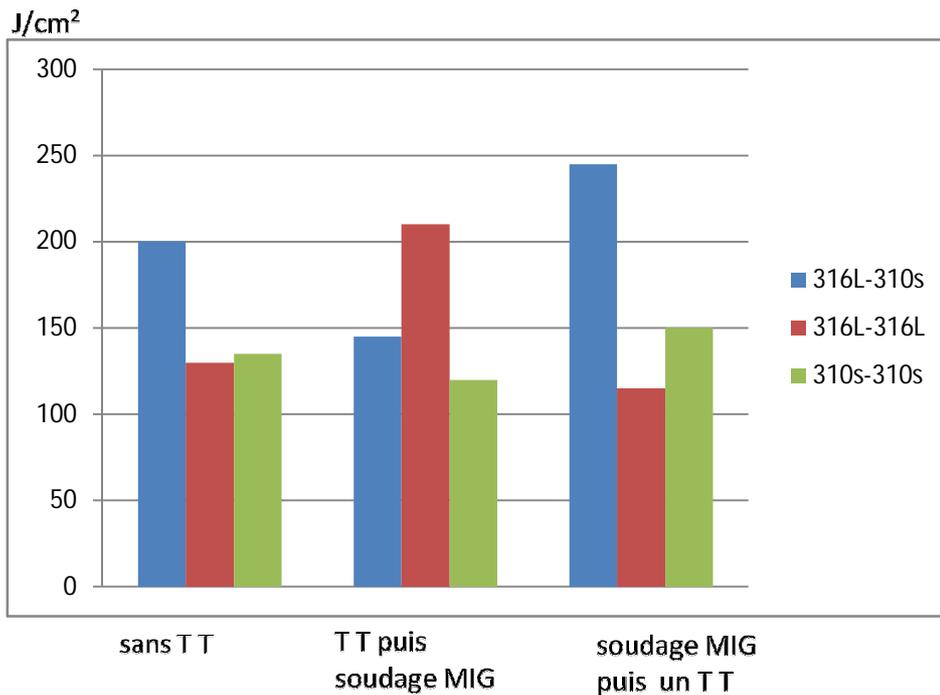


Figure IV.22 : Les Résultats des essais de résilience à différents étapes (sans T.T, T.T puis le soudage MIG, soudage MIG puis un T.T).

- Pour chaque échantillon, une rupture lui est appliquée. Celle-ci diffère selon les conditions de travail et selon les paramètres utilisés. Mais ce phénomène de la rupture diffère lors de l'expérience.
- Le type de la rupture de certains échantillons est ductile. La surface de rupture apparaît creusée de cupules formées au cours des dernières étapes de la déformation plastique (avant rupture de l'éprouvette).
- A l'état brut sans T.T on indique que la résilience à l'éprouvette (316L-310s) on a remarque que l'énergie augmente légèrement, a cause de 310s qui améliore la ductilité donc Kc augmente parce que la microdureté de 310s < a 316L.
- Dans l'étape de traitement thermique puis le soudage MIG, on a remarque que l'éprouvette réalise par 316L qui absorbe une grande énergie Kc par rapport les autres éprouvettes.

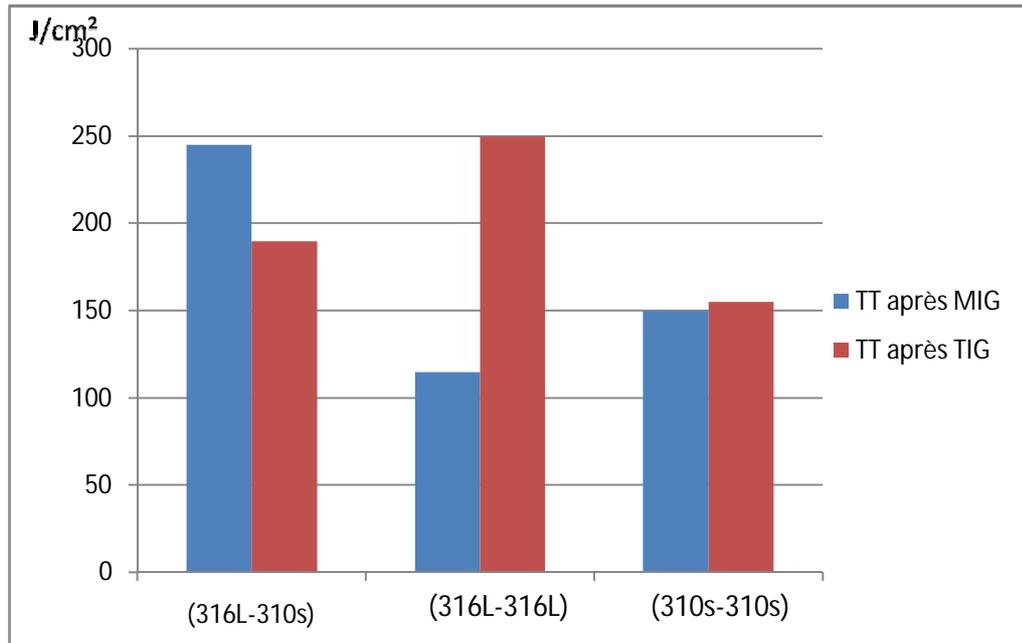


Figure IV.23 : Les Résultats des essais de résilience à l'étape de soudage MIG et TIG puis un traitement thermique.

- On remarque que l'énergie absorbé de l'éprouvette (316L-310s) à l'étape de soudage MIG est supérieure à l'éprouvette (316L-310s) à l'étape de soudage TIG a cause de 310s qui améliorer la ductilité donc Kc augment parce que HV de 310s < HV de 316L.
- On remarque que l'éprouvette qui réalisé 316L absorbé une grande énergie à l'étape de TIG par rapporte a l'étape MIG a cause de l'énergie fournie par le soudage TIG est plus grande a soudage MIG, une diminution de la microdureté applique la résilience augment.
- On observe même valeur de l'énergie absorbe 310s pour les deux étapes MIG et TIG Parce que les traitements thermiques conduite un changement des propriétés mécanique.

Conclusion générale

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution de leurs propriétés d'une manière intégrée tout au long du processus d'élaboration. Ces propriétés mécaniques sont en partie liées à la nature et à la proportion des éléments d'acier inoxydable et la composition chimique

Le soudage des aciers inoxydables conduit à des changements microstructuraux. Ces derniers sont liés aux cycles thermiques caractérisés par un passage de l'état solide à l'état liquide et inversement, au refroidissement et aux traitements thermiques qui peuvent être réalisés ensuite.

En premier lieu, nous avons étudié la microstructure résultant des procédés de soudage MIG et TIG ainsi que les caractéristiques du phénomène de soudage.

Cette étude du joint soudé nous a permis d'identifier plusieurs zones :

- Métal de base
- Une zone affecte thermiquement
- une zone fondue

Dans le but de contribuer à l'évaluation de la qualité de notre assemblage soudé, de caractériser l'interaction entre les aciers inoxydables et les procédés de soudage TIG et MIG, et de fournir des données quantitatives sur le comportement de cet assemblage soudé, nous avons utilisé durant cette thèse les essais mécaniques suivants :

- microdureté
- Résilience

Le soudage TIG et MIG réalisent des assemblages de qualités, grâce à une très bonne protection de la zone fondue et de l'arc, ainsi qu'à l'absence de transfert de métal. Ceci en fait un procédé de prédilection pour les industries chimiques et pétrochimiques, aéronautique, agroalimentaires ou nucléaires.

Finalement, notre étude nous a permis d'étudier l'influence des traitements thermiques sur les aciers inoxydables soudés par les procédés MIG et TIG. Elle nous a permis de distinguer les caractéristiques de l'évolution de la structure lors de l'application du procédé de soudage MIG et TIG dans les différentes zones (MB, ZAT, et zone fondue) en fonction de l'état initial de acier On peut conclure que :

- L'application des procédés de soudage MIG et TIG un effet sur l'augmentation de la microdureté dans la zone fondue pour les deux aciers par rapporte les autre zones.
- L'application des traitements thermiques puis les procédés de soudage MIG et TIG augmente l'énergie absorbé du cordon de soudure.

Les références

- [1] Thèse Docteur en Mécanique. « Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205 ». RAID BADJI. P 4-6 .2008
- [2] Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, p. M4541-6. juin 2000
- [3] Thèse Docteur. « 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 ». Emilie le Guen. P 47 .2010
- [4] Thèse Docteur. « Simulation numérique du soudage – acier 316l validation sur cas tests de complexité croissante » Lionel Depardeux. p 24.2004
- [5] Thèse Magister. « Étude théorique et expérimentale du procédé de soudage par points des alliages d'aluminium » Imane bennia.p 24 .2008
- [6] EN 10088-1 “Aciers inoxydables. - Partie 1 : liste des aciers inoxydables”.
- [7] [www.soudage 2000.com](http://www.soudage2000.com)
- [8] métallurgie et mécanique du soudage. (Régis bloudu).
- [9] [ht /www.chez.com /soudage 2000](http://ht/www.chez.com/soudage2000).
- [10] P.J CUNAT. “Aciers inoxydable : Critères de choix et structure”. Techniques de l'ingénieur, fasc. M 4540, (Mars 2000).
- [11] J. Barralis, G. Maeder, “Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, Processus”, AFNOR, P [39-43], 2001.
- [12] Comité de la fabrication métallique industrielle "procédés de soudage (Manuels et semi-automatiques) " chapitre2, 2009
- [13] Lievers, Klas Weman « Guide de soudage MIG », P [18-19] .2007