

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

UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin D'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Matériaux et Traitements de Surface

Titre :

Influence des éléments d'addition sur les
comportements mécaniques et métallurgiques des
soudures hétérogènes

Proposé et encadré par :

Promoteur: Mr. Abada.M

Co-dirigeant :Mr. M.F.BENLAMNOUAR

Etudié par :

Mr.Allaouat brahim

Année universitaire : 2014/2015

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Centre National de la Recherche en Soudage et Contrôle de Cheraga.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciement, je tiens à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Je voudrai tout d'abord remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail. Aussi, je voudrai remercier tous les enseignants de notre département pour tous leurs aides.

J'exprime toute ma gratitude au personnel des différents ateliers de notre Département de mécanique.

Je suis très reconnaissant à Monsieur **Farid Benlamnouar** et à Monsieur **Abada mourad**, pour avoir accepté de diriger ce travail, et dont l'aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique et humain. Je leur présente également mes plus sincères gratitudees pour la confiance et la sympathie qu'ils m'ont témoignéees au cours de ces mois de travail.

Dédicaces

- ✚ *Je dédie ce travail tout particulièrement aux personnes qui me sont les plus chères au monde ; à mes très chers **parents** pour leurs patiences, soutiens et confiances,*
- ✚ *A ma **mère** qui n'a pas cessé de prier pour moi, de m'encourager et de me soutenir et qui a su m'entourer de tout son amour et de son affection,*
- ✚ *A mon **père** qui s'est sacrifié afin que rien n'entrave le déroulement de mes études,*
- ✚ *Je dédie ce travail également à mes frères et à tous les membres de ma famille,*
- ✚ *Bien sur à mes **amis** et **collègues** de ma promotion sortante MTS*
2015.

ALLAOUAT

INTRODUCTION GENERALE

L'un des thèmes récentes de recherche a consisté à apporter une contribution à la problématique du soudage de matériaux dissemblables métallurgiquement peu compatibles, ou de matériaux qui, de par leurs caractéristiques particulières rendant leur soudage direct difficile, nécessitent le recours au soudage hétérogène, par l'utilisation d'un matériau de apport de nature innovante ou bien l'utilisation des nouveaux paramètres de soudage.

Dans ce travail on s'intéresse à des jonctions hétérogènes HSLA-INOX qui peuvent être utilisés dans les différentes centrales électriques et nucléaires aussi dans la fabrication mécanique [1], Les différentes nuances faiblement alliés HSLA comme le X70 (principalement utilisé dans les projets pétroliers) rentrent aussi dans la fabrication des pressuriseurs des centrales [2,3] car ils présentent un nombre d'avenues considérable à la résistance des pressions des gaz et des liquides, et leur utilisation pour construire un pipeline est de plus en plus répandue. Cependant, les caractéristiques des jonctions bimétalliques entre les aciers haute limite élastique et les aciers 304L ne sont pas encore vérifiées, en terme de soudabilité, propriétés mécaniques et métallurgiques.

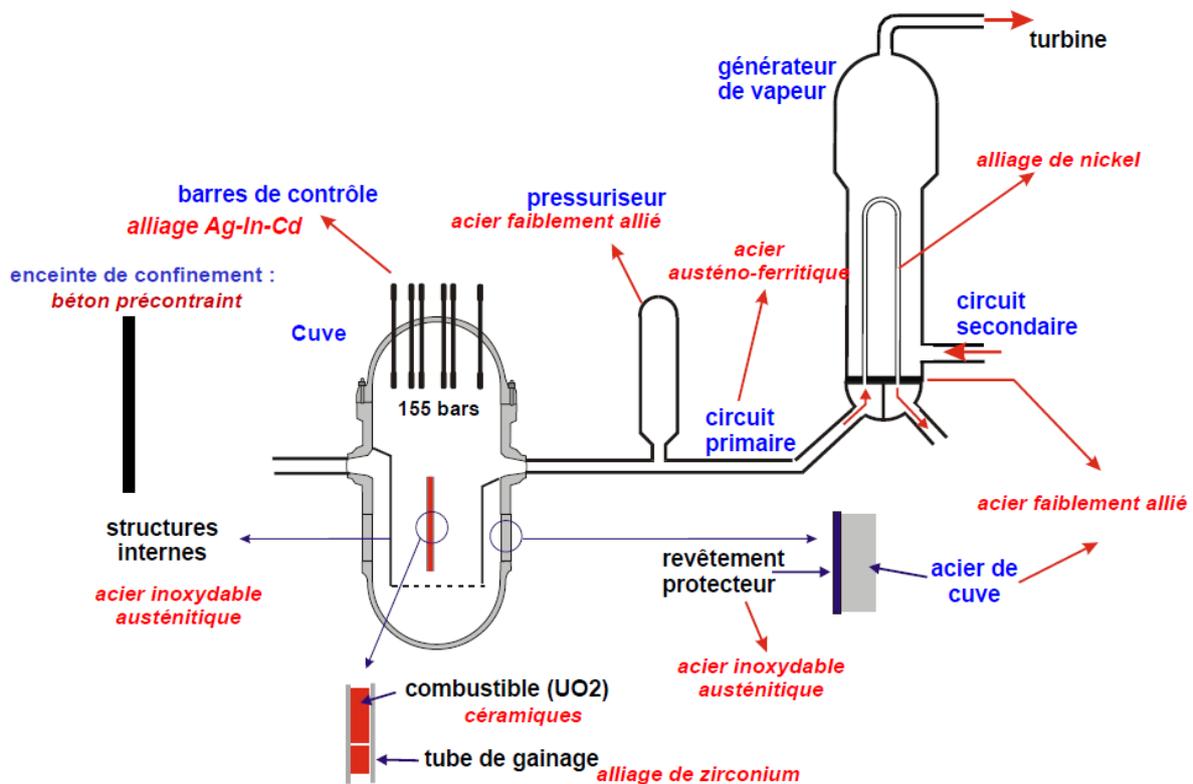


Schéma montrant l'utilisation des jonctions bimétalliques dans un central [2]

L'objectif de cette thèse est de caractériser et d'identifier les caractéristiques des soudures hétérogènes des nuances (HSLA-INOX) par différentes électrodes, en particulier d'étudier le comportement mécanique des joints de soudures et l'évolution des microstructures,

Pour les matériaux de base nous avons utilisé deux nuances : acier faiblement allié X70, et acier inoxydable austénitiques 304L,

Pour les métaux d'apport nous avons utilisé une électrode faiblement alliée, une électrode austénitique, une électrode duplex, Le manuscrit adopte une organisation linéaire.

Le chapitre 1 donne des généralités sur les aciers HSLA-304L, leurs classifications et leurs caractéristiques.

Par la suite, le chapitre 2 présente une synthèse bibliographique sur le soudage à l'arc utilisé dans notre partie expérimentale.

Les techniques expérimentales et leurs principes sont établis dans le chapitre 3.

Enfin, le chapitre 4 est consacré à la présentation des essais mécaniques adoptés pour notre étude et les principaux résultats obtenus avec leurs interprétations.

ملخص :

قمنا في هذا العمل بدراسة الملحومات الغير متجانسة وتأثير نوعية معدن اللحام على الخصائص الميكانيكية للحام. تم القيام بعملية اللحام باستعمال أربع طرق. بعدها قمنا باستخراج عينات بهدف عرضها على المجهر الضوئي وجهاز قياس الصلابة بغرض معرفة صفاتها المعدنية.
كلمات مفتاحية : لحام غير متجانس, البنية المجهرية.

Résumé :

Dans ce travail, une étude de l'influence de la microstructure sur le comportement mécanique des joints soudés a été réalisée. Des essais de soudage, avec quatre électrodes différentes ont été conduits. Les essais ont été instrumentés afin de prélever des échantillons après des opérations de soudage. Des échantillons prélevés sur les pièces soudées ont été examinés par micrographie optique et essais de microduretés réalisés.

Mots clés: Acier 304L, X70, microstructure, microdureté, soudage hétérogène, taille des grains, zone affectée thermiquement,

Abstract :

In this work, a study of the influence of the microstructure on the mechanical behavior of the welded dissimilar joints was carried out. Welding tests, using four different filler metal were carried out. The tests were instrumented in order to optimize welding.

Samples taken on the welded parts were examined by optical micrograph and microhardness. The results show that the microstructure, in particular the grain size, changes with the filler metal type.

Key words: 304L steel, microstructure, microhardness, microstructure, dissimilar welding, grainsize, Heat Affected Zone.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I HSLA&INOX	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. DIFFERENTS TYPES DES ACIERS HSLA.....	4
I.2.1. Les aciers HSLA résistants à la corrosion.....	4
I.2.2. Les aciers perlitiques à structure laminés.....	4
I.2.3. Les aciers de ferrite aciculaire.....	5
I.2.4. Les aciers à double phase (dual phase)	5
I.2.5. Les aciers de forme d'inclusion contrôlé.....	5
I.2.6. Les aciers microalliés ferrito-perlitique.....	5
I.3. EFFET DES ÉLÉMENTS D'ADDITION.....	6
I.3.1. Éléments microalliage.....	6
I.3.2. Composés : carbures, nitrures, oxydes.....	7
I.3.3. Précipitation.....	8
I.4. PROPRIETES DES ACIERS HSLA.....	8
I.4.1. Durcissement.....	8
I.5. SOUDABILITE DES HSLA.....	9
I.6. LES ACIERS INOXYDABLES.....	9
I.6.1. La formation de la couche inoxydable	10
I.7. LES FAMILLES DES ACIERS INOXYDABLES.....	11
I.7.1. Aciers inoxydables martensitiques.....	11
I.7.2. Aciers inoxydables ferritiques.....	11
I.7.3. Aciers inoxydables austéno-ferritiques.....	12
I.7.4. Aciers inoxydables austénitiques.....	12
I.8. ROLES DES ELEMENTS D'ADDITION.....	12
I.8.1. Le chrome.....	12
I.8.2. Le carbone.....	13
I.8.3. Le nickel	13
I.8.4. Le manganèse.....	13
I.8.5. Le molybdène et le cuivre	13
I.8.6. Le tungstène.....	13
I.8.7. Le titane	13

I.8.8. Le niobium	13
I.8.9. Le silicium	14
I.9. DOMAINES D'UTILISATION DES ACIERS AUSTENITIQUES.....	14
I.9.1 Équipements pour l'industrie	14
I.9.2 Électroménager et coutellerie.....	14
I.9.3 Industrie automobile.....	14
I.9.4 Industrie des transports terrestres et maritimes.....	15
I.9.5 Tubes.....	16
I.10. DIAGRAMMES DE PHASES.....	16
I.10.1 Système Fe-Cr.....	17
I.10.2 La boucle γ	18
I.10.3. Les phases « σ » et « α' »	18
I.10.4. Système Fe-Cr-Ni.....	19

Chapitre II Soudage à l'arc

II.1. DEFINITION DE SOUDAGE	21
II.2. PROCEDES DE SOUDAGE PAR FUSION	21
II.3. SOUDAGE A L'ARC	23
II.4. PRINCIPES DU SOUDAGE TIG	24
II.5. LES PARAMETRES TIG.....	25
II.5.1. Gaz inerte.....	25
II.5.2. Produit d'apport.....	25
II.5.3. La nature des électrodes au tungstène	25
II.5.4. Intensité de courant	26
II.6. TENUE MECANIQUE D'UN JOINT SOUDE	26
II.7. STRUCTURE D'UNE SOUDURE	26
II.8. CHOIX DES MATERIAUX A SOUDER.....	27
II.8.1. Choix du métal de base	27
II.8.2. Choix du métal d'apport	28
II.8.3. Choix de diamètre	28
II.8.4. Choix du type de chanfrein.....	28
II.9. SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES.....	28
II.10. DIAGRAMME DE SCHAEFFLER.....	29

Chapitre III Techniques expérimentales

III.1 .INTRODUCTION.....	32
III.2. LES MATERIAUX UTILISE.....	32
III.2.1. MATERIAUX DE BASE.....	32
III.2.2.Métaux d’apport.....	32
III.3. PROCEDURE DE SOUDAGE.....	33
III.3.1. Préparation des échantillons	33
III.3.2. Les paramètre de soudage.....	34
III.4. METALLOGRAPHIE OPTIQUE.....	36
III.4.1. Découpage des échantillons	36
III.4.2. Enrobage.....	37
III.4.3. Polissage.....	37
III.4.4. Attaque chimique	38
III.4.5. Microscopie optique	38
III.5. CARACTERISATION MECANIQUES.....	39
III.5.1. Profils de microdureté Vickers.....	39
III.5.2. Essai de résilience.....	40
III.5.3. Essai de traction.....	42
III.5.3.1.Préparation des éprouvettes.....	43

Chapitre IV Résultats et interprétations

IV.1. INTRODUCTION.....	45
IV.2. L’EXAMENMACROGRAPHIQUE.....	46
IV.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS ETUDIES.....	47
IV.4. EXAMEN MICROGRAPHIQUE	47
IV.5. MICRODURETE.....	49
IV.6. RESILIENCE	50
IV.7. ESSAIS DE TRACTION.....	52
CONCLUSION GENERALE.....	54
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE.....	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Evolution des HSLA.....	3
Tableau I.2 : Les Propriétés des aciers de grade API.....	3
Tableau II.1: Courants de soudage optimaux.....	26
Tableau III.1 : Composition chimique de X70-grade A en % (en poids).....	32
Tableau III.2 : Composition chimique de 304L en % (en poids).....	32
Tableau III.3 : Composition chimique du matériau d'apport inox (308L) (en poids).....	33
Tableau III.4 : Composition chimique du matériau d'apport inox (2209L) (en poids).....	33
Tableau III.5 : Composition chimique du matériau d'apport faiblement allié (E7018) (en poids).....	33
Tableau III.6 : Paramètres de soudage (TIG).....	35
Tableaux IV.1 Macrographies des soudures.....	46
Tableaux IV.2 : Micrographies des joints soudées.....	49
Tableau.IV .3 : Résultats de l'essai de résilience exécutée à (25) °C.....	51
Tableau IV.4: caractéristiques des essais traction des éprouvettes.....	52

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Développement des pipelines (composition,procédé TMCP, microstructure).....	4
Figure I.2 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités.....	8
Figure I.3 : Intérêt de la combinaison de deux éléments de microalliage pour le durcissement.....	10
Figure I.4 : Influence combinée de l'affinement du grain et de la précipitation sur la limite d'élasticité et la température de transition.....	17
Figure I.5 : Dureté sous cordon et fissuration d'un acier microallié (méthode des implants).....	18
Figure I.6 : Influence d'une addition de niobium ou de vanadium sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT).....	19
Figure .II.1 : Procédés de soudage classés selon les sources d'énergie.....	22
Figure II.2 : Principe d'un arc électrique.....	23
Figure II.3 : Distribution approximative de la chaleur lors du soudage TIG selon les polarités CCPD, CCPI et C.A.....	24
Figure II.4 : Structure d'une soudure.....	27
Figure .II.5 . Diagramme de Schaeffler.....	29
Figure III.1 : Matériaux de base utilisés (304L et HSLA-70).....	32
Figure III.2 : Métal d'apport utilisé (1 : E 308L) et (2 :2209) et (3 :E7018).....	33
Figure III.3 : les pièces à assemblés.....	34
Figure III.4 : les plaques soudées.....	36
Figure III.5 : outil de découpage utilisé.....	36
Figure III.6 : Polisseuse Struers.....	37
Figure III.7 : Microscope optique utilisé(C.S.C Cherraga).....	38
Figure III.8 : Micro uromètre semi-automatique.....	40
Figure III.9 : Forme de l'éprouvette de résilience et la position de l'entaille.....	41
Figure III.10 : Mouton pendule ou mouton de Charpy.....	41
Figure III.11 : les éprouvettes de résiliences.....	41
Figure III. 12 : Machine de traction Instron.....	42
Figure III.13 : perceuse fraiseuse utilisée (C.S.C Cherraga).....	43
Figure III.14 : L'éprouvette de traction la norme ASTM (E8/E8M – 09) [23].....	43

Figure IV.1: Macrographie des joints soudés montre les différentes zones des assemblages.....	47
Figure IV.2 : Micrographies les matériaux de base : X70 (à gauche) et 304L.....	47
Figure IV. 3: Profils de microdureté des joints de soudures (E308L, E2209, E7018, sans métal).....	49.
Figure IV.4: Montrant l'axe X des profils de microdureté.....	50
Figure IV.5 : Epreuve de résilience.....	50
Figure IV.6: Epreuves après des essais de résiliences.....	51
Figure IV.7: Courbes de traction des épreuves	52
Figure. IV.8 : les épreuves après de tractions.....	53

Les abréviations

API : American Petroleum Institute

C.C : courant continu

C.A : courant alternatif

CCPD : courant continu polarité directe

CCPI : courant continu polarité inverse

MB : métal de base

ZAT : zone affectée thermiquement

ZL : zone de liaison

ZF : Zones fondue

TIG : tungstène inerte Gaz

I.1. INTRODUCTION

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un faible taux d'éléments d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone la minés. Parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [4].

L'évolution des HSLA est remarquable lorsqu'on observe les données chiffrées en termes de pression, de diamètre et de capacité volumique, présentées dans le Tableau I.1 :

Année	Pression de service [bar]	Diamètre [mm]	Capacité annuelle [millions m ³]	Perte de pression après 6000 km [%]
1910	2	400	80	49
1930	20	500	650	31
1965	66	900	830	14
1980	80	1420	26000	11
2000	120	1620	52000	8

Tableau I.1 : Evolution des HSLA [5]

Le tableau I.2 rassemble les propriétés mécaniques requises pour les pipelines en acier, d'après l'American Petroleum Institute (API).

GRADE	Limite d'élasticité (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)
API-X65	448	530	24
API-X70	483	566	23
API-X80	551	620	22
API-X100	690	770	25

Tableau I.2 : Les Propriétés des aciers de grade API [8]

Les aciers HSLA (High straight lowalowy) [6] sont les matériaux des pipelines modernes, car ils possèdent de meilleures propriétés mécaniques que leurs prédécesseurs et ils sont moins coûteux que les aciers trempés revenus.

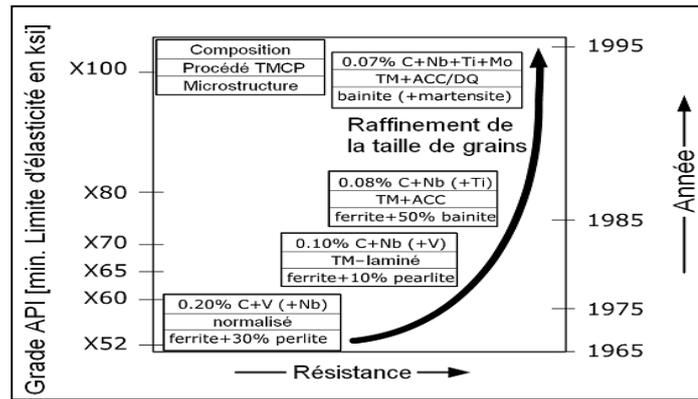


Figure I.1 : Développement des pipelines (composition, procédé TMCP, microstructure, API grade) [7]

L'amélioration des propriétés mécaniques de ces aciers est due à l'obtention d'une microstructure fine qui résulte de la mise au point de la composition chimique et du traitement thermomécanique (Figure I.1)

I.2. DIFFERENTS TYPES DES ACIERS HSLA

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçues pour fournir des combinaisons spécifiques désirées des propriétés telles que la limite d'élasticité, la dureté, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique. Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, quoique leurs propriétés désirées soient réalisées par l'utilisation de petites additions d'éléments d'alliage. Ils sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques augmentées obtenues par la petite addition judicieuse des éléments de microalliage et peut-être des techniques de traitement spéciales.

Les aciers HSLA peuvent être divisés en six catégories [4] :

I.2.1. Les aciers HSLA résistants à la corrosion

Ces aciers contiennent du cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement par solution solide et l'affinement du grain, ils étaient les premiers à être développés.

I.2.2. Les aciers perlitiques à structure laminés

L'addition de quantités modérées d'un ou plusieurs éléments autre que le carbone augmente les propriétés mécaniques ainsi que la soudabilité de ces aciers.

I.2.3. Les aciers de ferrite aciculaire

Une autre approche au développement des aciers HSLA est d'obtenir une microstructure de ferrite aciculaire très fine et de haute résistance, au lieu de la microstructure polygonale habituelle de ferrite, pendant la transformation de refroidissement des aciers à ultra bas carbone ($< 0.08\% \text{ C}$) avec la trempabilité suffisante (par des additions de manganèse, de molybdène, et/ou de bore). Le niobium peut également être employé pour le durcissement par précipitation et l'affinement de grain. La différence principale entre la structure de la ferrite aciculaire (désignée également sous le nom de la bainite à faible teneur en carbone) et celle de la ferrite polygonale est que l'ancien est caractérisé par une densité de dislocation élevée, et les grains fins fortement ovales qui ne sont pas exhibés en ferrite polygonale.

I.2.4. Les aciers à double phase (dual phase)

Ces aciers ont une microstructure de ferrite polygonale (de 80 à 90%) et des îles de martensite de 10 à 20% dispersées dans toute la matrice de ferrite. Le terme de dual phase se rapporte à la prédominance dans la microstructure de deux phases, la ferrite et la martensite. Ces aciers ont une basse limite d'élasticité et une résistance à la traction approximativement de 550 MPa.

I.2.5. Les aciers de forme d'inclusion contrôlé

Un développement important dans les aciers HSLA microalliés est l'utilisation du contrôle de la forme d'inclusion. Les inclusions de sulfure, qui sont plastique aux températures de laminage et ainsi s'allongent et aplatissent pendant le laminage, affectent défavorablement la ductilité dans (par l'épaisseur) la direction transversale courte. L'objectif principal du contrôle de la forme d'inclusion est de produire des inclusions de sulfure avec la plasticité négligeable même aux températures de laminage les plus élevées.

I.2.6. Les aciers micro alliés ferrito-perlitique

Ces aciers emploient des additions des éléments de microalliage tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la limite d'élasticité d'acier laminé à chaud sans teneur élevée de carbone et/ou de manganèse. Les propriétés des matériaux structuraux ont résulté de la découverte qu'une très petite quantité de niobium et de vanadium ($< 0.10\%$) renforcent les aciers de carbone-manganèse sans interférer le traitement suivant. La teneur de carbone a pu être réduite ainsi pour améliorer la soudabilité et la dureté parce que les effets de durcissement

Du niobium et du vanadium ont compensé la réduction de la dureté en raison de la réduction du taux de carbone.

Le développement des procédés de laminage couplés à la composition chimique a produit la limite d'élasticité élevée accompagnés d'un abaissement progressif du taux de carbone. Beaucoup de la classe des aciers HSLA microalliés ont le contenu de carbone bas que 0.06% ou même s'abaisse, pourtant peut encore développer des limites d'élasticité de 485 MPa. La haute limite élastique est réalisée par les effets combinés de la taille des grains fins développés pendant le laminage à chaud et de la précipitation durcissant cela est dû à la présence du vanadium, du niobium, et du titane.

Ces aciers peuvent également inclure d'autres éléments pour la résistance à la corrosion et le durcissement de la solution solide, ou augmenter la trempabilité (si des produits de transformation autres que la ferrite-perlite sont désirés).

I.3. EFFET DES ÉLÉMENTS D'ADITION

I.3.1. Éléments microalliage

La teneur limite qui distingue les aciers microalliés des aciers faiblement alliés se situe aux environs de 0,1 % C [9].

Dans le cas des aciers faiblement alliés, pour une teneur inférieure à 0,1 % C les effets des éléments métalliques en solution solide homogène sont considérés comme très faibles. Dans le cas du microalliage, la formation de composés très fins et très nombreux modifie considérablement les microstructures et les propriétés.

Les éléments principaux de microalliage sont :

- le titane.
- le niobium.
- le vanadium.

Le mode d'action des trois éléments retenus passe par les phénomènes de précipitation, mais avec des interactions avec les phénomènes métallurgiques de transformation de phase, de recristallisation après écrouissage à chaud ou à froid et de blocage des mouvements des joints de grain ou des dislocations [9].

I.3.2. Composés : carbures, nitrures, oxydes

Les composés formés par les éléments de microalliage sont de plusieurs types:

- des précipités qui se forment en phase solide .
- des composés qui se forment au moment de la solidification, Il est donc nécessaire de distinguer deux classes :
- Les précipités proprement dits qui peuvent être redissous en phase solide à haute température : carbures, carbonitrures, certains nitrures ;
- Les précipités pratiquement insolubles : oxydes, oxysulfures, oxy carbosulfures, TiN, etc.

Le microalliage le plus important actuellement est celui des aciers avec précipités formés à l'état solide qui sont des carbures, des nitrures ou des carbonitrures qui peuvent être dissous par réchauffage. Les principaux précipités formés à partir des trois éléments de base sont les suivants:

- pour le vanadium, les carbures VC et les nitrures VN.
- pour le niobium, il s'agit du carbonitride Nb C_xN_y .
- pour le titane, il s'agit du carbure TiC, dans une certaine mesure de TiN, et, dans certains cas, de carbonitride (TiCN).

Tous ces précipités sont caractérisés par leur nature, leur maille et leur répartition; ils sont en général de structure cubique avec des paramètres de maille assez voisins, de l'ordre de 0,4 à 0,5 nm. Des structures hexagonales sont parfois signalées.

Les précipités agissent sur :

- la taille de grain austénitique (grain γ) par épinglage des joints et par effet sur la recristallisation.
- l'état d'écroutissage de la matrice par un blocage de la recristallisation;
- la taille de grain ferritique (grain α) par freinage du grossissement et par le cumul des effets précédents ;
- la dureté de la matrice par un effet durcissant.

I.3.3. Précipitation

La précipitation des carbures, nitrures et carbonitrures peut avoir lieu dans quatre contextes différents:

- Dans le domaine austénitique au refroidissement s'il est suffisamment lent, et conformément aux conditions d'équilibre.
- Dans le domaine ferritique ou ferrito-perlitique au moment de la transformation de phase.
- Après un refroidissement suffisamment rapide, en évitant le domaine de précipitation, refroidissement suivi d'un revenu que la phase transformée soit de la ferrite, de la bainite ou de la martensite.
- Au cours d'un recuit de recristallisation de produits écrouis à froid, en général au moment du chauffage et à condition qu'une certaine proportion de l'élément soit restée en solution.

I.4. PROPRIETES DES ACIERS HSLA

L'effet global des éléments de microalliage sur les propriétés mécaniques est la somme de l'effet durcissant des précipités et des modifications de structure par suite des changements de la taille des grains ou d'autres sous-structures ; il est donc nécessaire, pour chaque propriété, de distinguer l'effet des précipités (durcissement, fragilisation...), l'effet induit sur la microstructure, comme l'affinement de grain, et l'effet indirect par d'éventuels changements de la composition de base de la nuance, comme une baisse de la teneur en carbone [4,9].

I.4.1. Durcissement

L'effet de durcissement par les précipités dépend de leur nature, de leur nombre et de leur taille (figure I.2).

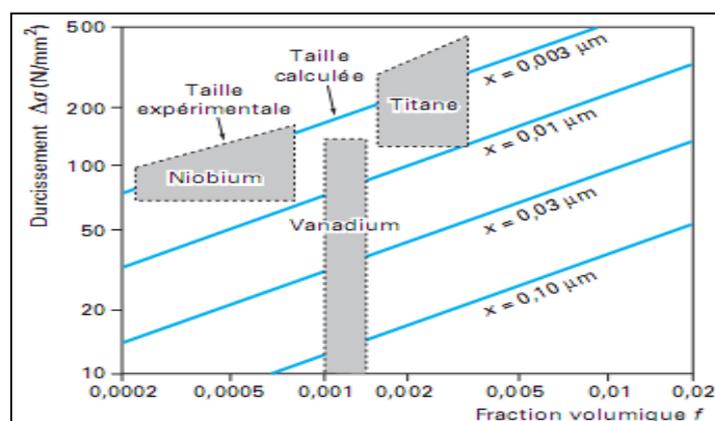


Figure I.2 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités [6]

On constate que la nature du précipité joue un rôle en plus de l'effet de taille. Les précipités des divers éléments Nb, Ti, V sont indépendants les uns des autres, leurs effets sont additifs du moins tant que le carbone (ou l'azote) est en quantité suffisante ; il est donc possible de faire des combinaisons à deux éléments ou même à trois dans certains cas.

I.5. SOUDABILITE DES HSLA

La soudabilité est une propriété complexe qui dépend beaucoup de la composition chimique de la nuance et, en particulier, de la teneur en carbone qui détermine la dureté de la martensite, qui se forme dans certaines conditions de soudage, et sa sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène. Il est donc très intéressant de pouvoir changer les caractéristiques grâce au microalliage, car cela permet d'abaisser la teneur en carbone et dans certains cas aussi les éléments d'alliage qui figurent dans les formules de carbone équivalent caractérisant la trempabilité des aciers en conditions de soudage. L'effet durcissant des éléments de microalliage est sans commune mesure avec leur faible effet sur la trempabilité des aciers (seul le vanadium figure dans certaines formules de carbone équivalent) : les aciers microalliés ont ainsi pris une grande place dans les aciers soudables. Cet abaissement de la teneur en carbone est très favorable pour la sensibilité à la fissuration à froid, mais aussi pour l'amélioration de la ténacité du métal de base ainsi que des zones affectées. La figure I.5 montre ainsi une comparaison entre une nuance classique et une nuance microalliée en utilisant un essai classique de fissuration par l'essai d'implant.

Néanmoins, l'effet durcissant et fragilisant des précipités peut se faire sentir dans les zones qui subissent des cycles thermiques à haute température telles que les zones affectées par la chaleur et le métal fondu.

I.6. LES ACIERS INOXYDABLES

Les aciers inoxydables jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : Industrie mécanique et pétrolière, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des 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.

L'inox a été découvert, dans les années 1890, par l'allemand Hans Goldschmidt qui développa les premières nuances d'aciers au chrome à bas carbone. Entre 1904 et 1909, divers chercheurs, notamment le français Léon Guillet, étudièrent et mirent aux points différents alliages Fe-Cr-Ni.

En 1911, l'allemand Philip Monnartz, mit en évidence l'influence de la teneur en chrome des alliages vis-à-vis de leur résistance à la corrosion [10].

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913. Un mérite analogue reviendrait aux allemands Benno Strauss et Eduard Maurer pour la production des aciers inoxydables austénitiques et aux américains Frederick Becket et Christian Dantsizen pour celle des aciers inoxydables ferritiques. La première description de la passivité des aciers inoxydables est attribuée à l'allemand Philipp Monnartz. Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard [10,12].

I.6.1. La formation de la couche inoxydable

La manière d'éviter la corrosion dans la couche superficielle des inox consiste à mettre une quantité importante de chrome (Cr) dans l'acier (plus de 10,5 % en masse) : le chrome réagit avec le dioxygène de l'air et forme une couche d'oxyde de chrome Cr_2O_3 : $4 Cr + 3 O_2 \rightarrow 2 Cr_2O_3$ Cette couche, compacte, adhérente et donc protectrice, est appelée « couche passive » : elle forme une barrière séparant l'acier de son milieu. En temps normal, elle est invisible car très fine. Ainsi, contrairement à son nom, l'acier n'est pas inoxydable : il s'oxyde rapidement, mais forme un oxyde protecteur, contrairement à la rouille [13].

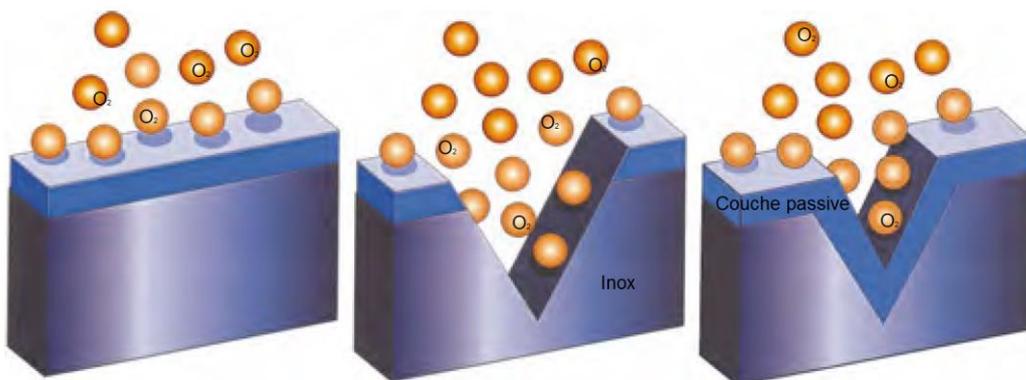


Figure I.3. Formation de la couche passive [13]

I.7. LES FAMILLES DES ACIERS INOXYDABLES

Les aciers inoxydables sont classés en quatre grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure cristallographique. On distingue les aciers ferritiques, les aciers martensitiques, les aciers austénitiques et les aciers austéno-ferritiques.

I.7.1. 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.7.2. 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 [14].

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 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.7.3. Aciers inoxydables austéno-ferritiques

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

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 inter granulaire et par piqûres doivent conduire à un plus large développement dans les années à venir [15].

I.7.4. 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).

Les aciers austénitiques trouvent de nombreuses applications du fait de leur exceptionnelle résistance à la corrosion, de leur aspect et de leur résistance mécanique : matériel ferroviaire, chaudronnerie, décoration, éviers profonds, matériel sanitaire, matériel de cuisson, échangeurs, nucléaire, etc. [15].

I.8.ROLES DES ELEMENTS D'ADDITION

I.8.1. Le chrome

C'est l'élément qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion. Conformément à la norme européenne EN 10088-1[16], un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

I.8.2. Le carbone

Dans les aciers inoxydables, la teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures [17] (notamment de carbures de chrome qui est un composé chimique très stable avide de chrome) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure Cr₂₃C₆ qui peut apparaître dans l'austénite a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion inter granulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'in oxydabilité par captation du chrome) [18].

I.8.3. 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.

I.8.4. 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 [12].

I.8.5. 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.

I.8.6. Le tungstène

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

I.8.7. Le titane

Il doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération de 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.

I.8.8. 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.

I.8.9. 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 [16]).

I.9.DOMAINES D'UTILISATION DES ACIERS AUSTENITIQUES

I.9.1 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 de l'ordre de 2,0 % (X2CrNiMo17-12-2) voire de 3,5 % (X2CrNiMoN18-15-4) [12].

A ces considérations de résistance à la corrosion, il faut ajouter qu'il est absolument nécessaire que les matériaux mis en œuvre possèdent une bonne soudabilité opératoire ainsi qu'une bonne soudabilité métallurgique.

I.9.2 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 [12].

I.9.3 Industrie automobile

Il s'agit du système d'échappement, de décoration, d'organes de la sécurité et d'éléments de structure. Dans la ligne d'échappement d'une voiture automobile, la nuance ferritique ASTM A554/A268 reste majoritaire. Pour des considérations d'esthétique relatives à des parties visibles et éviter la prise d'une patine [12].

Aussi bien pour la partie froide de la ligne d'échappement (c'est à-dire la zone du silencieux) soumise à l'agression de condensats acides que pour la partie chaude (c'est-à-dire celle proche du catalyseur et celle voisine du bloc moteur), on utilisera des nuances à 17 % de chrome stabilisés au titane et /ou au niobium.

Pour la partie chaude, les résistances à l'oxydation, au fluage et à la fatigue thermique peuvent imposer l'utilisation d'alliages austénitiques réfractaires du type X18CrNiSi20-12 ou X12CrNi23-13.

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[12] .

Certains éléments de structures sont maintenant réalisés en acier inoxydable. Grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées, l'Etat écroui, c'est la nuance X2CrNi18-7 qui est recommandée.

Il existe dès à présent des applications portant sur des réalisations tubulaires complètes appelées « cage d'oiseau » (spaceframe, en anglais). Elles concernent aussi bien des voitures particulières que des véhicules de loisir.

I.9.4 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 écrouie, d'autre part, une excellente soudabilité[12].

Pour les wagons mais également pour les ossatures des conteneurs, on utilise une nuance à 12% de chrome (X2CrNi12) dont la limite d'élasticité est supérieure à 320 N/mm², dont le peinturages facile et qui de plus présente une bonne soudabilité.

Qu'il s'agisse des conteneurs citernes ou des citernes routières, compte tenu de la variété des produits transportés, on utilise essentiellement des nuances austénitiques au molybdène : (X2CrNiMo17-12-2 ou X6CrNiMoTi17-12-2).

Quant à l'intérieur des conteneurs frigorifiques, il est réalisé à partir de tôles fines en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10.

I.9.5 Tubes

Pour les tubes destinés au transport de fluides appelés aussi tubes corrosion, la nuance la plus utilisée est l'austénitique X2CrNi18-9. Pour les milieux plus agressifs, on utilisera la nuance austénitique X2CrNiMo17-12-2.

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.

Si le traitement d'hypertrempe est réalisé sous atmosphère neutre ou légèrement réductrice, l'opération de décapage étant inutile, seule sera effectuée l'opération de passivation.

Pour les tubes destinés à la décoration, on utilise surtout la nuance X5CrNi18-10.

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'effectuer les traitements décrits précédemment (hypertrempe, décapage, passivation) mais l'extérieur du tube sera poli « en ligne » dans le sens travers, à l'aide de bandes abrasives oscillantes.

La soudure longitudinale est en général polie dans le sens long par une bande abrasive.

Il existe une dernière catégorie de tubes destinés à équiper des échangeurs de chaleur (condenseurs, réchauffeurs, évaporateurs, etc.). Compte tenu du fait que la conductivité thermique des nuances ferritiques est 1,7 fois plus élevée que celle des austénitiques, on les préférera à ces dernières. Les deux alliages les plus utilisés sont le X3CrTi17 et le X2CrMoTi29-4 pour les échangeurs fonctionnant à l'eau de mer [11].

I.10. DIAGRAMMES DE PHASES

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02% à 1% selon les nuances. Bien qu'un certain nombre d'autres éléments d'addition soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases.

Remarquant que certains éléments d'alliages ont un effet alpha gène, C-A-D : qu'ils favorisent la formation d'une structure cristallographique cubique centrée comme le Cr Mo, Si, Ti, Nb, V, W, A, et que d'autres ont un effet gamma gène, C-A-D qu'ils favorisent la formation d'une structure cristallographique cubique à faces centrées comme le Ni, C, Co, Mn, Cu.

Les diagrammes d'équilibre peuvent être utilisés pour décrire les transformations déphases et leurs stabilités dans les aciers inoxydables.

I.10.1 Système Fe-Cr

Le fer pur existe sous deux variétés cristallographiques dont la nature et le domaine d'existence sont résumés ci-après :

- A température ambiante, la structure est cubique centré, le fer se trouve sous sa forme ferritique α , il est alors magnétique.
- A 912°C, il subit une première transformation allotropique, et jusqu'à 1394°C, il se trouve sous sa forme austénitique γ , de structure cubique à faces centrées, amagnétique.
- Au-delà de 1394°C, il retrouve une structure identique à celle de l'ambiante, c'est la ferrite δ , magnétique.

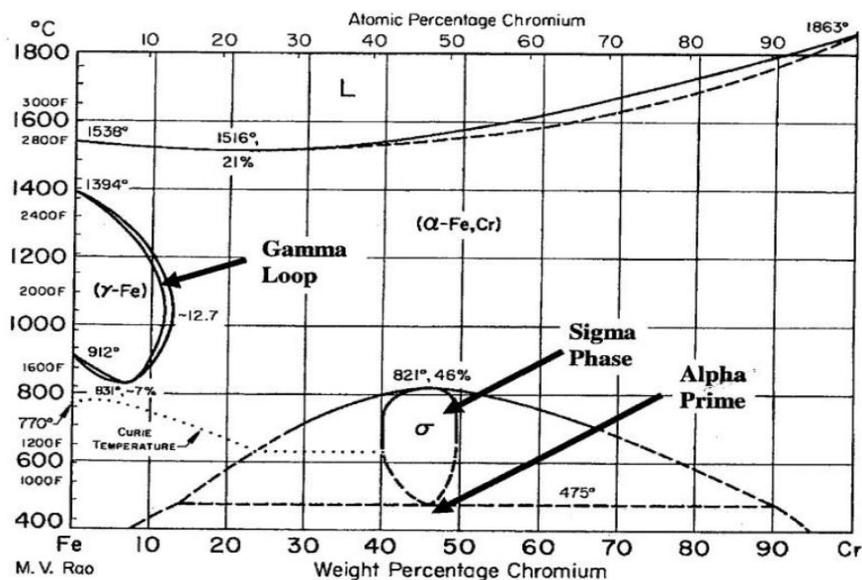


Figure I.4. Diagramme d'équilibre Fe-Cr [17].

Etant donné que le chrome est le principal élément d'alliage, la figure I.2 ci-dessus représentera le point de départ de l'étude de la stabilité de phases des aciers inoxydables. On remarque

- la solubilité complète du chrome dans le fer aux températures élevées et que tous les alliages Fe-Cr se solidifient sous forme de ferrite.
- Aux faibles teneurs en chrome, il y a formation de la « boucle γ » dans l'intervalle de température 912 – 1394°C
 - % Cr > 12,7 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est supérieure à 12,7% sont ferritiques aux températures élevées.
 - % Cr < 12 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est inférieure à 12% sont austénitiques aux températures comprises dans la boucle γ .
 - 12 < % Cr < 12,7 : dans ce cas, les deux phases α et γ coexistent [17].

I.10.2 La boucle γ

Quand la teneur en Cr atteint à peu près 12%, la ferrite est complètement stable de la température ambiante jusqu'au point de fusion, ce qui engendre en contrepartie un rétrécissement du domaine austénitique produisant ainsi la « boucle γ ». (La figure I.5) ci-dessous montre que d'autres éléments stabilisateurs de la ferrite comme le vanadium ou le molybdène agissent de la même manière que le chrome lorsqu'il est allié au fer donnant ainsi des boucles gamma (γ) [18].

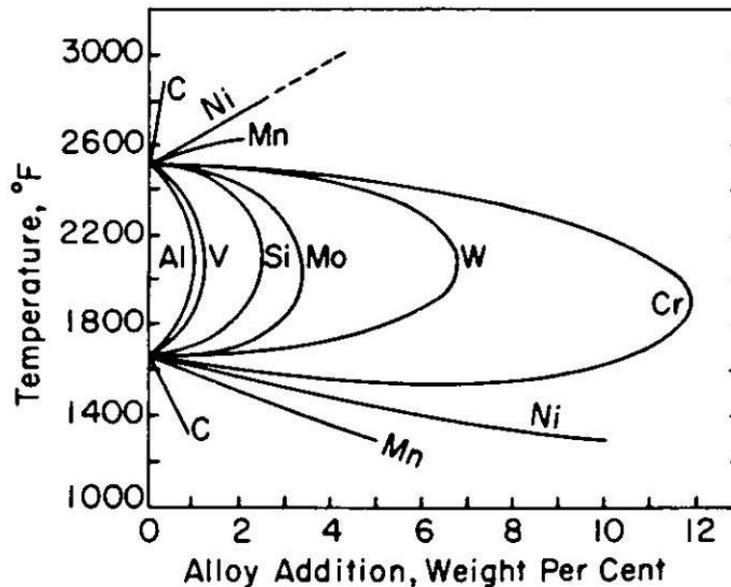


Figure I.5. Boucles gamma formées dans les divers systèmes binaires du fer [18].

I.10.3. Les phases « σ » et « α' »

Dans (la figure I.5) là où est mentionné « σ » (au centre en bas) la structure cristalline n'est pas cubique centrée comme pour la ferrite, mais elle est tétragonale, elle s'avère être très fragile, par conséquent, cette phase sigma est à éviter. Sa formation est un problème dans les traitements thermiques des aciers inoxydables qui ont une forte teneur en chrome.

On note aussi la présence d'une ligne discontinue à 475°C d'où l'appellation du phénomène « fragilisation à 475°C » qui est due à la formation d'un riche précipité en chrome dans la matrice α appelé alpha prime (α'), ce dernier engendre des fragilisations sévères dans les alliages qui contiennent plus de 14% de chrome [17,12].

I.10.4. Système Fe-Cr-Ni

En effectuant des coupes dans le diagramme ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en fer (50%, 60%, 70%, 80% et 90%) on obtient des diagrammes pseudo-binaires comme le montre (la figure I.6) ci-dessous, à partir de laquelle en déduit que :

- Les alliages riches en chrome se solidifient en ferrite
- Les alliages riches en nickel se solidifient en austénite
- Cependant, de nombreux alliages Fe-Cr-Ni se solidifient en deux phases, ferrite et austénite. Pendant la solidification de ces alliages, le liquide coexiste avec la ferrite et l'austénite [18].

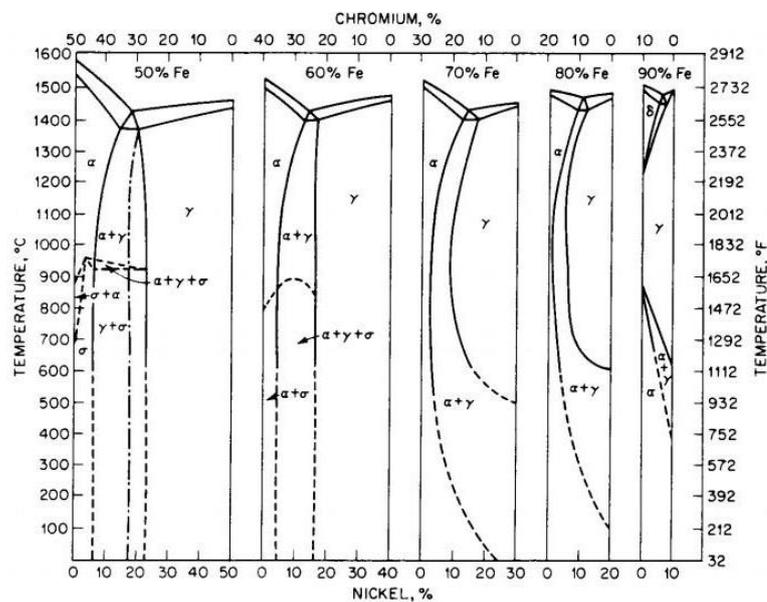


Figure I.6 : Coupes pseudo binaires du diagramme d'équilibre ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en Fe [18].

II.1. DEFINITION DE SOUDAGE

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs composants métalliques, il entre en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels que: Le vissage, sertissage, le rivetage, car c'est le seul procédé qui procure une assez appréciable continuité mécanique, physique et surtout métallurgique entre les pièces assemblées, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du métal de base.

II.2. PROCEDES DE SOUDAGE PAR FUSION

Réalisés généralement par une fusion des métaux à joindre qui provoque la formation d'un alliage comme dans le cas des métaux dissemblables ou de l'utilisation d'un métal d'apport de composition voisine ou différente de celle du métal de base (cas du soudage chalumeau, à l'arc...). La grande variété des procédés de soudage existants peut être également classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (figure II.1) [19].

Par ailleurs, les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (figure II.2). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

Les procédés de soudage par fusion les plus répandus pour l'assemblage sont le soudage à l'arc avec électrode de tungstène (procédé TIG), le soudage MIG, le soudage plasma, le soudage par faisceau d'électrons et le soudage par faisceau laser.

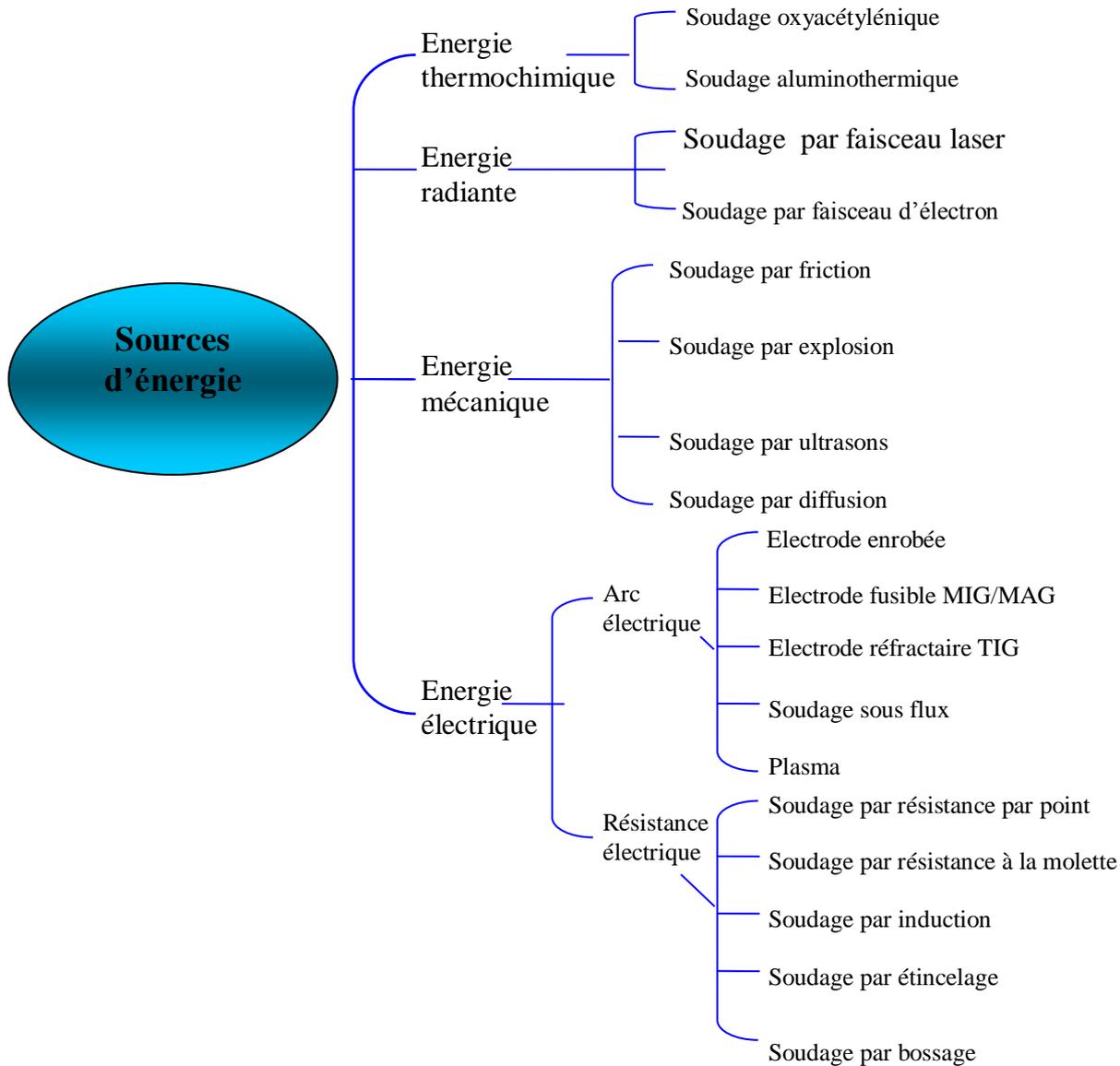


Figure .II.1 : Procédés de soudage classés selon les sources d'énergie [19]

Les procédés de soudage par fusion les plus répandus pour l'assemblage sont le soudage à l'arc avec électrode de tungstène (procédé TIG), le soudage MIG, le soudage plasma, le soudage par faisceau d'électrons et le soudage par faisceau laser.

Dans notre travail, on ne s'intéresse qu'au procédé mettant en jeu un arc électrique.

II.3. SOUDAGE A L'ARC

Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode).

Dans un processus de soudage, le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion. Dans le soudage à l'arc l'apport de la chaleur utilisé pour former le bain de métal fondu est assuré ici par un arc électrique, et la liaison a bien lieu par solidification du métal fondu sur le métal de base, soit sans métal d'apport soit sur tout avec métal d'apport [20, 21]. L'arc doit pouvoir s'amorcer facilement et, ensuite, rester stable. Pour faciliter son amorçage aussi bien que pour le stabiliser, on a recours à des éléments chimique facilement ionisables qui sont introduits dans le plasma d'arc. Ces éléments peuvent provenir les composés fusibles et volatils inclus dans les produits solides qui formeront le laitier ou des gaz distribués pour protéger le métal fondu [20,21].

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage [21].

Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder, comme l'illustre (la figureII.2). Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant [21].

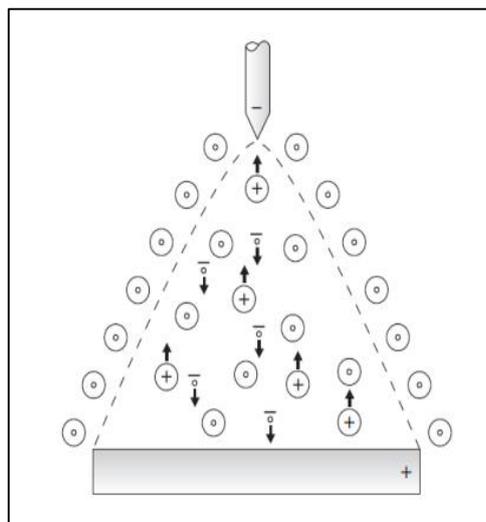


Figure II.2 : Principe d'un arc électrique [21]

II.4. PRINCIPES DU SOUDAGE TIG

Le soudage sous gaz avec électrode de tungstène requiert l'usage d'une source à courant constant, un gaz ou un mélange de gaz inerte, un équipement de distribution du gaz, une torche et, au besoin, un métal d'apport.

De nombreux électrons se déplacent du pôle négatif vers le pôle positif par fraction de secondes.

En tamponnant tout sur leur passage, ces électrons se déplaçant à très haute vitesse, génèrent un arc extrêmement chaud capable de fondre n'importe quel métal ou alliages de métaux. AC ou DC (+ or -), généralement le soudage TIG peut s'effectuer avec la torche branchée en polarité directe DC.

On peut utiliser le courant continu (C.C) ou le courant alternatif (C.A). Les deux polarités du C.C la polarité directe (CCPD) et la polarité inverse (CCPI), peuvent également être utilisées. Lors du soudage TIG en polarité directe (CCPD), environ 70 % de la chaleur générée se retrouve sur la pièce à souder, alors que 30 % de la chaleur demeure sur l'électrode. En CCPI, pour courant continu en polarité inversée, approximativement 70 % de la chaleur produite se retrouve sur l'électrode, tandis que

30 % de celle-ci atteint la pièce à souder. (La figure II.3) montre la circulation des électrons, la distribution de la chaleur et le profil de pénétration obtenus avec les polarités CCPD, CCPI et en c.a. La polarité directe (CCPD) produit la meilleure pénétration, tandis que la polarité inverse CCPI produit une pénétration plus réduite mais offre une meilleure action de nettoyage. Lorsque la polarité inverse (CCPI) est utilisée en soudage TIG, il faut utiliser un diamètre d'électrode plus grand qu'en soudage en polarité directe (CCPD).

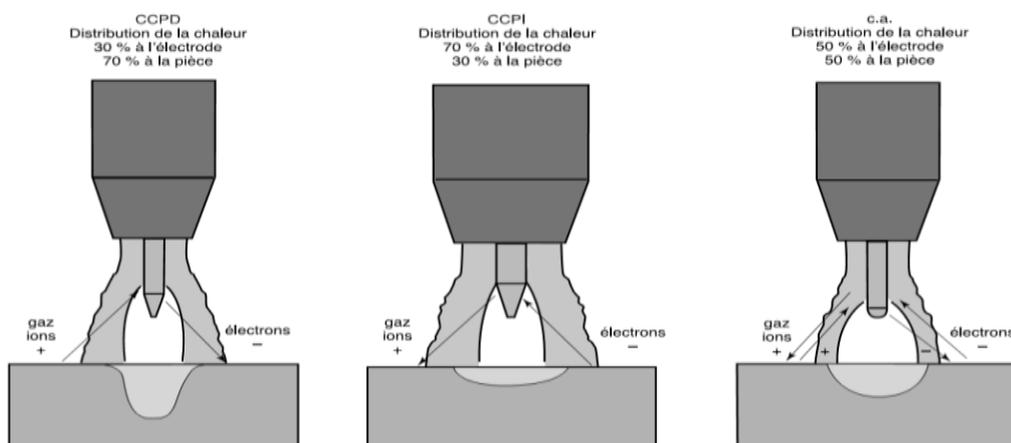


Figure II.3 : Distribution approximative de la chaleur lors du soudage TIG selon les polarités CCPD, CCPI et C.A

Notez qu'une électrode de plus grand diamètre est requise pour le soudage en CCPI et que la profondeur de pénétration est supérieure avec la polarité CCPD.

Le métal d'apport peut être ajouté au bain de fusion de façon manuelle ou automatique. Lors du soudage TIG manuel avec addition de métal d'apport, la baguette de métal est tenue dans une main et la torche dans l'autre.

L'extrémité de la baguette d'apport doit être constamment tenue à proximité de l'arc pour deux raisons :

- Pour préchauffer le métal d'apport.
- Pour garder l'extrémité de la baguette sous la protection gazeuse de la torche. [22]

II.5. LES PARAMETRES TIG

II.5.1. Gaz inerte

Le procédé TIG exige un gaz inerte afin de protéger le bain de soudage et l'électrode. Il faut éviter l'oxydation du métal et de l'électrode réfractaire par l'air ambiant.

II.5.2. Produit d'apport

Pour les épaisseurs fines, il est possible de souder sans apport de métal.

Les épaisseurs $\geq 1,5$ mm un apport de métal est indispensable. La nuance du métal d'apport et son diamètre sont à étudier en fonction de la nature du métal de base et de son épaisseur

Le métal d'apport est amené au bord du bain comme montré sur la figure et il ne doit pas venir en contact avec la pointe de l'électrode, ni traverser l'arc.

D'autre part, la pointe du fil doit toujours rester près du bain de métal. Ceci permet de la conserver dans l'atmosphère protectrice du gaz argon qui protège également le bain et l'électrode de l'oxydation de la surface [20].

II.5.3. La nature des électrodes au tungstène

D'une façon générale, les électrodes utilisées en soudage TIG sont fabriquées à partir de :

- Tungstène pur
- Tungstène allié au thorium
- Tungstènes alliées au cérium
- Tungstène alliées au lanthane

II.5.4. Intensité de courant

(Le tableau II.1) Courant de soudage nécessaire pour chaque mm d'épaisseur selon le matériau

Nature du métal	Type de courant de soudage	courant de soudage en A
Aluminium	AC	40–50 A
Magnésium	AC	40–45 A
Cuivre	DC	75–80 A
Acier faiblement allié	DC	30–60 A

Tableau II.1 : Courants de soudage optimaux

II.6. TENUE MECANIQUE D'UN JOINT SOUDE

Les modifications métallurgiques influent sur la tenue mécanique du joint soudé. Aussi faut-il s'assurer d'obtenir une tenue mécanique suffisante, et tenir compte des soudures dans le calcul et le dimensionnement des pièces.

L'opération de soudage engendre de plus la création de contraintes résiduelles dues au retrait créé par l'opération de soudage sur les pièces. La tenue à la fatigue des assemblages soudés est une problématique fondamentale dans la conception des appareils soudés. Les défauts géométriques des cordons de soudures jouent un grand rôle dans la tenue à la fatigue des assemblages soudés [24].

II.7. STRUCTURE D'UNE SOUDURE

L'opération de soudage est assimilable à une opération locale d'élaboration métallurgique. L'effet local du cycle thermique (fusion des métaux de base et d'apport) provoque une modification de la structure cristalline qui dépend à la fois de la composition chimique (pourcentage de carbone, de chrome, de silicium, ...) et de la vitesse de refroidissement, la soudure ainsi réalisée comporte plusieurs zones (Fig. II.6) [24] :

- La zone du métal de base :

Le métal n'a pas été porté à une température suffisante pour subir une transformation de structure. L'opération de soudage n'a aucune conséquence métallurgique sur cette zone.

- La zone affectée thermiquement :

ZAT, ($T^{\circ} > A_{c3}$) se trouve en bordure de la zone fondue, sur une largeur plus ou moins importante, la ZAT a été soumise à l'élévation de température sans être portée à fusion, la vitesse de refroidissement conditionne la structure cristalline de cette zone [25].

- Zones fondues
- La zone de liaison

Partie du métal de base participant à la réalisation du joint. Son volume détermine le taux de dilution.

- La zone fondue :

Zone de remplissage dont la section dépend directement de la nature du chanfrein et de l'épaisseur à souder.

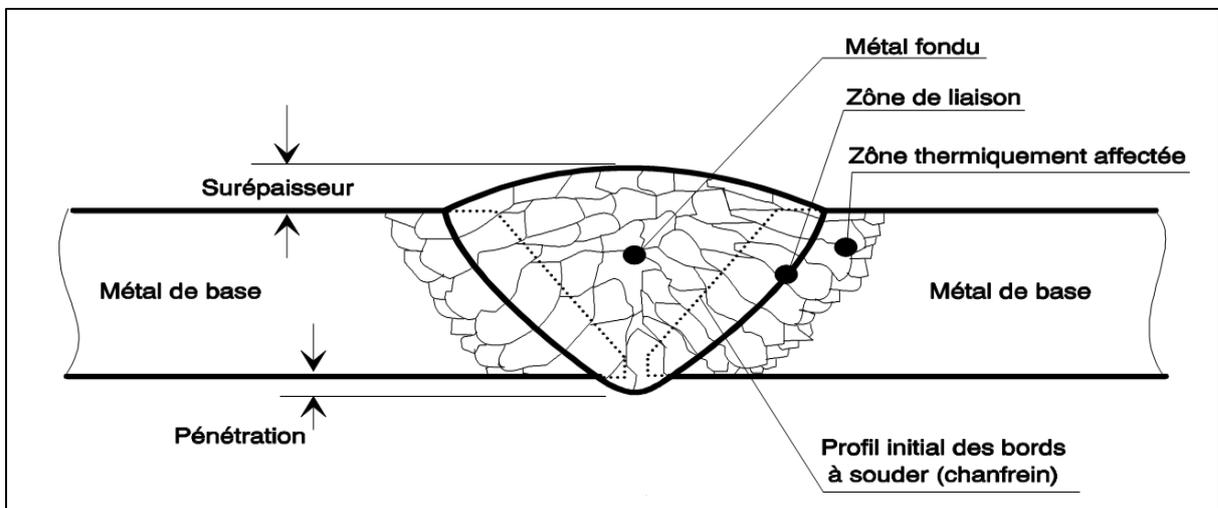


Figure II.4 : Structure d'une soudure [26]

II.8.CHOIX DES MATERIAUX A SOUDER

II.8.1. Choix du métal de base

Le choix du métal de base n'est abordé ici que sous le seul aspect de la soudabilité; il ne s'agit donc pas du choix de la nuance de l'acier qui est fait par le bureau d'étude, lors du dimensionnement de la construction. Les méthodes, permettant de choisir le métal de base, ne prennent généralement en compte que le risque de rupture fragile, les autres aspects de la soudabilité étant supposés envisagés au cours de l'exécution des assemblages.

II.8.2. Choix du métal d'apport

Le métal d'apport doit être choisi de manière telle qu'il permette d'obtenir des joints présentant un maximum d'homogénéité, sur le plan des propriétés mécaniques, de la composition chimique et des structures métallurgiques. Il est cependant difficile d'obtenir une homogénéité complète, étant donné les différences d'élaboration du métal fondu et du métal de base : le métal fondu présente en effet les propriétés d'un métal brut de coulé tandis que les propriétés du métal de base dépendent des traitements mécaniques et éventuellement thermiques qu'il a subis.

II.8.3. Choix de diamètre

Généralement le diamètre des électrodes est choisi selon l'épaisseur des pièces soudées et de la position de soudage [27].

II.8.4. Choix du type de chanfrein

La qualité d'une soudure dépend fortement de la bonne pénétration du premier cordon qui est elle-même influencée par l'épaisseur du métal du chanfrein.

L'écartement des bords des chanfreins a également une influence sur la qualité du premier cordon déposé. Si cet écartement est trop petit, il risque de conduire à un manque de pénétration et d'augmenter le coût de la reprise à l'envers; par contre, s'il est trop grand, le cordon peut présenter des trous dus aux effondrements locaux du bain de fusion [27,23].

II.9. SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES

La diversité des applications des aciers inoxydables (et surtout les aciers inoxydables austénitiques) nécessitent l'utilisation de procédés de soudage très divers tels que les procédés de soudage à l'arc, les procédés de soudage à haute densité d'énergie et même des procédés de brasage.

La diversité des aciers inoxydables existants nécessite une bonne connaissance de leur soudabilité métallurgique afin de choisir le procédé de soudage le plus adapté. Les aciers inoxydables austénitiques peuvent poser des problèmes de fissurations à chaud, les aciers inoxydables ferritiques sont sensibles au grossissement de grains, les aciers austéno-ferritiques nécessitent certaines précautions de soudage, les aciers inoxydables à durcissement structural sont l'objet de pertes importantes de leurs caractéristiques mécaniques après soudage. Un choix adéquat des procédés et des procédures de soudage peut éviter des nombreux problèmes.

II.10. DIAGRAMME DE SCHAEFFLER

La composition chimique d'un cordon de soudure dépend des compositions chimiques des métaux d'apport et des métaux de base, ainsi que de la proportion de chacun de ces métaux. La structure cristalline dépend de la forme des cristaux dans le cordon de soudure, des conditions de refroidissement, d'un traitement thermique éventuel après soudage. Le diagramme de Schaeffler permet de choisir un métal d'apport et de garantir de bonnes qualités métallurgiques. Le diagramme de Schaeffler permet aussi de prévoir les risques métallurgiques pour l'assemblage. Il est présenté avec en abscisses l'équivalent Chrome (EqCr), et en ordonnées l'équivalent Nickel (EqNi).

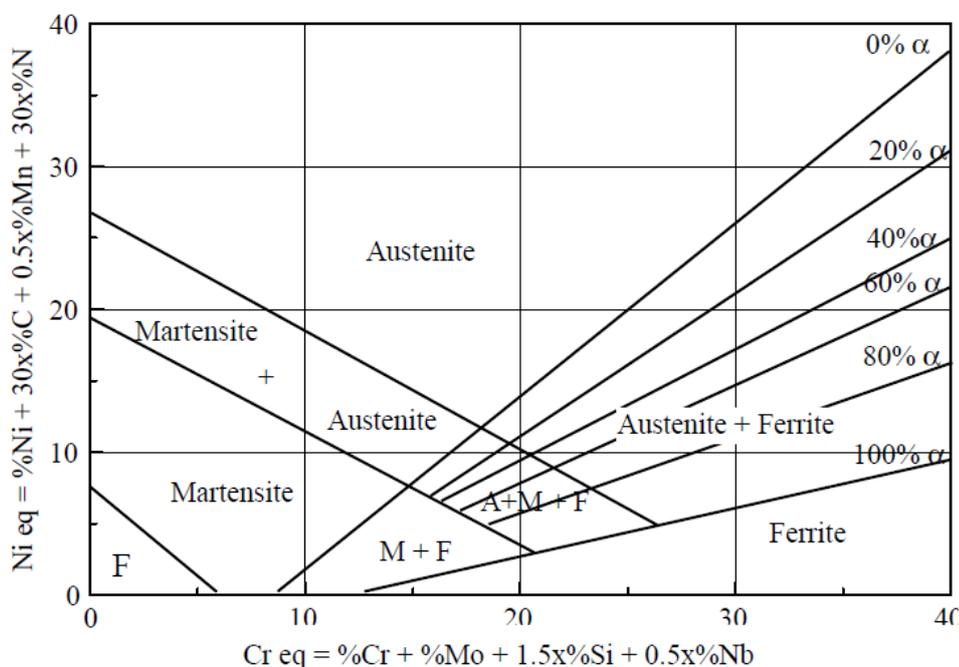


Figure II.5. Diagramme de Schaeffler [28]

Le diagramme de Schaeffer est divisé en 4 zones qui représentent les différentes structures rencontrées pour le soudage des aciers inoxydables.

Ces différentes structures sont :

- 1) La martensite (M)
- 2) L'austénite (A)
- 3) La ferrite (F)
- 4) L'austéno-ferrite (A+F)

C'est sur la base de la classification des éléments d'alliages en éléments alphagènes et gammagènes que Schaeffler a pu développer des formules par les quelles les éléments de chaque groupe peuvent être exprimés en tant qu'équivalents Cr ou Ni.

- Equivalent chrome : $\% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 (\% \text{Si}) + 0,5 (\% \text{Nb})$
- Equivalent nickel : $\% \text{Ni} + 30 (\% \text{C}) + 0,5 (\% \text{Mn}) + 0,3(\text{N})$

Les régions du diagramme représentent les microstructures qui peuvent être observées pour chaque classe d'aciers inoxydables. La méthode de Schaeffler permet cependant une évaluation sommaire de la microstructure comme fonction de la composition de l'acier, elle ne tient pas compte de l'influence de la vitesse de refroidissement et de la durée des traitements thermiques [29].

III.1 .INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure obtenus pour chaque nuance et chaque électrode.

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour estimer l'évolution des propriétés mécaniques pour différents soudeur.

III.2. LES MATERIAUX UTILISE

III.2.1. MATERIAUX DE BASE

Les aciers utilisés pour les conduites, se présente sous la forme des tôles, ils répondent aux critères de la spécification technique des aciers X70 et des aciers inoxydables 304L. Les compositions chimiques des deux nuances d'aciers sont représentées ci-dessous.

Elément	C	Si	Mn	S	Al	Cr	Mo
(%)	0.12	0.45	1.41	0.003	0.038	0.034	0.005

Tableau III.1 : Composition chimique de X70-grade A en % (en poids).

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
(%)	0.023	0.68	1.73	0.027	0.024	17.95	0.257	8.32	0.38

Tableau III.2 : Composition chimique de 304L en % (en poids).



Figure III.1: Matériaux de base utilisés (304L et HSLA-70).

III.2.2.Métaux d'apport

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique TIG en une seul passe avec 04 configuration : électrode duplex de type E2209, électrode austénitique de type 308L, électrode faiblement allié de type E7018 et sans électrode, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

Elément	C	Si	Mn	Cr	Ni
(%)	0.19	0.46	1.72	20.80	10.10

Tableau III.3 : Composition chimique du matériau d'apport inox (Er308L) (en poids).

Elément	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
(%)	0.03	0.46	0.9	22.5	9.3	2.8

Tableau III.4 : Composition chimique du matériau d'apport duplex (Er2209L) (en poids).

Elément	C	Si	Mn	Mo
(%)	0.12	0.80	0.90	0.5

Tableau III.5 : Composition chimique du matériau d'apport faiblement allié (E7018) (en poids).

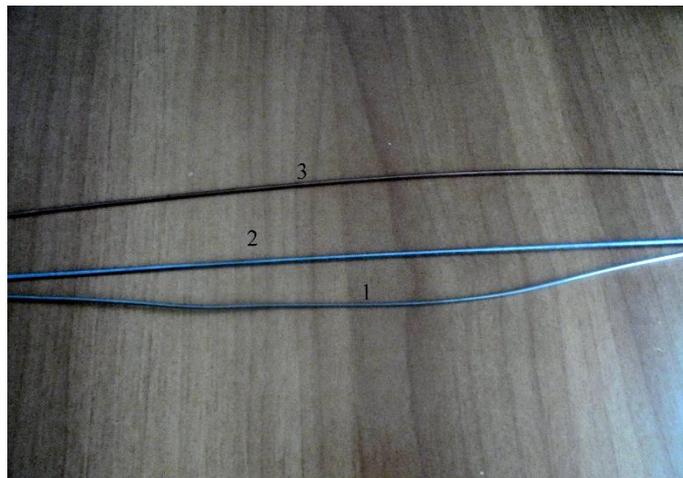


Figure III.2 : Métal d'apport utilisé (1 : E 308L) et (2 :2209) et (3 :E7018).

III.3. PROCEDURE DE SOUDAGE

III.3.1. Préparation des échantillons

Avant de passer par la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de préparation présente sous forme des tôles rectangle de largeur (8.3mm) et de longueur (115mm) et de (2 mm) d'épaisseur, après le soudage sans chan freinage [30] (fig III .3).



Figure III.3 : les pièces à assembler

III.3.2. Les paramètres de soudage

Les opérations de soudage sont réalisées au niveau de l'atelier de soudage au Centre de Recherche scientifique en Soudage et Contrôle (CSC) par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant donne les principaux paramètres de TIG utilisés pour les quartes configurations. L'électrode est consommée pour presque mêmes vitesses optimisées selon une seule passe. La source du courant continu et la vitesse d'avance du fil d'apport presque constants (tableau.III.6)

Electrode	Passe	Type de courant	Paramètres	
308L	01	CC	Tension (V)	11.50
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.53
			Début de gaz (L/min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	52
E2209	01	CC	Tension (V)	11.68
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.51
			Début de gaz (L /min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	53
E 7018	01	CC	Tension (V)	12.01
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.6
			Début de gaz (L /min)	10
			Diamètres de l'électrode	2
			Temps de soudage(s)	50
/	01	CC	Tension (V)	12.20
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.86
			Début de gaz (L/min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	43

Largeur de cordon soudure : 8cm

Tableau III.6 : Paramètres de soudage (TIG).

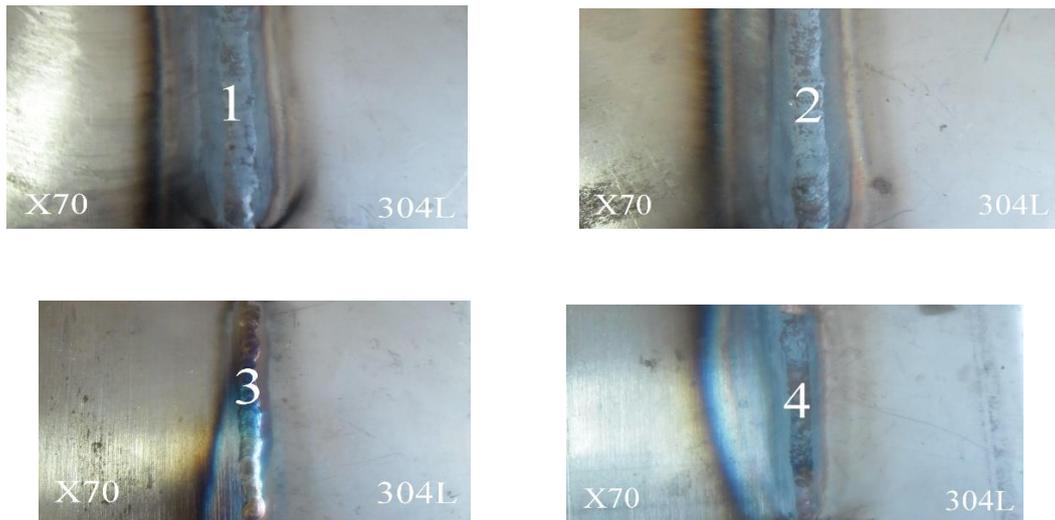


Figure III.4 : les plaques soudées.

(1 :E308L), (2 :E2209), (3 :E7018), (4 : sans métal d'apport) .

III.4. METALLOGRAPHIE OPTIQUE

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Dans ce qui, nous donnons le détail de chaque opération.

III.4.1. Découpage des échantillons

De chaque plaquette soudée nous avons prélevé une éprouvette



Figure III.5 : outil de découpage utilisé.

III.4.2. Enrobage

Les échantillons sont souvent enrobés dans des cylindres en plastique pour faciliter leur manipulation. Plusieurs résines sont disponibles pour cela, Chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Une résine phénolique simple est souvent employée quand la condition unique est de faciliter la manipulation.

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite pas de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester transparent versé dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.

III.4.3. Polissage

Emploie les particules abrasives qui ne sont pas fermement fixés mais sont suspendu dans un liquide parmi les fibres d'un tissu. L'objectif est de produire une surface lumineuse comme un miroir, généralement désignée sous le nom d'une surface polie.

Des étapes de polissage très accentuées utilisant des abrasifs de plus en plus fins, sont habituellement nécessaires.

La pâte diamantée, l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de magnésium (MgO) sont les abrasifs les plus généralement utilisés pour le polissage de finition.

Les échantillons ont subi un polissage mécanique effectué sur des papiers abrasifs de différentes granulométries d'ordre croissant de finisse (80,120, 220,300, 400, 600, 800,1000, 1200, 2400,4000) et puis une finition sur des feutres en utilisant une poudre d'Alumine.

L'expérience s'est déroulée au niveau de centre de recherche en soudage et contrôle (CSC), La polisseuse utilisée est représentée dans la figure. (Figure III.6).



Figure III.6: Polisseuse Struers.

III.4.4. Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance et à chaque matériaux d'apport utilisés ou procédés de soudage (E7018 et 304L), pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

Les deux réactifs chimiques utilisés pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol) et le (acier austénitique) est le (10 ml d'acide nitrique et 30ml Hcl et 30 gr glycérol)

Les échantillons furent immergés durant 30 à 40 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

III.4.5. Microscopie optique

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire de au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC).

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

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



Figure III.7: Microscope optique.

III.5. CARACTERISATION MECANQUES

- Microdureté
- Résilience
- Traction

III.5.1. Profils de microdureté Vickers

L'essai de microdureté des joints soudés est largement utilisé comme mesure rapide des propriétés mécaniques à travers les microstructures variables de la région soudée. Il permet de comparer la résistance des régions locales et différentes des microstructures, parce que la résistance est corrélée avec la dureté. La dureté a été principalement liée à la résistance à la traction plutôt qu'à la limite d'élasticité ou à la ductilité.

Les échantillons utilisés pour la métallographie sont adéquats pour mesurer la micro dureté car celles-ci exigent une préparation de la surface de l'échantillon et principalement la micro dureté qui requiert des coupes bien polies pour prendre des valeurs de zones bien précises de la ZAT et connaître le début et la fin de chaque zone durant les traversées de micro dureté [31].

Les essais de micro dureté sont effectués au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC) à moyen d'un microduromètre semi-automatique avec un pénétrateur Pyramide de diamant, placé entre deux lentilles de microscope. Le microduromètre est aussi équipé d'un afficheur des résultats d'essai avec la dureté équivalente. On a appliqué une charge de 300 grf pendant 20 secondes (HV 0.3/20) dans chaque point de mesure.



Figure III.8 : Microuromètre semi-automatique.

III.5.2. Essai de résilience

Les échantillons sont des barreaux à section carrée de 10 mm de côté et de 55 mm de long. L'entaille ayant la forme d'un V à 45°, rayon à fond d'entaille 0,25 mm, profondeur 2 mm, figure [34].

Pour chaque réparation on prélève quatre éprouvettes de résiliences, deux entre eux sont entaillées au centre du métal fondu, et les autres sont entaillées dans la zone à gros grains (CGHAZ) de la ZAT.

Les essais de résilience ont été effectués au niveau du laboratoire de au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC).

L'essai est réalisé par la chute d'un mouton-pendule qui percute l'éprouvette fixée sur deux appuis distants de 40 mm et le couteau du mouton-pendule vient frapper le côté opposé à l'entaille, dans la section médiane. Le centre dispose d'un appareil de modèle HOYTOM 750J/D2M qui peut mesurer des énergies d'impact allant jusqu'à 750J, avec une vitesse d'impact de 5.4 m/s. L'énergie consommée par la rupture de l'éprouvette se déduit de la lecture des angles de chute et de remontée du pendule. Elle est rapportée à la section à fond d'entaille pour calculer la résilience [31]. Avant l'exécution de l'essai les éprouvettes ont été refroidies à -60 °C pendant 30 minutes par l'utilisation de la neige carbonique.

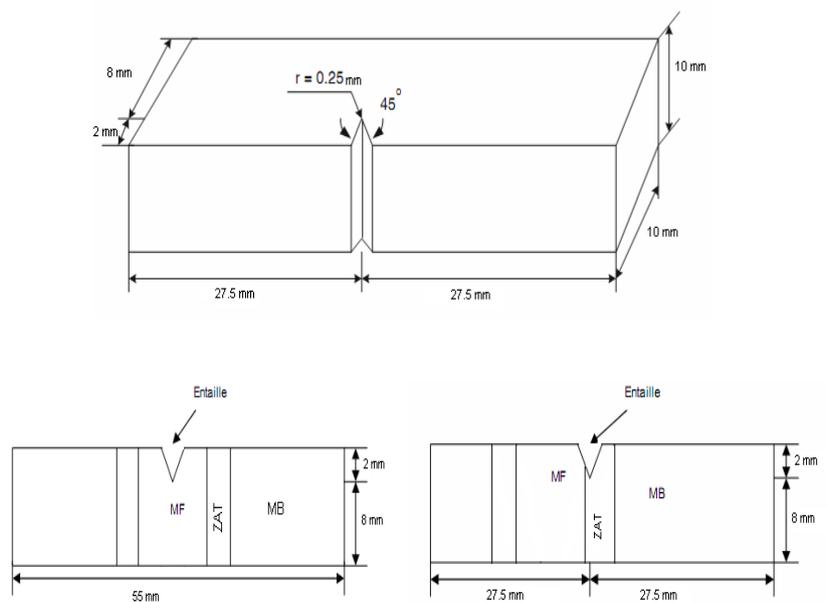


Figure III. 9 : Forme de l'éprouvette de résilience et la position de l'entaille.



Figure III.10: Mouton pendule ou mouton de Charpy.



Figure III.11 : les éprouvettes de résilience.

III.5.3. Essai de traction

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial, il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, l'allongement à la rupture, etc. nécessaires dans les calculs de structure.

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du Laboratoire des essais mécanique de CSC. Un montage approprié à la détermination de la loi de comportement en traction axiale nécessite des efforts (perpendiculaire à la soudure) et de mise au point des différents éléments composant ce montage (les mors, le réglage ...).

On dispose pour ces essais d'une machine de traction hydraulique de type « MAB » reliée à un logiciel approprié « bluehill 3 ». Dans notre expérience, on a utilisé des éprouvettes plate normalisée selon la norme ASTM (E8 : Standard test methods for tension testing of metallic materials). [33]



Figure III. 12 :Machine de traction Instron.

III.5.3.1. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes pour l'essai de traction 100mm de la longueur et 10mm de la largeur et 2mm d'épaisseur Elles été préparé à l'aide de la machine perceuse fraiseuse (figure III.13.).



Figure III.13 : perceuse fraiseuse utilisée (C.S.C Cherraga)

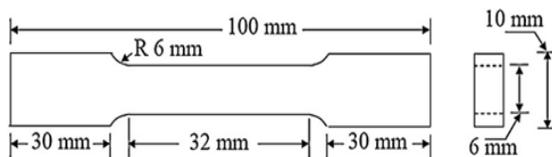


Figure III.14 : L'éprouvette de traction la norme ASTM (E8/E8M – 09) [33]

III.1 .INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure obtenus pour chaque nuance et chaque électrode.

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour estimer l'évolution des propriétés mécaniques pour différents soudeur.

III.2. LES MATERIAUX UTILISE

III.2.1. MATERIAUX DE BASE

Les aciers utilisés pour les conduites, se présente sous la forme des tôles, ils répondent aux critères de la spécification technique des aciers X70 et des aciers inoxydables 304L. Les compositions chimiques des deux nuances d'aciers sont représentées ci-dessous.

Elément	C	Si	Mn	S	Al	Cr	Mo
(%)	0.12	0.45	1.41	0.003	0.038	0.034	0.005

Tableau III.1 : Composition chimique de X70-grade A en % (en poids).

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
(%)	0.023	0.68	1.73	0.027	0.024	17.95	0.257	8.32	0.38

Tableau III.2 : Composition chimique de 304L en % (en poids).



Figure III.1: Matériaux de base utilisés (304L et HSLA-70).

III.2.2.Métaux d'apport

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique TIG en une seul passe avec 04 configuration : électrode duplex de type E2209, électrode austénitique de type 308L, électrode faiblement allié de type E7018 et sans électrode, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

Elément	C	Si	Mn	Cr	Ni
(%)	0.19	0.46	1.72	20.80	10.10

Tableau III.3 : Composition chimique du matériau d'apport inox (Er308L) (en poids).

Elément	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
(%)	0.03	0.46	0.9	22.5	9.3	2.8

Tableau III.4 : Composition chimique du matériau d'apport duplex (Er2209L) (en poids).

Elément	C	Si	Mn	Mo
(%)	0.12	0.80	0.90	0.5

Tableau III.5 : Composition chimique du matériau d'apport faiblement allié (E7018) (en poids).

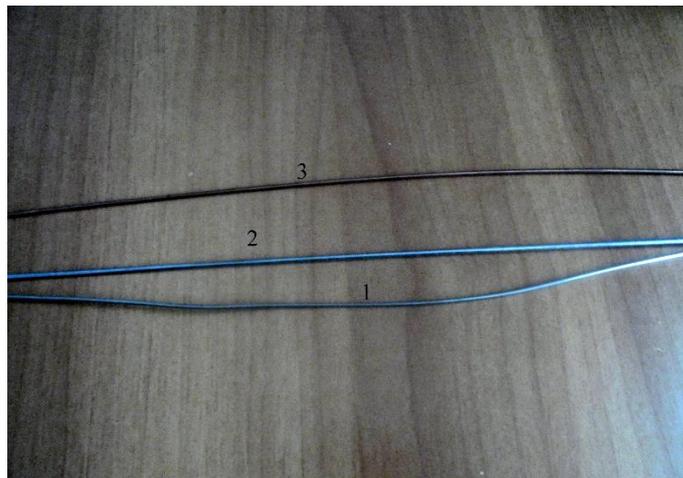


Figure III.2 : Métal d'apport utilisé (1 : E 308L) et (2 :2209) et (3 :E7018).

III.3. PROCEDURE DE SOUDAGE

III.3.1. Préparation des échantillons

Avant de passer par la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de préparation présente sous forme des tôles rectangle de largeur (8.3mm) et de longueur (115mm) et de (2 mm) d'épaisseur, après le soudage sans chan freinage [30] (fig III .3).



Figure III.3 : les pièces à assembler

III.3.2. Les paramètres de soudage

Les opérations de soudage sont réalisées au niveau de l'atelier de soudage au Centre de Recherche scientifique en Soudage et Contrôle (CSC) par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant donne les principaux paramètres de TIG utilisés pour les quartes configurations. L'électrode est consommée pour presque mêmes vitesses optimisées selon une seule passe. La source du courant continu et la vitesse d'avance du fil d'apport presque constants (tableau.III.6)

Electrode	Passe	Type de courant	Paramètres	
308L	01	CC	Tension (V)	11.50
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.53
			Début de gaz (L/min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	52
E2209	01	CC	Tension (V)	11.68
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.51
			Début de gaz (L /min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	53
E 7018	01	CC	Tension (V)	12.01
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.6
			Début de gaz (L /min)	10
			Diamètres de l'électrode	2
			Temps de soudage(s)	50
/	01	CC	Tension (V)	12.20
			Intension (A)	70
			Vitesse (mm/s)	1.86
			Début de gaz (L/min)	10
			Diamètres de l'électrode (mm)	2
			Temps de soudage(s)	43

Largeur de cordon soudure : 8cm

Tableau III.6 : Paramètres de soudage (TIG).

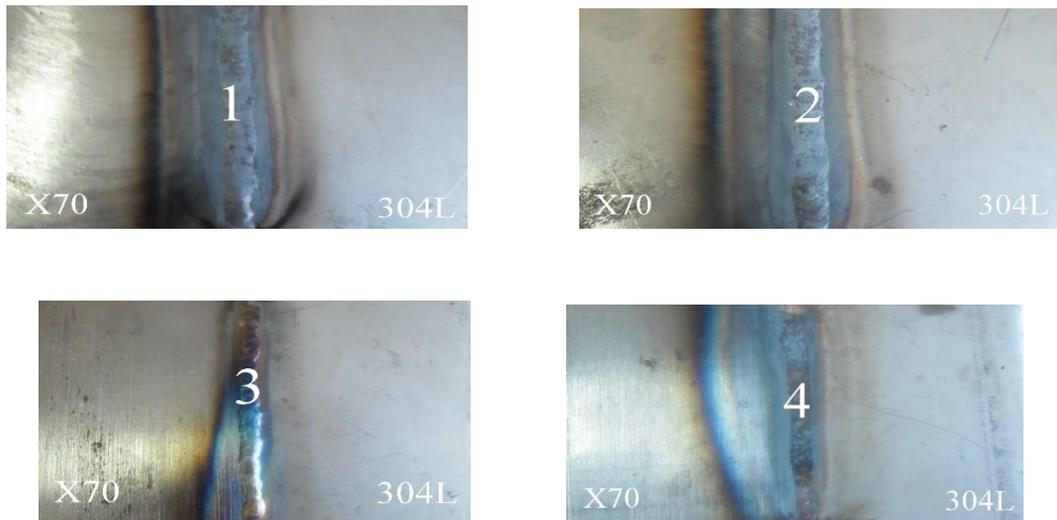


Figure III.4 : les plaques soudées.

(1 :E308L), (2 :E2209), (3 :E7018), (4 : sans métal d'apport) .

III.4. METALLOGRAPHIE OPTIQUE

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Dans ce qui, nous donnons le détail de chaque opération.

III.4.1. Découpage des échantillons

De chaque plaquette soudée nous avons prélevé une éprouvette



Figure III.5 : outil de découpage utilisé.

III.4.2. Enrobage

Les échantillons sont souvent enrobés dans des cylindres en plastique pour faciliter leur manipulation. Plusieurs résines sont disponibles pour cela, Chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Une résine phénolique simple est souvent employée quand la condition unique est de faciliter la manipulation.

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite pas de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester transparent versé dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.

III.4.3. Polissage

Emploie les particules abrasives qui ne sont pas fermement fixés mais sont suspendu dans un liquide parmi les fibres d'un tissu. L'objectif est de produire une surface lumineuse comme un miroir, généralement désignée sous le nom d'une surface polie.

Des étapes de polissage très accentuées utilisant des abrasifs de plus en plus fins, sont habituellement nécessaires.

La pâte diamantée, l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de magnésium (MgO) sont les abrasifs les plus généralement utilisés pour le polissage de finition.

Les échantillons ont subi un polissage mécanique effectué sur des papiers abrasifs de différentes granulométries d'ordre croissant de finisse (80,120, 220,300, 400, 600, 800,1000, 1200, 2400,4000) et puis une finition sur des feutres en utilisant une poudre d'Alumine.

L'expérience s'est déroulée au niveau de centre de recherche en soudage et contrôle (CSC), La polisseuse utilisée est représentée dans la figure. (Figure III.6).



Figure III.6: Polisseuse Struers.

III.4.4. Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance et à chaque matériaux d'apport utilisés ou procédés de soudage (E7018 et 304L), pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

Les deux réactifs chimiques utilisés pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol) et le (acier austénitique) est le (10 ml d'acide nitrique et 30ml Hcl et 30 gr glycérol)

Les échantillons furent immergés durant 30 à 40 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

III.4.5. Microscopie optique

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire de au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC).

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

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



Figure III.7: Microscope optique.

III.5. CARACTERISATION MECANIKES

- Microdureté
- Résilience
- Traction

III.5.1. Profils de microdureté Vickers

L'essai de microdureté des joints soudés est largement utilisé comme mesure rapide des propriétés mécaniques à travers les microstructures variables de la région soudée. Il permet de comparer la résistance des régions locales et différentes des microstructures, parce que la résistance est corrélée avec la dureté. La dureté a été principalement liée à la résistance à la traction plutôt qu'à la limite d'élasticité ou à la ductilité.

Les échantillons utilisés pour la métallographie sont adéquats pour mesurer la micro dureté car celles-ci exigent une préparation de la surface de l'échantillon et principalement la micro dureté qui requiert des coupes bien polies pour prendre des valeurs de zones bien précises de la ZAT et connaître le début et la fin de chaque zone durant les traversées de micro dureté [31].

Les essais de micro dureté sont effectués au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC) à moyen d'un microduromètre semi-automatique avec un pénétrateur Pyramide de diamant, placé entre deux lentilles de microscope. Le microduromètre est aussi équipé d'un afficheur des résultats d'essai avec la dureté équivalente. On a appliqué une charge de 300 grf pendant 20 secondes (HV 0.3/20) dans chaque point de mesure.



Figure III.8 : Microuromètre semi-automatique.

III.5.2. Essai de résilience

Les échantillons sont des barreaux à section carrée de 10 mm de côté et de 55 mm de long. L'entaille ayant la forme d'un V à 45°, rayon à fond d'entaille 0,25 mm, profondeur 2 mm, figure [34].

Pour chaque réparation on prélève quatre éprouvettes de résiliences, deux entre eux sont entaillées au centre du métal fondu, et les autres sont entaillées dans la zone à gros grains (CGHAZ) de la ZAT.

Les essais de résilience ont été effectués au niveau du laboratoire de au centre de recherche en soudage et Contrôle (CSC).

L'essai est réalisé par la chute d'un mouton-pendule qui percute l'éprouvette fixée sur deux appuis distants de 40 mm et le couteau du mouton-pendule vient frapper le côté opposé à l'entaille, dans la section médiane. Le centre dispose d'un appareil de modèle HOYTOM 750J/D2M qui peut mesurer des énergies d'impact allant jusqu'à 750J, avec une vitesse d'impact de 5.4 m/s. L'énergie consommée par la rupture de l'éprouvette se déduit de la lecture des angles de chute et de remontée du pendule. Elle est rapportée à la section à fond d'entaille pour calculer la résilience [31]. Avant l'exécution de l'essai les éprouvettes ont été refroidies à -60 °C pendant 30 minutes par l'utilisation de la neige carbonique.

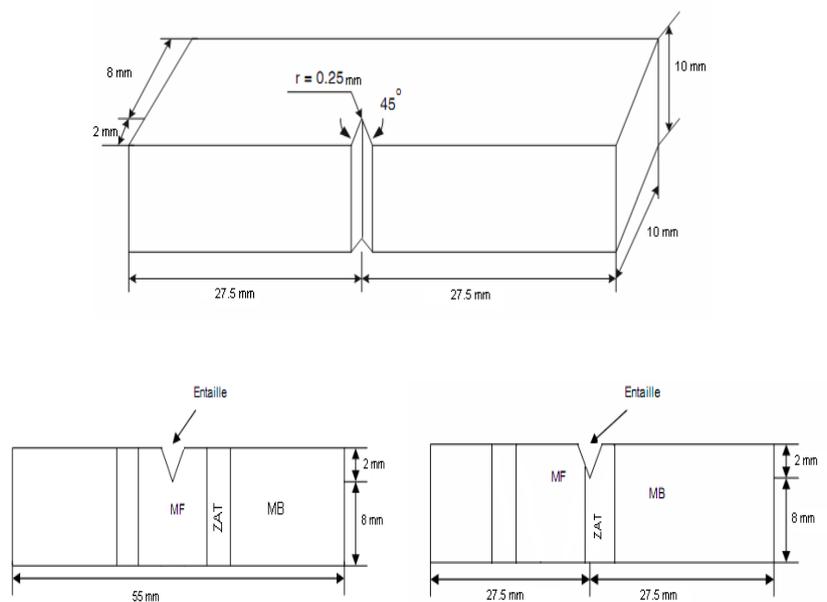


Figure III. 9 : Forme de l'éprouvette de résilience et la position de l'entaille.



Figure III.10: Mouton pendule ou mouton de Charpy.



Figure III.11 : les éprouvettes de résilience.

III.5.3. Essai de traction

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial, il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, l'allongement à la rupture, etc. nécessaires dans les calculs de structure.

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du Laboratoire des essais mécanique de CSC. Un montage approprié à la détermination de la loi de comportement en traction axiale nécessite des efforts (perpendiculaire à la soudure) et de mise au point des différents éléments composant ce montage (les mores, le réglage ...).

On dispose pour ces essais d'une machine de traction hydraulique de type « MAB » reliée à un logiciel approprié « bluehill 3 ». Dans notre expérience, on a utilisé des éprouvettes plate normalisée selon la norme ASTM (E8 : Standard test methods for tension testing of metallic materials). [33]



Figure III. 12 :Machine de traction Instron.

III.5.3.1. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes pour l'essai de traction 100mm de la longueur et 10mm de la largeur et 2mm d'épaisseur Elles été préparé à l'aide de la machine perceuse fraiseuse (figure III.13.).



Figure III.13 : perceuse fraiseuse utilisée (C.S.C Cherraga)

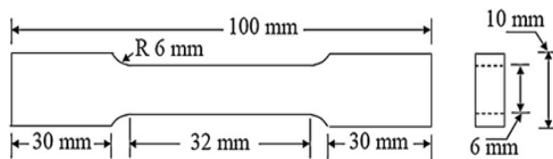


Figure III.14 : L'éprouvette de traction la norme ASTM (E8/E8M – 09) [33]

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale des soudures de l'acier X70 et les différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. Le chapitre est structuré comme suit: En premier lieu on fait une vision générale sur l'état de matériaux ainsi le cordon de soudure, ensuite, on s'intéresse à la micrographie réalisée par un microscope optique pour avoir des images micrographiques montrant les différentes phases, la taille et l'orientation des grains ; pour pouvoir ensuite les comparer avec les résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques(micro dureté, résilience ,traction).

IV.2. L'examen macrographique

Ech.	Vue externe	Vue Interne (Pénétration)
E1	<p>Longueur = 3,15 mm Longueur = 4,22 mm 308L Vue externe 5 mm</p>	<p>ENVERS E1 L3 = 4,83 mm L2 = 3,95 mm L1 = 5,00 mm 308L Vue Interne 2 mm</p>
E2	<p>L3=1,80 mm L2=6,29 mm L4=2,05 mm L1=6,73 mm 2209L Vue externe 2 mm</p>	<p>Longueur = 6,54 mm 2209L Vue Interne 5 mm</p>
E3	<p>L4 = 1,80 mm L3 = 1,49 mm L5 = 1,29 mm L1 = 5,95 mm L2 = 5,59 mm E7018 Vue externe 2 mm</p>	<p>Longueur = 4,98 mm Longueur = 4,83 mm E7018 Vue Interne 5 mm</p>
E4	<p>L3 = 4,76 mm L1 = 4,93 mm L4 = 1,17 mm L5 = 0,90 mm L2 = 4,98 mm sans métal d'apport Vue externe 2 mm</p>	<p>L2 = 4,27 mm L1 = 3,98 mm sans métal d'apport Vue Interne 2 mm</p>

Tableaux IV.1 Macrographies des soudures

Ces examens nous permis de conclure que, le cordon de soudure a une pénétration satisfaisante et il exempt de défaut (caniveau, sulfures, fissuration....etc.), ils confirment les examens visuels qui dévoile un cordon régulier et de beau aspect, On a réussi donc d'obtenir des soudures qualifie par nos paramètre optimisé.

IV.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS ETUDIES

Nous avons prélevé un échantillon au milieu de nos tôles soudées qui portent cinq zones essentielles MB (deux zones), la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) (deux zones) et zone Fondue (ZF). Le polissage a été réalisé puis suivi d'une attaque chimique afin de révéler la structure micrographique.



Figure IV.1 : Macrographie des joints soudés montre les différentes zones des assemblages

IV.4. EXAMEN MICROGRAPHIQUE

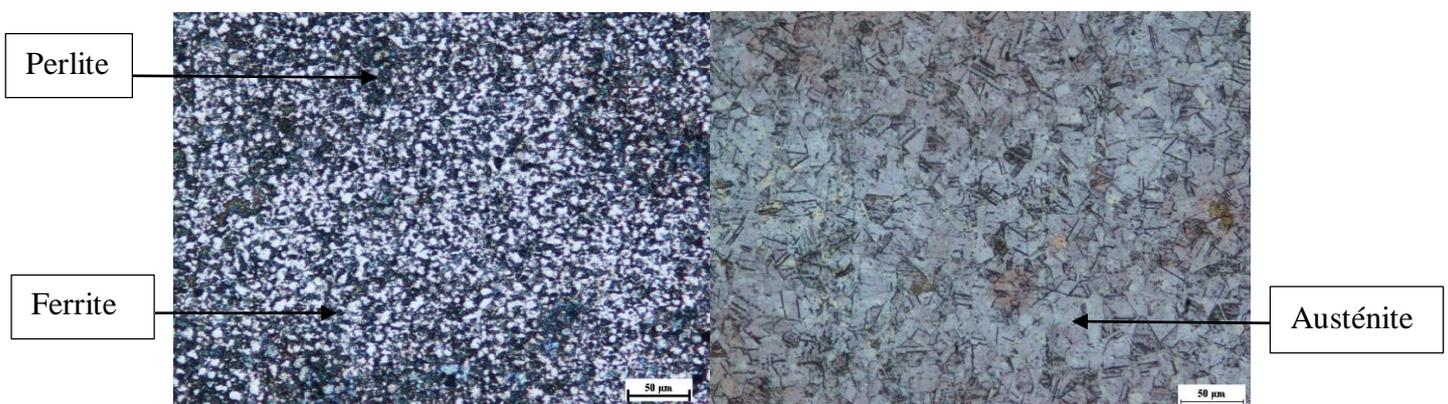
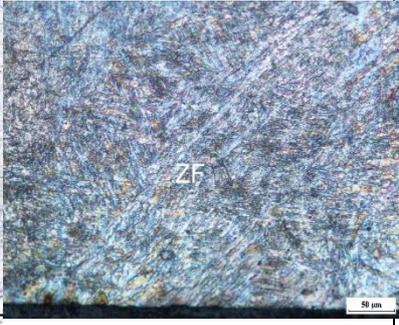
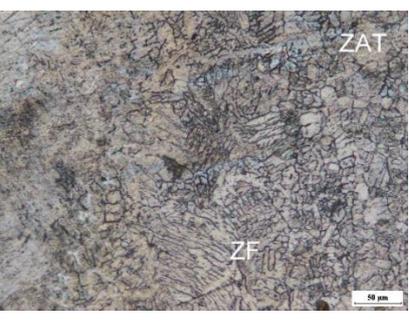
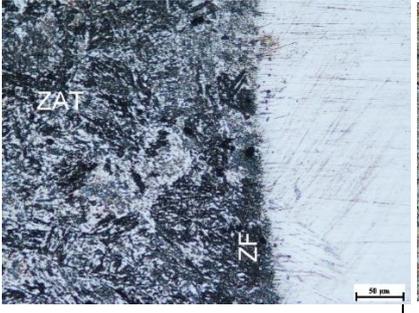
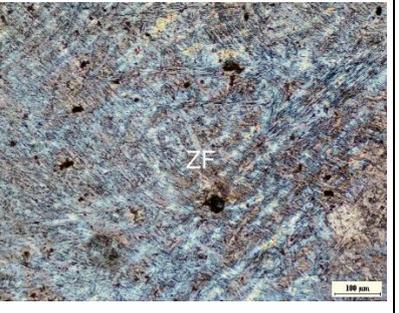
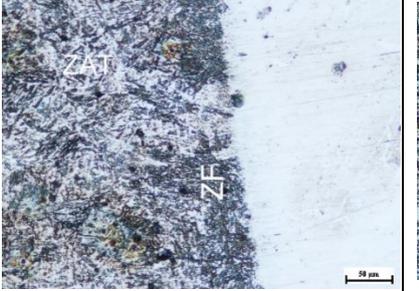
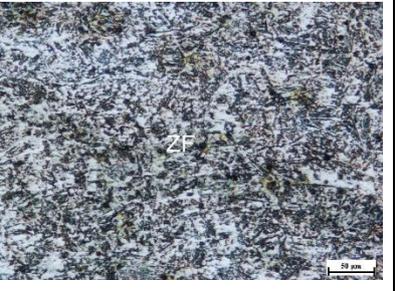


Figure IV.2 : Micrographies les matériaux de base : X70 (à gauche) et 304L

La micrographie des deux matériaux de base montre que : la microstructure biphasés de l'acier X70 est constituée de ferrite et perlite, cette dernière qui est composée de ferrite et cémentite, en revanche l'acier 304L présente une microstructure monophasé austénitique .

E308L		
ZAT(X70)-ZF	ZF	ZAT (304L)-ZF
		
E2209L		
ZAT(X70)-ZF	ZF	ZAT (304L)-ZF
		
E7018		
ZAT (X70)-ZF	ZF	ZAT (304L)-ZF
		
ZAT(X70)-ZF	ZF	ZAT (304L)-ZF



Tableaux IV.2 : Micrographies des joints soudées (grossissement X200)

d'une électrode Les résultats obtenues par un microscope optique sont regroupées dans Le (tableau IV.2) qui montre les différentes changement des microstructures soudées :

- Un affinage du grain dans la ZAT faiblement allié du fait de la recristallisation de la microstructure par apport de chaleur, il entraine microstructure ferrito-perlitique fine avec formation partielle de la martensite dans les joins des grains
- Les ZAT de l'acier 304L ont subi un grossissement des grains austénitique, ou il contient des tailles des grains varient à un autre.

IV.5. MICRODURETE

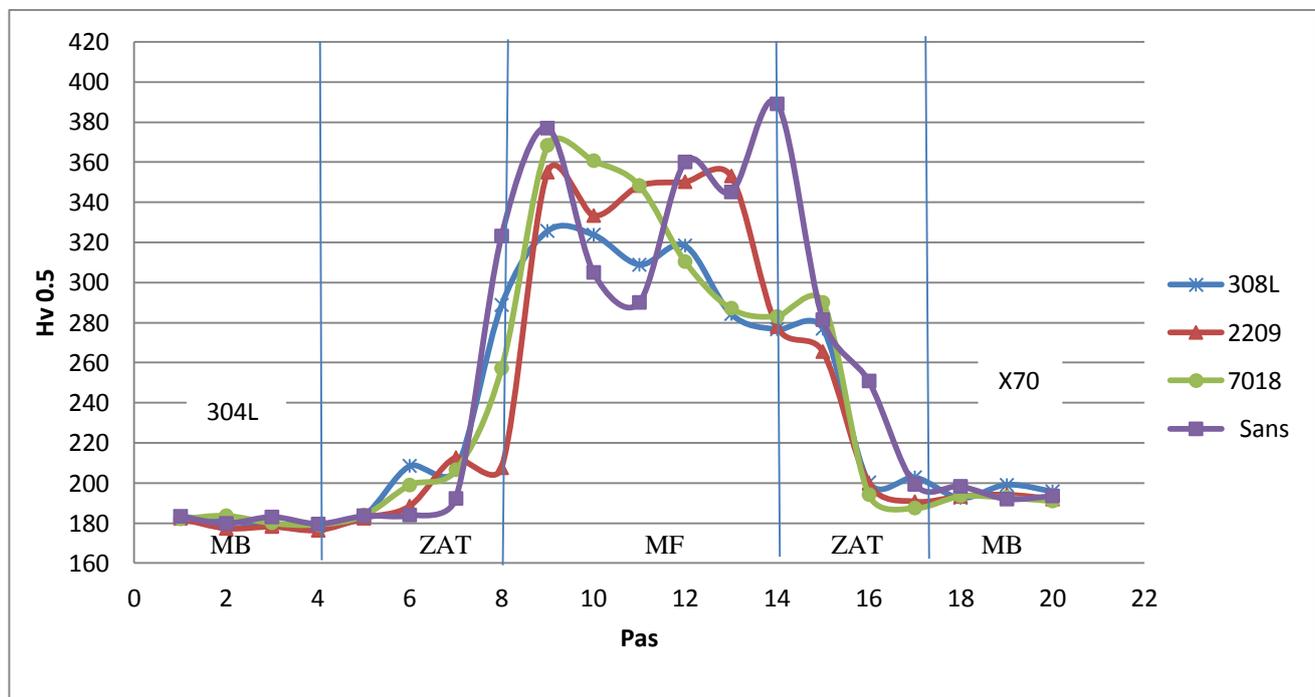


Figure IV. 3: Profils de microdureté des joints de soudures (E308L, E2209L, E7018, sans métal)

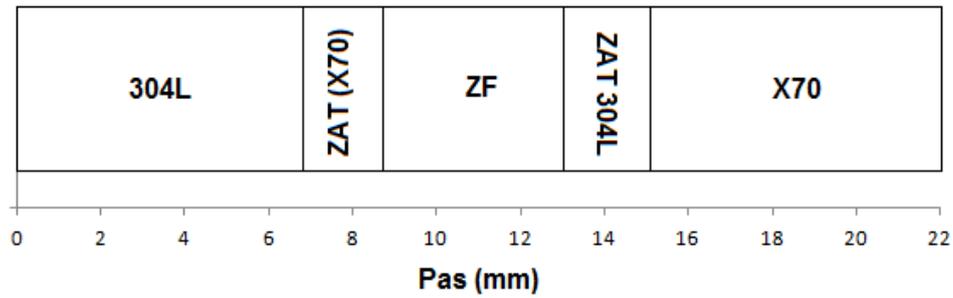


Figure IV.4: Montrant l'axe X des profils de microdureté

A partir de graphe (Figure IV.3) des profils de microdureté on tire les résultats suivants :

- La microdureté X70 est supérieure de celle de l'acier 304L à cause de la caractéristique des phases constituants de chaque acier.
- ZF dans E2 subissent une légère démunissions de la microdureté par rapport à les autres zone fondues enchantelions,
- Sur les frontière zone fondu-ZAT (E4), on observe des zones grises très dure composé essentiellement de perlite, ainsi dans le métal fondu on observe, des plaquettes de ferrite irrégulièrement répartie dans la matrice, ces dernières provoquent des fluctuations sur les valeurs de la microdureté,

IV.6. RESILIENCE

(Figure. IV .3) présente les résultats de l'essai de résilience pour le métal de base, le métal fondu et la ZAT austénitiques de chaque échantillon.



Figure IV.5 : Eprouvette de résilience

	E308L	E2209	E7018	Sans métal d'apport
Zat(304L)	6.45 J	9.65 J	3.1 J	1,55 J
Zf	2.8 J	2,1 J	1,3 J	1,25 J

Tableau. IV. 3 : Résultats de l'essai de résilience exécutée à (25) °C.



Figure IV.6: Eprouvettes après des essais de résiliences

(Le Tableau IV.3) présente les résultats de l'énergie de rupture absorbée pour le métal de base, le métal fondu et la zone affectée thermiquement.

- On observe que les zones affecté thermiquement (304L) absorbent une grande énergie avant leur rupture par rapport les zone fondues.
- Les basses valeurs d'énergie absorbée du métal fondu 308 L et 7018 peuvent être liées à leurs microstructures fragiles : dans le 7018 on peut trouver : des structures fragiles comme Widmanstatten, martensite, dans le 308L l'existence des microstructures de faible teneur (comme les phases sigma, delta, epsilon) offre une faible résistance à la propagation des fissures.

IV.7. ESSAIS DE TRACTION

Echantillon	F(KN)	Rm (MPa)	ϵ_r (%)
E1 : électrode E308L	7	522.54	0.173
E2 : électrode E2209	9.02	673.39	0.32
E3 : électrode E7018	7.73	572.04	0.2151
E4 : sans métal d'apport	6.56	489.57	0.16

Tableau IV.4: Caractéristiques des essais traction des éprouvettes

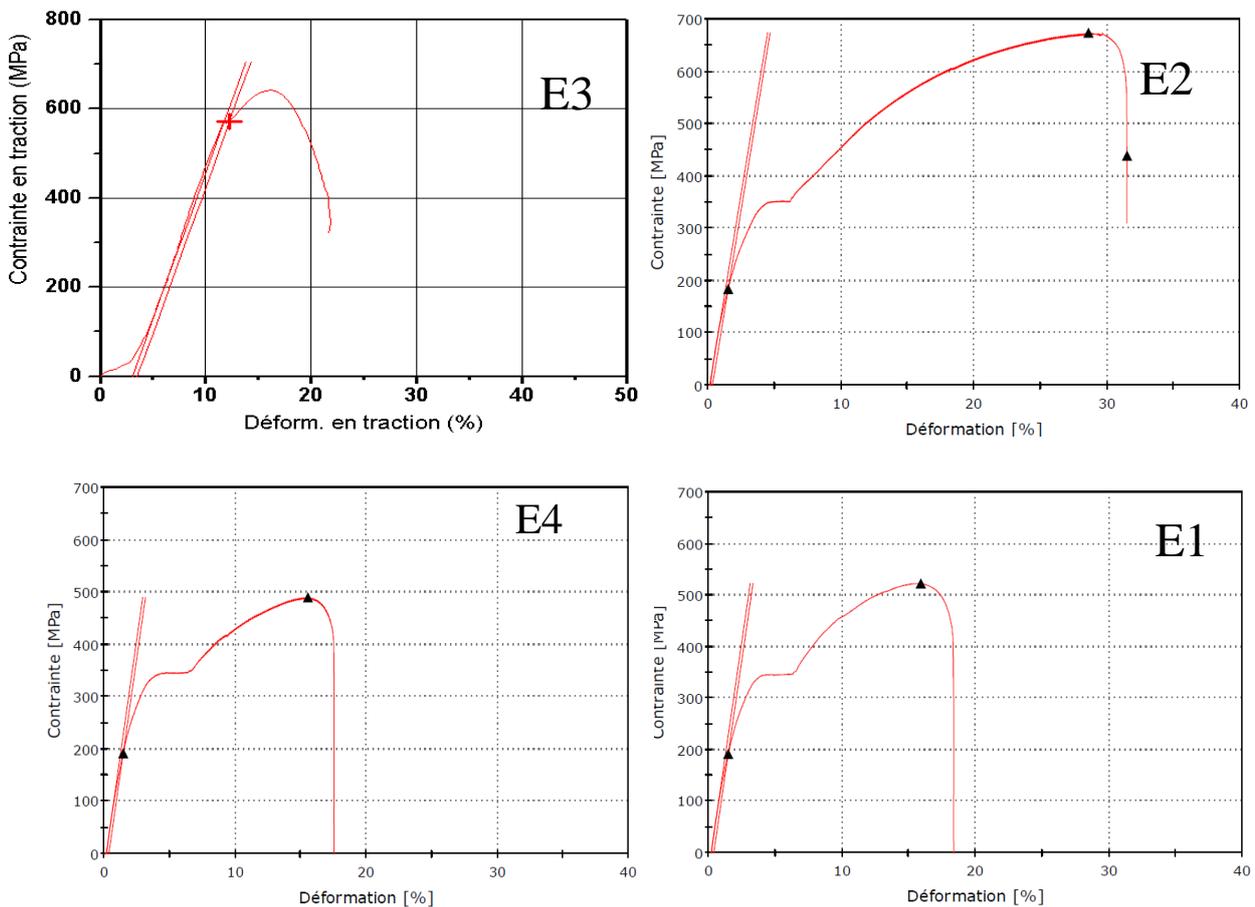


Figure IV.7: Courbes de traction des éprouvettes.

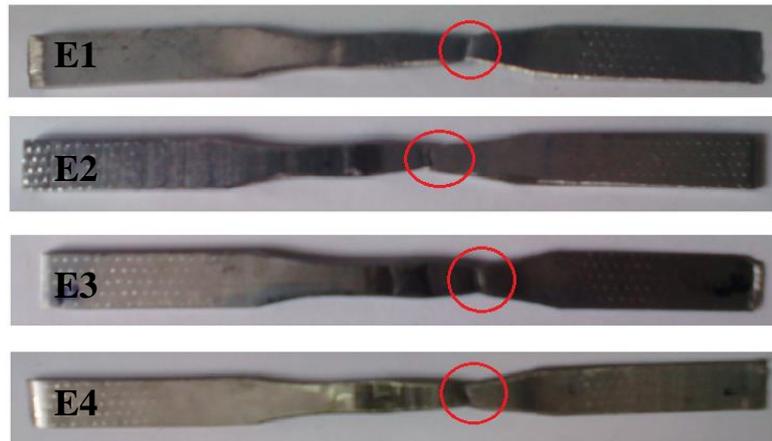


Figure.IV.8 : les éprouvettes après de tractions

La figure.IV.7 montre bien que les courbes des éprouvettes comportent trois parties:

- Une phase initiale linéaire qui reflète le comportement élastique du matériau.
- Puis une partie non linéaire de pente plus faible qui traduit la phase plastique homogène.
- Enfin une décroissance de l'effort au-delà du maximum, qui résulte l'instabilité plastique où la striction apparaît et la rupture de l'éprouvette se produit.
- Une chute considérable dans la résistance R_m de l'éprouvette (E4).
- L'utilisation des électrodes duplexe (E2) à une grande ténacité (représentées par l'aire de courbe de traction) et une bonne résistance maximale à la traction par rapport les autres éprouvettes.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude constitue une base de compréhension du phénomène généré par les énergies de soudage TIG sur le comportement mécanique et métallurgique des soudures hétérogènes. Il s'inscrit dans le cadre des travaux de recherches entrepris au sein du Laboratoire de DSTC du Centre national de recherche en soudage et contrôle.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à analyser le comportement MB-ZAT-MF (zone non affectée, zone affecté thermiquement, zone fondue) en terme de caractérisation de l'état de chaque de trois composants (phases, morphologie, répartition, taille, fraction volumique, solidification, germination du métal fondu et composition chimique) avec des caractérisations macro-microscopique, et analyses de microdureté,

Ainsi, des essais mécaniques sont consacrés à évaluée les résistances au choc des paramètres de soudage choisis (énergies de soudage), donc les principaux résultats peuvent être tiré d'ici sont ;

❖ En terme métallurgique :

- La croissance des dendritiques du métal fondu sont orientées vers la torche
- La variation de type des électrodes favorise l'augmentation de la taille des grains austénitiques.
- Un affinage du grain dans la ZAT faiblement allié du fait de la recristallisation de la microstructure par apport de chaleur, il entraîne microstructure ferrito-perlitique fine avec formation partielle de la martensite dans les joins des grains,

❖ En terme mécanique :

- les essais expérimentaux nous ont permis de classer les quatre procédés utilisés,
- Les électrodes duplex à un effet positif sur les propriétés de la microdureté, la ténacité, la résistance mécanique R_m , et la résistance au choc,
- La microdureté X70 est supérieure de celle de l'acier 304L à cause de la caractéristique des phases constituants de chaque acier.
- ZF dans l'électrode duplex subissent une légère démunissions de la microdureté par rapport la ZAT X70 contrairement les autres enchantelions
- Sur les frontière zone fondu-ZAT (E4), on observe des zones grises très dure composé essentiellement de perlite, ainsi dans le métal fondu on observe, des plaquettes de ferrite irrégulièrement répartie dans la matrice, ces dernières provoquent des fluctuations sur les valeurs de la microdureté
-

Cette étude sur le comportement des soudures TIG dans le cadre d'une thèse touche maintenant à la fin. Généralement, Dans cet axe de recherche, nous avons réussi à avancer dans la compréhension des phénomènes générés par les procédés de soudage à l'arc. Cependant, tout n'est pas résolu et quelques questions sont apparues au fur et à mesure de nos travaux. Ces questions comportent :

- ❖ le comportement la résistance électrochimiques des soudures et la probabilité de la création des piles électrochimiques (cathode-anode) entre l'électrode et les matériaux de base
- ❖ L'utilisation des moyens de caractérisation avancés (comme la microscopie électronique et la diffraction des rayons X) sera obligatoire pour définir les phases présentes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement (DRX) et l'analyse fractographique des éprouvettes de traction ou de résilience (MEB).

Référence bibliographiques

- [1] Hanifa_MAROUF « caractérisation structural et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique » mémoire de magistère, Université de Tizi Ouzou, 2012.
- [2] Jacky Ruste « Les matériaux du nucléaire endommagement et évolution », Université Nancy 1, 2011.
- [3] Centrale Phénix « Evaluation complémentaire de la sureté de la Centrale Phénix » Direction de l'énergie nucléaire, Centrale Phénix, 2011.
- [4] K. HULKA. « HSLA large diameter pipe plate from standard production to X80/X100 », Niobium Information 13/39, 1997.
- [5] A. BOUZIANE. « Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure », Thèse de Magistère en génie mécanique, Université Boumerdès 2008.
- [6] Metals Handbook « High strength structural and high-strength lowalloy steels » Metals Handbook, Tenth edition, 1990.
- [7] NOUREDDINE Mustapha « Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'acier HSLA- x70 lors des réparations par soudage » Mémoire de Magister Présenté, ENP, 2011.
- [8] M.graf, J.schroder, V.schwinn and k.hulka , « production of large diameter pipes grades X70 with high toughness using acicular ferrite microstructures », International conference on application and evaluation of high grade linepipe in hostile environments November 8-9 ,yokohama , japan, 2002.
- [9] L.J. CUDDY, « Grain Refinement of Nb Steels by Control of Recrystallization during Hot Rolling », Metallurgical Transactions A, vol 15A, January 1984.
- [10] Castro, R. « Historique des aciers inoxydables », Les éditions de physique. 1990.
- [11] P.J CUNAT. « Aciers inoxydable : Critères de choix et structure ». Techniques de l'ingénieur, fasc. M 4540, (Mars 2000).
- [12] Euro-inox « Le décapage et la passivation de l'acier inoxydable », The european Stainless Steel Development , 2eme eddition- serie matériaux et application 2007.
- [13] The Iron and Steel Society « Steel products manual: Stainless Steels ». (1999)...

Référence bibliographiques

- [14] Alain COL. «Tôles pour mise en forme», Techniques de l'Ingénieur, Edition bm7518 , 2013.
- [15] EN 10088-1 « Aciers inoxydables. - Partie 1 : liste des aciers inoxydables».
- [16] Michel Dupeux, «Aide mémoire sciences des matériaux», éditions Dunod, Paris, (ISBN 978-2-10-005458-9), p. 212.
- [17] J. Barralis, G. Maeder, «Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection », AFNOR, p. 103,2005.
- [18] Technique de l'ingénieur, les procédés de soudage, avril 2009.
- [19] Guide pratique Interne procédé TIG Antony FERNANDES, ESAB France 2009 .
- [20] <http://www.asphme.org/upload/pdf/soudage.pdf>.
- [21] <http://www.rocdacier.com>.
- [22] <http://www.soudeurs.com>.
- [23] Aesteiron Steels Private Limited, 2014.
- [24] B. MAAMACHE, A. Brahimi, «Effet des cycles thermiques du soudage sur le comportement microstructural et mécanique de la Z.A.T. dans une soudure en acier H.S.L.A. X52», colloque des Matériaux ,13-17 Novembre 2006 – Dijon, France.
- [25] Precision Tube Technology, INC, «Coiled Line Pipe applications», ISO 9001.USA, 2001.
- [26] WITIER, P., & ANTOINE, J.M. Analyse et caractérisation de matériaux de construction. Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation, 5(P3660), P3660-1, 1999.
- [27] American Iron and Steel Institute «Welding of Stainless Steels and Other joining Methodes», Handbook series N° 9002, 2005.
- [28] A.F PADILHA, P.R RIOS. « Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels». pp. 325-337. ISIJ International, Vol. 42, N°4. (2002).
- [29] Metals handbook Vol.8 « Mechanical testing and evaluation », ASM International, USA, 2000.
- [30] Norme ASME « Qualification Standard For Welding and Brazing » ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Welding and Brazing, July 1; 2010.
- [31] Norme E23« Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials» American Society for Testing and Materials, 1982.
- [32] Metals handbook Vol.8 « Mechanical testing and evaluation », ASM International, USA, 2000.
- [33] (E8: Standard test methods for tension testing of metallic materials).