

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie  
Mémoire de projet fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat Génie des  
Matériaux  
Thème :

**Etude de la sensibilité à la corrosion de soudures  
de canalisations en acier inoxydable  
austénitique, vis-à-vis d'eaux traitées  
industrielles**

**LEMMOUI Redha Abderraouf**

Sous la direction de :

**Pr F. HELLAL**

Soutenu publiquement le 19/06/2018

Membres du jury:

**Président : Mr. M. CHITROUB,**

**Pr E.N.P.**

**Promoteur : Mr. F. HELLAL,**

**Pr E.N.P.**

**Examineurs: Mr. H. SEDJAL,**

**Dr E.N.P.**

**Mr. N. BOUABBA**

**Dr en Pharmacien IMC.**

**ENP 2018**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie  
Mémoire de projet fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat Génie des  
Matériaux  
Thème :

**Etude de la sensibilité à la corrosion de soudures  
de canalisations en acier inoxydable  
austénitique, vis-à-vis d'eaux traitées  
industrielles**

**LEMMOUI Redha Abderraouf**

Sous la direction de :

**Pr F. HELLAL**

Soutenu publiquement le 19/06/2018

Membres du jury:

<b>Président : Mr. M. CHITROUB,</b>	<b>Pr E.N.P.</b>
<b>Promoteur : Mr. F. HELLAL,</b>	<b>Pr E.N.P.</b>
<b>Examineurs: Mr. H. SEDJAL,</b>	<b>Dr E.N.P.</b>
<b>Mr. N. BOUABBA</b>	<b>Dr en Pharmacien IMC.</b>

**ENP 2018**

## ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة السلوك الكهروكيميائي للمناطق الملحمة لأنابيب من الفولاذ الأوستينيدي 316L مأخوذ من أنبوب مستخرج من محطة معالجة المياه.

من أجل هذا قمنا بدراسة تشمل ثلاث أوساط هي، مياه إستطلاعية، مياه معذبة ومياه متجمدة (مياه التبريد). تقويم نتائج هذه الصفات المجهرية للمناطق الملحمة وتجارب الإستقطاب مكنتنا من رؤية تأثير عدم تجانس الهيكل المجهري (معدن قاعدي م.ق - منطقة متأثرة حراريا م.م.ح - منطقة منصهرة م.م) ناتجة عن التلحيم، مقارنة بسرعة التآكل. فرق الكمون الكبير كان مسجلا بين الثنائية م.ق/م.م.ح و أن المعدن القاعدي أقل فخامة، وهذا ينطبق على الأوساط الثلاث

## كلمات الرئيسية

الفولاذ الأوستينيدي 316L, التلحيم, التآكل, معدن قاعدي م.ق, منطقة متأثرة حراريا م.م.ح, منطقة منصهرة م.م.

## Abstract:

The purpose of this thesis is to study the electro-chemical behavior of the welded areas of the stainless steel austenitic 316L piping taken from a water treatment plant.

Three environments are subjects to the study, the logging water, a softend water and a frozen water (cooling water). The evaluation of the microstructural characterisation's results of the welded areas and the polarization's trials showed us the effect of the heterogeneity of the microstructure (basic metal BM – heat affected zone HAZ- welding melte-WM) from the welding, towards the corrosive speed. The big difference in potential  $\Delta E$  was recorded between the BM/TAA couple, and the basic metal is less noble, this is able in the three environments.

## keywords

Stainless steel 316L, welding, corrosion, basic metal BM, heat affected zone HAZ, welding melt WM.

## Résumé :

L'objectif de l'étude présentée dans ce mémoire consiste à étudier le comportement électrochimique des zones soudées des canalisations en acier inoxydable austénitiques 316L pris d'une station de traitement d'eau. Trois milieux sont étudiés, eau de sondage, une eau adoucie et une eau glacée (eau de refroidissement). L'évaluation des résultats de caractérisation microstructural des zones soudées et des essais de polarisation ont montré l'effet de l'hétérogénéité de la microstructure (métal de base MB- la zone affectée thermiquement ZAT - la zone fondue ZF) issu après le soudage, vis-à-vis la vitesse de corrosion. La grande différence potentiel  $\Delta E$  a été enregistré entre le couple MB/ ZAT, et que le métal de base est le moins noble, cela est valable dans les trois milieux.

## Mots clés

Acier inoxydable austénitique 316L, soudage, corrosion, métal de base MB, la zone affectée thermiquement ZAT, la zone fondue ZF.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mon éternelle gratitude.*

*A Mon père, ma tante, mes chères sœurs, et mon cher frère, pour leur soutien, encouragement, merci de me supporter.*

*A Isma qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, son aide. Merci de tout ce que tu fais pour moi.*

*A tous mes amis, pour leur présence, et soutien.*

## **Remerciement :**

*Je rends grâce à Dieu le Tout puissant et le Miséricordieux de m'avoir donné la force morale, physique et l'aide pour accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur Pr F. HELLAL de l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir encadré durant mon projet, son soutien et la confiance, qu'il m'a accordée tout le long de mon travail.*

*Je remercie également Monsieur CHITROUB et Monsieur SEDJAL pour leurs conseils et aide.*

*Je remercie chaleureusement membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions*

*Je présente également mes remerciements à mon encadreur Mr N. BOUABBA tout en lui témoignant mon gratitude pour ces précieux conseils.*

*Je tiens aussi à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, en particulier, les professeurs de département de métallurgie qui m'ont encadré, pour les connaissances qu'ils m'ont transmis, et leurs efforts qu'ils ont fourni*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de mes sincères gratitude*

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale .....	13
Chapitre 1 : Traitements des eaux dans l'industrie .....	15
1.1 Introduction .....	16
1.2 Utilisation industrielle de l'eau : .....	16
1.2.1 L'eau qui intervient dans le processus de fabrication .....	16
1.2.2 L'eau qui intervient en amont du processus de fabrication .....	16
1.2.3 L'eau est une utilité (eau d'utilité) .....	16
1.3 Usage de l'eau dans l'industrie pharmaceutique .....	16
1.3.1 Usage générale .....	16

1.3.2	Usage spécifique .....	17
1.4	La chimie de l'eau et les problèmes engendrés en industrie .....	17
1.4.1	Les matières organiques.....	17
1.4.2	Les éléments et les sels minéraux .....	17
1.4.3	Les gaz dissous .....	18
1.5	Traitements des eaux et dispositifs utilisés en industrie .....	19
1.5.1	Quelques appellations et abréviations.....	19
1.5.2	Les dispositifs utilisés pour les traitements d'eau.....	19
1.5.3	Description d'une station de traitement d'eau .....	20
1.6	Contrôle de qualité d'eau au sein d'une entreprise .....	22
1.6.1	Contrôle de l'eau brute.....	22
1.6.2	Contrôle de l'eau adoucie et l'eau glacée .....	22
1.6.3	Contrôle de la vapeur condensée des chaudières et de l'eau de bêche d'alimentation .....	22
1.6.4	Contrôle de l'eau purifiée .....	23
<b>Chapitre 2 Les aciers inoxydables .....</b>		<b>24</b>
2.1	Introduction .....	25
2.2	Structure et composition chimique.....	25
2.2.1	Action du chrome : système Fe-Cr .....	25
2.2.2	Action du carbone : système Fe-Cr-C.....	26
2.2.3	Action du nickel : système Fe-Cr-Ni .....	27
2.2.4	Actions des éléments alphas.....	28

2.2.5	Actions des éléments gammagène : .....	28
2.3	Les différents types d'aciers inoxydables : .....	29
2.3.1	Les aciers martensitiques .....	29
2.3.2	Les aciers ferritiques .....	29
2.3.3	Les aciers austénitiques.....	30
2.3.4	Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (Duplex).....	30
2.4	Les aciers inoxydables austénitiques .....	30
2.4.1	Quelques types des aciers inoxydables austénitiques .....	31
2.5	Propriétés des aciers inoxydables austénitiques.....	31
2.6	L'acier AISI 316L .....	31
2.7	Conclusion.....	32
<b>Chapitre 3 : Le soudage des aciers inoxydables austénitiques .....</b>		<b>33</b>
3.1	Introduction .....	34
3.2	Différents types de soudage des aciers inoxydables austénitiques .....	34
3.2.1	Le Procédé TIG.....	34
3.2.2	Procédé à arc avec électrode enrobée .....	35
3.3	Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques .....	35
3.4	Caractéristiques d'une soudure .....	35
3.4.1	Zone fondue .....	35
3.4.2	La zone affectée thermiquement.....	36
3.4.3	Métal de base (MB) .....	36
3.5	Prévision de la microstructure d'une soudure en acier inoxydable austénitique .....	37

3.5.1	Le diagramme de Schaeffler .....	37
3.5.2	Le diagramme WRC 1992 .....	38
3.5.3	Mode de solidification .....	38
3.6	Conclusion.....	39
<b>Chapitre 4 : LA CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES.....</b>		<b>40</b>
4.1	Introduction .....	41
4.2	La corrosion humide.....	41
4.2.1	La corrosion chimique .....	41
4.2.2	Corrosion électrochimique.....	41
4.2.3	Corrosion biochimique.....	41
4.3	Principaux facteurs de corrosion .....	41
4.3.1	Facteurs liés au milieu .....	41
4.3.2	Les facteurs liés au métal.....	42
4.4	Les différents types de corrosion .....	42
4.4.1	La corrosion uniforme.....	42
4.4.2	La corrosion localisée .....	43
4.5	La passivité des aciers inoxydables.....	43
4.6	Courbe de polarisation des aciers inoxydables .....	44
<b>Chapitre 5 : MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES .....</b>		<b>45</b>
5.1	Introduction .....	46
5.2	Prélèvement et préparation des échantillons .....	46

5.2.1	Echantillonnages .....	46
5.2.2	Préparation des échantillons .....	46
5.3	Caractérisation chimique et microstructurale.....	48
5.4	Caractérisation chimique des milieux .....	49
5.5	Méthodes expérimentales .....	49
5.5.1	Essai de microdureté .....	49
5.5.2	Essais électrochimiques de corrosion .....	51
5.6	Méthodes d'analyses .....	54
5.6.1	Méthode d'examen métallographique.....	54
5.6.2	Analyse électrochimique.....	54
<b>Chapitre 6 : RESULTATS EXPERIMENTAUX .....</b>		<b>57</b>
6.1	Introduction .....	58
6.2	Présentation des résultats .....	58
6.2.1	Observation microscopique .....	58
6.2.2	La microdureté .....	60
6.2.3	La taille des grains .....	61
6.2.4	Résultats des essais électrochimiques .....	61
6.3	Interprétation des résultats et discussions .....	63
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>68</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>70</b>

## Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Propriétés des aciers inoxydables austénitiques. ....	31
Tableau 5-1 : Les dimensions des tubes de la canalisation étudiée. ....	46
Tableau 5-2 : Teneur en éléments d'alliage du 316L en pourcentage massique. ....	48
Tableau 5-3 : Les caractéristiques chimiques des milieux. ....	49
Tableau 6-1 : La taille moyenne des grains. ....	61
Tableau 6-2 : Résultats des essais électrochimiques sur le métal de base. ....	63
Tableau 6-3 : Résultats des essais électrochimiques sur la ZAT. ....	63
Tableau 6-4 : Résultats des essais électrochimiques sur la zone fondue. ....	64
Tableau 6-5 : Caractéristiques des milieux. ....	64
Tableau 6-6 : $\Delta E$ entre les zones de la soudure. ....	66

## Liste des figures

Figure 1-1. 1 : Schéma du circuit de la canalisation de l'eau utilité. ....	21
Figure 2-1: Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome [5].....	26
Figure 2-2 : Influence de la somme des éléments carbone et l'azote sur les domaines austénitiques [5]. ....	27
Figure 2-3 : Coupe du diagramme Fe-Cr-Ni pour 65% de Fe [8]. ....	27
Figure 2-4 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs croissantes en nickel [5]. ....	28
Figure 3-1 : Représentation schématique des différentes zones constituant la soudure. ....	36
Figure 3-2 : Diagramme de Schaeffler.....	37
Figure 3-3 : Diagramme WRC 1992.....	38
Figure 5-1 : Echantillonnage.....	47
Figure 5-2 : Montage utilisé pour l'attaque électrolytique. ....	48
Figure 5-3 Microstructure de l'acier 316L observée au microscope optique. ....	48
Figure 5-4 : Microduromètre. ....	50

Figure 5-5 : Schématisation du Pénétrateur et de l’empreinte laissée après enlèvement de la charge.....	50
Figure 5-6 : Les variations possibles des courbes $E = f(t)$ .....	52
Figure 5-7 : Potentiostat.....	53
Figure 5-8 : Schéma du dispositif.....	53
Figure 5-9: Détermination de la taille des grains .....	54
Figure 5-10 : Courbe schématique de polarisation à l’échelle logarithmique.....	55
Figure 5-11 : Mesure de la vitesse de corrosion par la résistance de polarisation.....	56
Figure 6-1 : La microstructure au niveau du joints de soudure.....	58
Figure 6-2: Métal de base ( $d_g = 11\mu\text{m}$ , 191 HV).....	59
Figure 6-3 : La ZAT ( $d_g = 34\mu\text{m}$ , 152 HV).....	59
Figure 6-4 : La zone fondue (155HV).....	59
Figure 6-5 : Filiation de microdureté Vickers dans la soudure.....	60
Figure 6-6 : Superposition des courbes de polarisation de l’échantillon –métal de base- dans les trois milieux.....	62
Figure 6-7 : Superposition des courbes de polarisation de l’échantillon –ZAT- dans les trois milieux.....	62
Figure 6-8 : Superposition des courbes de polarisation de l’échantillon –Zone fondue- dans les trois milieux.....	62
Figure 6-9 : Le courant de corrosion des différentes zones de soudure dans les différents milieux.....	64
Figure 6-10 : Superposition des potentiels de corrosion des différentes zones de la soudure dans les trois milieux.....	65
Figure 6-11 : $\Delta E$ entre les zones de la soudure dans les différents milieux.....	66
Figure 6-12 Effet de la taille des gains sur la vitesse de corrosion.....	67

# Introduction générale

Les hommes se sont trouvés confrontés à des problèmes de corrosion métallique depuis apparemment fort longtemps et cela depuis qu'ils ont réussi à préparer des métaux qui ne se trouvaient pas à l'état pur dans la nature.

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux et les alliages métalliques subissent de la part de leur environnement, quel qu'il soit, une attaque dont la conséquence est de les faire retourner vers leur forme d'origine, de minerais sous forme oxydes.

La corrosion est un problème majeur, puisque l'on estime que 5 t d'acier disparaissent chaque seconde dans le monde (une très fine couche, mais sur tous les objets, appareils et structures en acier qui existent de par le monde...). Un problème économique, donc, mais aussi de sécurité et de protection environnementale.

L'histoire du fer et des aciers s'est heurtée très tôt à un problème majeur de résistance à la corrosion qui n'a pu être résolu qu'en ajoutant une certaine quantité de chrome. L'acier inoxydable joue un rôle majeur dans la manipulation, le stockage et le traitement de l'eau. Son intérêt réside principalement dans sa résistance aux effets corrosifs d'un large éventail de composés chimiques.

C'est dans les années 1970 que la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable a été systématiquement évaluée pour la première fois dans différents types d'eaux de procédé. On a ainsi testé le comportement des nuances 304 (S30400) et 316 (S31600), contenant respectivement 9 et 12 % de nickel environ, ainsi que d'autres alliages, dans le traitement des eaux usées. Ces tests ayant donné des résultats favorables, les aciers inoxydables austénitiques s'utilisent de plus en plus dans les stations d'épuration pour les tuyaux de traitement et d'aération, les clarificateurs, les racleurs de boues et la boulonnerie. L'emploi de l'acier inoxydable a connu le même essor dans le traitement et la distribution de l'eau potable, où il est désormais considéré comme essentiel.

Le travail qui va être présenté dans ce mémoire touche une problématique industrielle chez l'entreprise IMC (Industrie médico-chirurgicale de Rouiba). Il s'agit de cas de corrosion observé dans l'installation (canalisation) en acier inoxydable austénitiques dans lesquelles circule une eau puisée d'un sondage. Cette eau subit différents traitements en vue d'une utilisation soit pour refroidir des groupes thermiques, soit en priorité, servir de solution pharmaceutique.

Un stage en milieu industriel a été effectué au préalable et a permis de rassembler différents éléments entourant la problématique de corrosion.

Le travail s'est poursuivi au laboratoire de métallurgie de l'ENP en vue de cerner par des techniques métallurgiques, mécaniques et électro-chimiques. Le comportement de canalisations soudées ou cintrées en milieu industriel.

La première partie de ce mémoire concerne la recherche bibliographique, le premier chapitre concerne les traitements des eaux industrielles, le second décrira les généralités sur les aciers inoxydables, plus particulièrement les aciers inoxydables austénitiques. Puis, nous allons aborder le chapitre qui décrit le soudage des aciers inoxydables. Enfin la corrosion de ces aciers.

La deuxième partie contient deux chapitres, le cinquième chapitre de ce mémoire traite les techniques d'analyses utilisées, le matériel et les modes opératoires, tandis que le dernier chapitre rapporte les résultats expérimentaux, l'exploitation de ces derniers et leur impact sur l'acier inoxydable austénitique et à la fin, la conclusion et les perspectives.

# **Chapitre 1 : Traitements des eaux dans l'industrie**

## **1.1 Introduction**

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface stagnantes (lacs, retenues de barrages) ou en écoulement (rivières, fleuves) et des eaux de mer.

Dans toute activité industrielle, l'eau est nécessaire pour de nombreux usages qui dépendent de sa quantité et sa qualité.

## **1.2 Utilisation industrielle de l'eau :**

En termes d'usage de l'eau en industrie, on peut distinguer trois grandes catégories [1]:

### **1.2.1 L'eau qui intervient dans le processus de fabrication**

Elle est appelée eau de process, utilisée au sein même des procédés industriels comme solvant, matière première, agent de fabrication ou fluide de nettoyage des équipements ou du produit fabriqué.

Dans ces applications, la contrainte de qualité de l'eau dépend directement du procédé industriel.

### **1.2.2 L'eau qui intervient en amont du processus de fabrication**

Cette eau est utilisée dans les opérations de lavage et de transport des matières premières.

### **1.2.3 L'eau est une utilité (eau d'utilité)**

Elle participe de façon indirecte à la production en tant que fluide thermique (production de vapeur, eau chaude, eau de refroidissement, eau glacée...etc.).

La contrainte de qualité de l'eau dans ce type d'applications ne sont pas dépendantes de la nature de l'industrie, mais sont liées aux caractéristiques intrinsèques des équipements comme la chaudière, le circuit de refroidissement, le circuit d'eau glacée, les réseaux d'incendie.

## **1.3 Usage de l'eau dans l'industrie pharmaceutique**

### **1.3.1 Usage générale**

Comme dans toutes industries, l'industrie pharmaceutique dispose d'une ou plusieurs stations de traitement d'eau qui alimentent les circuits d'eau de refroidissement, et de chaudière, et même le circuit d'eau de process.

Pour l'intérêt de ce rapport on donne plus de détail sur le circuit d'eau de refroidissement :

Un circuit de refroidissement a pour fonction d'extraire la chaleur d'un procédé ou d'un matériel, la chaleur d'un milieu est transmise à un autre milieu ou à un fluide. bien souvent, l'agent de refroidissement est l'eau.

La chaleur transmise par les fluides ou matériels provoque un réchauffement de l'eau de refroidissement, voir un changement de son état. Un grand nombre des propriétés de l'eau, ainsi que le comportement des contaminants qu'elle referme, change avec la

température, la tendance d'un circuit de se corroder, à s'entartre ou favoriser la croissance microbienne évolue aussi en fonction de la température de l'eau [1].

D'une part pour atteindre certains critères de qualité et une préparation d'une eau industrielle qui répond à la fois aux exigences et aux normes d'utilisation de l'eau sur les appareils, d'autre part, conféré une eau seine pour les circuits afin d'éviter tout problèmes de fuites (corrosion) sur les canalisations d'eau, ou un faible rendement des circuits, l'eau de process et l'eau d'utilité passe par des traitements intervenant sur ses constituants (gaz dissout, sels minéraux, matières organiques, polluants divers), qui seront détaillés dans les paragraphes qui suit.

### **1.3.2 Usage spécifique**

En industrie pharmaceutique, l'eau intervient dans le procédé de fabrication et peut même faire partie du produit pharmaceutique fabriqué et commercialisé, notamment dans le cas des solutions injectables, dans ce cas deux qualités principales sont définies : les eaux purifiées et les eaux pour injection.

Ces qualités d'eau font l'objet de spécifications réglementaires très précises tant en Europe, avec les normes GMP (*Good Manufacturing Practises for Pharmaceutical Products*) qu'aux Etats Unis avec les normes FDA (*Food and Drug Administration*) [1].

Ces eaux doivent être exemptées de toutes bactéries ou virus, et elles doivent également être apyrogènes, c'est-à-dire qu'elles ne doivent contenir aucun composant qui puisse provoquer de la fièvre lors d'une injection, ce qui implique par exemple l'absence d'anticorps ou de toute partie des matériaux membranaires ou intracellulaires des bactéries tuées lors des stérilisations [1].

## **1.4 La chimie de l'eau et les problèmes engendrés en industrie**

L'eau pure ( $H_2O$ ) est incolore, insipide et inodore. Parce que l'eau est contaminée par les substances avec lesquelles elle entre en contact, il n'existe pas d'eau à l'état pure en milieu naturel [1].

En général l'eau naturelle contient des impuretés constituées de matières solides en solution et en suspension, on note [1]:

### **1.4.1 Les matières organiques**

L'eau peut être un milieu de culture de bactéries de cellules, de levures, les microorganismes qui sont principalement des bactéries comme les bactéries sulfato et thiosulfato-réductrices.

### **1.4.2 Les éléments et les sels minéraux**

On distingue :

- Les cations qui sont :
  - Le fer :

Sous forme ferreux  $Fe^{2+}$ , et ferrique  $Fe^{3+}$ , dans une eau prélevée d'un circuit dans une industrie, il existe deux origines de la présence de fer, en outre, la présence naturelle

dans l'eau d'alimentation des circuits, après contact avec des roches contenant du fer, ou bien le fer présent résulte de la corrosion du circuit.

La formation des dépôts de fer, conduit à la formation de films minces très adhérents à l'intérieur des circuits, réduit le rendement d'échange thermique et la capacité de réseau de distribution de l'eau. Ce phénomène accélère la corrosion et entraîne la défaillance des appareils.

- Sodium  $Na^+$  :

Augmente la teneur en solide de l'eau, combiné à l'ion  $OH^-$ . Il favorise la corrosion dans les chaudières sous certaines conditions.

- Le calcium  $Ca^{2+}$  et le magnésium  $Mg^{2+}$  :

La principale cause de l'entartrage dans les échangeurs thermiques et les chaudières.

- L'aluminium  $Al^{3+}$  :

Il peut occasionner des dépôts dans le circuit de refroidissement et contribuer à la formation de tartre.

Et d'autres comme le  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ .

- Les anions :

- Les sulfates  $SO_4^{2-}$  :

Le principal problème que pose la présence d'ions de sulfate dans l'eau est l'entartrage par la précipitation du sulfate de calcium.

- Le chlore :

On le trouve à l'état d'ion hypochlorite  $ClO^-$  ou acide hypochloreux  $HOCl$ , augmente la teneur en solides, et intensifie les propriétés corrosives de l'eau.

- Les nitrates  $NO_3^-$  :

On les retrouve dans les eaux naturelles en quantités relativement faibles. Par ailleurs, la présence de nitrates dans l'eau se révèle comme étant un facteur à considérer vu le rôle qu'ils jouent dans la lutte contre la fragilité caustique des composants d'un circuit.

### 1.4.3 Les gaz dissous

- Le dioxyde de carbone  $CO_2$  :

La corrosion est le principal effet de la présence dans l'eau du  $CO_2$  dissous. Ce gaz produit de l'acide carbonique, qui se révèle être un agent corrosif.

- L'oxygène dissous :

En raison des propriétés corrosives de l'oxygène dissous à l'égard des alliages de fer et de cuivre, sa présence est indésirable dans les eaux industrielles.

## 1.5 Traitements des eaux et dispositifs utilisés en industrie

Très souvent l'eau brute obtenue par puisage doit être traitée avant d'entrer dans l'usine pour assurer que sa qualité et ses propriétés correspondront aux spécifications requises par le processus industriel.

Des réserves permanentes d'eau sont nécessaires pour un grand nombre de raisons comprenant la production, le traitement des matériaux et le refroidissement.

Parmi les phénomènes pouvant être aperçus dans ce genre d'industries, on retrouve :

- Corrosion, oxydation, érosion, corrosion sous dépôt.
- Croissance biologique : bactéries, algues, films biologiques.
- Dépôt de sels : entartrage.

Ces phénomènes peuvent avoir pour conséquence :

- Des menaces pour la santé.
- Un accroissement des coûts et du temps de maintenance : nettoyage d'un échangeur.

### 1.5.1 Quelques appellations et abréviations

Avant de décrire les traitements effectués sur une eau, on doit donner les définitions des différentes appellations et abréviations usuellement employées [3] :

- TH : titre hydrotimétrique ou Dureté. C'est la teneur en calcium et magnésium en solution dans l'eau.
- TA : titre alcalimétrique. C'est la teneur en hydroxyde ( $OH^-$ ), et en carbonate ( $CO_3^{2-}$ ) en solution dans l'eau.
- TAC : titre alcalimétrique complet C'est la teneur en hydroxyde ( $OH^-$ ), et en carbonate ( $CO_3^{2-}$ ), et en hydrogénocarbonate ( $HCO_3^-$ ) en solution dans l'eau.

Ces différents titres définissent le caractère plus ou moins entartrant d'une eau.

- °F : le degré français est une unité de mesure symbolisant une concentration dans l'eau, c'est à dire une quantité de matière dans un volume donné.

### 1.5.2 Les dispositifs utilisés pour les traitements d'eau

- Les filtres:

Dispositifs permettant de retenir les particules solides en suspension dans l'eau. L'efficacité de ce type de matériel est donnée par la finesse de la maille de la surface filtrante, donnée en microns, mais également par la vitesse de passage de l'eau à travers la maille.

➤ L'adoucisseur :

Dispositif permettant d'éliminer par échange ionique la dureté d'une eau, de façon à éviter les risques d'entartrage d'un producteur de chaleur par exemple. L'adoucissement se fait en diffusant l'eau à travers une colonne de résine dite cationique, permettant la fixation du calcium et du magnésium par la résine, qui libère en échange du sodium. Lorsque la résine a libéré tous son sodium, la résine est dite épuisée ; l'adoucisseur n'est plus capable à ce moment de continuer à fixer du calcium, il est alors nécessaire de le faire régénérer.

La régénération permet aux résines de se recharger en sodium, après avoir libérées dans l'eau allant à l'éégout le calcium et le magnésium qu'elles avaient retenus.

➤ Les osmoseurs (osmose inverse) ou purificateurs d'eau

Leurs rôles permettent d'obtenir une eau presque, totalement, déminéralisée et faiblement chargée en matières Organiques. L'osmose inverse est un procédé de séparation par membrane semi-perméable, dont la structure particulière ne laisse passer ni les micro-organismes, ni les molécules organiques, ni les sels minéraux.

**Principe OSMOSE INVERSE:**

Lorsque deux solutions de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable (diamètre des pores 50 nm), l'eau passe de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée. Il en découle une augmentation de la pression exercée sur la membrane par la solution la plus concentrée. Ce phénomène, appelé Osmose, se poursuit jusqu'à ce que l'augmentation de pression soit suffisante pour empêcher le passage de l'eau.

### **1.5.3 Description d'une station de traitement d'eau**

A titre d'exemple, on se base sur la station de traitement d'eau d'IMC.

IMC dispose de plusieurs stations de traitement d'eau. Les cas de corrosions ont été signalés au niveau de l'une de ces unités, c'est l'unité Biolyse 4, qui a fait l'objet du stage.

La station contient une bache d'eau et une salle de pompage qui alimente la station de traitement d'eau. La station possède deux circuits d'eau destinés à différents usages [2] :

#### **1.5.3.1 Circuit process ou circuit de production d'eau pure**

- Un filtre fin (degré de filtration 100µm)
- Un filtre multimédia
- Cartouche filtrante (degré de filtration 10µm)
- Adoucisseur
- Cartouche filtrante (degré de filtration 5µm)
- Osmose inverse (suppression des impuretés et des dissouts).
- Dégazage membranaire
- Electrodéionisation (suppression des composants électrostatiques de l'eau : les ions, particules ionisable)
- Un distillateur, et une boucle d'eau pour produit injectable.

A la sortie de l'électrodéionisation on dispose d'une eau purifiée.

### 1.5.3.2 Circuit d'utilité

- Un filtre de 135 $\mu$ m, (filtre à lavage inversé)
- Un filtre multimédia (100 à 25 $\mu$ m).
- Un adoucisseur.
- 03 cuves d'eau glacée, chacune est reliée à un groupe de froid, et alimente un ou plusieurs équipements.
- Une bêche d'alimentation chaudière.

Dans notre étude, nous nous intéressons sur le circuit d'utilité. La figure 1 est un schéma explicite de la station de traitement d'eau biolyse 4 d'IMC :

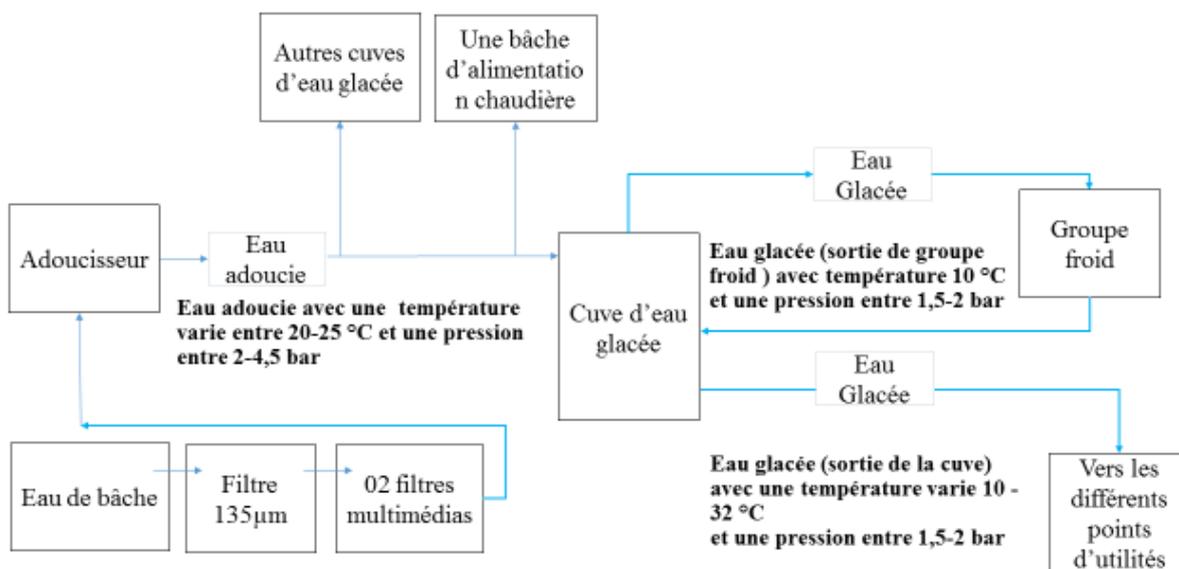


Figure 1-1. 1 : Schéma du circuit de la canalisation de l'eau utilité.

#### ➤ Fonctionnement de circuit utilité :

Sur le circuit utilité illustré par la figure 1, l'eau de bêche (eau brute) passe par un prétraitement de filtration de 135 $\mu$ m et un Filtre multimédia de degré de porosité plus fine.

Par la suite l'eau filtrée passe par un adoucisseur cette eau alimente les trois cuves d'eau glacée et la bêche d'Alimentation chaudière.

La température d'eau adoucie alimentant les équipements des utilités est comprise entre 20-25°C, et la pression est comprise entre 2-4,5 bar, selon la demande d'eau adoucie par les équipements des utilités.

L'eau adoucie sera conditionnée en terme de température au niveau des cuves, à partir de là l'eau est nommée l'eau glacée, cette dernière sert à alimenter les groupes de froid qui sont en circuit fermé avec la cuve (l'eau glacée à la sortie du groupe froid est à la

température de 10 °C et à la pression entre 1,5-2 bar) et sert aussi à alimenter les différents équipements d'utilités, sur cette canalisation la température de l'eau glacée varie entre 10 -32 °C et de pression entre 1,5-2 bar.

## **1.6 Contrôle de qualité d'eau au sein d'une entreprise**

Il est recommandé de maîtriser la qualité de l'eau d'appoint d'une application donnée, ainsi que l'évolution de la qualité d'eau dans chaque application.

Pour cela chaque entreprise effectue une série de contrôle de qualité de l'eau.

On se limitant sur notre cas d'étude, pour d'écrire certain nombre de contrôle. IMC dispose de laboratoires hautement performants permettant un contrôle de la qualité de toutes ses productions, en particulier la qualité de l'eau de ses stations. Les productions sont aussi validées par un laboratoire étatique LNCPP (laboratoire National de Contrôle des Produits Pharmaceutiques).

Voici quelques contrôles de qualité d'eau à effectuer et les spécifications internes de la société IMC [2] :

### **1.6.1 Contrôle de l'eau brute**

1. Contrôle de l'aspect : limpide, incolore, inodore.
2. Mesure de la Conductivité (à 25°C), <1250 µs/cm.
3. Mesure de pH doivent être comprise entre 6.5 et 9.
4. Dosage des chlorures < 500ppm.
5. Dosage des substances oxydables, la solution reste colorée en rose.
6. Dosage d'ammonium <4ppm.
7. Dosage nitrates <500ppm.
8. Titre alcalimétrique (TA) < 0 °F.
9. Titre alcalimétrique complet (TCA) <35 °F.
10. Titre hydrotimétrique (TH) entre 10-50 °F.

### **1.6.2 Contrôle de l'eau adoucie et l'eau glacée**

1. Contrôle de l'aspect : limpide, incolore, inodore.
2. Mesure de pH doivent être comprise entre 6.5 et 9.
3. Dosage des chlorures <500 ppm.
4. Mesure de titre hydrotimétrique <0.5 °F.
5. Mesure de la Conductivité (à 25°C).

### **1.6.3 Contrôle de la vapeur condensée des chaudières et de l'eau de bûche d'alimentation**

- 1- Aspect : liquide limpide sans matières en suspension ni mousse.
- 2- Mesure de la conductivité (à 25°C) < 8ms/cm
- 3- Mesure de pH doivent être comprise entre 10.5 et 12.
- 4- Titre alcalimétrique (TA) entre 30 et 70 °F.
- 5- Titre alcalimétrique complet (TCA) entre 80 et 120 °F.
- 6- Titre hydrotimétrique <1°F.
- 7- Densité <1.003 g/l.
- 8- Dosage des chlorures.
- 9- Dosage des phosphates <30 mg/l.

#### **1.6.4 Contrôle de l'eau purifiée**

- 1- Contrôle de l'aspect : limpide, incolore, inodore.
- 2- Mesure de la conductivité (à 20°C) < 4.3µs/cm.
- 3- Dosage des substances oxydable.
- 4- Dosage des métaux lourds (limite 0.1ppm).
- 5- Dosage des nitrate (limite 0.2ppm).

## Chapitre 2 **Les aciers inoxydables**

## 2.1 Introduction

Les aciers sont connus pour leur mauvaise résistance à la corrosion, c'est ce qui a poussé les chercheurs à trouver un moyen pour les protéger, en utilisant généralement deux types de protection : soit par l'ajout des éléments d'additions ou par le dépôt d'une couche protectrice sur le produit fini. Jusqu'à la découverte des aciers inoxydables qui regroupent ces deux types de protection,

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer, dont la principale propriété est la résistance à la corrosion. Toutefois, bien qu'on les qualifie inoxydables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel qui a des teneurs supérieures à 11%, rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface [4].

## 2.2 Structure et composition chimique

Les différents types d'aciers inoxydables se distinguent essentiellement par leur structure cristallographique. Aux basses températures et jusqu'à 910 °C, le fer a une structure cubique centrée, c'est le fer  $\alpha$ . A partir de 910 °C, il se transforme en fer  $\gamma$  dont la structure est cubique à faces centrées et une nouvelle transformation intervient à 1400 °C pour donner le fer  $\delta$  dont la structure est cubique centrée. L'addition des éléments d'alliage modifie en effet la structure cristallographique du fer [5].

Les éléments d'alliages se répartissent en deux catégories : ceux qui favorisent le maintien du fer  $\alpha$  et ceux qui stabilisent le fer  $\gamma$ .

### 2.2.1 Action du chrome : système Fe-Cr

Le chrome, cristallisant dans le système cubique centré, est un stabilisateur de fer  $\alpha$ , et élargit son domaine d'existence [6]. Il constitue l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables. Il génère la passivation de l'acier par la formation d'un film passif que l'on trouve sous forme d'oxyde complexe de type  $(Fe,Cr)_2O_3$  et d'hydroxyde  $Cr(OH)_3 \cdot nH_2O$  dans le film passif [7].

Le diagramme d'équilibre Fe-Cr (figure 1) montre les différents domaines qui peuvent exister en fonction de la teneur du chrome.

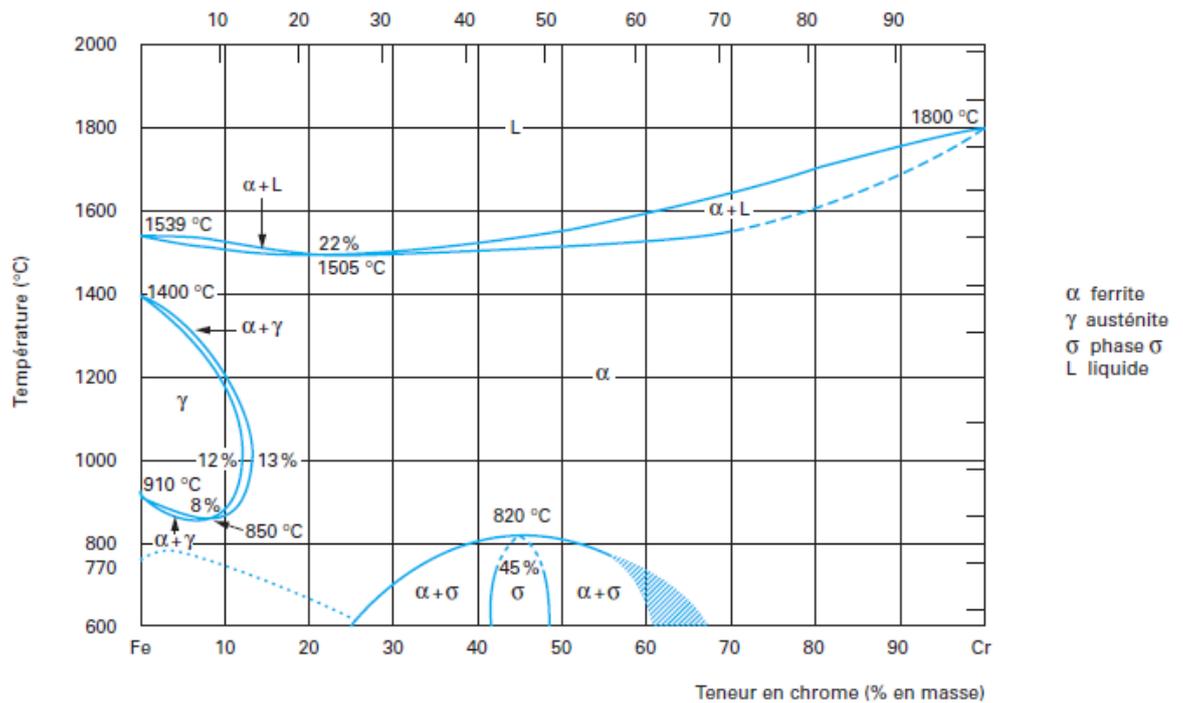


Figure 2-1: Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome [5].

On peut délimiter différentes régions de teneurs en chrome [5] :

- \* Pourcentage de Cr < 13% : ces alliages ont la possibilité d'être austénisés totalement ou partiellement et peuvent donc se transformer. L'existence de la phase  $\gamma$  est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « Boucle  $\gamma$  ».
- \* Pourcentage de Cr > 13% : ces alliages sont ferritiques à toutes températures et ne peuvent pas donc subir de trempe martensitique.
- \* Pour des teneurs élevées en chrome, il y a possibilité d'apparition d'une phase intermétallique, dure et fragile, dite phase sigma ( $\sigma$ ). Cette phase sigma peut apparaître autour de la composition 50/50 (entre 45 et 55%), et elle peut précipiter aux joints de grains ferritiques  $\alpha$  en rendant fragile l'alliage dans le cas de fortes teneurs en chrome.

### 2.2.2 Action du carbone : système Fe-Cr-C

Le carbone possède une action gammagène puissante, il élargit fortement le domaine austénitique. En outre, il peut donner lieu à la précipitation de carbures qui, bien qu'ils aient un pouvoir durcissant peuvent conduire néanmoins à des problèmes de tenue à la corrosion. Pour ces raisons, la teneur en carbone est dans la plupart des cas maintenue très basse [4]. Le fait d'ajouter du carbone à un alliage binaire Fe-Cr élargit en température et en concentration le domaine d'existence de la phase austénitique  $\gamma$ . Cela est illustré dans la figure 2 :

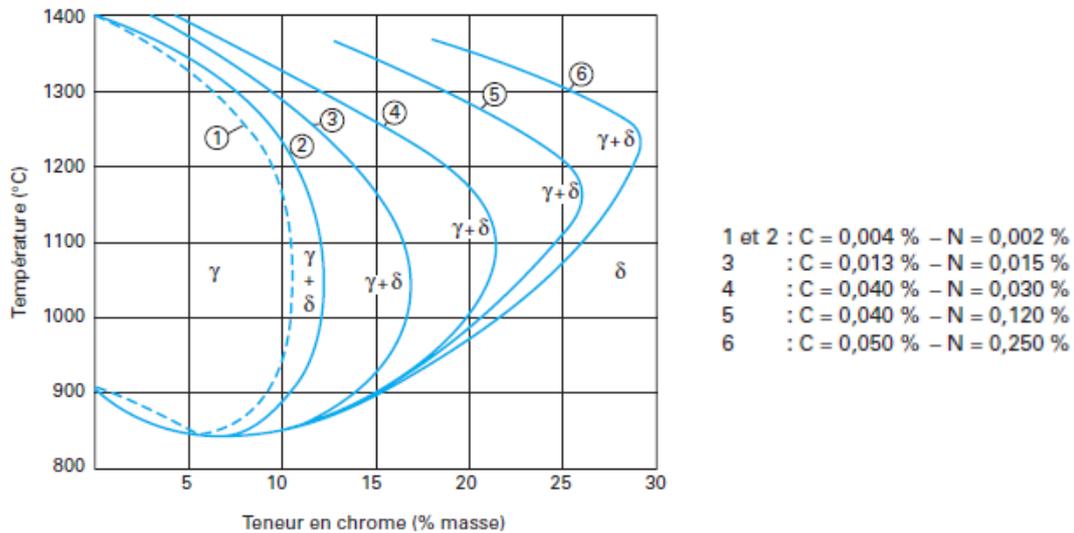


Figure 2-2 : Influence de la somme des éléments carbone et l'azote sur les domaines austénitiques [5].

### 2.2.3 Action du nickel : système Fe-Cr-Ni

Le nickel, de structure cubique à faces centrées favorise l'extension du domaine austénitique. Il est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliage des aciers inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques.

Le nickel améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension [6]. Comme le carbone, le nickel élargit en température et en concentration le domaine austénitique des alliages Fe-Cr. Mais il est remarquable qu'il faut une teneur beaucoup plus importante en nickel pour élargir la boucle  $\gamma$  qu'il en faut avec l'addition du carbone. Ceci démontre que le carbone a un pouvoir gammagène beaucoup plus prononcé que celui du nickel [4]. La figure 3 présente le diagramme d'équilibre ternaire Fe-Cr-Ni.

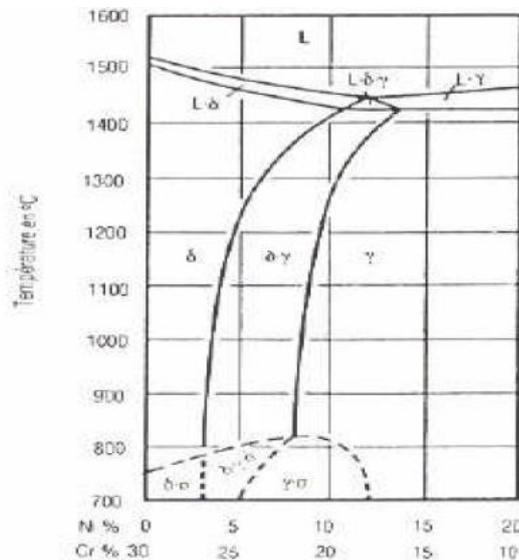


Figure 2-3 : Coupe du diagramme Fe-Cr-Ni pour 65% de Fe [8].

La figure 4 montre l'effet du nickel sur l'extension de la boucle  $\gamma$

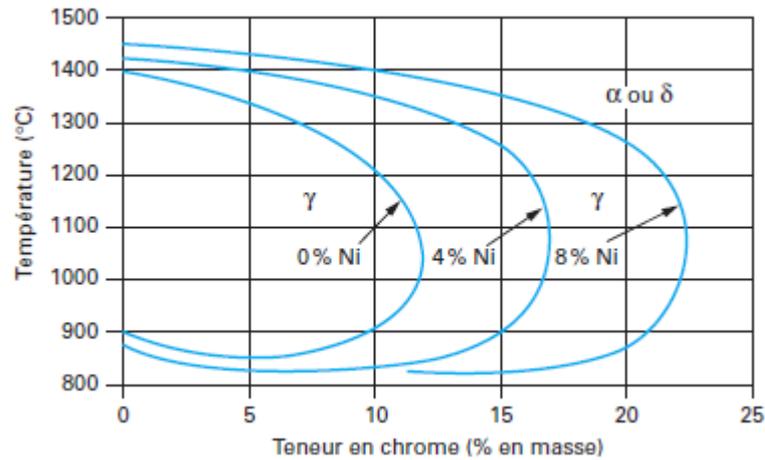


Figure 2-4 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs croissantes en nickel [5].

### 2.2.4 Actions des éléments alphasagènes

- Molybdène : il améliore la résistance à la corrosion des aciers inoxydables 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 [8].
- Silicium : il améliore la résistance à l'oxydation à chaud. A teneurs élevées, il augmente la résistance à la corrosion, par exemple en milieux concentrés d'acide nitrique [8].
- Niobium : c'est un formateur de ferrite, il s'oppose à la corrosion intergranulaire grâce à sa forte additivité pour le carbone.
- Titane : 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 intercrystalline [5,8].
- Aluminium : utilisé dans les alliages réfractaires, il se comporte comme le silicium. En présence du nickel, il peut former des composés dont la précipitation provoque des durcissements structuraux [6].
- Vanadium : il n'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 [8].

### 2.2.5 Actions des éléments gammagène :

- Azote : élément gammagène puissant, contribue à stabiliser l'austénite. L'ajout de l'azote augmente plus que toute autre addition la limite d'élasticité. De plus, des teneurs croissantes augmentent la résistance à la corrosion localisée par piqûres et à la corrosion inter-granulaire, la précipitation du nitrure  $Cr_2N$  moins riche en chrome que  $Cr_{23}C_6$  provoquant un appauvrissement en chrome plus faible au voisinage des joints de grains par rapport au carbone [4,8].

- Manganèse : il ne favorise pas l'extension du domaine austénitique, mais contribue à la stabilité de l'austénite par la formation de sulfure de manganèse. Il rend plus difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr-Ni et lors de sollicitation mécanique aux basses températures.
- Cuivre : il améliore la résistance à la corrosion, et augmente l'aptitude à la frappe [8].

### 2.3 Les différents types d'aciers inoxydables :

La classification des aciers inoxydables dépend essentiellement de leur structure puisque leurs propriétés mécaniques sont en corrélation directe avec celle-ci.

Remarquons que du point de vue de la corrosion, les structures les plus favorables sont celles qui ne présentent qu'une seule phase homogène (ferrite, austénite) car la présence de deux constituants dans un acier placé dans un milieu de corrosion peut donner naissance à des effets de piles [4].

Cependant, l'utilisation en milieu corrosif des aciers inoxydables, ayant des structures homogènes à plusieurs phases (austénite + ferrite, martensite + ferrite), n'est surtout pas à négliger.

Quatre grandes familles d'aciers inoxydables peuvent être distinguées :

#### 2.3.1 Les aciers martensitiques

Les aciers martensitiques contiennent en moyenne 12 à 17% de chrome, 0.10 à 1.10% de carbone et parfois des additions de nickel, de molybdène et éventuellement de soufre, en vue d'améliorer l'usinabilité. Ils sont, en règle générale, utilisés à l'état trempé et revenu, état dans lequel ils présentent des caractéristiques mécaniques et une résistance à la corrosion optimale.

La trempe de ces aciers est caractérisée par un mécanisme de transformation relativement simple, un chauffage d'austénitisation suivi d'un refroidissement à vitesse appropriée, dans le but de réaliser une transformation martensitique. L'obtention d'une structure entièrement martensitique, après trempe, confère à ces nuances une limite d'élasticité, une résistance à la rupture et une dureté très élevées [8].

La résistance à la corrosion de ces aciers, bien qu'inférieure à celle des aciers ferritiques et austénitiques, est bonne à l'air, aux solutions salines à caractères oxydant et aux produits alimentaires. Ils sont surtout utilisés en coutellerie et pour les pièces mécaniques fortement sollicitées, soumises à des actions corrosives [9].

#### 2.3.2 Les aciers ferritiques

Les aciers ferritiques contiennent 12 à 20 % de chrome et les super-ferritiques, plus de 20% de chrome, d'où leur résistance à la corrosion élevée. Ils possèdent des propriétés mécaniques intéressantes et notamment une limite d'élasticité assez élevée [8]. Ces aciers ont une structure identique à celle du fer  $\alpha$  (cubique centré) et en principe ils la conservent à toute température, en particulier à l'ambiante, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$ .

Comme éléments d'alliage complémentaires, on préfère additionner ceux qui stabilisent la ferrite comme par exemple le molybdène pour améliorer la résistance à la corrosion.

De plus, ces aciers sont magnétiques et peuvent être durcis modérément par écrouissage mais non par traitement thermique. On les utilise sous forme d'enjoliveurs sur les automobiles et comme matériau de construction pour les usines d'acide nitrique synthétique [3].

### **2.3.3 Les aciers austénitiques**

Ces aciers ont à l'ambiante une structure austénitique. Cette structure est cubique à faces centrées, non magnétiques et se déforme facilement. Ces aciers présentent des teneurs en chrome supérieures ou égales à 17 % et des proportions en nickel et en manganèse suffisantes (en général, au moins 8 % de nickel) pour assurer la stabilité de l'état austénitique à toutes températures [4].

Les aciers inoxydables austénitiques possèdent une grande stabilité structurale qui rend possible leur utilisation dans un large domaine de température. Ils ne sont pas durcis par la trempe mais par écrouissage. De plus, leur résistance aux différents modes de corrosion est meilleure que celle des aciers des deux classes précédentes. Cette résistance est améliorée par la présence de teneur croissante en molybdène [9].

Les aciers austénitiques offrent une très basse limite d'élasticité et une grande sécurité quant à la rupture sous contrainte. Les valeurs typiques d'allongements à la rupture se situent entre 40 et 50% et sont ainsi pratiquement le double de celles des aciers ferritiques, martensitiques et austéno-ferritiques [8]. Leurs résiliences sont excellentes. Elles ne présentent jamais de caractère de rupture fragile.

### **2.3.4 Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (Duplex)**

Ces aciers sont caractérisés par de hautes teneurs en Chrome (25% et plus) et des teneurs relativement basses en Nickel (5%) [5]. Ils présentent la particularité de posséder une structure biphasée (austénite + ferrite) à température ambiante, leur teneur en austénite étant comprise entre 40 et 60% en fonction des nuances. On les nomme également aciers « duplex ». Leurs caractéristiques mécaniques en traction sont plus élevées que celles des aciers austénitiques (environ 1,2 fois pour la résistance et 2 fois pour la limite élastique).

Ils peuvent également être durcis par écrouissage à froid. Leur résistance à la corrosion est globalement supérieure à celle des aciers austénitiques, en particulier vis à vis de la corrosion généralisée et de la corrosion sous contrainte [4].

## **2.4 Les aciers inoxydables austénitiques**

Les aciers inoxydables austénitiques Fe-Cr-Ni (série 300 selon ASTM) sont les aciers les plus répandus dans le marché, ceci est dû à leur structure cubique à faces centrées qui leur confère de nombreux avantages en terme de propriétés mécaniques. Pour appartenir à ce groupe, la somme des teneurs en chrome et nickel doit être supérieure à 26% afin d'obtenir une structure totalement austénitique à température ambiante comme le montre le diagramme Fe-Cr-Ni vu auparavant, on retrouve le plus souvent les combinaisons 18/8 et 18/10 avec une très faible teneur en carbone (<0,06%), il existe 50 nuances d'acier inoxydable austénitique selon la norme NF EN 10088-1 CIJ [10].

## 2.4.1 Quelques types des aciers inoxydables austénitiques

### 2.4.1.1 Le type INOX 304 :

Son code de couleur est le Jaune. C'est le type d'acier inoxydable le plus couramment utilisé en dépit de sa qualité d'usinage acceptable. Il a tout de même une bonne résistance à la corrosion et bonne soudabilité. Son formage à froid donne de très bons résultats (légèrement magnétique lorsqu'il est travaillé à froid). Il est très utilisé dans les hôpitaux, blanchisseries, et de nombreuses applications mécaniques en général [11].

### 2.4.1.2 Le type (INOX 303) :

Son code de couleur est le Blanc, comme tous les aciers austénitiques, il est amagnétique.

Ce type contient du soufre ce qui facilite son usinage, il a une bonne résistance à la contorsion mais sa soudabilité est médiocre. Son formage à froid est possible mais en évitant les coudes avec des angles vifs [11].

### 2.4.1.3 Le type (INOX 316L)

Son code de couleur est le Rouge. Il a une résistance élevée à la corrosion, surtout pour l'eau salée et les acides et une bonne soudabilité mais sa qualité d'usinage reste acceptable. Son formage à froid donne de bons résultats (Amagnétique une fois recuit, légèrement magnétique lorsqu'il est travaillé à froid) [11].

### 2.4.1.4 Le type (INOX 321)

Son code de couleur est le Bleu. Il a une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation ainsi qu'une très bonne soudabilité, néanmoins son usinabilité reste acceptable. Son formage à froid quant à lui, donne de bons résultats (amagnétique une fois recuit, légèrement magnétique lorsqu'il est travaillé à froid) il est utilisé dans la pétrochimie, toutes applications mécaniques en général [11].

## 2.5 Propriétés des aciers inoxydables austénitiques

On résume quelques propriétés des aciers AISI 300 dans le tableau suivant :

Tableau 2-1 : Propriétés des aciers inoxydables austénitiques [12].

Dénomination		Re 0,2 0,2% limite d'élasticité MPa	Re <sub>m</sub> Résistance à la traction MPa	A Allongement %	Dureté HRB	Coefficient de dilata- tion moyen à 20 °C 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> 20 – 400 °C
EN	AISI / ASTM					
<b>Aciers inoxydables austénitiques</b>						
1.4301	304	210 - 230	520 - 720	45	80	17,5
1.4306	304L	200 - 220	500 - 670	45	79	18,0
1.4436	316	220	530 - 730	40	-	17,5
1.4404	316L	220 - 240	520 - 680	45 - 40	79	17,5
1.4541	321	200 - 220	500 - 720	40	80	17,5
1.4450	347	200 - 220	500 - 720	40	85	17,5

## 2.6 L'acier AISI 316L

La désignation 316L (1.4404 selon EN) est une désignation d'ASTM Internationale qui est un organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux. La différence entre le 316 et 316L réside dans la teneur en

carbone, avec « L » signifiant « Low carbon », généralement une teneur inférieure à 0.03 [4].

Le 316L est un acier inoxydable contenant 16.5 à 18.8% de chrome, 10 à 13% de nickel et entre 2-2.5% de molybdène, cette dernière améliore la résistance à la corrosion, en particulier dans les environnements chlorés. La faible teneur en carbone de l'alliage 316L lui confère une meilleure résistance à la corrosion dans les structures soudées [4,11].

Cette nuance est utilisée le plus souvent pour le cas d'environnement suffisamment corrosif (dans le cas des soudures ou une possibilité de corrosion inter-granulaire).

Les aciers inoxydables 316L sont utilisés dans de nombreux domaines, allant des pipelines dans le désert, aux instruments médicaux dans les hôpitaux, mais leur utilisation reste limitée pour les cas spéciaux, où le risque de corrosion est fort présent. Par conséquent leur utilisation est très répandue dans les usines chimiques et pétrochimiques, dans l'architecture, l'industrie alimentaire, l'industrie pharmaceutique [8].

## **2.7 Conclusion**

Il existe une assez large gamme d'aciers dits inoxydables, qui diffèrent de par leurs compositions chimiques. Le chrome est l'élément d'alliage essentiel de tous ces aciers et c'est lui qui leur attribue leur caractère inoxydable. Les propriétés mécaniques de ces alliages ne sont pas à la hauteur de leur résistance à la corrosion mais restent bonnes et acceptables même à basse température.

# **Chapitre 3: Le soudage des aciers inoxydables austénitiques**

### 3.1 Introduction

Les aciers inoxydables austénitiques sont particulièrement adaptés au soudage, ce qui justifie leur place prépondérante dans les constructions chaudronnées en acier inoxydable.

D'une manière générale le soudage des aciers austénitiques ne nécessite pas de préchauffage ni précaution de refroidissement ou de traitement thermique ultérieur. En effet ces aciers étant austénitiques à toute température, ils ne manifestent pratiquement pas de transformation métallurgique lors du soudage et les propriétés mécaniques des joints sont comparables à celles du métal de base.

### 3.2 Différents types de soudage des aciers inoxydables austénitiques

De nombreux procédés de soudage par fusion peuvent être employés lors de la mise en œuvre des aciers inoxydables : soudage à l'arc avec électrode enrobée, sous flux, MIG, TIG, soudage au plasma, soudage par faisceau d'électrons, par faisceau laser. Ces procédés doivent assurer [12] :

- Une bonne continuité géométrique sans défauts de surface qui pourrait constituer des amorces de corrosion
- Une bonne conservation de la résistance à la corrosion de l'assemblage. Ce résultat sera obtenu si le procédé permet d'éviter tout départ d'élément d'alliage utile (le chrome) et tout apport d'élément nocif tel que le carbone.
- Une bonne tenue mécanique qui sera généralement obtenue si la géométrie de l'assemblage d'une part et la composition chimique du métal fondu sont satisfaisantes, notamment, en ce qui concerne cette dernière, si les conditions nécessaires pour éviter la fissuration à chaud sont satisfaites.

#### 3.2.1 Le Procédé TIG

Dans ce procédé, l'énergie nécessaire à la fusion du métal qui va constituer le joint soudé est fournie par un arc électrique amorcé et entretenu entre une électrode en tungstène (ou alliage de tungstène) et la pièce à souder.

Le soudage des aciers inoxydables est toujours effectué en courant continu en polarité directe « pôle (-) à l'électrode »

Dans ces conditions, c'est la pièce qui est soumise au bombardement électronique alors que l'électrode, généralement en tungstène, ne s'use que très peu.

Le soudage sous atmosphère inerte (argon, hélium, mélange argon-hélium ou mélange argon-hydrogène) se fait manuellement ou de manière automatique. Si l'on utilise un métal d'apport, celui-ci se présente sous la forme de baguettes nues comme en soudage au chalumeau oxyacétylénique ou sous la forme de bobines en soudage automatique. Le flux de gaz inerte qui protège la zone de l'arc des gaz atmosphériques (azote, oxygène) permet d'obtenir un arc très stable [13].

Les avantages de ce procédé dans le cas du soudage des aciers inoxydables peuvent se résumer comme suit [12] :

- Source de chaleur très concentrée (zone fondue étroite et profonde).
- Arc très stable et bain de fusion calme et d'importance réduite.

- Usure très faible de l'électrode.
- La réalisation des cordons lisses de très bel aspect de surface, de bonne compacité et des excellentes propriétés mécaniques du joint soudé.
- Apprentissage rapide.

### **3.2.2 Procédé à arc avec électrode enrobée**

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est un procédé à la fois rapide et d'une bonne souplesse d'utilisation sur toutes les nuances d'aciers inoxydables. L'électrode enrobée est constituée par une âme métallique centrale autour de laquelle est disposé concentriquement l'enrobage. Généralement, l'âme métallique constitué par un fil en acier inoxydable qui permet la conduction de courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte les éléments d'alliages devant assurer une grande partie des caractéristiques désirées de la soudure. L'enrobage des électrodes contient des oxydes complexes, des fondants et des carbonates intimement mélangés puis agglomérés à l'acide de silicate alcalin par dissociation à haute température des carbonates, il est possible de générer une protection gazeuse tandis que les oxydes sous forme d'un laitier participent aux réactions d'affinage du bain de fusion [13].

Cet enrobage de l'électrode procède un triple rôle qui est [14] :

- La protection de métal fondu du contact de l'acier et évite l'oxydation du chrome.
- La contribution à la bonne qualité métallique du joint à sa résistance à la corrosion.
- Stabilisateur de l'arc.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblage en aciers au carbone et peu alliés. C'est un procédé qui se rencontre dans tous les domaines industriels (sur les chantiers comme soudage des ponts, les navires et des pipelines).

### **3.3 Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques**

Les propriétés physiques des aciers inoxydables austénitiques diffèrent sensiblement de celles des aciers ordinaires au carbone, ce qui leur confère une meilleure aptitude pour le soudage, en outre, leur point de fusion (1 425-1 475 °C) est plus bas, leur résistivité électrique plus élevée. Il faut donc moins de chaleur. Et dans les procédés de soudage par résistance, à temps de soudage égal, une intensité moindre pour les souder.

Ils ont une conductivité thermique plus faible donc la chaleur de soudage se transmet plus lentement et tend à se localiser au voisinage des joints de soudure dans une zone plus étroite [13].

### **3.4 Caractéristiques d'une soudure**

Quelques soit le type de soudage par fusion utilisé, le cordon de soudure se constitue de trois zones :

#### **3.4.1 Zone fondue**

Suite au refroidissement rapide à haute température, la zone fondue se solidifie à l'état austénite-ferritique ou totalement ferritique et sa transformation ferrite( $\delta$ )  $\rightarrow$  austénite n'est généralement pas complète. Une proportion de ferrite subsiste à la température

ambiante elle est d'autant plus importante que le refroidissement est plus rapide dans le domaine de température supérieur à 1250°C.

Suite à des ségrégations issues par la solidification, cette ferrite ( $\delta$ ) est à la fois dans l'espaces interdendritiques et dans les axes des dendrites. L'austénite par ailleurs ne subit aucune transformation jusqu'à son retour à la température ambiante.

### 3.4.2 La zone affectée thermiquement

C'est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et modifier la structure du métal de base.

Dans cette zone on peut distinguer [15]:

- Zone de surchauffe : elle se retrouve au voisinage immédiat de la zone fondue, elle est appelée ZAT surchauffée ou ZAT de haute température, la température dans cette zone dépasse 1100 °C environ et le métal a subi plus ou moins partiellement la transformation austénite  $\rightarrow$  ferrite ( $\delta$ ) (la quantité de ferrite ( $\delta$ ) restant néanmoins toujours faible). La rapidité du refroidissement peut impliquer l'existence d'une certaine proportion de ferrite ( $\delta$ ). Cette zone devrait subir un grossissement exagéré des grains ce qui provoque une dégradation des propriétés mécaniques et ceci en fonction de la température et du temps de surchauffe.
- Une partie voisine de la zone de surchauffe dont la température atteinte au cours du cycle se situe entre 1100 °C et 850 °C environ. Dans cette zone, le métal a subi un nouveau traitement d'hypertrempe et subsiste donc dans un état austénitique comparable à celui du métal de base.
- Une partie dont la température maximale a été comprise entre 500 et 850 °C environ et dans laquelle les carbures de chrome ont pu précipiter aux joints des grains d'austénite.

### 3.4.3 Métal de base (MB)

C'est le métal des pièces à assembler, ou la partie qui n'a pas été affectée par la chaleur de soudage.

La figure 1 représente les différentes zones d'un cordon de soudure.

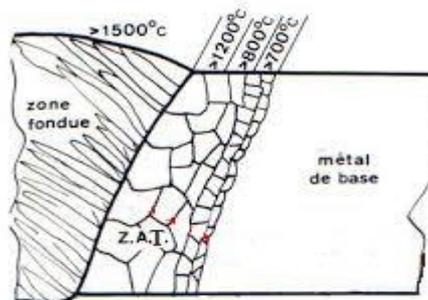


Figure 3-1 : Représentation schématique des différentes zones constituant la soudure.



### 3.5.2 Le diagramme WRC 1992

Le diagramme le plus riche d'informations et le mieux adapté aux aciers d'aujourd'hui est le diagramme WRC 1992 (Figure 3) car il délimite les zones correspondantes aux 4 modes de solidification et donne aussi, exprimée en terme de « Ferrite Number », la teneur en ferrite après refroidissement.

A partir de ce diagramme il est donc possible d'évaluer la sensibilité à la fissuration d'une soudure en fonction de la position du point représentatif de son analyse dans les domaines A, AF, FA ou F, qui seront décrites dans le paragraphe suivant [14]. Cette analyse pouvant être le résultat d'une mesure ou d'une évaluation à partir de l'analyse du métal de base, de celle du métal déposé et du taux de dilution estimé.

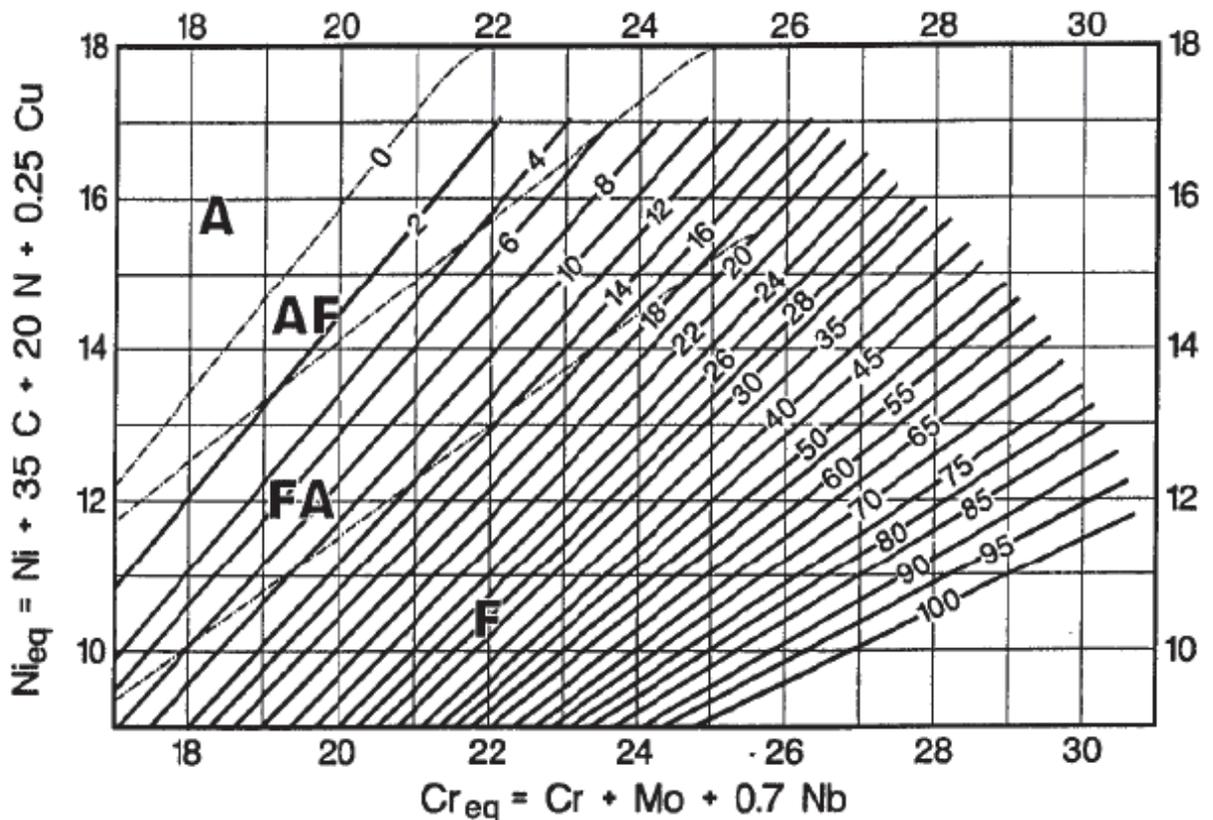


Figure 3-3 : Diagramme WRC 1992.

### 3.5.3 Mode de solidification

En fonction de la composition du métal d'apport, la solidification peut se produire selon différents modes :

- Mode A : solidification en austénite primaire. La précipitation de la phase à partir du liquide est aussi possible, si la température graduellement décroissante. Ce type de précipitation est favorisé par la présence de particules solides dans le métal liquide, qui peuvent jouer le rôle de grains mères de la phase d'une manière sélective. Particulièrement, pour des vitesses de refroidissement élevées.

Dans le cas de solidification en austénite primaire, les cristaux d'austénite sont appauvris en Cr et enrichis en Ni et ceux du liquide enrichis en Cr et appauvris en Ni [15].

- Mode AF : Solidification en austénite primaire avec apparition de ferrite par réaction eutectique et enrichissement en Cr à la frontière entre deux dendrites.

Mode FA : Solidification en ferrite ( $\delta$ ) primaire puis une transformation à l'état solide de la ferrite en austénite. Cette transformation s'accompagne d'un enrichissement en Cr et d'un appauvrissement en Ni au niveau des cœurs des dendrites. Il apparaît alors dans ces zones de la ferrite résiduelle dite « squelettique » ou « vermiculaire » [15].

- Mode F : Solidification en ferrite ( $\delta$ ) primaire avec possibilité de nucléation de grains d'austénites au sein de la ferrite (austénite dite de Widmanstätten). Dans le cas de solidification en ferrite primaire, les cristaux de ferrite ( $\delta$ ) sont enrichis en Cr et appauvris en Ni et inversement pour le liquide.

Remarque :

Il a de plus été montré que les modes de solidification pouvaient se déduire d'un rapport noté  $C_{req}/N_{ieq}$ . Les relations suivantes ont ainsi été établies [14] :

$C_{req} = \% Cr + \% Mo + 1.5 \% Si + 0.5 \% Nb$ .

$N_{ieq} = \% Ni + 30 \% C + 0.5 \% Mn$ .

$C_{req}/N_{ieq} < 1.25$  (mode A) ;

$1.25 < C_{req}/N_{ieq} < 1.48$  (mode FA) ;

$1.48 < C_{req}/N_{ieq} < 1.95$  (mode F) ;

$C_{req}/N_{ieq} > 1.95$  (mode F).

### 3.6 Conclusion

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre c'est l'aptitude des aciers inoxydables en particulier les austénitiques (AISI 300), grâce à leur structure stable même aux températures élevées. Le procédé de soudage TIG reste le plus utilisé pour ces aciers, en leurs conférant un très bel aspect de surface point de vue esthétique et aussi des excellentes propriétés mécaniques du joint soudé.

# Chapitre 4: **LA CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES**

## 4.1 Introduction

La corrosion bien que c'est un phénomène très complexe, peut être définie de manière simple comme étant la dégradation du métal par action du milieu environnant, elle est liée à la nature du métal, aux conditions d'emploi et au temps [16].

La corrosion traite la réaction entre un métal et un réactif. Si ce dernier est liquide, on parle de corrosion en solution ; s'il est gazeux, il s'agit de la corrosion sèche. La corrosion en solution (humide) ou la corrosion en solution peut avoir différentes sources : corrosion chimique, corrosion électrochimique, corrosion biologique [17].

## 4.2 La corrosion humide

### 4.2.1 La corrosion chimique

Il S'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide, le métal et une phase liquide. Lors le contact il se produit une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à sa surface même. Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique [17].

### 4.2.2 Corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité, soit dans le métal (hétérogénéité de la microstructure du matériau), soit dans le réactif (milieu). L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, un courant électrique circule entre anodes et cathodes et les zones qui constituent les anodes sont attaquées [17].

### 4.2.3 Corrosion biochimique

Tous les phénomènes de corrosion où des bactéries, agissant directement ou par l'intermédiaire des substances provenant de leur métabolisme, jouent un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement [3]

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées [17].

## 4.3 Principaux facteurs de corrosion

La corrosion étant un problème d'interface métal/milieu, il est possible de classer les facteurs qui influencent les processus en deux grandes rubriques :

- Les facteurs liés au milieu.
- Les facteurs liés au métal

### 4.3.1 Facteurs liés au milieu

Dans cette catégorie on peut classer les différents facteurs selon leurs natures :

- Chimique : L'oxygène, pH, conductivité.
- Physique : vitesse d'écoulement, température, pression.

#### **4.3.1.1 Influent de l'oxygène**

L'oxygène joue un rôle important dans les mécanismes de corrosion du fer et des alliages de fer en milieu aéré. La concentration en oxygène dissous dans l'eau est très variable puisqu'elle dépend des facteurs physiques tel que la pression et la température, des facteurs chimiques comme la concentration des autres constituant de l'eau.

La solubilité de l'oxygène décroît lorsque la température et la salinité augmentent, mais elle s'accroît avec la pression [3].

#### **4.3.1.2 Influence du PH**

Le pH de la solution est un facteur susceptible d'affecter la stabilité du film passif [11]. La présence d'anions formant des composés solubles avec un métal augmente le pouvoir corrosif de l'eau face à un métal, tandis que la présence d'anions formant des composés insolubles peut en augmenter la passivité.

#### **4.3.1.3 La conductivité**

La conductivité ou la résistivité du milieu corrosif limite la distance sur laquelle le couplage est effectif. Cependant, la forte conductivité des milieux implique que la résistivité de l'électrolyte va jouer un rôle mineur dans la cinétique des réactions de corrosion [16].

#### **4.3.1.4 La température**

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réactions et de transport. L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif [17].

### **4.3.2 Les facteurs liés au métal**

Ce sont les facteurs métallurgiques, ils sont nombreux et ont de grandes influences sur les processus réactionnels de la corrosion. On cite :

- La composition de l'alliage, impuretés, caractéristiques cristallographiques (type de structure à l'échelle du réseau et de la dimension des grains).
- Traitements thermiques, traitements mécaniques, traitement de surface.

## **4.4 Les différents types de corrosion**

On rencontre régulièrement certains types de corrosion des aciers inoxydables, on peut les classés comme suit :

### **4.4.1 La corrosion uniforme**

La corrosion uniforme constitue la dissolution quasi uniforme de tous les points constitutifs de la surface d'un matériau qui sont attaqués sensiblement à la même vitesse par le milieu corrosif [17].

La corrosion uniforme se rencontre le plus fréquemment lorsque l'acier inoxydable est en contact avec des acides tels que : l'acide sulfurique, l'acide nitrique, l'acide

phosphorique, etc. Avec ce type de corrosion, on peut exprimer la corrosion par la perte de masse  $m$  (g) en fonction du temps sous la forme de la relation [18]:

$$\Delta m = \frac{M \cdot i}{n \cdot F} : \text{c'est la loi de Faraday}$$

## 4.4.2 La corrosion localisée

### 4.4.2.1 La corrosion par piqûres

Sur la surface du métal, on ne voit que des petits points, mais en dessous, il y a une cavité bien plus importante. Ceci entraîne à terme la perforation de la pièce et sa fragilisation. La trace extérieure de corrosion est quasiment indétectable.

Le mécanisme de cette attaque se déroule sur deux stades : l'amorçage est suivi de la propagation des piqûres.

La formation d'une piqûre comprend une première phase d'amorçage qui correspond en réalité à une évolution locale du film passif. Plusieurs mécanismes liés à la présence de certains anions comme  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$  peuvent être à l'origine de ces modifications.

En résumé le mécanisme de piqûration se fait par :

- Adsorption d'ion à l'interface métal / solution
- Pénétration des ions dans le film et formation de chlorures
- Accélération de la dissolution anodique par formation d'un composé du type MCl<sub>n</sub> par exemple.

Ces modifications entraînent une diminution locale de la résistance de la couche passive correspondante, par conséquent une augmentation du courant de passivité jusqu'au déclenchement de la piqûre.

### 4.4.2.2 La corrosion intergranulaire (CIG)

C'est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui précipitent lors d'un traitement thermique. Pour les aciers inoxydables austénitiques, le cas le plus fréquent de corrosion intergranulaire pour ces aciers est consécutif à un traitement thermique à température moyenne (600 à 800° C selon sa teneur en carbone) pouvant être dû à une opération de soudage et qui provoque une précipitation de carbures de chrome  $Cr_{23}C_6$  aux joints de grains [18,19].

## 4.5 La passivité des aciers inoxydables

La passivation correspond à la transformation d'une surface active en cours de corrosion en une surface quasi inactive par formation d'une couche de passivation.

Ce phénomène de passivité 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 %.

#### 4.6 **Courbe de polarisation des aciers inoxydables**

La courbe de polarisation d'un métal susceptible de se passiver à l'allure de celle de la Figure1. Cette courbe se compose de deux branches dite cathodique et anodique. La branche cathodique varie des potentiels les moins nobles jusqu'au point du potentiel de corrosion et de la densité de courant de corrosion.

Ce point est représenté sur la courbe par un pic ayant l'intensité la plus faible. La branche anodique commence à partir de ce même point et varie vers des valeurs supérieures de potentiel.

Chapitre 5: **MATERIELS ET METHODES**

**EXPERIMENTALES**

## 5.1 Introduction

Il s'agit d'étudier le comportement d'une canalisation en acier inoxydable 316L dans des types d'eaux qui diffèrent par leurs compositions chimiques (pH, la conductivité, les chlorures...etc.)

Dans ce chapitre, nous exposons la démarche et les méthodes expérimentales utilisées afin de mener à bien notre travail. Il est subdivisé en quatre parties :

- La première partie, est consacrée à la caractérisation métallographique qui a pour objet de définir la composition chimique de l'acier étudié, ainsi que le choix du prélèvement sur la canalisation de la station.
- La deuxième partie, décrit les caractéristiques chimiques des milieux étudiés.
- La troisième partie, est destinée aux méthodes expérimentales utilisées dans notre étude.
- La quatrième partie, est destinée aux méthodes d'analyses effectuées sur les différents résultats expérimentaux.

Les différents essais présentés dans ce chapitre ont été effectués au Laboratoire de Science et Génie des Matériaux de l'Ecole Nationale Polytechnique.

## 5.2 Prélèvement et préparation des échantillons

### 5.2.1 Echantillonnages

Pour la mise en place d'une canalisation quelconque on utilise des soudures et des coudes afin de joindre les tubes, ce sont des points sensibles en termes de corrosion.

Sur la canalisation de l'eau utilisée les cas de corrosion ont été repérés effectivement au niveau des zones soudées et des coudes.

Pour cet effet, les échantillons ont été prélevés de ces zones et ils ont été découpés à partir de deux tubes de diamètre différents. Le tableau suivant résume les dimensions des tubes :

Tableau 5-1 : Les dimensions des tubes de la canalisation étudiée.

	Diamètre extérieur (mm)	Epaisseur (mm)
Tube 1	26	1.6

### 5.2.2 Préparation des échantillons

Trois échantillons sont découpés d'un tube (figure1), à l'aide d'une scie à métaux sous une coulée d'eau pour le refroidissement. Par la suite, un fil conducteur est collé sur les échantillons destinés aux essais électrochimiques. Enfin un enrobage est effectué pour garder une seule surface.

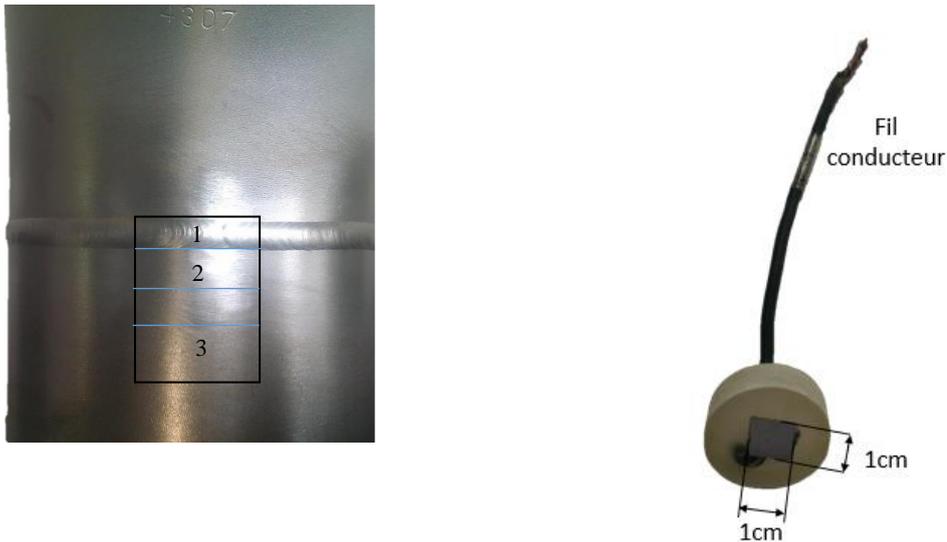


Figure 5-1 : Echantillonnage

### 5.2.2.1 Polissage mécanique

Les échantillons sont polis sur du papier abrasif de différentes granulométries. Nous avons utilisé les papiers 400, 600, 800, 1000 et 1200 sur une polisseuse mécanique tournant à une vitesse d'environ 150 tr/min. Pour chaque papier, le polissage est effectué pendant 2 min. Nous avons réalisé le polissage de finition sur, un papier feutre imprégné de poudre d'alumine ( $Al_2O_3$ ) de  $0,3\mu m$ , en suspension dans de l'eau distillée, pendant environ 3min. En fin de polissage, les échantillons sont rincés à l'eau distillée puis séchés.

### 5.2.2.2 Attaque chimique

Pour la mise en évidence de la structure de l'acier inoxydable austénitique 316L, nous avons préparé une solution dite attaque Kalling [7] contenant : 15mL d'HCl, 20mL d' $HNO_3$  et 15mL d'eau distillée, Nous commençons par tremper nos échantillons dans la solution pendant 120 secondes pour finir avec un lavage rapide à l'eau et un séchage au compresseur à air.

### 5.2.2.3 Attaque électrochimique

Le principe de l'attaque est très simple. Il consiste à faire passer un courant électrique à travers l'échantillon qui est placé à l'anode du circuit électrique ce qui provoque une oxydation des éléments de certaines zones de la surface. Le potentiel imposé, le temps de l'attaque et la solution utilisée dépendent de l'acier à attaquer.

Pour la mise en évidence de la morphologie des grains et les joints de grains des aciers inoxydables austénitiques on opte pour l'attaque avec la solution d'acide nitrique [7].

L'échantillon à attaquer électrolytiquement est plongé dans une solution d'acide nitrique  $HNO_3$  69% et joue le rôle de l'anode (figure 2), La cathode étant du même matériau 316L, l'ensemble est sous une tension de 1,5Volts pendant 50-60secondes. Ensuite l'échantillon est rincé à l'éthanol puis à l'eau distillée.

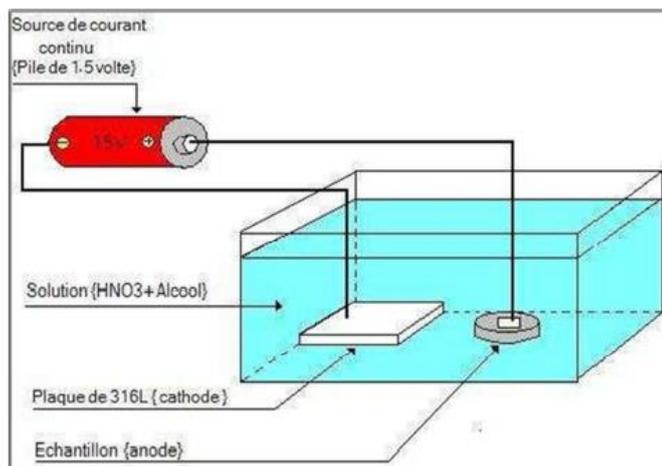


Figure 5-2 : Montage utilisé pour l'attaque électrolytique.

### 5.3 Caractérisation chimique et microstructurale

Pour effectuer cette étude, IMC nous a fournis des échantillons de la canalisation utilisée au sein de leur station de traitement d'eau.

Le matériau mis à notre disposition a une structure et une composition chimique connues. C'est l'acier inoxydable austénitique AISI 316L (EN 1.4404 selon la norme européenne), Sa composition chimique est montrée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-2 : Teneur en éléments d'alliage du 316L en pourcentage massique.

Eléments	C	Fe	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	P	S
%	<0.03	65	16.5-18.5	2-2.5	10-13	< 1	< 2	0.045	0.015

La figure 3 représente la microstructure de cet acier observée au microscope optique. La préparation métallographique de la surface sera décrite par la suite.



Figure 5-3 Microstructure de l'acier 316L observée au microscope optique.

La microstructure ci-dessus, montre des grains austénitiques réguliers, elle présente aussi des joints de macles cohérents et incohérents.

La microstructure sur la photo vient conforter la nuance de l'acier désigné plus haut, à savoir l'acier inoxydable austénitique 316L.

## 5.4 Caractérisation chimique des milieux

Afin de simuler les conditions de travail de la canalisation étudiée. Nous avons prélevé des échantillons d'eau sur les différentes zones de traitement d'eau décrites auparavant (chapitre 1) qui sont atteintes par la corrosion.

Des bulletins d'analyses effectués sur ces eaux sont fournis par l'IMC, le tableau ci-dessous résume les caractéristiques chimiques :

Tableau 5-3 : Les caractéristiques chimiques des milieux.

	Eau brute	Eau adoucie	Eau glacée
pH	7.76	7.84	7.90
Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	1310	1360	362
Chlorures (ppm)	247.7	212.3	106.1
TH °F	39.9	0	8.1

\* TH : titre hydrotimétrique ou Dureté. C'est la teneur en calcium et magnésium en solution dans l'eau.

## 5.5 Méthodes expérimentales

Dans ce qui suit, nous allons décrire les différentes expériences effectuées lors de notre étude.

### 5.5.1 Essai de microdureté

Cette méthode est nécessaire pour le suivi de l'évolution des propriétés mécaniques du matériau.

Pour effectuer l'essai de microdureté on utilise le micro duromètre de marque Mitutoyo (Micro Hardness Testing Machine, Mitutoyo) qui est composé d'un écran d'affichage et d'un porte-outil, contenant des lentilles de microscope et d'un pénétrateur (figure 4).



Figure 5-4 : Microduromètre.

Le pénétrateur est de type Vickers. La mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope ( $\times 100$  ou  $\times 400$ ). Il s'agit d'imprimer dans la surface de l'échantillon étudié un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet de  $136^\circ$  sous une charge donnée, ensuite on mesure la moyenne des deux diagonales "d" de l'empreinte laissée par le pénétrateur sur la surface comme montre la figure suivante :

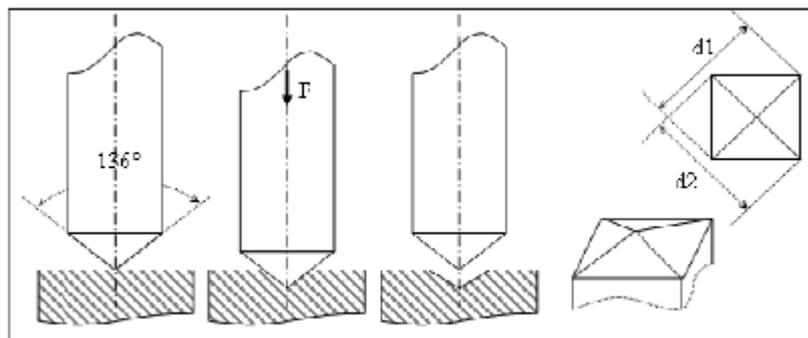


Figure 5-5 : Schématisation du Pénétrateur et de l'empreinte laissée après enlèvement de la charge [20].

Pour donner des résultats appréciables, la microdureté est déterminée par une filiation. La filiation de microdureté est effectuée avec un pas de  $20 \mu\text{m}$  sur trois lignes.

## 5.5.2 Essais électrochimiques de corrosion

Afin d'étudier le comportement de notre acier (potentiel de corrosion, vitesse de corrosion), une série de test électrochimique est appliquée sur les différents échantillons dans les différents milieux.

Deux types d'essais sont appliqués dans notre étude :

- les essais par immersion.
- les essais par électrochimie.

### 5.5.2.1 Essais d'immersion

Egalement désigné par le potentiel d'abandon ou potentiel libre, il s'agit de la grandeur nécessaire à mesurer

Ce type d'essai nous permet à la fois de prévoir le potentiel de corrosion afin d'établir un intervalle de potentiel à appliquer pour le second essai et de mesurer la résistance ohmique pour les échantillons [20].

Chaque échantillon est directement immergé dans la solution maintenue à température constante (20°C) et une agitation est assurée par un barreau magnétique de forme cylindrique. Le spécimen est relié à l'électrode de référence. Dans notre cas, à l'Electrode au Calomel Saturé (EECS=241mV/ENH [20]).

Le suivi du potentiel d'abandon est effectué en fonction du temps d'immersion ( $E=f(t)$ ). La valeur a noté, est celle qui correspond à l'équilibre. Avant de se stabiliser et d'atteindre une valeur fixe, le potentiel de corrosion d'un matériau plongé dans une solution subit en fonction du temps, différentes variations relatives aux phénomènes interfaciaux qui peuvent avoir lieu.

Ces variations peuvent être aussi dues à la formation de composés insolubles ou au dégagement de gaz. Les différentes variations possibles des courbes  $E = f(t)$  sont données par la figure suivante :

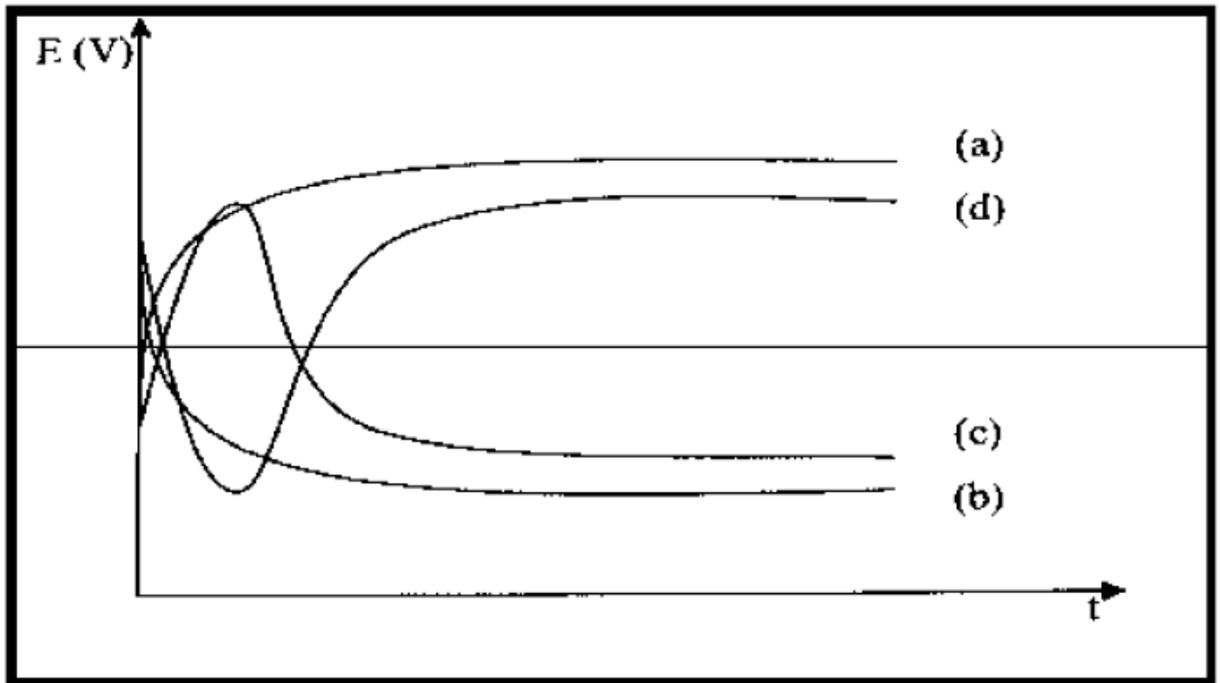


Figure 5-6 : Les variations possibles des courbes  $E = f(t)$ .

- La courbe (a) montre l'augmentation du potentiel avec le temps, traduit la formation d'une couche de composés insolubles qui protège le métal, c'est une passivation.
- La courbe (b) relative à un potentiel décroissant, correspond à une attaque corrosive du métal.
- La courbe (c) indique une passivation instable suivie d'une attaque.
- La courbe (d) une attaque suivie d'une passivation.

### 5.5.2.2 Essais de polarisation

Cette technique, permet de déterminer le potentiel de corrosion, le courant de corrosion et le potentiel de piqûration des aciers par rapport au milieu considéré.

Nous avons utilisé un potentiostat de type EGG Princeton model 332 (figure 7) relié à une cellule électrochimique à trois électrodes (figure 8) : l'échantillon c'est l'électrode de travail, une électrode de référence au calomel saturé et une contre électrode en platine.

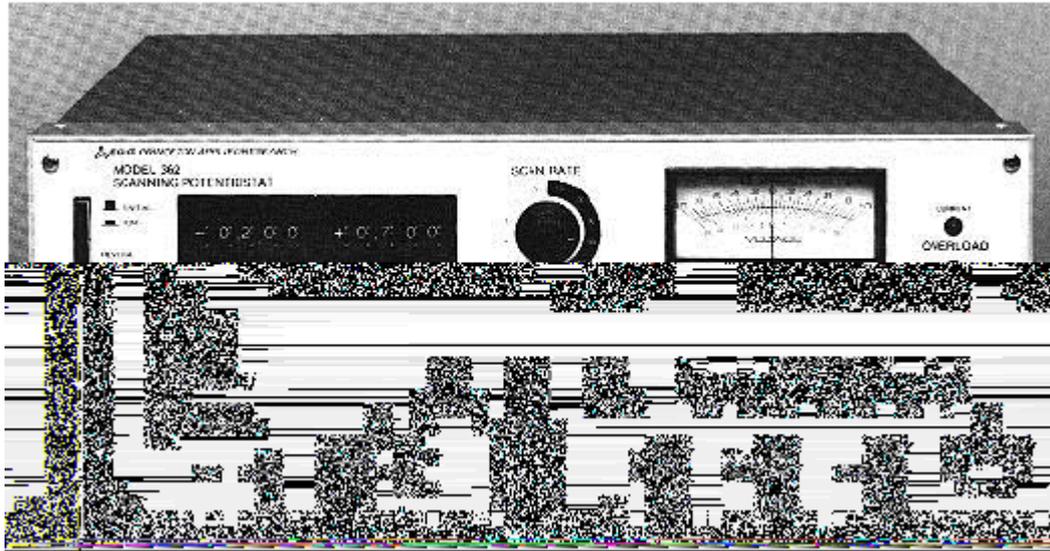


Figure 5-7 : Potentiostat.

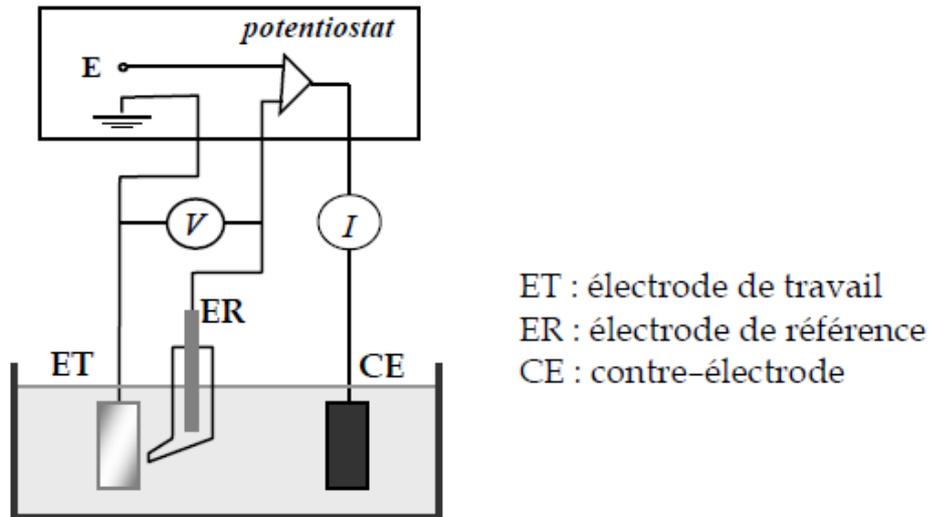


Figure 5-8 : Schéma du dispositif [10].

En mode statique, la fonction du potentiostat est d'appliquer et de maintenir une différence de potentiel fixe entre l'électrode de travail (l'échantillon) et l'électrode de référence, et d'enregistrer le courant débité par l'électrode de travail.

Cet essai nous a permis de tracer la variation d'intensité de courant en fonction du potentiel pour déterminer le courant et le potentiel de corrosion ( $i_{cor}$  et  $E_{cor}$ ).

## 5.6 Méthodes d'analyses

### 5.6.1 Méthode d'examen métallographique

#### 5.6.1.1 Détermination de la taille de grain par intersection linéaire

Après avoir effectué l'attaque électrolytique afin de faire apparaître les joints de grains et la prise de micrographie sur le microscope optique, nous avons pu calculer la taille moyenne de grain par la méthode d'intersection linéaire illustré dans la (figure 9).

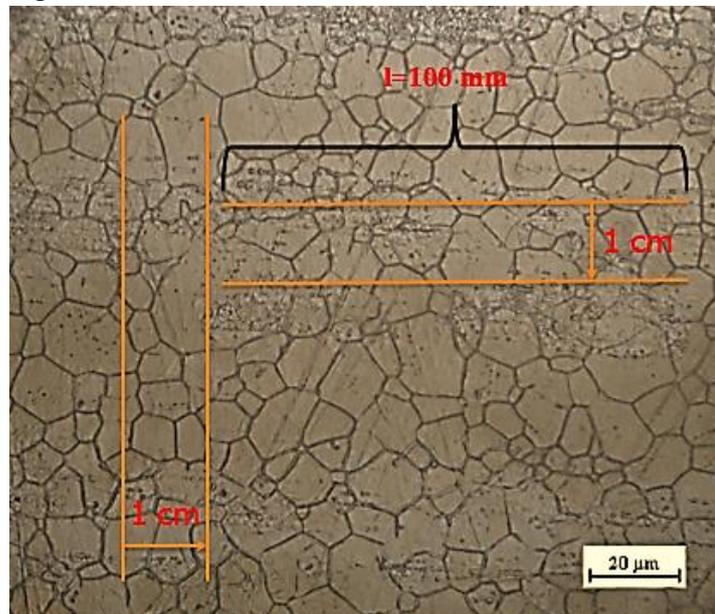


Figure 5-9: Détermination de la taille des grains .

On trace une ligne d'une longueur connue dans notre cas ( $l=100\text{mm}$ ), on dénombre les intersections entre la ligne et les joints de grains. Si la ligne de mesure se termine à l'intérieur d'un grain, le segment correspondant est compté comme 1 ; on compte  $\frac{1}{2}$  lorsque l'extrémité de la ligne touche exactement un joint de grains et  $\frac{3}{2}$  lorsqu'une ligne coupe un point triple.

On répète la même procédure en décalant la ligne d'un centimètre et dans les deux sens comme le montre la figure 10, afin de calculer le nombre de grains « N » par ligne.

Il faut noter que plus le nombre de lignes à tracer est grand, plus on aura une bonne précision de calcul. Une fois, le nombre de grain réalisé par ligne on utilise l'équation suivante :

$$\phi(\mu\text{m}) = \frac{L \cdot 1000}{N \cdot G} \cdot X_v$$

Avec :  $X_v$ , fraction volumique des grains dont on veut calculer la taille, dans notre cas elle est égale à 1 et G le grossissement utilisé.

### 5.6.2 Analyse électrochimique

Les essais de corrosion sont très importants, ils nous permettent de déterminer ou estimer, d'un point de vue quantitatif, les grandeurs caractéristiques de la corrosion

telles que le courant et le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion. Pour cela on utilise deux méthodes :

- Extrapolation des droites de Tafel.
- La détermination de la résistance de polarisation.

### 5.6.2.1 Extrapolation des droites de Tafel

L'essai de polarisation nous fournit une courbe de courant en fonction du potentiel, il convient de tracer la courbe courant-tension à l'échelle semi-logarithmique ( $\log(|i|) = E$ ).

En tracé semi-logarithmique, la courbe de polarisation fait apparaître des portions linéaires dites « branches de Tafel » ou pente de Tafel.

La figure 10, illustre l'extrapolation des branches anodique ( $b_a$ ) et cathodique ( $b_c$ ).

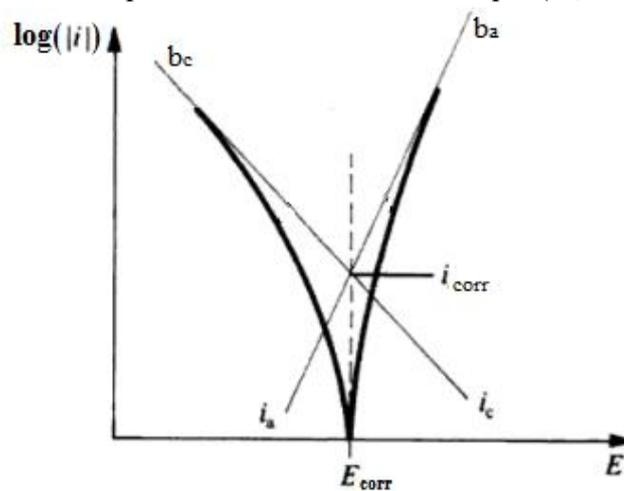


Figure 5-10 : Courbe schématique de polarisation à l'échelle logarithmique [20].

Le courant de corrosion  $I_{corr}$  est donc obtenu par l'intersection des droites de Tafel et de la verticale tracée en  $E_{corr}$ , et la vitesse de corrosion est directement proportionnelle à ce courant :

$$V_{cor} = i_{corr} / nF$$

### 5.6.2.2 Résistance de polarisation

La valeur de  $i_{corr}$  peut être mesurée par une autre technique, dite polarisation linéaire.

Le principe de mesure de résistance de polarisation,  $R_p$ , consiste à caractériser à l'aide de courbe intensité/potentiel pour de faibles surtensions anodique et cathodique une résistance appelée résistance de polarisation qui est, en théorie, proportionnelle au courant de corrosion.

Par définition, la valeur de résistance de polarisation correspond à l'inverse de la pente ( $i=f(E)$ ) de la courbe de polarisation au voisinage du potentiel de corrosion  $E_{corr}$  (figure 11).

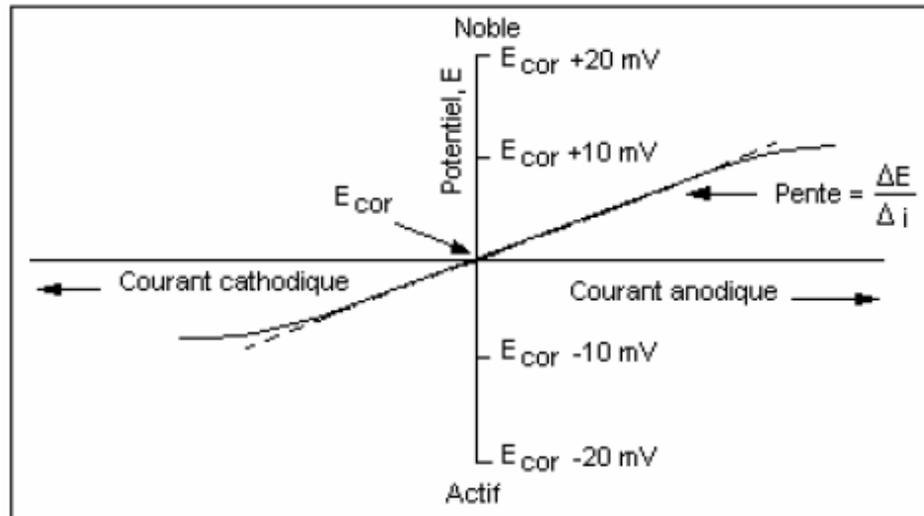


Figure 5-11 : Mesure de la vitesse de corrosion par la résistance de polarisation [11].

Afin de calculer le courant de corrosion on utilise l'équation suivante :

$$i_{corr} = \frac{1}{2 * R_p} * \frac{b_c * b_a}{b_c + b_a}$$

## Chapitre 6: **RESULTATS EXPERIMENTAUX**

## 6.1 Introduction

L'objectif de notre étude est de mettre en évidence le comportement électrochimique d'une canalisation en acier inoxydable austénitique, dans des eaux traitées. En se basant sur l'effet de la microstructure (les parties soudées), l'effet de la composition chimique du milieu.

## 6.2 Présentation des résultats

### 6.2.1 Observation microscopique

La soudure présente trois zones : le métal de base, la zone intermédiaire (zone affectée thermiquement -ZAT) et la zone fondue.

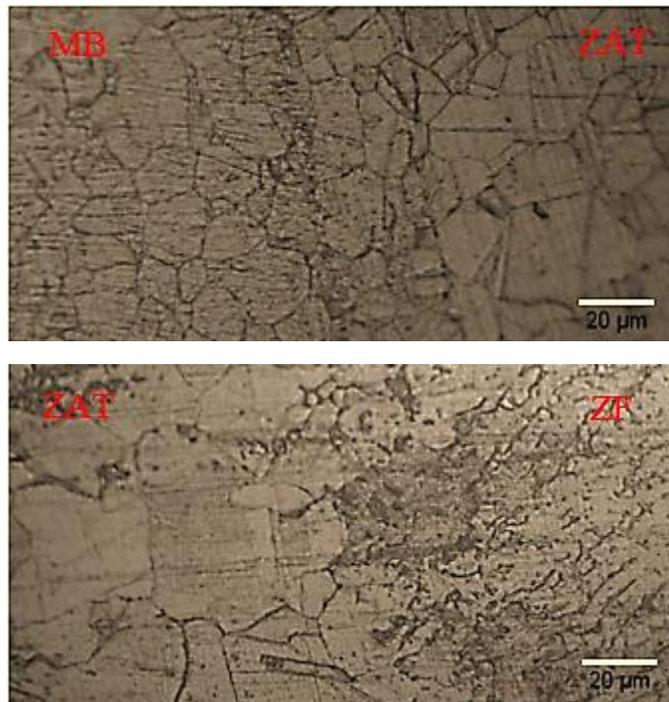
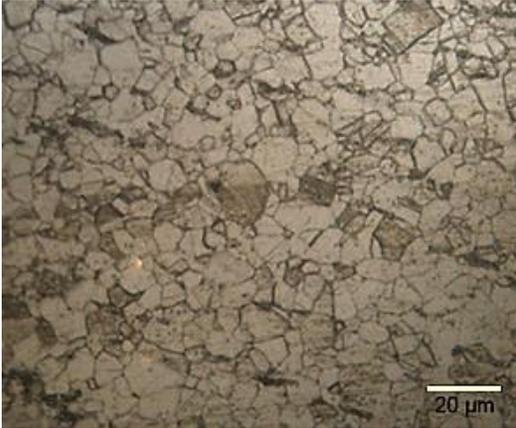


Figure 6-1 : La microstructure au niveau du joints de soudure.

a- Attaque chimique.



b- Attaque électrolytique.

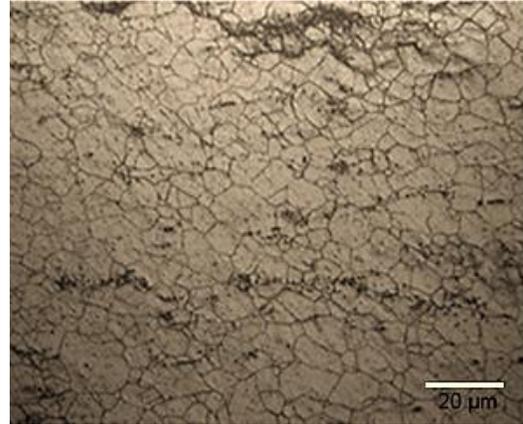
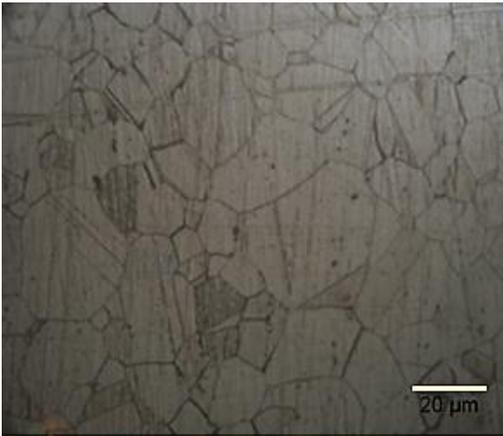


Figure 6-2: Métal de base (dg= 11μm, 191 HV).

c- Attaque chimique.



d- Attaque électrolytique.

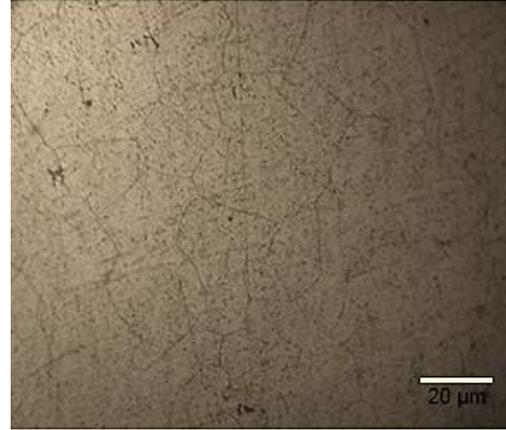
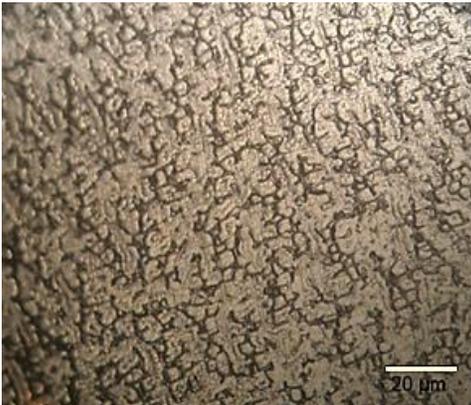


Figure 6-3 : La ZAT (dg= 34μm, 152 HV).

e- Attaque chimique.



f- Attaque électrolytique.

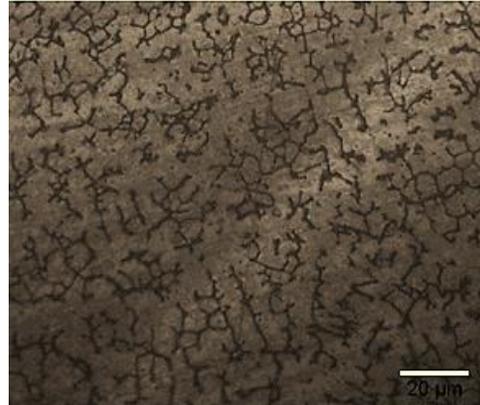


Figure 6-4 : La zone fondue (155HV).

- Le métal de base

L'acier possède une microstructure austénitique granulaire régulière. La taille des grains ne présente pas beaucoup de dispersion, comparée à celle de la ZAT. Nous constatons la présence de macles thermiques typiques des structures cubiques à faces centrées.

- La ZAT

La zone affectée thermiquement (ZAT) a une microstructure granulaire. Nous constatons la présence de grains de grande taille à côté de grains plus fins entraînés par la coalescence. Ce qui traduit la surchauffe importante subie par cette partie au cours de l'opération de soudage car la température atteint et peut dépasser 1000 °.

- La zone fondue

Dans cette zone, la structure est biphasée composée d'austénite et de ferrite. Elle garde les traces de la solidification rapide, elle a une forme dendritique.

### 6.2.2 La microdureté

Pour mettre en évidence l'évolution des caractéristiques mécaniques de la soudure nous mesurons la microdureté de chaque zone.

Les valeurs de microdureté moyennes ont été déterminées à partir de la filiation illustrée dans la figure 5.

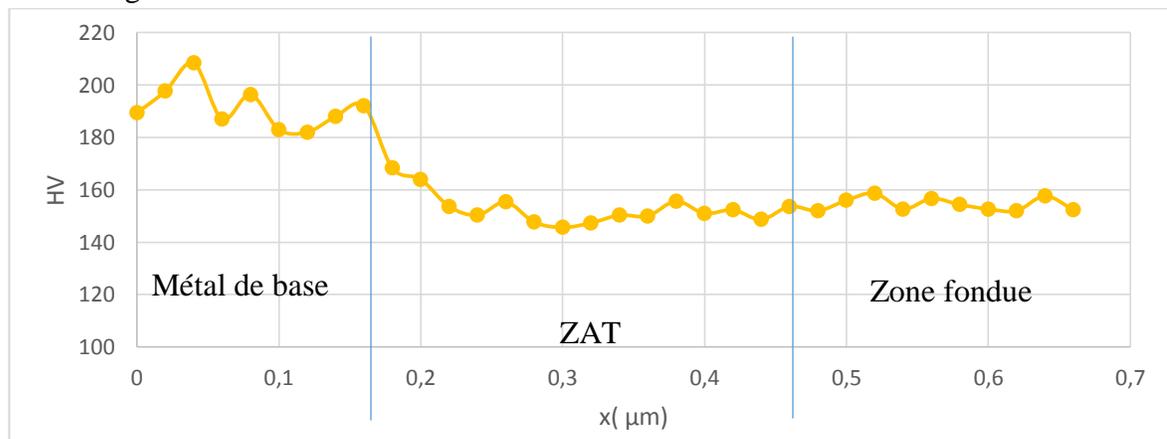


Figure 6-5 : Filiation de microdureté Vickers dans la soudure.

Nous constatons une différence de microdureté des zones. Tout d'abord, la microdureté du métal de base (191HV), est la microdureté moyenne de l'acier austénitique.

Une baisse de microdureté dans la ZAT (152 HV), est dû au grossissement des grains dans cette zone à cause de la surchauffe de cette zone.

La microdureté de la ZF en moyenne elle est à 155 HV plus faible que celle du métal de base principalement due à la proportion de la ferrite delta ( $\delta$ ) lors de la solidification brute [21].

### 6.2.3 La taille des grains

Sur les microstructures des échantillons de la soudure présentée auparavant, nous calculons la taille moyenne des grains par la méthode d'intersection linéaire.

Le tableau suivant résume la taille moyenne des différentes zones de soudure. Il est à noter que la mesure de taille dans la zone fondue est impossible en vue de la microstructure.

Tableau 6-1 : La taille moyenne des grains.

Echantillon	Métal de base	ZAT
Taille de grain ( $\mu\text{m}$ )	$11 \pm 1$	$34 \pm 1$

Nous remarquons notamment une différence entre la taille moyenne des grains du métal de base et celle de la ZAT, cette différence est due à la température du soudage qui a causé une croissance de la taille des grains au voisinage de la zone fondue.

Nous remarquons que la largeur de la zone affectée thermiquement est de l'ordre d'un demi-millimètre (voir l'intervalle de la ZAT sur la figure 4). La principale cause de cet effet est la basse conductivité thermique ( $15 \text{ [W/m K]}$ ) des aciers inoxydables austénitiques [13].

### 6.2.4 Résultats des essais électrochimiques

Après avoir étudié l'aspect microstructural de la soudure, nous passons à l'étude électrochimique. Les figures 6-7-8 illustrent les courbes de densités de courant-potential ( $\log(|i|) - E$ ). L'électrolyte étant respectivement : eau brute, eau adoucie, eau glacée. Les milieux étant agités à raison de 250 tours par minute à la température ambiante.

- Métal de base

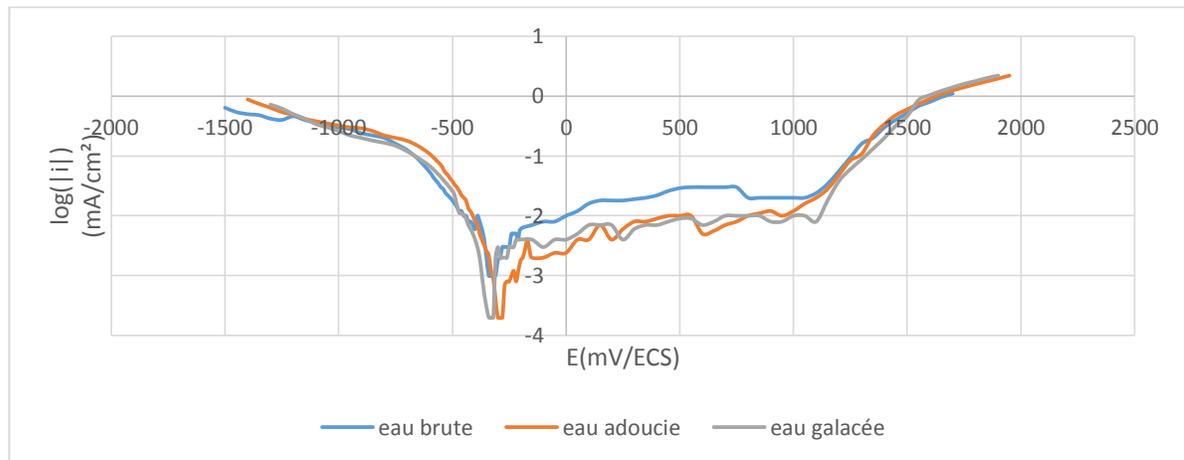


Figure 6-6 : Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon –métal de base- dans les trois milieux.

- La ZAT

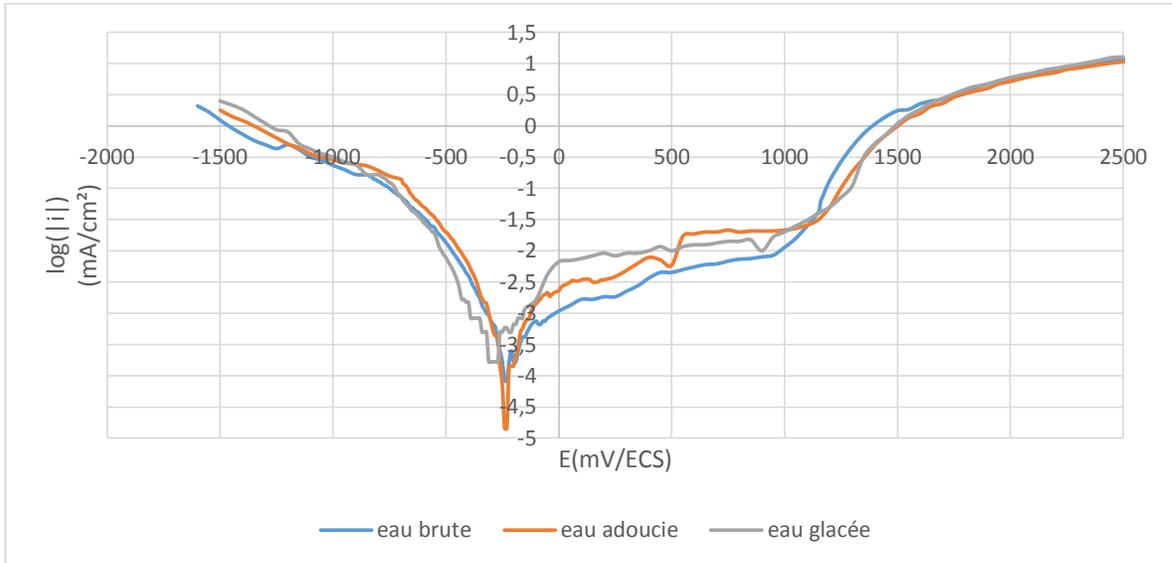


Figure 6-7 : Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon –ZAT- dans les trois milieux.

- Zone fondue

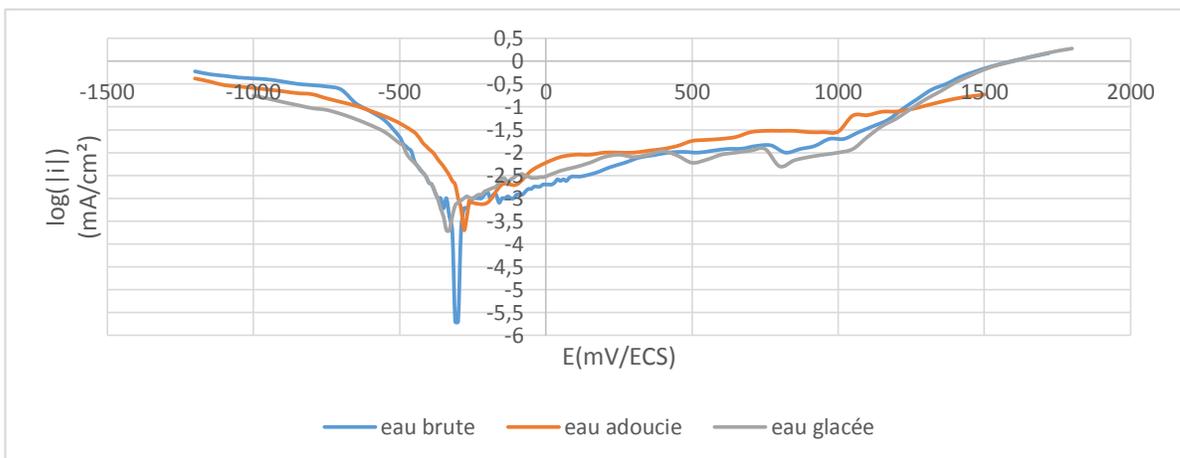


Figure 6-8 : Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon –Zone fondue- dans les trois milieux.

Les trois figures montrent que les différentes microstructures de la soudure ont un comportement cathodique (domaine actif) relativement identique dans les 3 milieux.

Une région passive importante de l'ordre de 1000mV/ECS, c'est dû à la stabilité de la couche passive. Au-delà de 1000mV/ECS la couche passive qui protège la surface se détruit, on note alors une augmentation de la densité de courant, c'est le domaine transpassif.

### 6.3 Interprétation des résultats et discussions

Pour obtenir les différentes grandeurs électrochimiques on utilise les méthodes décrites dans le chapitre 5.

Les tableaux 2-3-4 résume les résultats d'extrapolations des droites de Tafel de chaque partie de la soudure.

Tableau 6-2 : Résultats des essais électrochimiques sur le métal de base.

			Méthode de Tafel		Méthode de la résistance Rp		
	$E_{ab}$ mV/ECS	$E_{corr}$ mV/ECS	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$	Rp k $\Omega$ .m <sup>2</sup>	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$
Eau brute	-400	-346	3,76	30,73	11,11	3,86	31,56
Eau adoucie	-297	-292	3,16	25,86	22,22	3,21	26,27
Eau glacée	-303	-338	2,69	21,96	23,53	2,66	21,79

Tableau 6-3 : Résultats des essais électrochimiques sur la ZAT.

			Méthode de Tafel		Méthode de la résistance Rp		
	$E_{ab}$ mV/ECS	$E_{corr}$ mV/ECS	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$	Rp k $\Omega$ .cm <sup>2</sup>	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$
Eau brute	-108	-235	1,87	15,33	49,50	1,39	11,34
Eau adoucie	-170	-238	1,00	8,18	58,82	1,10	8,97
Eau glacée	-105	-295	0,63	5,16	43,24	0,60	4,93

Tableau 6-4 : Résultats des essais électrochimiques sur la zone fondue.

	Méthode de Tafel				Méthode de la résistance Rp		
	$E_{ab}$ mV/ECS	$E_{corr}$ mV/ECS	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$	R $\text{k}\Omega.\text{cm}^2$	$i_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Vcorr $\mu\text{m}/\text{an}$
Eau brute	-249	-306	1,40	11,47	40,00	1,40	11,47
Eau adoucie	-208	-284	1,33	10,90	32,00	1,38	11,31
Eau glacée	-257	335	1,00	8,18	40,00	1,07	8,78

### 6.3.1.1 Effet du milieu

Les paramètres principaux qui caractérisent les milieux étudiés ce sont la conductivité et le pH, le tableau suivant résume les données correspondantes.

Tableau 6-5 : Caractéristiques des milieux.

	Eau brute	Eau adoucie	Eau glacée
pH	7.76	7.84	7.90
Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	1310	1360	362
TH °F	39.9	0	8.1

Le pH des trois milieux étant le même, nous étudions l'effet de la conductivité sur le comportement électrochimique (figure 9).

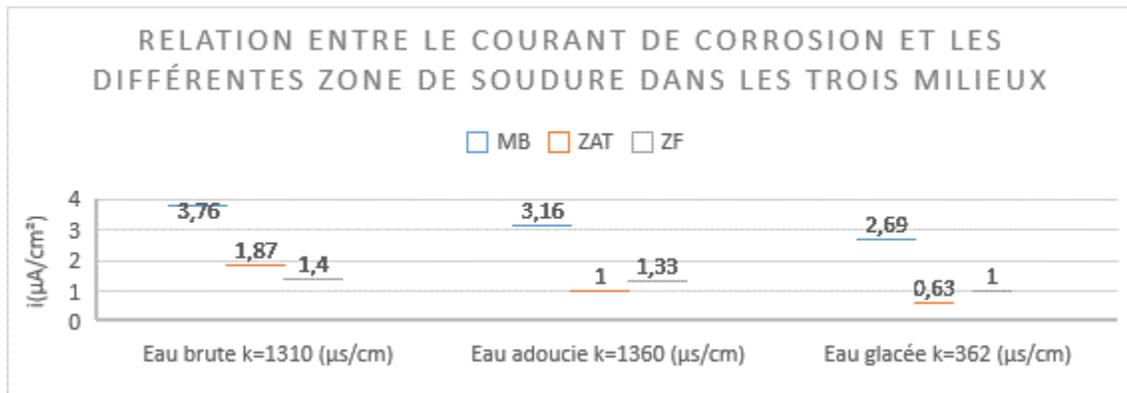


Figure 6-9 : Le courant de corrosion des différentes zones de soudure dans les différents milieux.

Pour chacune des zones le courant de corrosion est plus faible dans l'eau glacée, c'est dû au fait que la conductivité électrique est plus basse dans ce milieu. La conductivité électrique dans un milieu nous informe sur la quantité d'ions existant, autrement dit la capacité du milieu de faire circuler les charges électriques.

Les courants de corrosion sont plus élevés dans l'eau brute, le courant de corrosion de l'échantillon de métal de base reste le plus élevé dans les 3 milieux, c'est dû probablement à la microstructure.

On remarque qu'il y a plus d'activité dans l'eau brute, cela est dû au fait que l'eau brute contient une grande quantité de matière organique, sel et gaz dissous, matières en suspensions, donc une corrosivité plus importante.

Dans l'eau glacée, nous remarquons que le TH (teneur en calcium et magnésium en solution dans l'eau) est élevé. C'est lié probablement au dysfonctionnement de l'adoucisseur qui laisse passer une quantité d'ions de calcium  $Ca^{2+}$  et de magnésium  $Mg^{2+}$ . La présence de ces ions cause le tartre dans le circuit de la canalisation, dans le cas où le tartre forme une couche adhérente avec la surface de la tuyauterie c'est un facteur positif, il protège la surface et inhibe la corrosion, si une partie de cette couche se détache, une forte corrosion aura lieu dans cette zone.

### 6.3.1.2 Effet de la microstructure

Sur la figure 10 on présente la courbe de potentiel des différentes zones dans les trois milieux :

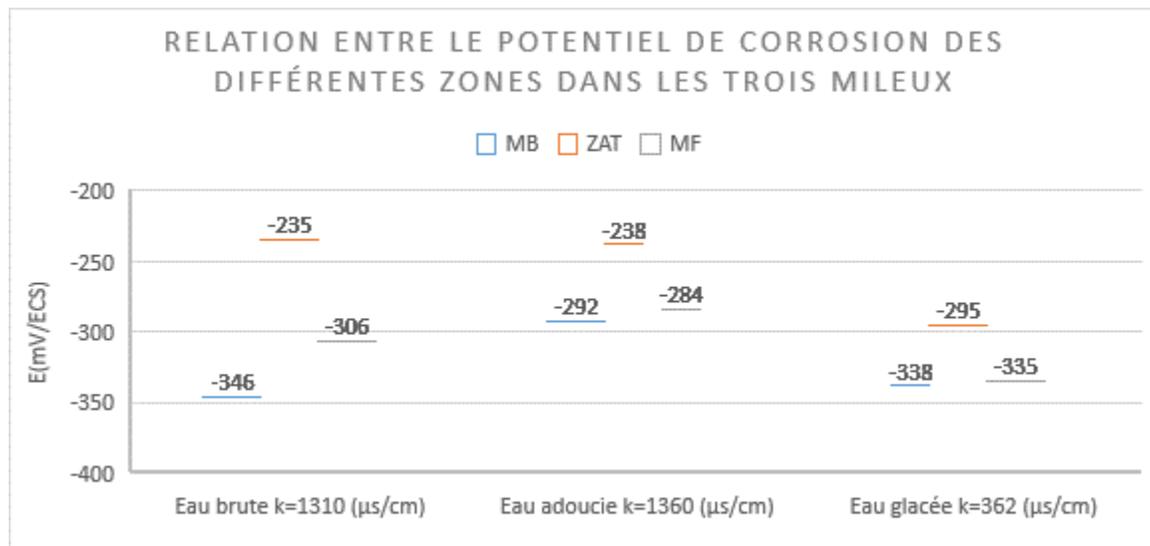


Figure 6-10 : Superposition des potentiels de corrosion des différentes zones de la soudure dans les trois milieux.

Cette figure montre que le potentiel de corrosion d'une même zone dépend du milieu.

Dans chaque milieu on mesure une différence de potentiel entre 2 zones adjacentes. C'est l'effet de la microstructure. Le tableau suivant résume les  $\Delta E$  correspondantes, illustré par la figure 11 :

Tableau 6-6 :  $\Delta E$  entre les zones de la soudure.

	$\Delta E$ (MB-ZAT)	$\Delta E$ (ZAT-ZF)
Eau brute	111	71
Eau adoucie	54	46
Eau glacée	43	40

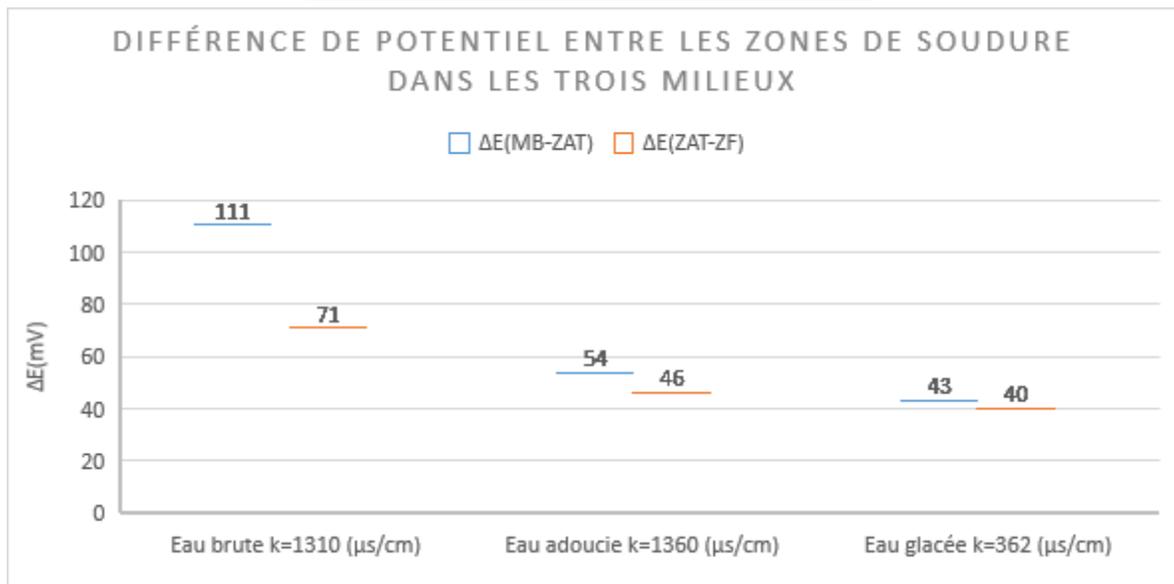


Figure 6-11 :  $\Delta E$  entre les zones de la soudure dans les différents milieux.

On remarque aussi que la différence de potentiel entre le métal de base et la ZAT est la plus élevée, donc on a une grande possibilité de formation de micro-pile.

- Effet de la taille des grains

La microstructure est liée à la taille des grains et la microdureté. L'augmentation de la taille de grain se traduit par la diminution de la microdureté dans cette zone :

MB,  $d_g=11\mu m$ . 191HV  $\rightarrow$  ZAT,  $d_g=34\mu m$  152HV.

En effet, d'une part la diminution de la taille des grains se traduit par une augmentation significative de la contrainte d'écoulement. Cette augmentation suit une loi expérimentale bien connue sous le nom de la loi de Hall Petch (1951, 1953) qui relie la contrainte élastique limite à l'inverse de la racine carrée de la taille de grain d par la relation:

$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}$  ou  $\sigma_0$  est la contrainte de friction, K est la pente de Hall Petch. D'autre part le limite élastique est proportionnel à la microdureté.

L'influence de la microstructure du métal de base et la ZAT sur la vitesse de corrosion est illustrée par la figure 12 :

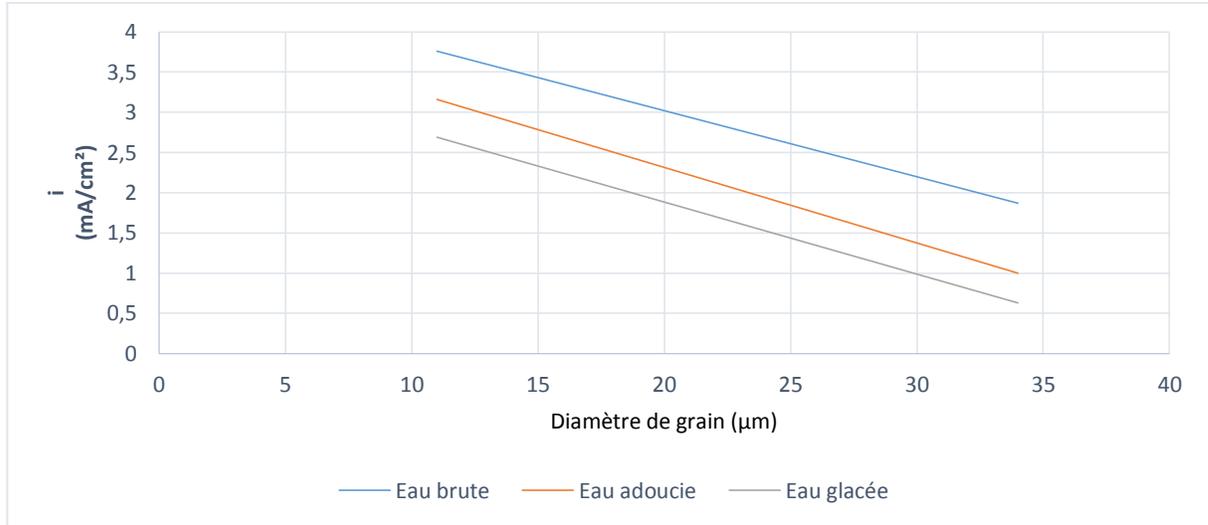


Figure 6-12: Effet de la taille des gains sur la vitesse de corrosion.

Dans la ZAT la taille des grains est nettement supérieure à celle du métal de base, par conséquent la surface des joints de grain dans la ZAT est inférieure à dans le cas du métal de base.

Plusieurs études montrent que les joints de grains sont des sites de potentiel de corrosion [22], ce qui explique que la vitesse de corrosion est plus élevée dans le cas du métal de base.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette étude traite, sous différents aspects, les microstructures développées dans les soudures de l'acier inoxydable austénitiques AISI 316L et le comportement de ces derniers dans des eaux traitées.

Le travail mené, consiste à déterminer les causes de corrosion observées sur certaines parties soudées des canalisations de transport et de traitement de l'eau de sondage, chez l'entreprise IMC. Il a été constaté que, même avec le procédé de soudage TIG qui est le plus adapté pour les aciers inoxydables austénitiques 316L, la zone soudée développe une hétérogénéité microstructurale.

Des échantillons de canalisation prélevés à partir des zones corrodées ont été étudiés au laboratoire de métallurgie de l'ENP.

L'analyse de la microstructure des différentes zones (métal de base, ZAT, zone fondue), nous a permis de mettre en évidence certains éléments clés, à savoir la différence de taille des grains qui diminue fortement en partant de ZAT vers le métal de base. C'est l'effet de la chaleur transmise par la zone fondue lors du soudage. La microdureté de ces deux zones confirme le résultat précédent. Nous retrouvons une microdureté de la ZAT (152HV) inférieure à celle du métal de base (192HV). La zone fondue, quant à elle, possède une microstructure dendritique et une microdureté (155HV), due à l'existence d'une deuxième phase (la ferrite  $\delta$ ).

L'analyse du comportement électrochimique de chacune des zones de la soudure dans les différents milieux (eau brute, eau adoucie, eau glacée) issus de l'installation, nous a révélé le risque de création des micro-piles entre les zones adjacentes (ZF-ZAT et

ZAT-MB). Les résultats obtenus à partir des courbes de polarisation montrent que le couple métal base/ ZAT est le plus susceptible de se corroder, en particulier dans l'eau brute.

Une optimisation du procédé de soudage est nécessaire, afin de garantir un état homogène, en terme de microstructure des zones soudées.

La raison la plus courante pour laquelle une canalisation en acier inoxydable ne satisfait pas la durée de vie prévue en ce qui concerne la résistance à la corrosion est une évaluation incomplète, de l'environnement et/ou les conditions d'exposition inattendues, dans le cas par exemple, de l'utilisation de l'eau de javel (le chlore) comme un désinfectant, peut attaquer la couche passive de ces aciers, à ce stade la corrosion localisée (piquration) par les ions de chlore se manifeste et se développe jusqu'à la perforation de la canalisation. Il convient d'étudier l'éventualité d'érosion-corrosion dans le cas des eaux contenant des particules solides. En particulier, l'eau brute. Nous pouvons gérer les effets de cette corrosion en ajustant le débit d'écoulement de l'eau, l'ajout des inhibiteurs de corrosion, pour améliorer la résistance à la corrosion, en protégeant la couche de passivité.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : S. CHERET, Les grandes catégories d'usages de l'eau dans l'industrie, Techniques de l'Ingénieur, G1150 V2.
- [2] : Documentation IMC, Spécifiques internes de la société IMC, 2014.
- [3] : BETZ, Le conditionnement des eaux industrielles selon Betz, 1993.
- [4]: J. BEDDOES, J. GORDON PARR, Introduction to stainless steels, 1999.
- [5]: P. J. CUNAT, « Aciers inoxydables : critères de choix et structure », Techniques de l'Ingénieur, M4540, (2001).
- [6] : D.C. MADELINE, La microstructure des aciers et des fontes, Dunod, 2012.
- [7] : G. BÉRANGER, Matériaux : résistance à la corrosion et au vieillissement, techniques de l'ingénieur, 42373210.
- [8] : H. ORDENBACH, Les aciers inoxydables : propriétés, mise en œuvre, emploi, normes, Paris : Tec et Doc 1990.
- [9] : B. DAGALLIER, Les aciers spéciaux : nature propriétés fabrication, SEMAS, 1978.
- [10] : M. COLOMBIE, Matériaux métalliques, technique et Ingénierie, Dunod, 2017.
- [12] : I.R. VENNEKENS FICHES D'INFORMATION -aciers inoxydables, Janvier 2007.
- [13] : DUNOD, Le soudage des aciers inoxydables, 1964.
- [14]: A.J. SEDRIKS, Corrosion of stainless steels, J. Wiley & Sons, 1979.
- [15]: J.C. LIPPOLD, Welding Metallurgy and weldability of stainless steel, 2005.
- [16]: L. BABOURI, Etude de la résistance à la corrosion des alliages de cuivre en milieu salin, Mémoire de Magister, 2008.
- [17] : J.J. LAMOUREUX, Précis de corrosion, 1980.
- [18] : J. BENARD, Métallurgie Générale, Masson, 1969.
- [19]: H.H. UHLIG, Corrosion and corrosion control, J. Wiley & Sons, 1985.
- [20]: J. BARRALIS, Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation, AFNOR, 1990.

- [21] : A. KELLAI, A. BOUTAGHANE, Comportement structural et mécanique des soudures en aciers inoxydables austénitique et duplex réalisées par le procédé TIG,2015.
- [22]: K.D RALSTON and N. BIRBILIS, Effect of grain size on corrosion, Juliet 2010.