

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



Département de Métallurgie

***Mémoire de fin d'études***

**Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie**

***Expertise de l'état de corrosion d'une  
installation pétrolière protégée  
cathodiquement***

**Réalisé par :**

**BOUMELIK Mustafa  
GHARBI Zoheir**

**Encadré par :**

**Mr. M.BOUABDALLAH**

**Promotion juin 2011**

# Table des matières

Introduction.....	1
<b>Première partie : Synthèse Bibliographique</b>	
<b>Chapitre I : corrosion des métaux</b>	
I. Corrosion des métaux.....	3
I.1. Définition de la corrosion.....	3
I.2 Types de corrosion.....	3
I.2.1. Corrosion chimique.....	3
I.2.2. Corrosion électrochimique .....	3
I.2.3. Corrosion biochimique.....	4
I.3. Formes de la corrosion .....	4
I.3.1. Corrosion uniforme.....	4
I.3.2. Corrosion par piquûre.....	4
I.3.3. Corrosion caverneuse.....	5
I.3.4. Corrosion galvanique.....	6
I.3.5. Corrosion intergranulaire.....	6
I.3.6. Corrosion sous contrainte.....	6
I.4. Mécanismes de la corrosion.....	8
I.5. Facteurs influents sur la corrosion .....	8
I.6. Réactions anodiques et cathodiques. Courbes courant-tension.....	9
<b>Chapitre II : protection cathodique</b>	
II.1. Métaux et électrolytes.....	11
II.1.1 L'électrode métallique.....	11
II.1.2. L'électrolyte.....	11
II.2. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique en contact avec un électrolyte.....	11
II.2.1. L'équilibre d'un métal dans une solution.....	11
II.2.1.1 Couche double à l'interface métal-solution.....	11
II.2.1.2 Potentiel d'équilibre.....	12
II.2.1.3 Electrode de référence.....	12
II.2.2 Processus secondaires aux électrodes -diagrammes ph – tension.....	14
II.2.2.1 Influence des réactions secondaires.....	14
II.2.2.2 Etablissement des diagrammes de Pourbaix (ph - tension).....	14
II.3. Application de la théorie de la corrosion aux métaux plongés dans un électrolyte quelconque (ouvrages métalliques dans le sol ou dans l'eau).....	15
II.3.1. Potentiel de corrosion.....	15
II.3.2. Mesure du potentiel d'un métal dans une solution.....	16
II.3.3. Classification des métaux.....	17
II.4. Protection cathodique .....	18
II.4.1. Principe de la protection cathodique.....	18
II.4.2. Critère de protection cathodique : Le potentiel métal/solution.....	18

II.4.3.Critère de protection cathodique : le courant.....	19
II.4.4.Protection cathodique par courant imposé .....	19
II.4.4.1.Les composantes d'une installation de soutirage de courant électrique.....	20
II.4.4.2 Domaines d'application.....	20
II.4.5.Protection cathodique par anodes sacrificielles.....	21
II.4.5.1.Les composantes d'une installation de la protection par anode réactive.....	21
II.4.5.1. Domaines de réalisation de la protection Cathodique par anodes sacrificielles.....	22
II.5.Les revêtements associés à la protection cathodique.....	22
II.5.1.Protection par revêtement métallique.....	22
II.5.2.Protection par revêtement organique (non métallique).....	23
II.5.2.1. Revêtement en bitume.....	23
II.5.2.1.Revêtement par peinture.....	23
II.6.Adjonction d'inhibiteurs.....	24
<b>Chapitre III : les aciers inoxydables austénitiques</b>	
III. Les aciers inoxydables austénitiques.....	25
III.1 Généralités .....	25
III.2 Elaboration .....	28
III.3 Influence des éléments d'alliage.....	29
III. 4 Propriétés mécaniques et physique des aciers inoxydables.....	31
III.5 Transformation martensitique des aciers inoxydables austénitiques.....	31
III.5.1 Transformation martensitique par déformation .....	31
III.5.2 Transformation martensitique par refroidissement à basse température.....	32
III.6 Domaines d'application des aciers inoxydables .....	33
<b>Chapitre IV: les aciers au carbone</b>	
IV. Aciers au carbone .....	34
IV.1. Définition .....	34
IV.2. Les sous-familles des aciers au carbone .....	34
IV.2.1. Les aciers doux .....	34
IV.2.2. Les aciers à moyenne teneur en carbone .....	34
IV.2.3.Les aciers à forte teneur en carbone .....	34
IV.3.Diagramme fer –carbone .....	35
IV.4.Composition chimique effective .....	36
<b>Deuxième partie : Expériences et Résultats</b>	
Partie I .....	37
V. Le contrôle de protection cathodique.....	37
V.1.Mesure de potentiel.....	37
V.1.1. Appareillage utilise.....	38
V.2.Mesure de courant .....	39
V.3.Mesure sur les anodes réactives .....	39
V.3.1.Inspection des anodes sacrificielles de l'intérieur des bacs d'eau.....	39
V.4.Mesure des isolements .....	39

V.5.Périodicité des opérations de contrôle et d'entretien de protection cathodique.....	40
V.5.1.Operations systématiques et indispensables .....	40
V.5.2.Operations souhaitables chaque semestre.....	40
V.5.3.Operations nécessaires, non systématique.....	41
Partie II.....	42
V.6.Présentation des matériaux.....	42
V.6.1.Acier au carbone A106/B .....	42
V.6.2 Acier inoxydable 312TP404L .....	44
V.7. Milieu de travail réel .....	46
V.7.1 Acier au carbone A106/B .....	46
V.7.2. Acier inoxydable A312TP304L .....	48
V.8.Caractérisation et contrôle non destructif .....	48
V.9.Caractérisation structurale .....	49
V.9.1 Préparation micrographique des échantillons .....	49
V.9.2 Technique d'attaque .....	51
Partie I .....	52
VI. Protection cathodique .....	52
VI.1. protection pour l'anti-incendie et pipeline.....	52
Partie II .....	58
VI. Caractérisation de l'état de corrosion et le milieu de travail réel des deux nuances d'acier A106/B et A312TP304L utilisés dans l'industrie pétrolière.....	58
VI.1 Caractérisation du milieu de travail réel .....	58
VI.1.1 A106/B.....	58
VI.1.2 A312TP304L.....	59
VI.2.Control Macrographique .....	59
VI.2.1. A106/B.....	59
VI.2.2 A321TP304L.....	60
VI.3 Caractérisation Micrographique .....	62
VI.3. 1 L'acier A106/B .....	62
VI.4 Résultats.....	64
Conclusion Générale .....	66
Annexe .....	67
Références Bibliographiques .....	75

## Liste des figures

Figure I.1.corrosion uniforme.....	4
Figure I.2.Corrosion par piqûre.....	5
Figure I.3.Corrosion caverneuse.....	5
Figure I.4.Corrosion intergranulaire.....	6
Figure I.5.fissurations intergranulaires.....	7
Figure I.6.fissurations transgranulaires.....	7
Figure I.7.Courbes courant-tension.....	10
Figure II.1. Électrode de référence Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	14
Figure II.2. Diagramme de Pourbaix.....	16
La figure II.3. Montre les différentes composantes d'une installation de soutirage de courant électrique.....	22
Figure II.4. Montre les différentes composantes d'une installation de la protection par anode réactive.....	23
Figure III.1.Courbe schématique de polarisation d'un acier inoxydable.....	27
Figure III.2.Influence du nickel sur l'extension de la boucle $\gamma$ des alliages ternaires Fe-Cr-Ni.....	28
Figure III.3.Diagrammes de phase en Cr et Ni équivalents, (a) et pour les soudures (b) : prévision de la structure des aciers inoxydables.....	29
Figure III.4.Constitution des aciers inoxydables austénitiques de type 18-9 à l'équilibre.....	30
Figure III.5.Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304.....	30
Figure III.6.Formation de la martensite $\epsilon$ dans les bandes de glissements et formation de la martensite $\alpha'$ (zones claires) aux intersections des bandes de glissements dans un acier 304L.....	33
Figure IV.1.Diagramme de phase du système fer - carbone.....	36
Figure V.1. Les points de mesures.....	38
Figure V.2. (a)Multimètres pour mesure le potentiel, (b) Électrode de référence Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	39
Figure V.3. Redresseur.....	39
Figure V.4. Anode réactive.....	40
Figure V.5. L'échantillon brut.....	44
Figure V.6: Structure du métal de base Gx200.....	44
Figure V.7: L'échantillon brut.....	45

---

Figure V. 8 : Structure du métal de base Gx200.....	46
Figure V. 9: Structure du métal de base Gx500.....	46
Figure V.10 : Conductimètre.....	48
Figure V.11 : Dispositif de mesure de la concentration de l'oxygène dissout.....	48
Figure V.12: Echantillon enrobé.....	50
Figure V.13: L'enchaînement de polissage.....	51
Figure V.14 : microscope optique.....	52
Figure V.15: Dispositif de l'attaque électrolytique.....	52
Figure VI.1. Poste de redresseur.....	53
Figure VI.2 Boite de jonction.....	54
Figure VI.3. Représente bonne connexion et continuité du câble pour une anode sacrificielle.....	54
Figure VI.4. (a) Appareil de testeur d'isolateur, (b) Eclateur.....	55
Figure VI.5. Méthode pour mesurer de potentiel par rapport à électrode de référence Cu/Cu SO4d'un pipeline a partir d'un point de mesure.....	55
Figure VI.6.anode sacrificielle.....	56
Figure VI.7.L'état de revêtement d'intérieur de back TK 401.....	58
Figure VI.8 : perforation due à la corrosion.....	61
Figure VI.9 : Macrographie de la pipe avant le découpé.....	62
Figure VI.10 (a, b) : Amorçage et propagation des fissures.....	63
Figure VI.11: surface interne avant l'attaque Gx50.....	64
Figure VI.12: surface interne après l'attaque Gx100.....	64
Figure VI.13: Surface externe sans attaque Gx50.....	64
Figure VI.14: Surface externe après l'attaque électrolytique Gx100.....	65
Figure VI.15 : Surface intérieur après l'attaque électrolytiqueGx100.....	66

---

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : principaux facteurs influents sur la corrosion.....	9
Tableau II.1. Classification des métaux.....	18
Tableau III. 1 : Propriétés mécaniques et physique des aciers inoxydables.....	32
Tableau V.1 : Compositions en % de l'acier A106GradeB.....	43
Tableau V.2 : Compositions en % de l'acier A312TP304L.....	45
Tableau VI.1. L'intensité de courant mesuré.....	56
Tableau VI.2. Le potentiel de protection externe mesuré.....	57
Tableau VI.3. Le potentiel de protection interne mesuré.....	57
Tableau VI.4. L'intensité de courant mesuré .....	58
Tableau VI.5. Le potentiel de protection mesuré.....	58
Tableau VI.6. Le potentiel de protection de pipeline mesuré.....	59
Tableau VI.7. Analyses chimique de l'eau.....	60
Tableau VI.8. Analyses chimique de l'eau.....	61

## ملخص:

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة كيفية عمل الحماية ضد التآكل الأنابيب الغاز بواسطة الحماية الكاثودية و مدى فاعليتها وأما الجزء الثاني من عملنا هو تشخيص حالتين من التآكل لعينتين من الفولاذ العينة الأولى لفولاذ غير قابل للتآكل والثانية لفولاذ عادي. و من اجل هذا قمنا بقياس جهد التآكل للأنابيب تحميل الغاز ونظام إخماد الحريق فما بعد قمنا بمقارنة القيم المقاس بقيم متفق عليها عالميا. من اجل تشخيص حالة التآكل قمنا بتحليل السائل الذي ينتقل في أنابيب الغاز و النظام إخماد الحريق لعينتين من الحديد ثائلة.

الكلمات المفتاحية : تآكل ، حماية الكاثودية ، فولاذ، فولاذ غير قابل للتآكل

## Résumé:

Le but de ce travail est d'étudier la protection contre la corrosion par la protection cathodique du pipeline de gaz et leur efficacité. La deuxième partie est consacrée à la caractérisation de l'état de corrosion et le milieu de travail réel des deux nuances d'acier A106/B et A312TP304L utilisés dans l'industrie pétrolière. Pour cela nous avons prélevé des potentiels de corrosion du pipeline et du système anti-incendie, ensuite, nous avons comparé ces dernières à des grandeurs normées. Pour la caractérisation de l'état de corrosion de deux aciers utilisés dans l'industrie pétrolière nous avons réalisé une analyse physico-chimique du milieu de travail. Des échantillons ayant subits une corrosion plus ou moins avancé sont ensuite caractériser par métallographie a fin de préciser le processus d'attaque de l'acier en milieu d'utilisation.

Mots clés: corrosion, protection cathodique, acier, acier inoxydable

## Summary:

The aim of this work is to study the protection against corrosion by cathodic protection of gas pipeline and effectiveness, the second part is devoted to characterizing the state of corrosion and the actual work environment of the two shades of steel A106 / B and A312TP304L used in the oil industry. . For this we collected potential pipeline corrosion and fire protection system, then we compared them to normalized quantities. To characterize the state of corrosion of two steels used in the oil industry we have achieved a physical-chemical analysis of the workplace. Samples have undergone a more or less advanced corrosion is then characterized by metallography was late to clarify the process of attack of the steel in the middle of use.

Key words: corrosion, protection cathodic, carbon Steel, stainless steel.

## Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur Pr. BOUABDALLAH pour nous avoir encadrés, conseillés lors de notre projet, et pour sa disponibilité et son aide.

Je remercie également le Dr K.ABADLI, Pr M.LARIBI et Pr E.SALHI les membres de jury, d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail dans l'unité de production de gaz d'Ohanet SH-BhpBilliton et en particulier les ingénieurs de corrosion Mourad et Salem et l'ingénieur paping Mohammed et Khaled le Technicien.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants de département de métallurgie qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre gratitude envers toute personne ayant contribué à la réalisation de ce modeste travail.

## Dédicaces

A mes très chers parents  
A mes frères  
A mes sœurs  
A toute ma grande famille  
A tous mes amis  
*Z. GHRBI*

A mes très chers parents  
A mes frères  
A mes sœurs  
A toute ma grande famille  
A toute mes amis  
*M. BOUMELIK*

## Introduction

La corrosion dans la production de pétrole et gaz est souvent considérée comme étant le problème actuellement le plus récurrent dans le monde.

Les aciers au carbone et acier inoxydable occupent une place privilégiée dans tous les secteurs industriels dans notre pays; ils sont souvent destinés à la production, au transport et stockage des produits pétroliers et de gaz naturel. La dégradation par la corrosion de ces structures causée par le milieu dans lequel elles sont exposées pose de sérieux problèmes sur les plans économiques, technologiques et sécuritaires.

Les aciers immergés au sol sont particulièrement exposés aux risques de corrosion, les dégâts occasionnés peuvent provoquer d'importantes pertes économiques et représentent un facteur de risque majeur en terme de sécurité industriel.

La quantité d'acier détruite chaque année par ce phénomène est estimée à un quart de la production annuelle du fer. Les évaluations du coût des dégâts directs et indirects causés par la corrosion varient entre 2 à 4 % du PNB (Produit National Brut) dans les pays industrialisés; ce coût comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection. Au Etats-Unis, ce coût a été évalué entre 5 et 8 milliards de dollars, soit 1,5 à 2 % du PNB. En France l'évaluation du CEFRACOR (centre français de la corrosion) a été de 4 % du PNB; ce qui est considérable et reflète l'importance du problème.

Il importe donc de développer notre connaissance en matière de lutte contre le phénomène de la corrosion au même rythme que celui du développement des industries de pointe, d'où la nécessité d'œuvrer dans ce sens.

Il existe plusieurs méthodes pour protéger les structures exposées à un milieu corrosif, le revêtement est l'une des plus utilisées, en raison de sa facilité d'application. De plus il est économique et s'adapte à toutes les exigences. On a utilisé pendant fort longtemps des revêtements à base de résine Epoxy, mais avec le temps il s'est avéré que ce revêtement se dégrade partiellement et l'acier se retrouve en contact direct avec le milieu corrosif. Cette dégradation partielle est la cause d'une corrosion localisée qui est très dangereuse, car elle se produit en profondeur et peut conduire à la perforation rapide de la structure. Ainsi par exemple on a pu constater que les fonds des bacs de stockage, prévu pour être opérationnels pendant 25 ans, sont détériorés après seulement 3 à 10 ans de service.

Pour remédier à ce problème, des Chercheurs multiplient les recherches permettant de mieux saisir le mécanisme de la corrosion pendant que des Ingénieurs s'attellent au perfectionnement des techniques destinées à prémunir les ouvrages métalliques des effets de cette dégradation. En effet, la protection des conduites contre la corrosion par le sol ou l'eau pourrait simplement être réalisée par isolation de celles-ci. Cependant, les revêtements utilisés dans ce but n'assurent pratiquement pas la conservation entière et durable des tubes d'aciers, il faut dès lors faire appel à une autre méthode de protection, dite active.

La protection cathodique par soutirage de courant, est une méthode incontournable de protection active contre la corrosion qui est très souvent utilisé comme complément à la protection passive des ouvrages longilignes de grandes envergures.

En effet, la plupart des études établies dans le cadre du dimensionnement d'un tel système de protection s'accordent à prendre une certaine marge de sécurité sur divers paramètres, dont un dimensionnement sur 25 ans et la majoration de la puissance, entraînant immédiatement des surdimensionnements occasionnant irrémédiablement des surcoûts. D'où l'importance de l'élaboration d'un modèle mathématique permettant de dimensionner de manière optimale ce genre de système.

Parmi les autres méthodes de protection existantes, la protection cathodique par anodes sacrificielles mérite aujourd'hui une étude car elle pourrait permettre d'assurer une meilleure longévité, de réduire les coûts et d'établir une protection uniforme. Dans ce procédé, on utilise des anodes sacrificielles qui se consomment pour protéger la structure immergée ou enterrée.

Dans un premier temps, nous présentons les concepts théoriques de base de corrosion et de protection cathodique. Ensuite, nous abordons la partie expérimentale dans laquelle nous présentons les techniques utilisées, suivie d'un chapitre regroupant les résultats obtenus et leurs interprétations. La conclusion générale mettra en lumière les bénéfices tirés de cette étude et les perspectives qu'elle ouvre.

## I. Corrosion des métaux :

La corrosion désigne l'attaque destruction et involontaire que subit un métal. De nature électrochimique, elle s'amorce généralement à la surface du métal. La corrosion métallique constitue un problème de taille : on estime que les pays industrialisés consacrent environ 5% de leurs revenus à la corrosion et à l'entretien ou au remplacement de produits endommagés ou déduits par des réactions de corrosion. Les effets de corrosion sont bien connus. Qui, en effet, n'a jamais vu de rouille sur la carrosserie, le radiateur ou le système d'échappement vu d'automobile ? Les processus de corrosion sont parfois mis avantageusement à contribution. ainsi, les procédés de gravure reposent sur la réactivité chimique sélective des joints de grains ou de divers composants microstructuraux. de même, le courant électrique produit dans les batteries de piles sèches découle de processus de corrosion [1].

### I.1. Définition de la corrosion

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible : elle détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Un autre phénomène dégrade le matériau : l'usure, perte progressive de matière de la surface d'un solide, due au frottement ou l'impact. Un phénomène principalement mécanique ou, cependant, les interactions chimiques entre le matériau et l'environnement jouent parfois un rôle important en accélérant ou en ralentissant la dégradation. L'étude de la corrosion et protection des métaux englobe donc aussi les phénomènes de dégradation dus aux sollicitations mécanique et chimiques combinées [2].

### I.2. Types de corrosion

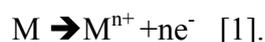
La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion.

#### I.2.1. Corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide, le métal, et une phase gazeuse ou liquide. Dans le cas où le réactif est gazeux, il apparaît un phénomène dit de corrosion sèche. Si le réactif est un liquide, il se produit une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à surface même. La corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique [3].

#### I.2.2. Corrosion électrochimique

Dans le cas des matériaux métallique, la corrosion est généralement d'origine électrochimique, c'est-à-dire quelle consiste en une réaction chimique marquée par un transfert d'électrons entre deux espèces chimique. Habituellement, les atomes métalliques perdent ou donnent d'électrons lors d'une réaction dite d'oxydation. Ainsi, le métal hypothèque M de valence n (ou ayant n électrons de valence) peut s'oxyder selon réaction :



### I.2.3. Corrosion biochimique

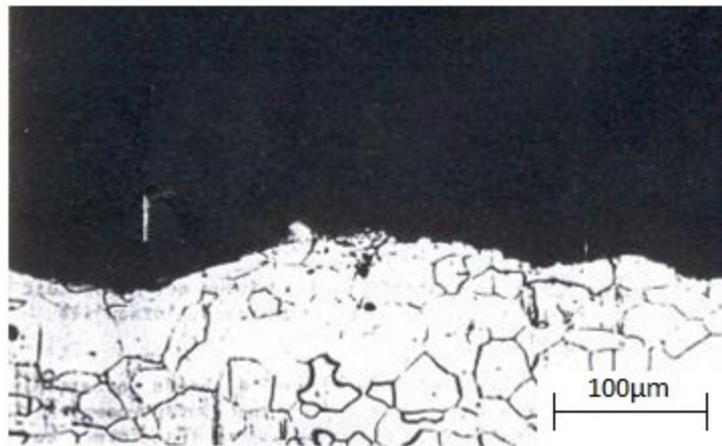
C'est un procédé de détérioration résultant de l'activité d'organismes vivants. Ces organismes comprennent des micro-organismes du type bactéries et des macro-organismes du type moules, algues, etc. Ces organismes vivants peuvent vivre et se reproduire dans des milieux où le pH varierait de 0 à 11, des températures de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $+80^{\circ}\text{C}$  et sous des pressions de plusieurs centaines de bar [3].

### I.3. Morphologie de la corrosion

La corrosion peut se développer sous différentes morphologies principales :

#### I.3.1. Corrosion uniforme

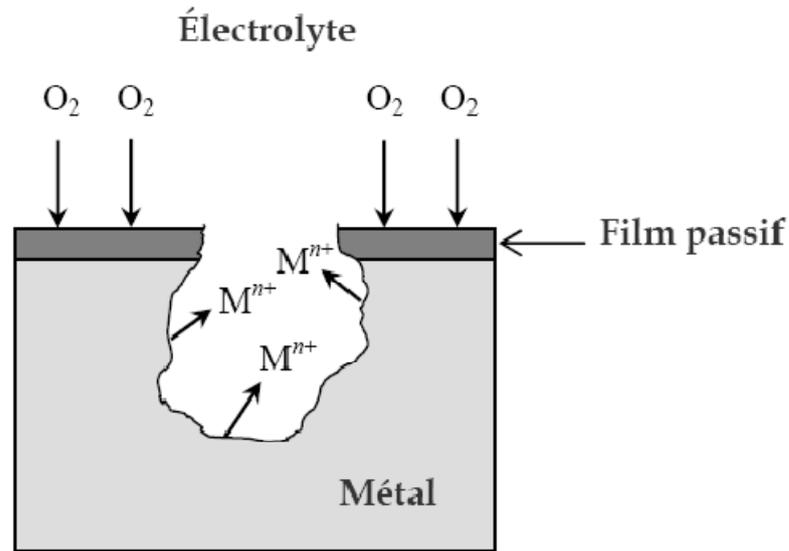
Elle se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal. On l'observe bien dans le cas de la corrosion sèche que s'il s'agit de corrosion en milieu liquide. Les caractéristiques mécaniques du métal rapportées à l'unité de section ou de longueur, ne sont pas modifiées (*Figure I.1*) [1].



*Figure I.1 : corrosion uniforme [4].*

#### I.3.2. Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres (pitting) est une forme de corrosion localisée au cours de laquelle le métal se dissout très rapidement en certains sites discrets de la surface, le reste de cette surface n'étant sensiblement pas attaqué. Cela se traduit souvent par la formation de trous de faibles dimensions mais de profondeur importante (*Figure I.2*). La conséquence d'une telle attaque peut être la destruction rapide et inattendue des structures sur lesquelles elle se manifeste [5].



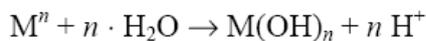
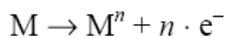
*Figure I.2 : Corrosion par piqûre[5].*

### I.3.3. Corrosion caverneuse

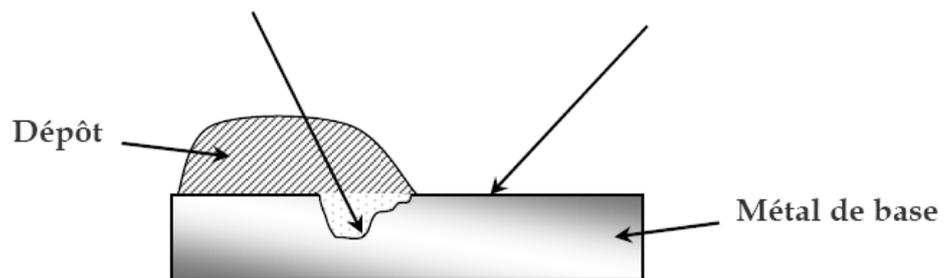
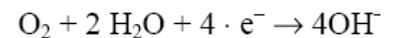
La corrosion caverneuse est un phénomène de corrosion localisée qui se développe dans des interstices, des zones de recoin où un matériau métallique se trouve localement en contact avec un milieu corrosif confiné, alors que la majorité de la surface du matériau est au contact de la masse du liquide (*Figure I.3*).

- la conception des appareillages
- la formation de dépôts, soit en service, soit même pendant la fabrication :
- dépôts minéraux ou organiques dans des zones de relative stagnation
- produits de corrosion
- développements biologiques [5].

Réactions anodiques (zone désaérée)



Réaction cathodique  
(zone aérée)



*Figure I.3 : Corrosion caverneuse [5].*

### I.3.4. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique ou bimétallique résulte de l'association électrique de deux métaux d'oxydabilité très différente. Le métal le plus facilement oxydable étant l'anode alors que l'autre est la cathode sur lequel l'oxydant contenu dans le milieu agressif se réduit [6].

### I.3.5. Corrosion intergranulaire

Elle se manifeste aux joints intergranulaires. Elle est due en général à la précipitation d'une phase ou à la formation préférentielle d'un produit de corrosion aux joints de grains. C'est un type de corrosion particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaqué soit faible, les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal, en effet, la charge à la rupture et l'allongement des échantillons corrodés prennent alors une valeur plus faible (*Figure I.4*) [3].



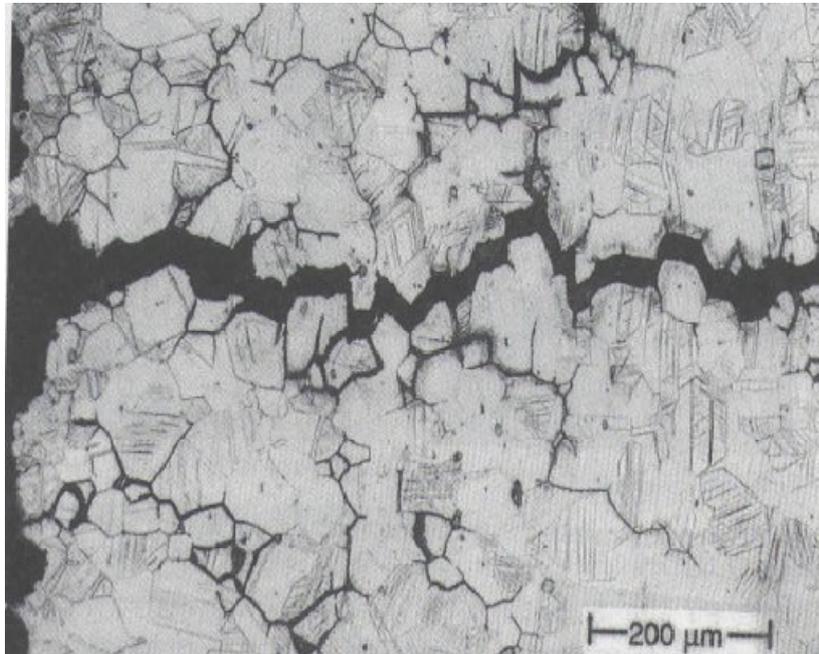
*Figure I.4 : Corrosion intergranulaire [3].*

### I.3.6. Corrosion sous contrainte

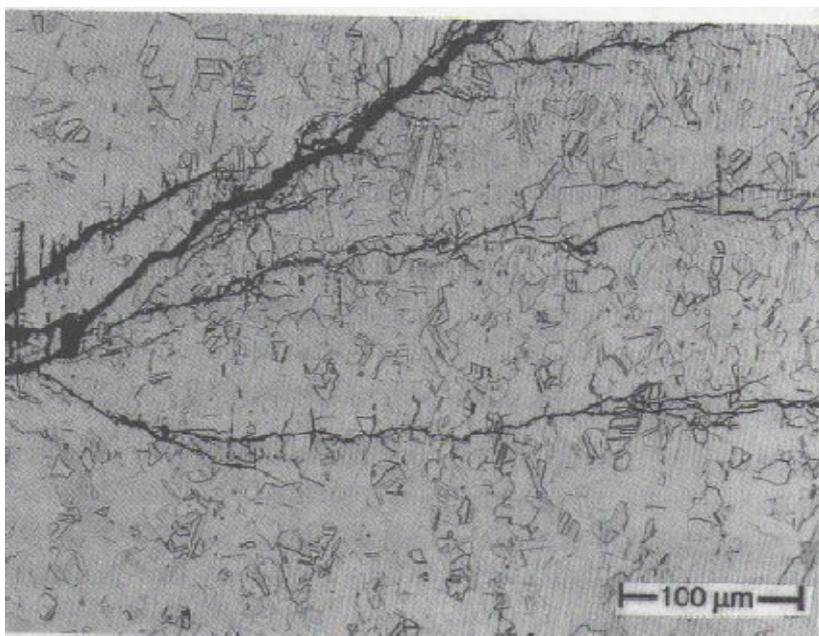
(Stress corrosion cracking), appel aussi corrosion fissurant sous contrainte, résulte d'une action conjointe entre la corrosion et contrainte de traction statique, dernière soit appliquée ou résiduelle. Ce type d'altération n'a lieu que lorsque plusieurs conditions, relatives tant aux propriétés du métal qu'à la contrainte mécanique ou au milieu, sont réunies [2].

➤ **Fissures intergranulaire et transgranulaires**

Selon les conditions, la fissuration sous contrainte sensible au milieu forme des fissurations intergranulaires, qui suivent les joints de graine, ou des fissures transgranulaires, souvent ramifiées, qui traversent les grains (voir *Figure I.5 et I.6*)



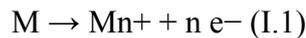
*Figure I.5: fissurations intergranulaire [2].*



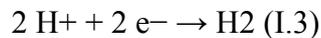
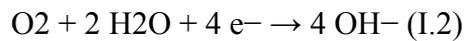
*Figure I.6: fissurations transgranulaires [3].*

#### I.4. Mécanismes de la corrosion

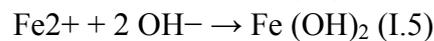
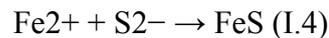
Le processus de corrosion des métaux en milieu aqueux est de nature électrochimique. Ce processus repose essentiellement sur l'existence d'une différence de potentiel entre deux éléments d'une micropile qui conduit à un déplacement de l'équilibre d'oxydo-réduction, qui constitue par conséquent l'effet de micropile. Cette différence de potentiel peut résulter d'une hétérogénéité du métal et d'une aération différentielle. Deux réactions simultanées d'oxydo-réduction atteignent cet effet micropile : la réaction anodique correspondant à l'oxydation du métal en espèce soluble



A l'inverse, la réaction cathodique (I.2) correspond à la réduction d'une espèce de ce milieu naturel, il s'agit de l'oxygène dissous s'il est présent, Ou les ions d'hydrogène provenant de la dissociation électrolytique dans les milieux désaérés selon la réaction (I.3) :



Ces deux réactions (I.2) et (I.3) sont dites réactions de réduction ou cathodiques. Les ions métalliques réagissent avec d'autres ions présents dans le milieu aqueux (l'ion sulfure  $S^{2-}$ , réaction d'oxydation (I.4), l'ion hydroxyde  $OH^{-}$ , réaction d'oxydation (I.5)...) formant ainsi les produits de corrosion (les hydroxydes de fer, sulfure de fer...).



Ces deux réactions (I.4) et (I.5) sont dites réactions d'oxydation ou anodiques. Ces produits se déposent sur la surface anodique et la polarisent (formant un protecteur): c'est ce qu'on appelle la polarisation anodique [2].

#### I.5. Facteurs influents sur la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et il est très important d'en dresser une liste. On peut les classer en quatre groupes principaux (tableau I.1).

La corrosion mettant en présence deux partenaires, le métal ou l'alliage et le réactif. On conçoit qu'elle dépendra à la fois des caractéristiques du métal et de celles du réactif [3].

**Tableau I.1 : principaux facteurs influents sur la corrosion [3].**

<b>Facteurs définissant les modes d'attaque</b>	<b>Facteurs métallurgiques</b>	<b>Facteurs définissant les conditions d'emploi</b>	<b>Facteurs dépendants du temps</b>
Concentration du réactif -Teneur en oxygène -Additions d'inhibiteur -pH du milieu -Température -Pression	-Composition du métal ou de l'alliage -Procédé d'élaboration - Impuretés - Traitement Thermique - Traitement Mécanique -Additions protectrices	-Etat de surface -Formes de pièces -Sollicitations Mécaniques -Emploi d'inhibiteurs -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Température -Modification des Revêtements protecteurs

### **I.6. Réactions anodiques et cathodiques. Courbes courant-tension**

Pour en revenir au problème de corrosion qui nous intéresse, tout mécanisme de corrosion humide correspond au passage des atomes du métal dans la solution sous forme d'ions, c'est-à-dire à la réaction :



Pour le fer par exemple :  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ .

De façon très générale (1) :  $Réd \rightarrow Ox + ne^{-}$ .

Cette réaction ne peut pas se produire seule ; en effet, elle conduirait à une accumulation de charges négatives dans le métal.

Par conséquent, pour que le métal reste neutre, il faut qu'il se produise simultanément une réaction consommant les électrons formés :

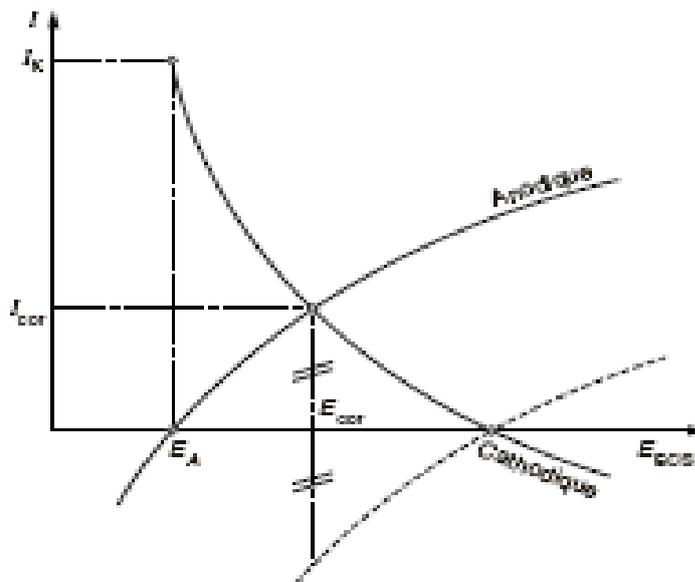
En milieu acide, c'est :  $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$  ;

En milieu neutre :  $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$  ;

Ou toute autre réaction de réduction du type (2) :  $Ox + ne^{-} \rightarrow Réd$ .

Par conséquent, tout phénomène de corrosion humide nécessite l'existence simultanée de deux réactions : l'une du type (1) anodique, l'autre de type (2) cathodique. De même que précédemment, il existe pour chacune de ces réactions une courbe courant/tension ou courbe de polarisation dans un diagramme E-I ; elles sont appelées respectivement courbe anodique et courbe cathodique (figure I.8). L'intensité

du courant est directement proportionnelle à la vitesse de réaction ; pour la courbe anodique, c'est donc la vitesse de corrosion. On notera d'ailleurs, que compte tenu du rôle de la surface de l'électrode, cette vitesse est exprimée en densité de courant, c'est-à-dire en  $A/cm^2$ . Pour que le métal reste neutre, il est nécessaire que la quantité d'électrons fournie par la réaction anodique soit égale à celle consommée par la réaction cathodique. Par conséquent, l'état d'équilibre est défini par le point tel que les courants anodique et cathodique soient opposés ; cela correspond aux conditions de corrosion naturelle, c'est-à-dire au courant  $I_{cor}$  et au potentiel  $E_{cor}$  appelés respectivement courant et potentiel de corrosion libre (**Figure I.7**). Ces caractéristiques peuvent aussi, évidemment, être obtenues par l'intersection de la courbe anodique et du symétrique par rapport à l'axe des abscisses de la courbe cathodique (**Figure I.7**). Par conséquent, s'il n'y a pas d'autre intervention (corrosion libre), le potentiel du métal s'établit naturellement à la valeur  $E_{cor}$ . La vitesse de corrosion libre ou naturelle est alors proportionnelle au courant  $I_{cor}$  ; elle est donc d'autant plus grande que cette dernière est élevée. À l'inverse, si l'on impose au métal un potentiel différent, par exemple par une source de courant extérieur, le courant de corrosion est modifié et s'arrête pour la valeur correspondant au potentiel imposé. Nous reviendrons sur ce point [7].



**Figure I.7 :** Courbes courant-tension [7].

## **II.1. Métaux et électrolytes**

La corrosion est le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif. L'environnement est un milieu corrosif, à partir du moment où il contient de l'eau ; ce milieu, c'est, bien entendu, l'eau elle-même, milieu complexe contenant quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi les sols qui contiennent tous plus ou moins d'humidité, et encore les gaz amenant des condensations d'eau. Cet environnement c'est aussi la plupart des milieux industriels liquides. La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, (une réaction est un échange - gain ou perte - de particules) dont les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre. Ces réactions, à l'interface d'une phase métallique et d'une phase aqueuse, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques, neutres ou ionisés, contenus dans la solution [8].

### **II.1.1.L'électrode métallique**

Un métal M est constitué par un édifice cristallin d'ions positifs  $M^{n+}$  dans lequel circulent des électrons libres. On sait que ce nuage électronique est responsable de la conductibilité des métaux. La mise en mouvement de ces électrons sous l'effet d'un champ électrique crée une circulation de courant dans le métal. La particularité d'un conducteur métallique est de laisser passer le courant électrique sans subir de modification chimique [8].

### **II.1.2.L'électrolyte.**

Un électrolyte est un système qui renferme des particules ionisées. Ces particules peuvent être des atomes ionisés, ou des ions complexes constitués de plusieurs atomes.

Les ions positifs ou cations proviennent d'atomes qui ont perdu un ou plusieurs électrons.

## **II.2. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique en contact avec un électrolyte.**

### **II.2.1.Équilibre d'un métal dans une solution**

#### **II.2.1.1.Couche double à l'interface métal-solution.**

Plongeons un métal dans un électrolyte ionisant inerte. Les ions du réseau métallique tendent à passer en solution et laissent le métal chargé négativement par ses électrons. Ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs. Il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte [8].

### II.2.1.2. Potentiel d'équilibre.

C'est le potentiel que prend un métal par rapport à la solution de l'un de ses sels. Il est caractéristique du métal. La thermodynamique permet de le calculer en utilisant la relation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \log(a_M^{n+}) \quad 2.1$$

$E$  s'exprime en volte, et il est lié à la variation d'enthalpie libre  $\Delta$  correspondant à la réaction



$$\Delta = -nFE.$$

$E_0$  est une constante appelée potentiel normal du métal. Elle correspond au cas où l'activité

$a_M^{n+}$  des ions du métal dans la solution est égale à 1.

$R$  est la constante des gaz parfaits.  $T$  la température absolue,  $n$  la valence du métal et  $F$  le faraday.

L'électrode constituée par un métal plongeant dans une solution de l'un de ses sels est une électrode réversible puisque l'interface métal-solution ne se modifie pas avec le temps [4].

### II.2.1.3. Électrode de référence

Pour mesurer la différence de potentiel interfaciale, il est nécessaire d'introduire dans la solution une sonde conductrice électronique qui va constituer à son tour une deuxième électrode. On ne peut donc pas mesurer la tension absolue d'une électrode, mais seulement sa tension relative par rapport à une électrode particulièrement choisi comme référence [9].

L'électrode de référence dont la tension est choisi égale à zéro à toute température est l'électrode à hydrogène dans l'état standard. Elle est constituée d'une lame platine platinée plongeant dans une solution d'acide chlorhydrique dans laquelle l'activité des ions  $H^{+}$  est égale à 1. On fait barboter dans la solution de l'hydrogène pure sous pression atmosphérique

Le processus réversible dont cette électrode est le siège est :



A 20°C, la tension de l'électrode à hydrogène est donnée par la relation :

$$E = E_0 + 0,029 \text{Log} (a_{\text{H}^+})^2 / P_{\text{H}_2}$$

Par convention à toute température,  $E_0=0$  si  $(a_{\text{H}^+})=1$ .  $\text{H}_2$

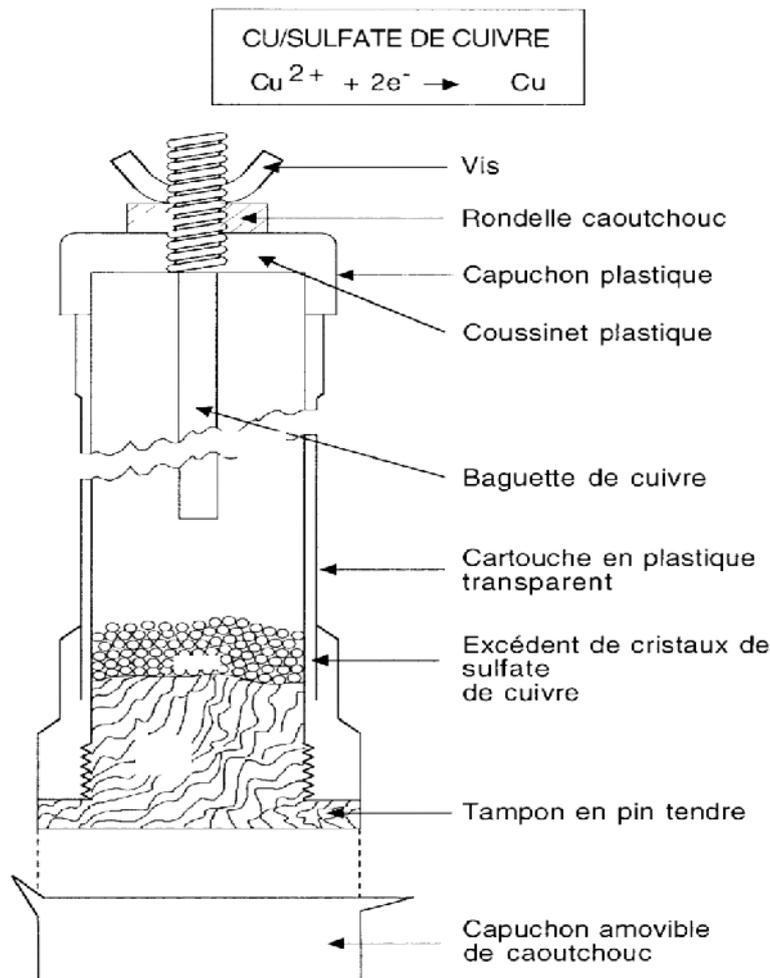
Pour  $P_{\text{H}_2}=1$  ce qui est le cas général, comme  $\text{pH} = -\text{Log} (a_{\text{H}^+})$ , la relation précédente s'écrit :

$$E = -0,058\text{pH}.$$

Cette électrode est longue à préparer et d'un emploi délicat [4].

- L'électrode au calomel saturé (ECS), très pratique en milieu chloruré de laboratoire (Hg dans  $\text{HgCl}_2$  saturé, suivi d'un deuxième compartiment en KCl saturé ( $E_R = 0,25 \text{ V}_{\text{EHN}}$ ) ;
- L'électrode Ag/AgCl, très robuste en milieu marin ( $E_R=0,25 \text{ V}_{\text{EHN}}$  dans l'eau de mer) ;
- L'électrode Cu/CuSO<sub>4</sub>, en milieu sulfurique ou sensible au chlorure ( $E_R \approx 0,30 \text{ V}_{\text{EHN}}$ ) *Figure II.1.*

En général, chacun utilise toujours la même électrode dans les mêmes études, et les problèmes de conversion sont peu fréquents [10].



*Figure II.1. Électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub> [4].*

## II.2.2.Processus secondaires aux électrodes-diagrammes ph-tension.

### II.2.2.1.Influence des réactions secondaires

Des processus ou des réactions secondaires peuvent apparaître au niveau des électrodes, pour ralentir ou augmenter la vitesse des réactions anodiques ou cathodiques.

- Ainsi, par exemple, dans les sols, la raréfaction de l'oxygène diminue la corrosion de l'acier en ralentissant la réaction cathodique, mais il n'en est plus de même si un apport constant d'oxygène est produit par les fluctuations d'une nappe phréatique ou d'un écoulement d'eau. Dans ce cas, il y aura entretien de la corrosion.
- En milieu neutre ou basique, l'hydrogène formé aux cathodes reste adsorbé et ne se dégage pas ; la vitesse de corrosion diminue dans de fortes proportions. Les produits primaires de la corrosion peuvent aussi, en réagissant avec la solution (soit par transformation, soit par dissolution), jouer ou non le rôle de barrières à la diffusion de l'oxygène et ainsi ralentir ou même réduire à zéro le taux de corrosion, ou bien au contraire, par une remise à nu du métal, favoriser la poursuite de la corrosion.

Il en est ainsi, par exemple, de l'hydroxyde ferreux, produit de la corrosion du fer, qui en solution très acide est dissous et ne protège pas le métal, mais qui en milieu neutre en présence d'oxygène se transforme en hydroxyde ferrique (La rouille) assurant une barrière à la diffusion de l'oxygène [8].

### II.2.2.2.Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - tension).

Le diagramme de *Figure II.2*, relatif au fer, va permettre la discussion, à la fois, des problèmes de corrosion et des problèmes de protection. Comme pour l'eau, ce diagramme a été établi en prenant en considération les potentiels thermodynamiques (ou les enthalpies libres de formation) du solvant aqueux, des corps dissous, des corps condensés et même des corps gazeux susceptibles d'être présents. Un tel diagramme peut changer légèrement de forme selon que tel ou tel oxyde formé est considéré comme protecteur. En fait, trois zones sont délimitées, et correspondent à une corrosion (faible ou forte), à l'immunité ou à une passivation [11].

Un domaine de corrosion où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles,

- ❖ un domaine de passivation où le fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant. C'est un domaine où le métal est protégé contre la solution, si le film a pu se former d'une manière uniforme, s'il reste adhérent et si, mécaniquement, rien ne vient le détruire.
- ❖ un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder, les réactions d'oxydation n'étant plus possibles. C'est le domaine de la protection cathodique.

Ces trois domaines et les circonstances (pH et tension) qui les définissent peuvent être établis pour tous les métaux purs [8].

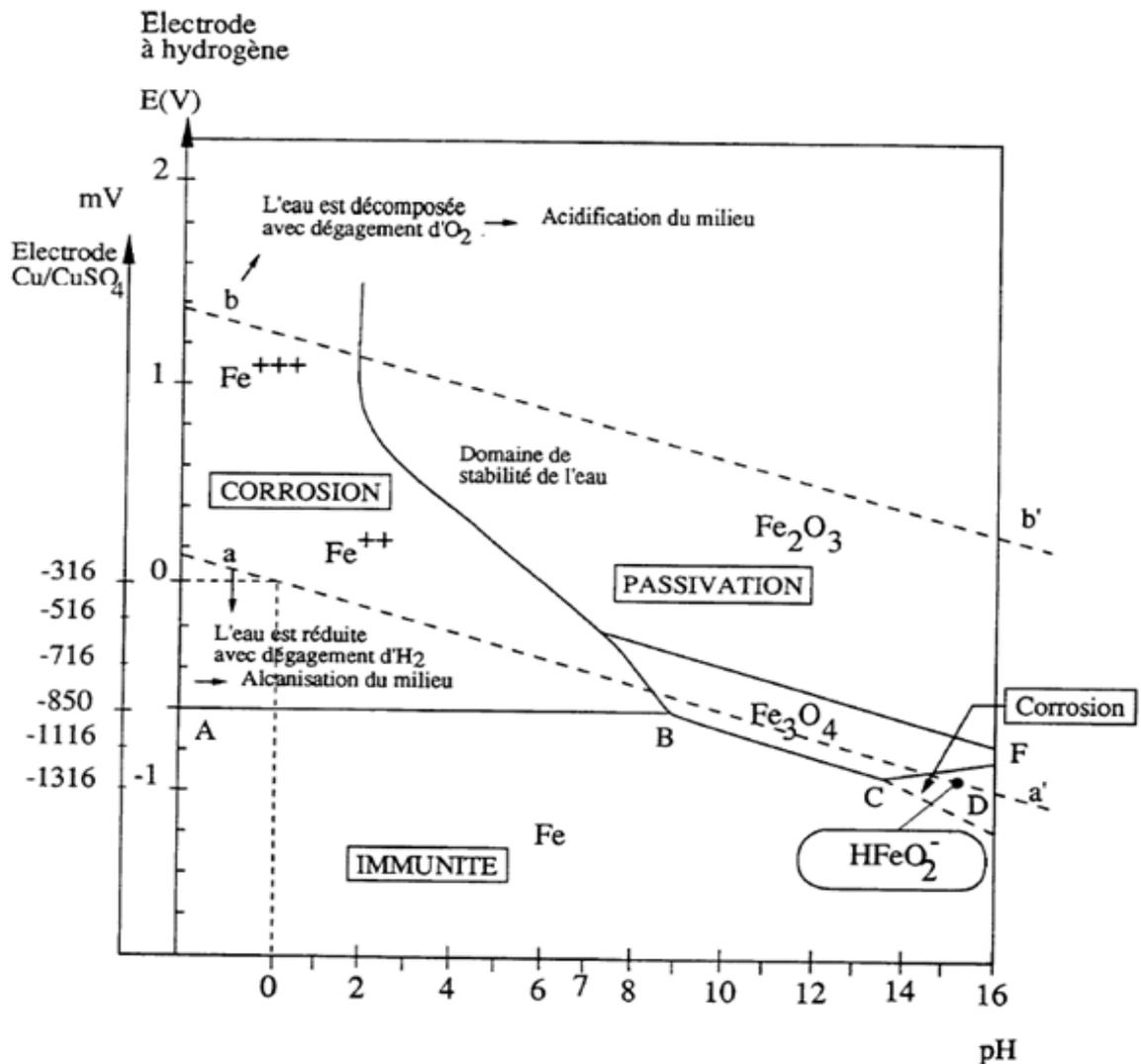


Figure II.2. Diagramme de Pourbaix [8].

## II.3.Applications de la théorie de la corrosion aux métaux plongés dans un électrolyte quelconque (Ouvrages métalliques dans le sol ou dans l'eau).

### II.3.1.Potentiel de corrosion

C'est le potentiel que prend un métal par rapport à un électrolyte donné. Il n'est pas caractéristique du métal et dépend des conditions expérimentales, en particulier de la nature, de la concentration et de la température du réactif, mais aussi de l'état de surface du métal. La réaction électrochimique n'est plus réversible puisque la nature de l'interface métal-solution varie avec le temps. Cependant, le potentiel tend vers une valeur stationnaire pour une durée d'immersion du métal qui dépend de sa nature et celle du réactif. C'est une grandeur complexe, mais qui donne des renseignements très

utiles sur le fonctionnement des piles qui interviennent dans les phénomènes de corrosion [4].

### **II.3.2. Mesure du potentiel d'un métal dans une solution**

Il s'agit de faire la mesure du potentiel du métal plongé dans l'électrolyte qui est dans son voisinage immédiat. En effet, le véritable milieu baignant la surface du métal est celui qui contient les produits des réactions d'oxydoréduction - solides, tels les oxydes, ou gazeux, comme l'hydrogène adsorbé au niveau des cathodes ou l'oxygène au niveau des anodes - et dont le pH est différent de celui du reste de l'électrolyte (plus alcalin s'il s'agit d'une cathode, plus acide près d'une anode). La sonde qui contient l'électrode de référence doit donc être placée dans le milieu ambiant, le plus près possible du métal, car c'est ce milieu ambiant qui lui fixe son potentiel et son état. On peut déjà comprendre les difficultés rencontrées pour faire des mesures correctes du potentiel d'un ouvrage enterré ou immergé. L'électrode de référence est rarement positionnée à proximité du métal ; placée en général au niveau du sol au droit de la conduite, elle ne reflétera pas le potentiel exact du métal. On verra, plus avant, que l'éloignement de l'électrode par rapport au métal introduit une erreur supplémentaire en intégrant, dans la mesure du potentiel, des chutes de tension existant au sein de l'électrolyte lorsque celui-ci est parcouru par des courants électriques.

La mesure de ce potentiel se fait à l'aide d'un millivoltmètre de forte résistance interne, de façon à éviter le passage d'un courant dans le circuit de mesure, et fausser la valeur de la tension par la polarisation de l'électrode métallique ou de l'électrode de référence. En laboratoire, les résistances de l'appareillage sont couramment de plusieurs mégohms. Sur le terrain, on se contente, pour éviter des inconvénients liés à l'existence de capacités parasites ou à l'humidité, d'appareils moins performants de 20.000 à 100.000  $\Omega$  par volt [8].

### II.3.3. Classification des métaux.

Spontanés des matériaux conducteurs dans divers électrolytes

*Tableau II.1. Classification des métaux [8].*

Electrolyte : eau de mer en mouvement			Electrolyte : sol ou eau	
Nature de l'électrode métallique	Electrode Calomel saturé	Electrode au Zinc pur	Electrode Cu/Cu SO <sub>4</sub>	Nature de l'électrode métallique
Platine	+ 250 à + 150		+ 100	Charbon, Coke, graphite
Titane	+ 100 à - 50			
Acier inox type 316-317	0 à - 100 eau aérée - 350 à - 450 eau désaérée calme	+ 1025 à + 925	- 100 à - 500 (Fer à béton)	Acier dans du ciment
Acier inox (type 304)	- 50 à - 100 -450 à - 550 alliage actif			
Argent	- 100 à - 150			
Plomb	- 200 à - 250		- 200	Ferrosilicium
Cuivre	- 300 à - 375		- 200 à - 400	Cuivre
Laiton	- 300 à - 400	+ 725 à + 625	- 400 à - 500	Plomb
Cuproaluminium	- 350 à - 450		- 200 à - 500	Acier rouillé
Fonte au Nickel	- 420 à - 450		- 400 à - 500	Fonte
Acier peu allié	- 580 à - 620	445 à 405	- 400	Acier dans le sable Acier doux en milieu aéré
Acier doux	- 600 à - 700	425 à 325	- 650	En terrain moyen
			- 800	Dans l'argile en milieu désaéré
Aluminium et alliages	- 750 à - 1000	- 375 à + 25	- 1050	Aluminium
Zinc	- 980 à - 1050			
Magnésium	- 1600 à - 1650	- 575 à - 625	- 1100 - 1400	Zinc Magnésium

## II.4. Protection cathodique

### II. 4.1. Principe de la protection cathodique

La protection cathodique des matériaux métalliques consiste à éviter ou réduire leur corrosion en milieux électrolytiques en provoquant l'abaissement de leur potentiel électrochimique jusqu'à un niveau suffisant, parfois limite par des effets secondaires nuisibles. Cet abaissement de potentiel est assuré par le couplage électrique de l'ouvrage à protéger avec des anodes sacrificielles constituées en matériau moins noble (système galvaniques) ou par l'injection d'un courant électrique continu (système à courant imposé) [9].

Elle est très économique pour les ouvrages en acier au carbone au contact de milieux moyennement corrosifs comme les eaux, les sols ou le béton. Ses applications industrielles principales concernent les canalisations enterrées ou immergées, les réservoirs enterrés, les intérieurs de capacités, en association avec une protection passive par systèmes de peintures ou revêtements spéciaux.

Les revêtements utilisés en association avec la protection cathodique doivent résister aux conditions physicochimiques créées à la surface du métal et ne pas constituer un obstacle à l'accès du courant de protection.

### II.4.2. Critère de protection cathodique : Le potentiel métal/solution

Reprenons le diagramme de Pourbaix *Figure II.2* (diagramme pH - tension métal/solution) établi pour le fer. Il apparaît dans ce diagramme un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique parce qu'il se trouve dans des conditions où seules des réactions cathodiques peuvent se développer. C'est le domaine de la protection cathodique. On admet que toute structure en acier enterrée dont le potentiel aura été rendu plus négatif que - 850 mV par rapport à l'électrode Cu/Cu SO<sub>4</sub>, sera protégée cathodiquement [8].

#### Remarque 1 :

On ne passe pas brutalement d'un état de corrosion à un état d'immunité par le simple franchissement de ce critère de protection de - 850 mV.

L'expérience prouve qu'à cette valeur de - 850 mV, le taux de corrosion est suffisamment faible pour que ce potentiel soit considéré comme frontière du domaine d'immunité (la concentration théorique d'ions métalliques dans l'eau est alors de 10<sup>-6</sup> mol/l ce qui correspond à 56 µg de fer par litre).

Pour un potentiel plus positif de 60 mV, à - 790 mV par rapport au Cu/Cu SO<sub>4</sub>, la concentration en fer est de 5,6 mg par litre. Bien que 100 fois plus grande qu'avec le critère choisi, elle n'en reste pas moins encore très réduite et conduit à une corrosion généralisée faible.

**Remarque 2**

On a admis comme critère de protection du fer dans l'eau et le sol, et pour des pH ne dépassant 10, la valeur de - 850 mV avec l'électrode Cu/Cu SO<sub>4</sub>. Ce critère doit être porté a - 950 mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfato réductrices. En pratique, pour des raisons de sécurité on cherchera plutôt à atteindre un seuil de protection fixé empiriquement pour l'acier à - 1000 mV par rapport à l'électrode Cu/Cu SO<sub>4</sub>.

**Remarque 3**

On constate dans le diagramme de Pourbaix pour les pH d'électrolytes très alcalins, l'existence d'un domaine de corrosion du fer pour des potentiels compris entre - 1100 et - 1300 mV. C'est le cas du fer dans le béton qui se corrode par formation de ferrates de calcium. Ces circonstances de potentiel seront donc à éviter dans un tel milieu.

**II.4.3. Critère de protection cathodique : le courant**

Dans certaines circonstances si la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant assurant la protection cathodique.

Des expériences établies par UHLIG donnent pour l'acier nu les critères suivants :

0,7 mA/m <sup>2</sup>	pour acier dans ciment
5 mA/m <sup>2</sup>	aciers dans sol anaérobie sans bactérie
35 mA/m <sup>2</sup>	dans sol aéré
60 mA/m <sup>2</sup>	dans eau douce agitée
100 mA/m <sup>2</sup>	dans eau de mer calme
à	
500 mA/m <sup>2</sup>	à plus dans l'eau de mer mise en mouvement.

Ces valeurs sont des moyennes et doivent toujours, au moment de projets, être ajustées en fonction des caractéristiques réelles du métal mais surtout de la nature de l'électrolyte [8].

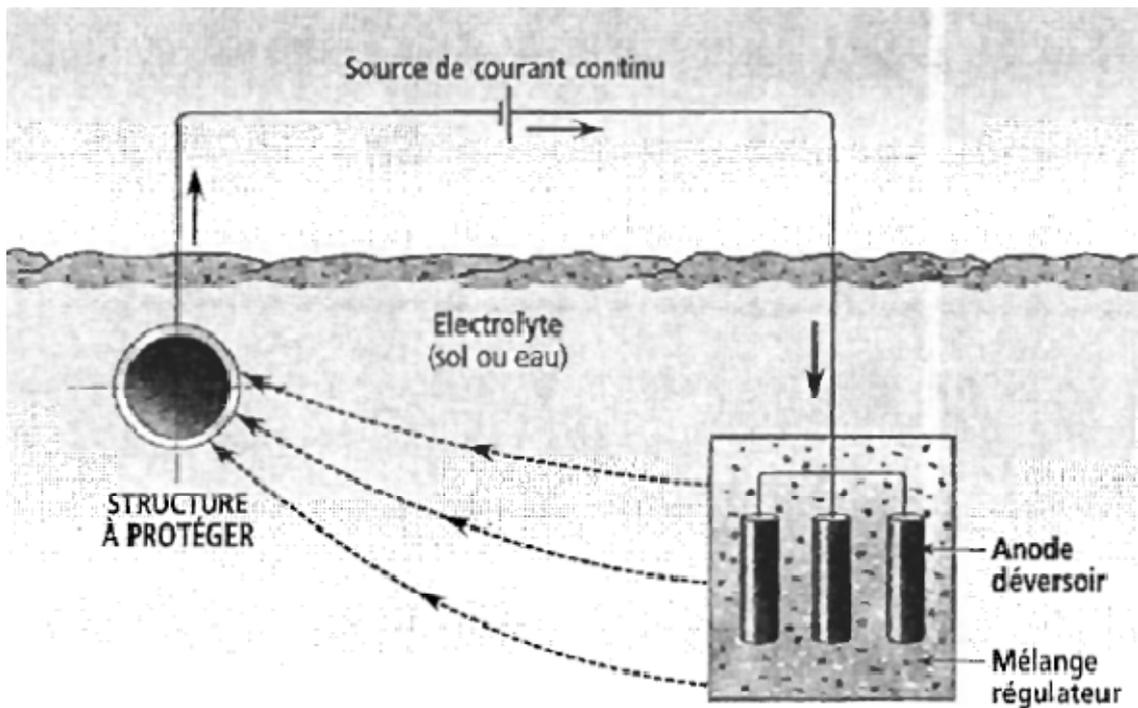
**II.4.4. Protection cathodique par courant imposé**

Implique l'utilisation d'un redresseur. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir régler la tension (ou le courant) en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces. En revanche, la protection par courant imposé nécessite une ligne électrique et demande un entretien continu. Pour protéger selon cette méthode de structure enterrées (conduites de gaz, câbles a haut tension), on utilise généralement des anodes en fer-silicium ou en graphite [12].

### II.4.4.1. Les composantes d'une installation de soutirage de courant électrique

La figure II.3 montre les différentes composantes d'une installation de soutirage de courant électrique

- une source d'énergie
- un déversoir anodique
- des câbles de liaison
- un appareillage électrique auxiliaire



*La figure II.3. Montre les différentes composantes d'une installation de soutirage de courant électrique [12].*

### II.4.4.2. Domaines d'application

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois qu'on a besoin d'une intensité de protection importante ou que la portée demandée est élevée ; c'est le cas pour

- ✓ les conduites enterrées ou immergées revêtues ou non,
- ✓ les casings de forage,
- ✓ les structures marines importantes (quais métalliques, plates formes pétrolières, coques de navires),
- ✓ les réservoirs de stockage de grandes dimensions,
- ✓ les ouvrages concentrés (station de pompage ou de compression, terminaux...),
- ✓ à l'intérieur des capacités d'eau douce,
- ✓ les boîtes à eau d'échangeurs thermiques [13].

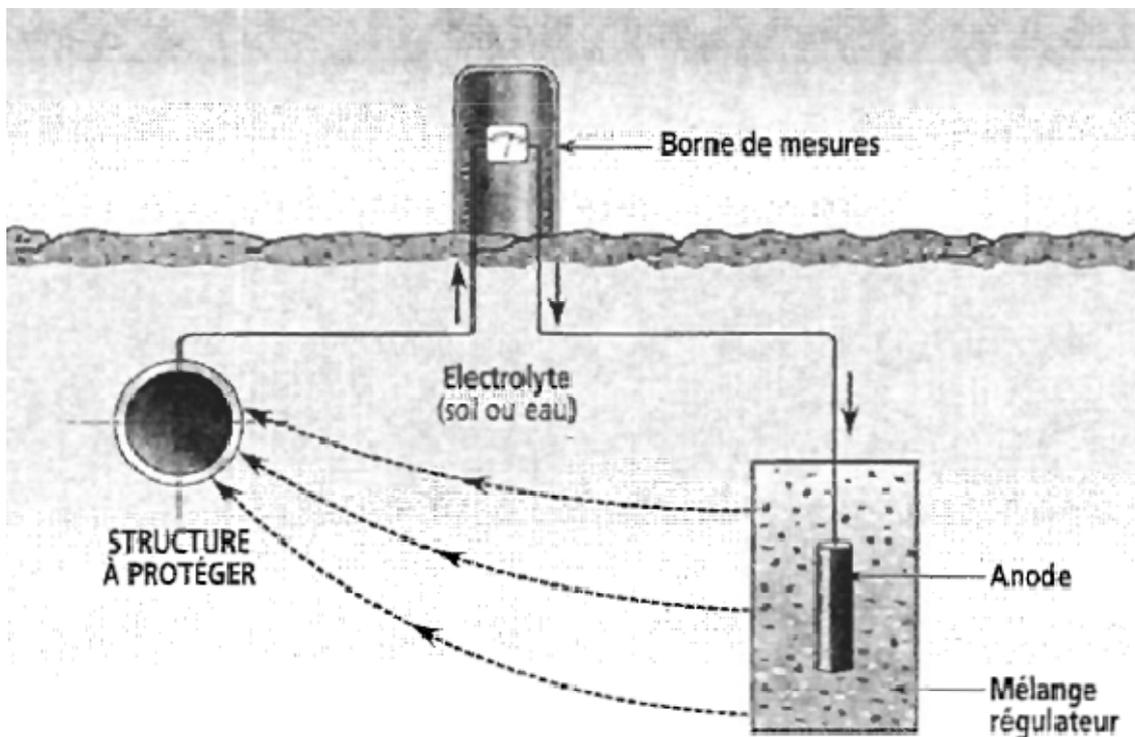
## II.4.5. Protection cathodique par anodes sacrificielles

La protection cathodique par anodes sacrificielles a pour but de créer une pile à l'aide de deux matériaux différents: l'acier de la surface à protéger (cathode) et un métal moins électropositif qui va constituer l'anode [12].

Ces anodes doivent être choisies de telle sorte que leur potentiel soit le plus électronégatif, le plus stable possible, leur rendement le plus élevé. Leur durée de vie doit être la plus longue possible [13].

Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution et permet de porter la surface à protéger au potentiel de non corrosion de l'acier

### II.4.5.1. Les composantes d'une installation de la protection par anode réactive



*La figure II.4. Montre les différentes composantes d'une installation de la protection par anode réactive [12].*

Les métaux les plus électronégatifs que le fer qui peuvent constituer une anode sont, par ordre de potentiel décroissant pris par rapport au fer (+ 0,440V) à débit nul dans l'eau de mer :

Les potentiels par rapport à l'électrode d' $H_2$

- ✓ le magnésium: -1,2V
- ✓ alliage d'aluminium: -0,9V
- ✓ le zinc: -0,4 V

### **II.4.5.2. Domaines de réalisation de la protection cathodique par anodes sacrificielles**

Parmi les applications classiques de la protection cathodique par anodes sacrificielles on peut citer

- les ouvrages immergés: tel que les plates-formes de forage ou de production, les sea-lines,
- certaines capacités enterrées: les cuves d'hydrocarbures des stations-service, les citernes à fioul domestiques,
- les conduites dont la nature du revêtement est compatible avec ce moyen de protection,
- le complément à d'autres dispositifs de protection: sur circuit de mise à la terre de vannes, à l'intérieur de l'espace annulaire entre tube et gaine,
- la protection externe et interne des réservoirs métalliques de stockage [13].

### **II.5. Les revêtements associés à la protection cathodique**

Les revêtements concernés peuvent répondre à l'un des objectifs suivants :

- protection passive contre la corrosion secondée par une protection active (Cathodique) qui a pour objet d'empêcher la corrosion aux zones où le revêtement endommagé laisse le métal exposé à l'électrolyte agressif ;
- protection complémentaire à la protection cathodique considérée comme le système de protection principale) afin de remplir l'un des rôles suivants :
  - ❖ limiter la consommation de courant,
  - ❖ assurer une polarisation plus rapide,
  - ❖ assurer une portée de la protection cathodique dans des zones à géométrie complexe,
  - ❖ réduire le cout global de la protection [9].

#### **II.5.1. Protection par revêtement métallique**

Dans l'industrie du transport des hydrocarbures par canalisation ce type de protection passive n'est pas très souvent utilisé. On distingue deux types de revêtement métallique qui sont le revêtement métallique anodique et le revêtement métallique cathodique, suivant la place relative qu'occupe dans la classification électrochimique le métal qui constitue le revêtement et le métal à protéger. Ainsi dans le cas de l'acier (fer) les revêtements à base de zinc, d'aluminium sont des revêtements métalliques anodiques et ceux à base de plomb, de cuivre, d'étain, de nickel, d'or constituent des revêtements métalliques cathodiques. Pour la réalisation de cette protection il existe plusieurs procédés dont :

- Immersion dans un bain fondu : le métal à protéger est immergé dans un bain chaud du métal protecteur
- Métallisation au pistolet : le métal fondu est projeté en fine gouttelette sur la structure à protéger.

Avant de passer à la partie suivante, il est important de noter que la protection métallique cathodique doit être effectuée avec beaucoup de précision, et prudence, car il suffit d'une seule faille pour que le métal qui était censé être protégé se dégrade au profit du métal protecteur [14].

### **II.5.2. Protection par revêtement organique (non métallique)**

C'est le mode de protection passive appliqué sur les canalisations de transport de produits pétroliers et gaziers. Il est important de savoir que l'efficacité de ce type de revêtement repose sur l'absence de défaut, mais en pratique cela est quasi impossible. L'on exige d'un revêtement les caractéristiques suivantes :

- Une résistance d'isolement élevée pour présenter sous l'épaisseur d'application une résistance électrique convenable.
- Une excellente adhérence avec le métal, pour éviter toute propagation d'un défaut de continuité accidentel.
- Une étanchéité, continuité et homogénéité satisfaisante, pour ne pas être envahie par le milieu environnant.
- Présenter une résistance assez élevée aux agents biologiques et aux produits transportés [14].

#### **II.5.2.1. Revêtement en bitume**

Il est utilisé pour la protection des conduites en acier et en fonte. En général le revêtement en bitume a une épaisseur de 5 mm, grâce à sa plasticité il permet de réduire considérablement les risques d'endommagement mécanique provoqué lors de la pose et du transport des tubes.

On en distingue trois types :

- Les thermoplastiques : polyéthylènes, polypropylène, polyvinyle Chloré (PVC)
- Les thermodurcissables : polyester, époxy
- Les caoutchoucs : naturels et synthétiques

Pour ce type de revêtement on utilise une épaisseur très faible qui varie entre 100 et 500 microns.

Les procédés de réalisation sont nombreux à savoir celui à la poudre, au pistolet et par immersion. Mais c'est celui à la poudre qui reste le plus répandu car il suffit de plonger le métal dans un lit de poudre agité et la poudre se dépose sur le métal [14].

#### **II.5.2.2. Revêtement par peinture**

En ce qui concerne ce type de revêtement on utilise en général une peinture.

Primaire, puis une autre secondaire ayant un rôle beaucoup plus esthétique que protecteur. Ce type de revêtement organique protège le métal par plusieurs mécanismes :

- Effet barrière : comme tous les autres types de revêtements, la couche de peinture forme une barrière entre le substrat métallique et le milieu ambiant. Il protège donc le métal dans la mesure de l'imperméabilité à l'eau et aux gaz.

- Inhibition de réaction électrochimique : les additifs (pigments ou colorations) qui se trouvent dans la peinture ( $Pb_3O_4$ ) jouent un rôle d'inhibiteur, donc il conduit le métal dans un état de passivation.
- Effet électrochimique : certaines peintures sont composées de 90% de zinc (Zn), donc l'effet de protection [14].

## II.6. Adjonction d'inhibiteurs :

Les eaux utilisées pour le refroidissement d'infrastructures sont le plus souvent des eaux de surface ayant subi un traitement de clarification. Dans le cas des circuits semi-ouverts qui sont les plus fréquents, ces eaux sont aérées et généralement à l'équilibre avec le gaz carbonique. Le flux thermique étant évacué par évaporation au niveau de réfrigérants atmosphériques, ces eaux deviennent concentrées en sels, ce qui augmente bien souvent leur corrosivité. Pour protéger l'intégrité des circuits, il est donc nécessaire d'avoir recours à des traitements à base d'inhibiteurs de corrosion (complétés par des inhibiteurs d'entartrage généralement). Pour les circuits fermés, des traitements complémentaires d'adoucissement ou de déminéralisation sont parfois pratiqués.

On classe les inhibiteurs en trois familles distinctes, selon le mécanisme mis en jeu :

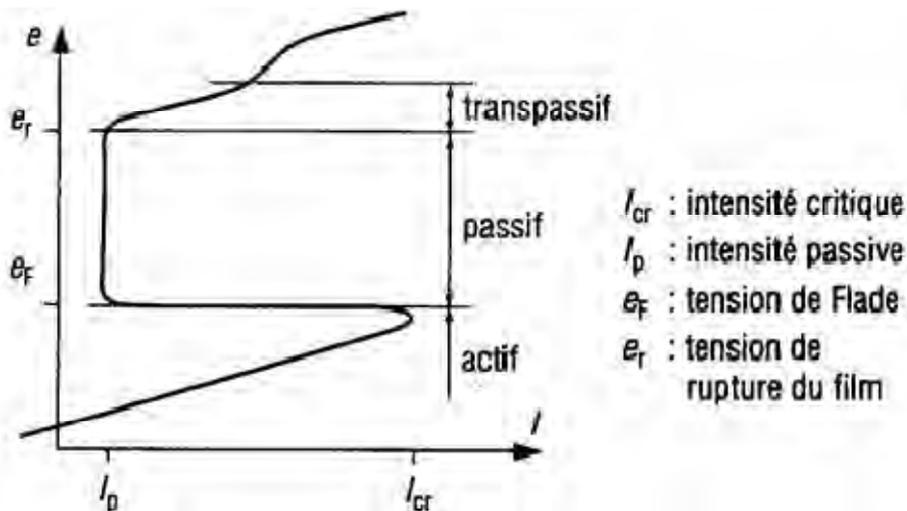
- 1) **les inhibiteurs anodiques**, qui bloquent la réaction d'oxydation du fer. Ce sont généralement les plus efficaces sous réserve qu'ils soient suffisamment dosés : si toutes les zones anodiques ne sont pas maîtrisées, une corrosion intense peut se développer sur la surface non ou mal inhibée, du fait du couplage galvanique avec la zone cathodique de grande surface ; c'est pour cette raison qu'ils sont utilisés en association avec des inhibiteurs de type cathodique.
- 2) **les inhibiteurs cathodiques** qui limitent la réaction de réduction, soit de l'oxygène en milieu aéré, soit des ions  $H^+$  en milieu désaéré. Ce type d'inhibiteurs ne présente pas de risque de corrosion localisée, car en cas de surdosage, le film se forme par précipitation de l'inhibiteur sous forme de sel insoluble, avec le calcium par exemple.  
L'action de ces inhibiteurs vis-à-vis de la corrosion localisée est moins connue ; ils sont généralement moins efficaces que les précédents. Cependant, en précipitant rapidement au niveau des cathodes, les inhibiteurs à base de sel de zinc contrôlent efficacement l'amorçage des piqûres de l'acier.

### III. Les aciers inoxydables austénitiques

#### III.1 Généralités

Les aciers inoxydables ont commencé à être développés industriellement au début du XXIème siècle. A partir de 1914, un acier contenant 14% de chrome s'est répandu dans l'industrie de la coutellerie [15], son inoxydabilité ayant été découverte par Brearly lors de travaux sur des alliages ferritiques fer-chrome pour canons de fusils. Les aciers inoxydables ont très vite trouvé de nombreuses applications, du fait de leur résistance à la corrosion tout d'abord, mais aussi du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques.

Un acier est défini comme inoxydable dès lors que sa teneur en chrome dépasse 13% [16]. Cette « inoxydabilité », qui caractérise une bonne résistance à la corrosion par l'oxygène, résulte de la formation d'un film protecteur passivant, par oxydation du chrome. Ce film a une épaisseur de 1 à 10 nm. En milieu air humide, il est constitué d'un oxyde de type  $[Fe, Cr_2 O_3-2]$ . Sur la **Figure III-1**, la courbe de polarisation d'un acier inoxydable est schématisée.



**Figure III-1** : Courbe schématique de polarisation d'un acier inoxydable [16]

Le film protecteur peut se rompre à partir d'une tension de rupture  $e_r$ , le métal sera alors oxydé jusqu'à ce que ce film se reforme. Les paramètres gouvernant cette oxydation sont d'une part le pH du milieu agressif environnant et la teneur en chrome du matériau, qui définiront le type de corrosion possible, d'autre part la teneur en oxygène et la température du milieu agressif environnant, qui rendront effectifs ou non l'oxydation / corrosion.

#### Différents cas de corrosion peuvent apparaître :

- corrosion par piqûres, en milieu chloré, surtout en présence d'inclusions de sulfure de manganèse (MnS),
- corrosion caverneuse,

- corrosion inter-granulaire, liée à l'appauvrissement en chrome du voisinage des joints de grains, dû à la précipitation de carbures de chrome  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  aux joints de grains entre 500 et 800°C environ,

- corrosion sous contrainte,
- fatigue-corrosion.
- corrosion sous contrainte,
- fatigue-corrosion.

Il existe plusieurs familles d'aciers inoxydables ; les quatre principales sont :

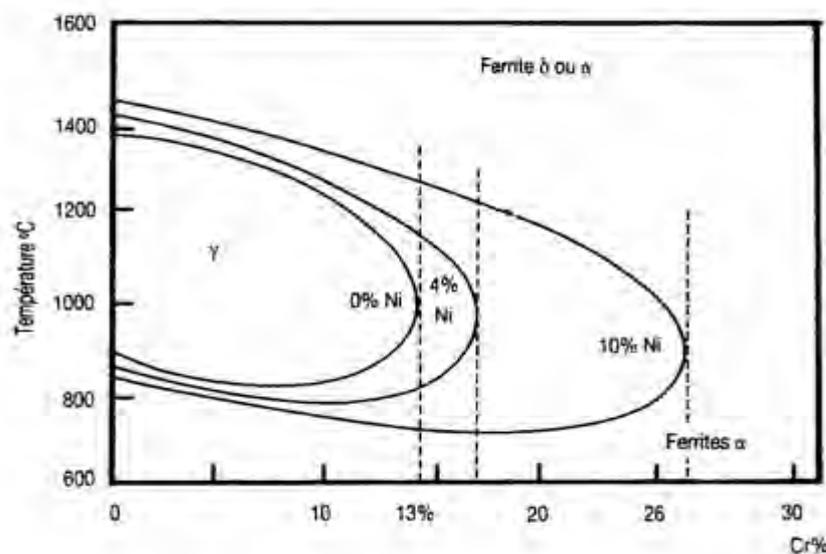
- les aciers inoxydables austénitiques (amagnétiques, de structure Cubique à Faces Centrées),

- les aciers inoxydables martensitiques (magnétiques),
- les aciers inoxydables ferritiques (magnétiques, de structure Cubique Centrée),
- les aciers inoxydables austéno-ferritiques (phase austénitique amagnétique CFC, et phase ferritiques magnétique CC).

D'autres structures, martensito-ferritiques, martensitiques ou austénitiques à phases durcissant, sont plus rarement utilisées. La distinction entre aciers inoxydables et alliages inoxydables n'est pas toujours bien définie. Lacombe et al [17]. Proposent d'appeler acier inoxydable tout alliage inoxydable dont la teneur en fer reste supérieure à chacun des éléments d'addition, même si elle est inférieure à 50% (alliages inoxydables base fer).

La structure de l'acier dépend de sa composition chimique. Certains éléments sont dits gamma gènes, ils élargissent le domaine austénitique  $\gamma$  ; d'autres sont dits alpha-gène, ils réduisent ce domaine au profit de la ferrite  $\alpha$ . Le nickel, le manganèse, le carbone et l'azote sont les principaux éléments gamma gènes ; le chrome, le silicium et le molybdène sont les principaux éléments alpha-gène.

L'étendue du domaine  $\gamma$  des alliages ternaires Fe-Cr-Ni en fonction des teneurs respectives en chrome et en nickel est présentée **Figure III-2**.

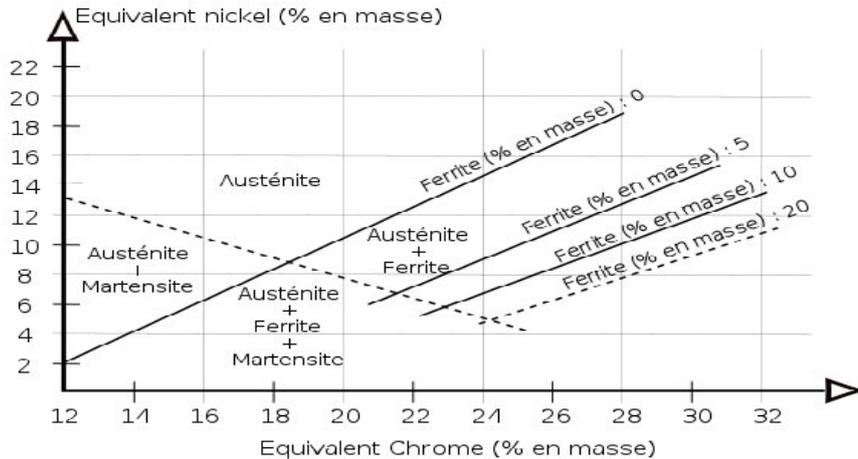


**Figure III-2** : Influence du nickel sur l'extension de la boucle  $\gamma$  des alliages ternaires Fe-Cr-Ni [17].

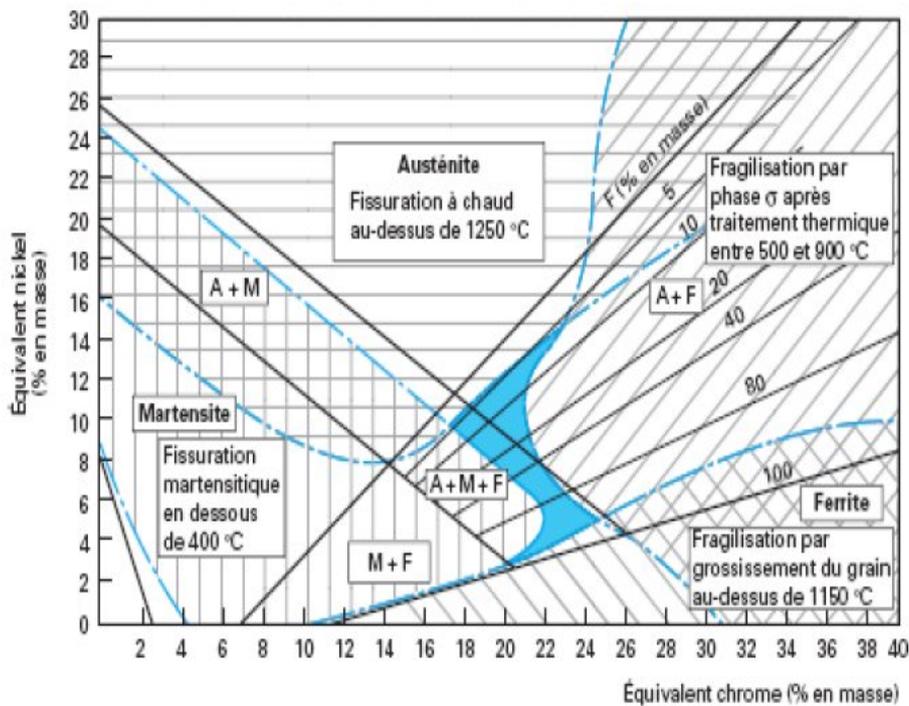
Les pouvoirs  $\alpha$ -gènes et  $\gamma$ -gènes des différents éléments peuvent être évalués de manière empirique, et des diagrammes comme celui de Pryce et Andrews (**Figure III.3 (a)**) [18], ou celui de Schäffeler [19] pour les soudures, permettent d'évaluer a priori les proportions des phases  $\alpha$  et  $\gamma$  de l'acier, à partir de la donnée des teneurs en chrome et en nickel équivalentes :

$$(\text{Ni})_{\text{éq}} = (\% \text{Ni}) + 0,5 (\% \text{Mn}) + 21 (\% \text{C}) + 11,5 (\% \text{N})$$

$$(\text{Cr})_{\text{éq}} = (\% \text{Cr}) + 3 (\% \text{Si}) + (\% \text{Mo})$$



(a) Pryce et Andrews [20].



(b) Diagramme Schaeffler [21].

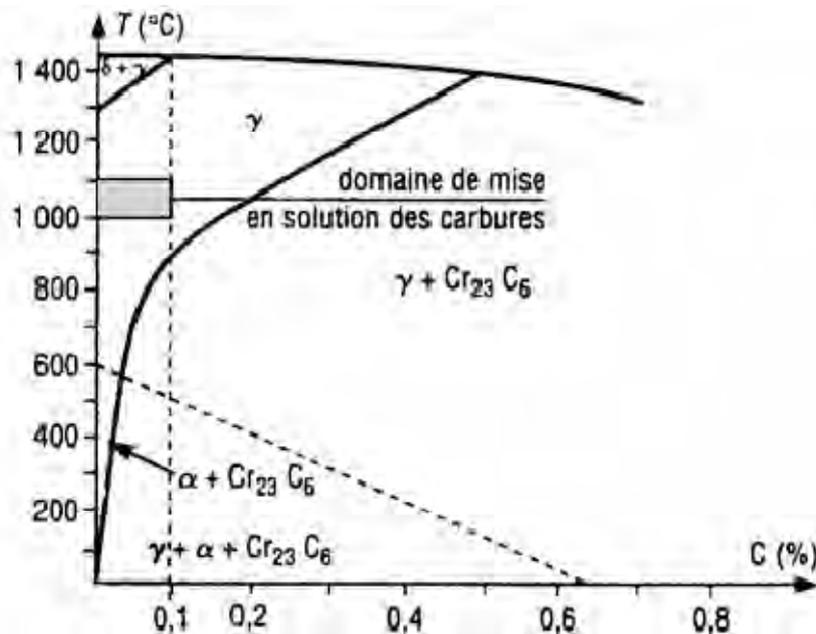
**Figure III-3** : Diagrammes de phase en Cr et Ni équivalents, (a) et pour les soudures (b) : prévision de la structure des aciers inoxydables

### III.2 Elaboration :

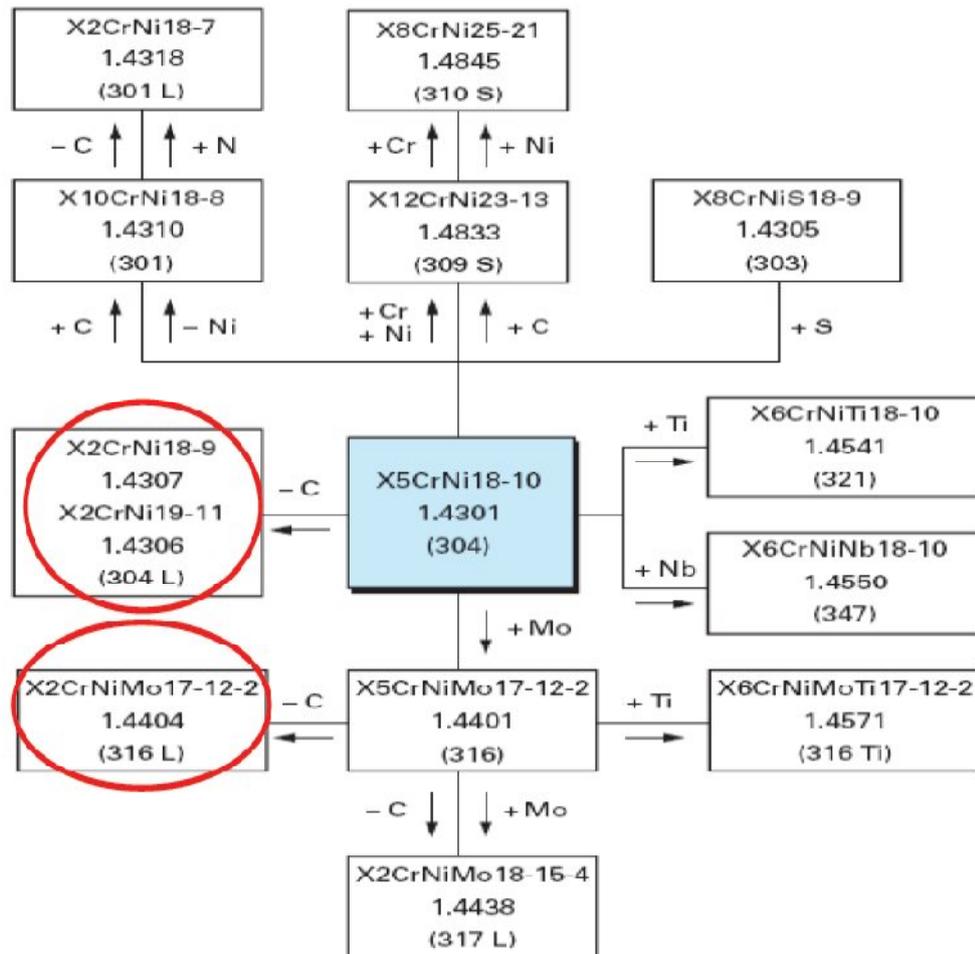
La famille des aciers inoxydables austénitiques est la plus employée des 4 principales familles d'aciers inoxydables. Les aciers inoxydables austénitiques ont une bonne résistance à la corrosion, de bonnes propriétés mécaniques, et une bonne formabilité. De structure CFC, ils ne présentent pas de transition fragile/ductile et peuvent donc être utilisés à basse température (pour le transport de gaz liquéfiés par exemple), tandis que leur résistance à la corrosion (dont l'oxydation) permet leur utilisation à haute température.

La **Figure III.4** présente le diagramme de refroidissement d'un acier à 18% de chrome et 9% de nickel.

La **figure III.5** présente les aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304.



**Figure III-4** : Constitution des aciers inoxydables austénitiques de type 18-9 à l'équilibre [16].



*Figure III.5 : Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304[21].*

### III.3 Influence des éléments d'alliage [20,21] :

#### ➤ Le Chrome :

C'est un élément stabilisateur de fer ( $\alpha$ ). Il est la cause de la passivation de l'acier et constitue, et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique), au delà de 12%, l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables.

#### ➤ Le molybdène :

C'est un élément formateur de fer ( $\alpha$ ). 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 du film passif et la résistance mécanique à chaud. L'alliage contenant 2 à 5% de molybdène, exposé à des températures de 500 à 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures manifeste la formation de différents composés intermétalliques (altération de la résistance à la corrosion ainsi que les caractéristiques mécaniques).

➤ **Le silicium :**

C'est un élément également formateur de fer ( $\alpha$ ). Il améliore les propriétés d'emploi à haute température (la résistance à l'oxydation à chaud) mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. A teneurs élevées et dans certaines conditions, il augmente la résistance à la corrosion par exemple en milieux concentrés d'acide nitrique. Il possède un effet sigma gène.

➤ **Le vanadium :**

Formateur de fer ( $\alpha$ ), intervient qu'en faible quantité dans les aciers martensitiques au chrome par formation de carbures pour rendre des aciers insensibles à la surchauffe. De plus il élève la résistance mécanique à chaud.

➤ **Le titane :**

C'est un formateur de ferrite. Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former un carbure de titane et avec l'azote pour former un nitrure de titane dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion inter granulaire.

➤ **Le nickel :**

C'est un élément stabilisateur du fer ( $\gamma$ ). Il élargit en effet le domaine d'existence de l'austénite en fonction de sa teneur jusqu'aux températures inférieures à 20°C. Il est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliage des aciers inoxydables austénitiques. Le Ni améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension, et favorise la mise en œuvre par déformation plastique.

➤ **Le manganèse :**

Il stabilise le fer ( $\gamma$ ) et n'a pas d'influence reconnue sur la résistance à la corrosion, classé comme élément gamma gène mais il joue toutefois un rôle alphasène pour des teneurs supérieures à 7%.

➤ **Le carbone :**

Il favorise le fer ( $\gamma$ ). C'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers. Il élargit fortement le domaine austénitique. Son effet aux basses teneurs est d'environ 30 fois celui du nickel. Pour des raisons de corrosion chimique, la teneur en C est dans la plupart des cas maintenue très basse. Il provoque la formation de carbures de chrome Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> en diminuant la résistance à la corrosion inter granulaire.

➤ **Le soufre :**

Il améliore l'usinabilité par enlèvement de copeaux. L'augmentation de la teneur en S conduit cependant à remettre en cause la résistance à la corrosion ce qui est à considérer lors du choix des aciers dans certaines conditions de sollicitations.

### III. 4 Propriétés mécaniques et physique des aciers inoxydables

Les propriétés mécaniques et physiques des différentes familles d'acier inoxydable se trouvent dans le tableau suivant :

*Tableau III. 1 : Propriétés mécaniques et physique des aciers inoxydables*

Type d'acier Inoxydable	Limite d'élasticité Rp0.2 (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la rupture Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Allongement à la rupture A (%)
Ferritiques	370	500	26
Martensitique			
Austénitique	270	620	56
Duplex	620	840	30

### III.5. Transformation martensitique des aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques ont une structure métastable à température ambiante et peuvent subir une transformation martensitique.

La martensite est une phase obtenue à partir de l'austénite par transformation displacive sans diffusion. Au cours de la transformation martensitique les atomes de fer se déplacent d'une petite distance, inférieure à la distance interatomique, vers des positions voisines de cristallographie plus stables à basse température, sans changement de la composition chimique initiale.

La transformation martensitique de l'austénite peut se faire par refroidissement ou par déformation plastique. La martensite rend difficile la déformation plastique du matériau et influence sa mise en œuvre à froid (emboutissage, formage) [22].

#### III.5.1 Transformation martensitique par déformation

La transformation de l'austénite en martensite par déformation plastique, se produit dans les aciers inoxydables austénitiques pour lesquels l'énergie de faute d'empilement est faible, il se forme de la martensite  $\alpha'$  de structure cubique centrée, et/ou formation de martensite  $\varepsilon$  de structure hexagonale compacte [23]. Cette transformation se fait suivant l'un des trois schémas suivants :



Dans ce dernier cas, la martensite  $\varepsilon$  (amagnétique) apparaît dans les bandes de glissement, puis à partir d'un écrouissage suffisant, la martensite  $\alpha'$  se forme à l'intersection de deux bandes de glissement (*Figure III.6*).



**Figure III.6 :** Formation de la martensite  $\epsilon$  dans les bandes de glissements et formation de la martensite  $\alpha'$  (zones claires) aux intersections des bandes de glissements dans un acier 304L [23].

La transformation martensitique de l'austénite par déformation est souvent caractérisée par un critère de température  $Md_{30}$  : température pour laquelle une déformation vraie de 30% provoque la formation de 50% de martensite en volume. D'après Angel cite par [7], la température  $Md_{30}$  peut être estimée par la formule suivante :

$$Md_{30} = 413 - 462(\%C + \%N) - 9.2 (\%Si) - 8.1 (\%Mn) - 13.7 (\%Cr) - 9.5 (\%Ni) - 18.5 (\%Mo)$$

Avec  $Md_{30}$  en °C.

Le volume de martensite formée dépend de l'amplitude de la déformation plastique, de la température, de la taille des grains et de la composition chimique du matériau [23].

### III.5.2 Transformation martensitique par refroidissement à basse température

Par refroidissement rapide depuis 1050-1100°C, la transformation de l'austénite (structure cubique à faces centrées) en martensite à (structure cubique centrée) débute à partir de la température  $M_s$ . Les éléments en solutions solides dans l'austénite abaissent la température  $M_s$ . Plusieurs formules empiriques décrivent l'effet de la composition chimique (% masse) sur la température  $M_s$ , est définie par :

$$M_s (\text{°C}) = 1302 - 42(\%Cr) - 61(\%Ni) - 33(\%Mn) - 28(\%Si) - 1667(\%C + \%N)$$

Cette formule empirique est valable pour les plages de composition suivantes :

$$10 < Cr < 18\% ; 6 < Ni < 12\% ; 0,6 < Mn < 5\% ; 0,3 < Si < 2,69\% ; 0,004 < C < 0,12\% ; 0,01 < N < 0,06\% [17].$$

### III.6 Domaines d'application des aciers inoxydables

La famille des aciers inoxydables austénitiques comprend un certain nombre de nuances dont les différences de composition chimique sont destinées à résoudre des problèmes particuliers. Le facteur déterminant le choix d'un acier inoxydable austénitique est en générale la résistance à la corrosion [17].

Les aciers inoxydables austénitiques sont employés dans les industries chimiques (minérale et organique) et pétrochimiques. Les qualités d'hygiène, de robustesse et d'instabilité ont imposé l'emploi des aciers inoxydables austénitiques dans les équipements destinés à l'hôtellerie, aux hôpitaux et aux cabinets médicaux.

Et vu leur bonne biocompatibilité et bio-fonctionnalité certaines nuances d'aciers inoxydables austénitiques (316L) sont utilisées dans le domaine d'implantologie par exemple en orthopédie pour la fabrication des prothèses de hanche, les prothèses de genou, les vis et les plaques de fixations.

Le comportement électrochimique d'un acier inoxydable comme le 316L dépend au premier ordre de sa composition chimique superficielle, de la nature et de la localisation des inclusions à la surface, assez peu de la taille des grains, et surtout de la solution dans laquelle il est immergé (pH, titre, nature des ions : agressifs  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ou inhibiteurs  $\text{MnO}_4^{2-}$ ) [24].

## **IV. Aciers au carbone**

### **IV.1. Définition :**

On définit par aciers au carbone, des aciers de haute qualité élaborés avec un soin particulier, en général au four à arc et calmés au silicium dont la teneur en carbone peut aller de 0,05 à 1,3%. Caractérisés par une faible pénétration de trempe, ils peuvent être considérés comme les représentants classiques des aciers fins [25].

Les aciers au carbone représentent environ 90 % en volume de l'acier utilisé. Les aciers au carbone occupent une place privilégiée dans tous les secteurs industriels dans notre pays; ils sont souvent destinés à la production, au transport et stockage des produits pétroliers et de gaz naturel, les ponts, les conteneurs, des poutres, les tôles de Châssis de voiture, des bateaux etc. sont des exemples d'application. Vu ces applications, les exigences principales aux aciers au carbone sont: résistance mécanique élevée, ductilité/ténacité élevée, et soudabilité.

### **IV.2. Les sous-familles des aciers au carbone :**

Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles: les aciers doux, les aciers à moyenne teneur en carbone et les aciers à forte teneur en carbone.

#### **IV.2.1. Les aciers doux :**

Dans tous les aciers, ce sont les aciers à faible teneur en carbone qui sont produits en plus grand nombre. Généralement, ces aciers contiennent moins de 0,25 %m de carbone environ, sont insensibles aux traitements thermiques destinés à former de la martensite et peuvent être renforcés par écrouissage [1].

L'acier à basse teneur en carbone est celui qui est le plus facile à souder puisque la chaleur de soudage ne modifie pas de façon significative les propriétés de l'acier de cette catégorie.

#### **IV.2.2. Les aciers à moyenne teneur en carbone :**

La concentration en carbone de ces aciers varie de 0,25%<sub>m</sub> à 0,60%<sub>m</sub>. Leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu, auquel cas ils microstructure de martensite revenue [1].

L'acier à moyenne teneur en carbone est sensible à la fissuration sous cordon. Il est presque toujours possible d'éviter ces risques en prenant certaines précautions.

#### **IV.2.3. Les aciers à forte teneur en carbone :**

Avec une teneur en carbone habituellement comprise entre 0,60%<sub>m</sub> et 1,4%<sub>m</sub>, les aciers à forte teneur en carbone sont à la fois plus dure, les résistants et les moins ductiles des aciers au carbone. Puisqu'ils sont presque toujours durcis et revenus, ils résistent particulièrement bien à l'usure et supportent bien les pièces à bord tranchant [1].

### IV.3. Diagramme fer – carbone :

Si l'on se limite aux états d'équilibre métastable, dans lesquels le carbone ne se présente jamais sous formes de graphite, les alliages fer-carbone sont représentés à la pression ordinaire par le diagramme d'équilibre de la figure (IV.1).

Ce diagramme est caractérisé essentiellement :

- En ce qui concerne la solidification, par l'existence de deux solutions solides distinctes, la solution solide et la solution solide (austénite), et d'un composé défini  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cémentite), donnant avec l'austénite un eutectique (ledeburite) ;
- En ce qui concerne les transformations à l'état solide, par la transformation au refroidissement, entre 1500 et 1400°C de la solution solide en solution solide (réaction péritectique et transformation polymorphique totale), puis la transformation entre 1140 et 700°C de la solution solide avec, selon la teneur en carbone, apparition de  $\text{Fe}_3\text{C}$  ou d'une nouvelle solution solide  $\alpha$  (ferrite), et finalement formation, à partir de l'austénite résiduelle, d'un eutectoïde (perlite) de ces deux constituants

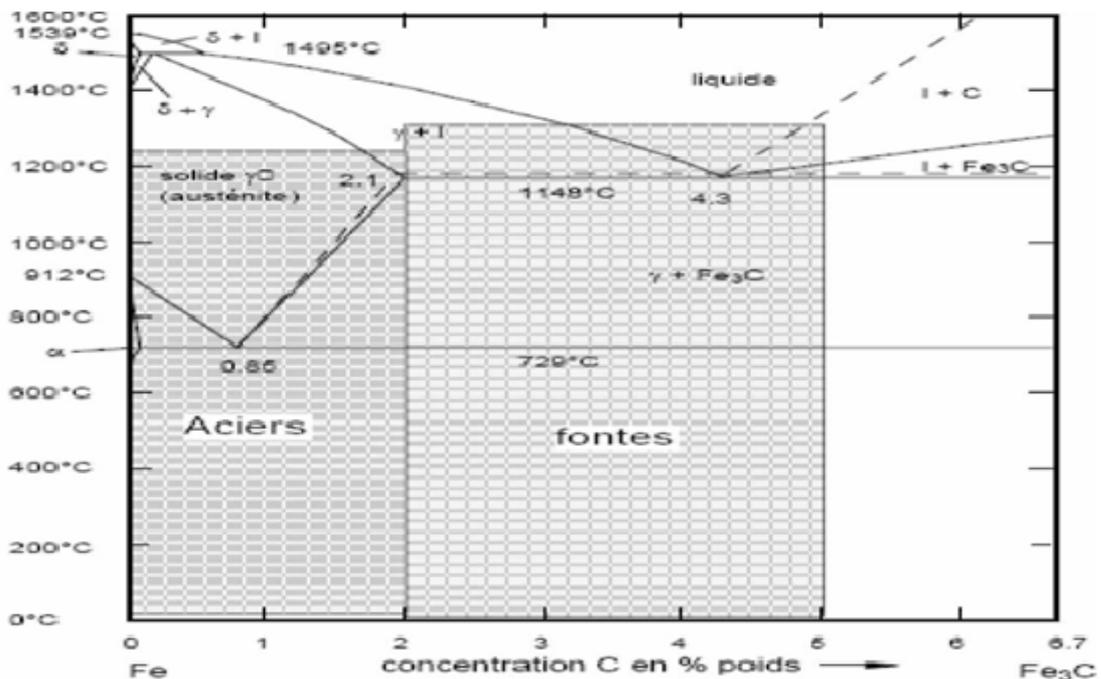


Figure (IV.1) : Diagramme de phase du système fer - carbone [26].

#### IV.4.Composition chimique effective :

En fait, en raison d'une part des additions d'affinage, d'autre part des impuretés contenues dans les matières utilisées, un acier au carbone contient presque toujours, en plus du fer et du carbone, les cinq éléments suivants :

- Silicium, provenant de la réduction de la silice au haut fourneau, ou des additions d'affinage ;
- Manganèse, provenant de la réduction des oxydes de manganèse au haut fourneau, ou des additions d'affinage ;
- Soufre, provenant du minerai ou du coke ;
- Phosphore, provenant du minerai et éventuellement du coke ;
- Cuivre, provenant de l'introduction de pièces en cuivre, ou en acier au cuivre, parmi les riblons utilisés dans le procédé par dilution –oxydation, ou exceptionnellement de la présence de cuivre dans le minerai (résidus de grillage des pyrites)

La proportion de ces éléments est très variable. Mais elle ne saurait pas atteindre des chiffres élevés sans que l'on sorte du domaine propre des aciers au carbone. Les normes françaises, par exemple, définissent ce domaine par les teneurs limites suivantes :

$$\text{Si} \leq 1 \% \quad \text{Mn} \leq 1, 2 \%$$

$$\text{S} \leq 0,10 \% \quad \text{P} \leq 0,12 \% \quad \text{S}+\text{P} \leq 0,2 \% \quad \text{Cu} \leq 0,3 \%$$

Ces normes limitent en outre comme suit les teneurs des autres éléments qui peuvent s'introduire dans les aciers par les riblons :

$\text{Ni} \leq 0,5 \% ; \text{W}, \text{Co}, \text{Ti}, \text{Al}, \text{chacun} \leq 0,3 \% ; \text{Cr} \leq 0,25 \% ; \text{V} \leq 0,05 \% , \text{ autres éléments, chacun} \leq 0,1 \%$ . Elles excluent la présence du bore [27].

Notre travail est divisé en deux parties :

- la première consiste à suivre l'efficacité de la protection cathodique ;
- la deuxième est consacrée à la caractérisation de l'état de corrosion et le milieu de travail réel des deux nuances d'acier **A106/B** et **A312TP304L** utilisés dans l'industrie pétrolière.

## **Partie I :**

### **V. Le contrôle de protection cathodique**

Le contrôle de l'efficacité de la protection contre la corrosion d'un ouvrage enterré consiste à vérifier, par des mesures appropriées de potentiel et de courant, que les critères de protection cathodique sont bien atteints en tous points de l'ouvrage. Mais ce contrôle doit s'attacher à vérifier aussi que la protection passive, telle qu'elle a été précédemment définie dans ses divers rôles, est toujours intacte. C'est pourquoi il sera nécessaire d'apprécier la valeur d'isolement apportée par le revêtement, comme il sera nécessaire de vérifier l'isolement par rapport à d'autres structures enterrées (conduites, fourreaux, tubages...), et l'efficacité des raccords isolants.

#### **V.1.Mesure de potentiel**

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinets de branchement d'abonné et parties aériennes) par les postes de détente et de comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite. Le nombre et les emplacements de ces points de mesures sont définis lors des études (*Figure V.1*). On prévoit en général au moins un point de mesure tous les 500 mètres en zone urbaine et tous les 2 à 4 km, selon les possibilités.



*Figure V.1. Les points de mesures.*

- ❖ La protection cathodique étant en service, on mesure le potentiel dit à courant établi, ou potentiel "ON", qui est le potentiel du métal sous application du courant de protection cathodique.
- ❖ A la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel à courant coupé, ou potentiel "OFF". Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques microsecondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans le sol.
- ❖ Un certain temps après la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel de polarisation du métal.

### V.1.1. Appareillage utilise

La figure V.2 donne l'appareillage utilisé sur le terrain pour inspecter l'état de protection. On vérifie ainsi si le potentiel est toujours inférieur à  $-850\text{mV}$  par rapport à l'électrode de référence.



(a)



(b)

*Figure V.2. (a) Multimètres pour mesure le potentiel, (b) Électrode de retirance  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .*

## V.2.Mesure de courant :

La mesure du courant circulant dans la conduite au niveau de la base peut être faite au niveau du poste de soutirage (*Figure V.3*) équipé d'un instrument de mesure de tension et de courant.



*Figure V.3. Redresseur.*

## V.3.Mesure sur les anodes réactives :

A part les connexions entre anodes et structure à protéger, aucun élément n'est susceptible de provoquer un arrêt de la protection. On peut se contenter de vérifier l'installation lors des mesures de potentiel deux fois par an.

### V.3.1.Inspection des anodes sacrificielles de l'intérieur des bacs d'eau

L'anode sacrificielle est contrôlée visuellement périodiquement et doit être remplacée lorsqu'elle est consommée (*Figure V.4*).



*Figure V.4. Anode réactive.*

## V.4.Mesure des isolements

Elles intéressent les joints isolants et les revêtements. Les uns et les autres nécessitent, en général, pour la détermination de leurs valeurs, des mesures complexes et délicates. Leur efficacité se traduit d'ailleurs directement par les potentiels obtenue

sur la structure et la connaissance de leur valeur numérique n'est pas indispensable pour le contrôle de la protection cathodique.

## **V.5.Périodicité des opérations de contrôle et d'entretien de protection cathodique.**

### **V.5.1.Operations systématiques et indispensables**

Elles peuvent être effectuées par un agent non spécialisé en protection cathodique mais connaissant le maniement d'un multimètre.

Tous les 8 à 10 jours environ.

Relève des indications des instruments de mesure inclus dans les appareillages, pour les soutirages :

- ✓ Tension de sortie
- ✓ débit de protection
- ✓ compteur secteur (consommation électrique)

Deux fois par an

- ✓ Mesure des potentiels sur l'ensemble de la structure, à l'aide d'un multimètre et d'une électrode impolarisable de référence (Cu/CuSO<sub>4</sub>).
- ✓ Mesure des potentiels produits par les anodes réactives et du débit de celles-ci

### **V.5.2.Operations souhaitables chaque semestre.**

Elles requièrent la présence d'agents électriciens spécialistes de la protection cathodique qui effectueront un entretien préventif des appareils de protection cathodique à savoir :

La visite complète de l'installation :

- ❖ Appareils
- ❖ Raccordement de câbles
- ❖ Anodes déversoir

Les mesures contrôlant la bonne utilisation de l'appareillage :

Pour les soutirages :

- ❖ Débit de protection
- ❖ Tension de sortie
- ❖ Consommation en énergie électrique calcule du rendement de l'appareil
- ❖ Abaissement de potentiel sur l'anode résistance de terre de l'anode
- ❖ Résistivité des terrains (éventuellement)

### **V.5.3.Operations nécessaires, non systématique.**

Elles ne peuvent être menées a bien que par un contrôle qualifie protection cathodique.

Elles peuvent concerner :

L'amélioration des potentiels par un nouveau réglage des appareils de protection, ou par l'adjonction de nouvelles installations

- ❖ Le contrôle et la mesure des joints isolants
- ❖ La mesure de la résistance d'un revêtement de conduite
- ❖ La détection de masse ou de mises à la terre intempestives
- ❖ Les mesures d'influences mutuelles entre structures protégées

## Partie II

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux à étudier et leurs milieux de travail réel ainsi que les techniques et les méthodes expérimentales nécessaires pour l'examen microscopique.

### V.6.Présentation des matériaux

Dans notre travail, nous avons considéré deux types d'acier :

- l'acier au carbone A106 grade B ;
- l'acier inoxydable austénitique A312TP 304L

#### V.6.1.Acier au carbone A106/B :

L'échantillon est découpé d'une conduite d'eau (*Figure V.5*) dont les paramètres dimensionnels sont :

- Diamètre intérieur de 2 pouces (5,08 cm) ;
- Épaisseur initiale de 3,91 mm ;
- Surépaisseur de corrosion 3mm.

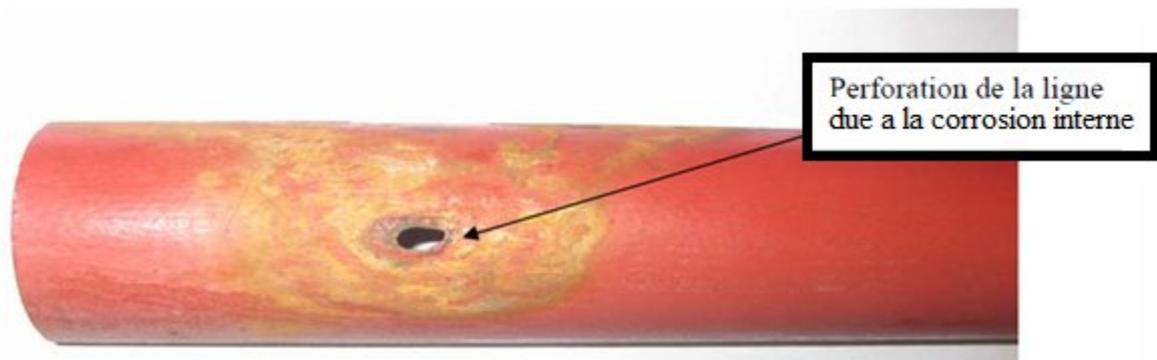
Le tableau V.1 donne la composition chimique de l'acier A106/B selon la norme ASTM.

**Tableau V.1 : Compositions en % de l'acier A106GradeB [28].**

Nuance	C	Mn	S	P	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	Max(a)		maxi	max	min	Max(b)	Max(b)	Max(b)	Max(b)	max(b)
B	0,30	0,27à 0,93	0,035	0,035	0,10	0,40	0,40	0,15	0,40	0,06

(a) Pour chaque réduction de 0,01 % en-dessous de la teneur maximale spécifiée en carbone, la teneur en manganèse peut être augmentée de 0,06 % au-dessus du maximum spécifié, sans pouvoir dépasser 1,35 %.

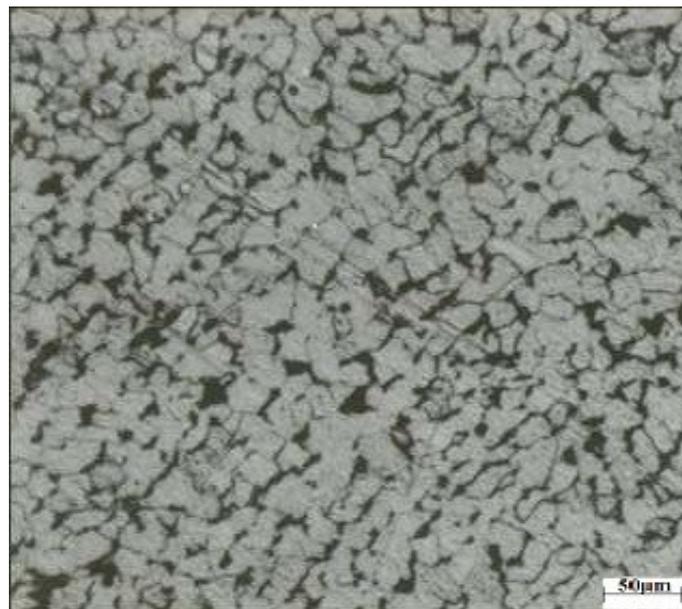
(b) La teneur de ces cinq éléments combinés ne doit pas dépasser 1 %.



*Figure V.5 : L'échantillon brut.*

### ➤ Structure de l'acier étudié

La microstructure de l'acier étudié observé par microscopie optique montre une structure ferrito-perlitique. Les grains de ferrite sont de forme cellulaire plus ou moins arrondie. Les grains perlitiques sont relativement plus fins et se développent préférentiellement aux joints de grains ferritiques. Ceci montre bien que l'acier a subi un traitement de normalisation (figure V.6).



*Figure V.6: Structure du métal de base Gx200.*

### V.6.2 Acier inoxydable 312TP404L :

L'échantillon est découpé d'une pipe de diamètre nominale de 6 pouces (152.4mm) et d'épaisseur 7,11mm représenté dans la *figure V.7* La composition chimique nominale de cet acier est donnée dans le tableau V.2.

*Tableau V.2 : Compositions en % de l'acier A312TP304L [28].*

Nuance	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni
	Max	max	max	max	min	Max	Max
304L	0,035	2	0,030	0,040	0,75	18,0-20,0	8,0-13.0

#### ➤ Fabrication

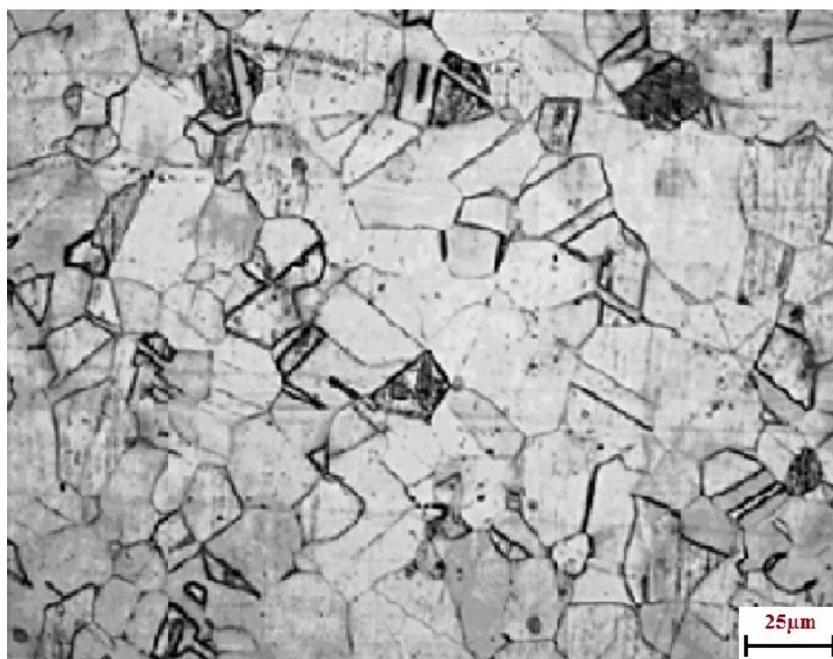
Les tubes sont fabriqués par un procédé de soudage automatique sans addition de métal d'apport et subissent un traitement thermique à 1040°C [29].



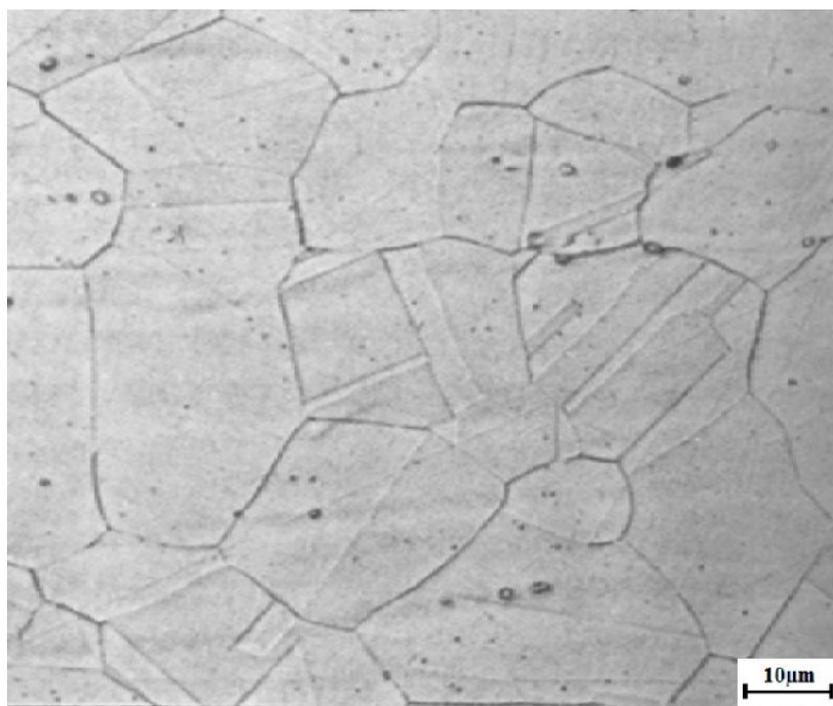
*Figure V.7: L'échantillon brut.*

#### ➤ Structure de l'acier étudié

Comme le montre les figures V.8 et V.9, la structure de cet acier est complètement austénitique car ne présentant pas d'îlots de ferrite résiduelle. La forme générale est du type cellulaire avec des macles caractéristiques de la structure c.f.c de l'austénite.



*Figure V. 8 : Structure du métal de base Gx200.*



*Figure V. 9: Structure du métal de base Gx500.*

## V.7. Milieu de travail réel :

### V.7.1 Acier au carbone A106/B :

Dans notre cas cet acier est utilisé dans le système fire-water (système anti- Incendie).

L'eau est dite « corrosive » quand elle réagit avec les surfaces et les matériaux métalliques et entraîne la dissolution de ces derniers.

La corrosivité de l'eau est également liée aux facteurs suivants : température, concentration totale de minéraux dissous, dureté calcique, alcalinité et pH.

### Analyse physico-chimique du l'eau :

Les éléments majeurs  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , ont été analysés au laboratoire et Les mesures du pH, la dureté totale et la conductivité électrique ont été réalisées au laboratoire du Sh-Bhp-billiton (Ohanet).

### Conductivité de l'eau et TDS

La mesure de conductivité de l'eau dépend d'une large variété de substances ou de matières inorganiques solides dissoutes dans les solutions d'eau. Les substances dissoutes communes sont le sodium, le chlorure, les sulfates, le calcium, le bicarbonate, les nitrates, les phosphates, le fer, et le magnésium. Tous ces matériaux à certaines concentrations ont la capacité de porter un courant électrique.

La conductivité ou la dissolution totale des matières solides (Total Dissolved Solids TDS) est définie comme la quantité de matières dissoutes dans l'eau, et dépend principalement de la solubilité des sédiments qui entrent en contact avec l'eau. Par exemple, de l'eau qui traverse du tartre et du gypse (minéral composé de sulfate hydraté de calcium) dissout le calcium, le carbonate, et le sulfate, l'eau devient par conséquent plus chargée et atteint un niveau élevé de matières solides dissoutes.

Une manière commode de mesurer le TDS est d'examiner la conductivité de l'échantillon.

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à faire passer un courant électrique d'un point A vers un point B. Cette traversée est affectée par la présence des matières solides dissoutes, car si le niveau du TDS monte, la conductivité augmentera également.

La conductivité d'une eau est généralement mesurée en micro-Siemens par cm ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), ou micromhos par centimètre (mhos/cm) approximativement la valeur en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspond à la salinité en mg/l.

On utilise également la résistivité inverse de la conductivité mesurée en ohms.cm :

Résistivité (ohms.cm) = 1 000 000 / conductivité (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De cette définition découle naturellement un principe simple. Plus une eau est dite pure plus son taux de conductivité sera bas. Une eau douce accusera généralement une conductivité basse et bien au contraire une eau dite dure affichera une conductivité élevée. L'eau pure est donc en réalité un isolant. Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'appareille portable (*Figure V. 10*) :



*Figure V.10 : Conductimètre.*

### ➤ L'oxygène dissous

Etant l'un des plus importants indicateurs de la pollution des eaux ; l'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau et il est exprimé mg/L ou en pourcentage de saturation. Il participe à la majorité des processus chimique et biologique en milieu aquatique.

La teneur moyenne dans l'eau de surface non polluée est de 8mg/l et ne dépasse guère 10mg/l.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'appareille qui est présenté dans la *Figure V. 11* :



*Figure V.11 : Dispositif de mesure de la concentration de l'oxygène dissout.*

### **V.7.2. Acier inoxydable A312TP304L :**

Cet acier est destiné à travailler à une température max de 150°C et une pression max de 25 bar [29]. Dans notre cas cet acier fonctionne à une température qui varie entre 60 et 65°C et à une pression de 20 Bar.

La conduite est alimentée d'eau qui provient d'une source dite (V216). Nous avons pris un échantillon et nous avons fait leurs analyses physico chimique.

### **V.8. Caractérisation et contrôle non destructif :**

Les essais non destructifs regroupent l'ensemble des techniques permettant de tester des matériaux et d'évaluer leurs aptitudes sans les détruire. De ce fait, ils ont une grande importance économique. Ils consistent à évaluer par une méthode physique (émission acoustique, ultrasons, ressuage, courants de Foucault, etc.) l'intégrité d'un matériau, à y détecter d'éventuels défauts et à diagnostiquer son état de santé, sans aucune détérioration.

#### **➤ Ressuage**

Le ressuage c'est le terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. Cette méthode est utilisée pour la détection de :

La discontinuité et des imperfections qui s'étendent sur la surface de la pièce.

- ✓ Les fissures de soudage.
- ✓ Les fissures de moulage, de fatigue.
- ✓ Les contractions.

La méthode est très simple de mise en œuvre, elle permet une localisation précise des défauts de surface et une appréciation de leur longueur.

#### **❖ Technique d'essai :**

##### **a-Nettoyage de la surface :**

Il est absolument essentiel que la surface de la pièce soit exempt de: poussière, de peinture, de graisse. Pour réaliser un nettoyage permettant d'éliminer toutes ces particules et graisses nous avons utilisé une projection de vapeur.

##### **b-Application de liquide pénétrant:**

Le liquide pénétrant est appliqué à la surface de l'objet par immersion ou par pulvérisation on utilise le kérosène par exemple.

##### **c- Retrait du liquide pénétrant en excédent**

Toute trace de liquide pénétrant doit être retirée de la surface de la pièce qui est ensuite séchée dans un générateur d'air chaud ou par un séchage normal dans l'air.

### **d-Application du révélateur :**

Le révélateur est appliqué sur la surface sèche. Il est constitué habituellement en une poudre finement divisée telle que du talc. Son but est de retirer le liquide pénétrant dans les défauts.

### **e-Inspection et interprétation :**

C'est l'étape la plus importante du processus entier le temps qui s'écoule entre l'opération et l'inspection peut varier entre quelques minutes et plusieurs heures.

## **V.9.Caractérisation structurale :**

L'examen micrographique ou métallographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques lors de l'observation au microscope optique.

### **V.9.1 Préparation micrographique des échantillons :**

Les échantillons doivent passer par des opérations connues et bien déterminées. Ainsi, ils seront prêts pour les analyses, et les rendront aisées. Aussi, l'exploitation des résultats dans le domaine de la corrosion sera facile et claire. Ces opérations sont comme suit :

#### **➤ Tronçonnage**

La caractérisation microscopique et de corrosion des dépôts a nécessité la réalisation de petits échantillons, d'environ 10 mm x 10 mm de surface, découpées dans les grandes plaques à l'aide d'une tronçonneuse (guillotine).

Pour cela la plaque est divisée en plusieurs échantillons. Quelques uns de ces échantillons seront soumis aux essais de corrosion en variant le paramètre « temps » d'immersion. Un seul échantillon sera conservé pour but de caractérisation et aussi de comparaison. Le dernier échantillon fera l'objet de l'essai de dureté.

#### **➤ Enrobage**

L'enrobage se fait pour faciliter le polissage et l'observation par le microscope ;

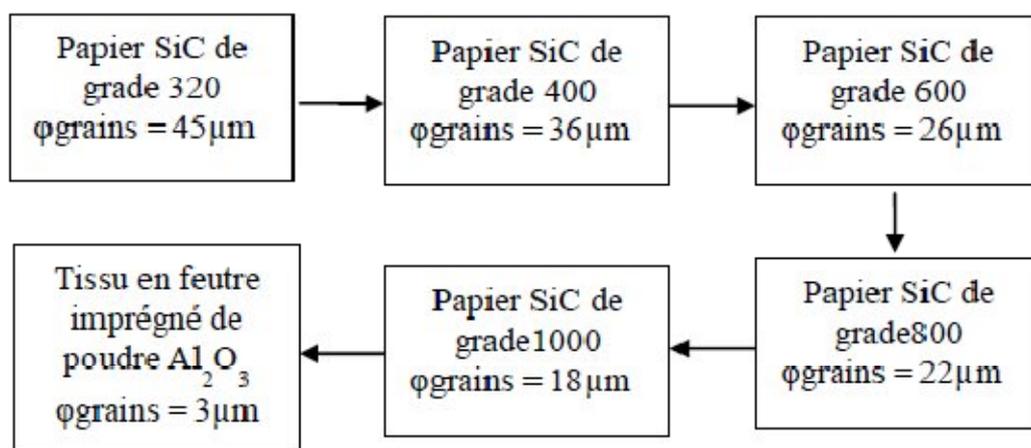
Nous utilisons un enrobage à froid. Il consiste à mettre les échantillons dans des petits moules puisqu'on remplit de résine que nous avons préparé. Après un certain temps la résine se solidifie, et on obtient des échantillons enrobés, comme montré dans la *Figure V.13*.

#### **➤ Polissage**

L'observation microscopique nécessite un polissage fin de la surface ou de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique, obtenu manuellement dans notre cas, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) de grade progressif, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est

d'environ 150 tr/min. La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne.

La surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines, caractéristiques des sillons laissés par les grains de SiC. Le polissage à la main des échantillons se fait selon la séquence suivante *Figure V.14*:

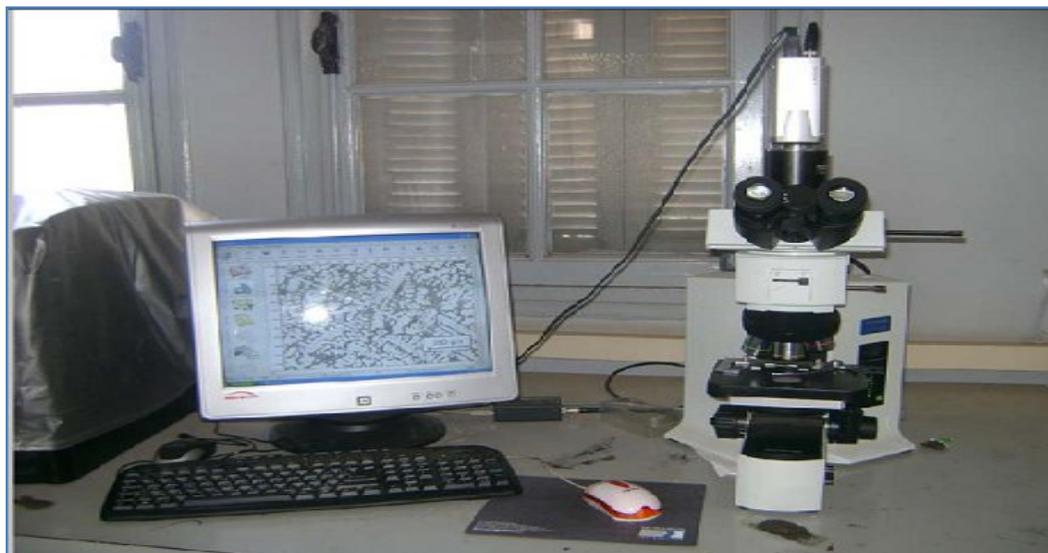


*Figure V.12: L'enchaînement de polissage.*

Chaque séquence dure environ 3 à 4 minutes. Les échantillons ainsi polis (surface ou coupe des dépôts) peuvent alors être observés au microscope. Un nettoyage à l'acétone et un séchage par flux d'air chaud terminent le polissage mécanique. Notons aussi que cette même procédure a été suivie pour préparer les échantillons sur lesquels les mesures de dureté ont été effectuées.

### ➤ L'observation microscopique

L'observation microscopique est faite à l'aide d'un microscope optique de type **OLYMPUS** (*Figure V.13*) avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000. Ce microscope est équipé d'une caméra et assisté par micro-ordinateur avec utilisation d'un logiciel d'amélioration d'image **Archimède**. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale l'aspect de la surface observée.



*Figure V.13 : microscope optique*

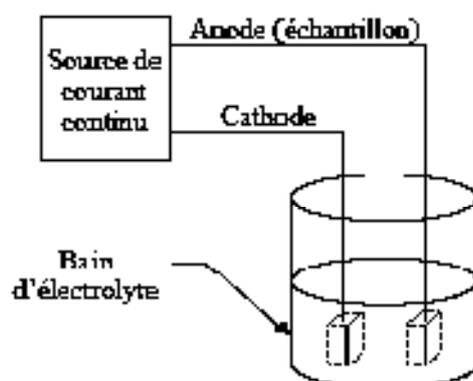
### V.9.2 Technique d'attaque :

Les surfaces à observer ont été attaquées pour pouvoir distinguer les joints de grains et les phases présentes. L'attaque utilisée est l'attaque électrolytique à l'acide oxalique, cette attaque permet de révéler les joints de grains austénitiques et ferritiques, la phase  $\sigma$  et les carbures [16].

L'appareillage se compose d'un bûcher contenant l'électrolyte avec l'échantillon (anode) placé à quelques centimètres de la cathode en acier inoxydable et une source de courant continu (voir *Figure V.14*)

Les paramètres de l'attaque électrolytique sont :

- Acide oxalique 10% dans l'eau distillé.
- Tension = 12 v.
- Temps d'attaque 10 à 30 secondes.



*Figure V.14: Dispositif de l'attaque électrolytique.*

Pour l'échantillon de l'acier au carbone : L'attaque chimique est faite avec du Nital (2 à 5ml d'acide nitrique : 100ml d'éthanol) durant 5s à 1.5min [29].

**Partie I :****VI. Protection cathodique****VI.1. protection pour l'anti-incendie et pipeline**

Les opérations de contrôle et diagnostique de réajustement du système de protection cathodique sont effectués à l'aide des appareils de mesure et de réajustement donnés dans les *Figures VI.1 à VI.4*.

- ❖ Examen et lecture de tous les redresseurs en fonction du CPF.

Les examens et prélèvement des paramètres des redresseurs utilisés au CPF nous indiquent le bon fonctionnement de ces derniers en comparant à des valeurs préalablement optimisés par le constructeur.



*Figure VI.1. Poste de redresseur.*

- ❖ Vérification du voltage circulant dans les câbles de la boîte de jonction.



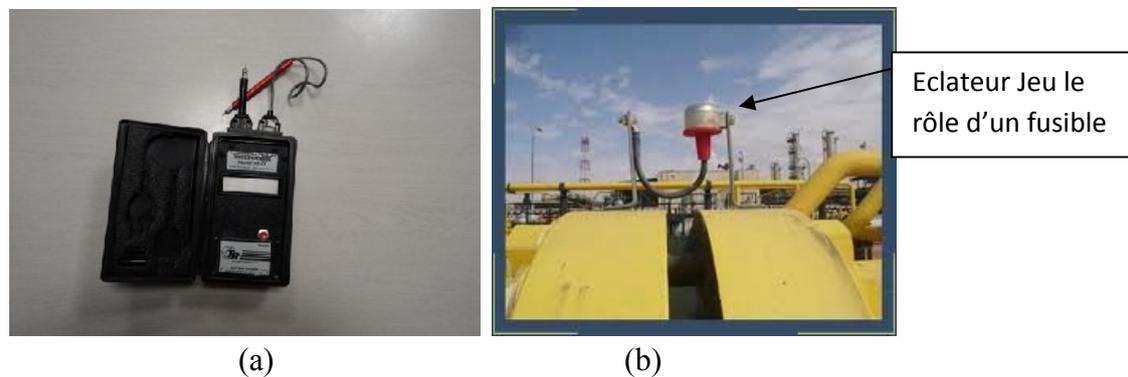
*Figure VI.2 Boîte de jonction.*

- ❖ Vérification de la bonne connexion et la continuité des câbles des circuits anodiques et cathodiques de tous les composants systèmes de protection à l'intérieur de la base pétrolière.



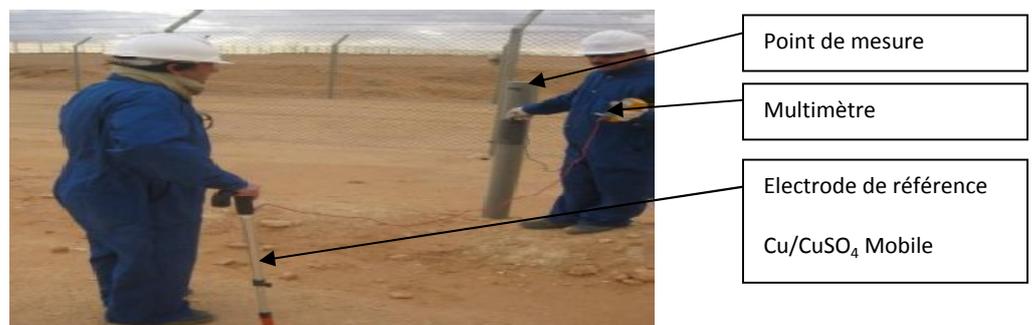
**Figure VI.3.** Représente bonne connexion et continuité du câble pour une anode sacrificielle.

- ❖ Vérification de tous les joints isolants de la base pétrolière ainsi que les éclateurs.  
On vérifie la bonne isolation des joints par l'appareil d'isolement montre sur la figure VI.4. (a).



**Figure VI.4.** (a) Appareil de testeur d'isolateur, (b) Eclateur

- ❖ Mesure du potentiel de pipeline par rapport à l'électrode de référence Cu/Cu SO<sub>4</sub>.



**Figure VI.5.** Méthode pour mesurer de potentiel par rapport à électrode de référence Cu/Cu SO<sub>4</sub> d'un pipeline a partir d'un point de mesure.

- ❖ Inspection des anodes sacrificielles de l'intérieur des bacs.  
Inspection visuelle des anodes, le bon état des anodes du système de support et du système de protection cathodique de bac de stockage (**Figure VI.6**).



**Figure VI.6.** anode sacrificielle.

- ❖ Relevés de potentiel et l'intensité de courant aux espaces rapprochés de l'intérieur des bacs de stockage.  
On a inspecté la protection cathodique des deux bacs de stockage TK 401 et TK 402.

## Les bacs de stockage TK 401.

### 1. Intensité de courant.

A partir des trois points de mesures, on a relevé des valeurs d'intensité de courant qui sont illustrées au tableau VI.1 suivant :

**Tableau VI.1.** L'intensité de courant mesuré.

B1 Micro-ampères	B2 Micro-ampères	B3 Micro-ampères
333	330	233

### 2. Potentiel de protection.

#### ❖ Protection Externe.

A partir des trois points de mesures, on a relevé des valeurs du potentiel qui sont illustrées au tableau VI.2 :

**Tableau VI.2.** *Le potentiel de protection externe mesuré.*

<b>TK 401</b>	
<b>Electrode</b>	-mV
<b>1</b>	-743
<b>2</b>	-696
<b>3</b>	-2112

❖ **Protection interne.**

A partir des déférant positions de lecteur, on a relevé des valeurs du potentiel qui sont illustrées au tableau VI.3 suivant :

**Tableau VI.3.** *Le potentiel de protection interne mesuré.*

	<b>Relevé de potentiel</b>
<b>Position de lecteur</b>	On -mV
19 (Toit)	-1002.00
18	-1009.00
17	-1000.00
16	-1005.00
15	-1004.00
14	-1004.00
13	-1003.00
12	-1003.00
11	-1002.00
10	-1002.00
9	-1002.00
8	-1001.00
7	-1002.00
6	-1002.00
5	-1001.00
4	-1001.00
3	-988.00
2	-998.00
1 (fond)	-999.00

### ✓ L'état de revêtement de l'intérieur de bac TK 401.

Après la vérification de l'état de revêtement à l'intérieur du bac il montre la bonne qualité du revêtement.



*Figure VI.7. L'état de revêtement d'intérieur de back TK 401.*

## Bac TK 402.

### 1. Intensité de courant

A partir des trois points, on a relevé des valeurs des intensités de courant qui sont illustrées au tableau VI.4 suivant :

*Tableau VI.4. L'intensité de courant mesuré*

B1 Micro-ampères	B2 Micro-ampères	B3 Micro-ampères
111	124	192

### 2. Potentiel de protection

A partir des différentes positions de lecteur, on a relevé des valeurs du potentiel qui sont illustrées au *Tableau VI.5* suivant :

*Tableau VI.5. Le potentiel de protection mesuré*

Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
On (mV)	On (mV)	On (mV)	On (mV)
-975	-945	-974	-910
-954	-975	-952	-904
-950	-952	-952	-914

## Pour le système de pipeline

A partir des points de mesures, on a relevé des valeurs du potentiel de protection qui sont illustrées au *Tableau VI.6* suivant :

*Tableau VI.6. Le potentiel de protection de pipeline mesuré*

	Pipeline
Nombre de points	32
Moyenne des On	-574
Min	-797
Max	-204

Par expérience, dans les milieux aqueux usuels, une protection cathodique est efficace si le potentiel réel de l'acier est inférieur à -850 mV par rapport à une électrode de référence Cu/Cu SO<sub>4</sub>.

Le système l'anti-incendie et le pipeline sont protégés cathodiquement, pour contrôler l'efficacité de la protection, nous avons prélevé des potentiels de corrosion du pipeline et du système l'anti-incendie, ensuite, nous avons comparé ces dernières à des grandeurs normées.

- Notons que les valeurs trouvées pour le système d'anti-incendie sont inférieures à -850 mV, alors la protection est vérifiée mais les valeurs trouvées pour le pipeline, présentent une anomalie puisqu'elles sont supérieures à -850
  - ✓ Un procédé GPS est proposé pour indiquer les valeurs de différents potentiels, placé sur des surfaces du pipeline suspect. mais le procédé n'est pas encore opérationnel.

## Partie II : Caractérisation de l'état de corrosion et le milieu de travail réel des deux nuances d'acier A106/B et A312TP304L utilisés dans l'industrie pétrolière.

Dans la caractérisation de l'état de corrosion on a recours à deux étapes :

- control Macrographique (visuel) ;
- control Micrographique.

### VI.1 Caractérisation du milieu de travail réel :

#### VI.1.1 A106/B :

L'eau véhicule dans la conduite à une pression constante de 08bar.

##### ➤ Analyses physico-chimique de l'eau

Les résultats de l'analyse d'eau sont représentés dans le tableau VI.7 si dessous :

*Tableau VI.7. Analyses chimique de l'eau.*

Source d'échantillon	pH	Conductivité	TDS	Biocide	Fer total	Salinité
		$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/cm}$	ppm	ppm	$\text{g/l}$
Puits avant traitement	7,3	1749	850	0	0,47	0,7
Après traitement	7,3	1740	874	83	0,55	07

Dureté totale	Chlore ( $\text{Cl}^-$ )	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	Sulfate
$\text{CaCO}_3$ en $\text{mg/}$	ppm	ppm	ppm	ppm
840	221,96	206,17	79,19	707
833	219,23	204,13	78,17	701

### ➤ L'analyse d'O<sub>2</sub> soluté dans le système anti-incendie

Après l'analyse faite on a obtenu les résultats suivant :

1. La source de l'eau DissO<sub>2</sub> = 6ppm ;
2. TK401 DissO<sub>2</sub> = 3ppm ;
3. Point plus basse dans le système anti-incendie P-T 101  
DissO<sub>2</sub> >100ppb.

#### VI.1.2 A312TP304L :

Cette conduite est traverse par un fluide se forme d'un gaz en phase vapeur à une pression de 20bar.

### ➤ Analyses physico-chimique de l'eau

Le tableau VI.8 montre les résultats obtenus lors du test sur l'eau.

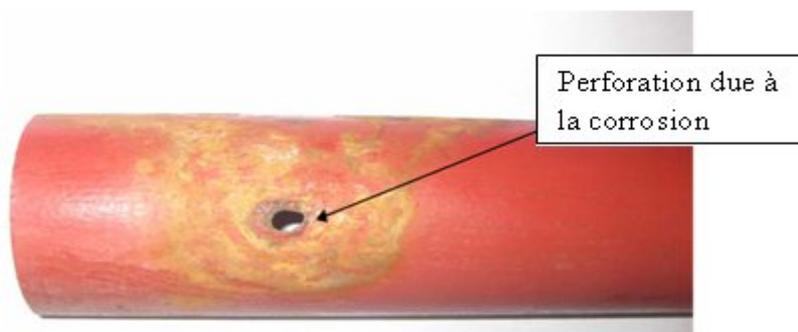
*Tableau VI.8. Analyses chimique de l'eau.*

Echantillon	Date	pH	Conductivité	TDS	Chlore	Fe
			μS/cm	Mg/l	g/l	ppm
eau	31/03/2011	5,6	220	110	110	38

## VI.2. Control Macrographique

### VI.2.1. A106/B

Le control Macrographique de cet acier montre qu'il s'agit bien d'une corrosion détectable à l'œil nu comme le montre la figure VI.8 suivante :

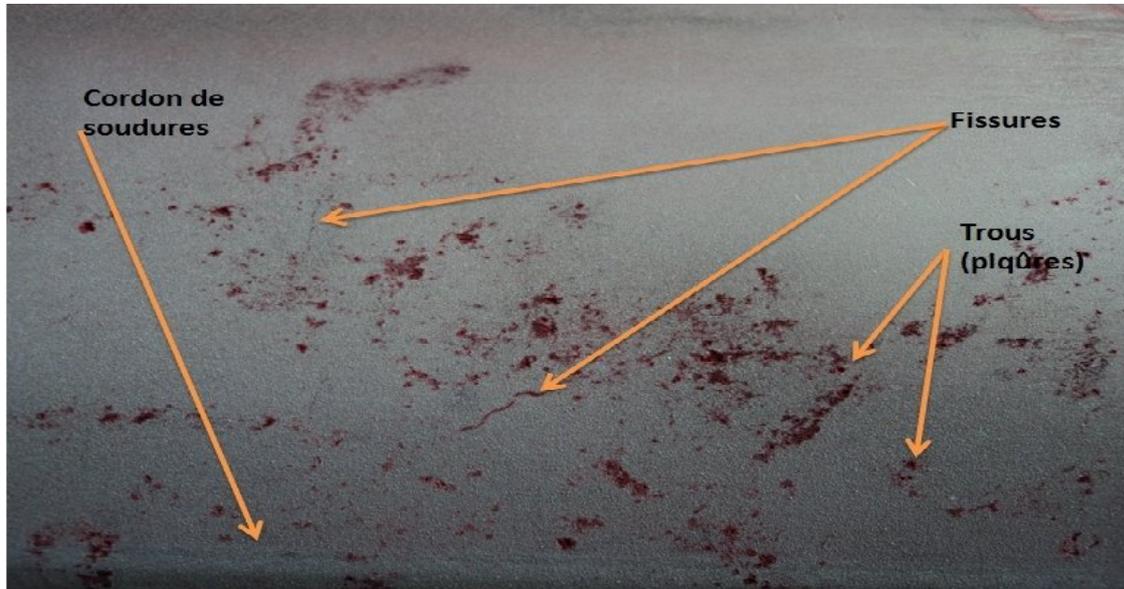


*Figure VI.8 : perforation due à la corrosion.*

## VI.2.2 A321TP304L

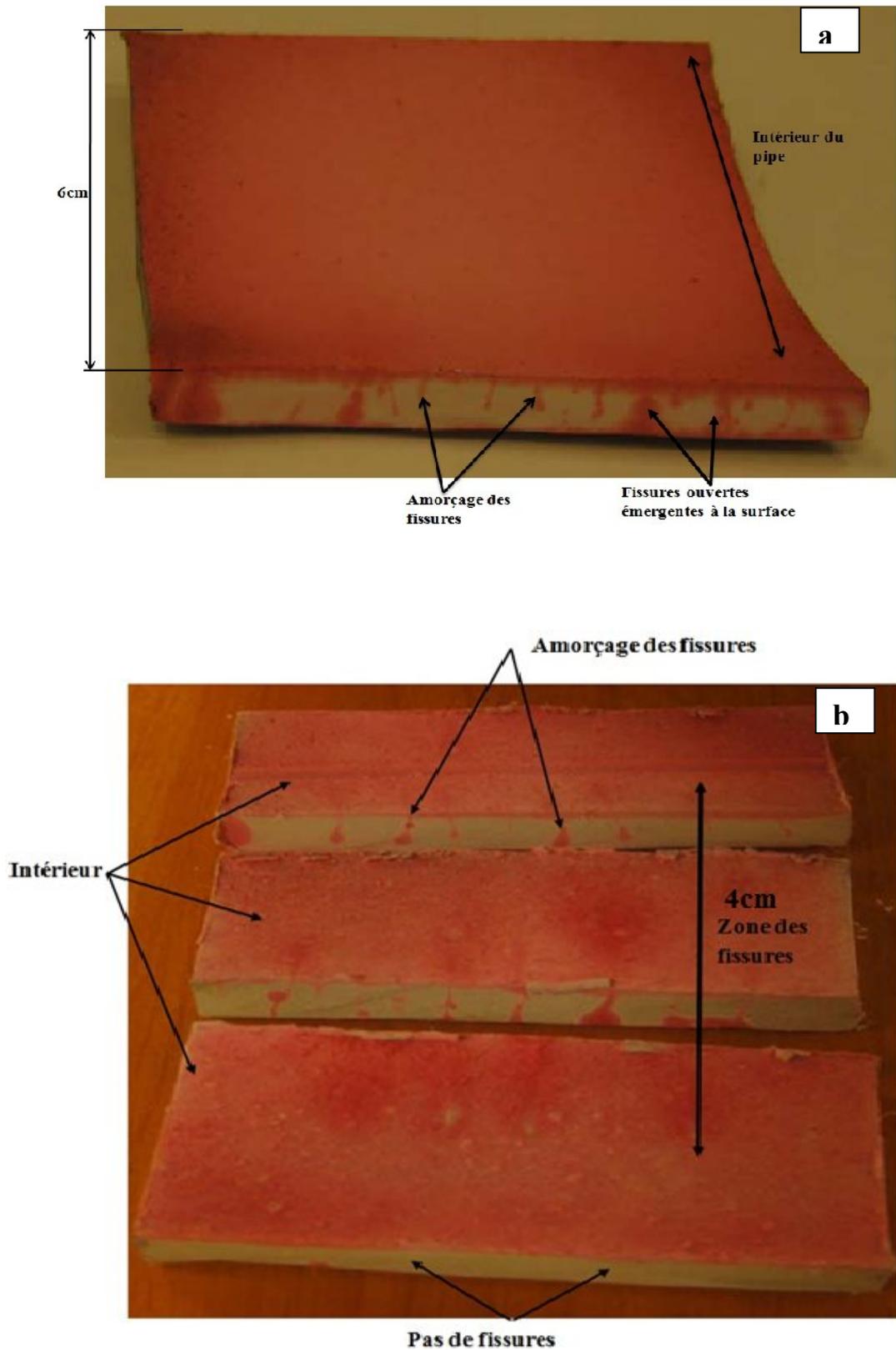
Le contrôle Macrographique de cet acier est fait à l'aide de la Caractérisation Non Destructif (Essai de Ressuage) (*Figure VI.9*).

➤ **Résultat de l'essai de ressuage :**



*Figure VI.9 : Macrographie de la pipe avant le découpe.*

Cette figure nous montre les fissures au tour de cordon de soudure, et pour localiser l'origine de ces fissures on a découpé la pipe en des coupons de dimensions (10x6 cm<sup>2</sup>) dans la zone des fissures.



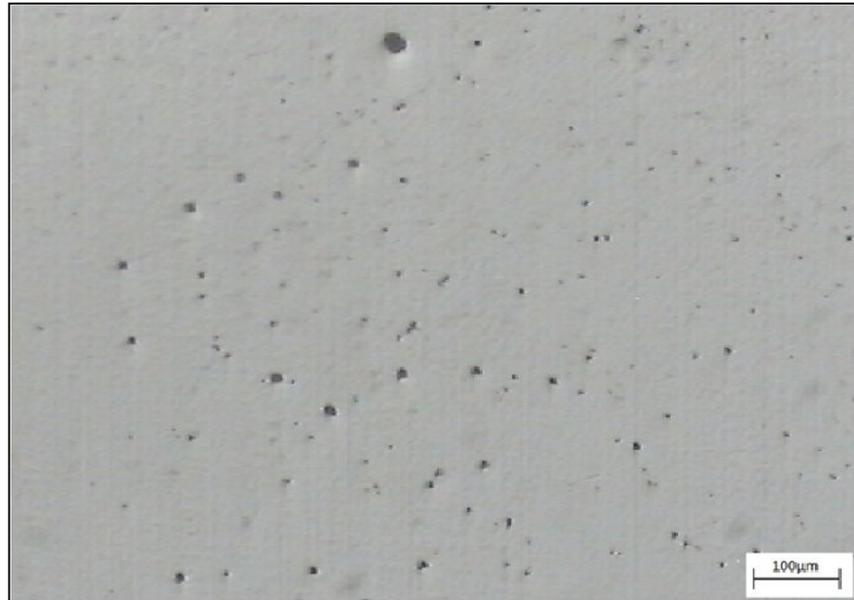
**Figure VI.10 (a, b) : Amorçage et propagation des fissures.**

La figure IV.10. (a, b) montre que l'amorçage des fissures à l'intérieur du pipe à la périphérie du cordon de soudure longitudinal.

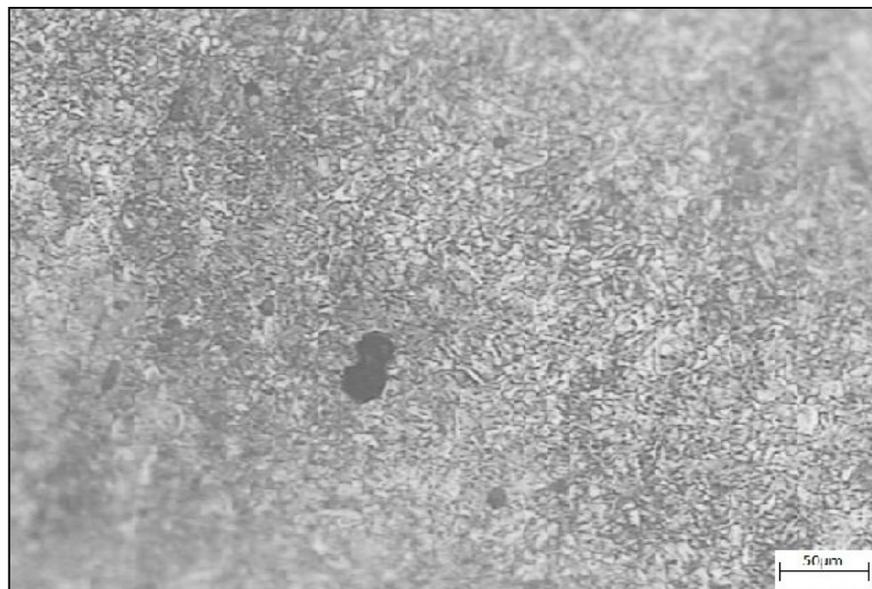
### VI.3 Caractérisation Micrographique :

#### VI.3.1 L'acier A106/B :

Les figures ci-dessous présentent l'état de surface de l'acier au carbone.



*Figure VI.11: surface interne avant l'attaque Gx50.*



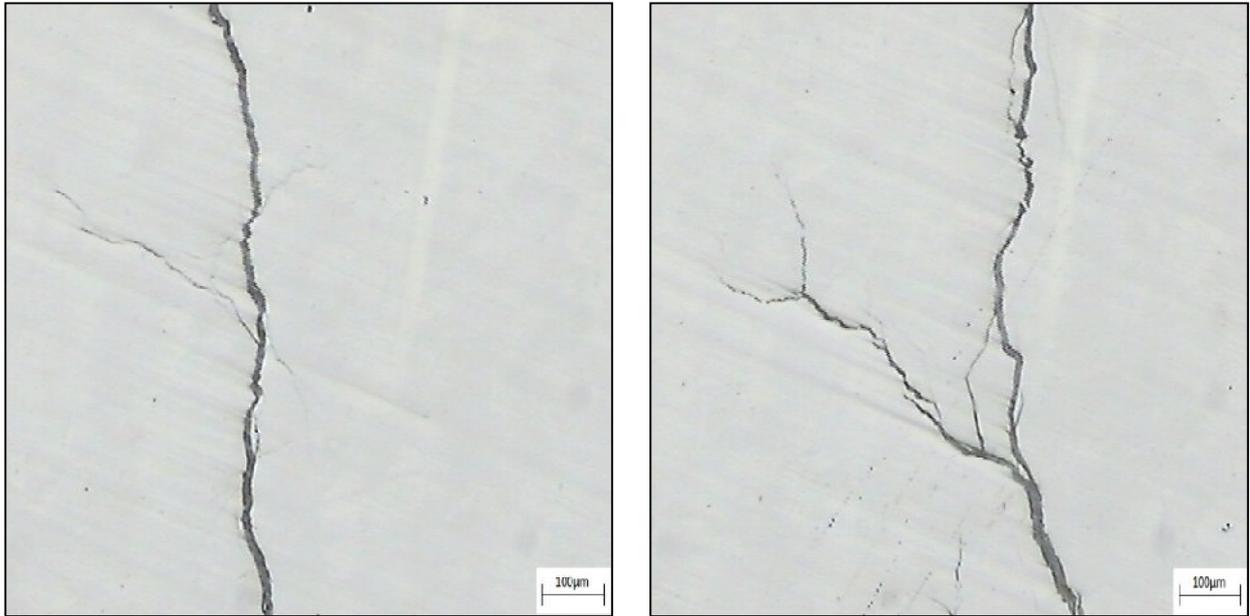
*Figure VI.12 : surface interne après attaque au Nital Gx100.*

Dans ces deux figures on remarque des piqûres en surface, on ne voit que des petits points, mais en dessous, il y en a une cavité bien plus importante. Ceci entraîne à terme la perforation de la pièce et sa fragilisation.

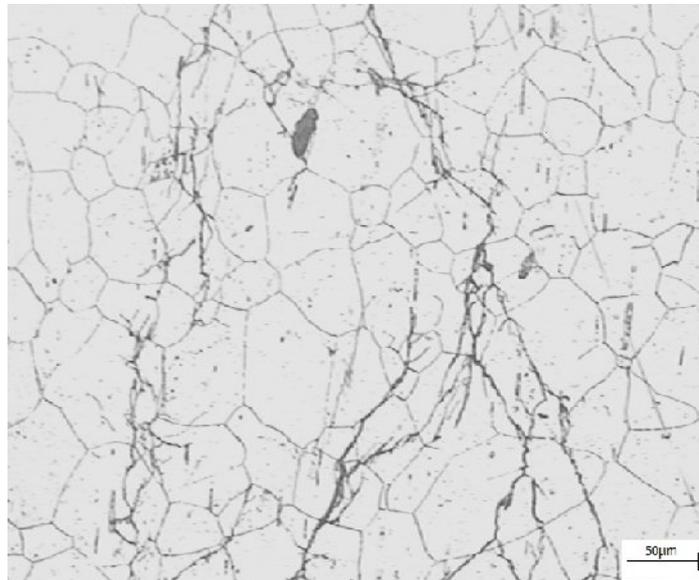
La formation de **piqûre** est un phénomène de corrosion qui survient lorsqu'une pièce est protégée contre la corrosion généralisée par un film passif

### VI.3. 2 L'acier 304L :

Après l'examen microscopique nous obtenons les figures suivantes :

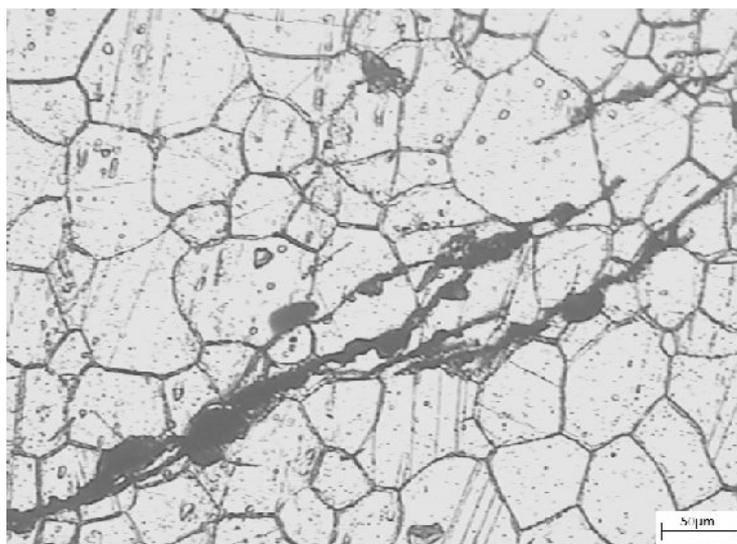


*Figure VI.13 : Surface externe sans attaque Gx50.*



*Figure VI.14 : Surface externe après l'attaque électrolytique Gx100.*

Cette figure montre une structure austénitique normalisée qui a subi une fissuration transgranulaire ramifiée.



**Figure VI.15 :** Surface intérieure après l'attaque électrolytique Gx100.  
Cette figure montre une structure austénitique sensibilisée fissurée.

## VI.4 Résultats

### 1. Acier au carbone

#### Résultats et interprétation

Les facteurs de la corrosion d'anti-incendie sont liés à la physicochimie des milieux ainsi qu'à la conception des ouvrages. En ce qui concerne la physicochimie des eaux, les principales caractéristiques intervenant au niveau des processus de corrosion localisée sont :

- le pH et l'alcalinité ( $\text{HCO}_3^-$ ) qui interviennent au niveau de l'acidification en fond de piquûre ;
- les ions chlorures et sulfates : l'ion chlorure, mobile, peut pénétrer à travers les films d'inhibiteurs. Compte tenu de son fort pouvoir de complexation vis-à-vis du fer, il favorise la dissolution anodique de cet élément. L'ion sulfate stimule la corrosion après amorçage.
- Les cations polyvalents tels que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . Dans le cas d'un film formé en présence de molybdates, ces ions inversent la charge de surface du film, le rendant ainsi plus perméable aux chlorures.

La conception du circuit, quant à elle, toujours en étroite relation avec les caractéristiques physicochimiques de l'eau, intervient par l'intermédiaire de facteurs tels que :

- la **géométrie du circuit** qui peut induire des vitesses de passage variables et donc une diffusion de l'oxygène non homogène, comme dans notre cas. En liaison avec la présence de matières en suspension susceptibles de former des dépôts, elle peut favoriser l'aération différentielle. Des vitesses de circulation de l'ordre de 1 m/s et des teneurs en MES (matière en suspension) inférieures à 5 ppm sont généralement recommandées.

La corrosion localisée affecte les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés : corrosion par piquûres et corrosions qui affectent des zones de plus grande surface, appelées ici corrosion par plaques. Des facteurs intrinsèques tels que les inclusions, rayures, zones mal décalaminées, ou encore extrinsèques tels que l'aération différentielle les ions agressifs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ...), le pH jouent un rôle sur l'amorçage de telles corrosions. Cependant, pour que celles-

ci se développent, il faut l'intervention de couplages galvaniques durables entre ces zones anodiques actives et de larges zones cathodiques protégées de la corrosion et qui sont le siège des réactions de réduction, généralement de l'oxygène. L'optimisation des ouvrages, la protection cathodique, les revêtements métalliques sacrificiels, le choix du matériau et la peinture constituent des solutions à ces corrosions.

## 2. Acier inoxydable

D'après les conditions de travail :

- la température de travail est supérieure à 60°C ;
- la concentration du chlore est supérieure à 100ppm (milieu corrosif).

Selon les analyses macrographiques et micrographie :

- les fissures sont près de la soudure longitudinale (*Figure VI.10.(a, b)*) ;
- les fissures intergranulaires et transe-granulaires ramifié traversent les grains (figure(VI.14) et VI.15).

Donc on constate que l'origine de ces fissures est une *corrosion sous contrainte*.

### ➤ Interprétation

Les aciers inoxydables et généralement les alliages fer-chrome-nickel subissent, sous l'effet d'un traitement thermique à température moyenne (600 - 700°C et même à température plus basse en présence d'une contrainte) un vieillissement caractéristique. Ce vieillissement provoque dans ces alliages une précipitation de carbures de chrome ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) qui entraîne, au voisinage immédiat de ces précipités, une diminution importante de la teneur en chrome rendant ainsi l'alliage localement très corrodable. Les aciers présentant cette structure sont dits "sensibilisés".

En pratique, ce phénomène est surtout associé aux opérations de soudage qui peuvent sensibiliser le métal à quelques millimètres de part et d'autre du cordon de soudure.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail dans son premier partie consistait à étudier l'efficacité de la protection cathodique des structures immergées et les réservoirs. Pour cela nous avons prélevé des potentiels de corrosion du pipeline et du système anti-incendie, ensuite, nous avons comparé ces dernières à des grandeurs normées.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation de l'état de corrosion dans le milieu de fonctionnement des deux nuances d'acier **A106/B** et **A312TP304L** utilisés dans l'industrie pétrolière.

Nous avons tout d'abord effectué une étude bibliographique sur les aciers, la corrosion ainsi quelque méthodes de protection.

Notons que les valeurs trouvées pour la protection cathodique du système d'anti-incendie sont inférieures à  $-850$  mV. Alors la protection est vérifiée mais les valeurs trouvées pour le pipeline, présentent une anomalie puisqu'elles sont supérieures à  $-850$ mV.

Pour la caractérisation de l'état de corrosion de deux aciers utilisés dans l'industrie pétrolière nous avons réalisé une analyse physico-chimique du milieu de travail. Des échantillons ayant subits une corrosion plus ou moins avancé sont ensuite caractériser par métallographie a fin de préciser le processus d'attaque de l'acier en milieu d'utilisation.

A partir de ce travail pouvons tirer :

- ✓ la présence d'excès d'oxygène dissout dans le milieu conduit à une corrosion par piqûre dans l'installation en aciers A106/B ;
- ✓ dans le cas de l'acier 304L nous constatons une forte corrosion transgranulaires dont l'origine est la teneur élevé en chlore dans le milieu .Cette corrosion affecte préférentiellement le contour du cordon de soudure ;
- ✓ pour la protection cathodique il faut chaque semestre vérification importante pour suivre l'efficacité de la protection cathodique.

1- Ligne 16" N° FW-04001-A01F -2 (entres des pompes P401 A/B et P420 A/B)

Corrosion allowance = 3 mm

Initial thickness = 7,92 mm

2- Ligne 12" N° FW-04001-A01F -1 (sortie des pompes P401 A/B et P420 A)

Corrosion allowance = 1 mm

Initial thickness = 6.35 mm

3- Ligne 12" N° FW-04001-A01F -1 (sortie des pompes P401 B)

Corrosion allowance = 1 mm

Initial thickness = 6.35 mm

4- Ligne 12" N° FW-04001-A01F -1 (sortie des pompes P420 A)

Corrosion allowance = 1 mm

Initial thickness = 6.35 mm

5 Ligne 20" N° FW-04001-A01F -2 (sortie des pompes P420 A)

Corrosion allowance = 3 mm

Initial thickness = 9.53 mm

6- Ligne 6" N° FW-04001-A01F -07 (Tronçon entre les pompes P 402 A/B au Conduite 20"

Corrosion allowance = 3 mm

Initial thickness = 7.11 mm

ABB Lummus Global Netherlands B.V.



PIPECLASSES

Client: BHP	120,411	09789	H-0621
Plant: Ouharet Onshore Gas Facility	Dept./sect	Job	Spec.
Location: Algeria		PIPECLASS : A01F-2	

INPUT SYMBOL	COMMODITY	MIN SIZE INCH	MAX SIZE INCH	COMMODITY CODE	SCHED CLASS	DESCRIPTION	MATERIAL	SEE NOTE
<b>PIPE</b>								
<b>PIPE/SE/STHRD</b>								
PI	SMLS PIPE	3/4	1 1/2	PA1010060010NN	SCH80	PIPE SEAMLESS, A106/B PE ASME B36.10 . -	CARBON STEEL ASTM A106 GRADE B	
		2	6	PA1010060010NN	SCH40	PIPE SEAMLESS, A106/B BE ASME B36.10 . -		
		8	24		SCH20			
PI / UG	SMLS/GW PIPE	1 1/2	1 1/2	PA101C0600214NN	SCH80	PIPE SMLS, A106/B PE PE COATED & WRAPPED ASME B36.10		11
		2	6	PA101C0600214NN	SCH40	PIPE SMLS, A106/B PE PE COATED & WRAPPED ASME B36.10		11
		8	16		SCH20			11
<b>PIPE FLANGED</b>								
PI / 2H	PIPE/S/FLINED	1 1/2	1 1/2	PA111P171C002NN	SCH80	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=200 MM	PIPE - CARBON STEEL, ASTM A106 GRADE B WITH ASTM A105 FLANGES	14
PI / 3H	PIPE/S/FLINED	2	2	PA111P171C003NN	SCH40	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=200 MM		14
PI / 4H	PIPE/S/FLINED	3	3	PA111P171C004NN	SCH40	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=200 MM		14
PI / 6H	PIPE/S/FLINED	4	4	PA111P171C005NN	SCH40	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=200 MM		14
PI / 8H	PIPE/S/FLINED	6	6	PA111P171C006NN	SCH40	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=200 MM		14
PI / 10H	PIPE/S/FLINED	8	8	PA111P171C007NN	SCH20	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=1000 MM		14
PI / 15H	PIPE/S/FLINED	10	14	PA111P171C008NN	SCH20	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=1500 MM		14
PI / 20H	PIPE/S/FLINED	16	16	PA111P171C009NN	SCH20	FLANGED PIPE, SMLS ASME B36.10, A106/B WA105 FLGS (WN FLG) RF SF, ASME B16.5 PTFE LINED, L=2000 MM		14
<b>FITTINGS</b>								
<b>NIPPLES</b>								
NP	NIPPLE	3/4	1 1/2	PA6P000000001NN	SCH80	SEAMLESS NIPPLE A106/B L=75MM PDBE ASME B36.10	CARBON STEEL, ASTM A106 GRADE B	
NP / TOE	NIPPLE	1/2	1 1/2	PA6P000000002NN	SCH80	SEAMLESS NIPPLE A106/B L=75MM TOE ASME B36.10		
<b>BW FITTINGS</b>								
ICAP	BW CAP	3/4	24	PA62C032NS001NN		BW ICAP, A234/WPB SEAMLESS ASME B16.9 -	CARBON STEEL, ASTM A234 GRADE WPB	2
IRBC	BW ECC REDUCER	3/4	16	PA62R02W.5001NN		BW ECC, REDUCER A234/WPB, SEAMLESS ASME B16.9 -		2
		18	24	PA62R02W.5W01NN		BW ECC, REDUCER A234/WPB, SEAMLESS OR WELDED ASME B 16.9 -		2

ABB Lummus Global Netherlands B.V.



**PIPECLASSES**

Client: BHP	120.411	09789	H-0621
Plant: Ouhet Onshore Gas Facility	Dept./sect	Job	Spec.
Location: Algeria		PIPECLASS : A01F-2	

<b>PIPECLASS</b>	<b>A01F-2</b>
PIPE MATERIAL	CARBON STEEL, ASTM A106 GRADE B
PRESSURE RATING	CLASS 150
VALVE TRIM	MS1410
VALVE TRIM	BUTTERFLY VALVE: ALUMINIUM BRONZE
TEMP. (DEG.C.)	-5    38    80
PRESSURE (Bar)	14    14    14
MINIMUM DESIGN TEMPERATURE	-5 (DEGR. C)
<b>CORROSION ALLOWANCE</b>	<b>3.0 MM</b>
SPECIFIC REQUIREMENTS	UNDERGROUND PIPING TO BE POLYETHYLENE COATED IN ACCORDANCE WITH SPECIFICATION HE-611.
SERVICE	FIRE WATER
NOTES:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 PRESSURE/TEMPERATURE RATING IS BASED ON ACTUAL DESIGN CONDITIONS.</li> <li>2 WALL THICKNESS (SCHEDULE) SHALL MATCH THAT OF PIPE.</li> <li>3 FOR ORIFICE INSTRUMENT CONNECTIONS ONLY.</li> <li>4 FOR DEVIATING WALL THICKNESSES SEE LAST PAGE</li> <li>5 FOR ORIFICE FLANGES ONLY.</li> <li>6 NOT USED</li> <li>7 FOR ORIFICE FLANGES AND CLASS 300 CONNECTIONS ONLY.</li> <li>8 FOR PRESSURE AND INSTRUMENT CONNECTIONS ONLY.</li> <li>9 REDUCING THREADED FLANGES SHALL BE HUB TYPE WHEN REQUIRED BY ASME B16.5 TABLE 7.</li> <li>10 ONLY TO BE USED FOR VENTS, DRAINS AND INSTRUMENT CONNECTIONS.</li> <li>11 STRAIGHT PIPE SHALL HAVE A FACTORY APPLIED POLYETHYLENE COATING TO HE-611.</li> <li>12 VALVES SHALL BE USED FOR UG INSTALLATION ONLY.</li> <li>13 FLANGES USED IN CONJUNCTION WITH LINE BLINDS SHALL BE PROVIDED WITH JACK SCREWS IN ACC. WITH PIPING STANDARD HS23 SHEET 14</li> <li>14 ISOLATION SPOOLS USED FOR CATHODIC PROTECTION</li> <li>15 FOR FLAT FACE CONNECTIONS</li> </ol>

Rev. 2	Date 07-MAY-01	DI-09789-H-0621	Page 1 of 8
--------	----------------	-----------------	-------------

LGV SFOR 04-3525-01.025 (1995-07-28)

M 5.1 5.50.RZ.01 2001-05-04 02:59

**ANSI Pipe Schedule  
SI-units (metric)**

OD = mm  
Wall thickness = mm  
Weight = kg/m  
Vol/m = m<sup>3</sup>



**Phocéenne de métallurgie**

9/11, 3<sup>e</sup> RUE - Z.I. - B.P. 61  
13742 VITROLLES - FRANCE

Tél. : 42 79 40 00  
Télex : 420255 F  
Télécop. : 42 79 40 79



à partir de 10" comme la différence  
entre SCH 40 et STD (Standard)

Nominal pipe size inch	OD mm	Figure based on austenitic steel																Vol/m <sup>3</sup>		
		10	20	30	STD	40	60	XS	80	100	120	140	160	XXS	5S	10S	40S		80S	
1/8	10.30				1.23 0.57	1.73 0.57		2.41 0.47	2.41 0.47								1.34 0.28	1.73 0.38	2.41 0.40	0.0001
1/4	13.70				2.34 0.63	3.24 0.63		3.03 0.80	3.03 0.80								1.89 0.51	2.24 0.64	3.62 0.62	0.0002
3/8	17.10				2.31 0.64	2.31 0.64		3.20 1.10	3.20 1.10								1.85 0.64	2.31 0.65	3.20 1.12	0.0003
1/2	21.30				2.77 1.27	2.77 1.27		3.73 1.82	3.73 1.62				4.78 1.55	7.47 2.55	5.65 0.82		2.11 1.01	2.77 1.30	3.73 1.55	0.0004
3/4	26.70				2.87 1.69	2.87 1.69		3.91 2.20	3.91 2.10				5.56 2.90	7.82 3.61	5.65 1.04		2.11 1.21	2.77 1.71	3.73 2.24	0.0007
1	32.40				3.28 2.50	3.28 2.50		4.55 3.24	4.55 3.24				6.35 4.24	8.89 5.45	5.65 1.32		2.77 2.13	3.38 2.55	4.88 3.29	0.0011
1 1/4	42.30				3.56 3.39	3.56 3.39		4.85 4.47	4.85 4.47				6.36 5.61	8.70 7.77	5.65 1.66		2.77 2.76	3.38 3.46	4.88 4.56	0.0018
1 1/2	48.30				3.68 4.05	3.68 4.05		5.08 5.41	5.08 5.41				7.14 7.25	10.16 8.56	5.65 1.85		2.77 3.17	3.38 4.13	5.08 5.51	0.0023
2	60.30				3.91 5.44	3.91 5.44		5.84 7.98	5.84 7.98				8.74 11.11	11.97 13.44	5.65 3.46		2.77 4.01	3.38 5.54	5.08 7.62	0.0028
2 1/2	73.00				5.19 8.52	5.19 8.52		7.01 11.41	7.01 11.41				9.83 14.92	14.92 20.39	5.65 3.77		3.05 5.36	5.18 8.81	7.01 11.54	0.0053
3	88.90				5.49 11.29	5.49 11.29		7.62 15.27	7.62 15.27				11.13 21.35	15.24 27.58	5.65 4.60		3.05 6.58	5.18 11.72	7.01 15.50	0.0079
3 1/2	101.50				5.74 13.67	5.74 13.67		8.90 18.63	8.90 18.63				—	—	5.65		3.05	5.74	8.90	0.0103
4	114.30				6.02 15.07	6.02 15.07		9.54 22.52	9.54 22.52			11.13 28.32	15.44 33.54	17.12 41.03	5.65		3.05	6.02	9.54	0.0130
5	141.30				6.55 21.77	6.55 21.77		9.53 32.97	9.53 32.97			12.70 40.28	16.81 46.11	19.05 57.43	5.65		3.40	6.55	9.53	0.0168
6	169.30				7.13 36.96	7.13 36.96		10.57 42.54	10.57 42.54			14.27 54.20	18.26 67.51	21.95 79.22	5.65		3.40	7.13	10.57	0.020
8	219.10		8.34 23.21	7.04 36.81	8.18 42.95	8.18 42.95	10.21 53.00	12.70 64.84	12.70 64.84	15.09 75.32	18.26 90.44	20.82 101.92	23.01 113.27	22.23 107.92	5.65		3.76	8.18	12.70	0.048
10	273.10		8.34 41.27	7.04 31.02	8.27 40.31	8.27 40.31	12.70 61.55	15.79 78.01	15.79 78.01	18.26 86.01	21.44 114.75	25.40 133.08	28.29 155.15	25.40 133.08	5.65		4.19	9.27	12.70	0.074
12	323.50		8.34 49.73	7.04 36.30	8.52 43.27	8.52 43.27	10.31 54.20	13.70 67.94	13.70 67.94	17.48 81.56	21.44 105.97	25.40 138.14	28.29 158.75	33.32 188.97	5.65		4.57	9.62	12.70	0.104
14	365.80	6.35 54.98	7.92 87.92	5.53 36.81	5.53 41.27	11.13 44.55	15.05 69.15	12.70 79.11	15.05 79.11	19.05 94.81	23.03 104.96	27.79 124.65	31.75 153.56	36.71 181.70	5.65		4.78	10.29	12.70	0.126
16	406.40	6.35 62.64	7.92 77.92	5.53 38.27	5.53 43.27	12.70 53.10	16.66 78.12	13.70 83.20	16.66 83.20	21.44 103.52	26.18 124.56	30.89 148.53	34.93 163.19	40.49 185.25	5.65		4.78	10.29	12.70	0.185
18	457.00	6.35 70.67	7.92 87.92	5.53 43.27	5.53 48.27	13.70 62.10	19.05 92.14	15.79 88.14	19.05 92.14	23.03 108.57	28.29 133.19	34.93 163.19	39.07 185.25	45.24 205.25	5.65		4.78	10.29	12.70	0.208
20	508.00	6.35 78.59	7.92 87.92	5.53 48.27	5.53 53.27	15.79 71.15	20.82 103.19	12.70 88.14	20.82 103.19	26.18 118.14	32.94 148.53	38.19 173.19	44.46 205.25	50.81 230.25	5.65		4.78	10.29	12.70	0.258
22	559.00	6.35 86.54	7.92 87.92	5.53 53.27	5.53 58.27	17.79 80.15	22.23 113.19	12.70 93.14	22.23 113.19	28.29 133.19	34.93 163.19	41.28 188.14	47.03 210.25	53.98 245.25	5.65		4.78	10.29	12.70	0.312
24	610.00	6.35 94.53	7.92 87.92	5.53 58.27	5.53 63.27	19.79 90.15	23.03 123.19	12.70 98.14	23.03 123.19	30.89 148.53	38.19 173.19	46.02 203.19	52.37 230.25	59.54 260.25	5.65		5.54	10.29	12.70	0.372
26	660.00	7.92 102.53	12.70 102.72	—	5.53 63.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.435
28	711.00	7.92 110.53	12.70 102.72	15.88 102.72	5.53 63.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.505
30	762.00	7.92 118.53	12.70 102.72	15.88 102.72	5.53 63.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.580
32	813.00	7.92 126.53	12.70 102.72	15.88 102.72	5.53 63.27	13.66 102.72	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.660
34	864.00	7.92 134.53	12.70 102.72	15.88 102.72	5.53 63.27	17.48 102.72	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.748
36	914.00	7.92 142.53	12.70 102.72	15.88 102.72	5.53 63.27	19.05 112.72	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.835
38	966.00	—	—	—	5.53 224.54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	0.921
40	1018.00	—	—	—	5.53 236.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	1.032
42	1067.00	—	—	—	5.53 248.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	1.138
44	1118.00	—	—	—	5.53 260.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	1.243
46	1169.00	—	—	—	5.53 272.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	1.364
48	1218.00	—	—	—	5.53 284.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.65		—	—	—	1.485

Without engagement





P-107A		CONDENSATE RETURN PUMP	
CAPACITY	3	m <sup>3</sup> /h	
DESIGN PRESSURE	25	bars	
DESIGN TEMPERATURE	150	°C	
DIFFERENTIAL HEAD	28	m	
MATERIAL (CASING/IMP)	CS/CS		
INSTALLED POWER	2.2	KW	
BASE PLATE DRAIN LINE	P-01108-AD2-1		

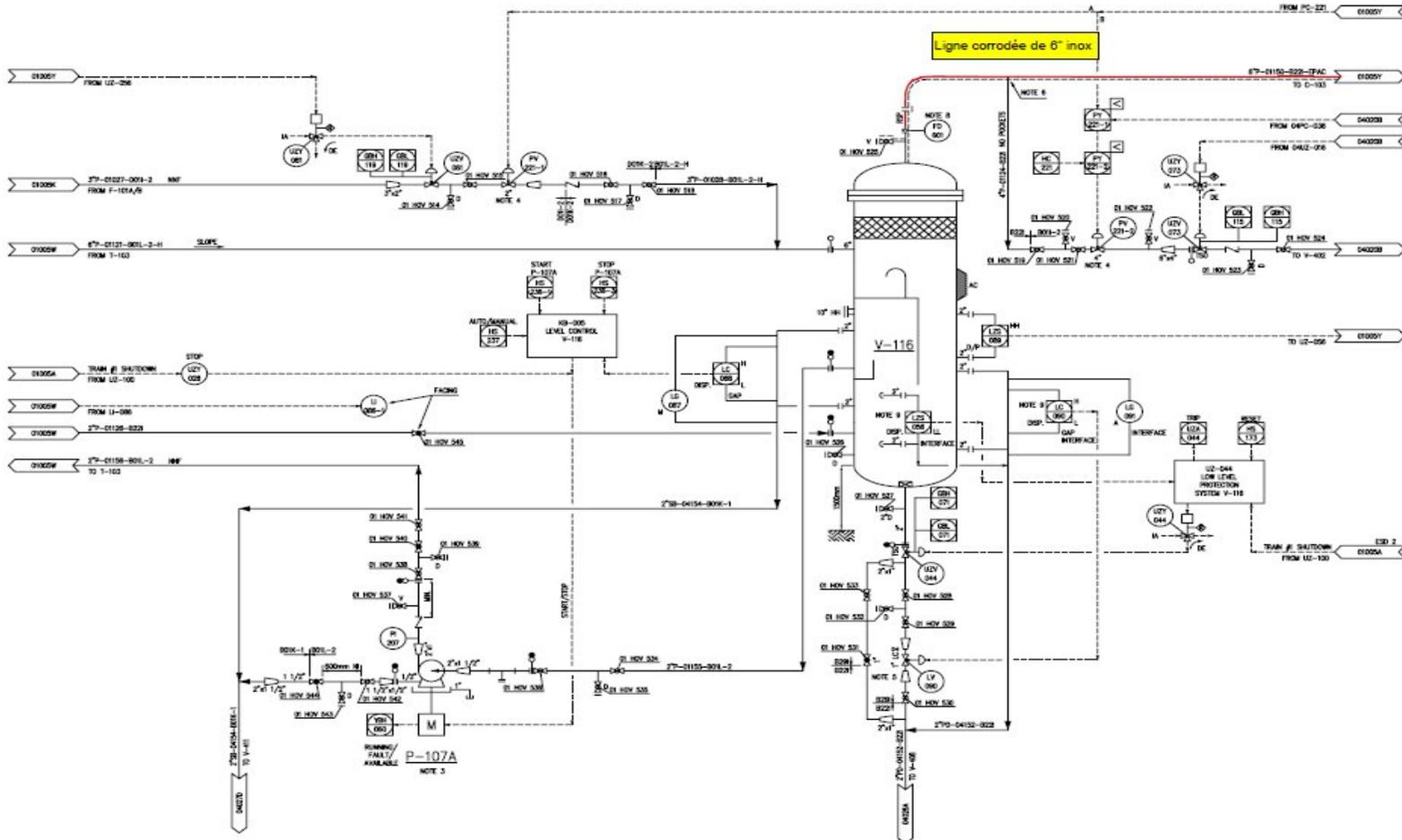
V-116		STABILIZER OVERHEAD K.O. DRUM	
SIZE (D x L/D)	750 x 2900	mm	
DESIGN PRESSURE	25	bars	
DESIGN TEMPERATURE	150	°C	
MATERIAL (TOP/BOT)	CS+3mmCA/CS+3mmGLAD		
EQUIPMENT TRIM TOP	P-01146-BOTL-2-AC		
EQUIPMENT TRIM BOTTOM	P-01145-B2B-AC		
LEVEL INSTRUMENT TRIM AND DETAIL (TOP)	DN-09789-00001G		
LEVEL INSTRUMENT TRIM AND DETAIL (INTERFACE)	DN-09789-00001G		

NOTES:

- FOR SYMBOLS, LEGEND, GENERAL NOTES AND SAMPLE CONNECTIONS SEE DWG. DN-09789-00001A/AC/CL.
- REFER ALL INSTRUMENT TAG NUMBERS ON THIS DRAWING WITH "DP" TO DENOTE DPO UNIT.
- CONDENSATE RETURN PUMPS P-107A AND P-201A SHALL HAVE ONE WANDERWEG SHAPE (P-107A).
- LOCATE AT HIGH POINT.
- PROVIDE LEAK TEST VALVE FOR THIS UNIT.
- CONNECTION FROM TOP OF PIPE.
- ACOUSTIC INSULATION (AG) TO BE PROVIDED FOR V-116 AND P-2100 AS INDICATED. ACOUSTIC INSULATION (AG) TO BE PROVIDED FOR HEATS AND DRUMS.
- FO-807 IS SUPPLIED BY C-103 VENDOR.
- INSULATE THE DISPLACER CHAMBER.

NOTES:

- FO-807 EST FOURN PAR LE VENDOR DE C-103.



REV	DATE	DESCRIPTION	PREP	CHK	DATE
7	09/03/03	ISSUE 34/MINUTE	AI	CT	BF
6	09/03/03	FINAL STATUS	PHJ	WJL	SFI
5	09/03/03	REVISED APP.	WJL	PHJ	WJL
4	09/03/03	APPROVED FOR CONSTRUCTION	WJL	PHJ	WJL
3	09/03/03	REVISED AS INDICATED	WJL	PHJ	WJL
2	09/03/03	FOR HAZOP	WJL	PHJ	WJL
1	09/03/03	APPROVED FOR DESIGN	WJL	PHJ	WJL

ABB	ABB	ABB	ABB
ABB	ABB	ABB	ABB
ABB	ABB	ABB	ABB
ABB	ABB	ABB	ABB

P&ID DIAGRAM  
GAS TREATMENT PLANT, UNIT 100  
STABILIZER OVERHEAD K.O. DRUM  
SHEET NO. 00222 OF 00222  
SCALE: NONE A1  
DRAWING NO. DN-09789-01005X  
REV. 0022  
SHEET NO. 7

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **William D. Callister, Jr**, «science et génie des matériaux » ,5<sup>ème</sup> édition, 2001
- [2]. **D.LANDOLT**, «Traité des matériaux », volume 12, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux », presse polytechnique
- [3]. **J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILBERT, et TALBOT**: « Métallurgie générale », édition Masson, 2<sup>ème</sup> édition, 1984.
- [4] **JEAN.CHANTEREAU**, «Corrosion bactérienne ; Bactéries de corrosion », 2<sup>ème</sup> édition, p 151, 1980.
- [5]. **F. DABOSI, G. BERANGER, B. BAROUX**, «Corrosion localisée», les Editions de physique 1994
- [6]. **C.FUVELLE**, «Introduction à la corrosion et protection », Centre technique des industries mécaniques, 1988.
- [7].**Michel Colombié et coll** , «matériaux métalliques», 2e édition, 2008
- [8].**M. MAREC**: « Conception, construction et exploitation des réseaux de transport de gaz naturel. Corrosion et protection cathodique », Association technique de l'industrie du gaz de France. AG, 1996.
- [9].**Gérard Béranger, Henri Mazille** «corrosion et anticorrosion», LAVOISER , 2002
- [10].**Denis PETROCOKINO**, Matériaux maintenus à l'état d'anode ou de cathode pendant tout l'emploi, Technique de l'ingénieur, M156 ,1979
- [11]. **Jean-Louis CROLET**, Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages par, Technique de l'ingénieur, M150,1998
- [12]. CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PETROLE ET DU GAZ NATUREL: « La Protection Cathodique », Guide pratique, édition Technip, 1968.
- [13]. CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PETROLE ET DU GAZ NATUREL: « Manuel de protection cathodique », édition Technip, 1970.
- [14].**HUHLIG** : « corrosion et protection», édition DUNOD 1970.

- [15] **P. MARSHALL**, Austenitic stainless steels - microstructure and mechanical properties, Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1984.
- [16] **J. BARRALIS, G. MAEDER**, Précis de métallurgie – élaboration, structures propriétés, normalisation, éditions Nathan, 1997.
- [17] **P. LACOMBE, B. BAROUX, G. BERANGER** « Les aciers inoxydables » , Les éditions de physique, 1990.
- [18] **L. Pryce, K.W. Andrews**, J. Iron Steel Inst., 195, p. 145, 1960.
- [19] **A.L. SCHAEFFLER**, Constitution diagram for stainless steel weld metal, Met. Prog., Vol 56, p. 680 et 680B, 1949.
- [20] **G. DAVID** LES ACIERS INOXYDABLES (pages 17-92). Lavoisier édition. Paris 1990..
- [21] **Cunat J.-P. (2000)**, Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, Technique de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, vol MB4, dossier M4540, Paris.
- [22]. These de Doctorat **Crescent KPODEKON** : Effet du pré-écrouissage sur la durée de vie d'aciers austénitiques de type 304L30 Avril 2010
- [23] La microstructure des aciers et des fontes, genèse et interprétation, Paris: Sirpe.2003
- [24] **P.PEYRE, C.CARBONI, L.BERTHE**, « Réactivité électrochimique dans NaCl 0.05 m de l'acier 316L traite par impulsions laser de 3 ns », Rapport LULI, 1999.
- [25]. **ANDRÉ.ROSS, BERNARD.MILOT**, «Précis de métallurgie appliquée », DUNOD, p 255, paris 1982.
- [26]. **JEAN.CREUS, RENÉ SOBOT, PHILIPPE.REFUT**, «Traité des matériaux», «Corrosion des métaux en milieu marin », technique de l'ingénieur, p 3, 2004.
- [27]. **H.DE LEIRIS**, «Métaux et alliages, Tome II (fers, aciers et fontes) », 6ème édition, MASSON, paris 1971.
- [28].document **TROUVAY ET CAUVIN PIPING**, «Equipment matériel pétrole», édition 1998
- [29].**BARRALIS J, VIGNES G**, Précis de Métallurgie-AFNOR/NATHAN, 2005