

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR : Science et Génie des Matériaux

**THEME : ETUDE DU COMPORTEMENT
MÉCANIQUE ET ÉLECTROCHIMIQUE DES
SOUDURES HÉTÉROGÈNES ACIER INOX
(316L)/ACIER AU CARBONE (A106 GR.B)**

Présenté(e) par : -Mr : Mougari Abdessamad.
-Mr : Boukhari Mohamed.

Encadré(e) par : - Pr. ZAHZOUH Moussa.

Membres du jury : - Mme. Lemboub
- Dr. Taibi

Président.
Rapporteur.

Juin 2016

Je dédie modestement ce travail à:

Ma mère et mon père qui me sont très chers,

Ma famille : Djaber, Hichem, Youcef, Nawel,

Les personnes spéciales: B.Amina, Raouf,

*Mes Cher amis Idir, Nabil, Toufik, Lydia,
S.Amina.*

*Mes collègues : L.Houssef, B.Mohamed
B.Abdelghani, L.Mohamed, B.Nabil, B.Med
Amine, Abdessalam, L. Hamza et toutes la
classe.*

Mougari Abdessamad

Dédicace

*A ma source de tendresse, l'être la plus chère
dans le monde La femme la plus patiente, ma
très chère mère.*

*Mon idéal, l'être le plus généreux, mon très cher
père tous leurs sacrifices.*

Mes très chers frères et mes sœurs :

*Ali, Amar, Yazid et Nadia, Faiza, Nouara,
Hafida, Houria, Hakima*

Mes amis :

*B.Nabil, L.Houssam, M.Abdessamad,
H.Abdnour, H.abdrzak, S.Hassane, B.Hacène
et tous les autres.*

Et tout la famille Boukhari et Redouane.

Boukhari Mohamed

DEDICACES

Remerciements

Avant tout, Dieu merci de nous avoir donné la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail. Au terme duquel, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour Mr. ZAHOUH Moussa, professeur de l'Université d'Annaba, pour nous avoir honorés en acceptant de diriger ce travail, et qui nous a accordé tout le soutien et l'aide durant les différentes étapes, ainsi que pour ses critiques minutieuses et ses précieuses orientations. Nous reconnaissons vivement les interventions qu'il a fait pour le déroulement parfait de notre recherche et je ne saurai point exprimer ma gratitude envers ses sacrifices offerts en faveur de mon intérêt.

En premier nous tenons à remercier Mr. ETTIGRINI Mohamed ingénieur métallurgiste à l'entreprise nationale des grands travaux pétroliers, Reghaia, qui a bien voulu mettre à notre disposition tous les moyennes pour le bon déroulement de notre stage.

Mes remerciements à Mr. LKABA Lamine doctorant au CRTI, Chéraga pour nous avoir permettre un accès facile au centre pour préparer nos échantillons.

Notre profonde gratitude à tous nos enseignants du l'Ecole Nationale Supérieure des mines et métallurgie qui ont contribué activement à notre formation pendant les trois ans. Qu'ils trouvent dans ce mémoire le bien de ce qu'ils nous ont appris.

Nos remerciements s'adressent aussi à toutes personnes qui travaillent à laboratoire de l'ENSMM et de département métallurgie de l'université de Badji Mokhtar pour leur aide toutes au cours de préparation de notre travail.

Je tiens également à associer à ce travail tous mes collègues de promotion que j'ai eu le plaisir de côtoyer pendant cette période de formation. Une pensée va particulièrement à tous ceux d'entre nous qui n'ont pas eu la possibilité d'aller jusqu'au bout de leur formation. Nous pensons enfin

fortement à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de porter un regard intéressé à mon travail.

Je cite Mme. Lemboub en tant que président, Dr. Taïbi.

Et enfin un grand merci à notre pays l'Algérie.

Résumé

Le **soudage hétérogène** d'un acier au carbone A106 Gr.B et l'**acier inoxydable austénitique** AISI316L a été réalisé par le procédé **TIG**.

Ce type des soudures ont été faites dans le but de substituer des assemblages homogènes afin de leurs caractéristiques spéciales vis-à-vis les sollicitations mécaniques et leur résistance électrochimique dans certaines applications.

D'un côté, pour étudier les **propriétés mécaniques** d'assemblage, des essais mécaniques (traction, dureté, pliage, résilience) ont été réalisés afin de mettre en question la conformité de cette soudure avec son application dans le domaine de transport des hydrocarbures. Ces essais nous a permis de déduire la bonne résistance mécanique de ce type des assemblages. D'un autre côté, pour évaluer la résistance à la **corrosion** des joints soudés à certains types de corrosion, cinq configurations ont été réalisées: les deux métaux de base séparément l'acier A106 Gr.B et l'acier inox 316L, la zones affecté thermiquement ZAT (coté acier au carbone), et la zone fondue ZF, puis l'ensemble (métaux de base, ZAT et ZF). Une comparaison des paramètres de corrosion (vitesse de corrosion, potentiel et courant de corrosion) dans une solution de NaCl (3,5%) des cinq configurations montre que l'assemblage hétérogène est mieux résistant par rapport au métal de base acier au carbone et la ZAT coté carbone ; mais il est moins résistant par rapport au métal de base 316L et la zone fondue.

Mots clés : soudage hétérogène, acier inoxydable austénitique, TIG, propriétés mécanique, corrosion.

ABSTRACT

The heterogeneous welding of carbon steel A106 Gr.B and **austenitic stainless steel** AISI 316L was produced by **TIG**.

This type of welds was made in order to replace homogeneous assemblies to their special features against the mechanical stresses and their electrochemical resistance in some applications.

On the one hand, to study the **mechanical properties** of assembly, mechanical tests (tensile, hardness, bending and resilience) were performed in order to question its compliance with welding application in the hydrocarbon transportation field.

These tests allow us to deduce the good mechanical strength of such assemblies.

On the other hand, to evaluate the corrosion resistance of welded joints to certain types of corrosion, five configurations were carried out: the two base metals separately A106 Gr.B steel and stainless steel 316L, the areas HAZ heat affected (carbon steel side), and ZF melt zone, then all (base metal, HAZ and ZF).

A comparison of the corrosion parameters (**corrosion** rate, potential and corrosion current) in NaCl (3.5%) of five configurations shows that the heterogeneous assembly is better resistant to carbon steel base metal and HAZ carbon side; but it is less resistant with respect to the 316L base metal and the molten zone.

Keywords: heterogeneous welding, austenitic stainless steel, TIG, mechanical properties, corrosion.

Sommaire

Introduction générale.

Chapitre I : -les aciers -

I-1- Introduction.....	1
I-2- Classification des aciers.	1
I-2-1- Les aciers ordinaires ou aciers au carbone (Stainless Carbone).....	1
I-2-1-1- Définition.....	1
I-2-1-2- Différents structures des aciers au carbone.....	2
I-2-2- Les aciers inoxydables (Stainless Steel).....	4
I-2-2-1- Définition.....	4
I-2-2-2- Composition et structure des aciers inoxydables.....	4

Chapitre II : -le soudage -

II-1- Introduction.....	9
II-2- Définition de soudage.....	9
II-3- Types de soudage.....	9
II-4- Procédés de soudage.....	9
II-4-1- Le procédé TIG (Tungstène inerte gas) ou (GTAW).....	10
II-5-Avantages et inconvénients de soudage TIG.....	12
II-6-Métallurgie de soudage.....	13
II-6-1- Structure d'une soudure.....	13
II-6-2- Transformation au cours du soudage.....	14
II-6-3- Aspect thermique de soudage.....	14
II-6-3-1- Cycles thermiques.....	15
II-7- Notion de soudabilité.....	16

Sommaire

II-8- Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques.....	17
II -9- Diagramme WRC 92.....	19

Chapitre III : -la corrosion-

III-1- Introduction.....	20
III-2- Définition de la corrosion.....	20
III-3- Principales formes de corrosion.....	20
III-3-1- Corrosion localisé.....	20
III-3-1-1- Corrosion par pique.....	20
III-3-1-2- Corrosion intergranulaire.....	22
III-3-2- Corrosion généralisé (ou uniforme).....	23
III-4- les grands facteurs de corrosion.....	23
III-5- Approche électrochimique de la corrosion.....	24
III-6- Méthodes d'étude de corrosion.....	25
III-6-1- Méthodes électrochimiques.....	25
III-6-1-1- Mesure du potentiel.....	25
III-6-1-2- courbes potentiodynamiques où (intensité-potentiel).....	26
III-7- Aspect économique de la corrosion.....	27
III-8- Les anions agressifs.....	28
III-9- le phénomène de passivation.....	28
III-10- La lutte contre la corrosion.	30
III-11- Utilité des soudures hétérogènes.....	30

Sommaire

Chapitre IV : -Techniques expérimentales-

IV-1- Introduction.....	32
IV-2- Attaques chimiques	32
IV-3- Préparation des échantillons	32
IV-3-1- Prélèvement des échantillons	32
IV-3-2- Préparation des surfaces	33
IV-4- Techniques expérimentales	34
IV-4-1- Chaîne de mesure électrochimique	34
IV-4-2- La microscopie optique (MO)	35
IV-4-3- Le Microscope Electronique à Balayage MEB (Scanning Electron Microscope).....	36
IV-4-4- Essai de Traction.....	37
IV-4-5- Essai de Résilience.....	40
IV-4-6- Essai de micro-dureté (Vickers).....	41
IV-4-7- Essai de pliage à l'envers et à l'endroit	41

Chapitre V :- Résultats et interprétations-

V-1- Analyse chimique.....	43
V-1-1- Interprétation et comparaison.....	43
V-2- Etude métallographique.....	44
V-2-1- Macrographie.....	44
V-2-2- Micrographie.....	45
V-3- Etude électrochimique.....	48
V-3-1- Evolution de potentiel d'équilibre.....	48
V-3-2- Courbes de polarisation.....	51

Sommaire

V-4- Essais mécaniques.....	56
V-4-1-Traction.....	56
V-4-2- Pliage.....	59
V-4-3- Micro dureté.....	60
V-4-4- Essai de résilience.....	63
Conclusion et perspective	

Liste des figures

Partie bibliographique :

Figure I-1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	1
Figure I-2 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone	2
Figure I-3 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde.....	3
Figure I-4 : Microstructure d'un acier eutectoïde (perlitique)	3
Figure I-5 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde.....	4
Figure I-6 : Influence de chrome (Cr) sur les caractéristiques mécaniques des aciers.....	5
Figure I-7 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel Pour des teneurs croissantes en nickel. Influence du nickel Sur l'extension de la boucle γ	6
Figure I-8 : Structure d'un acier inoxydable austénitique	7
Figure I-9 : La structure d'un acier inoxydable duplex.....	8
Figure II-1 : Les procédés de soudage.....	10
Figure II-2 : principe de procédé TIG.....	11
Figure II-3 : Structure d'une soudure.....	13
Figure II-4 : Transformations au cours du soudage.....	14
Figure II-5 : disposition des thermocouples sur le cordon	15
Figure II-6 : Courbe de variation de température en fonction du temps et de la position sur le cordon de soudure	16
Figure II-7 : Diagramme de [Schaeffler [Schaeffler, 1949].....	17
Figure II-8 : appauvrissement local en chrome produira une corrosion intergranulaire	18
Figure II-9 : Diagramme WRC 92 [Kotecki, 1992]	19
Figure III-1 : corrosion par piqûres.....	21
Figure III-2 : Schéma du processus de corrosion par piqûres :a) amorçage, b) propagation.....	21
Figure III-3 : Corrosion Intergranulaire.....	22

Liste des figures

Figure III-4 : Corrosion Généralisée (rouille) des pièces en acier.....	23
Figure III-5 : Structure à l'interface métal-solution.....	25
Figure III-6 : Courbe de TAFEL	27
Figure III-7 : (a) Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamotoet Shibata, (b) Modèle bicouche du film passif.....	30
Figure III-8 : images d'utilités des soudures hétérogènes.....	31

Partie techniques expérimentales :

Figure IV-1 : tube à partir de lequel les échantillons sont prélevés.....	32
Figure IV-2 : Echantillons des métaux de base découpés.....	33
Figure IV-3 : Échantillons de zone fondue et de zone affectée thermiquement découpés.....	33
Figure IV-4 : polisseuse.....	34
Figure IV-5 : chaine de mesures électrochimiques.....	35
Figure IV-6 : microscope optique.....	36
Figure IV-7 : Le microscope électronique à balayage (MEB).....	37
Figure IV-8 : éprouvette de traction prismatique proportionnelle.....	38
Figure IV-9 : Machine de traction.....	39
Figure IV-10 : Courbe de traction conventionnelle.....	39
Figure IV-11 : Forme de l'éprouvette de résilience et la position de l'entaille.....	40
Figure IV-12 : Duromètre.....	41
Figure IV-13 : Epreuves d'essai de pliage sur coté : épaisseurs de paroi supérieures 13 mm...42	42

Liste des figures

Partie Résultats et interprétations :

Figure V-1 : Vue macrographique de la soudure.....	43
Figure V-2 : Micrographie optique du métal de base (acier au carbone) (X500).	45
Figure V-3 : Structure austénitique de l'acier 316L (X 100).	46
Figure V-4 : Structure des macles dans l'acier 316L (X 500).	46
Figure V-5 : Mise en évidence de la ferrite particule ronde dans l'acier 316L (X 500).....	47
Figure V-6 : Micrographie optique de la zone de transition cotée inox austénitique (316L) (X200).....	47
Figure V-7 : Micrographie d'un plan transversale de cordon de soudure (X200).....	48
Figure V-8 : Micrographie des liaisons entre les différentes passes de soudures (X100).....	48
Figure V-9 : représentation graphique d'E=f(t) du cinq échantillons.....	49
Figure V-10 : représentation graphique d'E=f(t) du cinq échantillons.....	50
Figure V-11 : représentation graphique d'Log(I)=f(E) des couples : (a): soudure/acier au carbone, (b) : (soudure/ZAT) , (c) : soudure/Zone Fondue,(d) :soudure/316L.....	51
Figure V-12 : représentation graphique d'Log(I)=f(E) du cinq échantillons.NaCl (3,5%). Vitesse de balayage : 1mV/s.....	52
Figure V-13 : Histogramme comparative de la vitesse de corrosion pour les différents échantillons.....	53
Figure V-14 : Histogramme comparative de la résistance à la polarisation pour les différents échantillons.....	53
Figure V-15 : Microstructures des échantillons après le test de corrosion (a) : ZAT (A106 Gr.B),(b) Zone Fondue,(c) : Acier au carbone,(d) : Acier inox 316L (X100).....	55
Figure V-16 : Microstructure de l'assemblage hétérogène après le test de corrosion(X500). ...	56
Figure V-17 : rupture des éprouvettes après essais de traction.....	57.

Liste des figures

Figure V-18 : courbe rationnelle de traction éprouvette (1).....	57
Figure V-19 : image par le MEB des faciès de rupture après l'essai de traction.....	58
Figure V-20 : Résultats de l'essai de pliage : (a) éprouvettes endroits, (b) éprouvettes envers.....	59
Figure V-21 : Profil de la Micro dureté de la soudure complète.....	60
Figure V-22 : mesures moyenne de la Micro dureté de l'assemblage.....	61
Figure V-23 : profil de concentration réaliser par MEB (a)1810 μm coté carbone – zone fondue (b) 1014 μm coté zone fondue – acier inox (316L).....	62

Partie bibliographique :

Tableau II-1: Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients de soudage TIG.....12

Tableau III-1: Les différents facteurs de la corrosion.....24

Partie Techniques expérimentales :

Tableau IV-1 : Dimensions des éprouvettes de traction.....37

Partie Résultats et interprétations :

Tableau V-1 : composition chimique de l'acier (A106 Gr.B).....42

Tableau V-2 : composition chimique de l'acier austénitique (316L).....42

Tableau V-3 : composition chimique de métal d'apport inox ER 316L.....42

Tableau V-4 : Paramètres de corrosion.....53

Tableau V-5 : les paramètres de l'essai de traction.....55

Tableau V-6 : Résultats de l'essai de pliage.....58

Tableau V-7 : Valeurs de la micro dureté.....59

Tableau V-8 : Valeurs de la micro dureté.....60

Tableau V-9: résultats d'essais de résilience.....62

Introduction générale :

Ce travail a trait à l'étude de joints soudés hétérogènes inox 316L/ acier au carbone A106 Gr.B destiné à l'industrie des pipes.

La maîtrise du comportement des assemblages et particulièrement les soudures hétérogènes est une nécessité croissante pour les différents secteurs : aéronautique, automobile, marin, transport pétrolier, agroalimentaire...etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans les matériaux utilisés, et les facteurs influençant son comportement aussi bien mécanique et électrochimique, permet de prévenir toutes anomalies susceptibles de se produire et de ce fait procéder au meilleurs choix des conditions d'utilisation.

L'intérêt des aciers inoxydables réside dans leurs caractéristiques de résistance mécaniques (dureté, résilience, résistance à la déformation). Un avantage majeur de ces aciers est leur résistance à la corrosion, Leur coût d'élaboration reste relativement modéré, du fait de l'abondance naturelle du minerai de fer. Enfin, ces aciers sont pratiquement entièrement recyclables.

Le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) utilisé pour ce type d'assemblage connu sous le nom de GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux États-Unis, est un procédé de soudage très répandu, utilisé dans des applications telles que le domaine aéronautique et naval, industrie pétrolière et pétrochimique.

Depuis peu, scientifiques et industriels s'intéressent au soudage des métaux et alliages de compositions chimiques différentes ce qu'on appelle soudage hétérogène. Un procédé qui suscite beaucoup d'intérêt tant sur le volet économique que celui des propriétés mécaniques et métallurgiques de la construction.

L'entreprise nationale des grands travaux pétroliers -Reghaia- , utilise ce type de soudure dans la fabrication des tubes destinés à des utilisations hydrocarbures dans des conditions spécifiques (sous contraintes mécanique et chimique) ce qui exige de bien étudier les propriétés de ce type d'assemblage, ce qui nous a amené à faire cette étude.

Le travail entamé dans le cadre de cette étude s'inscrit dans cette optique:

En premier lieu, une synthèse des données relatives aux caractéristiques et des propriétés des aciers étudiés en générale est présentée dans le premier chapitre. Le deuxième chapitre est

consacré à la métallurgie de soudage de ces aciers, ainsi que les paramètres qui influent sur les propriétés finales d'un joint soudé et les phénomènes engendrés par le soudage, les procédés de ce dernier ont été également revus. Le troisième chapitre présente une synthèse des données sur le comportement à la corrosion des matériaux étudiés.

Les techniques expérimentales utilisées (prélèvement, préparation des éprouvettes), et les techniques de caractérisation (dureté, traction, pliage, résilience, métallographie...) ont été résumées dans le chapitre quatre.

Les résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés dans le chapitre cinq.

Une conclusion générale clôture ce travail.

I-1-Introduction :

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines [10]. Ils sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone, dont les plus importants sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le molybdène (Mo) [11]. Par conséquent, on obtient des aciers offrant les caractéristiques principales suivantes : excellente résistance à la corrosion dans un grand nombre de milieux et résistance mécanique notablement plus élevée que celle des matériaux traditionnels...etc. [9].

I-2-Classification des aciers :

I-2-1-Les aciers ordinaires ou aciers au carbone :

I-2-1-1-Définition : Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieure, constituent environ 80 % de la production des aciers. Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers [12].

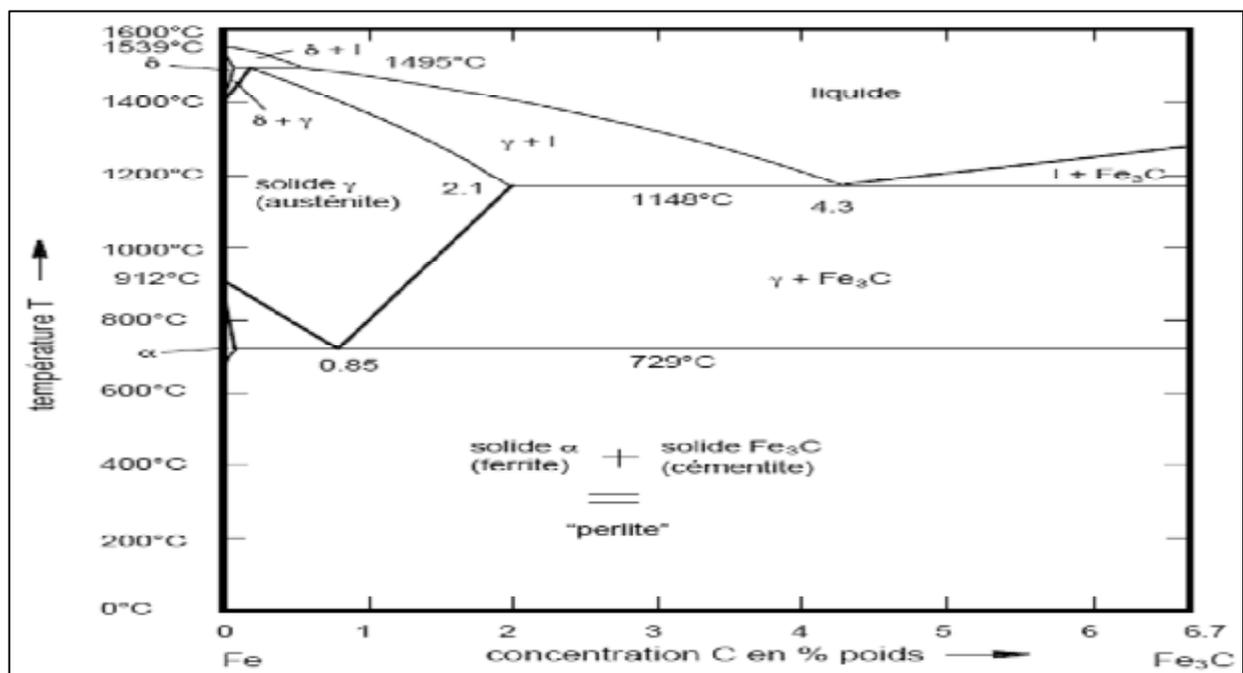


Figure I-1: Diagramme d'équilibre fer-carbone [13].

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées (**figure I-2**), les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- la résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- la trempabilité,
- la soudabilité
- la tenue à chaud,
- la résistance à l'usure et à la corrosion [12].

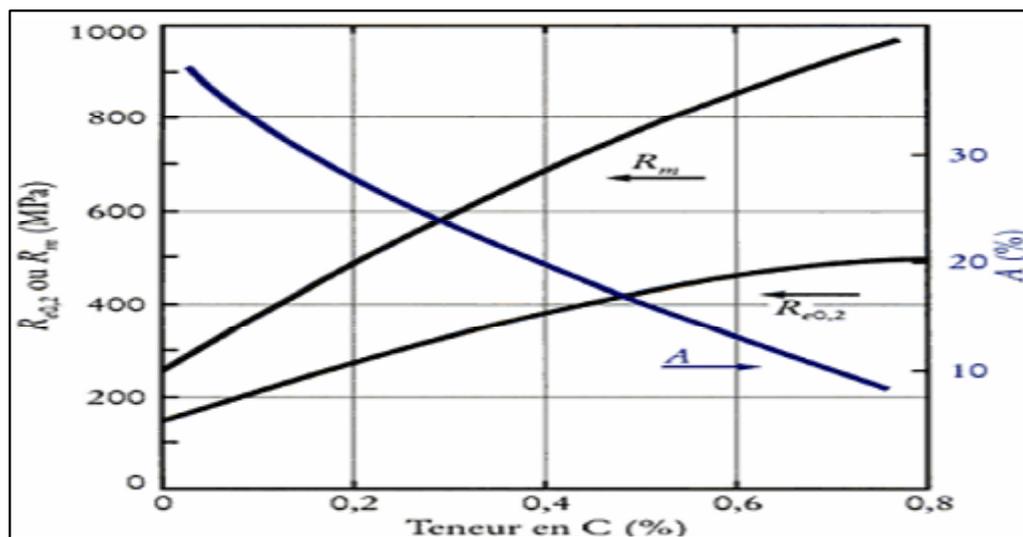


Figure I-2 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone [28].

I-2-1-2-Différents structures des aciers au carbone :

En fonction de pourcentage en carbone on distingue trois types d'aciers.

- ✚ **Les aciers hypoeutectoides** : Le %C \in [0.20% - 0.80%] [14]. ils sont formés de perlite (ferrite α + cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique [15].

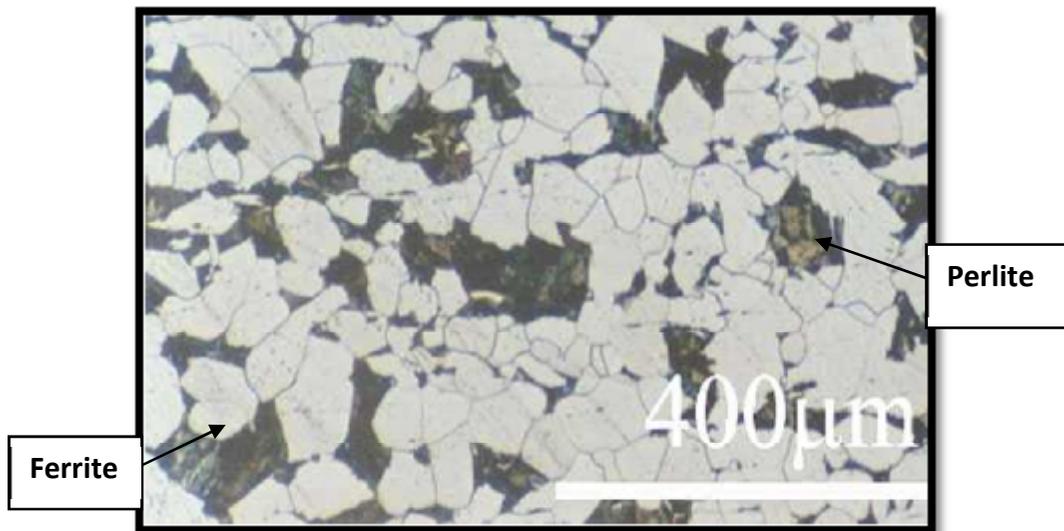


Figure I-3 : Microstructure d'un acier hypoeutectoide [14].

- ✚ **Les aciers eutectoides** : Le %C = 0,80% ils sont formés de 100% perlite (ferrite α + Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles [15].



Figure I-4 : Microstructure d'un acier eutectoide (perlitique) [15].

- ✚ **Les aciers hyper-eutectoides** : %C ∈] 0,85%, 2,1% [ils sont formés de perlite (Ferrite α + cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite [15].

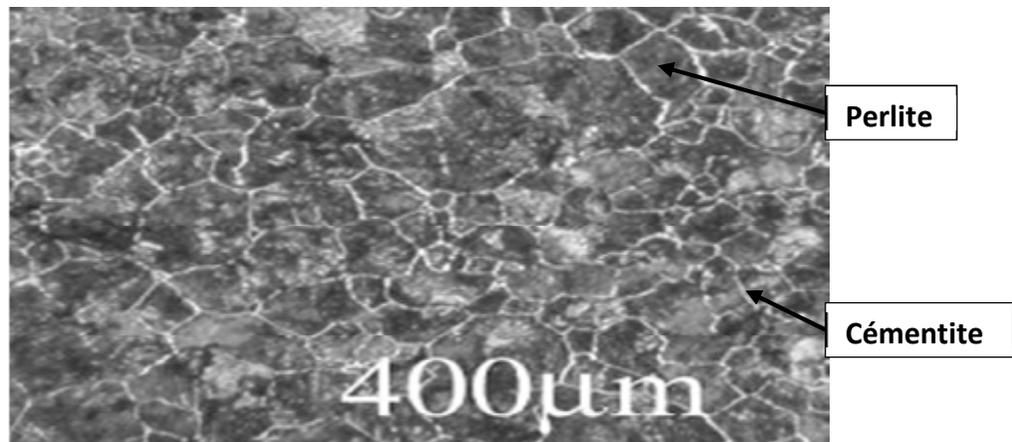


Figure I-5 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde [14].

I-2-2- les aciers inoxydables :

I-2-2-1- Définition : Les aciers inoxydables sont des aciers ayant une concentration : en chrome comprise entre 10.5% et 30 %, en nickel de 0% à 35% et en carbone $\leq 1.2\%$ [16]. La résistance à la corrosion est due au chrome qui, en présence d'un milieu oxydant, forme à la surface de l'acier une couche complexe « couche passive », invisible mais protectrice. C'est la résistance de cette dernière qui détermine les qualités d'inoxidabilité de l'acier. De plus, si cette couche passive devait être détruite accidentellement (rayure), elle possède la propriété de se reformer spontanément dans un grand nombre de milieu [17].

I-2-2-2- Composition et structure des aciers inoxydables :

L'élément d'alliage chrome constitue jusqu'à nos jours le métal d'addition le plus important pour les aciers inoxydables. Au-delà de 12%, il confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion. De plus il existe un certain nombre d'autres éléments d'alliage ayant une certaine importance. Entre autre, on distingue : molybdène (Mo), Silicium (Si), Vanadium (V), Titane (Ti) et Nickel (Ni)... etc.

- **Chrome (Cr) :** c'est un élément stabilisateur de fer alpha (α). Il est la cause de la passivation de l'acier et constitue, au-delà de 12%, l'élément d'alliage essentiel dans ces aciers [9].

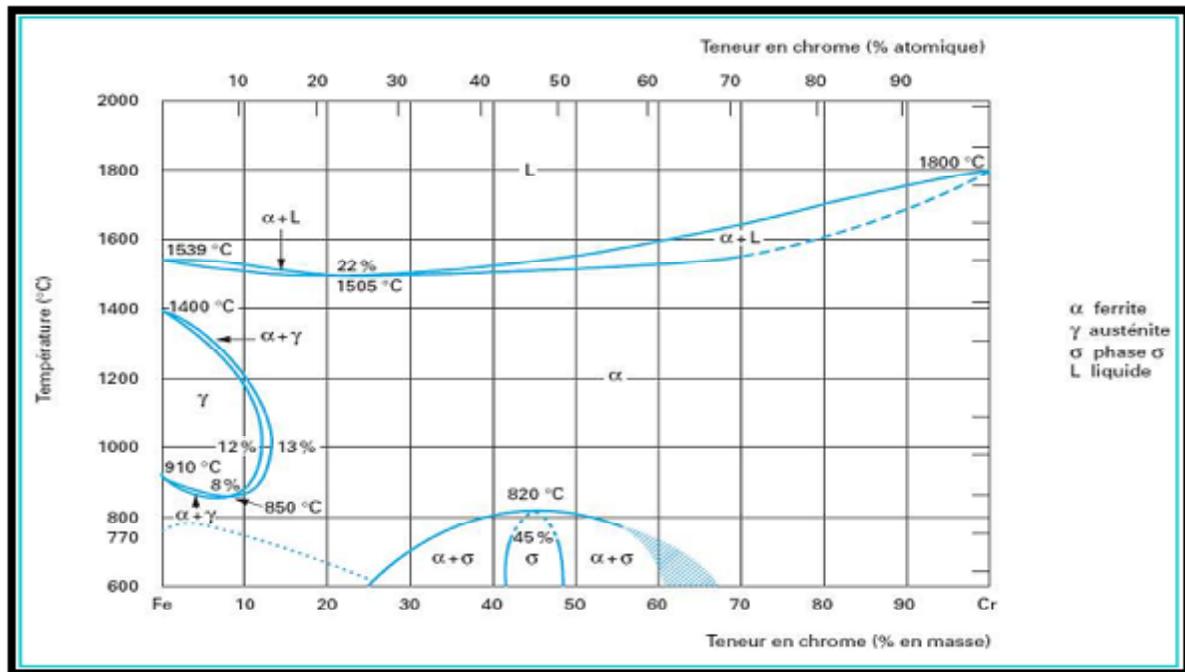


Figure I-6 : Influence de chrome (Cr) sur les caractéristiques mécaniques des aciers [29].

- **Molybdène (Mo)** : c'est un élément formateur de fer alpha (α). Il améliore la résistance à la corrosion de ces aciers en milieux réducteurs. En présence d'ions halogènes il améliore en particulier la résistance à la corrosion par piqûres. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud.
- **Silicium (Si)** : c'est un élément également formateur de fer alpha (α). Il améliore la résistance à l'oxydation à chaud. A teneurs élevées et dans certaines conditions, il augmente la résistance à la corrosion par exemple en milieux concentrés d'acide nitrique.
- **Vanadium (V)** : Formateur de fer alpha (α), intervient qu'en faible quantité dans les aciers martensitiques au chrome par formation de carbures pour rendre les aciers insensibles à la surchauffe. De plus il élève la résistance mécanique à chaud.
- **Titane (Ti)** : c'est un formateur de ferrite. Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former un carbure de titane et avec l'azote pour former un nitrure de titane dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion intergranulaire (intergranulaire).
- **Niobium (Nb)** : Il s'agit d'un formateur de ferrite. Il se combine également avec le carbone dans les aciers au Cr et au Cr Ni et s'oppose à la corrosion intergranulaire.
- **Nickel (Ni)** : c'est un élément stabilisateur de fer Gamma (γ). Il élargit en effet le domaine d'existence de l'austénite en fonction de sa teneur jusqu'aux températures inférieures à 20 °C. Il est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliages des aciers inoxydables austénitiques [9].

Le nickel (Ni) améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension (**Figure I-7**).

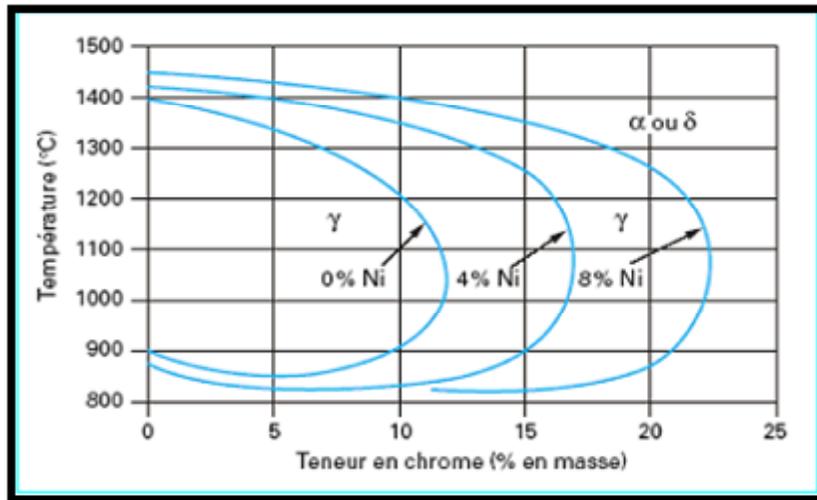


Figure I-7 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel Pour des teneurs croissantes en nickel. Influence du nickel Sur l'extension de la boucle γ [30].

- **Manganèse (Mn)** : Il stabilise le fer Gamma (γ) et n'a pas d'influence reconnue sur la résistance à la corrosion. Il rend plus difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr Ni et lors de sollicitation mécanique aux basses températures.
- **Carbone (C)** : Il favorise le fer Gamma (γ). C'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers. Son effet aux basses teneurs est d'environ 30 fois celui du nickel. Pour des raisons de corrosion chimique la teneur en carbone est dans la plupart des cas maintenue très basse.
- **Azote (N)** : Stabilisateur d'austénite. Il accroît les caractéristiques mécaniques sans compromettre les valeurs de la ténacité.
- **Soufre (S)** : Il améliore l'usinabilité par enlèvement de copeaux.
- **Cuivre (Cu)** : Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid [9].

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grands groupes :

- Aciers inoxydables ferritiques et aciers inoxydables martensitiques.
- Aciers inoxydables austénitiques et aciers inoxydables austéno-ferritiques.

- ✚ **Aciers inoxydables ferritiques** : Leur teneur en carbone est faible (inférieure à 0.08 %). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures ; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre 12 et 30 % de chrome. Ils sont aux chauffages sensibles au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité [12].
- ✚ **Aciers inoxydables austénitiques** : Les nuances les plus utilisées sont caractérisées par des teneurs en chrome et en nickel respectivement de 17 à 18 % et 8 à 14 %. L'addition de molybdène (de 2 à 3 %) leur confère une bonne tenue dans les milieux acides et ceux générateurs de piqûres ou de corrosion cavernueuse. La forte proportion de nickel sert à donner et à conserver la structure austénitique (γ) à ces aciers même à température ambiante, en plus d'augmenter leur résistance à la corrosion. Cette structure est thermodynamiquement instable à température ambiante. Les aciers austénitiques associent une bonne résistance à la corrosion et une résistance mécanique élevée, ils sont ductiles, résistants au choc et non-magnétiques; ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par déformation à froid. A l'état recuit, ils possèdent à ce moment une plus grande ductilité et une meilleure ténacité que les aciers ordinaires. Même si leur teneur en carbone est relativement faible, ces aciers sont très sensibles à la corrosion intergranulaire due à la précipitation de carbures. Ils sont utilisés dans les domaines de l'agro-alimentaire, du nucléaire, du bâtiment, des transports, de l'industrie chimique, de l'électroménager, etc [19]. La figure I.13 représente une microstructure d'un acier inoxydable austénitique consiste en des grains austénites qui peuvent montrer des macles.



Figure I-8 : Structure d'un acier inoxydable austénitique [19].

✚ Aciers inoxydables austéno-ferritiques :

Les aciers austéno-ferritiques sont des mélanges biphasés ferrite et austénite (d'où leur nom anglais de duplex), et contiennent des teneurs en chrome, molybdène et azote relativement élevées.

Ils sont obtenus par trempe depuis une structure mixte austénite-ferrite.

Les principales nuances contiennent 22 à 25 % de chrome et 4 à 7 % de nickel. Les incorporations de molybdène (3 ou 4 %) et d'azote (0,1 à 0,3 %) permettent de limiter les corrosions par piqûres et par crevasses. Alliant les bonnes propriétés de résistance à la corrosion des aciers ferritiques et les hautes résistances mécaniques des aciers austénitiques, ces aciers sont utilisés dans des conditions relativement agressives : industries chimique, pétrolière et maritime [19].

La microstructure de base de l'acier inoxydable duplex consiste de grains d'austénite dispersés dans une matrice ferritique, comme s'est montré sur la (**figure I.14**).

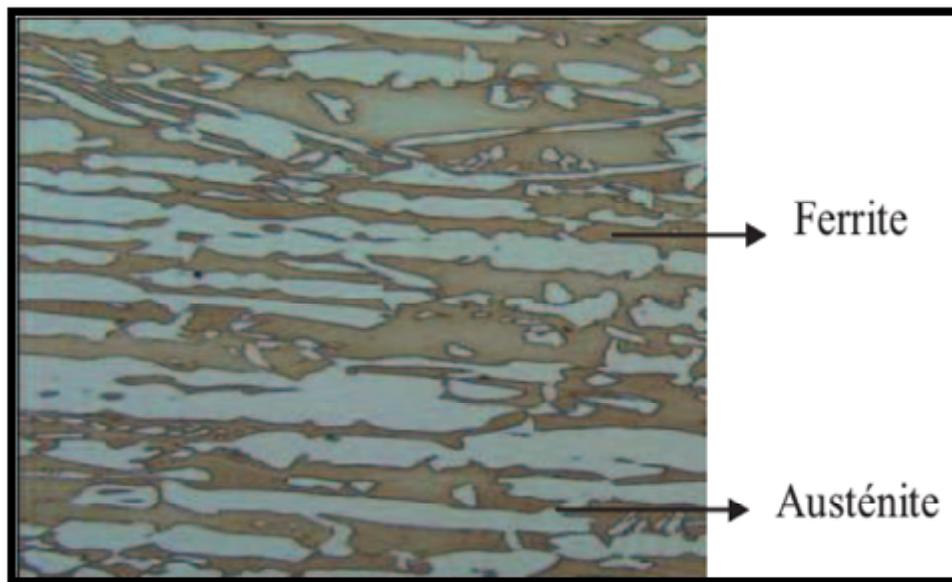


Figure I-9 : La structure d'un acier inoxydable duplex [20].

✚ **Aciers inoxydables martensitiques** : Leur teneur en chrome ne dépasse pas 17% et leur teneur en carbone, qui est fonction de la teneur en chrome peut atteindre 1.1% [12].

II-1-Introduction :

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, **tuyaux**, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. La clé des problèmes qui se posent lors d'une construction à souder relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages : découpage de l'assemblage et disposition des joints.
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces.
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service [31].

II-2-Définition du soudage :

C'est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de la pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [32].

II-3-Types de soudage :

Les soudures permettent de créer une liaison rigide entre deux pièces. Elles sont dites :

- ✚ **Hétérogènes** : le métal ou l'alliage utilisé pour la soudure est différent de celui des pièces à assembler.
- ✚ **Autogènes** : les pièces sont assemblées, soit sans aucun élément d'addition, soit avec un métal d'apport de même composition [33].

II-4-Procédés de soudage :

Les procédés de soudage opèrent dans leur majorité par la mise locale des pièces à souder à température de soudage (température de fusion la plupart du temps) au niveau de leur joint ; cette mise à température s'effectue soit progressivement, soit globalement dans l'espace et dans le temps,

au moyen d'une source de chaleur pouvant être associée, pour certains d'entre eux, à un dispositif de pression mécanique s'exerçant pendant le processus de formation de la liaison [31].

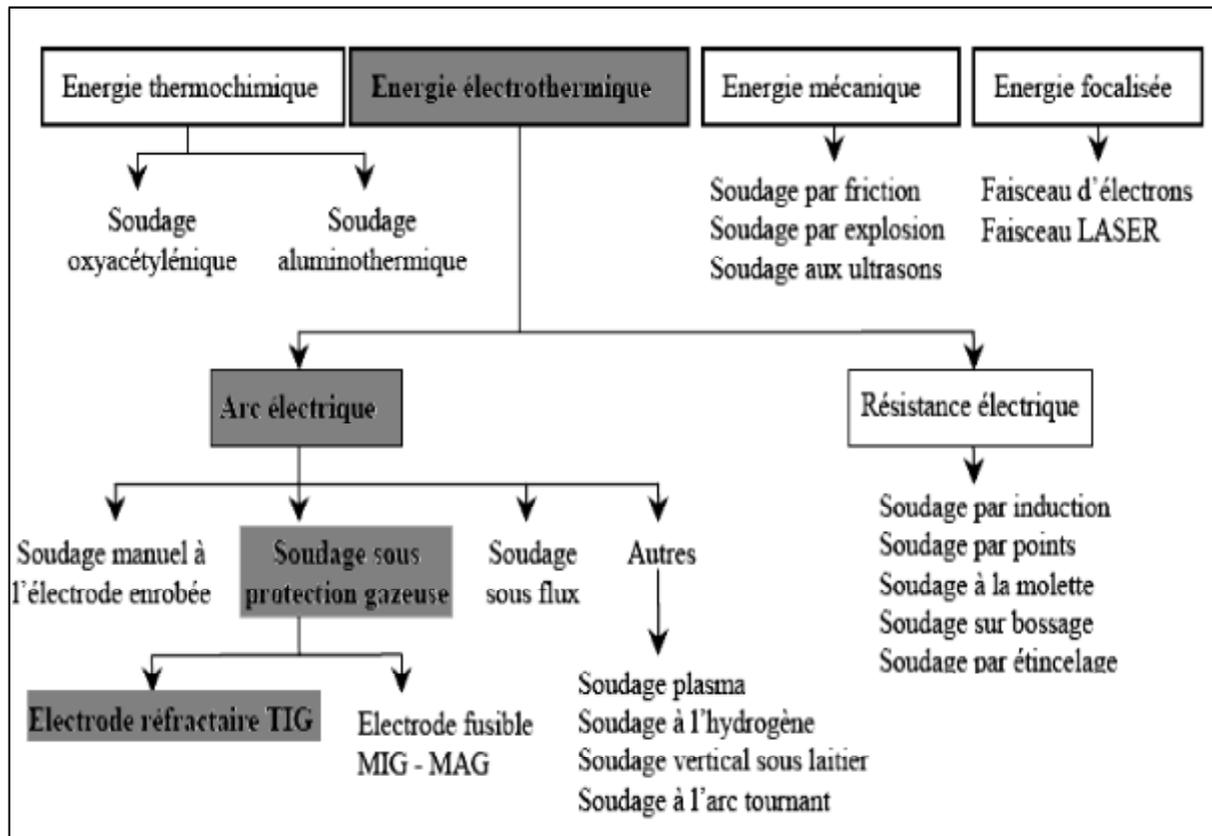


Figure II-1 : Les procédés de soudage [31].

II-4-1-Le procédé TIG :

L'abréviation TIG (Tungsten Inert Gas) désigne le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène ; on le trouve quelquefois sous l'appellation de GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

Son principe est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage.

Le soudeur tient dans sa main la torche qui alimentera en énergie le bain de fusion. De cette torche jaillira un jet de gaz inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium, voire un mélange argon + hélium. Ce gaz l'instar des autres procédés de soudage protégera le bain de fusion pendant toute l'opération. L'introduction éventuelle d'un métal d'apport peut être réalisée directement dans le bain de métal fondu soit sous forme de baguettes, soit sous forme de fil [34].

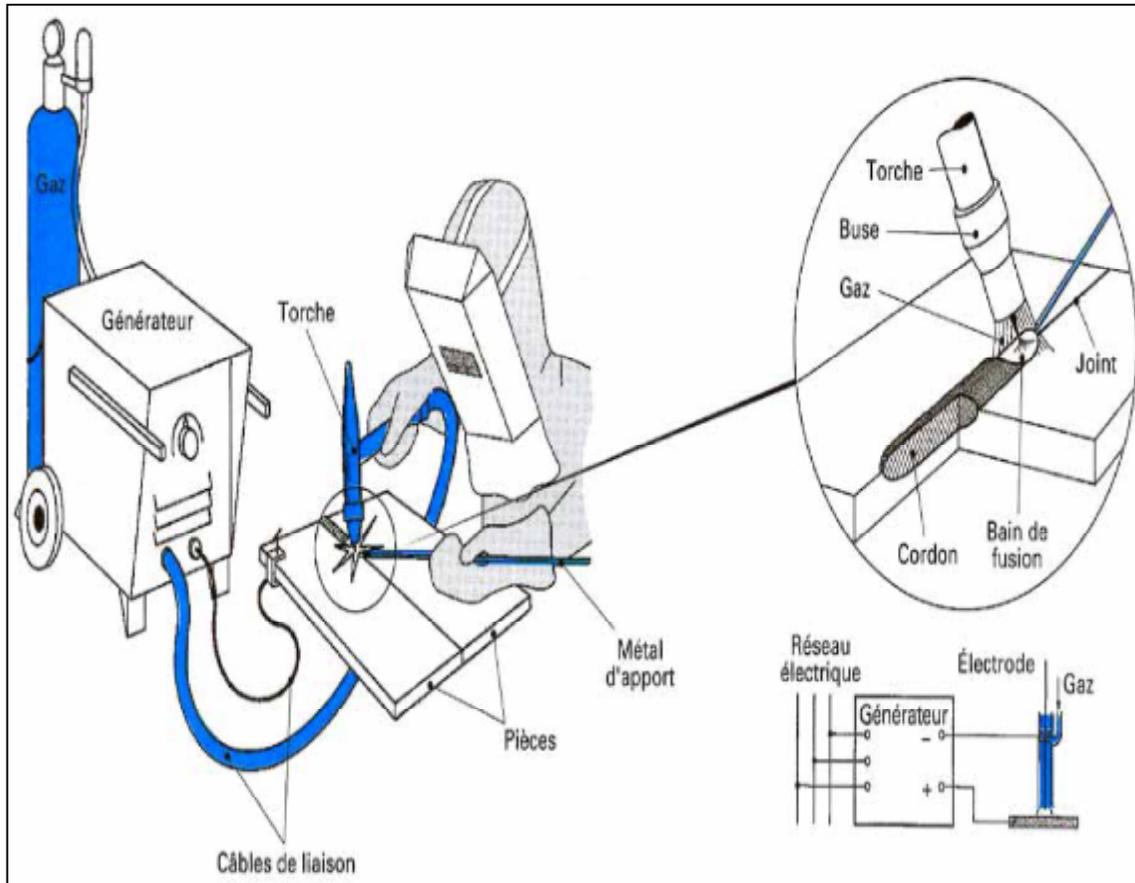


Figure II-2 : principe de procédé TIG [35].

a) Le poste à souder TIG :

Le poste à souder TIG est constitué d'un générateur qui fournit du courant continu ou alternatif (le choix de type de courant selon le type de matériaux à souder). L'intensité peut varier de quelques ampères à quelques centaines d'ampères. La tension à vide est comprise entre 60 V et 150 V [34].

b) Intensité de courant :

C'est l'intensité du courant que l'on règle, elle est donnée par la formule :

$$\text{Intensité} = (\text{\O de l'électrode} - 1) \times 50$$

Exemple : électrode de $\text{\O } 3,15$ $I = (3,15 - 1) \times 50 = 107 \text{ A.}$ [33]

c) Les électrodes :

Comme indiqué dans l'abréviation, l'électrode est en tungstène. C'est un métal qui a la propriété d'avoir un point de fusion très élevé, de l'ordre de 3400°C. Le choix de l'électrode dépend essentiellement d'une part de la nature du métal à assembler et d'autre part, du diamètre de l'électrode qui lui sera conditionné par l'intensité nécessaire à la fusion de la tôle. Il existe principalement trois types d'électrode de tungstène :

- Le tungstène pur (99,7%) utilisé en courant alternatif pour des aluminiums.
- Le tungstène thorié à 1 et 2 % de thorium ; on l'utilise pour le soudage des aciers faiblement alliés (acier doux) en courant continu.
- Le tungstène au zirconium. Ces électrodes ont un point de fusion plus élevé et s'utilise pour le soudage d'aluminium.

Lorsque l'on soude les aciers et les aciers inoxydables, il est nécessaire d'affûter l'extrémité de l'électrode en pointe. Cet affûtage peut se faire avec un petit touret à meuler [34].

d) Gaz de protection :

Les gaz utilisés pour le soudage (TIG) sont essentiellement l'argon et l'hélium. L'argon reste le gaz majoritairement employé. Il est comprimé dans des bouteilles en acier sous pression de 200 bars à une température de 15°C. L'argon est un gaz inerte. Il ne participe pas à la combustion et ne réagit chimiquement à aucun élément. C'est un gaz insipide et sans saveur [34].

II-5-Avantages et inconvénients de soudage TIG :

Tableau II-1: tableau récapitulatif des avantages et inconvénients de soudage TIG [43].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Large gamme d'épaisseurs à souder ; • Simple d'emploi ; • Travail précis et esthétique ; • Peu de fumées ; • Soudage dans toutes les positions ; • Procédé automatisable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible vitesse de soudage ; • Apport important d'énergie.

II-6-Métallurgie de soudage :

II-6-1-Structure d'une soudure:

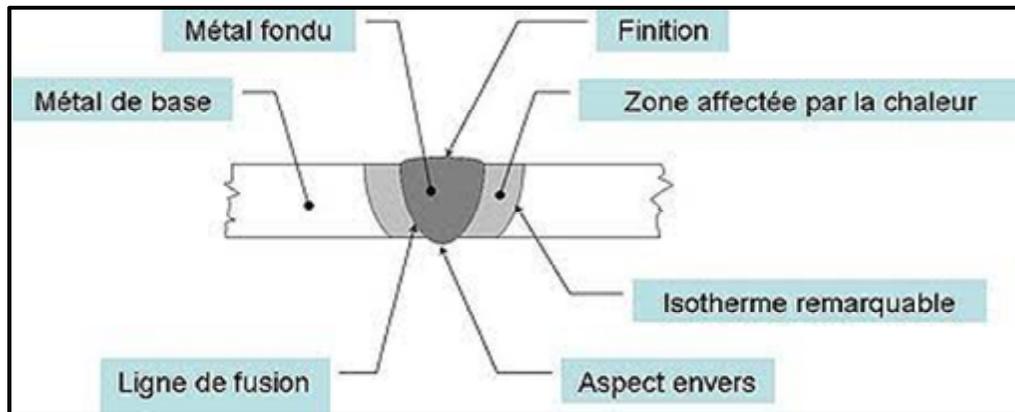


Figure II-3: Structure d'une soudure [38].

- ✚ **Métal ou métaux de base** (en fonction de leurs compositions chimiques): référence pour apprécier les différentes transformations intervenant lors du déroulement du processus de soudage.
- ✚ **Zone affectée thermiquement (ZAT)** : suffisamment proche de la zone fondue de sorte que les différents cycles thermiques ont provoqué divers transformations structurales.
- ✚ **Zone fondue** : refroidi rapidement depuis l'état liquide, cette zone est obtenue par la fusion du métal (ou métaux) de base avec la contribution plus ou moins importante du métal d'apport. '' Zone fondue = Métal d'apport + Métal fondu ''.
- ✚ **Zone de liaison** : fixe la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement (Z.A.T) en d'autres termes elle correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion [11].

II-6-2-Transformations au cours du soudage :

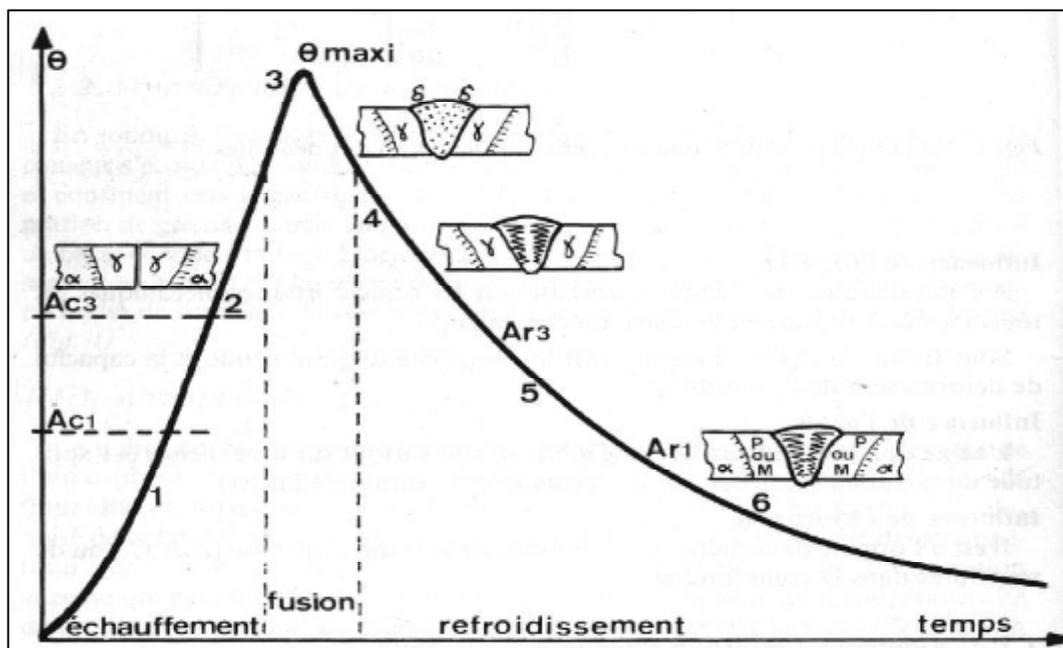


Figure II-4 : Transformations au cours du soudage [47].

- 1 – **Dilatation Ac1** : Détensionnement.
- 2 – **Ac3** : austénisation (changement de maille).
- 3 – **Zone fondue** : fusion et dilution du métal (d'apport et du base).
- 4 – **Solidification Ar3** : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – **Transformations allotropiques Ar1**: trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – **Fin de transformation** : contraintes résiduelles, déformations, rupture [47].

II-6-3- Aspect thermique de soudage

Les caractéristiques mécaniques d'un alliage pouvant être profondément modifiées en jouant sur le traitement thermique de la même façon, les cycles thermiques engendrés par l'opération de soudage vont modifier les propriétés de l'acier dans la zone affectée thermiquement et vont conditionner celles de la zone fondue.

Généralement, on caractérise le cycle thermique de soudage par le temps qui s'écoule pour passer de 800 à 500 ° C (Δt 800/500) ou de 700 à 300°C (Δt 700/300). L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes résultant d'un effet thermique requiert, comme condition nécessaire, la connaissance de la température atteinte. A cette condition de température s'ajoutent une ou

plusieurs conditions de temps, qu'il s'agisse de l'échauffement, du séjour à température ou du refroidissement [36].

II-6-3-1-Les cycles thermiques :

Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage, en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température T en fonction du temps

Pour enregistrer les évolutions de la température en fonction du temps, on place des couples thermoélectriques lors de la préparation des pièces à assembler. Ainsi, on peut, s'ils ont été judicieusement disposés (**Figure II-5**), enregistrer à partir de chacun d'eux la courbe température = f (temps), qui correspond au volume de métal voisin de la soudure chaude. Les résultats obtenus prennent les formes schématisées sur la (**Figure II-6**), [32].

Les principaux facteurs qui ont une influence sur le cycle thermique sont :

– l'énergie de soudage :

$$E \text{ (J/cm)} = \frac{U \text{ (V)} \times I \text{ (A)}}{V_s \text{ (cm/min)}} \times 60$$

– la forme du joint.

– le procédé de soudage.

– l'épaisseur du métal de base.

– la température de préchauffage et la température entre passes [36].

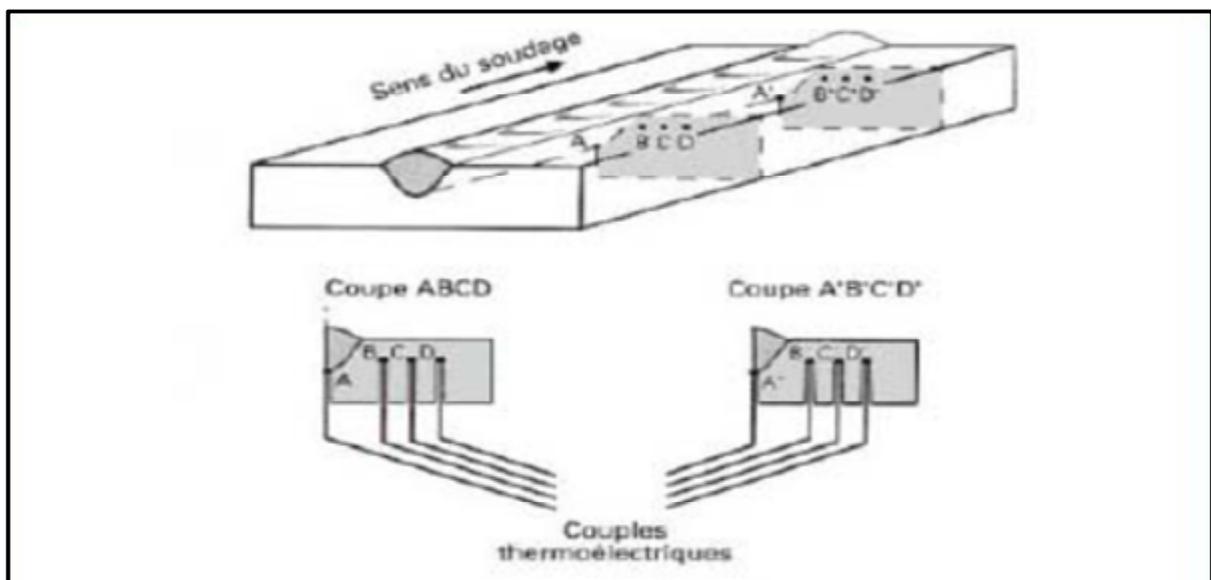


Figure II-5: disposition des thermocouples sur le cordon [32].

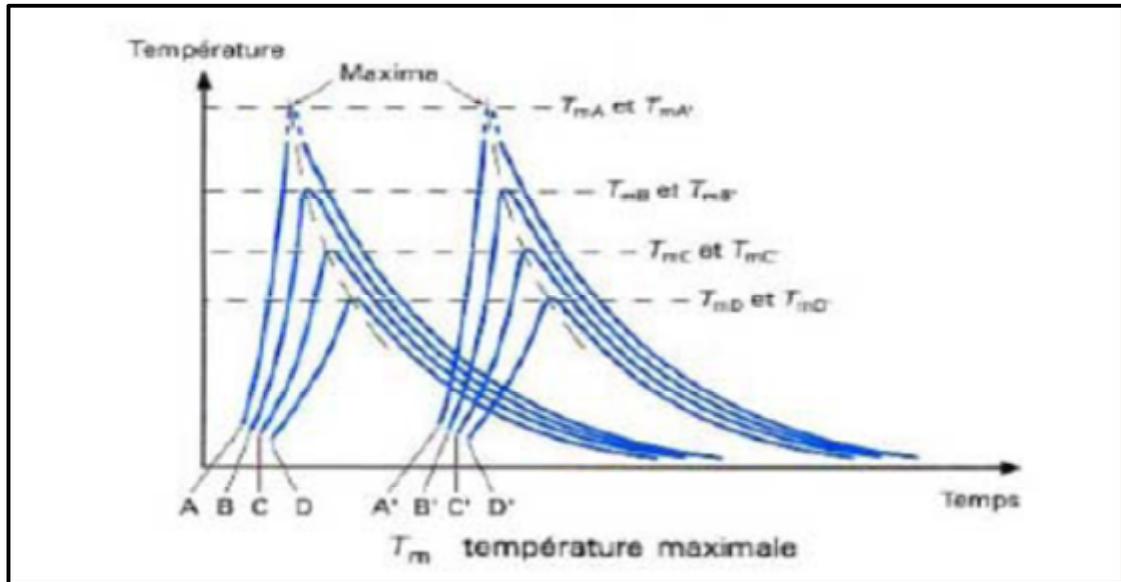


Figure II-6: Courbe de variation de température en fonction du temps et de la position sur le cordon de soudure [32].

II-7- Notion de Soudabilité :

Compte tenu du procédé de fabrication des pipes. Les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur en carbone est faible. Le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable, donc Une formule exprimant le pouvoir trempant de l'acier en fonction de ses constituants a été établie :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

Les propriétés de soudabilité sont meilleures si ce paramètre (**C_{eq}**) est plus faible.

A l'exception des tubes sans soudure, tous les aciers sont soudés deux fois, une fois lors de leur fabrication, une deuxième fois à la pose : la soudabilité est donc le deuxième critère de choix, après la résistance mécanique. L'acier doit donc posséder d'excellentes caractéristiques de soudabilité.

Dans le cas des pipelines, deux exigences techniques et économiques influencent le soudage :

- remplir les normes de qualité et de sécurité (exigences des utilisateurs et codes de construction).
- coût et durée de l'opération (productivité de la pose) [44].

II-8-Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers 316L sont une catégorie d'acier insensible au trempe car ils ne subissent pas de transformation de phase en fonction de la température donc on ne va pas enregistrer une augmentation de dureté dans la zone affectée thermiquement.

Le choix du métal d'apport est alors conditionné par les exigences métallurgiques suivantes:

- ✚ le métal de base étant choisi pour sa ténacité ou pour des conditions particulières de résistance à la corrosion, le métal d'apport devra, en général, avoir une composition chimique voisine de celui-ci,
- ✚ Suivant la composition, il existe ou non à très haute température, un domaine de stabilité de la ferrite. Un pourcentage de 2 à 10 % de ferrite δ dans le cordon de soudure va diminuer considérablement le risque de fissuration à chaud [36].
- ✚ Les ilots de ferrite formée dépendent de la composition chimique (notamment la proportion de Cr et Ni) de la zone fondue. Elle peut être prédite avec une approximation souvent suffisante en calculant les concentrations en chrome et nickel équivalents et en se reportant au diagramme de Schaeffler (**Figure II-10**) ou au diagramme WRC 92 (**Figure II-11**). [36,48].

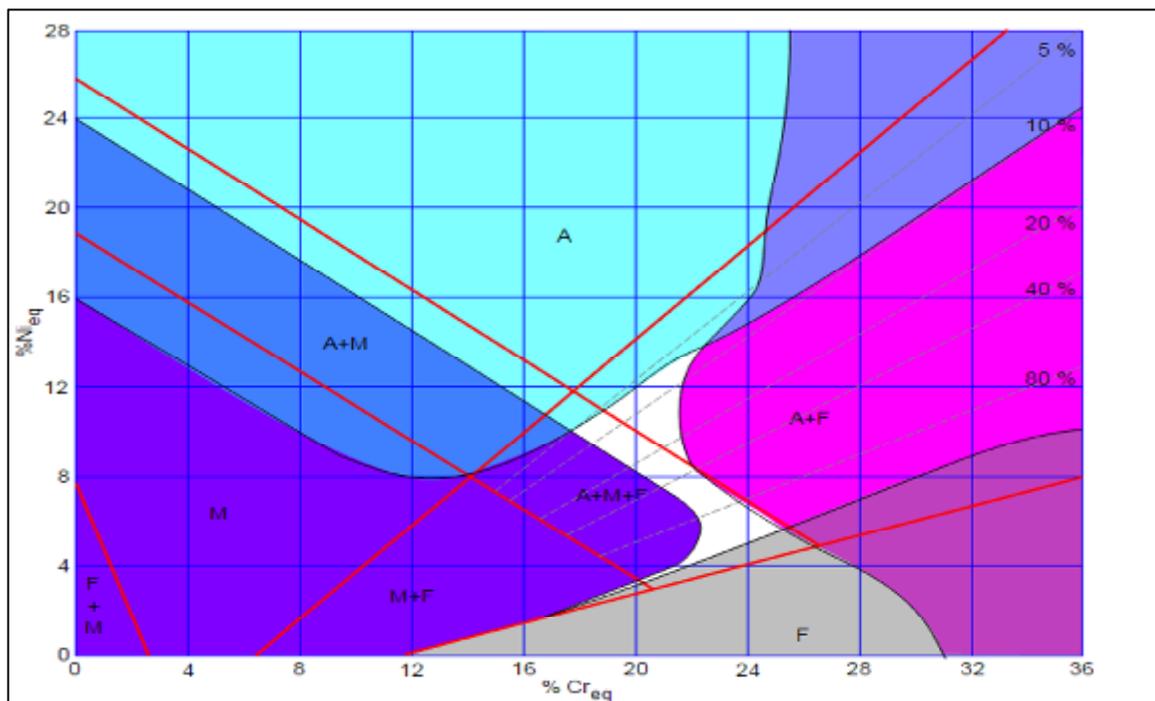


Figure II-7 : Diagramme de Schaeffler [Schaeffler, 1949] [37].

A : austénite.

F : ferrite.

M : martensite.

5 à 80% : pourcentage en masse de la ferrite dans l'austénite.

Zones de risques :

Bleu clair : fissuration à chaud.

violet : fissuration à froid.

Rose : fragilisation par transformation.

Gris: fragilisation par croissance des grains.

Blanc : zone idéale.

- ✚ Le maintien de l'acier 316L à des températures qui varient entre 450°et 900° va donner la naissance à la phase σ (composée Fe-Cr à 45% Cr) qu'elle la particularité d'être fragile ce qui implique une diminution de la résistance à la corrosion et à la résilience [36].
- ✚ Le carbone possède une grande affinité avec le chrome (dans l'intervalle de température 600-750°C), des carbures de chrome (M_2C_6 ou $M_7C_3...$) peuvent se former, préférentiellement aux joints de grain, joints de macles ou défauts : c'est la «sensibilisation» du matériau [48].
- ✚ la précipitation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ (94 % de Cr) après maintien entre 420 et 650 °C peut entraîner, suivant la teneur en carbone de l'acier, une déchromisation importante au voisinage des joints de grains et donc une grande sensibilité à la corrosion de ces zones (corrosion intergranulaire) [36].

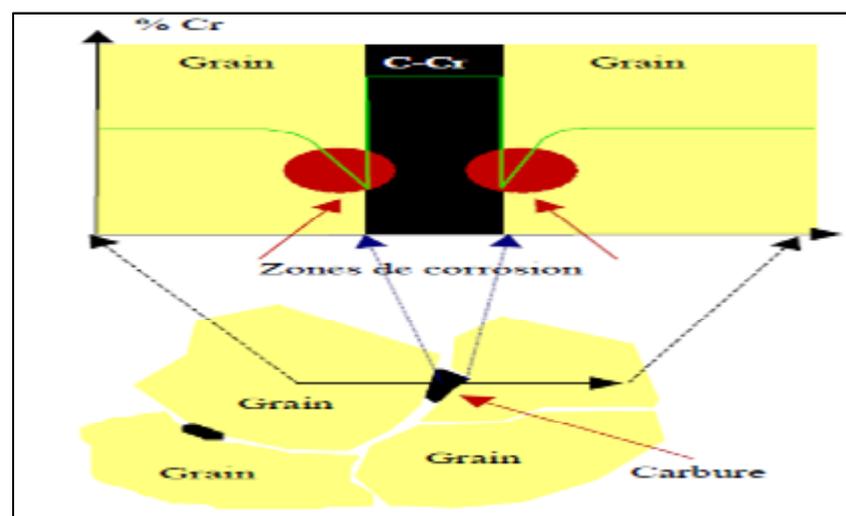


Figure II-8 : appauvrissement local en chrome produira une corrosion intergranulaire [36].

- ✚ Le temps de maintien nécessaire à la précipitation étant très court, ce phénomène se produira dans la zone affectée thermiquement par le soudage.
- ✚ Pour éviter ce phénomène, on peut soit ajouter des éléments comme le Ti ou le Ni, qui vont précipiter avec le carbone à la place du chrome, soit diminuer la teneur en carbone, et ajouter de l'azote pour compenser le « manque » de carbone. C'est le cas pour le 3 16L dit acier à azote [48].

II-9- Diagramme WRC 92 :

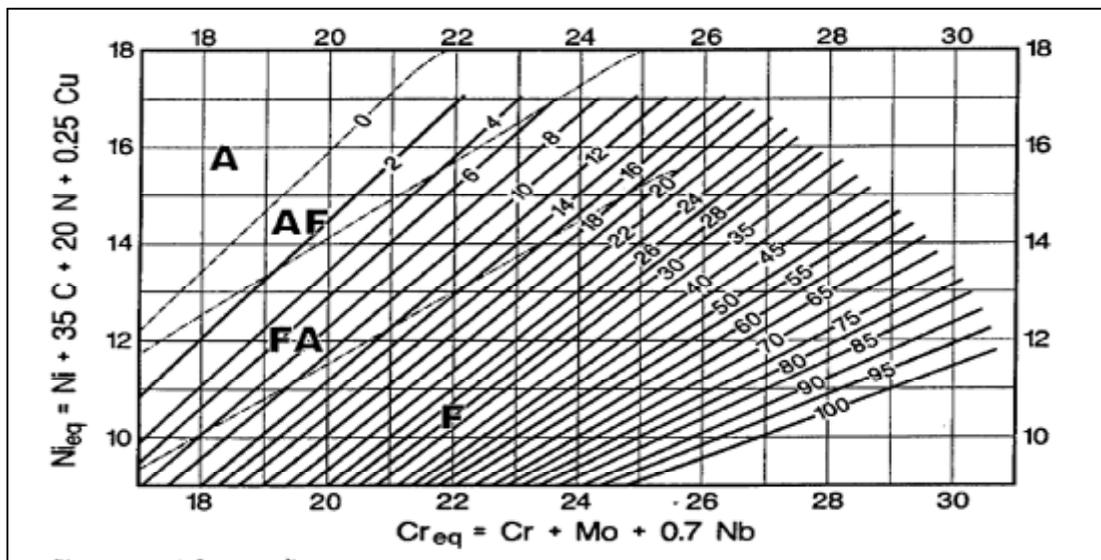


Figure II-9 : Diagramme WRC 92 [Kotecki, 1992] [36].

Pour évaluer la sensibilité à la fissuration d'une soudure on fait appel au diagramme WRC 92, par une analyse de métal déposé et le taux de dilution, en projetant ces données sur la courbe on déterminera l'appartenance de métal étudié dans les domaines : A, AF, FA ou F.

Sinon on peut appliquer la deuxième méthode, en utilisant un « feritoscope », on peut déterminer le nombre de ferrite de notre métal et on le projette sur le diagramme ensuite on le classe soit :

- ✚ des soudures solidifiant dans les domaines FA (le plus résistant) ou F si le nombre de ferrite est supérieur à 4.
- ✚ (A ou AF, ou $FN < 4$) c'est la zone de risque. on aura tout intérêt, à moins que les spécifications l'interdisent, à modifier le choix du produit d'apport ou la procédure de soudage (taux de dilution) de manière à rejoindre les domaines FA ou F.

Enfin, pour les cas où cela s'avère impossible, il faudra s'astreindre à soigner les formes de cordon, minimiser le bridage et utiliser une faible vitesse de soudage [36].

III-1-Introduction :

Dans la majorité des cas, les matériaux constitutifs d'objets ou de structures fabriqués par l'homme sont utilisés dans des environnements plus ou moins pollués où les métaux et alliages ne sont pas stables. Il suffit pour s'en convaincre d'observer que la très grande majorité des métaux n'existent pas à l'état natif dans la nature mais doit être extraite à partir de minerais. Dans ceux-ci, les métaux existent à l'état ionique ou de moins « oxydé ». La métallurgie élaborative s'efforce, par rapport d'énergie et de matière « d'amener ces ions » à l'état métallique, qu'il aura une tendance spontanée à retourner à l'état oxydé. La corrosion correspond à ce retour, dans la mesure où ces ions vont souvent passer dans le milieu aqueux environnant en faisant perdre au matériau son intégrité. Dans d'autre cas, les produits de corrosion vont rester en surface sous formes solides (oxydes, hydroxydes, carbonates...). Ils peuvent même donner naissance à une autoprotection, appelée la passivation. En pratique industriel la corrosion coute cher [6]. Du fait de la diversité à la fois des milieux rencontrés et des contextes industriels dans lesquels s'exerce la prévention, la corrosion pétrolière s'avère sans doute encore plus spécifique qu'ailleurs [39], dont la plus grande victime de ce phénomène c'est Le réseau de pipelines. Elle cause aussi de graves problèmes environnementaux et économiques [40,41].

III-2-Définition de la corrosion :

La corrosion métallique c'est l'Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [7].

III-3-Principales formes de la corrosion :

Il existe 5 principaux types de corrosion parmi eux on a: la corrosion localisée (corrosion par piqûres et corrosion intergranulaire) et la corrosion généralisée.

III-3-1-la corrosion localisée :

III-3-1-1-Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûre (**Figure III-1**) est la rupture locale du film passif de l'acier inoxydable provoquée par un électrolyte riche en chlorures et/ou sulfures [3] ou à des passivations incomplètes

en milieu corrosif (inhibiteur en quantité insuffisante) [1]. Selon le schéma de la (Figure III-2), ce type de corrosion comprend au moins deux étapes : L'amorçage (Figure III-2a), l'autre de propagation (Figure III-2b) [21]. La première correspond au temps nécessaire pour aboutir à un défaut mesurable par destruction locale de la passivité. Sur les aciers inoxydables, l'amorçage des piqûres a généralement lieu sur des inclusions de type MnS. Le mécanisme de la phase de propagation est tout à fait analogue à celui de la corrosion par effet de crevasse. La corrosion par piqûres peut affecter la plupart des matériaux passivables (c'est-à-dire recouverts d'un film protecteur de produits de corrosion [4]) : aciers, aciers inoxydables, alliages de nickel, de titane, d'aluminium, de cuivre, etc.

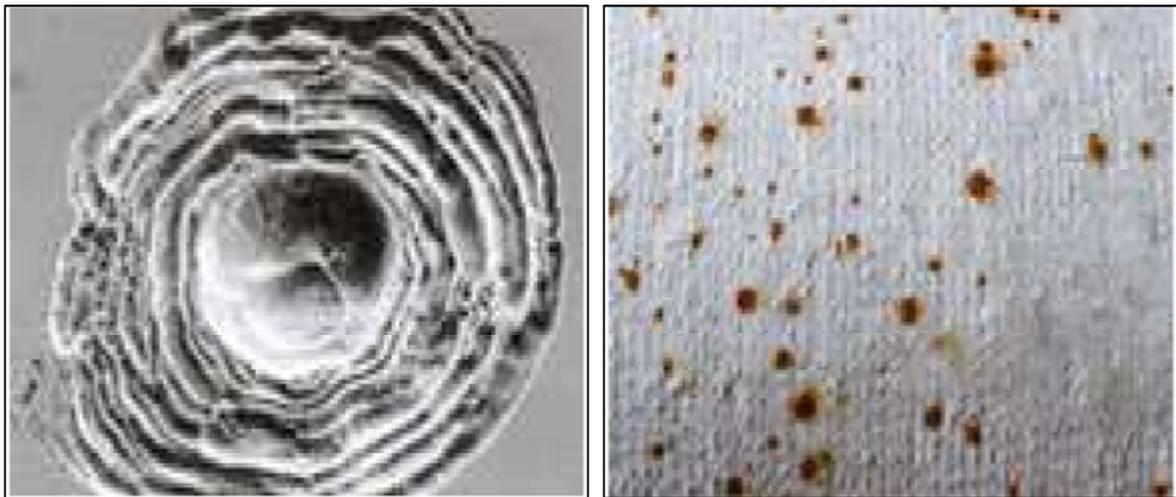


Figure III-1 : corrosion par piqûres [21].

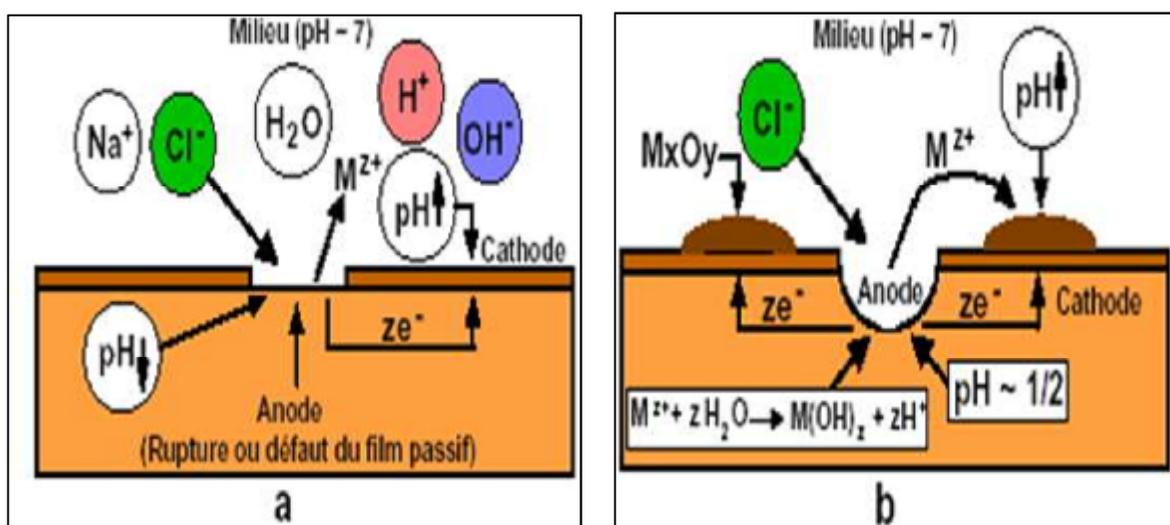


Figure III-2 : Schéma du processus de corrosion par piqûres : a) amorçage, b) propagation [21].

III-3-1-2-Corrosion intergranulaire :

Comme son nom l'indique, cette corrosion se manifeste par une attaque préférentielle des joints de grains du métal [1]. Elle est liée à la précipitation de carbure de chrome le long des joints. Pour qu'elle se produise, trois conditions doivent être remplies :

- Au moins 0,035 % de carbone,
- Une sensibilisation par un maintien à une température de 400 à 800° (notamment par le biais du soudage).
- Un milieu extérieur acide avec un pouvoir oxydant compris entre deux limites bien définies.

Cette corrosion est particulièrement vicieuse car elle se développe dans des endroits confinés, à des niveaux de liquide minimum et elle provoque très souvent la ruine de l'assemblage [2]. Les cas les plus classiques concernent les aciers inoxydables et plus généralement tous les alliages fer-chrome-nickel. En effet, sous l'effet d'un traitement thermique à température moyenne (600 - 700°C), on provoque dans ces alliages une précipitation de carbures de chrome (Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3) qui entraîne, au voisinage immédiat de ces précipités, une diminution importante de la teneur en chrome rendant ainsi l'alliage localement très corrodable. Les aciers présentant cette structure sont dits "sensibilisés".

En pratique, ce phénomène est surtout associé aux opérations de soudage qui peuvent sensibiliser le métal à quelques millimètres de part et d'autre du cordon de soudure. On peut s'affranchir de ce type de corrosion intergranulaire (**Figure III-3**) en utilisant des aciers à bas carbone (moins de 0,03 % dénomination L dans l'appellation AISI: 304L, 316L) [1].

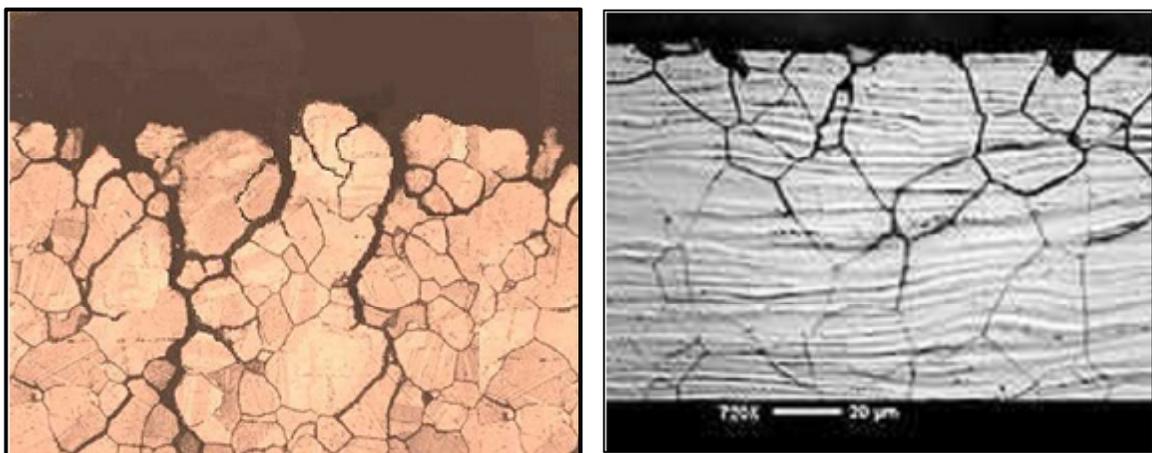


Figure III-3 : Corrosion Intergranulaire [21].

III-3-2-la corrosion généralisée (uniforme) :

Cette corrosion se traduit par une dissolution de tous les points constitutifs de la surface du matériau qui sont attaqués par le milieu corrosif. Ceci se traduit à l'échelle micrographique par une diminution globalement régulière de l'épaisseur ou perte de poids (corrosion uniforme ou généralisée par opposition à la corrosion localisée). La corrosion uniforme (**Figure III-4**) se rencontre le plus fréquemment lorsque l'alliage métallique est en contact avec des acides tels que : l'acide sulfurique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, etc. [5]. En effet, au-dessous d'une valeur de pH critique, le film passif protégeant l'acier inoxydable n'est plus stable et le matériau subit une dissolution active généralisée. Plus le milieu est acide, plus la vitesse de corrosion et la perte d'épaisseur de l'inox en résultant seront élevés [3].



Figure III-4 : Corrosion Généralisée (rouille) des pièces en acier [21].

III-4-les grands facteurs de corrosion :

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux dans le tableau suivant (**Tableau III-1**) [3]:

Le matériau	Le milieu	La conception	Le temps
-Composition chimique -Elaboration -Etat métallurgique (traitements thermiques et mécaniques)	-Nature chimique -Concentration -Impuretés -PH (acidité) -Pression	-Etat de surface -Forme -Assemblage (Soudure...) -Contact avec le milieu -Sollicitations mécaniques	-Evolution des tensions -Température variable -Vieillessement de la structure

Tableau III-1: Les différents facteurs de la corrosion [3].

III-5- Approche électrochimique de la corrosion:

La nature électrochimique de la corrosion est liée par essence à la structure atomique et électrique de la matière. On sait en effet que cette dernière est constituée de particules élémentaires porteuses de charges électriques, les ions et électrons, et de particules électriquement neutres, les atomes et les molécules.

✚ La **phase métallique** solide comprend ainsi (**Figure III-5**) :

-des ions métalliques M^{n+} disposés suivant un empilement compact rigide : c'est le réseau cristallin
-des électrons de conduction e^- , libres de se déplacer n'importe où dans le volume du métal. Ces électrons libres se comportent comme un gaz baignant les ions immobiles du réseau cristallin. Ce sont eux qui confèrent à la phase métallique les propriétés d'emploi usuelles des métaux, et en premier lieu leur très grande conductibilité électrique.

✚ La **phase aqueuse** est un liquide, qui comprend : des molécules neutres, eau, composés divers non dissociés et des ions positifs (cations) ou négatifs (anions) ; c'est la mobilité de ces ions qui confère à l'eau sa conductibilité électrique.

Les ions métalliques Mn^+ sont des constituants à la fois de la phase métallique et de la phase aqueuse. À l'interface entre les deux phases, ils peuvent donc passer indifféremment d'une phase à l'autre. Ce transfert correspond à un transport de charges électriques, et donc à un courant électrique passant d'une phase à l'autre (**Figure III-5a**). Les électrons libres ne sont pas par contre des constituants de la phase aqueuse. Un électron libre ne peut donc pas passer directement dans cette

phase. Il ne peut le faire que s'il est fixé sur une des particules élémentaires de la phase aqueuse. Cette particule verra alors sa charge électrique diminuée d'une charge élémentaire. En termes de chimie, cette opération correspond à une réduction de l'espèce chimique correspondante. Là encore, ce transfert de charges électriques correspond à un courant électrique circulant d'une phase à l'autre (Figure III-5b) [24].

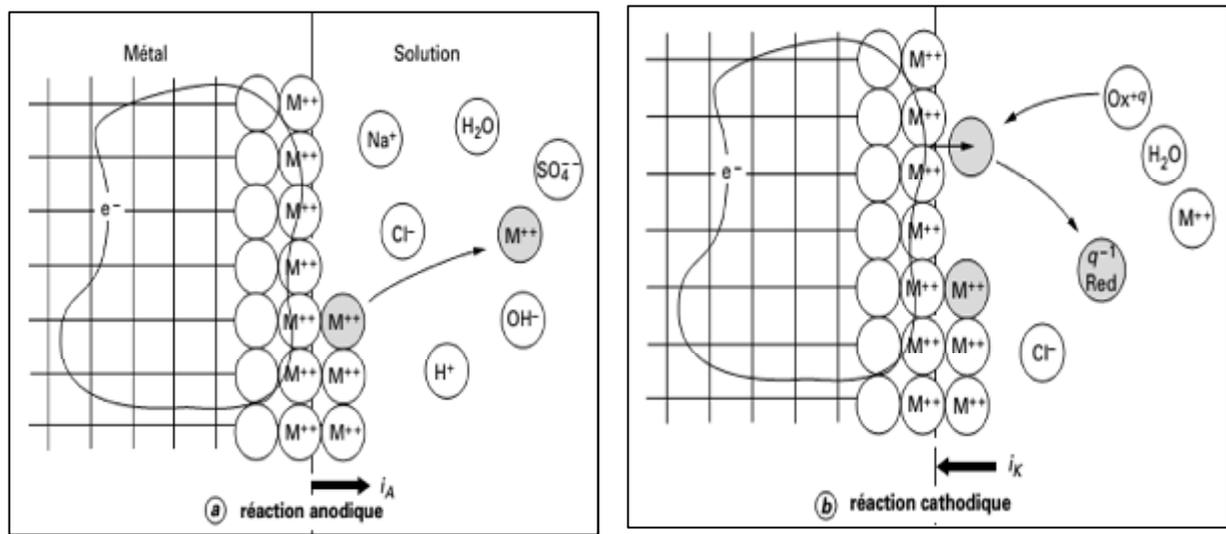


Figure III-5: Structure à l'interface métal-solution [24].

La corrosion d'une phase métallique nécessite quant à elle le passage en solution de tous les constituants du métal, les ions et les électrons. Elle fait intervenir au minimum deux réactions distinctes et indépendantes, une réaction anodique (oxydation du métal), et une réaction cathodique, (transfert d'électrons avec réduction simultanée d'un constituant de la solution).

III-6-Méthodes d'étude de la corrosion :

III-6-1-Méthodes électrochimiques :

III-6-1-1-Mesure du potentiel :

La potentiométrie est une méthode qui consiste à suivre l'évolution du potentiel de l'électrode de travail (dit aussi de dissolution ou de corrosion). En fonction du temps. C'est la tension d'un métal ou d'un alliage métallique mesurée par rapport à une électrode de référence dont le potentiel est connu et stable lorsque aucun courant ne s'écoule de ou vers cet échantillon. L'unité de mesure est le V/réf.

Les courbes (potentiel/temps) permettant d'apprécier les modifications de la surface de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans le milieu. Elles renseignent aussi sur la dégradation, la passivation ou l'immunité d'une surface métallique [27].

On peut utiliser l'électrode standard d'hydrogène dont le potentiel est par convention fixé à 0:



Mais on préfère d'utiliser une électrode au calomel saturé (ECS), $E = 0.241/\text{ENH}$, qui est une électrode pratique et d'emploi simple [22].

III-6-1-2- courbes potentiodynamiques où (intensité-potentiel) :

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel.

Elle utilise les portions de la courbe [$i = f(E)$], éloignées du potentiel de corrosion, c'est-à-dire les portions pour lesquelles ($E \gg \gg E_{\text{corr}}$) (domaine anodique) ou ($E \ll \ll E_{\text{corr}}$) (domaine cathodique).

L'équation de Buttlar –Volmer peut être simplifiée.

Pour la branche anodique ($E \gg \gg E_{\text{corr}}$)

$$i_a = i_{\text{corr}} \cdot \exp \left[\frac{2.3 (E - E_{\text{corr}})}{b_a} \right] \quad (1.0)$$

$$E - E_{\text{corr}} = a + b \cdot \log (i) \quad (1.1)$$

$$\eta_a = a + b \cdot \log (i) \quad (1.2)$$

Où

η_a : surtension anodique.

a : l'ordonnée à l'origine

Pour la branche cathodique ($E \lll E_{\text{corr}}$)

$$i_c = -i_{\text{corr}} \cdot \exp \left[\frac{-2.3 (E - E_{\text{corr}})}{b_c} \right] \quad (1.3)$$

$$E - E_{\text{corr}} = a' + b' \log (i') \quad (1.4)$$

$$\eta_c = a' + b' \log (i') \quad (1.5)$$

Les équations (1.2) et (1.5) représentent la loi de Tafel sous sa forme simplifiée et indiquent que la courbe $\log (i) = f(E)$ doit présenter une partie linéaire appelée couramment « droite de Tafel ». Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (**Figure III-6**) [45].

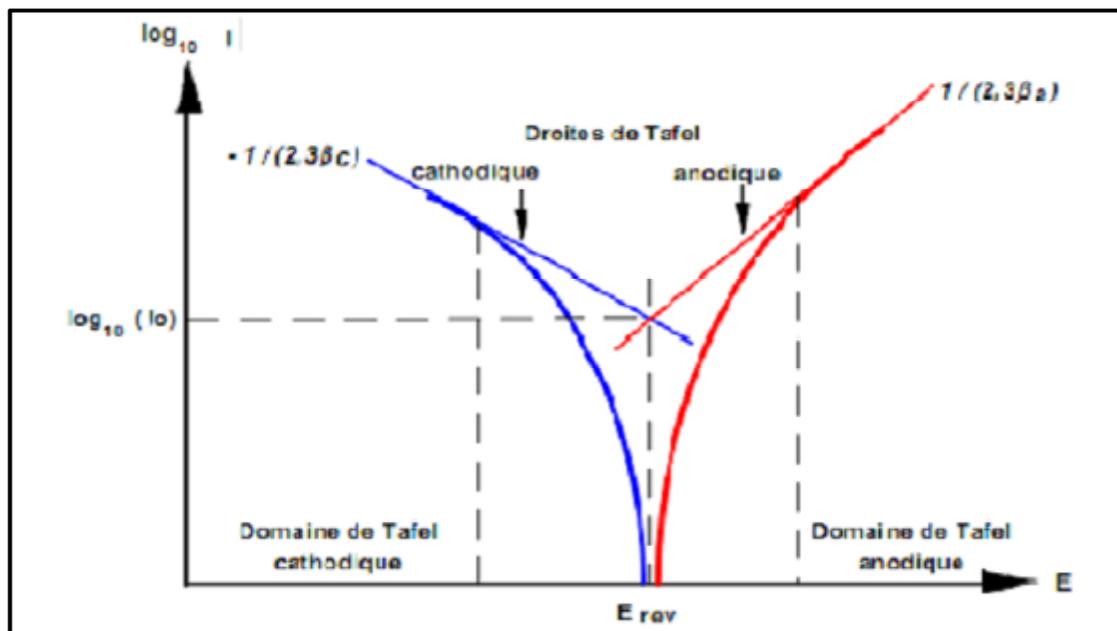


Figure III-6: Courbe de TAFEL [46].

III-7- Aspect économique de la corrosion :

La corrosion entraîne chaque année des pertes matérielle considérable pour l'industrie pétrolière jusqu'à des milliers de dinars [23]. On estime qu'elle détruit le quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par secondes [8]. Et plus grave encore, la corrosion peut causer des dommages irréversibles à l'environnement et même des pertes en vie humaine. En effet, la corrosion est susceptible d'affecter l'équipement et les structures en service en provoquant des graves altérations telles que: la diminution d'épaisseur, la génération des piqûres ... etc. [23].

Les canalisations, dont les matériaux constitutifs les plus répandus sont les aciers (aciers inoxydables aciers non alliés...etc.) sont particulièrement exposées à la corrosion, soit de leur environnement (comme pour les tubes enterrés), soit de leur fonction (transport de fluides corrosifs). Parmi les conséquences: la rupture sous pression; la fuite de liquides corrosifs, dangereux ou polluants et l'arrêt prolongé d'unités importantes de production (énergie, pétrochimie, etc.) [46].

III-8- Les anions agressifs :

Souvent, on suppose que le potentiel de l'acier et son taux de corrosion en circuit ouvert dans les solutions aérées stagnantes des anions agressifs ne varie pas avec la nature ou la concentration de ces derniers. Cependant, le taux de corrosion est principalement dépendant du taux d'approvisionnement en oxygène de la surface du métal. Ce comportement est confirmé dans un intervalle de concentration variant de 0.01M à 1M des solutions NaCl [25]. L'influence des chlorures, très connue sur les aciers inoxydables, est en fait aussi très forte sur les aciers doux. Ceci provient de concentrations élevées en ions $[Cl^-]$ très mobiles et en ions $[H^+]$ dans les zones anodiques. Une concentration importante d'une eau en $[Cl^-]$ augmente la probabilité de création d'une infinité de micro-anodes et la corrosion par piqûres ; c'est aussi une explication de la corrosion par piqûres au niveau des soudures hétérogènes. Le paramètre important de la corrosion par les chlorures est la teneur en oxygène.

Les ions chlorures, de très faibles dimensions, traversent facilement les dépôts recouvrant éventuellement les métaux et pénètrent dans les microfissures qui existent toujours à la surface du métal. Ils réagissent alors avec l'eau en produisant de l'acide chlorhydrique. Il s'ensuit localement des pH très faibles qui accélèrent la corrosion du métal qui se poursuit en profondeur (corrosion intergranulaire) [26].

III-9-Le phénomène de passivation :

Le phénomène de passivité présente une très grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables. Il se caractérise par la présence d'un film très mince (épaisseur de l'ordre de 10 à 20 nm), appelé film passif ou couche passive, à la surface de l'alliage métallique qui rend sa vitesse de corrosion négligeable. Le film passif, fortement solidaire du substrat métallique, empêche ou rend insignifiant le contact entre l'alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant. Pour que le phénomène de passivité puisse s'établir, et se maintenir, il est nécessaire que l'alliage fer-chrome ait une teneur minimale en chrome de l'ordre de 11 %. Autrement dit, il existe un effet de seuil au-delà duquel le phénomène de passivité peut exister et au-dessous duquel il est impossible. De plus, si la couche passive devait être détruite localement par suite d'un endommagement accidentel (rayure par exemple), elle possède la propriété de pouvoir se reconstituer dans un grand nombre de milieux, ce qui traduit la propriété d'autopassivation de l'alliage métallique dans ce milieu.

Les aciers inoxydables sont autopassivables et le schéma le plus utilisé pour décrire le mécanisme de formation de leur couche passive est emprunté à Okamoto et Shibata. Sa représentation schématique est donnée à la **(figure III-7 (a))**. Les principaux éléments constituant le film passif sont d'une part des cations M^{z+} de valence z provenant du substrat et ayant une grande affinité pour l'oxygène. Il s'agit, pour l'essentiel, de Cr^{3+} et de Fe^{3+} , bien que le fer puisse se trouver sous la forme de Fe^{2+} . D'autre part, aux éléments en provenance du substrat, vont être associées des molécules d'eau provenant de la solution. Certaines molécules d'eau ayant perdu des protons H^+ , de manière à équilibrer la présence des cations métalliques donnent naissance à des ions OH^- et O^{2-} , constitutifs de l'hydroxyde ou de l'oxyde. Le film passif des aciers inoxydables est de type bicouche. La couche interne, en contact direct avec le substrat métallique, est formée d'oxydes de type $(Fe,Cr)_2O_3$ et la couche externe est essentiellement constituée par des hydroxydes de type $Cr(OH)_3 \cdot nH_2O$. La représentation schématique de ce modèle bicouche est donnée à la **(Figure III-7 (b)) [5]**.

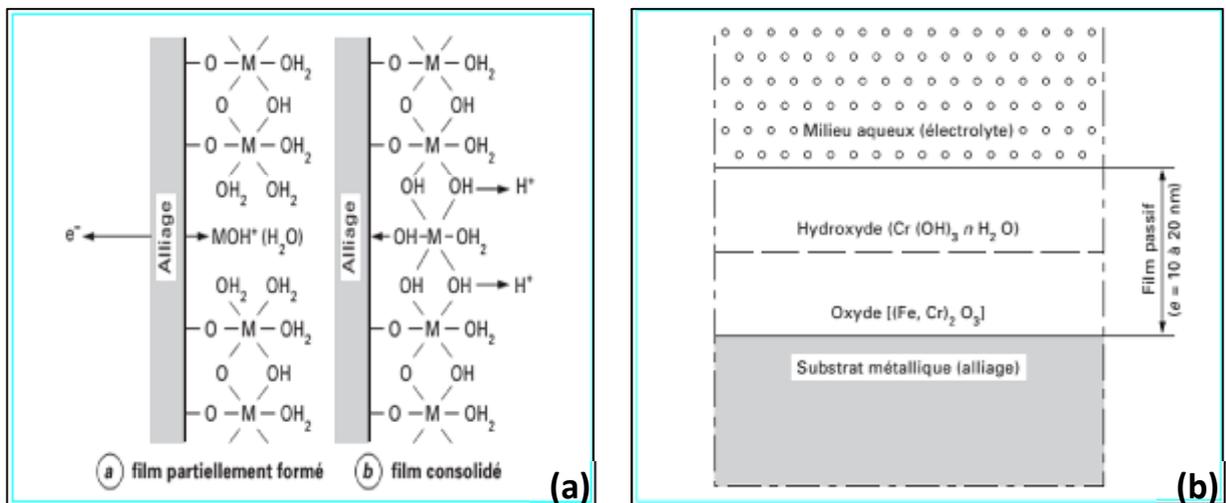


Figure III-7 : (a) Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamoto et Shibata, (b) Modèle bicouche du film passif [5].

III-10-La lutte contre la corrosion :

La corrosion affecte le comportement mécanique et physique des matériaux, ce qui diminue l'intégrité des structures en réduisant les épaisseurs, en favorisant l'amorçage des fissures et en provoquant des attaques localisées. Un certain nombre d'actions simples et efficaces peuvent être réalisées, entre autres :

- ✚ Lors de la conception d'un objet, d'une structure, d'un appareil, ou lors d'une opération de maintenance, il faut prendre en compte la totalité des paramètres chimiques, physiques, thermiques, mécaniques et métallurgiques qui sont associés au système matériau-surface-milieu.
- ✚ L'établissement du cahier de charge doit être complet et précis pour que toutes les personnes concernées soient en mesure, dès le stade de la conception, de choisir judicieusement le (ou les) moyen(s) à mettre en œuvre, tant au niveau de la prévention et de la maintenance qu'à celui de la lutte. Seule une démarche globale permettra de développer une politique éclairée d'anticorrosion [6].

III-11- Utilité des soudures hétérogènes :

Ce type de soudures est généralement utilisé :

- ✚ Ils sont utiles pour éviter diverses formes de corrosion.

- ✚ Les conduites et les coudes soumis à des contraintes plus élevées et plus sévères, ce qui nécessite d'utiliser des matériaux plus ductiles à ce niveau.
- ✚ La fixation des tubes de canalisation (généralement des hydrocarbures) avec des supports de fixation.
- ✚ Ce type d'assemblage est utilisé fréquemment pour les transitions (ouvrages concentrés /canalisation) [11]



Figure III-8 : images d'utilités des soudures hétérogènes [11].

IV-1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons : les matériaux d'étude, les différentes techniques expérimentales et de caractérisation utilisées dans ce travail. Nous aborderons le principe de fonctionnement et le mode opératoire de chaque appareillage ainsi que les paramètres d'expérience.

IV-2-Attaques chimiques :

Pour faire apparaître la micro structure, et mettre en évidence les phases constitutives des différents échantillons, une attaque chimique a été effectuée dans deux solutions :

1. Nital (97ml d'éthanol + 3 ml de HNO_3) : pour révéler la microstructure d'un acier au carbone (A333 Grade 6 désignations ASTM)
2. Solution acide oxalique (10g d'acide oxalique + 100 ml eau distillé) : c'est une attaque électrochimique qui sert à la mise en évidence de la microstructure de l'acier inoxydable (316L).

IV-3-Préparation des échantillons :

IV-3-1-Prélèvement des échantillons :

Plusieurs échantillons dont la surface varie de 35 mm^2 à 72 mm^2 ont été prélevés à partir d'un tube de 76,2 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur.



Figure IV-1 : tube à partir de lequel les échantillons sont prélevés.

Le découpage a été effectué avec lubrification sous un jet d'eau afin d'éviter tout échauffement susceptible de modifier les propriétés et caractéristiques du matériau.



Figure IV-2 : Échantillons des métaux de base découpés.



Figure IV-3 : Échantillons de zone fondue et de zone affectée thermiquement découpés.

Le découpage a été fait au niveau de CRTI (Centre de Recherche en Technologie Industrielle).

IV-3-2-Préparation des surfaces :

L'efficacité des résultats d'étude de la corrosion est étroitement liée à l'état de surface des matériaux, d'où la nécessité d'une bonne préparation de surface. la séquence des opérations est la suivante :

-Un fil de cuivre soudé au centre de la pièce métallique (Pour assurer le contact électrique entre l'interface (métal/solution) et la chaîne de mesure. L'ensemble est enrobé d'une résine thermodurcissable, de manière à ne laisser exposer à l'électrolyte que la section à examiner des échantillons, de surfaces différentes.

Pour une meilleure reproductibilité des résultats, l'ensemble des échantillons ont subi un prépolissage, et un polissage de finition. Le prépolissage a été réalisé à l'aide d'une polisseuse (**Figure IV-4**) sous jet d'eau (pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon), en utilisant des papiers abrasif de granulométrie de 120,400, 800 et 4000.

Le polissage de finition a été réalisé à l'aide d'une pâte diamantée ($3\mu\text{m}$).



Figure IV-4 : polisseuse.

IV-4-Techniques expérimentales : plusieurs techniques ont été utilisées à savoir :

IV-4-1- Chaîne de mesure électrochimique :

C'est un dispositif expérimental qui nous a permis d'accélérer les phénomènes de dégradation, par rapport à l'évolution naturelle et d'accéder à certains paramètres caractéristiques de corrosion comme : les potentiels de corrosion (E_{corr}), courants de corrosion (I_{corr}), vitesses de corrosion (V_{corr})...etc.

Les essais de corrosion ont été réalisés au niveau du laboratoire de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie Annaba (ENSMM).

Pour effectuer ces essais électrochimiques on a utilisé une chaîne de mesure qui comprend :

- Un potentiostat/Galvanostat **BIOLOGIC SP300**.
- Une cellule électrochimique de forme cylindrique thermostatée, en verre, à double paroi de capacité de 250 ml. Elle est équipée d'un montage conventionnel à trois

électrodes : Travail (ou échantillon), référence (une électrode au calomel saturé (ECS) dont l'extrémité est placée près de l'électrode de travail) et contre électrode (ou électrode auxiliaire) qui étant une grille de platine (pour assurer le passage du courant).

- Un ordinateur qui pilote l'ensemble et effectue l'acquisition et le traitement des données grâce au logiciel **EC-Lab**, pour les méthodes stationnaires (méthode de Tafel) et un logiciel **ORIGIN 6.0** pour la spectroscopie d'impédance électrochimique.

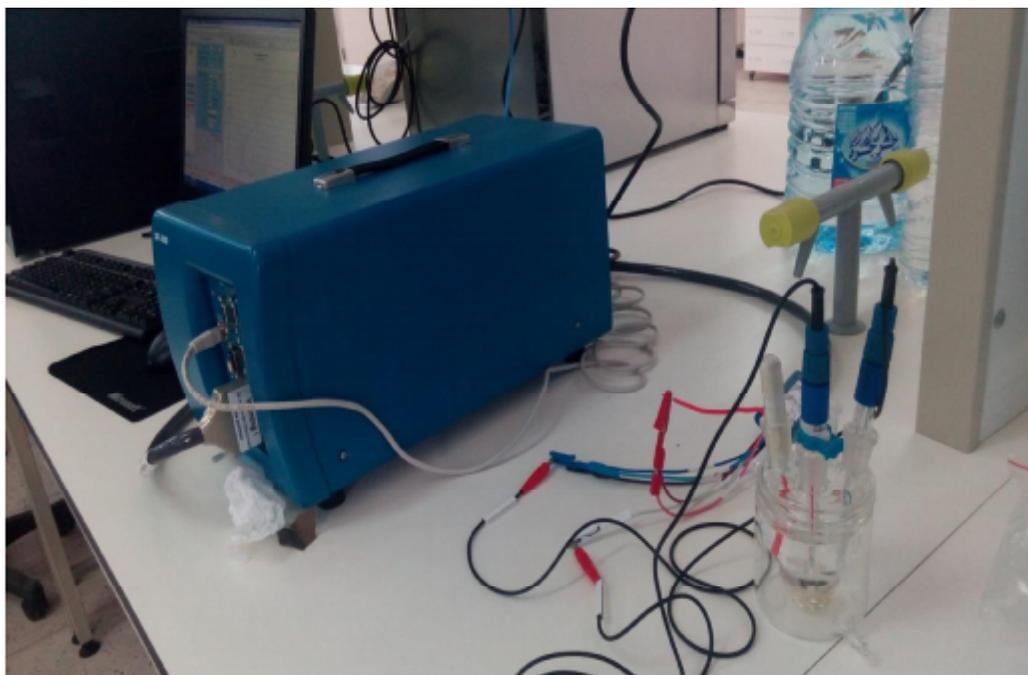


Figure IV-5: chaîne de mesures électrochimiques.

IV-4-2- La microscopie optique (MO) :

Pour mettre en évidence la microstructure de nos échantillons, nous avons effectué l'examen métallographique des surfaces polies au microscope optique.

Principe du microscope optique :

Son principe repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la caméra [20].

La (figure IV-6) montre la photo du microscope optique utilisé.

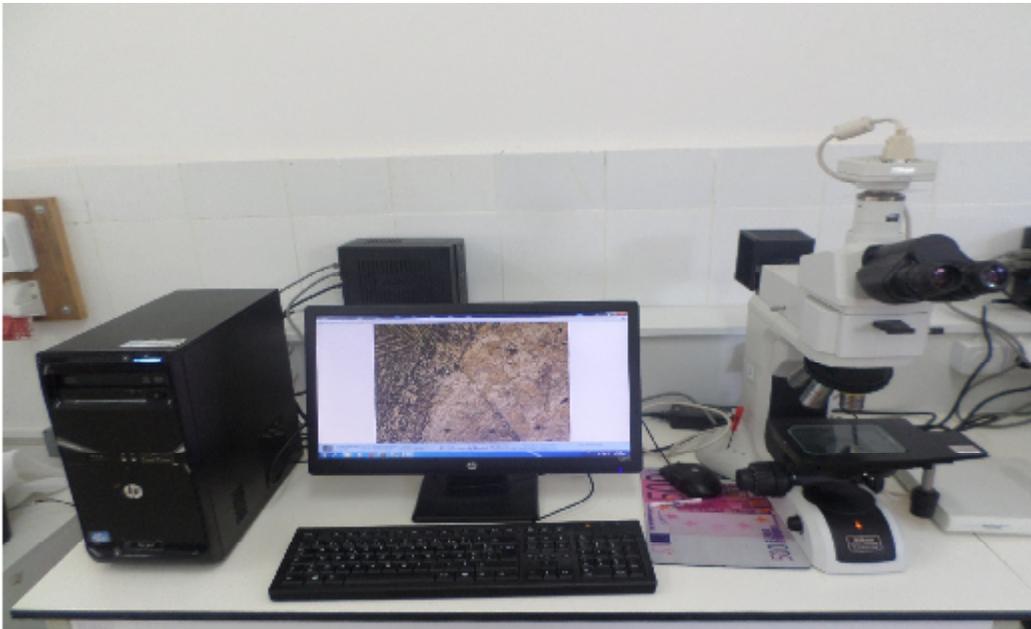


Figure IV-6 : microscope optique.

IV-4-3-Le microscope électronique à balayage **MEB** (Scanning Electron Microscope SEM).

C'est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.

✚ Principe de fonctionnement :

En relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon, le **MEB** fournit des images de manière séquentielle en balayant la surface de matériau par un faisceau d'électrons. L'impact d'un faisceau d'électrons sur la surface d'un échantillon engendre une émission des électrons secondaires et rétrodiffusés. Ces derniers sont détectés dans des détecteurs. Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface. La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue.

Les différentes particules émises : électrons secondaires, rétrodiffusés et photons X permettent une polyvalence d'analyse :

- Une analyse en fluorescence X.
- Une analyse en composition chimique...etc.

Pour obtenir la meilleure analyse possible il faut réussir à faire des compromis [42].

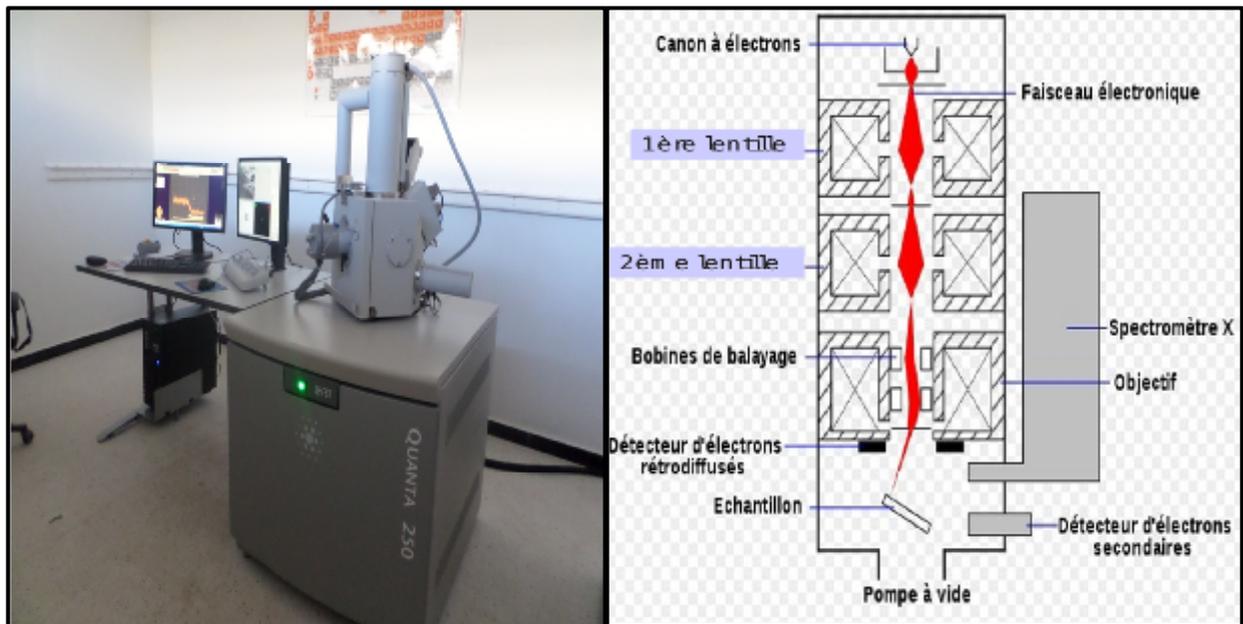


Image de MEB de l'ENSMM

principe d'un MEB [42].

Figure IV-7 : Le microscope électronique à balayage (MEB).

IV-4-4- Essai de Traction :

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des joints soudés (limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture) on applique une contrainte uniforme uni axiale de traction sur les éprouvettes normalisées qui contient ces joints et on enregistre l'allongement résultant.

Le but de cet essai est de vérifier que la rupture sous la surcharge se produira dans le métal de base plutôt que dans le métal fondu ou la ZAT.

a) Préparation des éprouvettes :

Selon la norme API 5L, L'éprouvette est obtenue par usinage ; d'un prélèvement d'un produit à section rectangulaire.

On emploie généralement des éprouvettes dont la section initiale et la longueur entre repères (L_0) sont liées par la relation :

$$L_0 = K \times \sqrt{S_0}$$

S_0 = Section initiale de la partie calibrée (mm^2).

K = coefficient donné = **5.65** ;

Eprouvette prismatique proportionnelle :

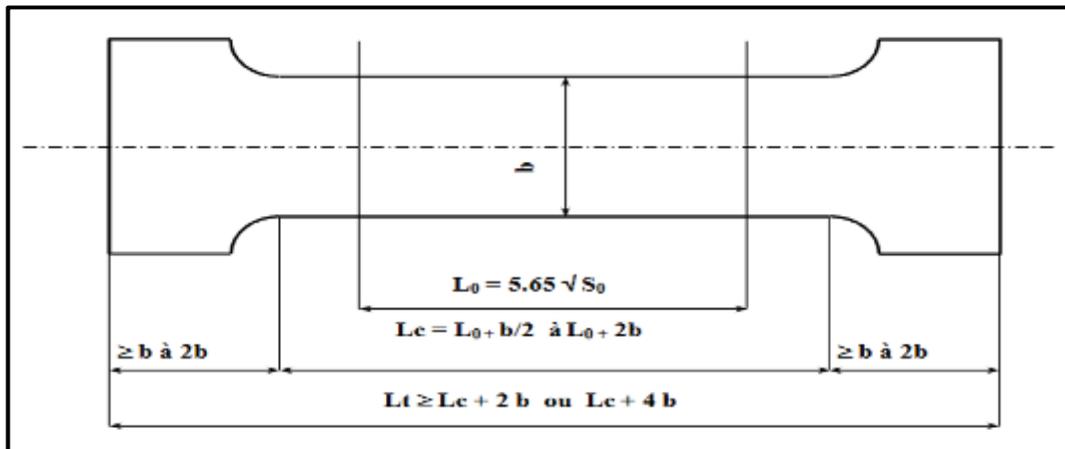


Figure IV-8: éprouvette de traction prismatique proportionnelle.

Les éprouvettes sont usinées avec les dimensions qui apparaissent dans le tableau ci-dessous:

Eprouvette	Dimensions
Eprouvette 1	230X25mm
Eprouvette 2	230x25mm

Tableau IV-1 : Dimensions des éprouvettes de traction.

b) Mode de traction :

Les essais de traction ont été réalisés dans le laboratoire des essais mécaniques de GTP (entreprise nationale des grands travaux pétroliers).

Pour réaliser ces essais on a utilisé une machine qui applique un effort par un vérin hydraulique ou agissant sur une vis attaquant une traverse mobile. Le déplacement de la traverse commande simplement la rotation de l'enregistreur à l'aide d'un fil tendu par un contrepoids (**Figure IV-9**). La vitesse de déplacement de la traverse est 30 mm/min.



Figure IV-9 : Machine de traction.

La machine est liée à un ordinateur et au cours de l'essai, une courbe de traction sera afficher sur l'écran qui présente la charge en fonction d'allongement d'éprouvettes (**Figure IV-10**). Cette courbe nous fournit les informations suivantes :

- une partie rectiligne correspondant au domaine d'élasticité ;
- le domaine de déformation plastique uniforme ;
- un maximum correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette, appelée couramment charge de rupture ;
- le domaine de striction dans lequel les déformations se localisent dans une zone limitée dont la section diminue rapidement ;
- et finalement la rupture de l'éprouvette.

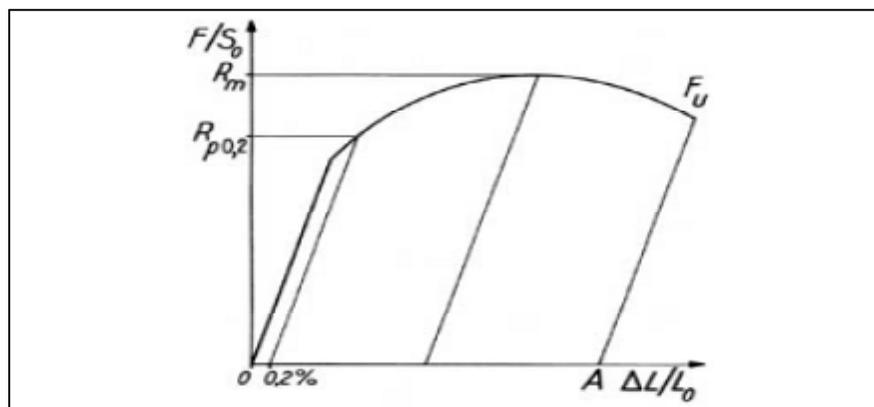


Figure IV-10 : Courbe de traction conventionnelle [49].

IV-4-5-Essai de Résilience :

L'essai de résilience par définition est la résistance au choc. L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule ; une éprouvette entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie absorbée pour détruire l'échantillon dans le but d'apprécier la qualité du métal de base plutôt que le métal fondu et la ZAT.

a) Préparation des éprouvettes :

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 (Figure IV-11).

b) Méthode de réalisation de l'essai de résilience :

Les essais de résilience ont été effectués au niveau du laboratoire de l'Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers (GTP).

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. Dans les conditions normalisées, cette chute fournit une énergie de 300 J et est animé, au moment du choc, d'une vitesse de déplacement de 5 à 5,5 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. Avant l'exécution de l'essai les éprouvettes ont été refroidies à -80°C et -196°C pendant 10 minutes par l'utilisation de la neige carbonique et l'azote, respectivement [49].

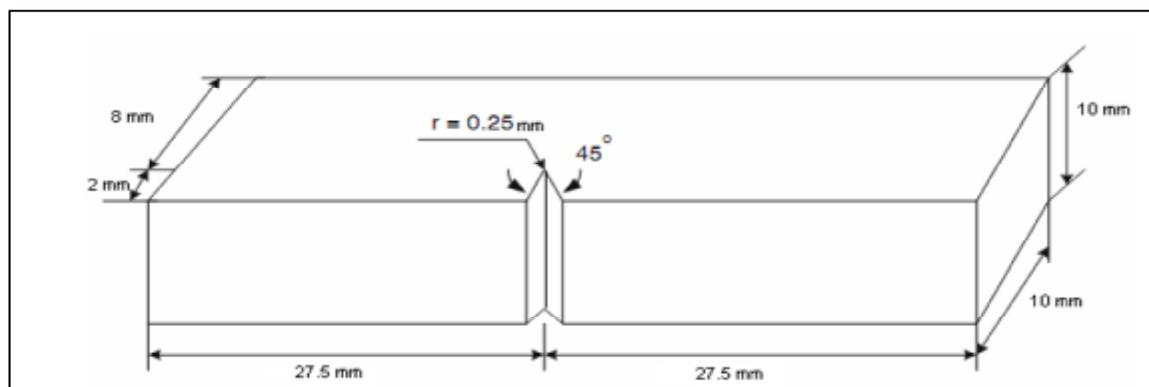


Figure IV-11: Forme de l'éprouvette de résilience et la position de l'entaille [49].

IV-4-6- Essai de micro-dureté (Vickers) :

Ce sont des essais destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants. Ils ont été réalisés en utilisant un microduromètre (**Figure IV-11**), avec un pénétrateur pyramide de diamant.

a) Principe :

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement rémanent d'un pénétrateur sous forme pyramidale en diamant à base carrée. L'angle entre deux faces opposées est de 136° . Après l'application d'une charge sur la surface à examiner [38], on mesure les deux diagonales **d1** et **d2** de ce carré. On obtient la valeur **d** en effectuant la moyenne de **d1** et **d2**. C'est **d** qui sera utilisé pour le calcul de la dureté [11].

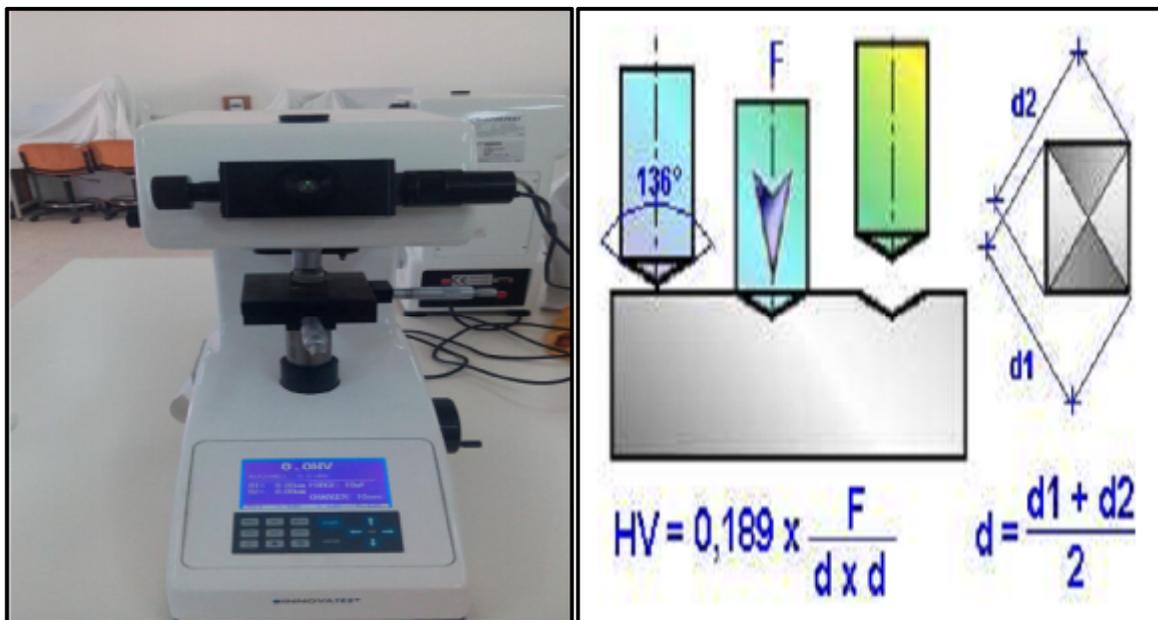


Image d'un duromètre.

Principe de microdureté [11].

Figure IV-12: Duromètre.**I-4-7- Essai de pliage à l'envers et à l'endroit :****a) Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes de pliage à l'envers et à l'endroit (voir la **Figure IV-12**) doivent être environ 230 mm de long et environ 25 mm de large et leurs bords longs doivent être arrondis [45].

b) Méthode de réalisation de l'essai de pliage :

Les éprouvettes de pliage à l'envers et à l'endroit doivent être pliées dans un gabarit d'essai de pliage. Chaque éprouvette doit être placée sur la matrice, la soudure se trouvant à mi-portée. Les éprouvettes de pliage à l'endroit doivent être placées l'endroit de la soudure vers l'intercalaire, et les éprouvettes de pliage à l'envers doivent être placées à la racine de la soudure vers l'intercalaire. Le plongeur doit être forcé dans l'intercalaire jusqu'à ce que la courbure de l'éprouvette ait environ une forme en U [45].

c) Exigences :

L'essai de pliage doit être considéré acceptable si aucune fissure ou autre imperfection dépassant la moindre valeur d'entre 1/8" (3 mm) ou la moitié de l'épaisseur de paroi nominale dans aucun sens n'est présente dans la soudure ou entre la soudure et la zone de fusion après le pliage.

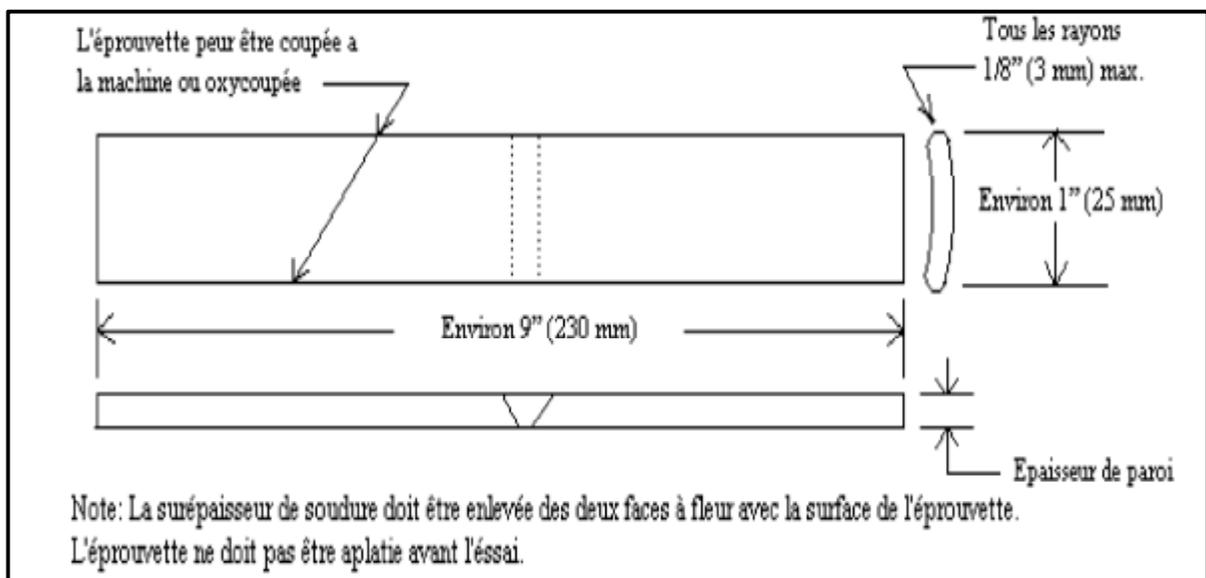


Figure 1V-13: Eprouvettes d'essai de pliage sur coté : épaisseurs de paroi supérieures 13 mm [49].

V-1-Analyse chimique :

Une analyse spectroscopique des différentes zones nous donne les résultats suivants :

➤ **Métal de base acier au carbone (A106 Gr.B) :**

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Pourcentage (%)	0,16	0,28	0,79	0,014	0,003	0,12	0,09	0,022	0,0075

Tableau V-1 : composition chimique de l'acier (A106 Gr.B).

➤ **Métal de base acier austénitique (316L):**

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Pourcentage (%)	0,014	0,46	1,39	0,025	0,001	16,90	11,10	3,19	0,056

Tableau V-2 : composition chimique de l'acier austénitique (316L).

➤ **Métal d'apport inox ER 316L :**

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Pourcentage (%)	0,02	0,30	1,50	0,02	0,01	18,4	11,17	2,5	0,10

Tableau V-3 : composition chimique de métal d'apport inox ER 316L.

V-1-1 Interprétation et comparaison :

- ✚ D'après les résultats obtenues ci-dessus on en déduit que l'acier en question est un acier inoxydable austénitique (**316L ; désignation ASTM**) du fait de la teneur élevée en chrome ($\approx 16,90\%$) alphasène et en Nickel également ($\approx 11,10\%$) gammagène. Ces taux confèrent à l'acier une structure biphasée, ainsi que la faible teneur en carbone qui permet de réduire les risques de précipitation des carbures ainsi que la formation de la martensite lors de la trempe contrairement à l'acier au carbone.

- ✚ On peut remarquer aussi que l'acier 316L est riche en manganèse ce qui va diminuer la trempabilité de matériau.
- ✚ L'analyse du métal d'apport nous montre que sa composition est tellement proche de celle de l'acier inoxydable 316L ce qui confirme que les soudures hétérogènes sont réalisées souvent à l'aide d'un métal avec une composition proche de celle de métal le plus noble.

V-2- Etude métallographique:

V-2-1- Macrographie:

Afin de mettre en évidence les différentes zones de l'assemblage en question, une attaque chimique a été réalisée en utilisant le nital de côté acier au carbone, et pour l'autre côté (316L+cordon de soudure), une attaque électrochimique a été nécessaire pour relever la structure.

Sur la macrographie suivante (**Figure V-1**) nous observons les zones principales d'un assemblage:

- (1) : Métal de base acier au carbone.
- (2) : Zone affectée thermiquement coté acier au carbone.
- (3) : Zone fondue.
- (4) : Zone affectée thermiquement coté acier inoxydable austénitique 316L.
- (5) : Métal de base inoxydable austénitique 316L.

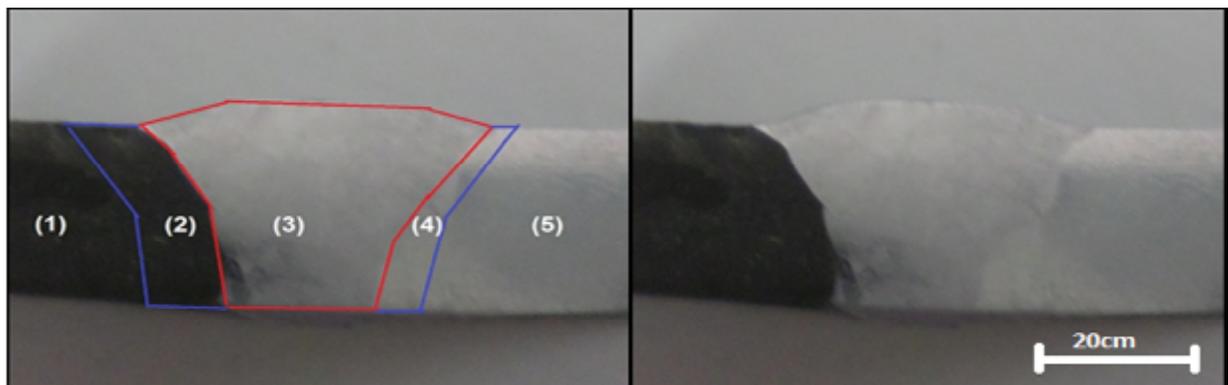


Figure V-1 : Vue macrographique de la soudure (X10).

V-2-2- Micrographie :

Une analyse métallographique en microscopie optique a permis de mettre en évidence les différentes zones, à savoir :

a) Acier au carbone :

L'acier au carbone a une structure ferrito-perlitique, sans aucune transformation structurale.

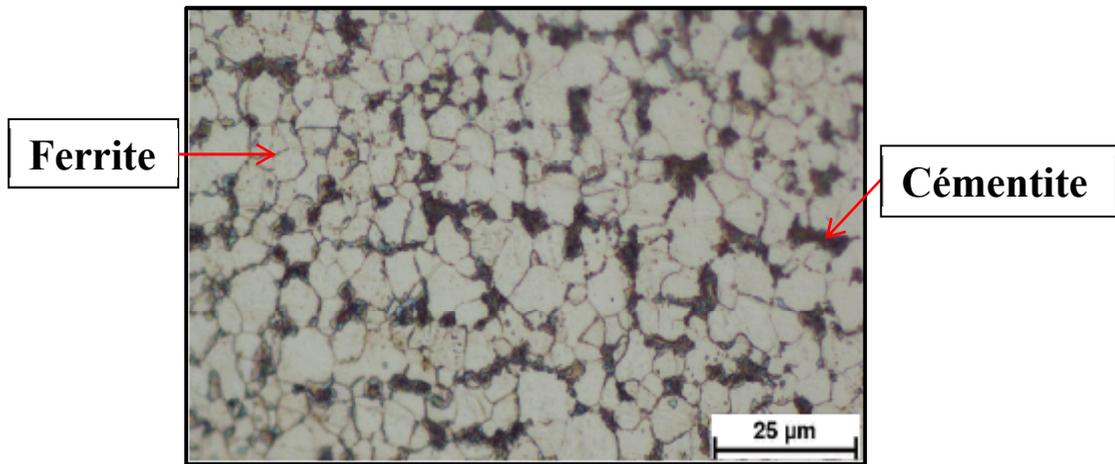


Figure V-2 : Micrographie optique du métal de base (acier au carbone) X500.

b) Acier inoxydable austénitique 316L :

Les figures (**Figure V-3**, **Figure V-4**) montrent les résultats des observations optiques de la microstructure de l'acier 316L pour deux grossissements différents (X100 et X500). Ces micrographies montrent une structure austénitique, avec une grande densité de macles, la distribution des grains est uniforme, leur forme est polygonale avec des joints de grain apparents.

D'autre part, les micrographies de la figure (**Figure V-5**) présentent de petites plages de ferrite aux joints de grains, on remarque aussi la présence de particules rondes réparties aléatoirement sur les coupes obtenues, ces particules ont été étudiées sous microscope électronique à balayage par M.KACHIT [50], on distingue deux familles :

- ✚ Des particules lisses et de forme relativement ronde d'une taille comprise entre quelques nanomètres et 2 µm. Ce sont généralement composés soit de silicium, de calcium et d'aluminium, soit de soufre et de manganèse.
- ✚ Des particules déchaussées de formes complexes d'un aspect plus sombre que les précédentes. Leur taille est comprise entre 1 et 6 µm.

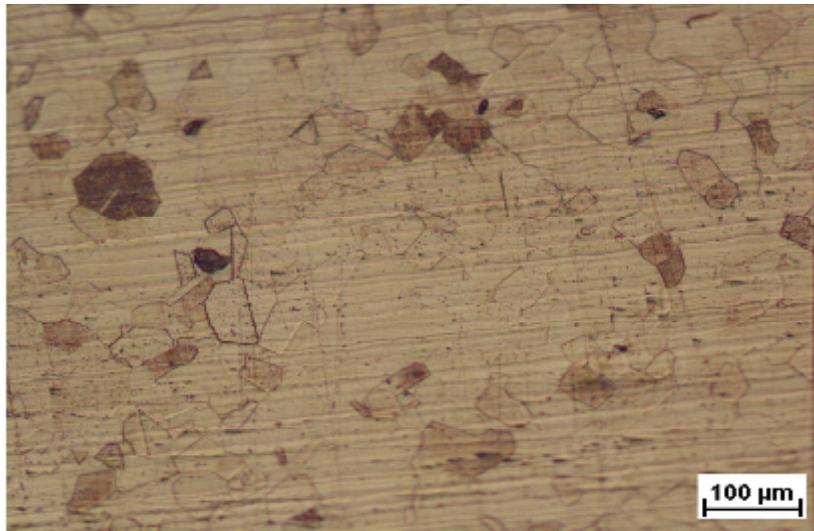


Figure V-3 : Structure austénitique de l'acier 316L (X 100).

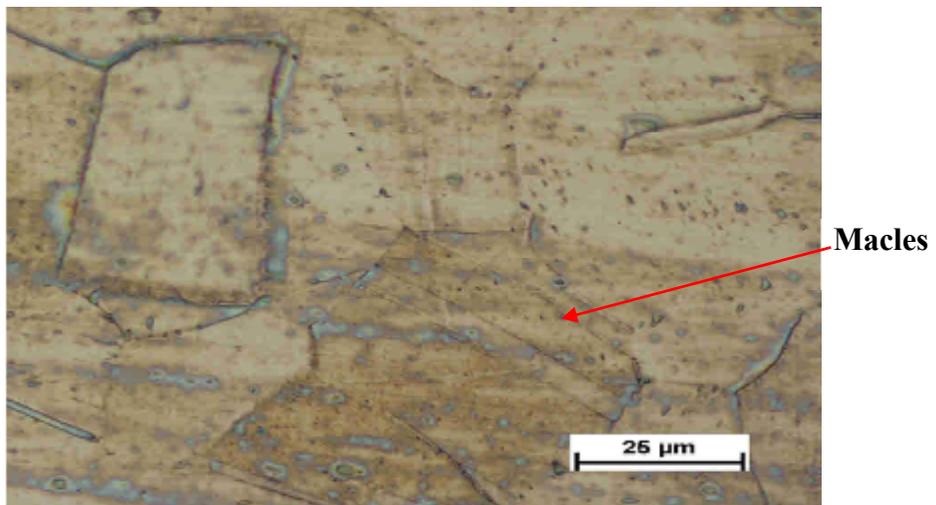


Figure V-4 : Structure des macles dans l'acier 316L (X 500).

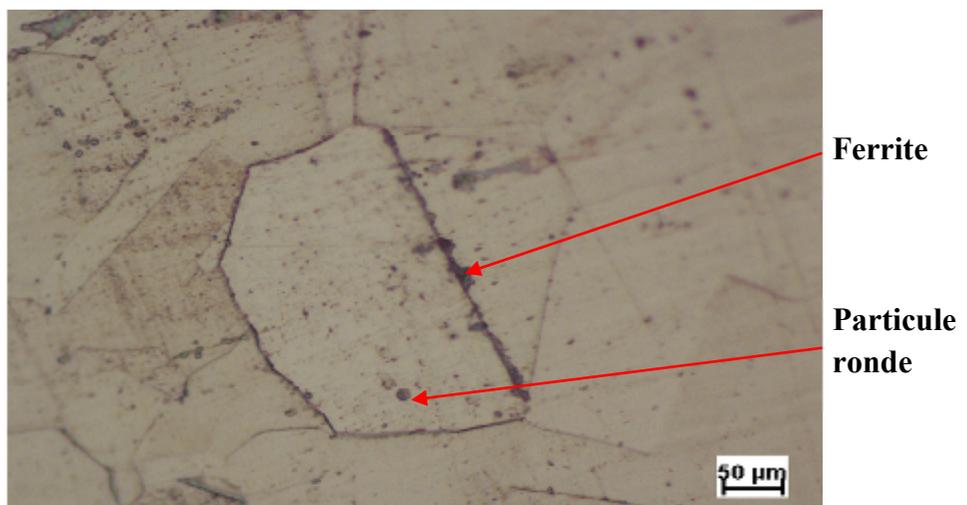


Figure V-5 : Mise en évidence de la ferrite particule ronde dans l'acier 316L (X 500).

c) Zone de transition :

L'observation micrographique confirme bien, la structure grossière de la zone affectée thermiquement en comparaison avec la structure de métal de base coté inox (316L), La frontière entre la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) est très nette, particulièrement l'aspect de la structure de solidification dans la zone fondue est plus fine (**Figure V-6**).

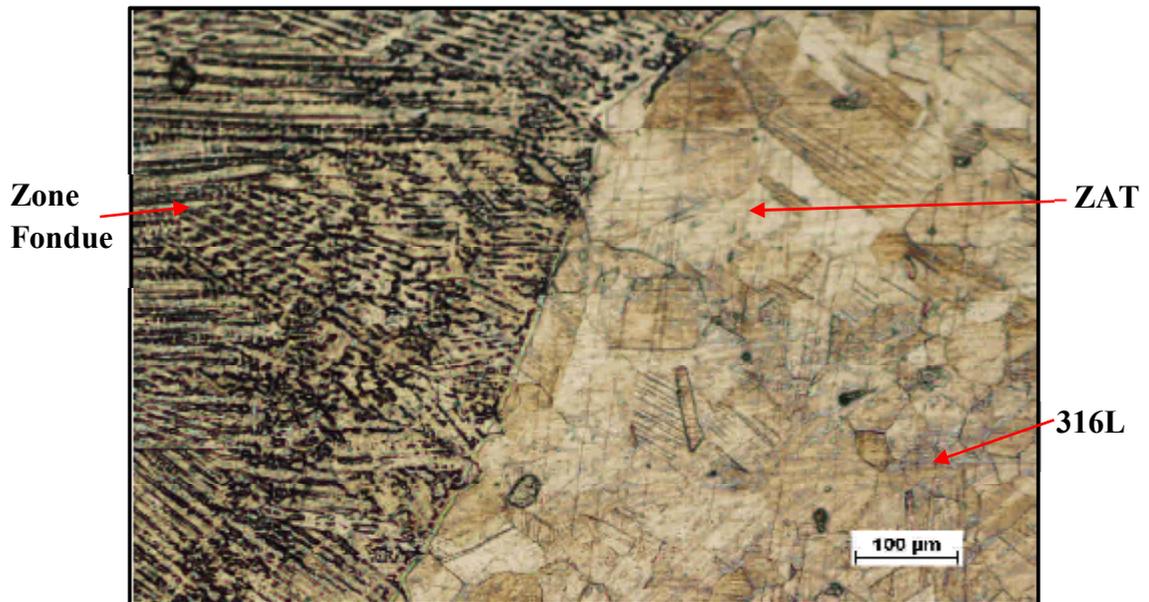


Figure V-6 : Micrographie optique de la zone de transition cotée inox austénitique (316L) (X200).

d) Zone fondue :

La figure (**Figure V-7**) montre la structure de la zone fondue, elle est très fine par rapport à la structure du métal de base. Elle a un aspect brut de solidification, composée de deux phases ; phase (γ) austénite et phase (α) ferrite. D'autre part, la figure (**Figure V-8**) montre le phénomène de la croissance par épitaxie d'un passe par rapport à l'autre.



Figure V-7 : Micrographie d'un plan transversale de cordon de soudure (X200).

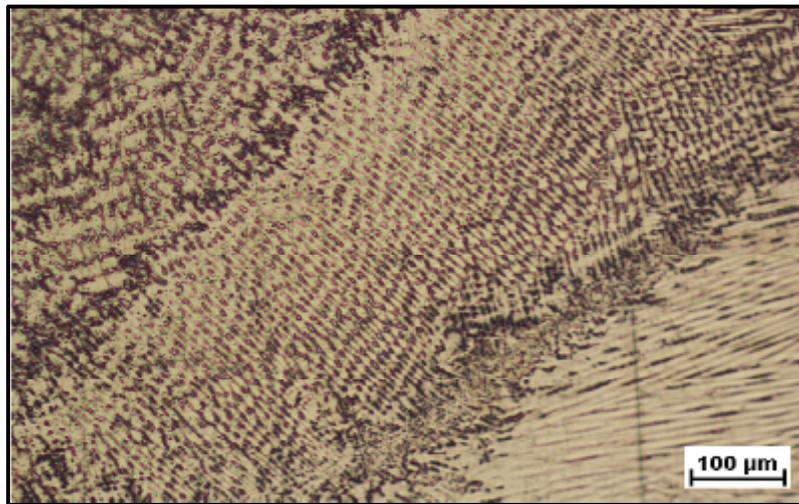


Figure V-8 : Micrographie des liaisons entre les différentes passes de soudures (X100).

V-3- Etude électrochimique :

Résultats :

Le comportement à la corrosion de la soudure hétérogène (**316L / acier au carbone A106 Gr.B**) a été étudié en utilisant une solution de NaCl à 3,5% (Eau de mer simulée).

V-3-1- Evolution de potentiel d'équilibre :

Le potentiel d'équilibre a été déterminé pour différentes zones :

Les figures (**Figure V-9 et Figure V-10**) représentent les courbes de $E=f(t)$ de cinq échantillons :

- a) Le métal de base l'acier au carbone (A106 Gr.B).
- b) Le métal de base l'acier austénitique (316L).
- c) La ZAT de l'acier au carbone (A106 Gr.B).
- d) La zone fondue.
- e) La soudure hétérogène (A106 Gr.B/316L).

Une figure (**Figure V-10, (f)**) englobe les cinq échantillons pour faire une comparaison entre eux :

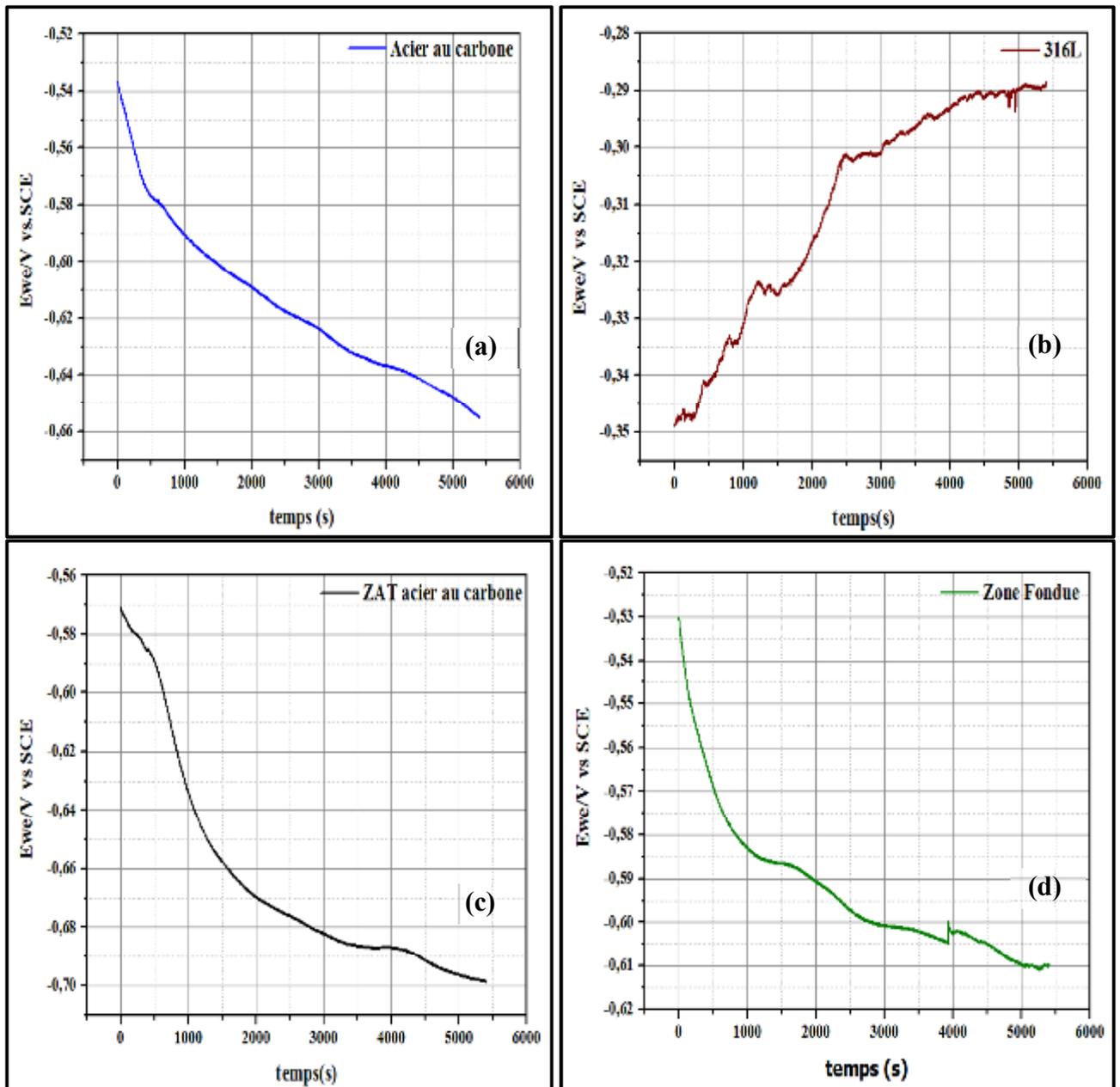


Figure V-9 : représentation graphique d' $E=f(t)$ du quatre échantillons : (a) : Acier au carbone (A106 Gr.B), (b) : inox (316L), (c) : ZAT de (A106Gr.B), (d) Zone Fondue.

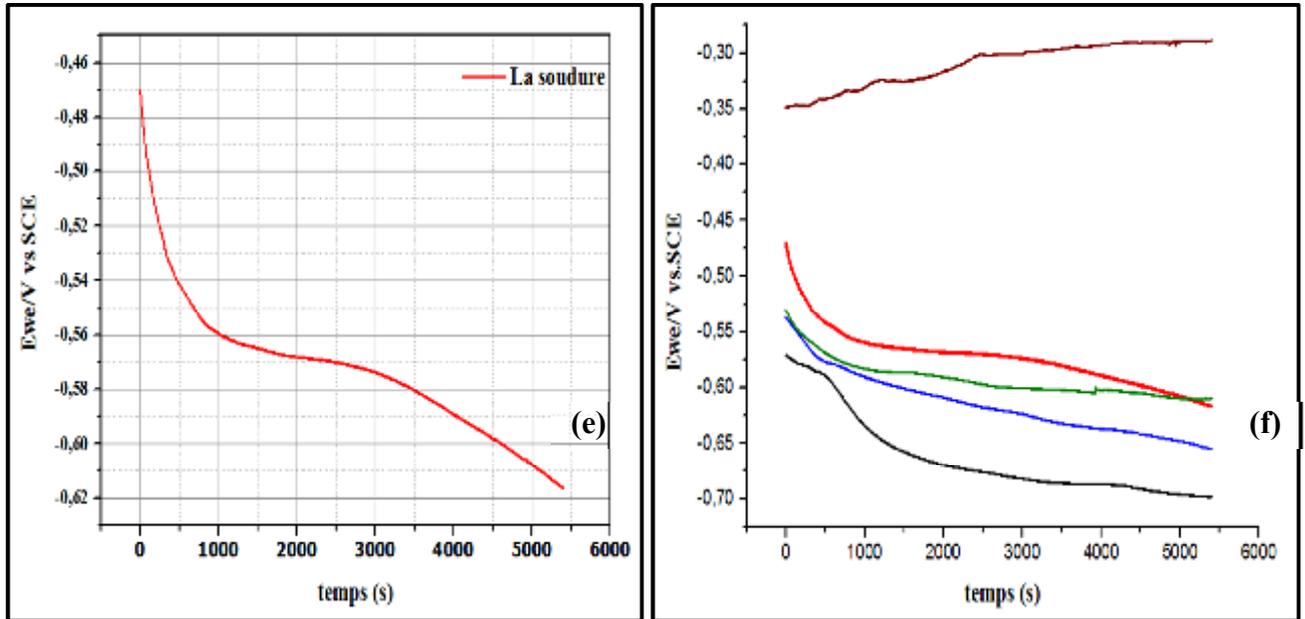


Figure V-10 : représentation graphique de $E=f(t)$: (e), La soudure, (f) les cinq échantillons.

On remarque d'après les courbes, que l'acier au carbone (**courbe-a-**) a un comportement linéaire, par contre la zone affectée thermiquement (ZAT) (**courbe-c-**), la zone fondue (**courbe-d-**) et l'assemblage soudé (soudure (**courbe-e-**)) ont un comportement logarithmique avec des potentiels qui ne font que décroître jusqu'aux potentiels d'abondant (ou potentiels de circuit ouvert) $E_{oc} = -0,655 \text{ V}$, $E_{oc} = -0,699 \text{ V}$, $E_{oc} = -0,610 \text{ V}$, $E_{oc} = -0,617 \text{ V}$ respectivement. Par contre, l'acier austénitique (316L) (**courbe-b-**) possède un comportement logarithmique mais avec un potentiel qui ne fait que croître, puis se stabilise environ après 41 min au potentiel d'abondant $E_{oc} = -0,288 \text{ V}$. Autrement dit, cet acier se passive ou il s'anoblit. Plus le potentiel d'abondant est négative plus la résistance à la corrosion est élevée, donc d'après la courbe (**courbe -f-**), On peut classer ces échantillons testés de plus résistant vers le moins résistant à la corrosion comme suit :

1. l'acier austénitique (316L).
2. la zone fondue.
3. L'assemblage soudé (soudure).
4. L'acier au carbone (A106 Gr.B).
5. La zone affectée thermiquement (ZAT).

Donc le comportement de ces échantillons est dû à la composition chimiques qui change d'un échantillon à l'autre. Autrement dit, le pourcentage en Cr et Ni, qui sont des éléments responsables à

Résultats et interprétation

la formation des oxydes ou hydroxydes de chrome constituant la couche de protection (passivation) contre la corrosion.

V-3-2- Courbes de polarisation :

Objectif de cette partie est d'effectuer une interprétation de test de polarisation électrochimique.

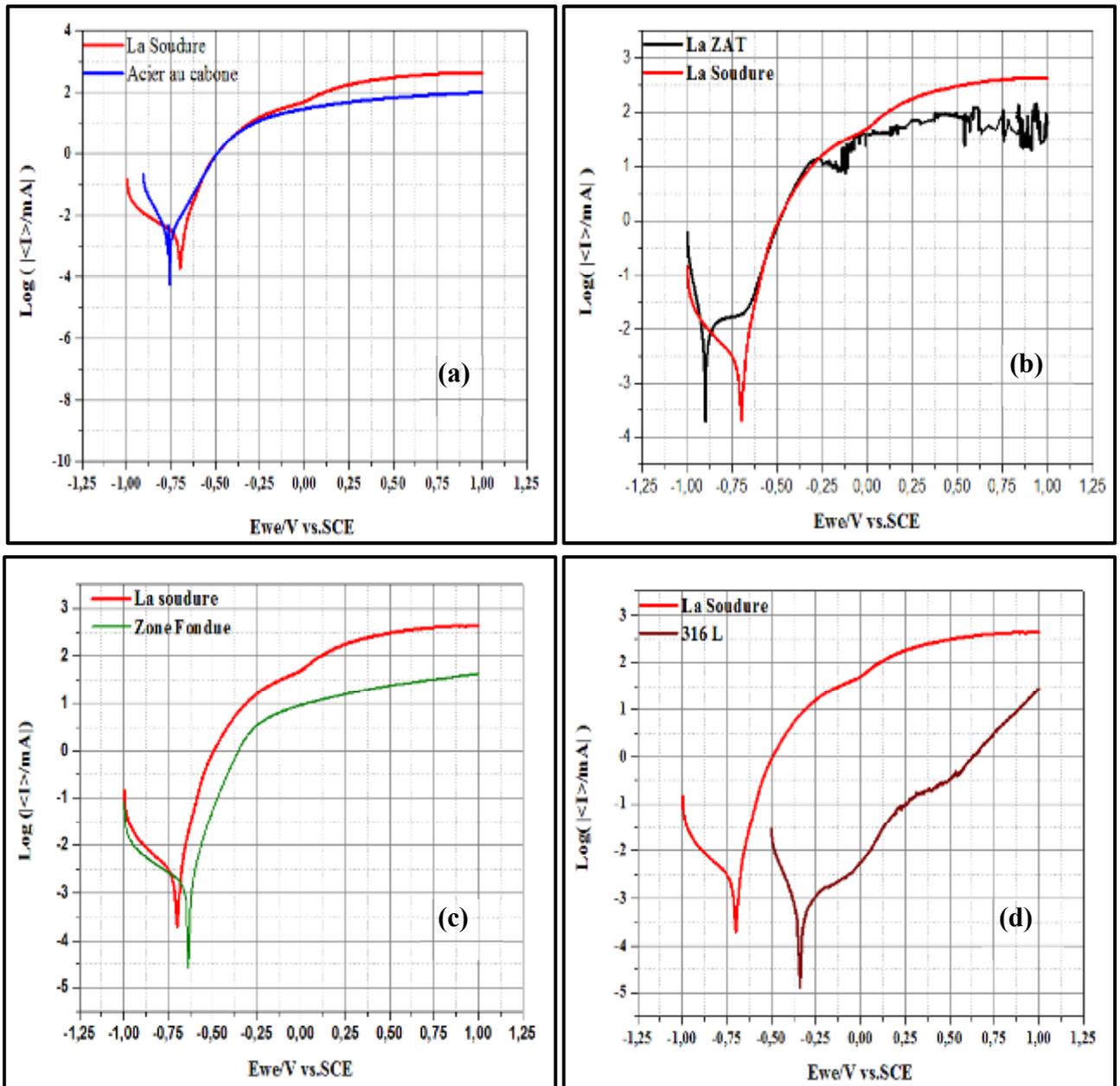


Figure V-11: représentation graphique d' $\text{Log}(I)=f(E)$ des couples :

(a) : soudure/acier au carbone, (b) : (soudure/ZAT) , (c) : soudure/Zone Fondue, (d) :soudure/316L.

Résultats et interprétation

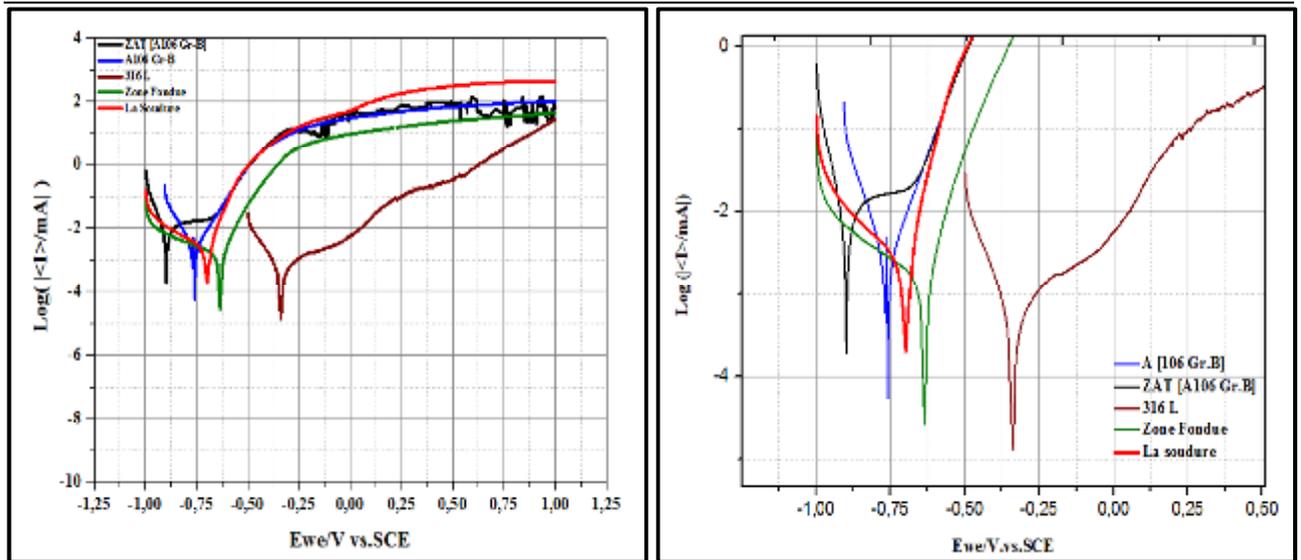


Figure V-12: représentation graphique de $\text{Log}(I)=f(E)$ du cinq échantillons. NaCl (3,5%). Vitesse de balayage : 1mV/s.

Les essais de polarisation montrent clairement le comportement vis-à-vis de la corrosion nettement supérieur du la soudure hétérogène comparativement à l'acier au carbone (A106 Gr.B) et sa zone affecté thermiquement (ZAT), courbes (a et b) et nettement inférieur comparativement à l'acier inoxydable austénitique (316L) et à la zone fondue, courbes (c et d). De plus, on constate que l'acier austénitique (316L) présente un comportement différent à celui des autres échantillons. Il se passive et sa courbe de polarisation (**Figure V-11(d)**) présente des légers paliers de passivation. Le courant de corrosion reste faible. Il est de l'ordre environ de $0,713\mu\text{A}$ et la résistance à la polarisation est égale à (19563 Ohm). D'après les résultats obtenus dans la solution de NaCl, pour nos cinq échantillons, nous constatons en faisant la comparaison qu'il y'a des différences notables quant aux valeurs des caractéristiques électrochimiques. La zone affectée thermiquement coté acier au carbone accuse un comportement moins noble par rapport à l'ensemble des zones étudiées la présence des contraintes résiduelles dans cette zone pourrait justifier ce type de comportement.

-La soudure hétérogène a un potentiel qui est de l'ordre de (-698,5 mV), un courant de corrosion avoisinant la valeur de $1,857\mu\text{A}$. Comparativement aux valeurs de l'acier au carbone et sa zone affecté thermiquement, dont les potentiels de corrosion tendent vers des valeurs plus négatives (-758,8 mV, -898,1 mV) et des courants de corrosion ($3,484\mu\text{A}$, $13,683\mu\text{A}$) respectivement, cette soudure a un comportement favorable vis-à-vis de la solution NaCl (3,5%). Par contre, elle possède un comportement défavorable en contact avec cette solution comparativement aux valeurs de l'acier inoxydable (316L) et de la zone fondue, dont les potentiels de corrosion tendent vers des valeurs

Résultats et interprétation

plus noble (-337,306 mV, -635,248 mV) et des courants de corrosion (0,713 μ A, 1,792 μ A) respectivement.

-La vitesse de corrosion 0,030294mm/an pour la soudure hétérogène montre :

Un meilleur comportement à la corrosion dans la solution NaCl (simulé l'eau de mer) par rapport à l'acier au carbone et à sa zone affectée thermiquement et un mauvais comportement par rapport à l'acier austénitique (316L) et à la zone fondue (**Figure V-13**).

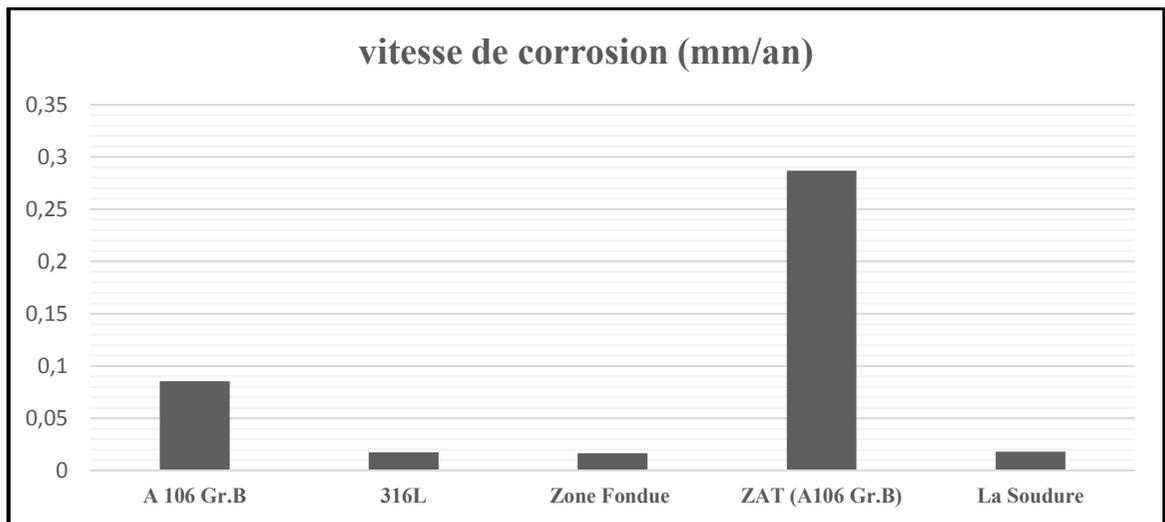


Figure V-13 : Histogramme comparative de la vitesse de corrosion pour les différents échantillons.

-La Résistance de polarisation de la soudure hétérogène est de l'ordre de 12104 Ω , elle est 5 fois plus élevée, que celles de l'acier au carbone et de la ZAT, par contre elle est (3/2) fois plus faible que l'acier de base 316L et la zone fondue. (**Figure V-14**).

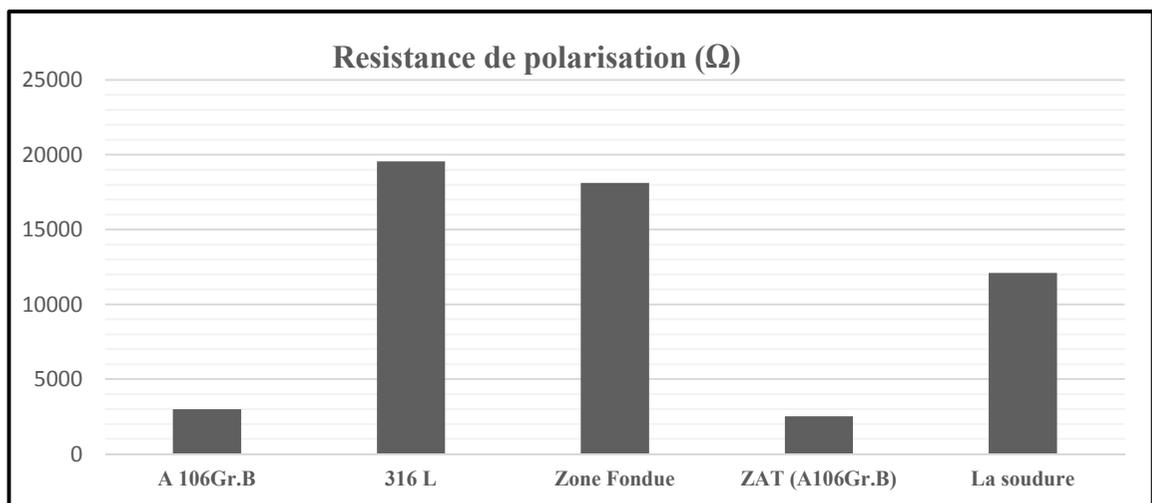


Figure V-14: Histogramme comparative de la résistance à la polarisation pour les différents échantillons

Résultats et interprétation

Le tableau (**Tableau V-4**) récapitule l'ensemble des résultats extraits des essais de polarisation.

Echantillons	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μA)	V_{corr} (mmpy)	R_{corr} (Ohm)
Acier au carbone (A106 Gr B)	-758,840	3,484	0,0852538	2986
Acier austénitique (316L)	-337,306	0,713	0,0174472	19563
Zone Fondue (ZF)	-635,248	1,792	0,0164103	18121
Zone affectée thermiquement (ZAT)	-898,053	13,683	0,286992	2518
La Soudure	-698,540	1,857	0,0181731	12104

Tableau V-4 : Paramètres de corrosion.

Ou : **E_{corr}** : le potentiel de corrosion en millivolt.

I_{corr} : le courant de corrosion en microampère.

V_{corr} : la vitesse de corrosion en millimètre par an.

R_p : la résistance de polarisation en Ohm.

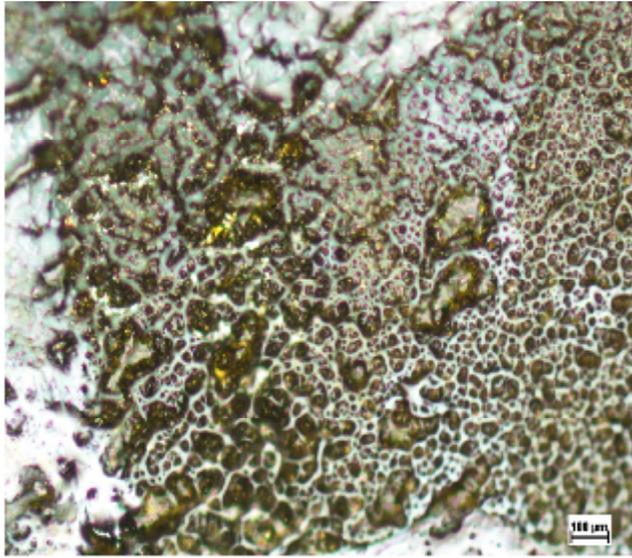
Les aciers inoxydables sont des matériaux passivables sensible à la corrosion par piqûres en présence d'espèces agressives spécifiques. Ce sont le plus souvent les ions chlorures (Cl^-), qui sont les plus agressifs et qui jouent un rôle important dans le mécanisme de piqûration.

La corrosion par piqûres est liée aux attaques très localisées d'hétérogénéités qui contribuent à la détérioration de la couche passivante protégeant le matériau. Ce processus de détérioration du matériau conduit généralement à un phénomène de corrosion généralisé.

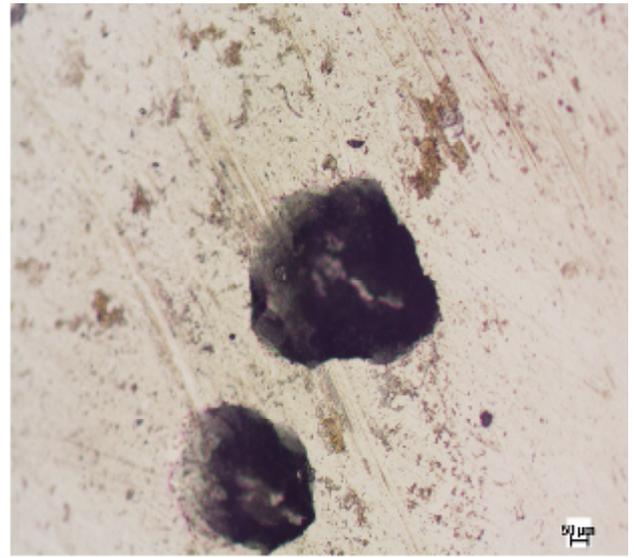
L'observation par microscopie optique des cinq échantillons étudiés, montre la forme d'attaque qu'ils ont subi après un test de corrosion dans la solution de NaCl (3,5%), figure (**Figure V-15**) et (**Figure V-16**). On remarque que l'acier au carbone et la ZAT ont subi une corrosion généralisée figure (**Figure V-15, (a)** et (**c**)), d'autre part la zone fondue a subi une piqûration, figure (**Figure V-15 (b)**) sous l'effet des anions (Cl^-) et des cations (Na^+).

Résultats et interprétation

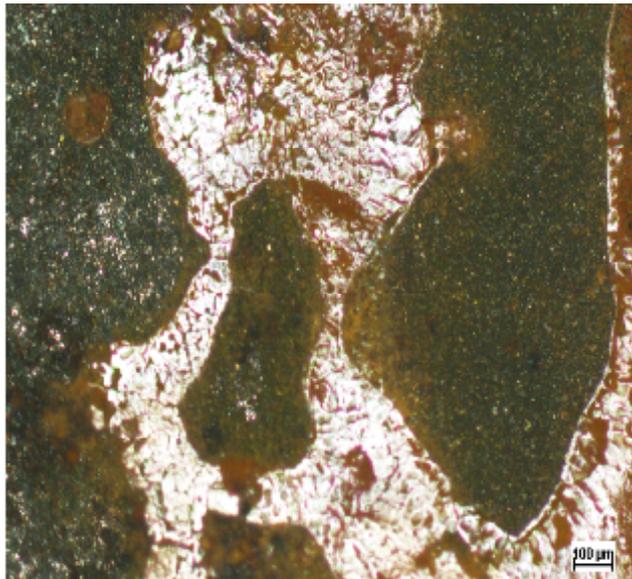
La figure (**Figure V-15 (d)**) de l'inox (316L) montre une forme particulière qui a été étudiée par Mr.Flemming [6], elle s'agit d'un précipité inorganique provenant de la solution qui constitue le biofilm provoquant une biocorrosion. La microstructure de L'assemblage hétérogène figure (**Figure V-16**) montre la formation des piqûres, la succession de ces dernières conduit à l'apparition des lignes de piquurations sur la surface immergée dans NaCl (3,5%).



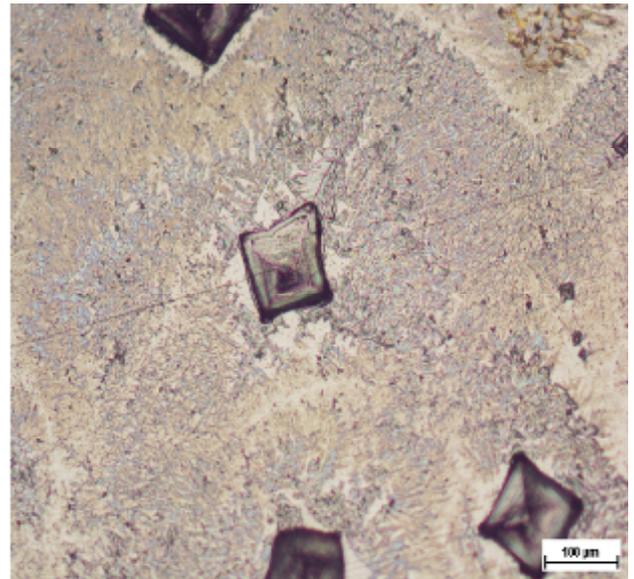
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V-15 : Microstructures des échantillons après le test de corrosion (a) : ZAT (A106 Gr.B), (b) Zone Fondue,(c) : Acier au carbone,(d) : Acier inox 316L (X100).

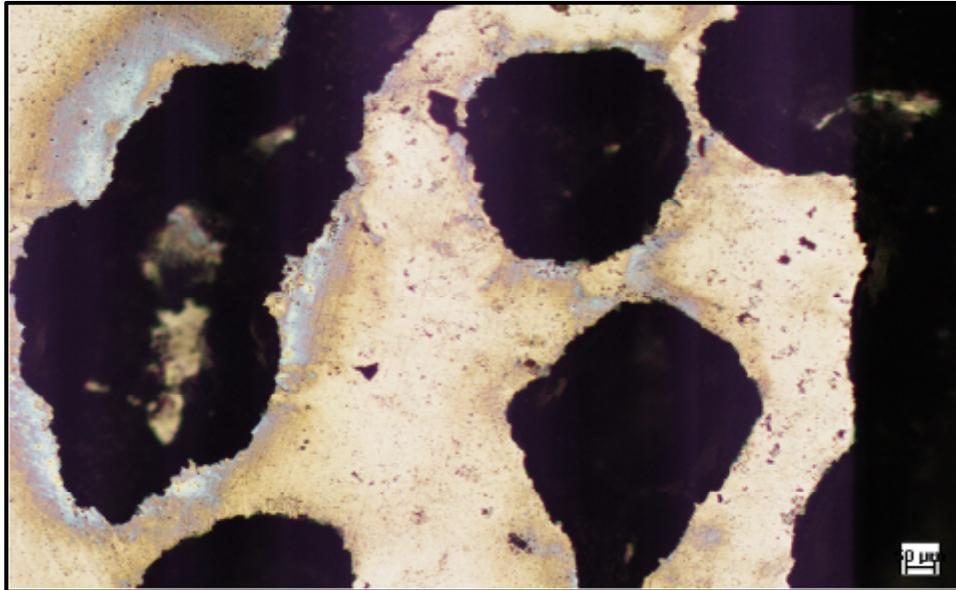


Figure V-16 : Microstructure de l'assemblage hétérogène après le test de corrosion(X500).

V-4-Essais mécaniques :

V-4-1-Traction :

Pour finaliser la phase de validation du soudage à l'arc électrique, des essais en traction monotone ont été effectués à température ambiante 20°C sur des éprouvettes planes soudées, en disposant le cordon de soudure perpendiculairement au sens de l'allongement. Les caractéristiques conventionnelles sont reportées dans le tableau (**Tableau V-5**) ci-dessous :

	Section [mm ²]	Re [MPa]	Rm [Mpa]	A(%)
Eprouvette (1)	34,76	473,38	608,16	25,99
Eprouvette (2)	37,73	386,11	673,50	29,46

Tableau V-5 : les paramètres de l'essai de traction.

Les essais de traction monotone réalisés montrent une bonne résistance mécanique ($R_m = 608,16 \text{ N/mm}^2$) pour l'éprouvette (1) et ($R_m = 673 \text{ N/mm}^2$) pour l'éprouvette (2) de la soudure. Il est important de signaler que la rupture durant les essais de traction s'est produite hors de cordon de soudure (**Figure V-17**) ce qui traduit la qualité de soudure réalisé.

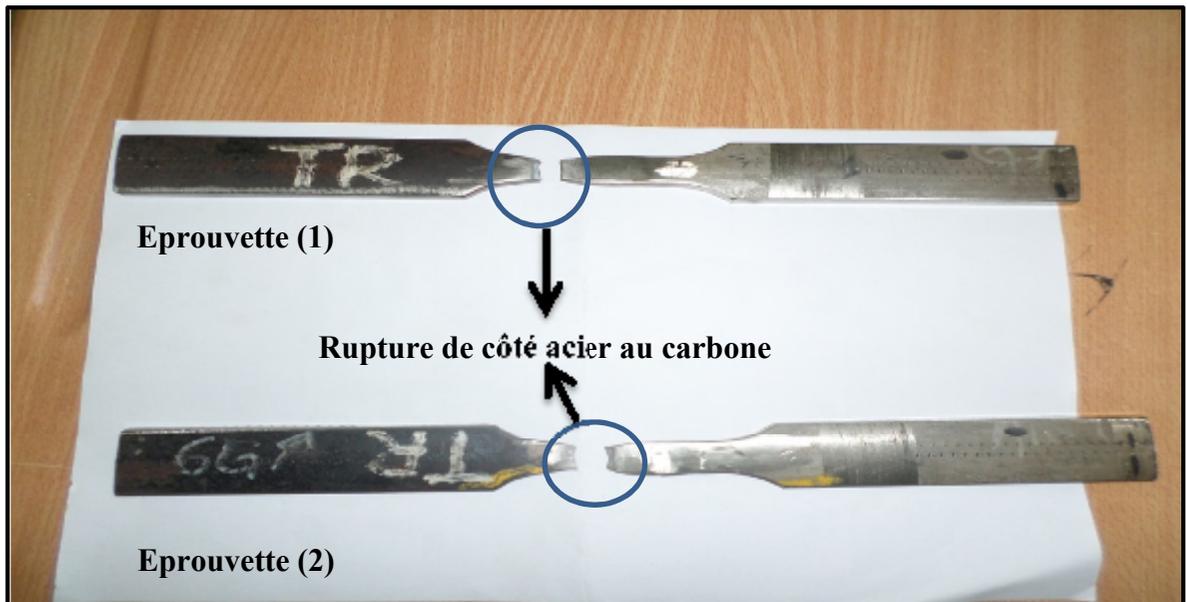


Figure V-17 : rupture des éprouvettes après essais de traction

La figure (Figure V-18), représente un exemple d'enregistrement de la courbe de traction :

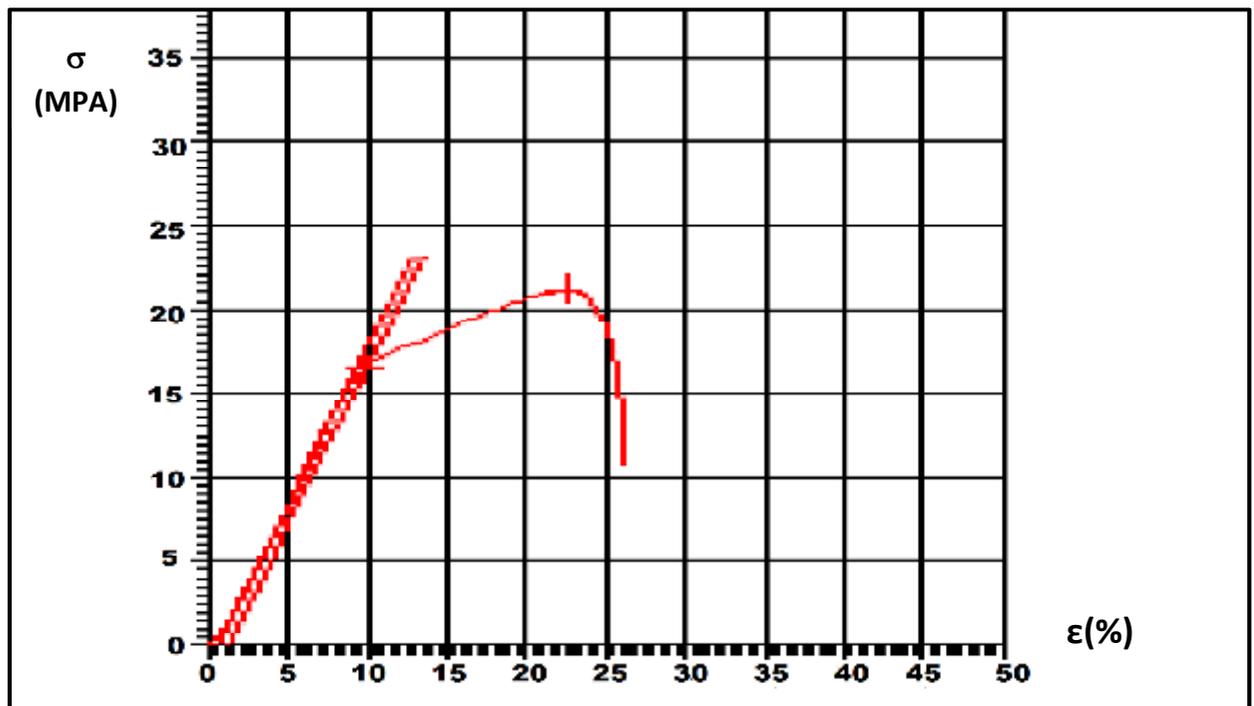


Figure V-18 : courbe rationnelle de traction éprouvette (1).

Résultats et interprétation

La résistance de la soudure se justifie par la haute limite d'élasticité de l'acier inox (316L) et de la zone fondue, due aux éléments d'additions.

Ce type d'hétérogénéité est désigné par les anglo-saxons par le terme mismatching. Il est caractérisé par le rapport M entre la limite d'élasticité de la ZAT et la limite d'élasticité du métal de base :

$$M = \frac{\sigma_{YZ}}{\sigma_{YB}} \quad (1.6)$$

Où : (σ_{YZ}) est la limite d'élasticité de la ZAT et (σ_{YB}) celle du métal de base. si $M < 1$ on parlera d'undermatching et la rupture se produit dans le joint soudé, si $M > 1$ on parlera d'overmatching la rupture se produit dans le métal de base comme dans notre cas.

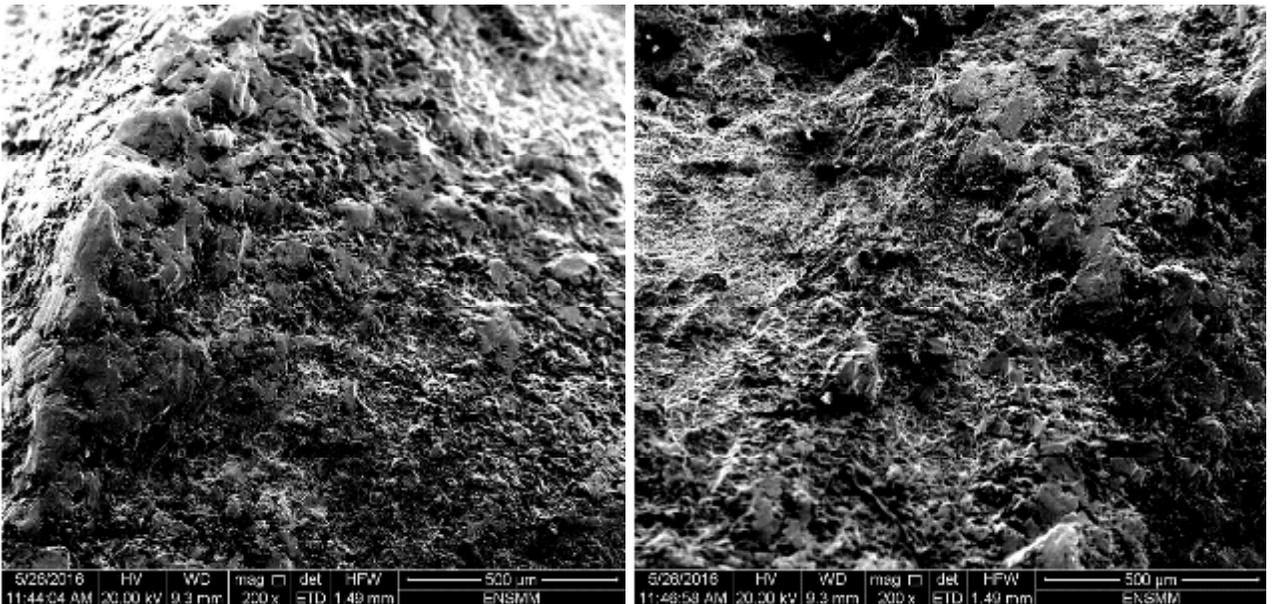


Figure V-19 : image par le MEB des faciès de rupture après l'essai de traction.

Les images obtenues par le MEB (**Figure V-19**), montrent la rupture ductile d'éprouvette de traction.

V-4-2-Pliage :

Les résultats de pliage sont représentés au-dessous :



Figure V-20: Résultats de l'essai de pliage : (a) échantillons droits, (b) échantillons envers.

Essai (1)	Essai (2)	Observations
Envers	Endroit	
	X	Rien à signaler
	X	Rien à signaler
X		Rien à signaler
X		Rien à signaler

Tableau V-6 : Résultats de l'essai de pliage.

Un contrôle visuel des échantillons obtenus après essais de pliage (**Figure V-20**) montre l'absence des fissures pour les deux positions (endroit et envers) au niveau de cordon de soudure hétérogène (inox 316L-acier A106 Gr.B) par conséquent, ce dernier est de bonne qualité (**tableau V-6**), d'où l'objectif de l'essai.

V-4-3-Micro dureté :

On a appliqué une charge de 100 grf pendant 10 secondes (HV 0.1/10) dans chaque point de mesure, sous une température ambiante 25°C, pour la prise des mesures on a utilisé un pas de 40 µm.

Les valeurs de micro dureté sont portées sur un tableau comme suit :

mesures	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	9ème
Dureté HV	399,7	405,1	394,4	385,8	308,6	349,7	366,3	351,2	385,8

10ème	11ème	12ème	13ème	14ème	15ème
243,7	242,9	263,5	223,9	205,0	259,7

Tableau V-7 : Valeurs de la micro dureté.

Les valeurs représentées dans le tableau (**Tableau V-7**) sont reproduites sur un graphe comme sui:

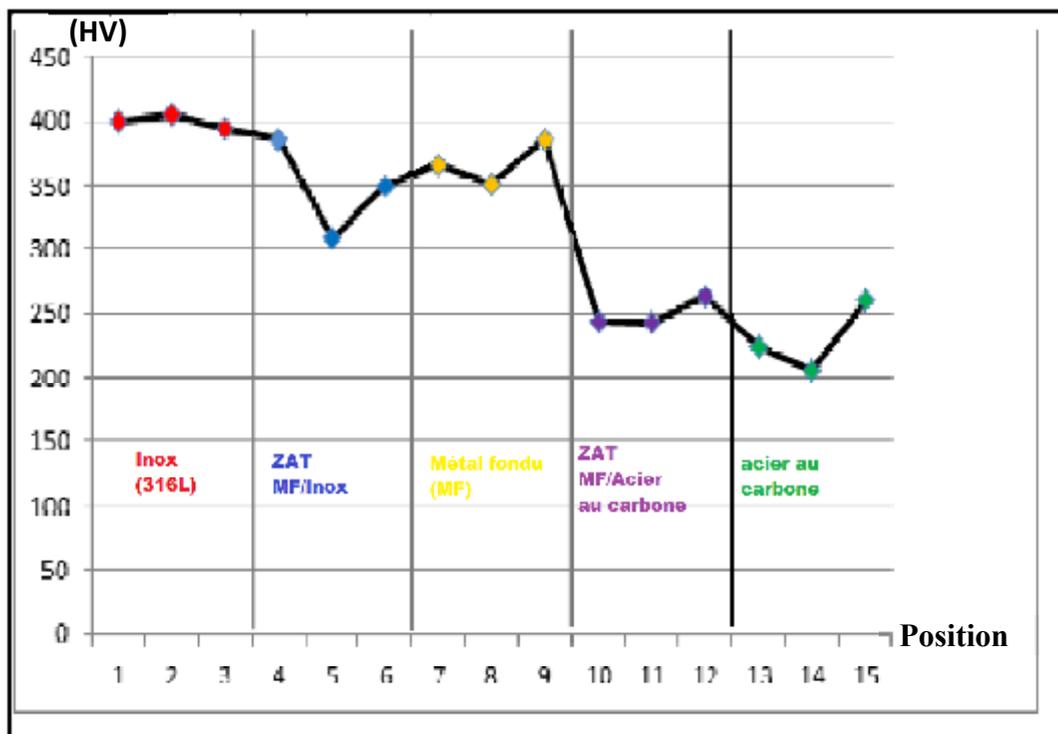


Figure V-21 : mesures de la Micro dureté de l'assemblage.

Résultats et interprétation

En calculant la moyenne de la dureté pour chaque zone :

mesures	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	10, 11, 12	13, 14, 15
Moyenne	399,78	348,03	367,76	250,03	229,53

Tableau V-8 : Valeurs de la micro dureté.

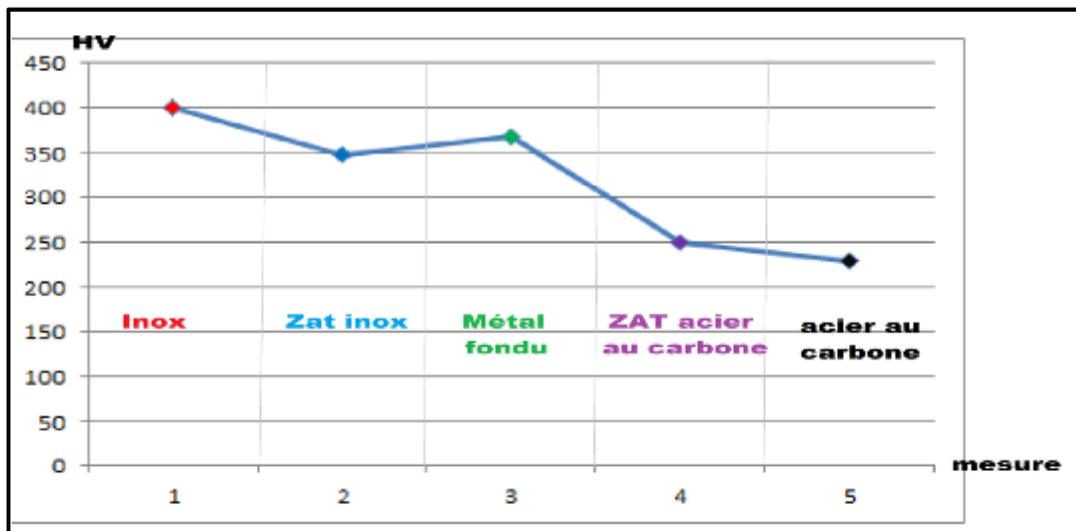


Figure V-22 : mesures moyenne de la Micro dureté de l'assemblage.

On constate une légère diminution de dureté des phases de la zone fondue comparé à celles du métal de base inox, cela est due d'un coté à la légère différence des propriétés entre le métal de base et le métal d'apport. Induite par la différence de la composition chimique et surtout pour les éléments Ni et Cr.

On a réalisé une analyse de profil de concentration sur différente zone en utilisant la technique EDS, et on a obtenu les profils présentés par les figures (Figure V-23) suivantes :

Résultats et interprétation

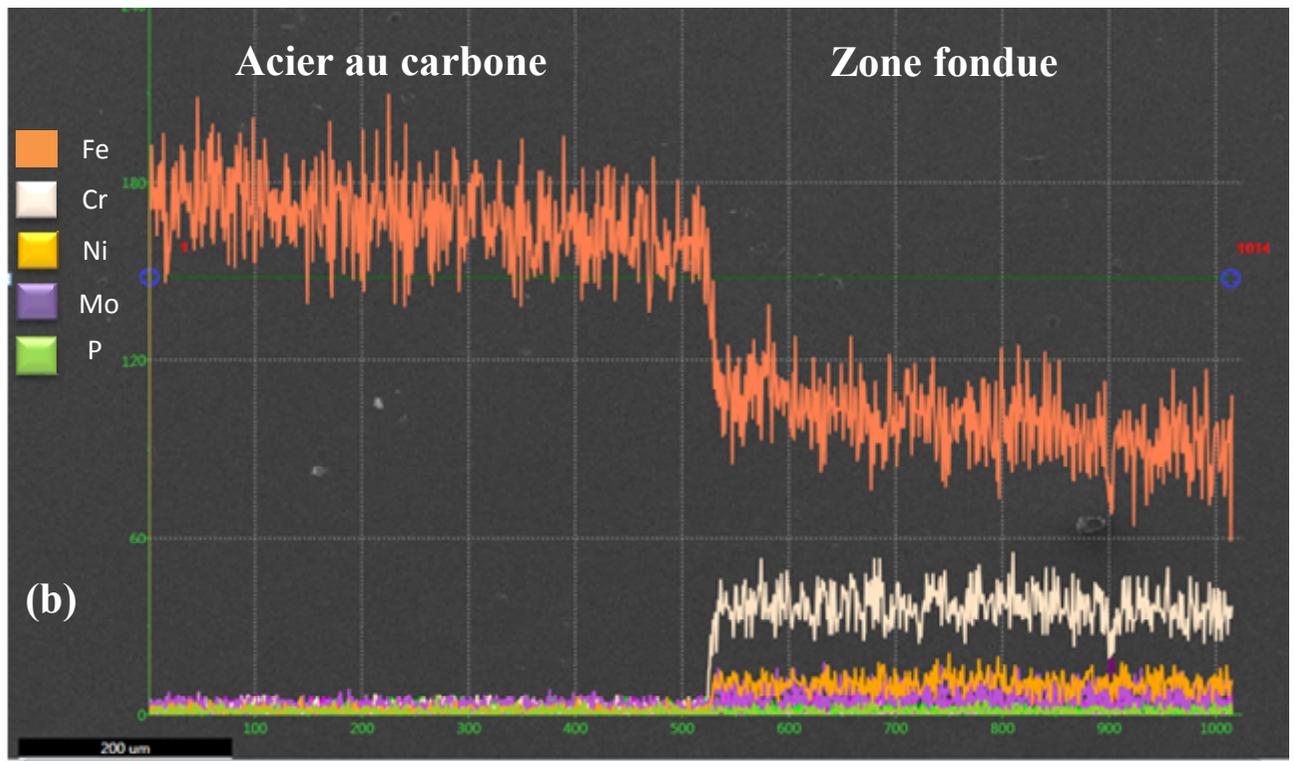
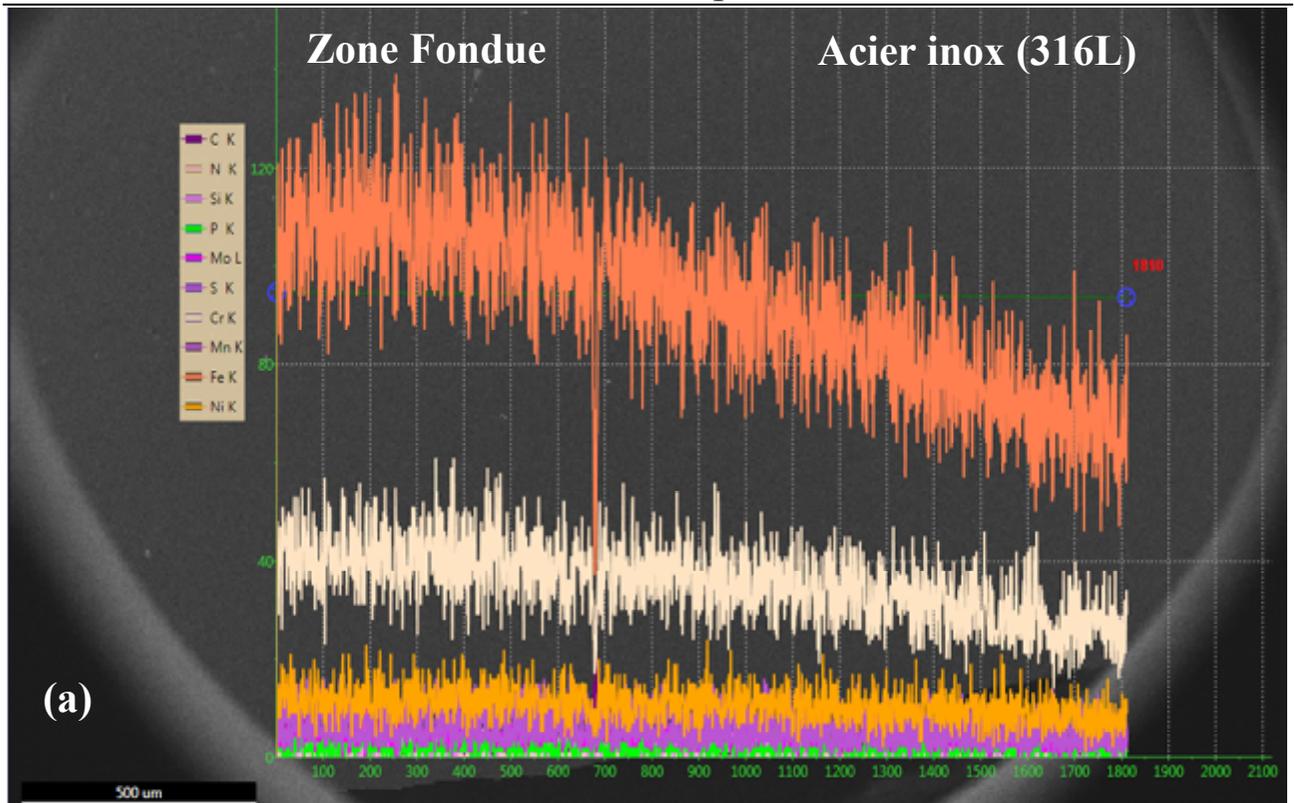


Figure V-23 : profil de concentration réalisé par MEB (a) 1810 µm coté carbone – zone fondue (b) 1014 µm coté zone fondue – acier inox (316L).

D'après le profil enregistré figure (**Figure V-23 (a) et (b)**) montre l'hétérogénéité dans la composition chimique ce qui justifie les résultats enregistrés par micro dureté qui montre que la dureté de l'acier au carbone est inférieure à celles du métal d'apport et du métal de base inox (ce qui a été quantifié théoriquement avant l'exécution de la jonction).

Et pour les zone affectée thermiquement la diminution de dureté est due au refroidissement lent provoqué par l'effet thermique des passes ultérieures (ce qui favorise la formation de l'austénite qui est réputée être une phase ductile).

V-4-4-Essai de résilience :

Les essais de résilience ont été effectués à basse température simulant les conditions de travail des tubes destinés au transport des hydrocarbures. Les résultats obtenus sont enregistrés dans le tableau (**Tableau V-9**) :

Température (°C)	Energie absorbé KV (J)	Résilience (J /cm ²)
-60	110	137,5
-196	80	100

Tableau V-9 : résultats d'essais de résilience.

On constate que plus la température de l'essai est basse et plus l'énergie de rupture est faible (l'éprouvette résiste moins aux chocs), cela est due à la faible mobilité des atomes, d'où réduction du domaine plastique favorisant la rupture [11].

Malgré la baisse de température, L'énergie de rupture des soudures reste élevée, d'où une meilleure résistance aux chocs des assemblages hétérogènes étudiés.

Conclusion générale :

Le but principal de ce travail, est étudier le comportement électrochimique et mécanique d'une soudure hétérogène 316L/A106 Gr.B.

Le procédé de soudage a une influence primordiale sur les soudures austénitiques, de nombreux types de structures de solidification sont susceptibles d'être rencontrés. Ils présentent un point commun : une anisotropie locale des propriétés élastiques due à une croissance préférentielle des grains selon un axe cristallographique bien défini.

L'étude détaillée des caractéristiques morphologiques de la jonction a été entreprise en mettant en œuvre la microscopie optique, elle visait principalement la caractérisation microscopique des joints soudés.

La Résistance de polarisation de la soudure hétérogène est de l'ordre de 12104Ω , elle est 5 fois plus élevée, que celles de l'acier au carbone et de la ZAT, par contre elle est (3/2) fois plus faible que l'acier de base 316L et la zone fondue, par conséquent on peut classer les différentes zones en fonction de la résistance à la corrosion du plus résistant au moins résistant comme suit :

- ✚ l'acier austénitique (316L).
- ✚ la zone fondue.
- ✚ L'assemblage soudé (soudure).
- ✚ L'acier au carbone (A106 Gr.B).
- ✚ La zone affectée thermiquement (ZAT).

La susceptibilité de l'acier inoxydable 316L à la corrosion apparait visiblement sur la surface des échantillons inox, synonyme de la présence des ions Cl^- dans le milieu. La rupture du film passif, c'est le domaine transpassif. Ce phénomène est dû à la présence de chlore après corrosion ce qui atteste que les ions de Cl^- ont été absorbés par la couche passive de l'acier inoxydable 316L qui produit la corrosion par piqûres.

La jonction hétérogène qui est le but de notre recherche présente un potentiel de corrosion est un peu plus négative que celui de métal de base 316L donc il est un peu moins résistant que ce dernier .Dans ce cas le matériau le moins noble se dissous le premier.

Le joint soudé présente une bonne résistance mécanique ($R_m = 608,16\text{N/mm}^2$) et que la rupture s'est produite hors de cordon de soudure. D'autre part, les essais de pliage montrent l'absence des fissures pour les deux positions (endroit et envers) au niveau de cordon de soudure. Et les résultats obtenus pour l'essai de résilience confirment la meilleure résistance aux chocs des assemblages hétérogènes étudiés.

Les propriétés mécaniques de jonctions hétérogènes (316L/A106 Gr.B) dans ses deux configurations ainsi que leur résistance à la corrosion ont une très grande concordance avec la littérature et elle respecte la norme.

Il conviendrait donc de continuer des recherches sur ce domaine, car les appréciations non destructives et fiables des états de corrosion des aciers présentent un intérêt certain pour le diagnostic des équipements.

Le corrosionniste peut difficilement s'intéresser à tous les mécanismes particuliers de corrosion localisée

En outre, leur approche nécessite une connaissance complète et détaillée des conditions de service.

Tout témoignage indirect porte en effet en lui-même un début d'interprétation ce qui rend l'accès au fait brut financièrement épuisant, mais intellectuellement passionnant.

En perspective, répondre au besoin industriel et économique afin d'apporter des solutions moyennant l'assemblage par soudage de matériaux différents d'une part et d'optimiser la sensibilité à certains types de corrosion des assemblages par soudage.

Références bibliographiques

- [1] corrosion localisée, **F.DABOSI, G.BERANGER, B.BAROUX**.
- [4] Corrosion basics, chap V, Localized corrosion 93-108, **Ed. NACE** (1984)
- [5] **Pierre-Jean CUNAT**, Technique d'ingénieur: Aciers inoxydables, propriétés, Résistance à la corrosion
- [6] **Gérard Béranger, Henri Mazille**, corrosion des métaux et alliages, Lavoisier,(2002).
- [7] **Norme ISO 8044**, corrosion des métaux et alliages, vocabulaire, 2^{eme} édition (1989).
- [8] **Messari Mohamed, Akli Oulbani Said** « les différents types de contrôle destructifs et non destructifs et les traitements thermiques dans le soudage », Mémoire de magister, IAP, (2010).
- [9] **Edelstahl-vereinigung e.v, Verein Deutxher Eisenhuttenlente (vdeh)**, Technique et Documentation-Lavoisier, 1990.
- [10] **G.Beranger, G.Henry, G.Sanz**. « Livre de l'acier », Ed.SOLLAC ,1996.
- [11] **Touaibi Djallel Eddine**, « Etude de réalisation d'un assemblage hétérogène (A333.Grade 6 /A790.532 550) par un métal d'apport (ER 2209) », projet de fin d'études, école nationale supérieure polytechnique, Alger (2009).
- [12] **Hanifa Marouf**, « caractérisation structural et mécanique du joint de soudé de la liaison bimétallique Acier ordinaire E36/Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'unité Grue de bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation » (2012). Mémoire de magister en génie mécanique, université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou (2012).
- [13] **P.J.CUNAT**, Aciers inoxydables : Critère de choix et structure, Technique de l'ingénieur, M4540, 2000.
- [15] **B.Thomas, T.H.Schmitt**, Durcissement des aciers: rôle de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, M4341, 2002.
- [17] **Jean-Louis MOIRON.Bernard BONNEFOIS. Pierre-Jean CUNAT**,(Souder les aciers inoxydables)
- [18] **J.Paul bailon. J.Marie dorlot**, (Des matériaux), 3^{eme} édition 2000-2001.
- [19] **Dudognon Julien**. « Etude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques », thèse de doctorat de l'université d'orleans, Décembre 2006.
- [20] **AMY Zahia**, « Caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi 18-10 et étude de son oxydation à température », Mémoire de Magister, 2013.

- [21] **Afaf youcef Azouz.** « Effets de la concentration de (NaCl) sur la corrosion de l'acier doux en présence des cations Zn^{2+} et Anions CrO_4^{2-} », Mémoire de magister, université Hadj Lakhdar Batna.
- [22] **A.D.Mercer,** Testing techniques en corrosion inhibitors, 6^{ème} symposium Européen sur les inhibiteurs de corrosion, P.729, Ferraré (1985).
- [23] **MENNAD Fatima Zohra.** « Etude de corrosion de l'acier APISCT GradN 80 dans des puits d'injection d'eau par l'inhibiteur N-(2-aminoéthyl) », Mémoire de master, université Kasdi Merbeh Ouargla.
- [24] **Jean-Louis CROLET, Gérard Béranger.** Technique d'ingénieur « corrosion en milieu aqueux des métaux et alliage ».
- [25] **V.K.GOUDA et S.M.SAYED,** British corrosion journal, 8, p.71 (1973).
- [26] **H.H UHLIG et R.W.REVIE,** corrosion and corrosion control, 3rd edition, John
- [27] **B.GROSGOGEAT, P.COLON,** Société Francophone de Biomatériaux, (2009-2010).
- [28] **C.W. kovach,** High performance stainless steel, Technical marketing resources, Inc, Pittsburg, PA, USA.
- [29] **J. Baralis, G. Maeder** Précis de Métallurgie, (élaboration, structures- propriétés et normalisation), 5^{ème} édition, Nathan, 1990.
- [30] **P.J. Cunat** Aciers inoxydables : Critères de choix et structure, Techniques de l'ingénieur, M 4540, 2000
- [31] **Ronald CAZES** procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Techniques de l'ingénieur, B7700.
- [32] **Guy MURRY** Soudage et soudabilité métallurgique des métaux Techniques de l'ingénieur,
- [33] **LP.Léon de LEPERVANCHE.** Le soudage.
- [34] **Jean Claude Guichard** La soudure à l'arc électrique ,4^{ème} édition, 2013.
- [35] **Ronald CAZES** soudage à l'arc, Techniques de l'ingénieur, B7730 (1995).
- [36] **Cristian Bonnet** Le soudage : métallurgie et produit, CTAS, 2001.
- [39] **Metals handbook Vol.1** «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.
- [40] « Specification for pipe line », ANSI API specification 5L forty fourth edition, October 1 2007.

[41] **Welding Handbook**, «Consumables for Manuel and Automatic Welding », sixth edition ESAB 1998.

[42] **Julien Bortoluzzi, Benjamin Malatrat, Ludovic Ribstein, Marie Paule Bassez**, Les microscopes électroniques.<http://chemphys.U-Strasbg.fr/mpb/teach/coursenligne.html>.

[44] **J.M Gray and potermouli.M (1987)** metallurgical option for API grade X70 and X80 In international conference: pipe technology. Rome.

[45] **Sadki mohamed**. « étude métallurgique du soudage des aciers HLE (acier api 5l x70) » mémoire de fin d'études.

[46] **Amina Bendjebbour**. « Corrosion localisée des aciers API 5L- X52 de la ligne ASR/MP sollicite en sol Algérien » mémoire du Magister.

[47] **M.Marc BENTI**. Structure métallique.

[48] **Lionel DEPRADEUX INSA de Lyon 2003**. « Simulation numérique du soudage — Acier 316L. Validation sur cas tests de complexité croissante »

[49] **Dominique FRANÇOIS**, Technique de l'ingénieur, «Essais de rupture», M 126.

[50] **Oulbani Said**. « Influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier inoxydable austénitique '316L'.2008.

Références sitographiques

[2] [https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Technologie/Matériaux/Généralités/Aciers inoxydables&oldid=427044](https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Technologie/Matériaux/Généralités/Aciers_inoxydables&oldid=427044).

[3] Stainless Europe L'acier inoxydable et la corrosion .www.arcelormittal.com/stainlesseurope.

[14] <http://lmi.cnrs.fr/spip/-Olivier-DEZELLUS/> / Olivier.dezellus@univ-lyon1.fr

[16] **Diamant Building.Bd.A.Reyers** 80.1030 Bruxelles.Belgique.www.euro-inox.org

[37] **Boutique Rocardier:**WWW.Wikibooks.org .

[38] WWW.Wikipedia.com.

[43] www.soudeurs.com

ANNEXE 1

Présentation de l'E.N.G.T.P

Dénomination : Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers

Logo : E.N.G.T.P.

Statut : Société par actions

Régime juridique : Entreprise publique économique

Filiale du groupe : SONATRACH



Siège de la direction générale

Siège social :

zone industrielle BP 09 - Reghaia - Alger
GTP est une société, filiale du groupe SONATRACH, qui offre des services de construction d'ouvrages destinés à la production, transformation et distribution des Hydrocarbures, la pose de canalisation à grande distance, l'engineering, le procurement, la maintenance industrielle, le soudage et le contrôle de soudage. Pour réaliser ses missions, GTP s'appuie sur un groupe à l'expérience nationale et internationale reconnue, le Groupe SONATRACH.

DOMAINES D'INTERVENTIONS

GTP intervient dans les secteurs suivants :

- Hydrocarbures.
- Chimie et pétrochimie.
- Energie.
- Matériaux de construction.
- Hydraulique.

LES ACTIVITES DE G.T.P

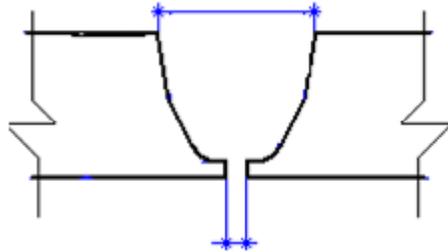
GTP effectue toute sorte d'activités : **Engineering, Génie civil et bâtiments, Montage industriel, Préfabrication, Canalisation, Soudage, Contrôle et essais, Traitement thermique, maintenance industrielle.**



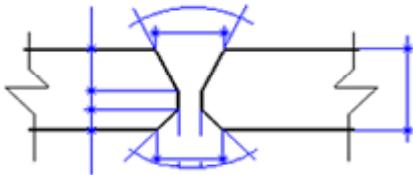
ANNEXE 2

Les différents types de chanfreins

En soudure électrique à l'arc des éléments ou des tôles de fortes épaisseurs, on peut adopter, dans certains cas, des chanfreins profonds en U ou "en calice", qui permettent, d'utiliser une quantité moindre d'électrodes.



Chanfrein en "U"

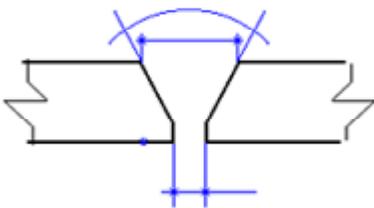


Chanfrein en "X" pour les tôles épaisses.



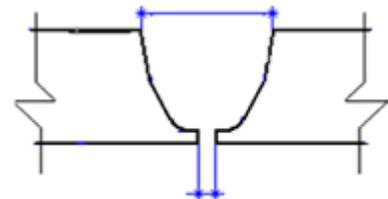
Chanfrein en "X" pour les fers massifs.

Tubes à épaisseur ≤ 20 mm.



Chanfreins en "V".

Tubes à épaisseur > 20 mm.



Chanfrein en "U".



Chanfrein en "V" à double pente.

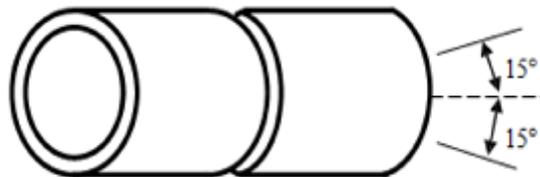
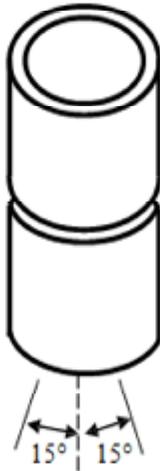
ANNEXE 3

LES DIFFERENTES POSITIONS DE SOUDAGE DES TUBES

Position numéro 1

Position numéro 2

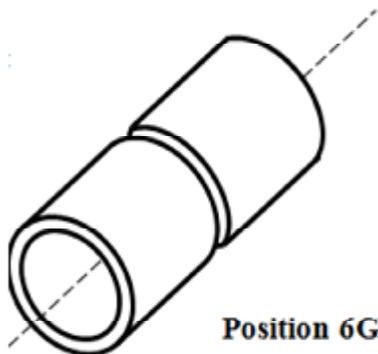
Position 2G



Position 5G

Position numéro 3

Position numéro 4



Position 6G



Position 1G

Le tuyau tourne sur un positionneur