

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux :

**Etude d'une installation de protection
cathodique de bacs de stockage de
Méthanol**

Proposé et soutenu le 25/06/2023 par :

Mr. MOKEDDEM Imad Eddine Feth Ellah

Composition du jury :

Président

Pr. M. CHITROUB

Encadreur

Pr. F. HELLAL

Examineur

Pr. A. DAIMELLAH

Examineur

Pr. H. SEDJAL

ENP 2023

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



DEPARTEMENT METALLURGIE

Filière : **Génie des Matériaux**

Mémoire de projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Génie des Matériaux :

**Etude d'une installation de protection cathodique de
bacs de stockage de méthanol**

MOKEDDEM Imad Eddine Feth Ellah

Sous la direction de M. Fatah HELLAL Professeur

Présenté et soutenue le 25 juin 2023

Composition du jury :

Président	M. Mohamed CHITROUB	Professeur	ENP
Promoteur	M. Fatah HELLAL	Professeur	ENP
Examineur	M. Abderrahmane DAIMELLAH	Professeur	ENP
Examineur	M. Hamid SEDJAL	Professeur	ENP

ENP 2023

ملخص

يثير التحكم في التآكل قضايا اقتصادية وأمنية، ولهذا السبب قررت شركة سوناطراك إطلاق هذا المشروع. تعد الحماية الكاثودية (PC) تقنية وقائية من التآكل تُستخدم على نطاق واسع للهياكل المعدنية في مختلف الصناعات. يبدأ عملية التصميم بتقييم شامل للهيكल الذي يجب حمايته، بما في ذلك تحليل تركيبته المادية وحجمه وظروفه البيئية. فهم الآليات التآكلية وإمكانية التآكل ضروري لتحديد نظام الحماية الكاثودية المناسب. في هذه الحالة، اخترنا "حماية كاثودية بتيار مفروض". تعتبر العوامل مثل مقاومة التربة والرقم الهيدروجيني واحتياج التيار وتوزيع التيار المتوقع حاسمة في تحديد التيار وعدد الأنود وحجمها وموقعها في النظام. يجب أن تتضمن التصميم تدابير أمان لحماية الموظفين والبيئة وسلامة نظام الحماية الكاثودية. يتم استخدام أنظمة المراقبة لاكتشاف الأعطال والحفاظ على مستويات التيار وضمان فعالية تركيبية الحماية الكاثودية.

الكلمات الرئيسية: فولاذ كربوني، تآكل، معدل التآكل، كهروكيمياء، تأقلم، حماية كاثودية، كثافة التيار، جهد، أنود، تركيب، تفتيش .

Abstract

Corrosion-control engages economic and security issues, that is why SONATRACH decided to launch this project; "cathodic protection of storage tanks"; it is a widely employed corrosion prevention technique for metallic structures in various industries. The design process begins with a thorough assessment of the structure to be protected, including an analysis of its material composition, size, and environmental conditions. Understanding the corrosive mechanisms and the potential for corrosion is essential in determining the appropriate CP system. In this case we opted for 'Impressed current cathodic protection'. Factors such as soil resistance, pH, current demand, and anticipated current distribution are crucial in determining the current and number, size, and placement of anodes or impressed current sources. Safety measures should be incorporated into the design to protect personnel, the environment, and the integrity of the CP system. Monitoring systems to detect faults, maintain current levels, and ensure the effectiveness of the CP installation.

Key-words: carbon steel, corrosion, corrosion rate, electrochemistry, polarization, cathodic protection, current density, potential, anodes, installation, inspection.

Résumé

Le contrôle de la corrosion engendre des enjeux économiques et de sécurité, c'est pourquoi SONATRACH a décidé de lancer ce projet ; « la protection cathodique des bacs de stockages » ; c'est une technique largement utilisée pour prévenir la corrosion des structures métalliques dans diverses industries. Le processus de conception commence par une évaluation approfondie de la structure à protéger, comprenant une analyse de sa composition matérielle, de sa taille et de ses conditions environnementales. Comprendre les mécanismes corrosifs et le potentiel de corrosion est essentiel pour déterminer le système de PC approprié. Dans ce cas, nous avons opté pour la "protection cathodique par courant imposé". Des facteurs tels que la résistance du sol, le pH, la demande en courant et la distribution anticipée du courant sont cruciaux pour déterminer le courant, le nombre, la taille et l'emplacement des anodes ou des sources de courant imposé. Des mesures de sécurité doivent être intégrées à la conception pour protéger le personnel, l'environnement et l'intégrité du système de PC. Des systèmes de surveillance sont utilisés pour détecter les défauts, maintenir les niveaux de courant et assurer l'efficacité de l'installation de PC.

Mots-clés : acier au carbone, corrosion, taux de corrosion, électrochimie, polarisation, protection cathodique, densité de courant, potentiel, anodes, installation, inspection.

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné patience, santé et volonté tout au long de mes études ;

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce aux soutiens de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance ;

Au terme de ce travail, je tiens à remercier mon encadreur Pr F. HELLAL qui m'a encadré tout au long de ce projet de fin d'études de vision industriel et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour son orientation, sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigué ;

Je remercie également Pr. M. CHITROUB de m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Pr. A. DAIMELLAH et Pr. H. SEDJAL d'avoir accepté de juger mon humble travail ;

Je tiens à remercier vivement mon Co-encadreur de stage, Mr A. DJEDID, chef de service technique d'inspection « TI » du complexe CP1Z d'ARZEW, et le chef de section d'inspection Mr. F. GHAZI pour le temps, l'attention, l'intérêt qu'ils ont bien voulu me témoigner. Ils m'ont donné envie de persévérer dans ce métier pour lequel vous m'avez donné le plus grand respect. Ainsi que tous les employés de la section d'inspection notamment : A. BOUDALIA, R. MESKIN, L. BENKLAOUZ.

Je ne saurais oublier ici de remercier les enseignants du département de métallurgie à l'école nationale polytechnique pour m'avoir offert, une bonne formation au bout des trois années qu'on a passé ensemble sous le toit de notre département ; je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche, pour tous les moments agréables partagés durant cette formation ainsi que pour la bonne ambiance de travail qui a régné pendant la période de préparation de nos PFE.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma **Grand-Mère B. MEKADIM** pour son soutien moral, financier et son encouragement tout le long de mes études.

A mes parents.

A mes tantes qui sont mes sœurs.

A toute ma famille et mes amis.

A ceux qui m'aiment, qui font partie de ma vie et qui m'ont tout donné.

Sans vous je ne serai arrivé à surmonter tous les moments difficiles, pour tous les meilleurs moments dont nous avons partagé, pour votre soutien et encouragement.

C'était les meilleurs 5ans de ma vie.

Merci.

Table des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale.....	12

Chapitre I : Généralités sur la corrosion

I.1. Phénomène de corrosion	14
I.1.1. Définition	14
I.1.2. Environnements corrosifs.....	14
I.1.3. Types de corrosion et leurs origines	14
I.1.4. Taux de corrosion.....	16
I.1.5. Aspects fonctionnels de corrosion	16
I.1.6. Coût de la corrosion	16
I.1.7. Cinq raisons pour étudier la corrosion	17
I.2. Corrosion particulière dans les installations pétrolières	17
I.2.1. Corrosion par l'hydrogène	17
I.2.2. Corrosion par dérivés sulfurés H ₂ S.....	18
I.2.2.1. Corrosion par H ₂ S en présence de l'hydrogène.....	19
I.2.2.2. Corrosion par H ₂ S en absence de l'hydrogène.....	19
I.2.2.3. Corrosion par hydrogène sulfuré froid en présence d'humidité.....	20
I.3. Corrosion atmosphérique	20
I.3.1. Polluants atmosphériques.....	20
I.3.2. Degré d'humidité	21
I.3.3. Mécanisme de corrosion atmosphérique de l'acier	22
I.3.4. Influence de la concentration oxygène.....	22
I.3.5. Influence de la température	23
I.3.6. Rôle de la couche d'oxyde	23
I.3.7. Vitesses de corrosion atmosphérique pour différents métaux.....	24

Chapitre II : Protection Cathodique

II.1. Introduction.....	26
II.2. Principe de protection cathodique.....	26
II.3. Diagramme de Pourbaix.....	26
II.4. Diagramme de polarisation.....	27
II.5. Potentiel et courant de protection.....	28
II.5.1. Potentiel de protection	28
II.5.2. Courant de protection.....	28
II.6. Influence du milieu	29
II.7. Courant imposé ou anode sacrificielle	30
II.8. Protection par courant imposé	30
II.8.1. Anodes pour courant imposé	31
II.9. Protection par anode sacrificielle	31
II.9.1. Anode à base de magnésium.....	32
II.9.2. Anode à base d'aluminium	32
II.9.3. Anode à base de zinc	32
II.10. Paramètres de dimensionnement du système de protection cathodique.....	32

Chapitre III : Méthodes et analyses de l'étude

III.1. Introduction	35
III.2. Présentation du complexe CP1Z	35
III.3. Problématique de l'étude	36
III.4. Identification des bacs 16TK	37
III.5. Conclusion	40

Chapitre IV : Présentation des résultats

IV.1. Introduction.....	42
IV.2. Résistivité du sol.....	42
IV.3. pH du sol	44
IV.4. Analyse de l'atmosphère d'Arzew	44
IV.5. Vitesse de corrosion	44
IV.5.1. Théoriquement	44
IV.5.2. Pratiquement.....	45
IV.6. Courant de protection.....	47

Chapitre V : Dimensionnement de l'installation

V.1. Introduction	52
V.2. Composants de l'installation.....	52
V.2.1. Source d'énergie	53
V.2.2. Anodes déversoirs.....	54
V.2.3. Câbles	56
V.3. Inspection et suivi	56
V.4. Solutions innovantes.....	57
V.4.1. Par courant imposé	58
V.4.2. Par anode sacrificielle.....	58
Conclusion Générale	60
Références bibliographiques.....	61

Liste des figures

Figure	Page
Figure I.1 : Les types de corrosion souvent rencontrés.....	15
Figure I.2 : Taux de corrosion par le soufre en présence de l'hydrogène	19
Figure I.3 : Influence de la température, composition de l'acier H ₂ S en absence de l'hydrogène sur le taux de corrosion	19
Figure I.4 : Influence de la température sur l'humidité relative et absolue.....	21
Figure I.5 : Influence de l'humidité relative sur le taux de corrosion	21
Figure I.6 : Influence de la concentration de O ₂ sur la vitesse de corrosion	22
Figure I.7 : Effet de l'oxygène sous différentes températures sur la vitesse de corrosion	23
Figure II.1 : Diagramme de Pourbaix du Fer à 25°C.....	27
Figure II.2 : Courbes de polarisation	27
Figure II.3 : Courbe de surtension et de polarisation extrapolée	27
Figure III.1 : Les bacs 16 TK1 et TK2	37
Figure III.2 : Schéma des parties d'un bac de stockage.....	38
Figure III.3 : Schéma qui démontre les différentes épaisseurs des tôles	38
Figure III.4 : Appareil de mesure d'épaisseur	39
Figure III.5 : Appareil PMI.....	39
Figure III.6 : Diagramme Fe-C.....	40
Figure III.7 : Micrographie de l'acier A285 C	40
Figure IV.1 : Schéma de construction de la structure sous le bac.....	43
Figure IV.2 : Diagramme polarisation de la réaction de notre structure	49
Figure IV.3 : Extrapolation de Tafel	49
Figure IV.4 : Potentiel/courant de protection à appliquer.....	50
Figure V.1 : Illustration présentant un système courant imposé pour bac de stockage.....	52
Figure V.2 : Variateur de vitesse (de courant)	53
Figure V.3 : Placement des anodes pour une distribution homogène	54
Figure V.4 : Anode fonte à haute teneur en silicium.....	54
Figure V.5 : La distribution des anodes en mètre.....	55
Figure V.6 : Code couleur entre intensité du courant, longueur et diamètre du câble	56
Figure V.7 : Ouverture dans les viroles pour faciliter l'accès aux travaux	57
Figure V.8 : Grille d'anodes de protection de type ruban	58

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau I.1 : Influence de la couche d'oxyde de différents métaux sur la corrosion	23
Tableau I.2 : Différentes vitesses pour certains métaux dans des environnements divers.....	23
Tableau I.3 : Classification de la tenue envers la corrosion en fonction du taux de corrosion	23
Tableau II.1 : Variation du courant de protection dans différents sols.....	29
Tableau II.2 : Critères de choix entre anode sacrificielle et courant imposé.....	30
Tableau II.3 : Classification de la corrosivité des sols selon leur résistivité.....	33
Tableau II.4 : Les résistivités des milieux fréquemment utilisés	33
Tableau II.5 : Exemple divers de sols corrosifs et non corrosifs.....	33
Tableau II.6 : Les valeurs de courants de protection pour divers sols.....	33
Tableau II.7 : Influence du revêtement sur le courant de protection.....	33
Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier des bacs.....	39
Tableau IV.1 : Les valeurs de pH mesurées pour différents points de Prélèvement du sol	44
Tableau IV.2 : Classification de l'air ambiant en fonction de TOW.....	45
Tableau IV.3 : Vitesse de dépôt d'espèces sulfuriques selon le type d'atmosphère.....	45
Tableau IV.4 : Prélèvement des épaisseurs de plusieurs points sur les 15ans... ..	46
Tableau IV.5 : Pertes d'épaisseurs globale de plusieurs points sur les 15ans... ..	46
Tableau IV.6 : Pertes d'épaisseurs annuelle de plusieurs points sur les 15ans... ..	46
Tableau IV.7 : Vitesse de corrosion du fond et de la surface extérieure	47
Tableau IV.8 : Les différents éléments pour le calcul de courant... ..	47
Tableau IV.9 : Les courants de corrosion du fond et de la surface extérieure.....	48
Tableau V.1 : Nombre d'électrodes selon la variation du rayon d'un bac.....	53
Tableau V.2 : Dimensions des anodes en fer-silicium.....	55

Liste des symboles et abréviations

Abréviation	Signification
API	Institut Américain du Pétrole
IAP	Institut Algérien du Pétrole
ASTM	Société Américaine des Tests et Matériaux
PNB	Produit National Brut
PIB	Produit Individuel Brut
T° (°C)	Température
γ -FeOOH / α -FeOOH	Phase de l'acier
pH	Potentiel d'hydrogène
E _{prot}	Potentiel de Protection
I _{prot}	Courant de Protection
i	Densité de courant
R	Constante des gaz parfaits
F	Constante Faraday
β	Coefficient lié au transfert de charge
Ω	Ohm
SACP	Protection Cathodique par Anode Sacrificielle
ICCP	Protection Cathodique par Courant imposé
AC	Courant Alternatif
DC	Courant Continu
A / Ah	Ampère / Ampère heure
CP1Z	Complexe pétrolier 1 Arzew
MPa	Méga pascalle
TOW	Durée de persistance de l'humidité
V ; V _{corr}	Vitesse de corrosion (mm/an)
α	Coefficient de transfert de charge

Introduction générale

Introduction générale

Dans le monde industriel on trouve beaucoup de pertes et de dépenses inévitables, chose pour laquelle on essaye de minimiser ses coûts et d'augmenter le revenu. Parmi ces pertes, la corrosion : un phénomène qui ne nécessite pas d'introduction et considéré comme bête noire pour un grand nombre d'entreprises.

Heureusement, les ingénieurs au cours des années ont su développer des méthodes de lutte contre ce problème et réduire ses effets au maximum, au même temps que la recherche continue pour éliminer au maximum possible les conséquences de ce phénomène. Ces recherches ont abouti à plusieurs solutions y compris : la protection cathodique, une méthode fréquemment utilisée pour protéger les structures métalliques contre la corrosion. Cette technique est basée sur l'injection d'un courant électrique pour réduire le potentiel du métal en dessous du potentiel de corrosion pour sécuriser notre structure. Cette différence de potentiel permet de réduire des réactions électrochimiques qui sont l'origine de la corrosion.

La protection cathodique est particulièrement utile pour les réservoirs de stockage de produits pétroliers et chimiques, tel est le cas de la Sonatrach. Les principaux bacs de stockage pour le méthanol sont sujet de notre étude. Les réservoirs en acier ordinaire sont particulièrement vulnérables à la corrosion, car l'humidité et les produits chimiques peuvent endommager la couche de protection de surface du métal.

Mais dans le cas où le produit stocké est le méthanol qui n'est pas corrosif ; c'est plutôt l'atmosphère de la zone industrielle qui pose problème ainsi que le sol au-dessous des bacs. Les bacs de stockage - sujet de notre étude - mis en service depuis presque 50 ans ce qui implique une dégradation inévitable, non catastrophique, mais qui exige des précautions. Le service d'inspection ainsi que l'ARH "autorité de régulation des hydrocarbures" ont notifié l'organisme CP1Z de la nécessité de placer un système de protection cathodique pour protéger les bacs contre les futures dégradations et éviter un incident qui va causer des dégâts matériels et humains. Le service d'inspection du complexe CP1Z a assez de rapports pour réaliser une étude approfondie et savoir à quel point nos mesures devront être sécurisées.

Ainsi, la protection cathodique est une méthode très efficace et rentable pour protéger les réservoirs de stockage contre la corrosion. Cette technique permet de prolonger la durée de vie des réservoirs et de réduire les coûts de maintenance associés à la corrosion. Il est recommandé de consulter un expert en protection cathodique pour déterminer la meilleure solution de protection pour chaque situation de stockage.

Chapitre I :
Généralités sur la corrosion

I.1. Phénomène de Corrosion :

I.1.1. Définition :

Corrosion vient du mot latin « corrodere » qui veut dire « attaquer », C'est estimer que la corrosion détruit environ 25% de la production de l'acier par an et affecte le PNB avec des pertes directes (les pièces) et indirectes (arrêt de production) immenses.

C'est une dégradation naturelle - parfois accélérée - des matériaux métalliques ainsi que leurs propriétés qui résultent de l'interaction avec l'environnement où se trouvent nos pièces, autrement dit c'est les résidus des surfaces affectées par une attaque chimique ou électrochimique irréversible de l'interface. Cependant elle peut être contrôlée et prévenue.

I.1.2. Environnements corrosifs :

La corrosion ne peut pas être définie sans se référer à l'environnement. Tout environnement est corrosif à un certain degré, exemples [1] :

- Air et humidité.
- Eau de mer.
- Atmosphère naturelle, urbaine ou industrielle.
- Vapeur et gaz tel le chlore.
- Ammoniac.
- Sulfide d'Hydrogène.
- Dioxyde de Soufre et oxide de nitrogène.
- Gaz de Fuel.
- Acides.
- Bases.
- Terre.

I.1.3. Types de corrosion et leurs origines :

Le comportement de corrosion des matériaux est influencé par plusieurs facteurs :

- La composition chimique et la microstructure du métal ;
- La composition chimique de l'environnement ;
- Des paramètres physiques tels que la température, la convection, l'irradiation, etc. ;
- Des forces mécaniques, y compris des contraintes de traction, des chocs ou des frottements.

La résistance à la corrosion d'un métal donné n'est pas une propriété intrinsèque de ce métal, mais une propriété du système. Le même métal peut se corroder rapidement dans un certain environnement, tandis que dans des conditions différentes il est stable.

Plus fondamentalement, la résistance à la corrosion est essentiellement déterminée par la réactivité de l'interface métal-environnement. Certains types de dommages causés par la corrosion que l'on observe dans la pratique présentent une apparence caractéristique qui donne un indice quant à leurs origines [2].

Dans son chapitre, « Introduction à l'ingénierie de la corrosion » M. Fontana propose de regrouper les dommages causés par la corrosion en huit types :

La corrosion uniforme est une perte de matériau répartie uniformément sur toute la surface exposée à l'environnement corrosif. (Ex : contact avec des acides forts)

La corrosion galvanique, également appelée corrosion bimétallique, résulte de la formation d'une cellule électrochimique entre deux métaux. La corrosion du métal moins noble est ainsi accélérée.

La corrosion en crevasse est causée par une différence de disponibilité d'oxygène entre deux sites sur un métal passif qui conduit à la formation d'une cellule électrochimique. Une attaque sélective dans les sites d'accès faibles à l'oxygène est observée.

La corrosion par piqûres est observée sur des métaux passifs en présence de certains anions (en particulier les chlorures) lorsque le potentiel dépasse une valeur critique.

La corrosion intergranulaire est une attaque sélective des limites de grains. Souvent liée à des traitements thermiques qui entraînent une précipitation préférentielle de phases aux limites de grains.

La corrosion sélective, ou dézincification sélective ou délailage, implique la dissolution sélective d'un des composants d'un alliage qui forme une solution solide, formation d'une couche poreuse faite du métal le plus noble.

La corrosion par érosion est le résultat d'une réaction électrochimique combinée à une perte de matériau par usure mécanique due à l'impact avec un solide ou un fluide.

La corrosion sous contrainte est combinée de la corrosion et de la contrainte mécanique, formation de fissures à des niveaux de contrainte bien inférieurs à la limite de traction.

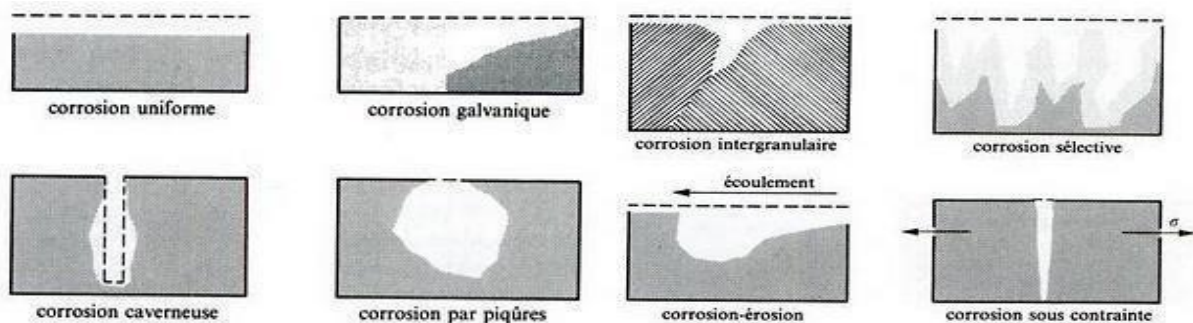


Figure I.1 : Les types de Corrosion souvent rencontrés

I.1.4. Taux de corrosion :

Le taux de corrosion peut être exprimé de plusieurs manières différentes selon l'application et les préférences personnelles [2] :

- Une perte de masse par unité de surface et par unité de temps ;
- Le nombre de moles transformés par unité de surface et par unité de temps ;
- Une profondeur de corrosion par unité de temps ;
- Une densité de courant.

I.1.5. Aspects fonctionnels de corrosion :

La corrosion peut affecter gravement les fonctions suivantes des métaux, des équipements et des installations [1] :

- Imperméabilité : pour minimiser la possibilité de corrosion, les constituants environnementaux ne doivent pas être autorisés à pénétrer dans toute sorte d'équipements.
- Résistance mécanique : la corrosion ne doit pas affecter la capacité à supporter des charges spécifiées et sa résistance ne doit pas être sapée par la corrosion.
- Intégrité dimensionnelle : le maintien des dimensions est essentiel pour les conceptions d'ingénierie et elles ne doivent pas être affectées par la corrosion.
- Propriétés physiques : telles que la conductivité thermique et les propriétés électriques, ne doivent pas être autorisées à être affectées négativement par la corrosion.
- Contamination : si la corrosion s'accumule, elle peut contaminer les équipements, les produits alimentaires, les médicaments et mettre en danger la santé et la sécurité environnementale.

I.1.6. Coût de la corrosion :

Dans une étude menée conjointement par C&C Technologies Inc., États-Unis, les agences fédérales de l'autoroute, États-Unis et l'Association nationale des ingénieurs de la corrosion, le coût direct de la corrosion a été estimé à environ 276 milliards de dollars américains, soit environ 3,1 % du produit intérieur brut national. En raison du temps nécessaire pour réaliser la structure des coûts, il n'est pas possible de mettre à jour les informations chaque année. Au moins 35% de ce montant aurait pu être économisé en prenant des mesures appropriées de lutte contre la corrosion. Pour la plupart des nations industrialisées, son coût moyen est de 3,5-4,5% du PIB [1].

Voici quelques chiffres alarmants sur les pertes dues à la corrosion [1] :

- Le coût de la corrosion des pipelines de transmission de gaz et de liquides aux États-Unis dépasse sept milliards de dollars américains.
- Près de 95 % des dommages causés au béton dans la région côtière du golfe arabe sont dus à la corrosion de l'armature et à l'éclatement conséquent du béton.
- Il est estimé que 10 % de toutes les opérations de maintenance des avions aux États-Unis sont consacrées à la remédiation de la corrosion.
- Chaque nouveau-né dans le monde a maintenant une dette annuelle de corrosion de 40 dollars.

I.1.7. Cinq raisons pour étudier la corrosion :

La corrosion est un grand problème à considérer lors de la construction des pièces et engins et voici 5 raisons pourquoi il ne faut pas la négliger lors de l'étude [1] :

- Les matériaux sont des ressources précieuses des pays qui diminuent rapidement. Il est nécessaire de comprendre comment ces ressources sont détruites par la corrosion et comment elles doivent être préservées en appliquant la technologie de protection contre la corrosion.
- La connaissance en ingénierie est incomplète sans une compréhension de la corrosion : Les avions, les navires, les automobiles et les autres moyens de transport ne peuvent pas être conçus sans tenir compte du comportement de corrosion des matériaux utilisés dans ces structures.
- Plusieurs catastrophes d'ingénierie ont été observées ces dernières années. La corrosion a été facteur très important dans ces catastrophes.
- La conception d'implants artificiels pour le corps humain nécessite une compréhension complète de la science et de l'ingénierie de la corrosion. Les implants chirurgicaux doivent être très résistants à la corrosion en raison de la nature corrosive du sang humain.
- La corrosion est une menace pour l'environnement (l'air, l'eau et le sol). Par exemple, l'eau peut être contaminée par des produits de corrosion et ne convient pas à la consommation.

I.2. Corrosion particulière dans les installations pétrolières :

I.2.1. Corrosion par l'hydrogène :

A noter que seul l'atome d'hydrogène (H) est capable de diffuser à travers les métaux en modifiant les propriétés, la molécule H₂ ne diffuse pas. Par conséquent seule la forme atomique de H représente un danger potentiel et peut endommager un métal.

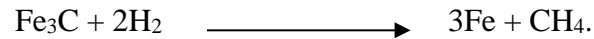
On peut distinguer trois sources possibles d'hydrogène :

- Présence dans l'installation sous forme gazeuse (industrie pétrolière par exemple) ;
- Formation par polarisation cathodique ;
- Formation par réaction de corrosion.

D'une façon générale, la fragilisation par l'hydrogène affecte les alliages à caractéristiques mécaniques élevées (aciers martensitiques, alliages de titane...) et se traduit comme la corrosion sous contrainte par la perte de ductilité qui conduit à la propagation de fissures. La fragilisation est liée à la pénétration d'hydrogène dans la matrice métallique par diffusion à l'état atomique. L'hydrogène ainsi inséré dans le réseau pourrait fragiliser le matériau en diminuant l'énergie de cohésion entre les atomes [3].

Ce phénomène qui affecte en général les aciers ordinaires apparaît lorsque le matériau est en présence d'un milieu légèrement agressif (cuves de stockage par exemple), ou en cas de surprotection cathodique. L'hydrogène moléculaire ainsi formé ne pouvant se diffuser, la pression augmente et conduit à une déformation locale du métal qui se traduit par la formation de cloques d'un diamètre pouvant aller du millimètre à plusieurs centimètres.

Enfin, dans le cas des aciers utilisés à haute température (plus de 200 à 300 °C), l'hydrogène peut réagir avec les carbures de fer et former du méthane suivant la réaction :



Certaines substances telles que les ions sulfures, les composés d'arsenic et du phosphore, les cyanures réduisent le taux de la réaction de réduction de l'ion hydrogène ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$). Il semble que la 2ème étape (formation des molécules) est plus concernée. En présence de ces substances il y a une plus grande concentration d'atomes d'hydrogène à la surface du métal. Les dommages causés par l'hydrogène se répartissent en 3 catégories [3] :

- Fragilisation par l'hydrogène
- Décarburation
- Attaque par l'hydrogène

La fragilisation se manifeste dans les procédés chimiques des opérations de soudage ou de décapage ou à la suite de protection cathodique. Par contre, la décarburation et l'attaque par l'hydrogène ne se passent qu'à des températures élevées.

I.2.2. Corrosion par les dérivés soufrés :

La teneur en soufre des bruts varie de 1.8 à 2.6 %. Ce dernier se trouve sous forme de sulfures organiques tels que les Thiophènes, Mercaptans ... etc. Dans ce cas, le taux de corrosion dépend de la composition :

- Chaque composé est référencié et correspond à un certain degré de corrosion vis-à-vis de l'acier.
- Dans l'industrie du pétrole l'hydrogène sulfuré est l'agent le plus corrosif.
- Il provient du brut et de la décomposition thermique des composés sulfurés (cracking thermique).

Dans les raffineries, les cas de corrosion suivants sont rencontrés [3] :

1. Par H_2S en présence d'hydrogène (désulfuration, reformage et craquage catalytique)
2. Par H_2S en absence d'hydrogène (distillation, fissurations thermiques)
3. Par hydrogène sulfuré froid en présence d'humidité.

1. *Corrosion par H₂S en présence d'hydrogène* : le plus souvent dans les unités de désulfuration ou le soufre est éliminé par hydrogénation sous forme H₂S. La vitesse de corrosion augmente selon une fonction linéaire de la T° et ne présente pas de maximum. Le problème rencontré dans cette corrosion est le bouchage et colmatage des lits de catalyseur qui est dû à l'entraînement des produits de corrosion. Le seuil du taux de corrosion à respecter est 0.3 mm/an.

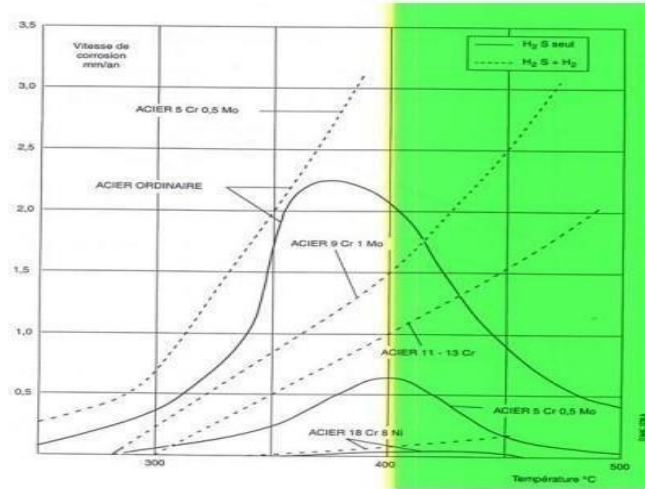


Figure I.2 : Taux de corrosion par le soufre en présence de l'hydrogène [3]

2. *Corrosion par H₂S en absence d'hydrogène* : elle est en fonction de la concentration de H₂S et de la température. Elle est quasiment indépendante de la pression. La vitesse de corrosion augmente rapidement dès l'attaque du métal par H₂S mais elle diminue avec le temps. La diminution est due essentiellement à la formation de la couche de sulfure formée. Cette couche protectrice pose le problème de bouchage dans le cas de son détachement (colmatage des faisceaux tubulaires et filtres). Ce problème apparaît quand la corrosion dépasse les 0.3 mm / an.

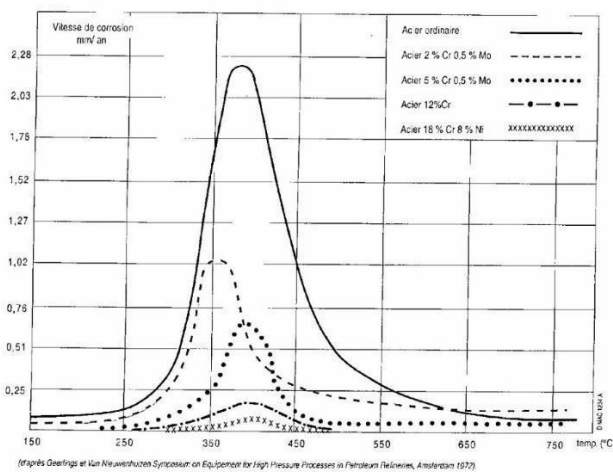
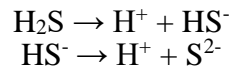
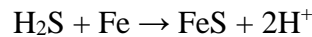


Figure I.3 : Influence de la température, composition de l'acier H₂S en absence de l'hydrogène sur le taux de corrosion [3]

3. *Corrosion par hydrogène sulfuré froid en présence d'humidité* : H₂S biacide faible, son ionisation est comme suit [3] :



En milieu humide, le H₂S provoque une corrosion généralisée ($6 < \text{pH} < 8$). A noter que les films de sulfures sont peu protecteurs. Ils sont dissous par les variations du pH ou arrachés par l'érosion dans le cas des écoulements élevés. Ce type de corrosion peut être pallié par l'utilisation de revêtements. L'hydrogène sulfuré réagit avec le fer et produit de l'hydrogène atomique selon la réaction suivante :



Cette corrosion est similaire à la corrosion de fragilisation par l'hydrogène (corrosion sous contraintes et cloques d'hydrogène). Pour y remédier :

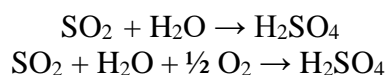
- Revêtement
- Utilisation d'inhibiteurs
- Utilisation de tôles d'acier de qualité spéciale.

I.3. Corrosion atmosphérique :

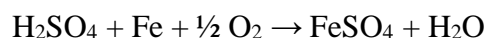
Comme son nom l'indique, la corrosion atmosphérique désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier, l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte. La vitesse de corrosion atmosphérique dépend de la vitesse des réactions partielles anodiques et cathodiques aux interfaces métal-électrolyte et oxyde-électrolyte. Elle est donc en ce sens comparable à la corrosion en milieu liquide où il n'y a pas évacuation des produits de corrosion par l'électrolyte et que ce dernier peut éventuellement s'évaporer complètement lors de phases de séchage pour se reformer lors de phases d'humidité élevée. Le phénomène de corrosion atmosphérique va donc dépendre étroitement des polluants présents dans l'air ambiant et de son degré d'humidité [3].

I.3.1. Polluants atmosphériques :

Les principaux polluants contenus dans l'air ambiant sont le dioxyde de soufre SO₂, les différents oxydes d'azote NO_x, les chlorures Cl⁻ et les poussières. Du point de vue corrosion, les chlorures (surtout présents dans les régions maritimes) et le SO₂ (provenant de la combustion du charbon et du pétrole) sont les espèces les plus importantes. Le SO₂ est responsable des pluies acides car il forme, en réagissant avec l'eau, l'acide sulfureux H₂SO₃ ou, avec l'eau et l'oxygène et en présence de catalyseurs comme les ions ferreux ou ferriques, l'acide sulfurique H₂SO₄ selon les réactions suivantes :



Par réaction de l'acide sulfurique avec le fer, on obtient le sulfate ferreux :



I.3.2. Degré d'humidité :

On distingue l'humidité absolue (g/m^3) qui indique la masse d'eau contenue dans un mètre cube d'air et l'humidité relative exprimée en % qui représente le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la pression de saturation. La pression de saturation, correspond à la pression de vapeur d'eau à partir de laquelle survient la condensation et dépend de la température.

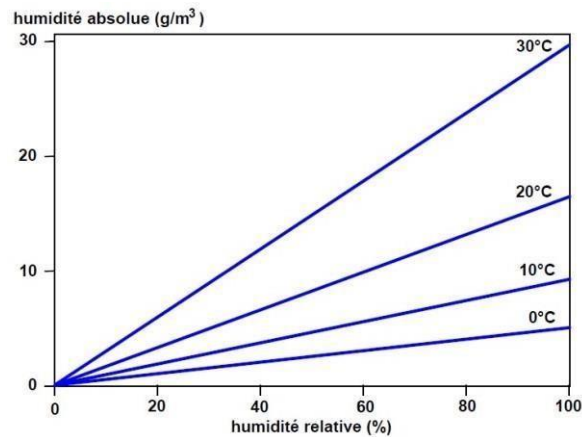


Figure I.4 : Influence de la température sur l'humidité relative et absolue [3]

Du point de vue de la corrosion, le paramètre significatif est donc l'humidité relative puisqu'elle détermine le degré d'humidité à partir duquel on assistera au phénomène de condensation nécessaire à la formation du film d'électrolyte à la surface du métal. Cette condensation se produit en théorie pour une humidité relative de 100%, mais peut, sous certaines conditions, se manifester à la surface d'un métal pour des valeurs apparemment inférieures.

Cela survient notamment lorsque la température du métal est inférieure à celle de l'air ambiant, lorsque sa surface est poreuse, ou lorsqu'elle contient des sels déposés. La présence de sels déposés a une action double car d'une part elle réduit la valeur de la pression saturante et d'autre part elle se dissout dans l'eau de condensation, cette action peut conduire à la formation d'un électrolyte particulièrement agressif.

La Figure I.5 montre l'évolution de la corrosion d'un acier en fonction de l'humidité relative pour une atmosphère polluée par 0.01% de SO_2 . On constate que la corrosion devient importante dès que l'humidité relative atteint 60% :

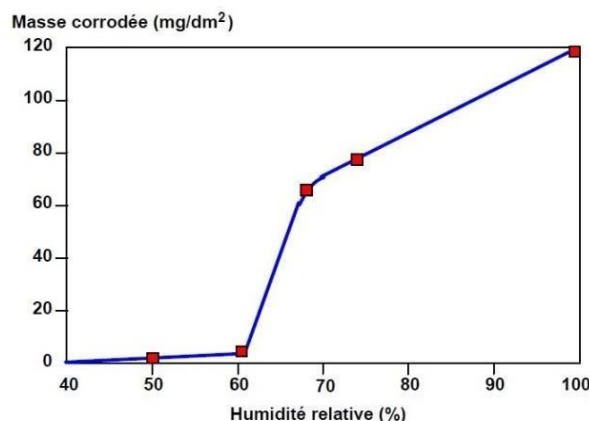
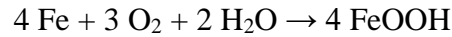


Figure I.5 : Influence de l'humidité relative sur le taux de corrosion [3]

I.3.3. Mécanisme de la corrosion atmosphérique de l'acier :

La corrosion atmosphérique de l'acier peut être schématiquement décrite par la réaction suivante :



Le composé FeOOH, qui peut être considéré comme de l'hématite Fe₂O₃ hydratée ($2\text{FeOOH} \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$) désigne globalement la rouille, qui est en fait un mélange complexe de différentes phases cristallines et amorphes d'oxydes et d'hydroxydes de fer et dont la stœchiométrie ne correspond qu'approximativement à la formule globale FeOOH.

Les trois composants principaux de la rouille sont respectivement :

- La lépidocrocite γ -FeOOH de structure rhomboédrique ;
- La goethite α -FeOOH de structure rhomboédrique ;
- La magnétite Fe₃O₄ de structure cubique.

La composition de la rouille varie en fonction des conditions climatiques et de la durée d'exposition. Elle varie entre l'intérieur et l'extérieur de la couche :

- La partie extérieure est souvent poreuse et principalement constituée de goethite et de lépidocrocite.
- La partie intérieure, adjacente au métal, est en général relativement dense et formée de magnétite et de phases amorphes de FeOOH.

Lorsqu'on expose une surface d'acier humide à l'atmosphère, elle se recouvre rapidement d'un film mince de produits de corrosion. Cette réaction de formation de la rouille est autant plus rapide que la contamination de la surface par des polluants comme les ions sulfates ou les ions chlorures [3].

I.3.4. Influence de la concentration de l'oxygène :

Type de corrosion rencontré dès qu'un circuit verra son eau véhiculée renouvelée, ou lorsque l'eau du réseau est en contact avec l'atmosphère (ex : circuits ouverts de tour de refroidissement). On peut avoir aussi introduction d'air dans un réseau fermé dans les parties de circuit en dépression provenant d'une mauvaise conception du réseau. Par définition la vitesse de corrosion est proportionnelle à la vitesse de diffusion de l'oxygène. En l'absence d'oxygène dissous, la vitesse de corrosion de l'acier faiblement allié est négligeable.

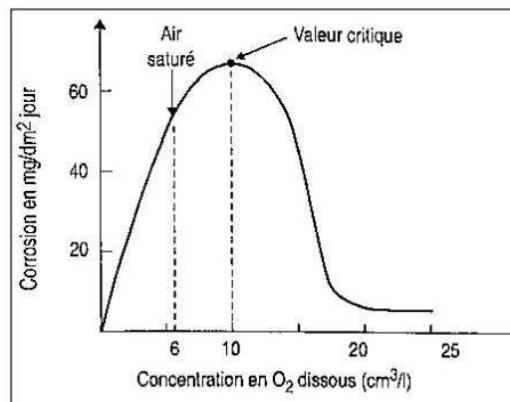


Figure I.6 : Influence de la concentration de O₂ sur la vitesse de corrosion [3]

On remarque que la vitesse s'accroît d'une manière exponentielle du au phénomène de dépolarisation déjà cité. Au-delà de la concentration d'O₂ critique, la vitesse de corrosion chute à de faibles valeurs. Cette valeur critique dépend de la teneur en sels dissous, T°, pH et de la vitesse d'écoulement. La diminution au-delà de la concentration critique est due à la passivation du fer par l'oxygène. Dans ce cas précis, la vitesse de corrosion dépendra seulement de la vitesse de diffusion de l'oxygène à travers les pores de la couche protectrice.

I.3.5. Influence de la température :

Quand la corrosion est contrôlée par la diffusion de l'oxygène, la vitesse de corrosion, pour une concentration donnée en O₂, double approximativement pour chaque augmentation de 30°C de la température.

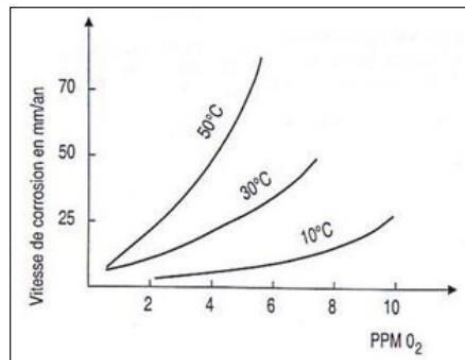


Figure I.7 : Effet de l'oxygène sous différentes températures sur la vitesse de corrosion [3]

I.3.6. Rôle de la couche d'oxyde :

L'importance de cette couche dans le processus de corrosion dépend essentiellement de sa continuité, son degré de porosité, son adhérence... etc. La formation de la couche dépend d'un rapport appelé : rapport de Pilling-Bedworth ; un concept utilisé pour évaluer l'étendue de la corrosion ou de la réaction d'un matériau lorsqu'il est exposé à un environnement corrosif [3].

$$R_{PB} = (k \cdot \rho) / (n \cdot M \cdot \rho_{ox}) ; \quad \text{avec :}$$

- m : Masse de l'oxyde formé
- ρ_{ox} : Masse volumique de l'oxyde formé
- M : Masse atomique du métal
- ρ : Masse volumique du métal de base
- n : Nombre d'atomes du métal de base dans la molécule d'oxyde.

Si $R_{PB} > 1$ Formation d'une couche protectrice | Si $R_{PB} < 1$ Formation d'une couche non protectrice

Tableau I.1 : Influence de la couche d'oxyde de différents métaux sur la corrosion [3]

L'oxyde	MgO/Mg	Al ₂ O ₃ /2Al	ZnO/Zn	FeO/Fe
R _{PB}	0.80	1.28	1.55	1.7

L'oxygène joue un double rôle dans la formation de la rouille : la dépolarisation des microcathodes et l'oxydation des produits formés.

I.3.7. Vitesses de corrosion atmosphérique pour différents métaux :

La résistance à la corrosion est une propriété qui diffère d'un métal à un autre, de ce fait on peut aboutir à la vitesse de corrosion sachant que ça change d'un environnement à un autre.

Tableau I.2 : Différentes vitesses pour certains métaux dans des environnements divers [1]

Métal	Taux de corrosion ($\mu\text{m}/\text{an}$)			
	Rural	Urbain	Industriel	Marin
Pb (Plomb)	0,7 – 14	1,3 – 2	1,8 – 3,7	1,8
Cd (Cadmium)	-	2 – 15	15 – 30	-
Cu (Cuivre)	1,9	1,5 – 2,9	3,2 – 4	3,8
Ni (Nickel)	1,1	2,4	4 – 5,8	2,8
Zn (Zinc)	1 – 3,4	1 – 6	3,8 – 19	2,4 – 60
Acier	4 - 60	30 - 70	40 - 160	64 – 230

D'une manière générale, on a :

Tableau I.3 : Classification de la tenue envers la corrosion en fonction du taux de corrosion [1]

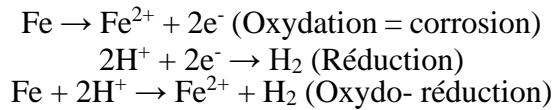
Taux de corrosion	Tenue
< 0.05 mm/an	Excellente
0.05 à 0.130 mm /an	Bonne
0.130 à 1.25 mm/an	Satisfaisante
> 1.25 mm/an	Non satisfaisante

Chapitre II :
Protection cathodique

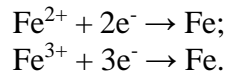
II.1. Introduction

Toute structure métallique se corrode, chose pour laquelle on a inventé des techniques de protection contre ce phénomène y compris la protection cathodique.

La protection cathodique oppose la corrosion qui est due à un processus électrochimique dans lequel le métal s'oxyde en perdant ses électrons, en présence d'un milieu réducteur qui capte des électrons. Exemple du fer :



Avec un milieu réducteur Fe^{2+} se réduit :



- 1- La réaction d'oxydation (corrosion) se passe dans le sens : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
- 2- La réaction de réduction (protection) se passe dans le sens : $\text{Fe} \leftarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Pour éviter la corrosion, on doit éviter le sens 1 et donc déplacer l'équilibre dans le sens 2.

II.2. Principe de protection cathodique

Le principe de la technique de protection cathodique est basé sur l'injection d'un courant externe pour le but de diminuer le potentiel de polarisation du métal à un niveau pour lequel la vitesse de corrosion du métal est réduite à un point négligeable. Le seuil de protection cathodique peut être déterminé thermodynamiquement, il correspond au seuil d'immunité tel que représenté dans les diagrammes de Pourbaix. C'est un état à partir duquel la corrosion devient théoriquement impossible [5].

II.3. Diagramme de Pourbaix

Marcel Pourbaix a développé une méthode pour expliquer la thermodynamique des systèmes de corrosion en traçant des régions de stabilité thermodynamique des métaux et leurs réactions sur des diagrammes de potentiel par rapport au pH. Les régions d'un diagramme sont :

- Immunité : pas d'oxydation ou corrosion (possibilité de fragilisation par l'hydrogène).
- Corrosion : Les ions sont thermodynamiquement stables et le métal se corrodera.
- Passivité : Les composants du métal et les produits chimiques de l'environnement sont thermodynamiquement stables et le métal peut être protégé si le film passif est adhérent.

De nombreux utilisateurs des diagrammes de Pourbaix négligent le point final ci-dessus. La thermodynamique seule ne peut pas prédire si les films passifs seront protecteurs ou non. Le diagramme de Pourbaix du fer est présenté dans la figure suivante. Une ligne horizontale représente une réaction qui ne dépend pas du pH ; c'est-à-dire, ni H^+ ni OH^- ne sont impliqués, Une ligne verticale implique H^+ ou OH^- , mais pas d'électrons.

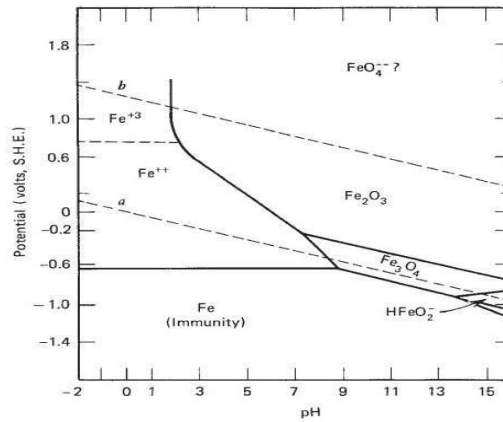


Figure II.1 : Diagramme de Pourbaix du fer à 25°C [4]

Pour cet équilibre, en utilisant l'équation de Nernst, nous obtenons :

$$E = E^\circ - 2,303(RT/nF) * \log(1/Fe^{2+}) ; E = -0,44 + 00296 * \log(Fe^{2+})$$

Si (Fe^{2+}) est pris comme 10^{-6} (la valeur conventionnelle de l'immunité), alors $E = -0,617 \text{ V}$, une ligne horizontale sur le diagramme de Pourbaix [4].

II.4. Diagramme de polarisation

Le comportement de polarisation d'un alliage unique est une solution spécifique. Le courant est tracé en fonction du potentiel appliqué pour les réactions anodiques et cathodiques.

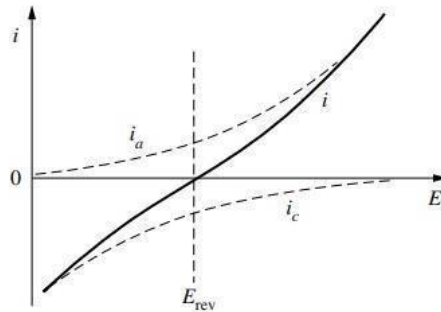


Figure II.2 : Courbes de polarisation [2]

L'extrapolation linéaire jusqu'au point d'intersection permet d'obtenir un potentiel (E_{corr}) où les courants anodique et cathodique (i_{corr}) sont égaux et où le taux d'oxydation est égal au taux de réduction. Lorsque $E = E_{corr}$, aucun courant externe n'est fourni. Si nous représentons le potentiel en fonction du logarithme du courant externe (en valeur absolue), nous obtenons les courbes en pointillés représentées sur la figure **II.3.b**.

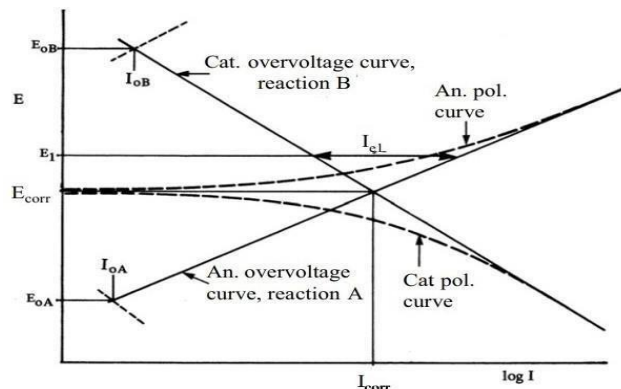


Figure II.3 : Courbes de surtension et de polarisation extrapolée [2]

Ces courbes sont appelées courbes de polarisation. On observe que les courbes de surtension (les lignes de Tafel) sont des asymptotes aux courbes de polarisation. Lorsque E s'écarte beaucoup du potentiel de corrosion, les courbes de polarisation et les courbes de surtension se rejoignent, et s'utilisent pour l'extrapolation de Tafel. La partie linéaire des courbes de polarisation est extrapolée, et ainsi les courbes de surtension sont déterminées.

Pour établir une protection cathodique totale il faut calculer le courant de protection totale qui est égale à : $i_{\text{prot}} = i_{\text{cathodique}} - i_{\text{anodique}}$. Le courant anodique est déterminé par l'intersection de la courbe de la réaction de réduction Fe^{2+} vers le fer avec la courbe linéaire anodique I_{oA} , tandis que le courant cathodique est déterminé par l'intersection (au même niveau horizontale) avec la courbe linéaire cathodique I_{oB} .

Cette valeur de courant i_{prot} est à un potentiel E_o représentent un seuil de protection totale à respecter. Si le potentiel est au-dessous de ce seuil on est dans le domaine d'immunité et s'il est au-dessus ça indique que le courant fournie est inférieur au nécessaire et qu'on a une protection partielle [2].

II.5. Potentiel et courant de protection

II.5.1. Le potentiel de protection :

E_{prot} , définit la valeur limite du potentiel à laquelle le taux de corrosion devient suffisamment faible pour être considéré comme négligeable. Pour protéger un métal contre la corrosion, il est donc polarisé cathodiquement de sorte que : $E_{\text{metal}} < E_{\text{prot}}$

Le potentiel de protection E_{prot} est défini par l'équation de Nernst :

$$E_{\text{prot}} = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln ([X^-]) \text{ mol/l}$$

Tel que $[X^-]$ est la concentration des ions du métal dans la solution. Pour le cas du fer la valeur conventionnelle est prise $[10^{-6}]$, le potentiel à température ambiante (25 C) est :

$$E_{\text{prot}} = E^\circ - 0,354/n$$

Selon ces valeurs, le potentiel de protection de l'acier est égal à -0,62 V, celui du cuivre est de 0,16 V et celui du plomb est de 0,30 V [2].

II.5.2. Le courant de protection

I_{prot} est le courant cathodique qu'il faut appliquer pour imposer le potentiel de protection. La valeur du courant de protection est proportionnelle à la surface à protéger 'S' et à la densité de courant de protection i_{prot} , qui dépend de la cinétique de l'électrode.

$$I_{\text{prot}} = i_{\text{prot}} * S$$

Étant donné que la densité du courant anodique partiel est négligeable au potentiel de protection, i_{prot} est égal à la densité du courant cathodique partiel i_c au potentiel $E = E_{\text{prot}}$. L'équation de Butler-Volmer permet d'obtenir la densité du courant de protection i_{prot} :

$$i_{\text{prot}} = i_c = -i_{\text{corr}} * \exp[-(E_{\text{prot}} - E_{\text{corr}})/\beta] ; \text{ tel que } \beta \text{ est un coefficient lié au transfert de charge}$$

Si le transport de masse d'oxygène limite la cinétique de la corrosion plus que l'équation Butler-Volmer, la densité du courant de protection correspond à la densité du courant limite d'oxygène i_{o2} [2].

En pratique, la protection cathodique est souvent plus utilisée en combinaison avec un revêtement organique. La protection cathodique ne sert alors qu'à prévenir la corrosion aux endroits où le revêtement présente un défaut (pores, rayures, etc.).

II.6. Influence du milieu

Le seuil de protection cathodique dépend du milieu avec lequel l'équipement est en contact. Il est toutefois difficile de définir théoriquement le seuil de protection cathodique d'un métal dans un milieu donné (impossibilité de tracer avec précision la courbe individuelle de polarisation anodique, calcul thermodynamique basé sur l'hypothèse d'équilibre de la teneur en cation métallique avec le métal dans le milieu corrosif). Les critères pratiques sont donc basés sur l'expérience pour contrôler la corrosion d'une surface métallique en transformant cette surface en la cathode d'une cellule électrochimique [5].

La densité de courant nécessaire à l'obtention du seuil de protection est en fonction du matériau à protéger (nature de l'équipement, présence d'un revêtement...) et des paramètres physico-chimiques de l'électrolyte au contact de celui-ci (corrosivité du milieu...). Il faut également considérer le facteur temps (présence de dépôts pouvant se réduire, dégradation des revêtements...). Ainsi, pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, la densité de courant peut varier sensiblement au cours du temps. Exemple : dans l'eau il se forme des dépôts calco-magnésiens (sorte de dépôt calcaire offrant une protection supplémentaire). Pendant que la surface du métal se recouvre d'un film protecteur, la valeur du courant de polarisation baisse, comme le cas des fonds marins [5].

Tableau II.1 : Variation du courant de protection dans différents sols [5]

Milieu électrolytique	Densité de courant Sols :
a) Sol sec	10 mA/m ²
b) Sol humide agressif	Jusqu'à 30 mA/m ²
Acier enrobé de béton :	
a) béton de bonne qualité	0,1 mA/m ² (prévention)
b) béton dégradé	1 mA/m ² 10 mA/m ² (curatif)
Eaux douces :	
a) eau froide en mouvement	150 mA/m ²
b) eau chaude aérée	50 mA/m ²
Eau de mer	60 à 220 mA/m ²
Fonds marins	25 mA/m ² (initial) 20 mA/m ² (maintien)

II.7. Courant imposé ou anode sacrificielle

Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, on utilise une anode installée dans le même électrolyte. Les anodes peuvent être de deux types :

- Soit des anodes couplées à un générateur de courant imposant une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à courant imposé) « ICCP ».
- Soit des anodes ayant un potentiel plus électro négatif que le métal à protéger (anode galvanique ou sacrificielle) « SACP »,

Le choix d'un système par rapport à un autre doit être établi en tenant compte des comparaisons techniques et des critères économiques (conception, équipement, installation, maintenance, consommation en matière et en énergie) selon le tableau suivant :

Tableau II.2 : Critères de choix entre anode sacrificielle et courant imposé [5]

	Système à courant imposé	Anode galvanique ou sacrificielle
Complexité de l'installation	Complexe	Simple
Distribution du courant sur la structure	Souvent hétérogène	
Influence de la résistivité du milieu	Pas de difficulté	Non envisageable si la résistivité est trop grande
Débit par anode	Elevé	Faible
Nombre d'anodes	Faible	Important
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation facile	Adaptation possible à travers une liaison résistante
Risque de surprotection	Possible	Pratiquement aucun
Interférence avec d'autres structures	Possible	Non
Risques humains	Possible	Non
Surveillance	Surveillance fréquente	Aisée et occasionnelle

II.8. Protection par courant imposé

Le courant de protection fourni à la structure est injecté à partir d'une source DC dans le système de courant imposé. Ainsi, le déversoir agit comme une anode et se corrode à peine dans le système imposé.

L'alimentation directe est obtenue à partir d'un transformateur redresseur conçu pour abaisser la tension alternative normale du secteur, puis la redresser en courant continu. Cette sortie est réglable sur une large plage pour répondre aux besoins. Une boîte de commutation est installée dans le circuit AC et contient un disjoncteur magnétique ou thermique pour protéger le redresseur contre les surcharges.

La borne négative de l'ensemble redresseur est connectée à la structure et la borne positive à l'anode déversoirs. Les électrons provenant du redresseur entrent dans toute structure à protéger. Les anodes sont placées dans une tranchée, appelée lit de mise à la terre. En pratique, les anodes sont placées dans le sol ayant la résistivité la plus faible. Les fils individuels d'anode sont amenés dans

une boîte de jonction et un shunt est inséré dans chaque fil d'anode. La boîte de jonction permet la mesure de la production de courant de chaque anode en déterminant la chute de tension [1].

II.8.1. Anodes pour courant imposé

Fonte à haute teneur en silicium : La production de courant maximale est de 50 A/m² et le taux de consommation est compris entre 90 et 250 g/A/an. Les anodes contenant du Mo sont utilisées dans des milieux à haute température. L'anode est généralement utilisée pour la protection cathodique en terre.

Ferrailles Métalliques : Elles ont l'avantage d'être à bon prix et largement disponibles. Le taux de consommation de tuyaux en acier doux, de rails et de pièces en fonte varie. Pour les ferrailles d'acier doux, le taux de consommation est de 6,6 à 9,0 kg/A/an, et pour la fonte, le taux est de 0,9 à 9,0 kg/A/an. Le matériau est principalement disponible sous forme de sections longues et minces et en fonction de la position horizontale ou verticale.

Anodes en graphite : Elles présentent les avantages d'une protection contre la corrosion à longue durée de vie, d'un faible coût d'entretien et d'une grande efficacité. La densité de courant typique est comprise entre 10,8 et 40,0 A/m². Le taux de consommation est compris entre 0,225 et 0,45 kg par an. Elles sont généralement de forme cylindrique, bien que d'autres formes soient disponibles.

Titane platiné : Ces anodes sont utilisées pour l'eau salée ou douce où la conductivité est très faible. Le titane développe une couche d'oxyde protectrice. [1]

II.9. Protection par anode sacrificielle

Lorsque des ouvrages métalliques souffrent de corrosion qui prend la forme d'une lente dissolution ou une forme d'avantage localisée (piqûres, chancres), on peut arrêter ces évolutions en associant ces ouvrages à des anodes sacrificielles et qui selon le courant électrique qu'elles vont débiter rendront d'avantage négatif le potentiel moyen des couples de corrosion, les amenant dans le domaine de l'immunité. [6]

Les qualités premières des anodes sacrificielles seront, quelle que soit leur nature :

- Leur degré d'électronégativité, mesuré au moyen d'une électrode de référence, dans le milieu d'utilisation : à vide ou en charge (sous une densité anodique de 100 mA/dm² par exemple) ;
- Leur résistance à la passivation, dans les conditions de l'emploi : ces électrodes auxiliaires seront utilisées en situation anodique pendant toute la durée de leur service ;
- Leur contenu énergétique exprimée en Ah / kg : cette valeur permettant de calculer leur durée de vie ;
- Leur degré de non nocivité pour le milieu ambiant (lente dissolution des composants de l'anode et leur dispersion) ou pour l'exploitation (dégagement de gaz en cours de fonctionnement).

II.9.1. Anode à base de magnésium

L'alliage le plus courant est le G-A6Z3. Les impuretés doivent être réduites à des valeurs maximales : 0,003 % pour Fe ; 0,005 % pour Cu ; 0,1 % pour Si. Le Mn peut être utilisé entre 0,15 et 0,3 %. Pour certaines applications (cuves susceptibles de recevoir périodiquement des hydrocarbures blancs), on a réduit le zinc à moins de 0,1 % (G-A6M). Mais les rendements de ces alliages, en dépendance du milieu, sont variables et doivent être indiqués par les fabricants. Pour les projets, on adoptera les paramètres suivants [6] :

- $E_{\text{charge}} / (\text{Ag}/\text{AgCl}) : -1,4 \text{ V (eau de mer)}$;
- Capacité : 1 400 Ah/kg ;
- Consommation : 8 kg / (A · an) ;
- Densité : 1,9.

II.9.2. Anode à base d'aluminium

Il existe maintenant de nombreux alliages proposés sur le marché, se divisant approximativement en deux classes : les anodes à rendement médiocre et les anodes à haut rendement. Il est donc démontré que l'on peut fabriquer de bonnes anodes à base d'aluminium et que l'on peut profiter de sa trivalence pour obtenir des électrodes sacrificielles très intéressantes. On pourra adopter les paramètres suivants pour les anodes à haut rendement [6] :

- $E_{\text{charge}} / (\text{Ag} / \text{AgCl}) : -1,05 \text{ V (eau de mer)}$;
- Capacité : 2 900 Ah/kg ;
- Consommation : 3,4 kg / (A · an) ;
- Densité : 2,6 à 2,75.

II.9.3. Anode à base de zinc

Deux types d'alliages à base de zinc peuvent être envisagés, le second donnant lieu à une dissolution plus régulière en surface : Alliage Z A 0,5 Cd 0,15 (le fer étant tenu inférieur à 0,005 %) ; Alliage Z Hg 0,15 (le fer est ici tenu à moins de 0,001 4 %). Le zinc de base de ces anodes est à 99,995 %. On peut aussi employer des anodes en zinc extra pur. Les paramètres à retenir pour ces anodes sont [6] :

- $E_{\text{charge}} / (\text{Ag} / \text{AgCl}) : -0,94 \text{ V (eau de mer)}$;
- Capacité : 780 Ah / kg ;
- Consommation : 13 kg / (A · an) ;
- Densité : 7,13.

II.10. Paramètres de dimensionnement du système de protection cathodique

L'exigence de base en matière de conception pour la protection cathodique est le choix de la densité de courant par mètre carré de la surface à protéger. Le choix de la densité de courant peut varier de l'ordre de 1A/m² pour une structure nue dans l'eau jusqu'à aussi bas que 0,001 mA/m² pour des structures bien revêtues ou des structures à haute résistivité. Pour estimer les besoins en courant, la connaissance de la résistivité du sol est d'une importance primordiale. En général, la quantité de courant varie en fonction du type de sol et de la qualité du revêtement. Les besoins en courant pour une structure non revêtue peuvent être jusqu'à soixante-dix fois supérieurs aux besoins en courant pour une structure revêtue. [1]

Tableau II.3 : Classification de la corrosivité des sols selon leur résistivité [1]

Résistivité du sol	Tendance à la corrosion
0-10 ohm.m	Très corrosif
10-30 ohm.m	Corrosif
30-50 ohm.m	Légèrement corrosif
>100 ohm.m	Très faible

Le tableau suivant donne des résistivités de divers sols :

Tableau II.4 : Les résistivités des milieux fréquemment utilisés [1]

Milieux	Résistivité moyenne des milieux
Sable ou gravier	500 Ω .m
Eau douce	50 Ω .m
Argile	10 Ω .m
Eau de mer	0.3 Ω .m
Goudron	10 à 10 000 Ω .m

Tableau II.5 : Exemple divers de sols corrosifs et non corrosifs [1]

Corrosif	Non corrosif
Eau saumâtre	Faible teneur en humidité
Mal aéré	Bien aéré
Très acide ou très basique	Neutre ou légèrement acide
Présence de sulfures	Présence de sulfates
Couleur noire ou grise	Couleur rouge ou brune
Micro-organismes anaérobies	Micro-organismes aérobies
Sol avec une forte teneur en sel	Sol sec

Le tableau suivant (considérer comme référence pour avoir une idée approximative sur le courant nécessaire) donne des densités de courant selon le pH du sol pour un acier nue.

Tableau II.6 : Les valeurs de courants de protection pour divers sols [1]

L'environnement	mA/m ²
Sol neutre	4,5-16
Sol neutre bien aéré	21,5-32
Sol très acidifié	32-160
Sol à base de sulfate	65-450
Sol chauffé	32-270
Eau douce stationnaire	11-65
Eau douce oxygénée, En mouvement	54-160
Eau de mer	32-110

Tableau II.7 : Influence du revêtement sur le courant de protection [2]

Surface protégé	Environnement	I (mA) prot
Acier nue	Terre	10 – 50
Acier recouvert avec 2 mm de polyethylene	Terre	5×10^{-4}

Chapitre III :
Méthodes et analyses de l'étude

III.1. Introduction

Avec le développement rapide de l'industrie pétrochimique, les bacs de stockage jouent un rôle de plus en plus important, ce sont des réservoirs de grande dimension servant à stocker le pétrole brut et ses sous-produits (ses dérivés) ainsi que les additifs chimiques. Les bacs de stockage sont souvent de forme cylindrique, perpendiculaire au sol avec des fonds plats, et un toit fixe ou flottant. Le site industriel de méthanol et résine *CP1Z d'ARZEW* de la « SONATRACH » comporte 2 bacs de stockage de méthanol, de la corrosion peut être observée à l'intérieur du bac, qui est dû aux produits contenus dedans, mais aussi à l'extérieur du bac en gardant à l'esprit que la plupart de ces structures sont posées sur le sol ou enterrées.

D'une manière générale, les sols sont très aérés et de l'humidité ce qui provoque, dans la plupart des cas, une dégradation de ces réservoirs. La résistance des fonds de bac de stockage à la corrosion par le sol dépend principalement de la nature de ce dernier et d'autres facteurs environnementaux, tels que l'humidité et l'oxygène. Ces facteurs peuvent conduire à des variations extrêmes de la vitesse de corrosion.

La dégradation des structures métalliques entraîne un gaspillage important de ressources ce qui nécessite d'appliquer un mode de protection pour réduire ces risques à défaut de pouvoir les éliminer totalement. La protection cathodique demeure l'approche la plus importante de la lutte contre la corrosion.

III.2. Présentation du complexe CP1Z

La compagnie nationale des hydrocarbures, SONATRACH, focalise sur le développement de son pôle pétrochimique pour améliorer ses revenus tirés des exportations de pétrole et de gaz. L'un des axes de sa stratégie à moyen terme s'avère être la pétrochimie L'objectif de SONATRACH n'est pas d'exporter du gaz naturel en tant que matière première mais de le transformer en produit pétrochimique pour un gain économique meilleur Ce qui est motivant dans sa stratégie est le développement de la pétrochimie.

Les principaux produits du complexe CP1Z sont le méthanol, formaldéhyde et les résines incolores. Le méthanol possède une odeur agréable, il est miscible dans l'eau et réduit à une pureté supérieure ou égale à 99,85 %, sa masse volumique à 25° C est de 0,7867, sa masse moléculaire est égale à 32 g/mole et sa température d'ébullition est de 64,5°C. Le méthanol est très toxique : 25 à 100 cm³ de méthanol ingéré par l'homme peuvent provoquer sa mort.

L'unité méthanol a une capacité de production de 300 Tonnes/Jour avec apport de CO₂ 340 Tonnes/Jour la synthèse du méthanol se fait par la réaction de l'hydrogène avec l'oxyde de carbone.

III.3. Problématique de l'étude

Une attention particulière est portée aux réservoirs gérés par la compagnie nationale SONATRACH à partir du contexte industriel donné par le service d'inspection du département technique de l'entreprise CP 1Z d'Arzew comprenant des mesures d'épaisseur, de potentiel et des mesures de résistivité du sol ainsi que de pH et tout ce qui est de routine dans l'inspection. L'ARH « Autorité de Régulation des Hydrocarbures » lors de sa dernière visite d'inspection a exigé une nouvelle installation de protection cathodique pour les 2 bacs afin de prolonger leurs durées de vie et par mesure de sécurité contre les potentiels accidents.

Dans notre cas, la corrosion du bac de stockage a 2 origines, corrosion atmosphérique des viroles et des toits des 2 bacs et corrosion du fond qui est en contact avec le sol, il faut considérer aussi la corrosion interne et externe des bacs.

A l'intérieur des bacs, les zones de soudure sont des points sensibles du fait de leur hétérogénéité. Le risque augmente en cas de développement de bactéries sulfates- réductrices (sous les dépôts, en absence d'oxygène, avec présence d'ions sulfates, de préférence à températures de 30 à 60°C). L'eau provenant principalement de la respiration des réservoirs par variations de température, conduisant à la condensation de l'humidité de l'air au-delà du toit flottant. Par ailleurs, ce type de corrosion peut se manifester soit de façon apparente sur le métal nu soit en corrosion sous couche dans le cas de réservoirs possédant un revêtement interne. La corrosion sous couche peut conduire à des vitesses de corrosion élevées de même ordre de grandeur que la corrosion bactérienne et n'est pas toujours facile à détecter, de ce fait elle doit faire l'objet d'une attention particulière lors des contrôles.

Mais dans notre cas, avec des bacs contenant du méthanol (un produit qui n'est pas très corrosif et peut même être considéré comme inhibiteur) qui est aussi recouvert avec le toit flottant éliminant l'évaporation et le contact avec l'humidité donc la situation n'est pas alarmante car on ne trouve qu'une légère corrosion négligeable.

Au niveau externe des viroles et des toits qui sont protégés avec un revêtement triple de peinture : GALZINEPOX 90nm EPOXAMINE 90nm POLYRANE 90nm, on ne trouve pas de corrosion remarquable qu'aux endroits des accessoires tels que les escaliers, les tuyaux, etc... Où il y a eu un seul incident de corrosion par crevasse légère en 2016/17 près d'un accessoire dans l'un des 2 bacs - sur les 48ans de service - qui a été réparé avec un patch soudé (partie de tôle).

La partie qu'on veut protéger le plus est le fond parce qu'on ne peut l'inspecter que durant les arrêts qui sont séparés de longues périodes. Les critères d'acceptabilité de l'épaisseur mesurée des tôles de fond doivent prendre en compte la durée prévue du fonctionnement jusqu'au prochain contrôle. Les codes construction définissent les valeurs minimales acceptables pour les tôles de fond. Sauf dispositions particulières, l'épaisseur minimale des tôles admise est 2,5mm. L'intérieur du fond est en contact avec le méthanol qui se comporte comme un inhibiteur cela diminue le risque de corrosion interne. L'externe est en contact avec le sol qui est formé de plusieurs couches (terre, sable, gravier...) il faut envisager toutes ces couches lors du calcul de la résistivité et du dimensionnement du courant de protection.

III.4. Identification des bacs de stockage 16TK

L'unité CP1Z utilise 2 bacs pour stocker le méthanol après la fin de production et avant l'exportation du produit. La fiche technique du bac est la suivante :

- Site : CP 1Z d'Arzew.
- Fabricant : CAVAZZA PLASTICOVERS -MILANO ;
- Capacité de service net : 12.000 m³ ;
- Produit stocké : méthanol ;
- Diamètre estimatif : 32 000 mm ; Hauteur estimative : 16 500 mm ;
- Type de toit : Flottant simple et fixe avec membrane dia flotte et joint delta-seal ;
- Température : ambiante ;
- Matériaux : ASTM -A 285 ;
- Épaisseur des tôles : 6.35 mm à 16 mm ;
- Code de construction : API 650 ;
- Date de construction : 1974 ; Date de service : 1975.
- Catégories de la tôle : métal ferreux, acier ASTM, acier faiblement carboné, acier non resuluré, acier pour récipients sous pression.



Figure III.1 : les bacs 16 TK1 et TK2

Comme on voit sur les images ci-dessus le bac est divisé sur 10 parties (8 viroles, toit et fond) et soulevé sous une plateforme, selon le schéma suivant :

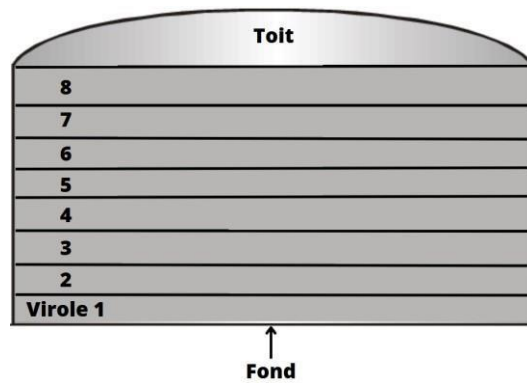


Figure III.2 : Schéma des parties d'un bac de stockage

A l'intérieur du bac, il existe un toit flottant. Ce toit a pour but d'assurer que le fluide à l'intérieur ne s'évapore pas et que tout reste condensé, il est ainsi équipé de plusieurs pieds pour le soulever si le niveau du fluide est très bas, d'un guide anti rotation pour diriger sa position et éliminer le contact avec les viroles et d'un joint à mousse au tour du toit pour éliminer l'évaporation et assurer l'étanchéité entre l'air et le méthanol ; et des tôles zinguées pour éviter les étincelles causées par la friction avec les viroles.

Ces viroles ont une hauteur de 2m avec un anneau ajouté entre la 7eme et 8eme de 0,5m, le toit et le fond ont des épaisseurs différentes et décroissantes du bas vers le haut ainsi que le centre de chaque tôle est superposé au centre de celle qui est au-dessous comme indiqué :

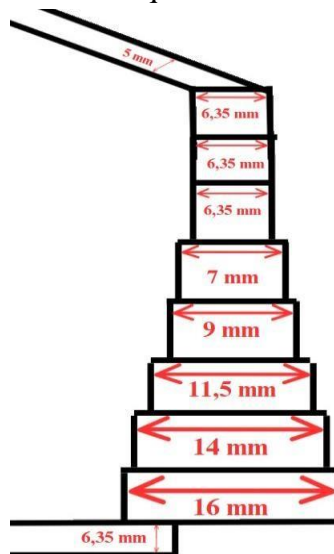


Figure III.3 : Schéma qui démontre les différentes épaisseurs des tôles

Avec les années, plusieurs rapports d'inspections ont été réalisés pour connaître l'état du bac et qui contiennent des prélèvements d'épaisseurs. Pour ces mesures, on utilise un appareil de mesure simple qui se base sur le principe des ondes.



Figure III.4 : Appareil de mesures d'épaisseur

On utilise un appareil « “PMI” ; positive material identification » conçue pour identifier les matériaux sur le champ sans prendre un échantillon au laboratoire, il fonctionne en éjectant des émissions de rayons X, analyser les rayons X et afficher sur un écran connecté le résultat de l'analyse (la nuance et la composition chimique).



Figure III.5 : Appareil PMI

La composition chimique est de :

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier des bacs

C	Fe	Mn	P	S
0,28%	98%	0,9%	0,035%	0,04%

En voyant la composition chimique de notre acier et la teneur du carbone on utilise le diagramme Fe-C pour déduire les phases, la structure et les propriétés mécaniques.

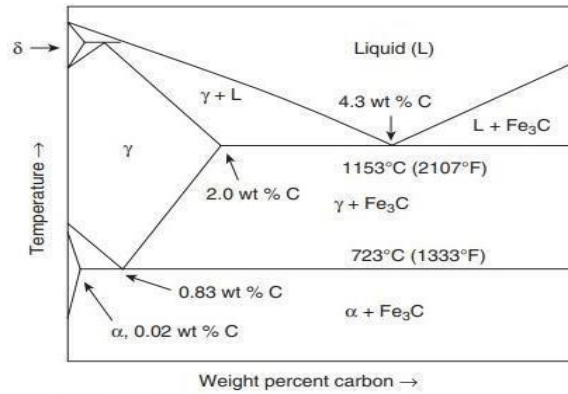


Figure III.6 : Diagramme Fe-C [7]

Notre acier A285 C appartient aux aciers Ferrito-perlitique (matrice ferritique avec des îlots de perlite) présentent une limite d'élasticité élevée avec des potentialités d'allongement importantes.

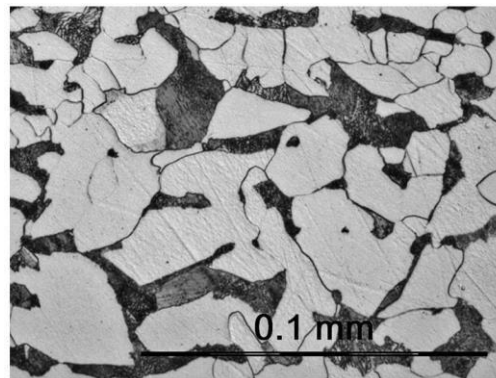


Figure III.7 : Micrographie de l'acier A285 C [7]

Les propriétés mécaniques de notre acier sont :

- Résistance à la traction : 380 – 515 MPa
- Limite d'élasticité : 205 MPa
- Allongement : 23%

III.5. Conclusion

C'est pour cela que nous avons choisi d'étudier tous les rapports d'inspections et de voir le développement de l'état (les dégradations) du bac pour :

- Estimer le taux de dégradation qu'ont subi les 2 bacs,
- Conclure à quel point il faut qu'ils soient protégés (courant de protection, potentiel, masse d'anode...)
- Dédire le choix optimal entre courant imposé et anode sacrificielle.

D'habitude, les installations de protection sont à placer avant la construction d'un bac. Mais dans notre étude, les bacs sont en plein service ce qui pose un problème de faisabilité de placer l'installation et l'adapter d'une telle façon que le bac reste en marche pendant les travaux.

Chapitre IV :
Présentation des résultats

IV.1. INTRODUCTION

Nous présentons ici les calculs effectués sur le site d'Arzew. Avant d'envisager la méthode de protection cathodique par courant imposé ou anode sacrificielle, il est indispensable d'effectuer une étude préalable du sol sur lequel est déposé le bac de stockage comprenant la résistivité et le pH du sol. Ces deux paramètres nous permettent de définir le degré de corrosivité du sol.

Il faut étudier l'évolution d'état des bacs et le niveau de dégradation subi, pour faire un calcul de vitesse de corrosion en utilisant les pertes d'épaisseur à court et long terme et en déduire le courant de corrosion. Tout cela mènera vers une meilleure compréhension de la corrosion de nos bacs et une solution plus efficace.

IV.2. RESISTIVITE DU SOL

Définition : C'est l'imperméabilité du sol envers le passage du courant. Le sol est un milieu hétérogène, rarement homogène. La conduction du courant se fait dans des sols mouillés ou des conducteurs solides, et cela se traduit par le passage du courant à travers les ions ou les électrons libres. C'est la conduction de l'électrolytique.

La valeur de conductivité dépend de la nature des ions présents (en fonction de la différence d'activité électrique) et de leur concentration. Certains sols solides, composant de la terre, est électriquement isolée (dans le cas du sable pur d'une composition chimique de SiO₂), ou à l'inverse à l'état conducteur dans le cas du sol argileux.

La résistivité du sol s'exprime selon la relation suivante [8] :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R ; \text{Où:}$$

ρ : Résistivité moyenne du sol en $\Omega \cdot m$

R : Résistance moyenne du sol en profondeur d'enfoncement des piquets.

a : espacement entre les piquets 15fois sup à profondeur piquets

On peut réaliser deux essais pour déterminer la résistivité du sol en utilisant la méthode Wenner (la plus utilisé dans l'industrie), ces essais sont réalisés en mettant des piquets dans la terre, éloignés de la même distance et de mesurer le potentiel entre chaque 2 piquets pour un courant injecté et ça nous permettra de déduire la résistivité. Les essais peuvent être effectués horizontalement ou verticalement.

Le premier est effectué en position horizontale avec les paramètres suivants :

On prend la profondeur de mesure de la résistivité de l'ordre de 0.3 m

a = 2.8 m; R = 1.15 Ω mesuré sur le site; $\pi=3.14$.

En remplaçant dans l'expression, on détermine la résistivité du sol :

$$\rho = 2 * 3.14 * 4.5 * 1.15 = 20.2 \Omega m$$

Le second essai est effectué en position verticale avec la même loi :

Avec : $a = 2.8 \text{ m}$; $R = 1.2 \Omega$ mesuré sur le site ; $\pi = 3.14$

$$\rho = 2 * 3.14 * 2.8 * 1.2 = 21.11 \Omega.m$$

Les sols à faible résistivité sont plus corrosifs que les sols à haute résistivité ; notre sol ayant environ une résistivité moyenne de $\rho = 20,65 \Omega.m = 2065 \Omega.cm$. Il faut cependant noter une augmentation de 2.5 % dans le courant qui passe dans le sol pour chaque degré à partir d'une température supérieure 30°C.

Mais dans notre cas le bac est déposé sur un anneau de béton rempli à l'intérieur avec 3 couches : la première avec une hauteur 'h1' de « terre » dont on vient de calculer la résistivité ; recouverte d'une couche 'h2' de 10cm de « sable et gravier compacté » et enfin une couche 'h3' de 5cm de « sable + goudron + gravier ».

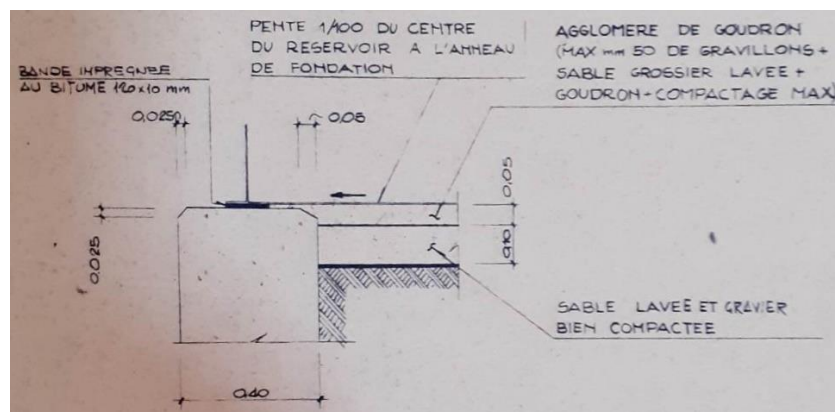


Figure IV.1 : Schéma de construction de la structure sous le bac

Une fois que la résistivité de chaque couche est connue et mesurée, il faut calculer la résistivité du sol en prenant en compte la proportion de chaque couche dans le sol. Pour cela, on utilise une formule qui prend en compte la résistivité de chaque couche et sa proportion dans le sol. Cette formule est :

$$\rho_s = (\rho_1 \times h_1 + \rho_2 \times h_2 + \rho_3 \times h_3) / h_{total} ;$$

où :

- ρ_s est la résistivité du sol
- ρ_1 , ρ_2 et ρ_3 sont les résistivités des couches (terre, sable + gravier, sable + gravier + goudron) on prend les valeurs du **Tableau II.4**
- $h_1=1,35\text{m}$; $h_2=0,1\text{m}$; $h_3=0,05\text{m}$ sont les épaisseurs de chaque couche
- $h_{total}=1,5\text{m}$ est l'épaisseur totale du sol

$$\rho_s = (20,65 \times 1,35 + 500 \times 0,1 + 2000 \times 0,05) / 1,5 ;$$

$$\rho_s = 118,58 \Omega.m$$

Donc la résistivité du sol directement sous le bac a une moyenne de 118,58 $\Omega.m$, ce paramètre indique une faible corrosivité d'après le tableau **II.3**.

IV.3. pH du sol

Le pH du sol est une référence à l'acidité ou à l'alcalinité du sol. Les données expérimentales indiquent qu'un milieu hautement alcalin réduit la résistivité du sol. Autrement dit, le milieu devient plus agressif. En revanche, les milieux faiblement alcalins sont peu corrosifs. Les sols d'un pH inférieur à 5 peuvent engendrer des taux de corrosion élevés et une corrosion par piqûre. Le pH égal à 7 est la valeur pour minimiser le risque de corrosion.

Travaillant suivant la norme « ASTM D 1293 », on prend 5 prélèvements de 5g de terre et on les dissout dans 1litre d'eau distillée, on agite et mesure le pH.

Tableau IV.1 : les valeurs de pH mesurées pour différents points de Prélèvement du sol

N	1	2	3	4	5
pH	9,4	9,1	9,3	9,1	9,1

La valeur moyenne du pH est de 9.2, comme on a un pH> 9 donc le milieu est basique, ce paramètre indique un sol corrosif d'après le tableau **II.5**.

A l'introduction de ce chapitre on a établi que la corrosivité d'un sol peut être déterminé à l'aide de 2 paramètres : la résistivité et le pH. D'après les résultats, une résistivité de 120 Ohm.m permet une faible corrosivité et une valeur moyenne de pH est égale à 9,2 permet un sol basique corrosif donc :

On constate que la nature du sol de CP 1Z d'Arzew-Oran étudié est corrosive.

IV.4. Analyse de l'atmosphère d'Arzew

Lors des années, plusieurs enquêtes sur la qualité de l'atmosphère à Arzew ont été réalisées à cause des émissions de la zone industrielle, ces enquêtes portaient sur les polluants atmosphériques, leurs quantités, leurs dangers, etc... La plus récente nous donne les valeurs suivantes [9] :

- CO₂ des émissions de 11 - 12 millions tonnes/an ;
- NO_x des émissions de 2 – 2,5 millions tonnes/an ;
- SO₂ une concentration de 65 µg /m³ en 24 heures.

Ces valeurs indiquent un certain degré de corrosivité de l'atmosphère qui va affecter nos bacs.

IV.5. Vitesse de corrosion

IV.5.1. Théoriquement :

Un certain nombre de relations permettant de corréler la perte de masse ou la profondeur d'attaque de la corrosion sur un métal avec les paramètres environnementaux a été proposé pour chaque métal ou alliage. Suite à l'existence du SO₂ dans l'atmosphère, Barton suggère la relation suivante pour la vitesse de corrosion des aciers [10] :

$$V = 0,0152 * (TOW)^{0,428} * (V_{SO_2})^{0,57} ; \text{ avec :}$$

V : (g/m².j) vitesse de corrosion,

TOW : (h/ j) durée de persistance de l'humidité,

V_{SO₂} : (mg_{SO₂}/m².j) vitesse de dépôt de SO₂.

Tableau IV.2 : Classification de l'air ambiant en fonction de TOW [10]

Valeur de TOW	Classe de l'air ambiant
TOW < 10	T1
10 < TOW < 250	T2
250 < TOW < 2500	T3
2500 < TOW < 5500	T4
5 500 < TOW	T5

Tableau IV.3 : Vitesse de dépôt d'espèces sulfuriques selon le type d'atmosphère [11]

Type d'atmosphère	Vitesse de dépôt ($\text{mgSO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{j}$)
Rurale	< 10
Urbaine	10 à 100
Industrielle	Jusqu'à 200

Donc la vitesse en envisageant les conditions de l'air est de :

$$V = 0,0152 * (50)^{0,428} * (200)^{0,57} = 1,66 \text{ g/m}^2 \cdot \text{j} = 0,07 \text{ mm/an}$$

La Vitesse de corrosion de notre acier dans un atmosphère comme celui de CP1Z est d'environ 0,07 mm/an. Une telle vitesse est auxiliaire à un courant de corrosion d'environ 54 mA/m².

IV.5.2. Pratiquement

Les rapports d'inspection ne contenaient pas toujours des prélèvements d'épaisseur ; dans ceux contenant assez d'informations nous avons pris un intervalle des 15 dernières années, surtout que les conditions climatiques ont changé par rapport aux temps plus anciens. Ces mesures d'épaisseurs ont été réalisées à l'aide de l'appareil à onde sonore digitale qui affiche l'épaisseur directement. Pour effectuer une mesure, on gratte les couches de peinture parce qu'il faut que la sonde soit posée sur le métal nu sinon l'onde rebondira sur la peinture seulement.

On définit ces unités pour effectuer un tableau de calcul de la vitesse de corrosion :

- e_0 : épaisseur initiale théorique ;
- $e_{0\text{max}}$: épaisseur mesurée le jour de mise en service ;
- $e_{20^{**}}$: épaisseur mesurée dans l'année indiquée ;
- Moy/ans : moyenne de perte entre les 8 viroles ;
- Moy S : moyenne entre les 8 viroles et le toit ;
- Δe_{global} : perte d'épaisseur entre e_{annuel} et e_{max} ;
- Δe_{annuel} : perte d'épaisseur entre une année et sa précédente ;
- V_s : vitesse de corrosion surface extérieure ;
- V_f : vitesse de corrosion du fond ;
- I_s : courant de corrosion de la surface extérieure ;
- I_f : courant de corrosion du fond.

Tableau IV.4 : Prélèvement des épaisseurs de plusieurs points sur les 15ans

Surface	e ₀	e _{max}	e 2021	e 2020	e 2018	e 2017	e 2016	e 2015	e 2012	e 2011	e 2010	e 2009	e 2008
Virole 1	16	16,5	15,3	15,1	15	15,1	15,1	15,4	15,4	15,4	15,5	15,7	
Virole 2	14	14,3	13,7	13,93	13,5	13,6	14,2	14,1	13,7	13,7	13,7	13,6	
Virole 3	11,5	12,2	11,4	11,6	11,5	11,4	11,5	11,2	11,2	11,2	11,2	11,3	
Virole 4	9	9,2	8,8	8,9	8,8	8,9	9	9	9	9	8,9		
Virole 5	7	7,3	6,8	7,1	7,1	7	7	7	6,9	6,9	7		
Virole 6	6,35	6,7	6,3	6,2	6,2	6,2	6,2	6,4	6,4	6,4	6,4		
Virole 7	6,35	6,7	6,3	6,25	6,2	6,3	6,3	6,5	6,4	6,5	6,5		
Virole 8	6,35	6,6	6,3	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3		
Moy/ans		9,95											
Toit	5	5,7	4,8		5	5	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	4,9	5,2
Moy S		7,8											
Fond	6,35	6,9			6	6,1						6,3	6,39

Tableau IV.5 : Pertes d'épaisseurs globale de plusieurs points sur les 15ans

Surface	e _{0max}	Δeg 21	Δeg 20	Δeg 18	Δeg 17	Δeg 16	Δeg 15	Δeg 12	Δeg 11	Δeg 10	Δeg 09	Δeg 08	Max Δeg
Virole 1	16,5	1,2	1,4	1,5	1,4	1,4	1,1	1,1	1,1	1	0,8		1,5
Virole 2	14,3	0,6	0,37	0,8	0,7	0,1	0,2	0,6	0,6	0,6	0,7		0,8
Virole 3	12,2	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	1	1	1	1	0,9		1
Virole 4	9,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3			0,4
Virole 5	7,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3			0,5
Virole 6	6,7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3			0,5
Virole 7	6,7	0,4	0,45	0,5	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2			0,5
Virole 8	6,6	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3			0,3
Moy/ans	9,95	0,575	0,5025	0,6	0,575	0,475	0,4375	0,5125	0,5125	0,5	0,8		0,8
Toit	5,7	0,9		0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,5	0,9
Moy S	7,8	0,7375	0,135	0,65	0,6375	0,6375	0,6188	0,7063	0,6563	0,65	0,83	0,25	0,83
Fond	6,9			0,9	0,8						0,6	0,51	0,9

Tableau IV.6 : Pertes d'épaisseurs annuelle de plusieurs points sur les 15ans

Surface	e _{0max}	Δea 21	Δea 20	Δea 18	Δea 17	Δea 16	Δea 15	Δea 12	Δea 11	Δea 10	Δea 09	Moy Δea
Virole 1	16,5	0,2	0,05	0,1	0	0,3	0	0	0,1	0,2		0,105
Virole 2	14,3	0,23	0,215	0,1	0,6	0,1	0,4	0	0	0,1		0,1939
Virole 3	12,2	0,2	0,05	0,1	0,1	0,3	0	0	0	0,1		0,0944
Virole 4	9,2	0,1	0,05	0,1	0,1	0	0	0	0,1			0,05625
Virole 5	7,3	0,3	0	0,1	0	0	0,1	0	0,1			0,075
Virole 6	6,7	0,1	0	0	0	0,2	0	0	0			0,0375
Virole 7	6,7	0,05	0,025	0,1	0	0,2	0,1	0,1	0			0,0719
Virole 8	6,6	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0			0,025
Moy/ans	9,95	0,16	0,0487	0,075	0,1	0,1375	0,075	0,025	0,0375	0,133		0,088
Toit	5,7			0	0,1	0	0,1	0,1	0	0	0,3	0,075
Moy S	7,8	0,126	0,044	0,0375	0,1	0,0688	0,0875	0,0625	0,0187	0,067		0,084
Fond	6,9			0,1							0,09	0,095

On remarque que la perte d'épaisseur diffère d'une année à une autre, parfois c'est sévère et d'autres fois c'est négligeable. C'est pour cela qu'on a calculé la perte annuelle et globale pour prendre en considération les changements climatiques d'une année à une autre ainsi que la perte à long terme. Certaines années ont une grande perte d'épaisseur suivie d'une perte légère qu'on interprète par la couche d'oxyde qui se forme devient protectrice avant qu'elle ne se dégrade et la corrosion reprenne.

Aussi on remarque que les pertes sont plus grandes dans les viroles inférieures par rapports aux supérieurs dues aux contraintes mécaniques qui s'imposent du liquide et des tôles superposés simultanément, dans le toit parce qu'il est plus susceptible à rester mouiller plus que les autres surfaces et le fond car il est en contact avec un sol corrosif et l'appui constant du liquide crée des contraintes qui accélère la corrosion, d'un autre coté cette action répétitif du fond qui fait une légère parabole vers le bas quand le bac est plein affecte les couches du sol au-dessous qui va probablement fissurer la 1ere couche de goudron protectrice et mélanger la couche du sable avec celle de terre basique, chose qui diminue la résistivité du sol et augmente la corrosivité.

On prend les pertes d'épaisseurs pour calculer la vitesse annuelle et à long terme.

Tableau IV.7 : Vitesse de corrosion du fond et de la surface extérieure

	15ans	Annuel	e moy	% Δe perdu
Δe Viroles	0,8	0,088	9,95	13 %
Δe Toit	0,9	0,075	5,7	18 %
Δe Moy S	0,83	0,084	7,8	10 %
Δe Fond	0,9	0,095	6,9	21 %
Vs=Δe/Δt	0,053	0,099		
Vf	0,06	0,095		

Suite au changement climatique récent qui a fait que ces 15 dernières années soient très humides, la vitesse est plus intense annuellement que sur le long terme. Avec ce dernier tableau on a confirmé qu'on perd nettement plus d'épaisseur sur le fond et le toit que sur les viroles.

IV.6. COURANT DE PROTECTION

Avant qu'on effectue le calcul, il faut établir les données nécessaires :

$$S_{\text{ext}} = S_{\text{toit}} + S_{\text{viroles}} = \pi * r * l + \pi * r^2 + 2\pi * r * h \quad ; \quad S_{\text{f}} = \pi * r^2$$

Tableau IV.8 : Les différents éléments pour le calcul de courant

S _{ext} (m ²)	3282,33
S _{fond} (m ²)	804,25
ρ (g/m ³)	7,8 * 10 ⁶
M (g/mol)	55,25
F (c/mol)	96485
n	2
1 an	365*24*3600 s
Δe (mm)	10 ⁻³ m

La loi de Faraday lie la vitesse de corrosion au courant de corrosion :

$$I = V \cdot (nFS\rho) / M$$

n: nombre électron / F: constante faraday / S: surface / ρ : masse volumique / M: masse atomique

Ainsi que la densité est : $i = I / S$

Tableau IV.9 : Les courants de corrosion du fond et la surface extérieure

	15ans	Annuel
V_{toit} (mm/an)	0,06	0,075
V_{viroles} (mm/an)	0,053	0,088
V_{fond} (mm/an)	0,06	0,095
i_{toit} (mA/m²)	51,8	64,78
i_{viroles} (mA/m²)	45,78	76,02
i_{fond} (mA/m²)	51,83	82,07

Tenant compte du taux de perte d'épaisseurs : 21% pour le fond et 18% pour le toit et voyants les courants de corrosion calculés qui sont presque identiques, on peut conclure que le courant de corrosion globale qui affect notre structure métallique est de 52 mA/m².

Afin d'avoir le courant de protection, il faut établir le diagramme de polarisation en suite l'extrapolation de Tafel. Pour la réaction globale « $Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$ », la densité de courant est donnée en valeur absolue par : $i_{globale} = i_c - i_a$

D'après Faraday « $i = nFv$ », ce qui donne : $i_{globale} = nF \cdot (v_c - v_a)$

n : nombre d'électrons en jeu ; F : constante faraday ; v : vitesse de corrosion.

v est proportionnelle à la concentration par la loi : $v = K \cdot C$;

k est la constante de concentration tel : $K = K' \cdot \exp(-\Delta G^* / RT)$; avec la constante $K' = kT/h$; k, constante de Boltzmann ; h, constante de Planck ; R, constante des gaz parfaits.

La densité de courant anodique i_a s'écrit donc : $i_a = nFK' C_{Fe} \cdot \exp[-(\Delta G_a - \alpha nFE) / RT]$, Pareil la densité de courant cathodique s'écrit : $i_c = nFK' C_{Fe^{2+}} \cdot \exp[-(\Delta G_c + (1-\alpha)nFE) / RT]$.

En remplaçant dans l'équation de départ : $i_{globale} = i_c - i_a$, on aura donc :

$$i_{globale} = i_0 \cdot [\exp([E - E_{eq}] / \beta_a) - \exp([E - E_{eq}] / \beta_c)]$$

C'est l'équation de Butler-Volmer. Tels que :

$$\beta_a = RT / \alpha nF = 0,013 / \alpha \quad ; \quad |\beta_c| = |RT / -(1-\alpha)nF| = |0,013 / -(1-\alpha)|.$$

Dans de telles conditions α « coefficient de transfert de charge » a une valeur de 0,1 à 0,5 dans l'atmosphère. Nous envisageons un milieu légèrement alcalin (sol avec 9,2 pH et l'atmosphère qui contient du SO₂ rend le film d'eau qui couvre la surface du bac plutôt basique) cela permettra un transfert de charge un peu plus facile, on prend une valeur de α à 0,4 ; on aura lesvaleurs suivantes :

$$\beta_a = 32,5 \text{ mV} ; |\beta_c| = 21,6 \text{ mV}.$$

Aussi on a :

$$E = E_{\text{corr}} + 2,3 \cdot \beta_a \cdot [\log(I_{\text{app}}) - \log(I_{\text{corr}})] = E_{\text{corr}} - 2,3 \cdot \beta_c \cdot [\log(I_{\text{app}}) - \log(I_{\text{corr}})]$$

$$\Delta E = E_{\text{app}} - E_{\text{corr}} = \beta_a \cdot \log(i_a/i_{\text{corr}}) = -\beta_c \cdot \log(i_a/i_{\text{corr}}); \quad \beta_c = 2,3 \cdot \beta_a$$

Nos données sont :

- $I_{\text{corr}} = i_{\text{corr}} \cdot S = 212 \text{ A}$
- $E_{\text{corr}} = -0,617 \text{ V}$
- $\beta_a = 32,5 \text{ mV/décade}$
- $|\beta_c| = 21,6 \text{ mV/décade}$

On utilise le logiciel « EC LAB » un logiciel qui va nous dessiner le diagramme de polarisation et l'extrapolation de Tafel. On aura :

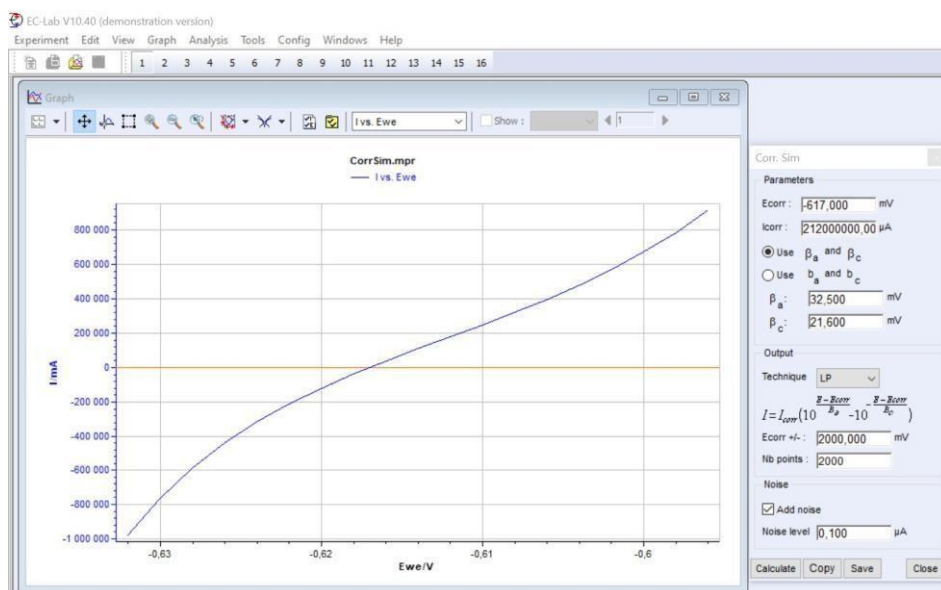


Figure IV.2 : Diagramme de polarisation de la réaction de notre structure

On continue par analyser le graphe avec les options de ‘Analysis’ et ‘TafelFit’ qui va donner :

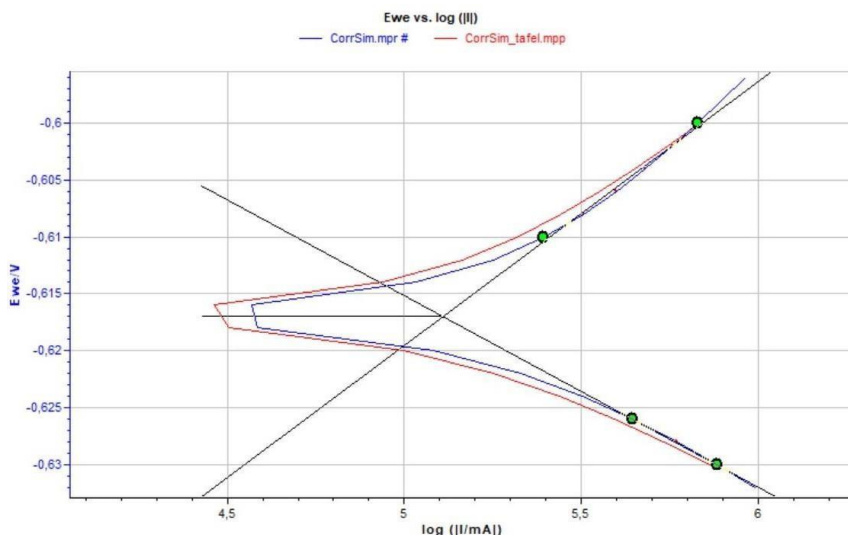


Figure IV.3 : Extrapolation de Tafel

De ce résultat on calcule le courant de protection cathodique total qui est sous la loi :

$$I_{\text{PC}} = I_{\text{sol}} - I_{\text{metal}}$$

A $E=E_{\text{seuil}}$ on a $I_{\text{metal}} = I_a$; c'est avec cette intersection qu'on va tirer nos valeurs. I_a selon la norme EN12954 a pour vitesse $V=12 \mu\text{m/an} \rightarrow I=41 \text{ A} \rightarrow \log(I)=4,62$

On fait une projection sur le graphe pour obtenir les valeurs de protection suivantes :

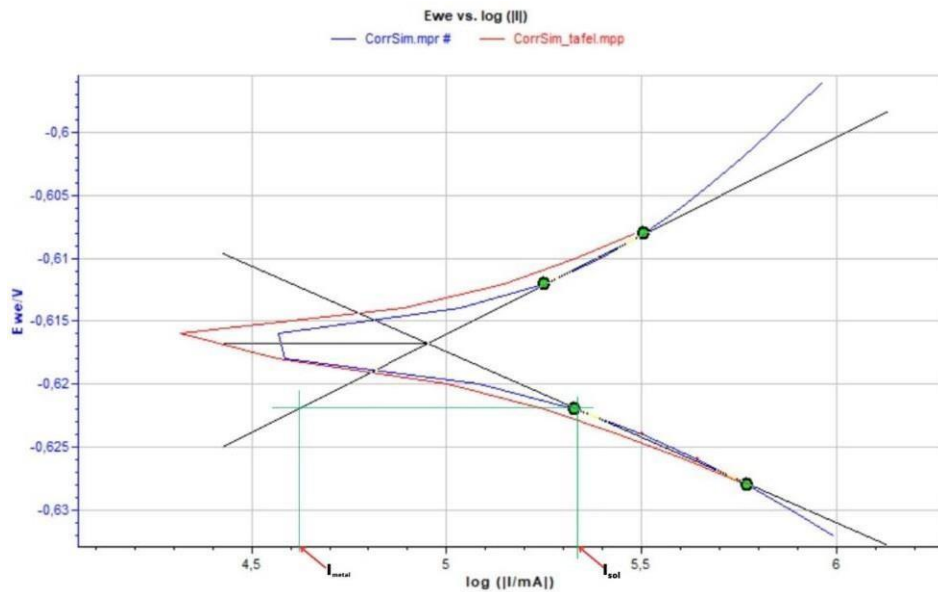


Figure IV.4 : Courant/potentiel de protection à appliquer

A $E=E_{\text{seuil}}$: $\log(I_{\text{metal}}) = 4,62 \rightarrow I_{\text{met}} = 41,68 \text{ A}$ et $\log(I_{\text{sol}}) = 5,34 \rightarrow I_{\text{sol}} = 218,7 \text{ A}$

$$I_{\text{PC}} = I_{\text{sol}} - I_{\text{metal}} = 218,7 - 41,68 = 177 \text{ A}$$

Le potentiel pour protéger la structure E_{app} est à partir de $-0,622\text{V}$ accompagné d'un courant continue de : $I = 177 \text{ A}$.

On aura une densité de courant de : $i_{\text{prot}} = I / S = 177 / 4086 = 44 \text{ mA/m}^2$

Donc on appliquera un courant de 44 mA/m^2 à appliquer sur la structure. Ce qui coïncide avec la fourchette de courant selon le sol pris dans notre étude.

Il faut considérer la relation qui décrit l'influence de la résistivité du sol sur le courant qui passe à travers lui est donnée par la loi d'Ohm appliquée à un circuit électrique comportant une résistance :

$$I = V / R = 0,62 / R$$

Dans le contexte de la résistivité du sol, la résistance (R) est déterminée par la formule :

$$R_{\text{anneau}} = (\rho * L) / A = (120 * 1,5) / (804) = 0,223 \Omega$$

$$R_{\text{terre}} = (\rho * L) / A = (20 * 4) / (804) = 0,09 \Omega$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{terre}} + R_b = 0,32 \Omega$$

Où :

- ρ est la résistivité du sol en ohm-mètres ($\Omega \cdot \text{m}$)
- L est la longueur du chemin du courant à travers le sol en mètres (m)
- A est l'aire de la section transversale du chemin du courant en mètres carrés (m^2)

A cause la résistance du sol, on a une perte : $I = V / R = 0,62 / 0,32 = 1,95 \text{ A}$

* Notre courant appliqué protégera et permettra de ralentir ou d'arrêter le processus de corrosion de la structure suffisamment (même avec les pertes à cause du sol) envisageant le milieu non dangereux.

Chapitre V :
Dimensionnement de l'installation

V.1. INTRODUCTION

Selon la norme « API-651 » la protection cathodique des réservoirs de stockage de pétrole en surface : « La méthode des anodes sacrificielles “AS” n'est pas pratique pour la protection de grandes structures nues. Les systèmes de protection par ‘AS’ peuvent être appliqués aux fonds de réservoirs où la surface métallique exposée à l'électrolyte peut être minimisée grâce à l'application d'un revêtement diélectrique ou lorsque la surface est petite en raison de la taille ou de la configuration du réservoir. » [11]

D'un autre côté, la maintenance et le remplacement des anodes sacrificielles au-dessous des bacs peut être très coûteux. La flexibilité de l'installation courant imposé est désirable et le rend favorable ainsi les rectifieurs nécessitent une vérification bimensuelle.

Donc, la méthode optimale est la protection par courant imposé.

L'installation proposée est de la forme :

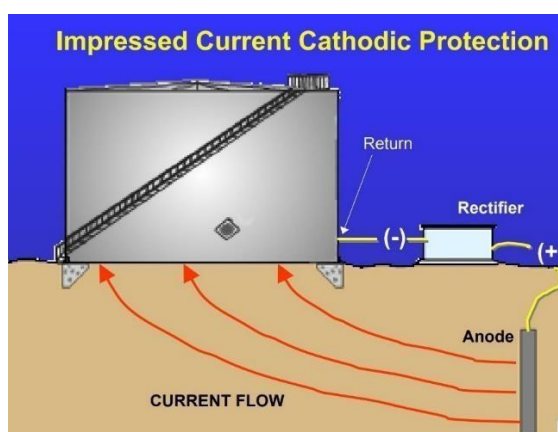


Figure V.1 : Illustration présentant un système de protection par courant imposé [12]

V.2. COMPOSANTS DE L'INSTALLATION

Selon les normes « NACE RP-0163 » publiée par l'Association internationale de la corrosion “Contrôle de la corrosion externe des systèmes de tuyauterie métallique enterrée ou immergée” et « API 651 » “Protection cathodique des réservoirs de stockage de pétrole hors sol” ; qui fournissent des orientations sur les exigences de conception, d'installation, d'inspection et de maintenance des systèmes de protection cathodique sur les réservoirs de stockage de pétrole hors sol la procédure a été établie pour la construction de toute installation de système de protection pour nouveaux ou anciens bacs, on s'appuie sur ses 2 normes pour établir notre solution [11&13].

Une installation de protection cathodique est composée d'une source d'énergie (un générateur et un redresseur si nécessaire) + les anodes déversoirs + les câbles + appareils de mesure et suivi. Par mesure de sécurité, on a des murs qui entourent les bacs en cas d'une grande fuite ils empêchent le déversement du produit sur le reste de l'usine ; c'est pourquoi nous suggérons de soulever les composants sur une plateforme en béton qui est de la même hauteur que les murs.

V.2.1. Source d'énergie

Les sources d'énergies pour avoir le courant de protection sont différentes, généralement on utilise un générateur AC + un redresseur pour un courant DC, un moteur thermique ou une dynamo, source d'énergie renouvelable comme les panneaux solaires

Redresseurs : Les unités de redresseur se composent d'un transformateur. Des surcharges de dix fois le courant nominal peuvent être soutenues. Il existe deux types de redresseurs :

- Redresseur au sélénium (refroidi à l'huile et à l'air) : les unités à l'air ont un coût plus faible que celles immergées dans l'huile, mais ont une ventilation médiocre. Les redresseurs immergés dans l'huile sont moins vulnérables à l'air et à la poussière.
- Redresseur au silicium (refroidi à l'huile et à l'air) : ils ont une durée de vie plus longue et une plus grande efficacité par rapport aux redresseurs au sélénium. Ils sont de 20 à 50 % plus petits que les redresseurs au sélénium.

La meilleure solution dans notre cas est un redresseur sélénium à l'air (zone ne contient pas beaucoup de poussière et elle bien aéré ; pas de problème de ventilation) puisque la zone est déjà pleine de sources de courant alternatif, nous devons installer un long câble ramenant de l'électricité des piliers connecté au redresseur qui fournira le courant nécessaire de 177 A. Avec la possibilité que le redresseur nous délivrera un courant inférieur au nécessaire, on règle ce problème avec un variateur qui s'occupera même de la variation du courant selon le besoin qui suit les conditions de l'environnement (humidité, pluie...) ce qui permet de contrôler le courant au tourde l'année.



Figure V.2 : Variateur de vitesse (de courant)

Pour suivre la tension du système et connaître s'il faut injecter plus au moins de courant il faut installer un équipement de suivi et de mesure qui inclue des électrodes référentielles. Le tableau peut être utilisé comme guide pour la quantité d'électrodes de référentielles nécessaires.

Tableau V.1 : Nombre d'électrodes selon la variation du rayon d'un bac [14]

Diamètre	Nombre d'électrodes
6 – 12	3
12 – 18	4
18 – 30	5
30 – 45	6
45 – 76	7

Notre bac est de 32m de diamètre donc on utilise 6 électrodes de références répartis autour du bac. C'est conventionnel de choisir les électrodes Ag/AgCl dû à la zone côtière.

V.2.2. Anodes déversoirs

Pour les bacs de grandes tailles, on utilise plusieurs anodes au tour à fin d'obtenir une distribution homogène du courant et éviter qu'une région de la surface ne reçoit pas de courant.

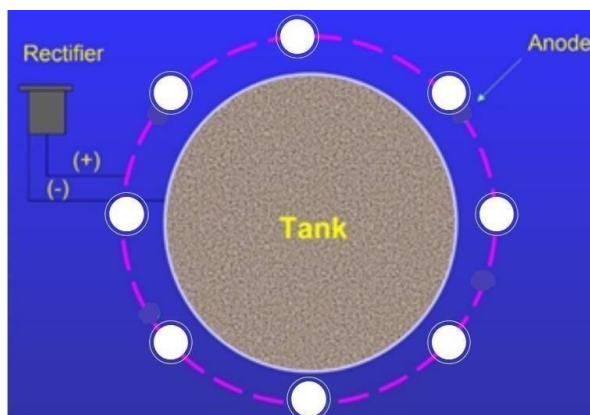


Figure V.3 : Placement des anodes pour une distribution homogène [12]

En général, pour un sol de résistivité de 120 Ohm.m, il est recommandé d'utiliser une anode de protection en fonte à grande teneur de silice avec une résistance électrique de 0,05 Ohm.m²/mètre linéaire. La distance recommandée entre l'anode de fonte silicieuse et le bac de stockage peut varier entre 2 et 4 mètres pour une protection adéquate contre la corrosion.

La profondeur à laquelle on doit installer l'anode de protection dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature du sol, la géométrie de l'objet protégé, la résistivité du sol et la densité de courant requise pour la protection contre la corrosion. Cependant, une règle de base souvent utilisée pour les réservoirs de stockage est d'installer l'anode de protection à une profondeur égale à la moitié de la distance entre l'anode et le fond du réservoir.

On a une plateforme de ciment au tour du bac pour éliminer la verdure au tour des instruments donc l'idéal sera de prendre une distance de 3,5m pour placer l'anode. Dans le cas présent, si l'on prend la distance de 3,5 mètres entre l'anode de fonte silice et le bac de stockage, alors la profondeur à laquelle l'anode doit être installée sera de :

$$\text{Profondeur} = 1/2 \times \text{Distance} = 1/2 \times 3,5 \text{ mètres} = 1,75 \text{ mètres}$$

Donc, on creuse un trou de 20 à 30 cm de diamètre sur 1,75 m de profondeur où on enfonce l'anode au milieu du trou verticalement.

La fonte à haute teneur en silicium : La production de courant maximale est de 50 A/m² et le taux de consommation est compris entre 90 et 250 g/A/an.



Figure V.4 : Anode fonte à haute teneur en silicium

Puisque on veut protéger les bacs sur 25ans avec un courant de 177 A donc la masse des anodes nécessaire sera de 398 à 1106 KG. Puisque on nécessite une telle grande masse on choisit les anodes de 50 KG pour avoir un nombre d'anodes minimales entre 4 et 12.

Tableau V.2 : Dimensions des anodes en fer-silicium [15]

Diamètre (mm)	Longueur (m)	Surface (m ²)	Courant produit (A)	Masse (Kg)
38	0.915	0,109	50*0,109= 5,45	7.5
51	1.22	0,195	9,75	19.0
51	1.525	0,244	12,2	23.0
64	1.525	0,304	15,2	35.0
76	1.525	0,364	18,2	50.0
114	1.525	0,546	27,3	100.0

L'idéal est 8 anodes de 50 kg qui auront des dimensions de D = 76 mm par L= 1,525 m.

Ces anodes seront éloignées d'un arc = degré d'angle * rayon ;

Un cercle sur 8 anodes donne un angle de $\pi/4$;

Rayon est de 16+3,5 m ;

Donc : l'arc = $\pi/4 * 19,5 = 15,31m$

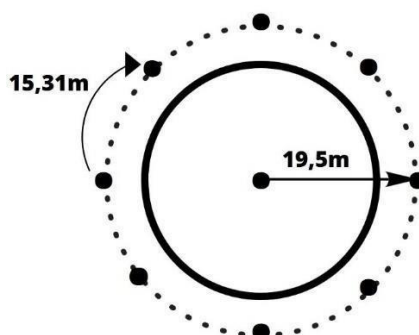


Figure V.5 : la distribution des anodes en mètre

Calcul des résistances de terre des déversoirs verticaux (tige cylindrique, anode circulaire, ...) : La résistance d'une tige cylindrique verticale est donnée par l'équation de Dwight pour la résistance à l'anode verticale simple à la terre en mètre [15&16] :

$$R' = \rho / 2\pi L (\ln (4L/a) - 1)$$

où :

- R' : la résistance, en Ω
- ρ : la résistivité du sol, en $\Omega.m = 190$
- L : la longueur en mètre L= 1,525 m
- a : le rayon de l'anode en mètre a = 38 mm

$$R' = \rho / (2\pi L) * (\ln (4L/a) - 1) = 190 / (2\pi * 1,525) * (\ln (4 * 1,525 / 0,038) - 1)$$

$$R' = 80,8 \Omega$$

V.2.3. Câbles

Les conducteurs de câble vers les anodes sont en cuivre ou en aluminium (de préférence en cuivre). Ces conducteurs doivent donc être isolés. On travaille avec un courant d'environ 177A, une telle valeur nécessite un câble spécial pour assurer une grande intensité sans risque électrique et ne pas perdre beaucoup d'énergie en effet de joule.

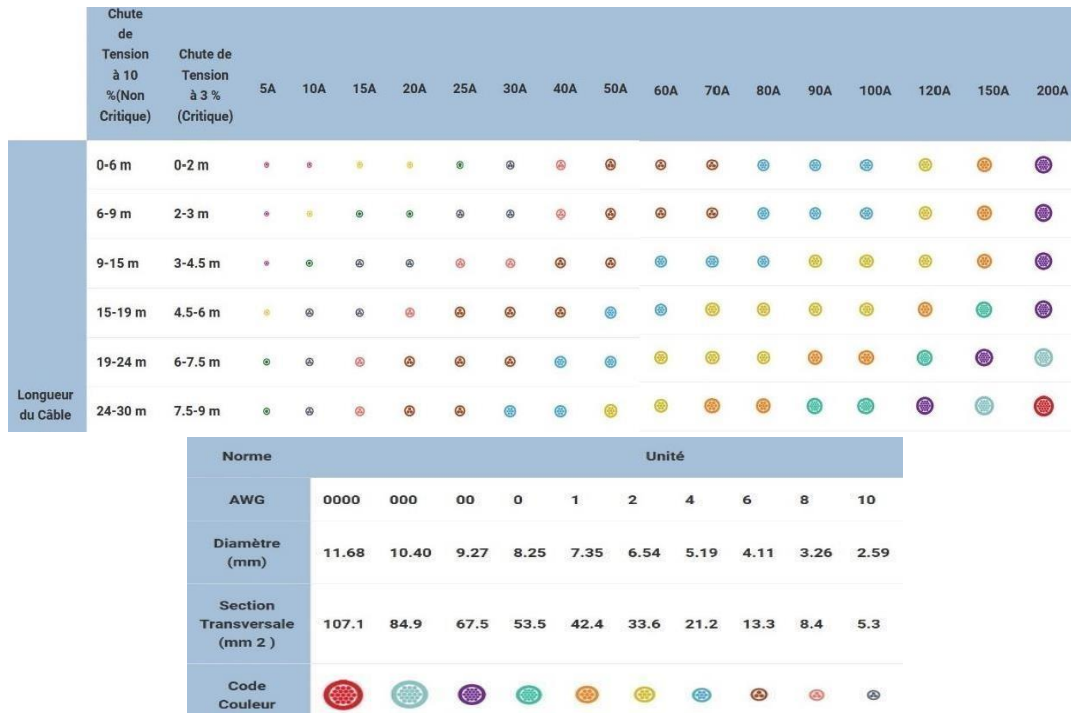


Figure V.6 : Code couleur entre intensité du courant, longueur du câble et diamètre [17]

Selon la figure précédente, on prend les câbles pour 177A, et on prend en considération la distance entre le bac et le poste de soutirage pour choisir le diamètre adéquat. On opte à mettre le poste au niveau des murs de protection ce qui impose une longueur de câbles 24-30 m pour un tel câble, on choisit un diamètre de 11,68 mm (on peut tolérer la chute de tension de 10%).

V.3. INSPECTION ET SUIVI

Pour inspecter un système de protection cathodique il faut être minutieux et s'assurer de tous les composants, c'est pour cela que les ingénieurs ont conçu une norme sur laquelle se référer à chaque inspection. D'après les normes « API » et « NACE » voici les étapes à suivre [17&18 & 19] :

- a) Préparation : Avant de commencer l'inspection, il est important de s'assurer que l'équipement nécessaire est disponible et de mettre en place des mesures de sécurité adéquates.
- b) Mesures électriques : Il est important de mesurer la tension, le courant et la résistance de la structure métallique, ainsi que la tension et le courant de protection cathodique appliqués.

c) Inspection visuelle : Cela inclue l'examen de la qualité de l'installation et du matériel du système des connexions électriques, la recherche de signes de corrosion ou de dommages sur la structure métallique, ainsi que la vérification de la qualité de l'anode.

d) Analyse des données : Les données recueillies doivent être analysées pour déterminer si le système de protection cathodique fonctionne correctement et si des mesures correctives sont nécessaires.

Les appareils nécessaires pour inspecter un système de protection cathodique peuvent varier en fonction de la complexité et de la taille du système. Voici une liste d'outils et d'équipements qui peuvent être nécessaires :

a) Multimètre : Un multimètre est utilisé pour mesurer la tension, le courant et la résistance dans le système de protection cathodique.

b) Anode-tester : Un anode-tester est utilisé pour mesurer la qualité et la performance de l'anode utilisée pour fournir le courant de protection cathodique.

c) Endoscope : Un endoscope est utilisé pour inspecter les parties cachées et inaccessibles du système de protection cathodique, telles que les tuyaux enterrés.

d) Caméra thermique : Cette caméra est utilisée pour détecter les zones chaudes ou froides dans le système de protection cathodique, qui peuvent indiquer des problèmes potentiels.

e) Outil de mesure d'épaisseur de revêtement : cet appareil est conçu pour le suivi des pertes d'épaisseurs non visible à l'œil humaine. Exemple : appareil à onde sonore.

Il est important de sélectionner l'outillage approprié pour chaque inspection et de s'assurer que l'équipement est étalonné et fonctionne correctement avant l'utilisation.

V.4. Solutions innovantes

Si le complexe décide de prévoir un arrêt pour une grande maintenance, des travaux de longue durée ou construire un nouveau bac, nous suggérons de faire une autre installation de protection cathodique en pénétrant à l'intérieur du bac et mettre en œuvre une installation comme celle d'un nouveau bac, ce qui signifie une protection supérieure à ce qu'on vient de proposer.



Figure V.7 : Ouverture dans les viroles pour faciliter l'accès aux travaux [12]

V.4.1 Par courant imposé : où les anodes seront installées au-dessous des bacs cela nécessite l'enlèvement du fond (une solution quand le fond n'est plus utilisable), placer les anodes dans le sol et souder un nouveau fond au-dessus ; où d'y mettre les anodes entre l'ancien fond très dégradé et le nouveau dans une couche de sable qui sépare les 2 fonds.

Le système de protection cathodique permanent pour la base des réservoirs sera basé sur une configuration de grille d'anodes "proche" avec une anode de type ruban. Une protection temporaire n'est pas nécessaire car le système permanent peut être mis sous tension après l'achèvement du réservoir. Les anodes à courant imposé doivent être constituées d'une anode ruban en oxyde de métaux mixtes (MMO) / titane avec une barre conductrice en titane pour garantir une très longue vie de l'installation et pour porter le courant et connectée via un câble et une boîte de jonction au redresseur-transformateur. Le ruban MMO doit être soudé par points à la barre conductrice à chaque intersection.



Figure V.8 : Grille d'anodes de protection de type ruban [12]

A envisager : en vue des démarches pour des sources d'énergies renouvelables et si on veut une solution écoenvironnementale, on peut changer la source d'énergie d'un générateur vers des panneaux solaires, bien que l'installation soit plus chère qu'un simple générateur, cela sera plus économique à long terme.

V.4.2 Par anode sacrificielle : On peut faire une installation très simple, efficace et moins coûteuse et qui demande moins de suivi et d'inspection ; cependant le coût de la maintenance (remplacement des anodes régulier) va la rendre avec le temps plus cher. Ainsi on n'aura pas le même degré de certitude qu'il n'y aura pas de coupure dues à la difficulté du suivi et de l'inspection surtout dans un sol de haute résistivité comme le nôtre et le débit de courant que produit les anodes sacrificielles est faible par rapport au ICCP et ce débit est fixe, chose qui n'est pas toujours adéquate. Sauf si on fait une installation où les anodes seront enterrés autour des bacs et que les trous seront d'une faible quantité de la terre creusée pour faciliter l'accès à l'inspection et assurer que le courant passe toujours. On peut laisser des espaces pour rajouter des anodes temporaires pour les périodes où le climat est très corrosif pour qu'on puisse modifier et changer le débit au besoin.

CONCLUSION

En conclusion, cette étude a mis en évidence l'importance de mettre en place une installation de protection cathodique pour protéger les structures métalliques contre la corrosion surtout dans un milieu industriel marin. Avec le travail effectué on prévoit que l'installation de protection proposée soit efficace et fiable pour prévenir la corrosion des bacs de stockage 16TK1 et 16TK2 pour plusieurs années. Notamment nos bacs ne sont pas trop dégradés comparés à leurs années de services, cependant cette protection offre une mesure de sécurité indispensable dans les protocoles de nos jours.

Cette étude a également mis en évidence les différentes mesures à prendre pour déterminer à quel point nos structures sont susceptibles de se détériorer, savoir s'ils sont toujours utilisables et comment les protéger contre ces dégradations, ainsi que les différentes techniques de contrôle et d'entretien nécessaires pour assurer une protection à long terme.

En somme, cette étude a amélioré notre compréhension de l'importance de la protection cathodique pour les structures métalliques et a fourni des recommandations pratiques pour réaliser des installations adéquates selon les conditions de travaux (milieu, structure, durée de vie visée...)

Il est donc recommandé aux entreprises de prendre en considération les résultats de cette étude lors de la planification et de la mise en place d'une installation de protection cathodique pour leurs structures métalliques, afin de garantir leur durabilité et leur fiabilité à long terme.

Références bibliographiques :

- [1] Zaki Ahmad, « Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control », Elsevier Ltd. UK, 2006.
- [2] Dieter Landolt, « Corrosion and surface chemistry of metals », EPFL Press. Suisse, 2007.
- [3] D.Amokrane, « Corrosion et Protection des Ouvrages », IAP.
- [4] R.Winston Revie, Herbert H.Uhlig, « Corrosion and corrosion control an introduction to corrosion science and engineering », JOHN WILEY & SONS, INC. 2008.
- [5] Nguyen-Thuy LE, « Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) », Protection_cathodique_V1.1., BADORIS INERIS DRA-PREV GIL, 2008.
- [6] Denis Petrocokino, « Protection anodique. Protection cathodique », Technique de l'ingénieur, Réf : COR1010 v1, 1979.
- [7] Robert Heidersbach, « Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production », Wiley Series in Corrosion, 2011.
- [8] A.Oyubu, « Soil resistivity and soil pH profile investigation », Delta State University Faculty of Engineering Complex, Journal of Engineering in Industrial Research, 2015.
- [9] T.Abdelaziz, « Audit environnemental de la région d »Arzew – Wilaya d'Oran », Thèse de Doctorat, Université Oran 1, 2016.
- [10] J.Tidblad, C.Leygraf, « Atmospheric corrosion effects of SO₂ and NO₂, A comparison of laboratory and field exposed copper ». Journal of the Electrochemical Society, 1995.
- [11] API RP-651 « Cathodic Protection of Aboveground Storage Tanks », USA, 2014.
- [12] James T.Lary, « Corrosion Control/Cathodic Protection for Aboveground Storage Tanks », Corr_pro Companies, inc. World Headquarters 1090 Enterprise Drive.
- [13] NACE RP – 0163, « External Cathodic Protection of On-grade Carbon Steel Metallic Storage Tanks », 2007.
- [14] EXTERNAL TANK BASE SYSTEM AND INTERNAL TANK SYSTEMS. TETCO, GADARIF STRATEGIC DEPOT PROJECT. Cathodic Protection Co. Limited. Project Ref: 12/P16227. 2012
- [15] C.Basalo, « Les Canalisations d'eau et de Gaz: Corrosion, Dégradation et Protection, Technique et Documentation », Lavoisier, Paris, 1987.
- [16] Stephen D. Cramer and Bernard S. Covino, « ASM Handbook Volume 13C Corrosion: Environments and Industries ». 2006.
- [17] <https://log.logcluster.org/fr/dimensionnement-et-cablage-des-cables>, consulté le 14/05/2023.

- [18] W. Brian Holtsbaum, “Cathodic protection survey procedures”, NACE international, 2009.
- [19] API RP-653 « Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction », 2014.
- [20] Alec Groysman, « Corrosion Problems and Solutions in Oil Refining and Petrochemical Industry ». Springer, Volume 32, 2017.
- [21] Amiya Kumar Lahiri, « Applied Metallurgy and Corrosion Control A Handbook for the Petrochemical Industry », Springer Ltd, UK, 2006.
- [22] Schweitzer Philip, « Corrosion Engineering Handbook », Corrosion Technology. CRC Press, 1996.
- [23] E.Stanbury, R.A.Buchanan, « Fundamentals of Electrochemical Corrosion », AM International. 2000.
- [24] Einar Bardal, « Corrosion and protection », Springer Ltd, UK, 2004.
- [25] R.Baboian, « Corrosion tests and standards: Application and interpretation, ASTM International », 2nd edition, USA, 2005.
- [26] Mars Fontana, « Corrosion Engineering », McGraw-Hill International Editions Companies. 1986.
- [27] H.Zendaoui, « Protection Cathodique: Principes, Dimensionnements et Controle, Gas Refining & Petrochimistry », IAP, CU UFR. 2018.
- [28] Kosay Abdul Sattar Majbor, Qais Matti Alias, Wafa Faraj Tobia, Mohamed Adnan Hamed, « Cathodic Protection Design Algorithms for Refineries Aboveground Storage Tanks », Number 12, Volume 23, Journal of Engineering. 2017.
- [29] « La Protection cathodique-guide pratique », Technip, France, 1986.