



Université M'Hamed BOUGARA BOUMERDES
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département de Transport et Equipement Des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie mécanique : Transport et distribution des
Hydrocarbures

Réalisé par : AMOUCHI Thamazgha

THEME :

DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE PROTECTION
CATHODIQUE DES BACS DE STOCKAGE DU TERMINAL
MARIN DE BEJAIA

Suivi par : Mr. TIKOBAINI Mourad

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS :

Tout d'abord, je remercie Dieu de son soutien qui m'a fourni l'aide et la confiance nécessaire pour accomplir ce travail.

Je remercie mon promoteur Mr TIKOBAINI, enseignant à la faculté d'hydrocarbures de l'université de Boumerdes, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter la réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

- ◆ Les enseignants et la totalité de l'équipe pédagogique de la faculté des hydrocarbures.
- ◆ L'ensemble de personnel du terminal marin de Béjaia, en particulier le département de protection cathodique, et Messieurs LOUIBA Mustapha et YESSAD Abdelhanine, pour m'avoir fourni des documents très intéressants, ainsi que leurs expériences personnelles. Ils ont été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.
- ◆ Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.
- ◆ Et tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire:

INTRODUCTION :	1
CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA CORROSION	I
I.1 Définition de la corrosion :	2
I.2 Généralités sur la corrosion :	2
I.2.1 La réaction anodique du Fer :	2
I.2.2 Réactions cathodiques sur la surface de la structure métallique :	3
I.2.3 Le diagramme de Pourbaix :	3
I.2.4 L'échelle de Nernst :	5
I.2.5 Notion de la couche double :	6
I.3 La corrosion interne:	6
I.4 La corrosion externe :	7
I.4.1 La corrosion atmosphérique :	7
I.4.2 La corrosion biochimique :	7
◆ Les bactéries associées à la corrosion :	7
I.4.3 La corrosion chimique (sèche) :	8
I.4.4 La corrosion sous contrainte :	8
I.4.5 La corrosion par érosion/ par cavitation :	9
I.4.6 La corrosion par courants vagabonds :	10
I.4.7 La corrosion électrochimique :	11
◆ I.4.7.1 Définition :	11
◆ I.4.7.2 Principe :	11
◆ I.4.7.3 Types de piles de corrosion :	12
I.4.7.3.1 Les piles géologiques :	12
I.4.7.3.2 Le couplage galvanique :	12
I.4.7.3.3 Les piles dues à l'aération différentielle :	13
I.5 Les catégories générales de corrosion :	13
I.5.1 La corrosion uniforme :	13
I.5.2 La corrosion localisée :	14
◆ I.5.2.1 Morphologies de la corrosion localisée :	14
I.5.2.1.1 La corrosion par piqûres :	15

I.5.2.1.2 La corrosion intergranulaire :	16
I.5.2.1.3 La corrosion Caverneuse :	16
I.5.2.1.4 La fragilisation par l'hydrogène :	17
I.5.2.1.5 La corrosion sélective :	17
I.5.2.1.6 La corrosion sous fatigue :	18
◆ I.5.2.2 Paramètres influents sur la forme et le type de la corrosion :	18
I.6 Les Causes principales de corrosion :	18
I.6.1. Les défauts de revêtement :	18
◆ I.6.1.1 Porosité :	19
◆ I.6.1.2 Défaut ouvert :	19
◆ I.6.1.3 Défaut avec écran :	19
◆ I.6.1.4 Défaut ouvert avec décollement du revêtement :	19
◆ I.6.1.5 Fluage du revêtement :	19
◆ I.6.1.6 Défauts ouverts communicants :	20
I.6.2 Métaux dissimilaires :	20
I.6.3 Couplage d'un nouvel acier avec un vieux :	20
I.6.4 Rapport des surfaces anode/cathode :	20
I.6.5 Nature de l'environnement corrodant :	20
◆ I.6.5.1 La concentration d'oxygène :	20
◆ I.6.5.2 Effet de la température :	20
◆ I.6.5.3 Le débit :	20
◆ I.6.5.4 L'humidité :	21
◆ I.6.5.5 Le PH du sol :	21
◆ I.6.5.6 La résistivité du sol :	21
◆ I.6.5.7 Propriétés chimiques des sols :	21
◆ I.6.5.8 Présence d'impuretés dans l'atmosphère :	21
I.7 L'importance de l'étude de la corrosion :	22
I.8 Conclusion :	22

CHAPITRE II : LA LUTTE CONTRE LA CORROSION	II
II.1 Introduction :	23
II.2 Notions de base :	23
II.2.1 Mesure du potentiel d'un métal dans une solution :	23
II.2.2 Densité de courant de protection:	23
II.2.3 La chute ohmique : (IR drop)	24

II.2.4 L'agressivité du sol :.....	25
◆ II.2.4.1 Généralités :	25
◆ II.2.4.2 Mesure de l'agressivité du sol :	25
II.3 Prévention de la corrosion par une forme adaptée des pièces :	26
II.3.1 Corrosion sous contrainte :.....	26
II.3.2 Corrosion humide :.....	26
II.3.3 Corrosion galvanique :.....	27
II.3.4 Corrosion par érosion :	27
II.3.5 Corrosion par cavitation :	28
II.4 Prévention de la corrosion par un choix des matériaux adéquats :.....	28
II.5 La protection passive :.....	29
II.5.1 Protection par revêtement :	29
◆ II.5.1.1 La fonction principale des revêtements :.....	30
◆ II.5.1.2 Caractéristiques des revêtements :	30
◆ II.5.1.3 Types des revêtements :	31
II.5.1.3.1 Les revêtements métalliques :	31
II.5.1.3.2 Les revêtements organiques :	32
II.5.2 Prévention par injection d'inhibiteur de corrosion :	33
◆ II.5.2.1 Principe :	33
◆ II.5.2.2 Les inhibiteurs Anodiques :	34
◆ II.5.2.3 Les inhibiteurs Cathodiques :.....	34
II.5.3 La protection contre les courants vagabonds :	34
II.6 La protection active :.....	36
II.6.1 Le principe de la protection cathodique :	36
II.6.2 Les critères de protection :	36
II.6.3 Facteurs affectant la validité des critères :	37
II.6.4 La protection cathodique par anodes sacrificielles :	38
◆ II.6.4.1 Domaine d'application:	39
◆ II.6.4.2 Les types d'anodes :	39
II.6.5 Protection cathodique par courant imposé :	43
◆ II.6.5.1 Principe :	43
◆ II.6.5.2 Domaine d'application:	44
◆ II.6.5.3 Les éléments d'un système de protection cathodique par courant imposé :	44
II.6.5.3.1 La source d'énergie :	44
II.6.5.3.2 Le déversoir :	45

II.6.5.3.3 Le Backfill :.....	48
II.6.5.3.4 Les câbles de connexion :.....	48
II.6.5.3.5 L'appareillage électrique auxiliaire :.....	50
◆ II.6.5.4 Facteurs limitant la protection par courant imposé :	51
II.7 Comparaison entre les systèmes de protection par anode sacrificielle et les systèmes de protection par courant imposé :.....	52
II.8 Conclusion :.....	53

CHAPITRE III: LES BACS DE STOCKAGE III

III.1 Présentation du site :	54
III.2 Construction des réservoirs :	55
III.2.1 Les bacs à toit flottant :	55
◆ III.2.1.1 La Constitution d'un bac à toit flottant :	56
III.2.2 Les réservoirs à toit fixe :	57
III.3 Le rôle du stockage :.....	58
III.4 Les types de corrosion dans un bac :.....	59
III.4.1 La corrosion externe :.....	59
III.4.2 La corrosion interne :.....	60
III.5 Mesures de protection des bacs contre la corrosion :	60
III.6 La protection cathodique des bacs de stockage :	61
III.6.1 La protection cathodique par courant imposé :.....	61
III.6.2 La protection cathodique par anodes sacrificielles :	64
III.7 Actions nécessaires pour l'optimisation du système de protection :	64
III.8 Conclusion :.....	65

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION IV

IV.1 Introduction :	66
IV.2 Illustration de l'installation du système de protection :	67
IV.3 Tableau des données :.....	68
IV.4 Calculs :.....	68
IV.4.1 La surface à protéger :.....	68
IV.4.2 Densité du courant de protection.....	69
IV.4.3 Calcul du courant de protection :.....	69
IV.4.4 La masse totale d'anode requise :	70
IV.4.5 Le nombre d'anode requis :.....	70

IV.4.6 Calcul des résistances électriques :	70
◆ La résistance d'une anode au backfill :	71
◆ La résistance du backfill au sol :	71
◆ La résistance du déversoir :	72
◆ La résistance des câbles :	73
◆ Résistance totale du circuit :	73
IV.4.7 La tension du redresseur :	73
IV.5 Résultats :	74
IV.6 Interprétation des résultats :	75
IV.7 Conclusion :	75
 CHAPITRE V : <u>CONTROLE ET SURVEILLANCE</u>	V
V.1 Introduction :	76
V.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique :	76
V.2.1 Le contrôle de la protection cathodique des bacs de stockage :	76
V.3 Le contrôle de revêtement :	76
V.4 Détection de décollement de revêtement :	77
V.5 Efficacité des joints isolants :	77
V.6 Les mesures périodiques :	77
V.7 Le contrôle mensuel des postes de protection cathodique :	78
V.8 Les techniques de mesure :	78
V.8.1 Les mesures de potentiels :	79
V.8.2 Les mesures de courant :	80
V.9 Les facteurs de limitation de l'efficacité de la protection cathodique:	81
V.10 Eléments qui assurent un bon fonctionnement de la protection cathodique :	81
V.10.1 La continuité électrique parfaite de la structure à protéger :	81
V.10.2 L'isolation électrique de l'ouvrage par rapport au sol :	81
V.11 L'automatisation de la protection cathodique :	82
V.12 Conclusion :	82
 CONCLUSION	83
ANNEXE	VII
BIBLIOGRAPHIE	VIII

Liste des tableaux

Tableau 1: Les réactions cathodiques en fonction des différentes natures de sol	3
Tableau 2 : La densité de courant de protection en fonction de l'électrolyte environnant	24
Tableau 3: L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité.....	25
Tableau 4: Résistance des métaux dans des milieux différents	28
Tableau 5: caractéristiques des anodes en Zinc	39
Tableau 6: Caractéristiques des anodes en aluminium au mercure.....	41
Tableau 7: Caractéristiques des anodes en aluminium à l'indium.....	41
Tableau 8: Caractéristiques des anodes à base de magnésium	42
Tableau 9: Les matériaux de déversoir de courant imposé.....	46
Tableau 10: Comparaison entre les systèmes sacrificiels et de courant imposé	52
Tableau 11: Les données de calcul	68
Tableau 12: Densités de courant de protection en fonction des résistivités des sols ..	69
Tableau 13: Les résultats des calculs	74

Liste des figures

Figure 1: Le principe de la corrosion	2
Figure 2: Le diagramme de Pourbaix.....	4
Figure 3: L'échelle de Nernst.....	5
Figure 4: La couche double	6
Figure 5: La corrosion par courants vagabonds.....	10
Figure 6: Le circuit de corrosion.....	12
Figure 7: Morphologies de la corrosion	14
Figure 8: Un raccord isolant	27
Figure 9: Le drainage des courants vagabonds.....	35
Figure 10: La protection cathodique par anodes sacrificielles	38
Figure 11: Protection cathodique par courant imposé	44
Figure 12: Déversoir de surface à anodes horizontales.....	47
Figure 13: Déversoir de surface à anodes verticales (API, 2007)	48
Figure 14: Câble de connexion	50
Figure 15: Photo du terminal marin de Bejaïa tirée de Google Earth.....	54
Figure 16: Un bac de stockage à toit flottant.....	56
Figure 17: Bacs de stockage à toit fixe	58
Figure 18: La protection des bacs contre la corrosion	61
Figure 19: Déversoir de surface d'anodes distribuées	62
Figure 20: Déversoir en profondeur (tiré de www.corrosionpedia.com)	63
Figure 21: Protection cathodique par courant imposé de deux bacs de stockage.....	67
Figure 22: Le facteur de correction en fonction du nombre et la distance entre les anodes	72
Figure 23: Schéma global de la protection cathodique du Terminal Marin de Bejaïa	75
Figure 24: Système de surveillance de la protection cathodique.....	79
Figure 25: Méthode de mesure de potentiel d'une structure métallique	80

Liste des Annexes

Annexe 1: La réaction anodique du Fer	84
Annexe 2: La réaction cathodique sur la surface de la structure métallique	85
Annexe 3: Le transformateur redresseur utilisé dans la protection des bacs du Terminal Marin de Bejaia ..	86
Annexe 4: La disposition horizontale des anodes de déversoir	87
Annexe 5: La disposition verticale des anodes de déversoir	88
Annexe 6: Les types de réservoirs à toit flottant	89
Annexe 7: Electrode de référence en Cu/CuSo4	90
Annexe 8: Paramètres de calcul d'une anode backfillée	91
Annexe 9: Un Multimètre.....	92

INTRODUCTION :

La corrosion est un des problèmes les plus importants dans l'industrie pétrolière. Elle est définie par la détérioration des matériaux et leurs propriétés suite au contact entre une structure et son milieu environnant qui engendre des réactions électrochimiques néfastes.

Les bacs de stockage jouent un rôle de plus en plus important dans l'exploitation des champs pétroliers. Ce sont des réservoirs de grandes dimensions qui servent à stocker le pétrole brut et ses sous-produits tels que le GPL et le GNL. Les bacs ont plusieurs formes et caractéristiques bien définies, cependant, ceux traités dans ce travail servent à stocker du pétrole brut et ils ont une forme cylindrique, perpendiculaire au sol avec des fonds plats, et un toit flottant.

La corrosion des ouvrages métalliques provoque des pertes économiques considérables chaque année, d'où leur protection devient une nécessité et une priorité pendant les travaux de conception. Ça se traduit par des recherches et des expérimentations dans le but de remédier au phénomène de corrosion. La méthode la plus efficace et la plus économique est la protection permanente et active dite la protection cathodique. Elle doit être accompagnée par une isolation bien faite des structures à protéger, réalisée par des revêtements spécifiques aux conditions d'utilisation. La protection cathodique est relativement simple et permet une surveillance facile. Je parle dans mon travail de ses deux types : la protection cathodique par anode sacrificielle et la protection cathodique par courant imposé. Le dimensionnement du système de protection se base sur la dernière, vu qu'elle est la méthode la plus utilisée pour la protection des ouvrages de grandes dimensions.

Le but de mon mémoire est de montrer une vue globale sur la corrosion, ses causes et conséquences, tous les moyens connus de lutte contre elle, avant de passer vers les spécifications du lieu étudié et le dimensionnement du système de protection d'un parc de stockage contenant un ouvrage concentré de 12 bacs aériens. Enfin, je cite les méthodes de contrôle du système de protection afin de garantir une meilleure fonctionnalité pendant toute sa durée de vie.

CHAPITRE I :

INTRODUCTION A LA CORROSION

INTRODUCTION A LA CORROSION

I.1 Définition de la corrosion :

Le terme corrosion fait référence à la destruction d'un métal ou d'un alliage par réaction chimique, électrochimique, biochimique ou avec abrasion. Elle résulte de l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement.

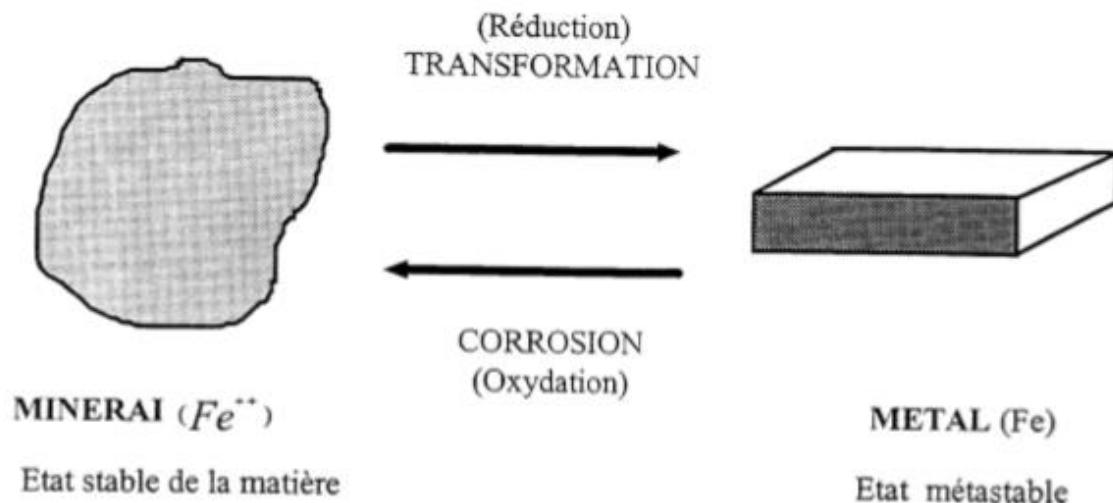


Figure 1: Le principe de la corrosion

Dans le cas de l'acier, en raison de certaines de ses caractéristiques, il n'est pas stable une fois en contact avec un environnement aqueux ; il tente alors de retourner à son état naturel en interagissant avec ce dernier.

Une partie de la rouille est superficielle et ne pose pas de problème grave. Cependant, si l'acier est dans un mauvais environnement tel qu'un sol humide contenant des produits chimiques naturels ou artificiels, le processus de rouille s'accélère. C'est ce que nous appelons la corrosion.

I.2 Généralités sur la corrosion :

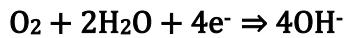
I.2.1 La réaction anodique du Fer :

En prenant le Fer comme un exemple très commun d'un matériau anodique, sa réaction globale d'oxydation en présence d'oxygène s'écrit comme suit :



INTRODUCTION A LA CORROSION

Il est convenable de considérer les deux parties séparées de cette réaction, en distinguant entre les réactions métalliques et non-métalliques :



Le produit de ces réactions, l'oxyde de fer, généralement s'oxyde encore une fois et devient la magnétite (Fe_3O_4) ou bien l'oxyde ferrique (FeOOH). (Voir Annexe 1).

I.2.2 Réactions cathodiques sur la surface de la structure métallique :

Dépendant du milieu environnant, on se trouve en face d'une multitude de transformations de nature cathodique telles que :

Dans un sol humide aéré	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \Rightarrow 4\text{OH}^-$
Dans un sol humide aéré acide:	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Dans l'eau de mer neutre:	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \Rightarrow 4\text{OH}^-$
Dans un sol ou une eau désaérés	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \Rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$

Tableau 1: Les réactions cathodiques en fonction des différentes natures de sol

Référer à l'Annexe 2 pour une schématisation du processus de la réaction cathodique.

I.2.3 Le diagramme de Pourbaix :

Etablis par Dr. Marcel Pourbaix en 1938, les diagrammes (potentiel-pH) sont utiles pour prévoir les réactions spontanées de corrosion métallique entre des oxydants et des réducteurs appartenant à des couples Red/Ox différents pour une valeur du pH et une composition de solution données. Ils délimitent les domaines théoriques de la situation du métal. Pour un système de Fer-eau à 25°C, on obtient la courbe suivante :

INTRODUCTION A LA CORROSION

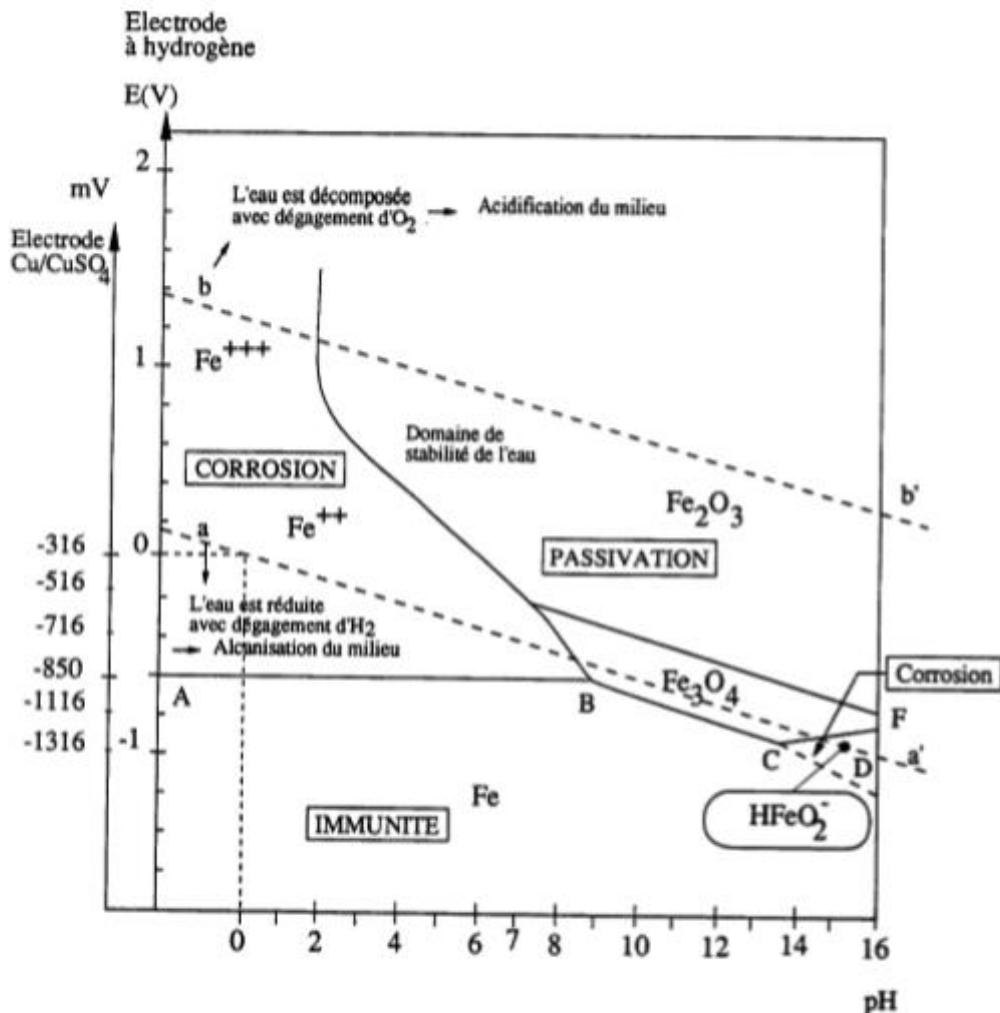


Diagramme Fer - Eau

à 25°C en ne considérant comme corps solides que Fe , Fe_3O_4 , Fe_2O_3

Figure 2: Le diagramme de Pourbaix

On observe les trois domaines suivants :

- Corrosion : où le métal se corrode, produisant des sels et des hydroxydes solubles.
- Passivation : Où le produit de la corrosion est un film superficiel qui isole le métal du milieu ambiant et le protège contre ses composantes agressives, en condition que la formation de la couche passive est uniforme et mécaniquement adhérente.
- Immunité : Où le fer est stable et ne peut pas se corroder, toute réaction d'oxydation n'est plus possible. C'est le domaine de la protection cathodique.

INTRODUCTION A LA CORROSION

I.2.4 L'échelle de Nernst :

L'échelle de Nernst nous permet de classer les métaux du point de vue de leur noblesse. Un métal noble s'ionise peu, dû à l'existence des forces de cohésion importantes entre les atomes. Plus son potentiel est élevé, plus le métal est considéré noble, inversement à un métal classé vil, de potentiel plus faible.

L'or et le platine ont des potentiels normaux d'oxydoréduction les plus élevés. Ils sont très nobles, donc peu ionisables et peu corrodables par l'eau. Le cuivre a un potentiel plus élevé que le fer, il est donc considéré plus noble. Parmi les métaux les plus vils on cite le magnésium.

Cette échelle donne les valeurs des potentiels normaux des éléments usuels par rapport à l'électrode d'hydrogène à une température de 25°C.

<u>Eléments</u>	<u>Couples oxydant/réducteur</u>	<u>E_o (volts)</u>
Au	$\text{Au}^{+++}/\text{Au}$	+ 1,42
O	$\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$	+ 1,23
Pt	Pt^{2+}/Pt	+ 1,20
Ag	Ag^+/Ag	+ 0,80
Cu	Cu^+/Cu	+ 0,52
	Cu^{2+}/Cu	+ 0,34
H	H^+/H_2	0 (par convention)
Pb	Pb^{2+}/Pb	- 0,13
Ni	Ni^{2+}/Ni	- 0,25
Fe	Fe^{2+}/Fe	- 0,44
Zn	Zn^{2+}/Zn	- 0,76
Al	Al^{3+}/Al	- 1,66
Mg	Mg^{2+}/Mg	- 2,37

Figure 3: L'échelle de Nernst

I.2.5 Notion de la couche double :

Un métal plongé dans un électrolyte environnant va avoir un excès d'électrons sur sa surface, qui se chargent négativement. Tout près de l'interface, il y aura un excès d'ions métalliques chargés positivement. L'équilibre de cette réaction se traduit par une différence de potentiel entre ce métal et l'électrolyte. On a donc un métal chargé négativement et une couche d'ions positifs dont on a du mal à définir les limites du coté solution. C'est ce qu'on appelle une couche double. C'est à travers cette couche que nait le potentiel d'équilibre qui caractérise le couple métal/électrolyte. La mesure de potentiel se fait par une électrode d'hydrogène dont le potentiel est 0.

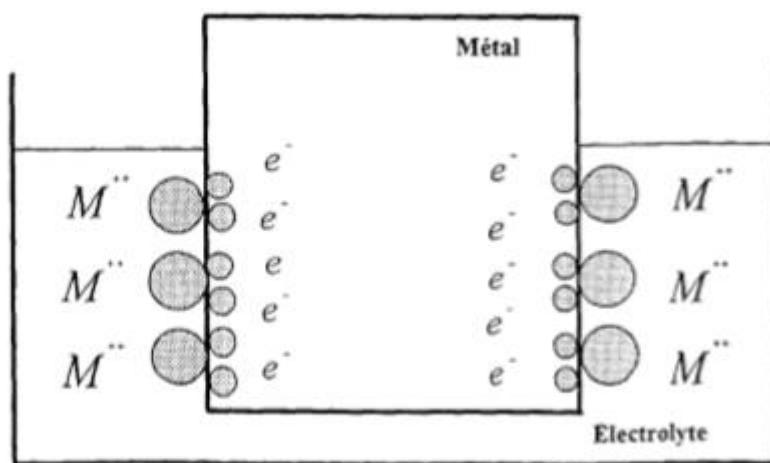


Figure 4: La couche double

I.3 La corrosion interne:

Les effets de corrosion interne possibles dans les canalisations sont de nature électrochimique, qui nécessite le dépôt ou la formation d'un milieu aqueux apte à promouvoir des réactions électrochimiques sur les parois de la canalisation. Cette possibilité de formation d'un milieu aqueux en paroi déterminera la possibilité ou non d'avoir une corrosion, sachant qu'en cas de corrosion déjà existante, elle risque d'être évolutive.

Cependant, quand le gaz contient des composés corrosifs tels que du sulfure d'hydrogène, le principal risque est alors la corrosion interne des parois des tubes.

I.4 La corrosion externe :

I.4.1 La corrosion atmosphérique :

Un métal ou un alliage en contact direct avec l'atmosphère subit une corrosion dont laquelle le degré est déterminé par l'humidité de l'air.

Cette corrosion a plusieurs types (rural, urbain, industriel, marin) distingués selon le taux de corrosivité qui dépend du milieu.

Parmi les contaminants atmosphériques on a : les oxydes de soufre, le sulfure d'hydrogène, les composés de l'azote, les particules salines, les chlorures, et d'autres particules comme le charbon et la silice.

Il est noté que le taux de corrosion est proportionnel au taux de pollution atmosphérique, sachant que le niveau de pollution est maximal durant Janvier et Février, et minimal en Aout. La corrosion est plus importante durant l'hiver malgré les basses températures.

I.4.2 La corrosion biochimique :

Certaines bactéries peuvent corroder les conduites métalliques, en particulier les canalisations enterrées. Les bactéries se développent sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des sites de la conduite qui sont faiblement aérés. C'est delà qu'on déduit les trois mécanismes de la corrosion biochimique :

- Corrosion chimique par production d'agents corrosifs tels que le CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique, formant d'acide sulfurique qui attaque le métal des canalisations enterrées.
- Réduction de sulfates par les bactéries sulfato-réductrices par l'intermédiaire d'hydrogène provenant des régions cathodiques par exemple, ce qui conduit à une formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.
- Formation de piqûres sur le métal là où se trouve les dépôts résultants de l'attaque des bactéries, dû au processus de corrosion causée par la différence de concentration en oxygène.

♦ Les bactéries associées à la corrosion :

Les bactéries sulfato-réductrices : Ce sont des bactéries anaérobies réductrices des sulfates, qui donnent des sulfures suivant la réaction :

INTRODUCTION A LA CORROSION



Ici, l'hydrogène est fourni par les plages cathodiques ou les composés organiques d'environnement.

Les bactéries slimes forming : C'est un ensemble de bactéries qui produisent des capsules boueuses dans certaines conditions d'environnement. Ces bactéries sont aérobics ; elles consomment de l'oxygène et rendent le milieu favorable pour le développement des bactéries sulfato-réductrices.

Les bactéries de fer : Elles sont des bactéries aérobics et elles puissent leur énergie de synthèse dans la consommation des ions ferreux et leur oxydation en ions féeriques suivant la réaction :



Cette réaction consomme les ions ferreux et les ions de OH^- , ce qui dépolarise à la fois les anodes et les cathodes comme suit:

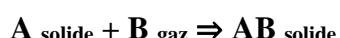


Ce qui provoque une augmentation du courant de corrosion.

I.4.3 La corrosion chimique (sèche) :

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase gazeuse. Elle se déroule dans le domaine atomique sans présence d'un électrolyte, car l'échange d'électrons durant le processus d'oxydoréduction s'effectue directement et ne requiert pas un passage de courant. L'air se compose d'oxygène, de la vapeur d'eau, et des vapeurs acides qui sont des agents corrosifs (oxydants gazeux). Parmi ces derniers on trouve le CO_2 , SO_2 , H_2S , etc.

Cette réaction nécessite généralement des températures élevées et elle est souvent accompagnée de corrosion électrochimique. Elle est de la forme suivante :



I.4.4 La corrosion sous contrainte :

C'est le processus de développement de fissures sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce.

INTRODUCTION A LA CORROSION

Les contraintes de tension sont jugées dangereuses, pendant que les contraintes de compression exercent au contraire une action protectrice.

Cette corrosion se produit généralement dans les milieux peu ou non agressifs à l'égard du métal ou de l'alliage en absence de toute contrainte, avec de faibles pertes de métal. D'un point de vue pratique, elle constitue un risque permanent dans de nombreuses installations industrielles (personnel, fiabilité des équipements, respect de l'environnement).

❖ Prévention :

- Utiliser des inhibiteurs comme mesure de précaution.
- Eliminer les éléments corrosifs dans l'environnement.
- Abaisser les contraintes par recuit ou relaxer les contraintes résiduelles par traitements thermiques de détente.
- Augmenter de la section du pipe ou réduire les charges.
- Eviter les couples matériau/milieu qui sont connus de conduire à la corrosion sous contrainte.
- Changer l'alliage. Par exemple l'acier ordinaire est plus résistant à la corrosion sous contrainte que l'acier inoxydable, bien qu'il soit moins résistant à la corrosion généralisé que celui-ci.
- S'assurer qu'il n'y a pas de dégagement d'hydrogène, car ça va inverser l'effet de la protection cathodique et elle deviendrait néfaste.

I.4.5 La corrosion par érosion/ par cavitation :

Dans les cas où il y a formation de dépôts continus produits de la corrosion, cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal dû au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, et la corrosion s'accélère. Ce processus est aussi causé par le frottement lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre.

A la suite de l'augmentation de la vitesse du liquide déplacé ou à la diminution de sa pression statique en dessous de sa tension de vapeur, il y a formation de bulles de vapeur dans la canalisation. Il y aura alors un violent martèlement de la surface du métal et une destruction locale du film protecteur, et la corrosion pourra se développer à nouveau.

Ce type de corrosion n'est généralement pas répandu.

INTRODUCTION A LA CORROSION

❖ Prévention :

- Concevoir des meilleures formes, géométrie, et renforcer l'épaisseur des zones susceptibles, en évitant en particulier les variations brutales de sections créant des zones de turbulence, bien que les changements brusques de direction.
- Réduire la formation des bulles par des surfaces mieux polies.
- Utiliser des matériaux de grande résistance.
- Utiliser un revêtement uniforme et durable.

I.4.6 La corrosion par courants vagabonds :

Les lignes de transports à traction électrique sous courant continu comme le métro et les tramways propagent des courants vagabonds dans le sol. Ces courants qui s'échappent peuvent emprunter des circuits peu résistants électriquement tels que les conduites, sur des parcours de dizaines de kilomètres, avant de rejoindre le générateur à proximité de la sous-station.

STRAY DIRECT CURRENT CORROSION

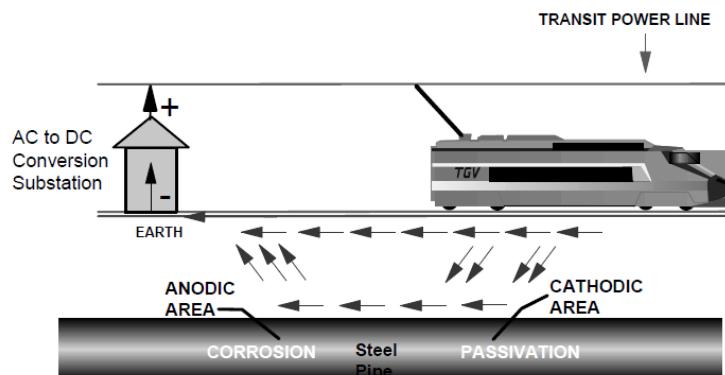


Figure 5: La corrosion par courants vagabonds

La corrosion se produit à l'endroit où les courants vagabonds quittent la conduite pour retourner au rail. Sachant que l'acier a une consommation d'environ 10kg/a.An, d'après la loi de Faraday, le taux de la corrosion est proportionnel aux intensités de ces courants, produisant des pertes de métal et des percements de conduites.

I.4.7 La corrosion électrochimique :

♦ I.4.7.1 Définition :

Considérée comme le phénomène de corrosion le plus important, c'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte, accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique. On cite par exemple la dégradation de l'aluminium par l'acide sulfurique. Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc.), sans lequel la corrosion ne peut se produire.

La corrosion électrochimique correspond à une réaction d'oxydo-réduction où :

L'oxydation du métal est appelée 'réaction anodique'.

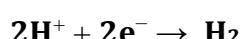
La réduction d'un agent oxydant est appelée 'réaction cathodique'.

♦ I.4.7.2 Principe :

Prenant le Fer comme exemple, le processus de la corrosion électrochimique peut être introduit comme suit :



Cette équation signifie la transformation des atomes de Fer en ions positifs de Fe^{2+} qui quittent le métal pour rejoindre l'électrolyte. Il y a donc un changement de l'état de la matière lié à la réaction de dissolution du métal, qui s'accompagne de la libération d'électrons. Pour conserver la neutralité du milieu, il est imposé que ces électrons soient consommés dans une seconde réaction, appelée la réaction de réduction. Dans un milieu acide, par exemple, on a :



En résumé, au cours de la corrosion électrochimique, la surface de la structure devient siège à deux réactions : une réaction anodique (l'oxydation) et une réaction cathodique (la réduction). Elles s'accompagnent de la circulation des électrons dans le métal et d'ions dans l'électrolyte entre la zone cathodique et la zone anodique, créant un courant électrique.

Le processus de corrosion ne se déclenche que si les quatres éléments du circuit sont présents :

- La zone anodique: Ou bien l'anode, est le siège de la réaction d'oxydation où le métal libère ses ions et passe en solution.

INTRODUCTION A LA CORROSION

- La zone cathodique: Ou bien la cathode, où les réactions de réduction se développent pour permettre à l'équilibre de se renforcer.
- L'électrolyte : L'électrolyte est un conducteur ionique, tel que le sol, auquel s'applique la loi d'Ohm généralisée : $U = E + R \cdot I$. Il permet le passage du courant électrique entre l'anode et la cathode. Il s'agit d'une conduction ionique.
- Le chemin métallique: Le déplacement des ions engendre une conduction de courant sous l'action d'un champ électrique, où les cations (ions +) se dirigent vers la cathode dans le sens du champ et les anions (ions -) se dirigent vers l'anode. La conductibilité électrique est proportionnelle à la concentration en espèces ionisées.

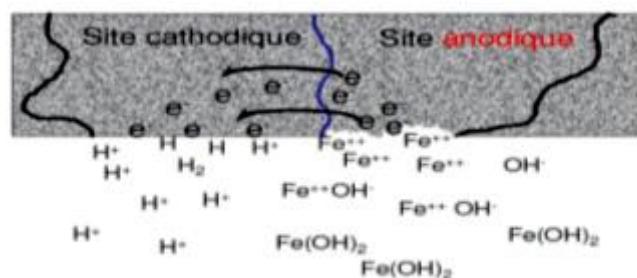


Figure 6: Le circuit de corrosion

♦ **I.4.7.3 Types de piles de corrosion :**

I.4.7.3.1 Les piles géologiques :

Dû aux sols dissimilaires, on parle du cas d'un pipeline traversant deux zones de sols différents, le potentiel du métal du pipeline, à l'électrolyte représenté par le premier type de sol, est légèrement différent du potentiel du même métal à l'électrolyte représenté par un sol de composition différente. En remarque généralement que les sols argileux, marécageux et les terrains humides se comportent comme des zones anodiques vis à vis des autres terrains.

I.4.7.3.2 Le couplage galvanique :

Causé par l'association de métaux dissimilaires, c'est une corrosion qui s'établit au moment où deux différents métaux utilisés dans la construction d'une canalisation, à condition qu'il y ait un contact électrique entre eux et qu'ils soient en contact avec un électrolyte commun (sol ou eau). On

INTRODUCTION A LA CORROSION

s'attend à ce que les deux métaux aillent une différence de potentielle entre eux. Lequel de ces deux sera anodique et ce corrodera dépend de leur position dans la série galvanique. La corrosion touche celui dont le potentiel est le plus négatif, Il est donc possible de prévoir le sens des réactions entre les deux en mesurant et en comparant leurs potentiels. Ce problème ne s'arrête pas là, mais il existe également à l'échelle macroscopique, au niveau des soudures par exemple, et à l'échelle microscopique, au niveau des inclusions ou hétérogénéités du métal.

1.4.7.3.3 Les piles dues à l'aération différentielle :

Une autre source importante de corrosion est l'aération différentielle, considérée comme une des raisons les plus importantes des dommages causés par la corrosion. Supposons qu'une canalisation est enterrée dans un sol complètement uniforme mais que certaines zones de cette canalisation sont mieux alimentées en oxygène alors que d'autres sont mal aérées. Dans ce cas, la partie qui se trouve dans le sol bien aéré sera cathodique et celle qui est dans le sol mal aéré sera anodique et corrodée. Elle se produit généralement dans la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins.

❖ Mesures de prévention :

- Choisir des métaux de potentiels très près les uns des autres.
- Introduire une électrode anodique par rapport aux deux autres métaux.
- Isoler les deux métaux dissimilaires par des entretoises et des rondelles en bakélites.

I.5 Les catégories générales de corrosion :

I.5.1 La corrosion uniforme :

La corrosion uniforme, aussi appelée corrosion généralisée entraîne une diminution régulière de l'épaisseur du métal ou simplement un changement de coloration (ternissement) car il est attaqué avec la même vitesse sur toute sa surface. Ce type de corrosion peut avoir des causes chimiques, électrochimiques, ou encore mécaniques.

On note que les surfaces rugueuses subissent des attaques plus importantes. Il n'est pas possible de distinguer entre les zones cathodiques et les zones anodiques à l'échelle macroscopique, toute la surface du métal est simultanément anode et cathode.

INTRODUCTION A LA CORROSION

❖ Moyens de prévention :

- Utiliser un revêtement sur la surface de la structure.
- Injecter des inhibiteurs de corrosion.
- Installer un système de protection cathodique.

I.5.2 La corrosion localisée :

Le procédé de la corrosion localisée se déroule en deux étapes, la première étant la rupture du film protecteur (amorçage), et la deuxième étant la propagation qui correspond à la croissance en largeur et en profondeur de la zone attaquée.

- L'amorçage est généralement lié aux hétérogénéités existantes soit sur la surface du métal ou dans le milieu environnant.
- La vitesse de propagation de la corrosion est contrôlée par le rapport des surfaces anodiques et cathodiques couplées entre elles.
- La physicochimie du milieu joue aussi un rôle à ce niveau, on note que l'alcalinité peut ralentir l'acidification pendant que la présence des ions tels que les sulfates encourage la corrosion localisée.

♦ I.5.2.1 Morphologies de la corrosion localisée :

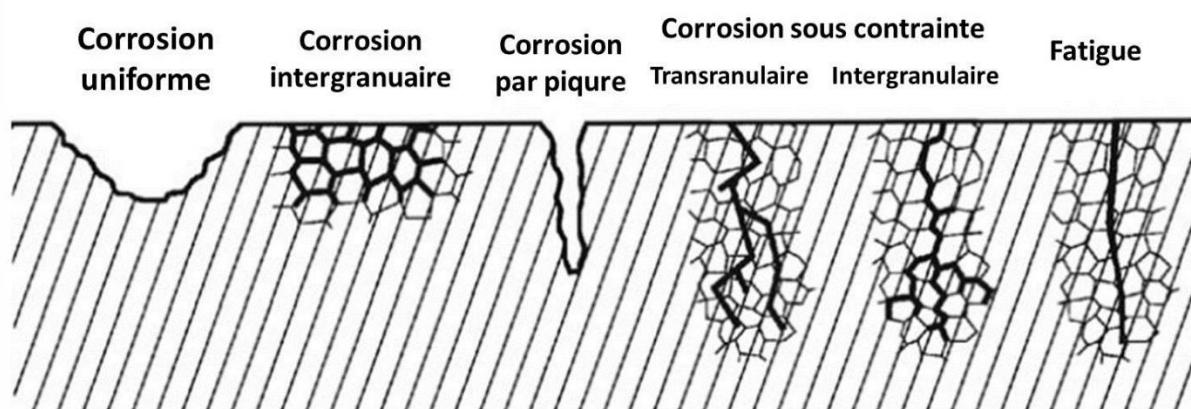


Figure 7: Morphologies de la corrosion

I.5.2.1.1 La corrosion par piqûres :

Sous certaines conditions, des corrosions locales du type piqûre (pitting) se développent dans le sol ou l'eau, c'est une forme de corrosion localisée, qui se manifeste par de petites piqûres ou de petites cavités sur le métal. Avec des vitesses de corrosion de 0,3 mm/an, ce type de corrosion diminue considérablement la durée de vie des ouvrages enterrés concernés.

L'attaque peut se progresser très rapidement en profondeur, beaucoup plus dans la présence des solutions agressives contenant des chlorures, bromures, hypochlorites, et les sulfures. Les piqûres peuvent se former dans la présence d'un cation oxydant tel que Fe^{3+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} ...etc. même en absence d'oxygène.

La corrosion par piqûres est extrêmement insidieuse, produisant une perte très localisée de métal qui ne se révèle qu'en phase finale par un très petit trou sur la face externe du pipe. Ce dernier peut même se trouver obstrué par des résidus de corrosion.

Ce type de corrosion peut se produire de différentes manières, telles que les résidus présents dans la canalisation ou véhiculés par le fluide, un changement très localisé dans la composition du métal, un défaut dans la surface interne du pipe, ou une rupture de continuité de la couche protectrice.

On note que les métaux les plus sensibles aux piqûres sont généralement ceux qui forment une couche de passivation pour se protéger de la corrosion.

Mesures de prévention :

- Refermer les piqûres par soudage lorsque c'est possible.
- Augmenter la vitesse d'écoulement des fluides.
- L'acier ordinaire a une meilleure résistance aux piqûres que l'acier inoxydable dans certains milieux (tels que l'eau de mer).
- La résistance aux piqûres est améliorée considérablement par l'addition de 2% de Mo.
- Prévoir l'enlèvement des particules solides en suspension dès le début de l'exploitation.
- Inspecter et nettoyer les dépôts régulièrement.
- Utilisation des assemblages soudés au lieu des assemblages boulonnés.
- Affiner l'état de la surface du pipeline.

INTRODUCTION A LA CORROSION

- Concevoir des récipients faciles à nettoyer afin d'empêcher tout dépôts de se former.

I.5.2.1.2 La corrosion intergranulaire :

Elle se présente par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. Ces joints sont des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique plus régulier des grains. Ils contiennent de nombreux défauts de structures favorables à la précipitation de phases intermétallique ainsi qu'à la ségrégation d'impureté en solution solide. Ces zones sont chimiquement plus actives ce qui leur permet d'être attaquées plus rapidement par le milieu corrosif que les faces des grains. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques.

On cite par exemple des petites quantités de fer dans l'aluminium, qui vont ségrégner au niveau des joints de grains et créer une corrosion intergranulaire.

❖ Mesures de prévention :

- Utiliser d'acières de type AISI 316Ti qui contient un élément d'addition tel que le titane ou le niobium qui préviennent la formation de carbures de chrome par leur grande affinité pour le carbone. Ou bien, utiliser des aciers inoxydables à très faible teneur en carbone comme le type QISI 304 L ou 316 L.
- Traiter les pièces sensibilisées telles que les zones soudées thermiquement pour solubiliser les carbures et ré-homogénéiser le chrome dans l'alliage.

I.5.2.1.3 La corrosion Caverneuse :

Elle est généralement associée au contact d'une pièce métallique avec un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets. Ça se voit aussi dans le cas des joints en matériau souple, poreux ou fibreux (bois, ciment, amiante plastique, caoutchouc, ...).

Le mécanisme de la corrosion sous crevasse se base sur l'acidification progressive du milieu dans l'interstice avec l'apparition de conditions locales très agressives du milieu qui détruisent la passivité.

Dans les métaux et alliages dont la tenue dépend de la stabilité du film passif, ce type de corrosion est rencontré car ces films sont instables en présence de concentrations importantes en Cl^- et H^+ .

INTRODUCTION A LA CORROSION

❖ Mesures de prévention :

Les mêmes mesures de prévention de piqûres sont pratiquement applicables aux crevasses.

I.5.2.1.4 La fragilisation par l'hydrogène :

La présence d'atomes d'hydrogène dans un réseau métallique, provenant soit de l'atmosphère ou des procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique, peut entraîner des détériorations de métal avec une chute catastrophique de ses propriétés mécaniques.

Plusieurs types de dégâts peuvent être provoqués par la pénétration de l'hydrogène dans le réseau.
A titre d'exemple :

- Dans le cas de titane et d'autres métaux très réactifs vis-à-vis de l'hydrogène (tels que Ta, Zr, V, PCI...) on remarque des précipitations sous forme d'hydrures.
- Les atomes d'hydrogène peuvent se recombiner lorsque le métal présente des défauts macroscopiques ou microscopiques : C'est la recombinaison sous forme d'hydrogène moléculaire. Par conséquent, on peut atteindre des pressions considérables qui engendrent des boursouflures, des cloques, des cohésions en "marches d'escalier" ou même des éclatements.
- La fragilisation c'est quand les atomes d'hydrogène interagissent avec les dislocations du réseau, conduisant à une diminution importante de la capacité de déformation plastique du métal, et il devient alors fragile.

❖ Mesures de prévention :

- Réduire la vitesse de corrosion.
- Modifier les conditions d'électrolyse.
- Changer l'alliage.
- Souder convenablement.

I.5.2.1.5 La corrosion sélective :

Elle se traduit par la dissolution sélective d'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou d'une des phases si l'alliage est polyphasé. La corrosion sélective résulte de l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

I.5.2.1.6 La corrosion sous fatigue :

Ce phénomène se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau à la fatigue. Il est très comparable à la corrosion sous contrainte et il apparaît sous l'action de l'environnement et d'une sollicitation cyclique.

On entend par le terme de l'endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutives à l'application des cycles d'efforts. La répétition de ces cycles entraîne la rupture des pièces utilisées dans les constructions humaines.

La rupture peut se produire sous des contraintes apparemment faibles, ce qui rend la fatigue néfaste. La rupture apparaît brutalement lorsque la fissure dépasse la taille critique, indiquant que l'endommagement ne s'accompagne souvent d'aucunes modifications de forme ou d'aspect de la pièce.

♦ I.5.2.2 Paramètres influents sur la forme et le type de la corrosion :

Il y a une multitude de facteurs qui déterminent le comportement de la corrosion, tels que :

- La composition chimique de l'environnement.
- La composition chimique du métal et sa microstructure.
- Des paramètres physiques comme la température, la convection, l'irradiation, etc.
- Les sollicitations mécaniques (contraintes, frottements, chocs, etc.).

I.6 Les Causes principales de corrosion :

La corrosion peut être causée par plusieurs facteurs, y compris: la teneur en humidité de l'électrolyte, les concentrations d'ions, la composition des grains métalliques, les imperfections de fraisage, les rayures sur la structure et les arêtes vives, les défauts de soudure, défauts de revêtement, et construction de pipeline par segments (non-continuité).

I.6.1. Les défauts de revêtement :

Il existe plusieurs types de défauts de revêtements, qui peuvent conduire dans certains cas à la corrosion. Les origines et les conséquences de ces défauts sont diverses.

♦ I.6.1.1 Porosité :

C'est le cas d'un revêtement constitué d'un matériau à une porosité intrinsèque qui permet l'accès des agents corrosifs tels que l'eau, l'oxygène, CO₂ à la surface de la structure.

♦ I.6.1.2 Défaut ouvert :

Ce défaut met le métal en contact direct avec le milieu électrolytique. Dans ce cas, la continuité électrique est nécessaire pour avoir une protection cathodique efficace. On peut distinguer pour ce type de défaut une 'taille critique' en dessous de laquelle les courants de protection ne seront plus efficaces du à la résistance intrinsèque importante du défaut.

♦ I.6.1.3 Défaut avec écran :

Quand un obstacle non conducteur s'introduit et reste enfiché dans le revêtement, typiquement une pierre, l'espace libre entre cette pierre et le revêtement peut créer un effet d'écran en empêchant les courants de protection cathodique de protéger la structure par l'entrainement d'une chute ohmique. Il deviendra aussi possible de laisser passer les agents corrosifs et il peut s'engendrer une pile d'aération différentielle entre le point de contact de la pierre et la partie en contact de l'électrolyte aéré.

♦ I.6.1.4 Défaut ouvert avec décollement du revêtement :

C'est souvent le résultat d'un défaut d'application ou d'un vieillissement d'un trou existant. On dit 'trou unique débouchant' dans le cas d'un décollement présentant une seule ouverture sur le milieu extérieur. On considère dans ce cas des paramètres tels que la taille du défaut, la surface du métal mis à nu, et la hauteur de l'interstice entre le métal et le revêtement.

♦ I.6.1.5 Fluage du revêtement :

C'est un cas particulier de décollement observé généralement sur des conduites de grand diamètre. Il semblerait que le fluage s'amorce dès la pose du revêtement à cause d'une préparation non-appropriée du métal mais surtout à cause de son exposition à la chaleur avant d'être enfoui. Il est admis que le responsable de ce phénomène est l'élévation de la température du revêtement, le plus souvent lors des opérations de pose. Du au fluage, on observe parfois une absence totale de revêtement sur une bande de quelques centimètres de largeur sur le haut du tube.

♦ I.6.1.6 Défauts ouverts communicants :

En raison du décollement du revêtement, plusieurs défauts ouverts peuvent finir par communiquer s'ils sont proches les uns des autres, créant alors une circulation d'électrolyte.

I.6.2 Métaux dissimilaires :

En principe, la corrosion existe due à une différence des potentiels des métaux contenus dans un électrolyte conducteur. Les différences de potentiel peuvent être causées par le couplage de métaux différents entre eux, des variations au sein d'une même structure, des variations de l'électrolyte ou une combinaison de ces derniers.

I.6.3 Couplage d'un nouvel acier avec un vieux :

Lorsqu'un nouvel acier est couplé à un vieil acier de même potentiel, le nouvel acier se corrode par rapport à l'ancien.

I.6.4 Rapport des surfaces anode/cathode :

Plus la surface de la cathode est grande, plus le taux de corrosion est plus important. C'est dû à la demande en électrons, qui engendre un taux augmenté de dissolution des métaux dans la zone anodique. Si la densité de courant est élevée dans une petite zone anodique, on constate une corrosion rapide et sévère.

I.6.5 Nature de l'environnement corrodant :

♦ I.6.5.1 La concentration d'oxygène :

Une grande teneur en oxygène dissous engendre un taux de corrosion important, et les régions où la concentration en oxygène est moindre deviennent le siège de la corrosion. Ces zones anodiques ont souvent lieu sous les rondelles mécaniques où la diffusion de l'oxygène est difficile. C'est aussi la raison pour laquelle est née la corrosion par aération différentielle, comme le cas d'une conduite traversant deux sols de différentes concentrations en oxygène.

♦ I.6.5.2 Effet de la température :

Elle joue un rôle important dans la solubilité des gaz corrosifs dans un liquide, tel que la solubilité augmente avec l'augmentation de la température, et les gaz auront tendance à pénétrer dans un fluide et passer en solution plus facilement. Ça se traduit par l'augmentation de la

INTRODUCTION A LA CORROSION

vitesse de corrosion, raison pour laquelle la corrosion intergranulaire et la corrosion sous contraintes sont observées à haute température.

♦ **I.6.5.3 Le débit :**

Les écoulements turbulents et les débits importants enlèvent le film créé par les produits de corrosion, exposant les surfaces métalliques nues aux agents corrosifs, ce qui augmente la corrosion.

♦ **I.6.5.4 L'humidité :**

La présence de l'humidité est une des causes d'un taux augmenté de corrosion, contrairement à l'air sec. Elle agit comme un solvant de l'oxygène de l'air, créant une cellule de corrosion. On constate que la rouille de Fer augmente considérablement avec l'augmentation de l'humidité relative de l'air de 60% à 80%.

♦ **I.6.5.5 Le PH du sol :**

Les variations de PH du sol contribuent à la corrosion. Les parties du métal exposées à un PH plus bas deviennent anodiques par rapport à celles exposées à un PH plus élevé.

♦ **I.6.5.6 La résistivité du sol :**

La corrosion peut se manifester à la jonction d'un changement prononcé de la résistivité su sol.

♦ **I.6.5.7 Propriétés chimiques des sols :**

Elles sont mises en évidence par la mesure du pH. La plupart des sols ont un pH compris entre 5 et 8. Les sols contiennent des sels dissous à des concentrations de 100 à 1500 ppm. La teneur en sel est fonction des précipitations. Des pluies abondantes lavent les terrains et leur salinité est faible. Dans les régions arides, au contraire, où l'eau remonte du sol pour s'évaporer, la concentration en sels peut devenir très importante. Les cations les plus répandus, qui causent l'agressivité, sont les ions Potassium, Sodium, Magnésium et Calcium.

Les anions présents, Chlorures et Sulfates, augmentent la conductibilité de l'électrolyte et facilitent donc les transferts électriques causant les corrosions.

♦ I.6.5.8 Présence d'impuretés dans l'atmosphère :

Certaines particules présentes en suspension dans l'atmosphère absorbent l'humidité, causant la formation des cellules galvaniques, et augmentant la vitesse de la corrosion. Parmi ces particules actives on a : NaCl, NH₄, les Nitrates, les Sulfates, l'Ammoniac NH₃... etc.

I.7 L'importance de l'étude de la corrosion :

On étudie la corrosion pour les raisons suivantes :

- L'économie : Elle concerne la réduction des pertes de matériel résultantes de la détérioration ou la rupture soudaine de tubulures, réservoirs, pièces métalliques de machines, coques de navires, structures marines ...etc.
- La sécurité : C'est à propos des risques liés aux incidents causés par des appareils sous pression, réservoirs métalliques, produits radioactifs, conduites de transport, rotor et ailettes de turbines ...etc.
- Raisons écologiques : Telles que la pollution de l'environnement, le gaspillage de l'eau et de l'énergie nécessaires à la transformation des matières premières en structures métalliques.

I.8 Conclusion :

La corrosion fait parti d'une des causes principales d'endommagement des aciers des pipelines et d'autres structures métalliques. On remarque que la corrosion localisée est le phénomène le plus rencontré et le plus néfaste du fait de sa simplicité d'apparition et des dégâts qu'il peut engendrer sur les ouvrages métalliques bien que ceux en béton armé. Plusieurs facteurs intrinsèques comme les inclusions, les zones mal décalaminées, les rayures, ou encore plus l'aération différentielle, le PH, et les substances agressifs jouent un rôle important dans l'amorçage de la corrosion.

Néanmoins, plusieurs études ont été conduites par des spécialistes, et pas mal de méthodes de protection ont été inventé pour remédier ce problème et lutter contre ses effets catastrophiques. Dans le chapitre prochain, j'introduis les types de protection passifs et actifs, tout en citant leurs caractéristiques et domaines d'utilisation, avec l'établissement d'un tableau comparatif à la fin.

CHAPITRE II :

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

II.1 Introduction :

La corrosion électrochimique résulte d'une réaction entre un métal et un électrolyte conducteur, d'où se produisent deux phénomènes principaux : la dissolution du métal dans les sites anodiques produite par les réactions d'oxydation, et la formation des dépôts métalliques créés par les réactions de réductions des sites cathodiques. Pour interrompre ce processus, on sait qu'il est généralement impossible de modifier la nature de l'électrolyte, mais il est plus facile d'agir sur le métal lui-même.

La protection contre la corrosion se fait de plusieurs manières, à savoir :

- ✓ La protection passive : Qui consiste à agir soit sur le métal ou sur le milieu, en utilisant des revêtements afin d'isoler les deux ou en injectant des inhibiteurs de corrosion.
- ✓ La protection active : Ou bien la protection cathodique, consiste à fournir un courant continu qui baisse le potentiel du métal vers un potentiel d'immunité, selon le diagramme de Pourbaix, ce qui réduit les réactions anodiques considérablement.

Il est nécessaire d'incorporer ces mesures lors de la conception de chaque installation métallique pour éviter les problèmes de corrosion dans le futur ainsi qu'assurer une assez longue durée de vie aux équipements pour un cout minimal, et une production continue.

II.2 Notions de base :

II.2.1 Mesure du potentiel d'un métal dans une solution :

La mesure se fait avec le métal plongé dans l'électrolyte qui est dans son voisinage immédiat. Les produits d'oxydoréduction solides (les oxydes) ou gazeux (comme l'hydrogène adsorbé au niveau des cathodes ou l'oxygène au niveau des anodes) sont contenus dans le milieu baignant la surface du métal, dont le PH diffère du reste de l'électrolyte (plus alcalin s'il s'agit d'une cathode, plus acide s'il s'agit d'une anode).

L'électrode de référence est donc placée dans le milieu ambiant, le plus près possible du métal, car c'est ce dernier qui lui fixe son potentiel et son état. Il est difficile de prendre des mesures correctes dans le cas d'ouvrages enterrés ou immergés parce que le positionnement de l'électrode de référence est rarement à proximité du métal, mais généralement au niveau du sol, ce qui ne reflète pas le potentiel exacte de l'ouvrage. L'éloignement de l'électrode introduit une erreur qui intègre

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

dans la mesure du potentiel des chutes de tension dans l'électrolyte lorsqu'il est parcouru par des courants électriques.

II.2.2 Densité de courant de protection:

C'est la quantité de densité de courant de protection requise pour amener le potentiel de la structure vers -850mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄. Elle dépend de l'environnement et du métal qu'on veut protéger.

La densité de courant est un paramètre essentiel pour le dimensionnement d'un système de protection cathodique, soit pour déterminer le nombre d'anodes sacrificielles, soit pour identifier les caractéristiques des postes de soutirages s'il s'agit d'une installation par courant imposé.

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 1 : La densité de courant de protection en fonction de l'électrolyte environnant

On note que pour une structure revêtue, un coefficient de mise à nu de l'acier par dégradation doit être pris en compte. Par exemple, ce coefficient est généralement compris entre 2-10% pour le revêtement d'un pipeline, en fonction de la qualité présumée du revêtement.

II.2.3 La chute ohmique : (IR drop)

C'est une notion directement liée à la loi d'ohm. Quand un courant voyage à travers une résistance, une chute de tension se produit le long du circuit, qui est égale au courant multiplié par la résistance $U=RI$. Cette tension disparait ou se rapproche de zéro si le courant est stoppé.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

Ainsi, une mesure à l'instant off veut dire une prise de potentiel qui est effectuée immédiatement après l'arrêt du système de protection. La valeur mesuré dans cet instant correspond à une lecture prise sans l'effet de la chute ohmique, et elle est considérée la plus précise quant à la vérification du potentiel de la structure elle-même, permettant d'établir une protection cathodique bien efficace.

II.2.4 L'agressivité du sol :

Il est nécessaire de prédire l'agressivité du sol afin de bien prévenir la corrosion. Ça nous aide à Spécifier les types de revêtements et autres matériaux à utiliser, les intervalles d'inspection et d'entretien pour les structures enterrées et les installations connexes, ainsi que l'optimisation de la protection cathodique.

♦ II.2.4.1 Généralités :

Le sol se compose de : matière minérale, air, eau et matière organique. Quand on parle des composantes corrosives, on peut citer : les Chlorures, Sulfates et Sulfures.

Parmi les facteurs qui affectent la corrosivité du sol on a : la concentration en chlorures, sulfates, et sulfures, l'humidité du sol, la teneur en oxygène, la perméabilité et la texture du sol, le PH, la température, la résistance du sol, les caractéristiques de drainage, activité microbiologique, les courants vagabonds, la pollution et le déversement de substances corrosives.

♦ II.2.4.2 Mesure de l'agressivité du sol :

Celle-ci peut être déduite de la mesure de la résistivité électrique du sol. Le tableau ci-dessus montre le degré d'agressivité d'un sol en fonction de la résistivité mesuré :

Résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Corrosivité du sol
Inférieure à 500	Très sévère
De 500 à 2000	Sévère
De 2000 à 5000	Haute
De 5000 à 10 000	Modérée
De 10 000 à 25 000	Moyenne
De 25 000 à 50 000	Légère
Supérieure à 50 000	Faible

Tableau 2: L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité

Cependant il ne suffit pas de savoir si la résistivité est grande ou faible, mais plutôt d'essayer de savoir pourquoi elle est grande ou faible. La résistivité elle-même ne représente pas tous les phénomènes qui entraînent la corrosion du métal, comme l'on précis MM. GIRARD et POIRIER : "Ce n'est pas un critère formel de décision, mais plutôt un critère certain d'orientation, car si tous les ions présents dans le sol sont équivalents du point de vue résistivité électrique, ils n'ont pas tous la même influence sur l'effet corrosif du sol".

II.3 Prévention de la corrosion par une forme adaptée des pièces :

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux pièces des formes bien distinctes afin de leur procurer une meilleure résistance et une plus longue durée de vie. Voici les cas les plus rencontrés dans l'industrie pétrolière et les solutions employées pour limiter les risques de chaque type de corrosion :

II.3.1 Corrosion sous contrainte :

Des actions préventives peuvent être appliquées sur la géométrie des structures permettant de réduire ou bien supprimer les zones de concentration de contraintes, en jouant sur la distribution des contraintes sur la surface de la pièce.

II.3.2 Corrosion humide :

La corrosion atmosphérique ne se produit que dans la présence de l'humidité. Il est donc évident dans ce cas d'éviter les zones de rétention d'eau en prévoyant un drainage plus ou moins parfait, et en assurant une aération convenable.

Nous cherchons donc à concevoir des pièces de formes adaptées aux fonctions citées précédemment telles que des formes permettant :

- Un bon drainage et une meilleure vidange.
- D'éviter l'accumulation des goulettes en bas des réservoirs.
- D'éviter l'accumulation d'humidité entre le pipeline et le sol.

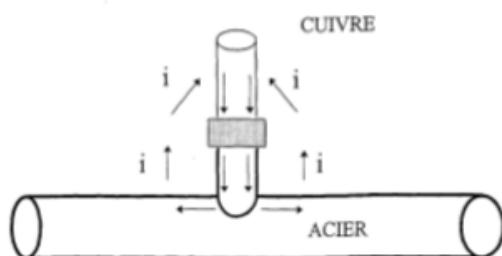
II.3.3 Corrosion galvanique :

On est parfois obligé, pour des raisons de conception, d'assembler des pièces de matériaux différents, comme dans le cas des branchements des abonnées (conduite en cuivre) sur les réseaux de distribution urbaine de gaz (conduite en acier). On lutte contre la dégradation du métal le moins noble en utilisant une de ces solutions :

- Isolation électrique : Pour couper le circuit électrique et empêcher toute circulation de courant afin de protéger le métal qui présente la partie anodique.

ISOLEMENT DES DIFFERENTS METAUX CONSTITUTIFS DES OUVRAGES

BUT : Empêcher la circulation des courants dus aux couples galvaniques.



Différents types de raccords isolants :

- R.I. monobloc
- R.I. à brides

Figure 1: Un raccord isolant

- Utilisation des pièces sacrificielles : Ce sont des pièces échangeables qu'on sacrifie au profit de l'équipement qui devrait se corroder.

II.3.4 Corrosion par érosion :

C'est un phénomène causé par l'écoulement du fluide, on est alors exigé de concevoir des pièces résistantes aux grandes vitesses d'écoulement, bien que d'éviter les changements brusques de section et de direction.

II.3.5 Corrosion par cavitation :

Elle se produit particulièrement dans les extrémités des surfaces de contact entre les pièces, les angles serrées des conduites et les recoins de la même pièce. On gère ce phénomène en installant des joints isolants là où il y a contact et par l'adoucissement des coins.

II.4 Prévention de la corrosion par un choix des matériaux adéquats :

On sait qu'aucun matériau n'est parfaitement résistant à la corrosion, tant que la corrosivité ne dépend pas que du métal, mais aussi du milieu dans lequel il se trouve. Les seuils de protection sont alors ajustés pour convenir à chaque type de métal en fonction de son milieu environnant, comme est indiqué dans le tableau ci-dessous :

milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	m	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	m	-	-	-	+	+
Acide +Cl-	-	+	m	-	-	-	m	+
Base + O ₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	m	+	+	-	-	-	m	-

Tableau 3: Résistance des métaux dans des milieux différents

(Tiré de : Matériaux et corrosion, édition Masson Paris ; 1989)

où les notations signifient :

(+) : une bonne résistance

(-) : une mauvaise résistance

(m) : une résistance moyenne.

Dans certaines situations, on utilise des alliages connus pour leur résistance supplémentaire vis-à-vis à la corrosion en conditions particulières, comme :

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

-Les aciers en carbone et les aciers inoxydables.

-Les alliages de Cuivre.

- Les alliages de Nickel.

-Les alliages d'aluminium.

-Les alliages de Zirconium.

-Les alliages de Titane.

II.5 La protection passive :

Cette méthode consiste à soustraire l'ouvrage à protéger de son milieu agressif en utilisant d'isolateurs ou de revêtements adéquats. Elle nécessite aussi d'isoler cet ouvrage des autres métaux qui pourraient amener des couplages galvaniques.

De même, la protection passive ne constitue pas un remède définitif. Aucun revêtement ne confère à un ouvrage un isolement infini idéal. Malgré les contrôles effectués lors de la pose de l'ouvrage, il reste toujours des micropores qui mettent le métal en contact avec le sol. Cette protection est endommagée par les éléments constitutifs du terrain quels que soient les soins apportés au remblaiement de l'ouvrage. Sans oublier qu'avec le temps et le vieillissement des matériaux, la qualité initiale du revêtement se détériore petit à petit. Il est donc très important de mettre en œuvre une protection cathodique active, complémentairement à la protection passive.

II.5.1 Protection par revêtement :

Les mesures de protection contre la corrosion sont divisées en processus actifs et processus passifs. La protection électrochimique joue un rôle actif dans le processus de corrosion en modifiant le potentiel. Quand aux revêtements, ils maintiennent le milieu agressif à distance des structures à protéger. Les deux mesures de protection sont en théorie applicables séparément. Cependant, une combinaison des deux est nécessaire pour les raisons suivantes:

- Les revêtements sans défauts ne peuvent pas être installés et maintenus en état de fonctionnement de manière fiable. Sans protection contre la corrosion électrochimique, le risque de corrosion est accru si le revêtement est endommagé.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- De plus, l'alimentation en courant nécessaire peut être considérablement réduite par un revêtement, ce qui conduit à une diminution des coûts d'installation et de fonctionnement. Un autre avantage des courants de protection plus faibles est la réduction des interférences des installations voisines pour lesquelles le courant de protection est considéré comme un courant vagabond.

Parmi les types des revêtements utilisés contre la corrosion on trouve : Les revêtements métalliques, les revêtements organiques et les revêtements inorganiques non métalliques.

Les revêtements minces contiennent en général de nombreux groupes polaires qui favorisent l'adhérence. Les revêtements épais faiblement polaires ou non polaires (par exemple : PE) sont généralement combinés avec des adhésifs polaires pour obtenir la force d'adhérence nécessaire contre le décollement.

♦ **II.5.1.1 La fonction principale des revêtements :**

Elle est comprise dans la protection passive, ce qui veut dire assurer la protection contre le milieu environnant en évitant l'émigration et le renouvellement d'électrolyte sous l'isolation, et présenter une résistance électrique suffisante d'une bonne qualité au cours des temps afin de minimiser la puissance des installations de protection cathodique.

Ça comprend aussi l'annulation de contact électrique de la structure à protéger avec les conduites ou les ouvrages appartenant à des tiers, dû aux mises à terre importantes qu'il crée et qui mettrait en péril la protection cathodique de l'ouvrage en question. Sans oublier la réalisation de l'isolement des différents métaux constitutifs d'un réseau.

Les revêtements jouent aussi un rôle dans la réduction du besoin en courant de protection cathodique, notamment lors de la polarisation de la structure.

♦ **II.5.1.2 Caractéristiques des revêtements :**

Il est toujours recommandé qu'un revêtement possède les qualités suivantes :

- Une adhérence excellente avec le métal et une perméabilité suffisamment faible pour les composants corrosifs dans des conditions de service afin d'éviter l'infiltration du milieu électrolytique et tout risque de corrosion associé malgré la présence d'un système de protection cathodique fonctionnel.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- Une stabilité suffisante sous les influences électrochimiques, en particulier avec les mesures de protection électrochimique, autrement dit, une résistance efficace à l'action des corps chimiques présents dans le milieu environnant.
- Une résistance d'isolement élevée vis-à-vis de l'électrolyte pour limiter la consommation de courant de protection, et augmenter au maximum la portée de protection dans le cas des structures de grandes longueurs.
- Une bonne résistance aux contraintes mécaniques et thermiques durant la construction et, par la suite, en service, en particulier pendant le transport, le stockage et l'installation.
- Une perméabilité minimale à l'eau, aux ions, et aux gaz.
- Insensibilité aux bactéries qui peuvent endommager, voire détruire, le revêtement.
- Rester insensible aux mouvements du sol ainsi qu'aux actions du fluide transporté (température, vitesse, pression, surpression).
- Une bonne conservation de ces paramètres au cours du temps.

◆ **II.5.1.3 Types des revêtements :**

II.5.1.3.1 Les revêtements métalliques :

Couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique et l'usure, ces derniers remplissent souvent une fonction décorative.

On trouve deux types de revêtements métalliques :

• **Les revêtements anodiques :**

Ce sont des revêtements moins nobles que l'acier. On peut citer le Zinc, l'Aluminium et le Cadmium. Ils constituent l'anode de la pile et sont donc attaqués, tout en protégeant l'acier.

• **Les revêtements cathodiques :**

Constitués de matériaux qui forment des revêtements plus nobles tels que le Plomb, l'Etain, le Nickel, le Cuivre, l'Argent, l'Or, le Rhodium ou le Platine. L'acier ici devient l'anode de la pile, il est donc évident que la moindre fissure du revêtement entraînera l'attaque de l'acier. On doit donc s'assurer que le revêtement soit parfaitement continu et ne contient pas de défaut.

II.5.1.3.2 Les revêtements organiques :

Les revêtements organiques sont appliqués principalement pour protéger les pipelines et les réservoirs de stockage. Ils comprennent les peintures et vernis, les polymères et les matériaux bitumineux. Ceux-ci peuvent être appliqués en couches minces ou épaisses.

Les peintures et vernis sont des revêtements minces appliqués sous forme de liquides ou de résine en poudre avec une épaisseur d'environ 0,5 mm. Par exemple : résine époxy.

Les vernis sont appliqués pour la protection interne des réservoirs de stockage. Le vernis est imperméable à l'eau, c'est-à-dire qu'il sépare l'objet protégé du milieu corrosif. La protection ne peut échouer qu'en cas de défauts de ce revêtement et de sa corrosion.

- **Les revêtements à liants hydrocarbonés :**

Ils sont constitués par :

- Un primaire d'adhérence appliqué à froid.
- Une ou plusieurs couches de brai de houille ou de bitumes de pétrole appliquées à chaud à l'état fondu et maintenue par une armature de voile et de tissu de verre.

- **Les bandes :**

Elles sont essentiellement utilisées pour la perfection des revêtements aux endroits des soudures de raccordement ou des zones de dégradation. Il existe plusieurs types :

Les bandes grasses : Constituées d'un support en toile de verre ou en matériau plastique imprégné d'une graisse paraffiné. Celles-ci sont pratiquement abandonnées.

Les bandes adhésives à froid : Constituées d'un support en Polyéthylène ou en PVC plastifié enduit d'une couche adhésive. Les bandes plastiques sont enroulées à froid sur un primaire d'adhérence préalablement appliqué sur le métal.

Un système de protection par bandes est généralement constitué d'une première couche dite d'anticorrosion et d'une seconde couche dite couche de protection mécanique qui doit adhérer parfaitement au métal.

- **Les produits thermo rétractables :**

Ce sont des bandes ou manchons constitués d'un support en Polyoléfine articulé à mémoire thermique et d'une couche adhésive. Ils sont utilisés pour la réfection en droit des soudures et des accessoires de tuyauteries. Leur application se fait par chauffage sur un métal revêtu de primaire, à l'aide d'un chalumeau à flamme mole.

- **Les joints PF ou PP**

Ils peuvent être réalisés directement en Polyéthylène ou en Polypropylène par pulvérisation de poudre à chaud au pistolet (spraygun). Le résultat obtenu est de très bonne qualité mais cette méthode coûte très cher en raison des moyens importants à mettre en œuvre.

- **Les revêtements en Polythène :**

C'est une couche de Polyéthylène de 2 à 4 mm, qui à la fin donne un revêtement souple adapté au cintrage, et bien résistant aux chocs et aux poinçonnements. Ils sont utilisables jusqu'à environ 60°C.

II.5.2 Prévention par injection d'inhibiteur de corrosion :

- ♦ **II.5.2.1 Principe :**

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qu'on ajoute au milieu corrosif à faible concentration afin d'arrêter ou de ralentir le processus de corrosion du métal qui est en contact avec ce milieu.

L'action des inhibiteurs est fonction du système métal + solution dont ils se trouvent. Cependant, il existe des considérations de base valables pour tous les inhibiteurs :

Sachant que la corrosion est un processus essentiellement électrochimique, l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'au niveau d'une des étapes de réaction élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, absorption des espèces à la surface des phases solides, transfert de charge électronique.)

Le mécanisme d'action de l'inhibiteur est à rechercher le plus souvent au voisinage immédiat de la surface étant donné que son intervention dans le processus de transport des espèces électroactives au sein de la solution est peu probable.

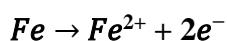
L'action des inhibiteurs peut être traduite comme suit :

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

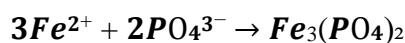
- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif.
- Le renforcement d'une barrière préexistante.
- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur et une ou plusieurs espèces du milieu corrosif.

♦ II.5.2.2 Les inhibiteurs Anodiques :

Où la réaction de l'anion de l'inhibiteur avec le cation métallique forme un précipité insoluble qui protège le métal par effet barrière. Prenant l'exemple de Na_3PO_4 comme inhibiteur avec le fer comme métal:



Le précipité ainsi formé est le $Fe_3(PO_4)_2$ par la réaction globale suivante :



♦ II.5.2.3 Les inhibiteurs Cathodiques :

Ici le précipité insoluble est obtenu de la réaction du cation de l'inhibiteur avec l'ion hydroxyde contenu dans le réactif. Prenant le Chlorure de Magnésium $MgCl_2$ comme inhibiteur :



Le précipité formé est l'Hydroxyde de Magnésium ; $Mg(OH)_2$.

Cette méthode est facile à mettre en œuvre mais elle est loin d'être le seul moyen d'intervention sur le milieu corrosif.

II.5.3 La protection contre les courants vagabonds :

Sachant qu'il est rarement possible d'intervenir sur les zones d'entrées des courants vagabonds dans une structure, on agit donc au niveau de la sortie de ce courant. On constate alors l'emploi de deux types de dispositifs de limitation :

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- Les dispositifs passifs : Qui se traduisent par des prises de terre polarisées afin de faciliter l'évacuation des courants qui on emprunté une structure métallique.

- Les dispositifs actifs : Ce sont des systèmes de régulation de drainage de courant.

Le drainage de courant : Il a pour but d'imposer un chemin de passage de courant dans un circuit préférentiel contrôlé à travers le terrain, en établissant une liaison polarisée entre la conduite et le chemin de fer. Avec l'ajout d'un système de régulation afin de limiter le courant.

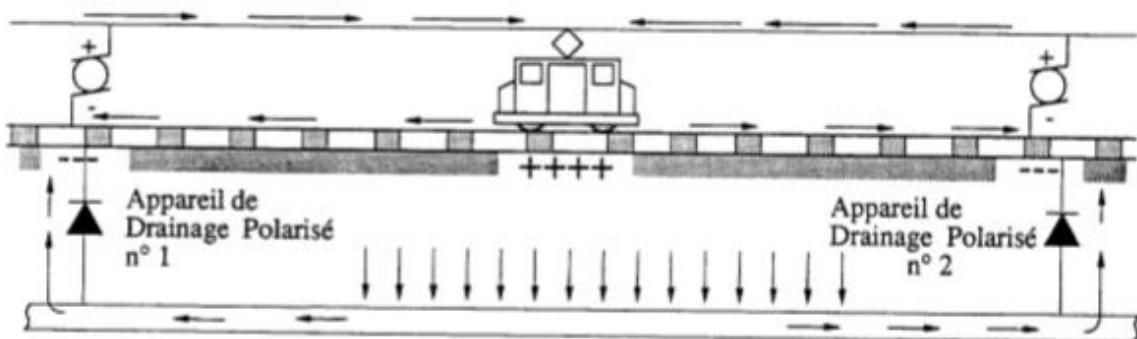


Figure 2: Le drainage des courants vagabonds

Ce système permet le passage du courant dans un seul sens, notamment de la structure métallique vers le rail. On distingue deux types de drainage :

- Drainage à contacteur : Le potentiel entre le rail et la structure est mesuré par un boîtier électronique. Quand le potentiel du rail est négatif, le contacteur ferme la liaison et le courant peut circuler de la structure vers le rail. Lorsque le courant s'inverse, le boîtier électronique commande le contacteur à l'ouverture et le rail est isolé de la structure.

- Drainage à diode au silicium : La structure métallique est reliée à la liaison de retour par l'intermédiaire d'une diode, et le courant ne peut passer que dans le sens structure-liaison de retour. C'est une méthode simple et la plus utilisée en ce moment.

II.6 La protection active :

II.6.1 Le principe de la protection cathodique :

Dans chaque cas de corrosion, il existe un site anodique et un site cathodique. On note que dans les zones anodiques, où la structure se corrode, le courant circule du métal vers l'électrolyte environnant (sol ou eau). D'autre part, le courant circule encore de l'électrolyte vers le métal, rendant sa surface cathodique qui ne se corrode pas.

D'où il devient évident que si chaque partie superficielle du métal d'un ouvrage pouvait être amené à collecter du courant, il ne se corroderait pas car toute la surface serait alors cathodique. C'est exactement le but de la protection cathodique. Un courant continu est déversé d'une source externe vers toute la surface métallique. Lorsque la quantité de courant circulant est correctement ajustée, il vaincra le courant de corrosion se déchargeant de toutes les zones anodiques du métal et il y aura un flux net sur toute la surface. La corrosion s'arrête alors lorsque le potentiel de la cathode devient égal au potentiel de l'anode. La structure sera alors cathodique et la protection complète.

On peut donc imaginer la possibilité de créer un courant tel que son sens soit de la solution vers le métal, ce qui favorise ainsi la réaction cathodique au niveau de ce métal, en reportant la réaction anodique sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation.

Pour qu'une structure puisse être protégée par cette méthode, Elle doit recevoir du courant de son environnement. Dans l'atmosphère, l'air étant un mauvais conducteur, Il n'est pas possible de lutter contre la corrosion par protection cathodique.

II.6.2 Les critères de protection :

Il est admis que toute structure en acier est considérée protégée cathodiquement si son potentiel atteint le seuil de -850mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄.

- ✓ 700 mV pour le Plomb.
- ✓ 600 mV pour le Cuivre.
- ✓ Entre -900 et -1200 mV pour l'Aluminium.

Le potentiel de polarisation de la structure dont la valeur est de -850mV peut être réduit par la chute ohmique créée entre l'électrode de mesure et la structure elle-même. Afin de réduire la chute ohmique, l'électrode doit être toute proche de la structure durant le relevé de potentiel.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

La valeur de -850mV est appliquée pour la protection du fer dans l'eau et le sol, et pour des PH ne dépassant pas 10. Ce critère doit être porté à -950 mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfatoréductrices. Dans le cas réel, pour des raisons de sécurité, on cherche plutôt à atteindre un seuil de protection pour l'acier fixé empiriquement à -1000 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄.

D'après le diagramme de Pourbaix, on constate que pour des PH très alcalins, le domaine de corrosion du Fer existe pour des potentiels compris entre -1100 et -1300mV. Comme dans le cas du Fer dans le béton qui se corrode par formation de ferrates de calcium. On doit donc éviter ces circonstances de potentiel dans des tels milieux.

En cas où la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant assurant la protection cathodique. Des expériences établies par UHLIG donnent les critères ci-dessous, qui restent toujours des moyennes à ajuster au moment de projet en fonction des caractéristiques réelles du métal mais surtout de la nature de l'électrolyte :

- ✓ 0,7 mA/m² pour l'acier dans le ciment.
- ✓ 5 mA/m² pour l'acier dans un sol anaérobiose sans bactérie.
- ✓ 35 mA/m² dans un sol aéré.
- ✓ 60 mA/m² dans l'eau douce agitée.
- ✓ 100 mA/m² dans l'eau de mer calme à 500 mA/m² et plus dans l'eau de mer mise en mouvement.

II.6.3 Facteurs affectant la validité des critères :

Les critères mentionnés peuvent être affectés par plusieurs paramètres structuraux et environnementaux tels que :

- Le type de métal.
- La température.
- Bactéries Sulfato-réductrices.
- Métaux dissimilaires.
- Le PH.

- Le courant alternatif.
- Le décollement de revêtement.

II.6.4 La protection cathodique par anodes sacrificielles :

Lorsque des anodes sacrificielles sont utilisées, une cellule électrochimique est formée entre l'anode et la cathode à travers l'électrolyte environnant. L'anode constituée d'un métal moins noble (Aluminium, Zinc ou Magnésium dans le cas de la protection de l'acier) est préférentiellement corrodée ou «sacrifiée», produisant un flux d'électrons vers la cathode qui se traduit par une réduction ou une élimination de la corrosion au niveau de la cathode. L'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger au-delà de son potentiel d'immunité.

Les anodes sacrificielles se corrodent continuellement et nécessitent un remplacement de routine pour maintenir une masse et une surface suffisantes pour une protection cathodique adéquate.

L'emploi de cette méthode est bien approprié aux électrolytes très conducteurs comme l'eau de mer, et elle est généralement réservée à des milieux de résistivité inférieure à $50\Omega \cdot \text{m}$.

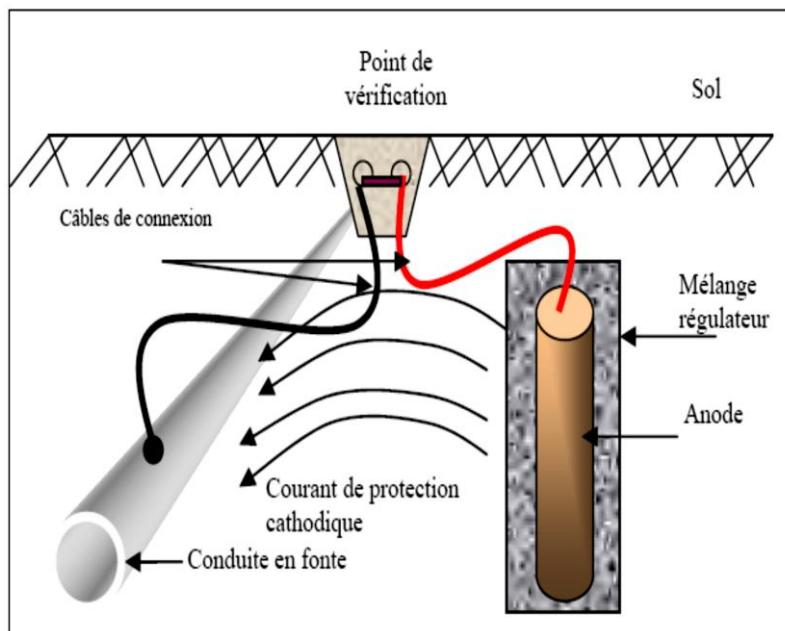


Figure 3: La protection cathodique par anodes sacrificielles

♦ II.6.4.1 Domaine d'application:

Cette méthode est utilisée couramment pour la protection des équipements en contact avec l'eau, mais également on l'utilise pour la protection des ouvrages enterrés de faible longueur, des réservoirs à petites tailles et surtout pour une protection provisoire des ouvrages en cours de réalisation. Par exemple on rencontre ce mode de protection sur les navires, les plateformes, oléoducs et gazoducs ...

♦ II.6.4.2 Les types d'anodes :

Les anodes en Aluminium ont 3 à 4 fois la capacité actuelle des anodes en Zinc en raison des différences de valence (3 pour l'Aluminium et 2 pour le Zinc) et de densité. La densité plus faible des anodes en Aluminium entraîne également des anodes en Aluminium occupant plus de volume que les anodes en Zinc du même poids.

- Les anodes en Zinc:** Les anodes en zinc contiennent environ 99,3% de Zinc et de petites quantités de Cadmium et d'Aluminium (pour l'activation). Le Zinc et le Cadmium sont des polluants prioritaires. Aucuns matériaux contenus dans les anodes en Zinc est un bioaccumulateur.

Domaines d'utilisation :

- Ouvrages immergés.
- Capacités métalliques.
- Conduites enterrées de faible longueur.

Caractéristiques :

Paramètres	En eau de mer	A terre
Potentiel à débit nul (v)	-1.05	-1.10
Potentiel en charge (v)	-1 à -1.05	-1.10
Capacité pratique (Ah/kg)	780	740
Consommation pratique (kg/A.an)	11.2	11.9
Rendement électrochimique (%)	95	90

Tableau 4: caractéristiques des anodes en Zinc

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

Avantages :

- Comportement sûr dans de diverses conditions de fonctionnement (sol, eau de mer, milieu confiné...).
- Potentiel bien adapté à la protection d'ouvrages compacts en eau de mer.
- Peu sensible aux salissures marines (fouling).
- Rendement excellent.
- Fiabilité excellente quel que soit le débit, et même après un arrêt prolongé.

Inconvénients :

- Poids spécifique élevé (7.14 g/cm³).
 - Température de fonctionnement limitée à 60C.
 - Portée limitée à cause de son potentiel faible.
 - Pour une structure en mer, le cout par A/an est plus élevé que celui de l'Aluminium.
- b) Les anodes en Aluminium : Les anodes en Aluminium se composent d'environ 95% d'Aluminium, 5% de Zinc. Sachant que l'Aluminium se passive spontanément par formation d'une couche d'alumine superficielle, ces anodes contiennent de petites quantités de Mercure ou d'Indium qui sont des agents activateurs nécessaires d'être introduits dans la composition du matériau anodique. Le Zinc est un polluant prioritaire dans les anodes en Aluminium. Ces anodes pourraient contenir jusqu'à 0,001% de Mercure sous forme d'impureté; le Mercure est un bioaccumulateur connu.

Domaines d'utilisation :

- Les plates-formes offshore.
- Les conduites offshore chaudes.
- L'intérieur des capacités métalliques.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

Caractéristiques des anodes en aluminium au mercure :

Paramètre	En eau de mer
Potentiel à débit nul (v)	-1.05
Potentiel en charge (v)	-1.00 à -1.05
Capacité pratique (Ah/kg)	2830
Consommation pratique (kg/A.an)	3.1
Rendement électrochimique (%)	95

Tableau 5: Caractéristiques des anodes en aluminium au mercure

Caractéristiques des anodes en aluminium à l'indium:

Paramètre	En eau de mer
Potentiel à débit nul (v)	-1.10
Potentiel en charge (v)	-1.05
Capacité pratique (Ah/kg)	2600
Consommation pratique (kg/A.an)	3.4
Rendement électrochimique (%)	87

Tableau 6: Caractéristiques des anodes en aluminium à l'indium

Avantages :

- Potentiel bien adapté à la protection d'ouvrages compacts en eau de mer.
- Forte capacité pratique, et donc un cout d'A/an plus faible.
- Restent actives aux températures élevées, cependant on note une chute de rendement de 20 à 30% pour des températures de 80°C à 100°C.
- Possibilité de l'utilisation dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute).

Inconvénients :

- Sensible aux salissures marines, mais avec des conséquences pratiques peu néfastes.
- Non utilisable dans le sol vu que les alliages courants actuels sont généralement déconseillés pour les milieux faiblement renouvelés. Il y a chute de rendement par suite de l'acidification du milieu.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- Les alliages courants actuels sont généralement déconseillés pour la protection des structures entièrement peints dû au risque de passivation si l'anode est faiblement sollicitée.

c) Anodes à base de Magnésium: On distingue deux types principaux d'anodes de Magnésium :

Le premier est appelé le type standard (global standard) ; il contient environ 6% d'Aluminium et 3% de Zinc, et il donne un potentiel de -1.5 V par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl en eau de mer.

Le deuxième est appelé type haut potentiel (global high voltage); il ne contient pas de Zinc mais du Magnésium pur et du Manganèse. Celui là donne un potentiel de l'ordre de -1.7 V par rapport à Ag/AgCl en eau de mer.

Domaines d'utilisation:

- Protection des conduites offshore sur plusieurs kilomètres à partir de plates-formes.
- Protection des conduites enterrées de faible longueur.
- Prépolarisation des structures offshore ce qui permet de réduire la quantité d'anodes d'Aluminium devant prendre le relais.

Caractéristiques :

Paramètre	Type standard	Type haut potentiel
Potentiel à débit nul (v)	-1.5	-1.7
Potentiel en charge (v)	-1.4 à -1.7	-1.6 à -1.7
Capacité pratique (Ah/kg)	1100	1230
Consommation pratique (kg/A.an)	6.5 à 8	
Rendement électrochimique (%)	55	55

Tableau 7: Caractéristiques des anodes à base de magnésium

Avantages :

- Poids spécifique faible.
- Portée élevée dû à son fort potentiel.

- Polarisation rapide de la structure.

Inconvénients :

- Courte durée de vie et remplacements nécessaires.

- Possède le cout de l'A/an le plus élevé.

- Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée, ce qui cause la surconsommation inutile et des risques de cloquage de la peinture.

- Rendement médiocre en eau de mer (auto-corrosion).

II.6.5 Protection cathodique par courant imposé :

♦ II.6.5.1 Principe :

La protection par courant imposé, aussi appelée par "soutirage", emploie une source de courant continu qui débite dans un circuit comprenant : Un déversoir (ou bien une masse anodique), l'électrolyte (eau ou sol), et la structure à protéger.

Le déversoir est relié au pole positif de la source alors que la structure à protéger est reliée au pole négatif. Le courant vient du déversoir, traverse le sol, et puis entre dans la structure créant l'abaissement de potentiel voulu.

Exemple :

Prenant le cas de l'acier dans le sol ou l'eau de mer ; on obtient l'immunité lorsque le potentiel, mesuré avec une électrode de référence en Cu/CuSO₄, est inférieur à -850 mV en tous points de l'ouvrage. Mais en général, on tient compte des phénomènes annexes tels que la présence des bactéries, d'où on cherche à atteindre une valeur limite de -1000 mV.

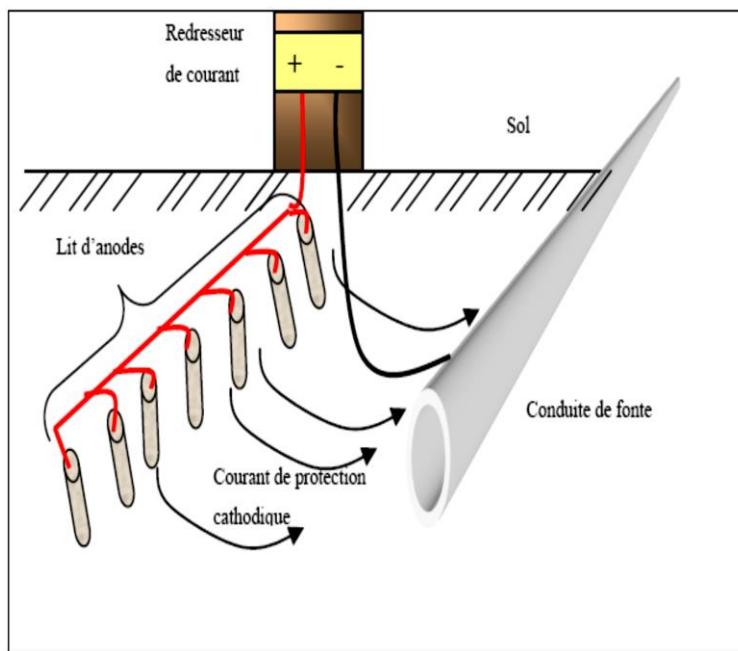


Figure 4: Protection cathodique par courant imposé

♦ **II.6.5.2 Domaine d'application:**

Cette méthode est employée quand l'intensité de courant nécessaire à la protection est importante ou que la portée demandée est élevée. Par exemple, on l'utilise pour des conduites enterrées ou immergées revêtues ou non, pour des structures marines importantes (quais métalliques, plateformes pétrolières, coques de navires, etc.), dans le cas des ouvrages concentrés (stations de pompage ou compression), casings de forage, intérieur des capacités d'eau douces, etc.

♦ **II.6.5.3 Les éléments d'un système de protection cathodique par courant imposé :**

Le poste de soutirage comprend les composantes suivantes :

II.6.5.3.1 La source d'énergie :

Elle peut être constituée de :

- Le réseau local de distribution.
- Les groupes électrogènes : Générateur électrique entraîné par un moteur thermique.
- Energie électrique d'origine solaire : Utilisation de cellules photovoltaïques.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- Les turbines entraînées par un fluide.
- Les turbogénérateurs : Energie transmise d'un combustible à une turbine qui entraîne un alternateur.
- Les générateurs thermoélectriques.
- Les éoliennes : Nécessitant une batterie en tampon.
- Les piles à combustibles et les piles à Lithium.

On emploi généralement des générateurs à très basse tension (TBT) inférieure à 50 V ; néanmoins, il peut arriver que la tension délivrée par le générateur dépasse la limite de la TBT. Dans ce cas, l'installation du système est soumise à la réglementation concernant les installations électriques (mise à la terre de l'appareillage, protection contre les contacts fortuits, protection individuelle du personnel, etc.). (voir Annexe 3)

Connaissant le débit de l'appareil, on fixe ces caractéristiques en appliquant un coefficient de sécurité qui tient en compte, en particulier, le vieillissement du revêtement, des défauts possibles et de l'augmentation de la consommation dû à des adjonctions ou interconnexions.

Il faut aussi considérer, lors de la répartition des postes de soutirage, que certains revêtements ne supportent pas des potentiels de protection trop négatifs. De ce fait, il est nécessaire de connaître, lors de l'étude de la protection cathodique, les limites des valeurs de potentiel de protection afin de rester en conformité avec la réglementation locale.

II.6.5.3.2 Le déversoir :

Aussi appelé masse anodique, c'est une masse en matériau conducteur qui injecte le courant de protection dans le milieu où se trouve la structure à protéger. La résistance de contact du déversoir avec le sol doit être la plus faible possible. Sa masse est déterminée tout en assurant la longévité souhaitée. Parmi les matériaux les plus utilisés on trouve : l'acier, le Ferro-Silicium, le Titane platiné, le Graphite, etc. dont le choix à installer dépend des conditions suivantes :

- Le milieu.
- La densité de courant admissible.
- La durée de vie ou la consommation.

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

- Le prix de la fourniture et de la mise en œuvre.

Anode	Milieu convenable	Consommation	Densité de courant admissible	Masse spécifique
Ferrailles	Tous les milieux	9 kg/A.an	Pas limitée	7.8 g/cm3
Ferro-silicium	Tous les milieux	0.3 kg/A.an	0.2 A/dm2	6.8 à 7 g/cm3
Magnétite	Tous les milieux	0.01 kg/A.an	1.2 A/dm2	g/cm3
Graphite	Tous les milieux, sous réserve de présence d'un backfill. sauf eau de mer	1 kg/A.an	0.08 A/dm2	1.6 g/cm3
Titane Platine (épaisseur de platine minimale de 2.5 micro m)	Eau de mer Eau douce brassée Intérieur de réservoirs métalliques ou de conduites à usage alimentaire	9 mg/A.an	5 à 7 A/dm2	4.5 g/cm3
Niobium platine (épaisseur de platine minimale de 2.5 micro m)	Eau de mer Eau douce brassée	9 mg/A.an	10 A/dm2	8.57 g/cm3
Tantale platine épaisseur de platine minimale de 2.5 micro m	Eau de mer Eau douce brassée	9 mg/A.an	20 A/dm2	16.6 g/cm3

Tableau 8: Les matériaux de déversoir de courant imposé

*Pour les trois derniers types, il est nécessaire de spécifier que la consommation ne concerne que le Platine pendant que l'autre métal sert uniquement de support. D'autre part, la masse spécifique indiquée est celle du métal support, sachant que celle du platine (21.3 g/cm3) n'intervient pratiquement pas en raison de la faible épaisseur.

❖ Choix de l'emplacement et configuration des déversoirs :

Localisation et implantation :

- Le choix de l'emplacement du déversoir est déterminé par une étude préalable du terrain et du tracé de la structure à protéger.
- La distance entre le déversoir et l'ouvrage à protéger ne doit pas être trop faible. Par exemple, un minimum de 50 m est conseillé pour les canalisations.
- Après mesure de la résistivité du sol, le choix se porte sur la zone où celle-ci est la plus faible.
- La résistance du déversoir au sol doit être la plus faible possible afin d'éviter une tension trop élevée aux bornes du redresseur pour des raisons de sécurité des personnels et économie d'énergie. En admettant une valeur de 1Ω comme étant une très bonne résistance, 2Ω à 3Ω restent toujours acceptables.

a) Déversoirs de surface :

Anodes posées horizontalement : Employé dans le cas où la résistivité du sol est faible en surface lorsqu'on dispose de place sur le terrain. Cette configuration est recommandée pour les railles ou autres ferrailles de formes similaires. (voir Annexe 4 pour une vue détaillée du déversoir.)

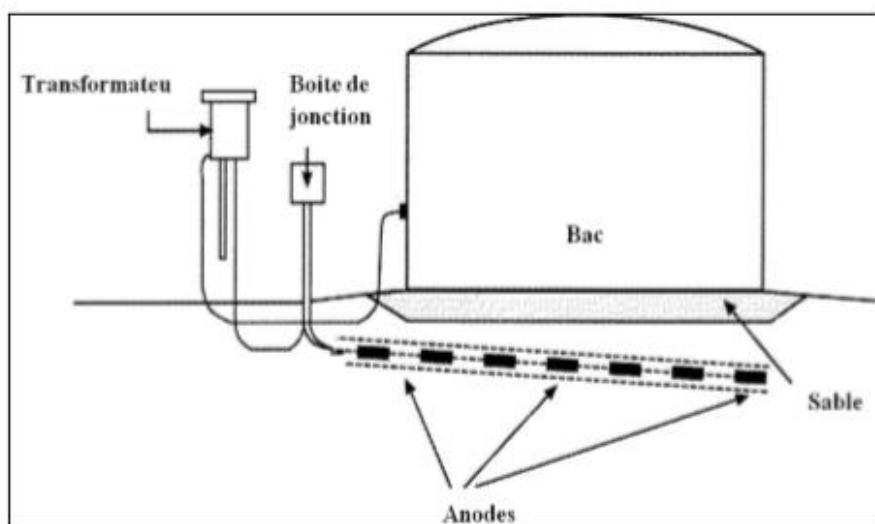


Figure 5: Déversoir de surface à anodes horizontales

Anodes posées verticalement : Il s'agit toujours de déversoir de surface. Les anodes sont enterrées verticalement dans des trous creusés au fond de la tranchée où sont posés les câbles. Les anodes sont ainsi à une profondeur de 1 à 2 mètres ; et selon la nature du sol, dans un terrain plus humide qu'en surface. (Voir Annexe 5 pour la disposition verticale des anodes à l'intérieur du déversoir.)

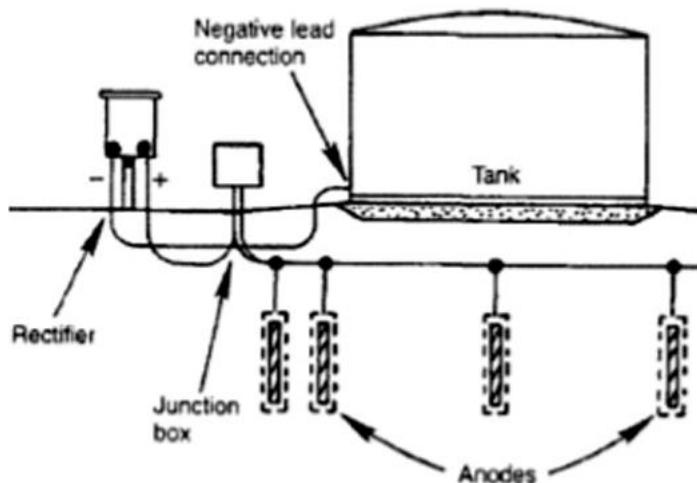


Figure 6: Déversoir de surface à anodes verticales (API, 2007)

b) Déversoirs en profondeur :

Ils sont utilisés dans les cas suivants :

- Impossibilité d'obtenir une répartition convenable du courant sur la structure à protéger par un déversoir de surface.
- Risque d'interférences trop importantes sur les structures voisines.
- La résistivité du sol en surface ne permet pas d'obtenir une valeur acceptable de courant.

II.6.5.3.3 Le Backfill :

Pour réduire la résistance du sol, les anodes sont entourées de matériaux appelés Backfill. La composition standard d'un backfill est un mélange de 75% de gypse, 20% de bentonite et 5% de sulfate de sodium. Ces matériaux agissent pour fournir une distribution de courant et une consommation d'anode uniformes. Cette consommation quasi-homogène sur la surface de l'anode

LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

est dû à la présence de gypse, tandis que la bentonite retient l'humidité. L'ajout de sulfate de sodium réduit la résistivité spécifique du backfill.

Le mélange régulateur est soit versé dans le trou de forage, soit les anodes sont enfermées dans des sacs de matériau perméable remplis de remblai

Les anodes galvaniques ne doivent pas être remplies de coke comme pour les anodes à courant imposé. Une cellule de corrosion forte proviendrait de la différence de potentiel entre l'anode et le coke, ce qui conduirait à une destruction rapide de l'anode.

II.6.5.3.4 Les câbles de connexion :

- La section des câbles est déterminée en fonction de la chute de tension admissible et du réchauffement. Une section minimale de 25mm^2 est recommandée pour des raisons de tenue mécanique.
- En règle générale, on évite d'employer des câbles à gaine métallique.
- On détermine la nature de l'isolant des câbles en fonction du milieu (tenue aux hydrocarbures, au chlore naissant, à l'eau de mer, aux sols, etc.)
- Dans la majorité des cas, il est suffisant d'utiliser un câble isolé au PVC.
- Afin d'éviter toute blessure accidentelle de l'isolant, une attention particulière doit être apportée aux conditions de pose. En effet, les câbles de liaison de la source de courant aux anodes peuvent être facilement coupés par la sortie du courant au point de détérioration de l'isolant. En ce point, le métal du câble va se comporter comme une anode.
- Les bornes positives et négatives sur l'appareil de soutirage et le câbles qui y aboutissent doivent être clairement repérés pour éviter des inversions qui engendreraient la corrosion de la structure à protéger. Sur l'appareil, il doit être marqué un signe (+) pour le déversoir et un signe (-) pour la structure.

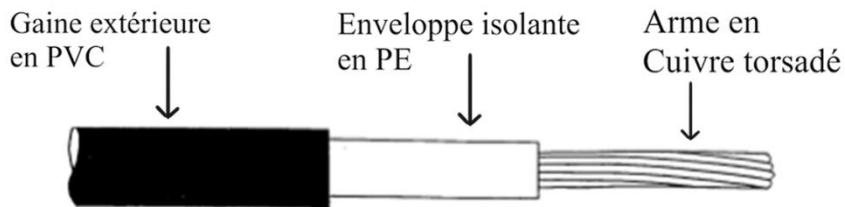


Figure 7: Câble de connexion

- Arme : cuivre torsadé • Section : 16 ou 50 mm² (95 mm² exceptionnellement) • Enveloppe isolante polyéthylène spécialement traitée contre le chlore naissant. • Gaine extérieure : PVC

II.6.5.3.5 L'appareillage électrique auxiliaire :

On parle essentiellement des appareils de coupure, de protection, et de mesure installés à poste fixe.

- a) Appareils de coupure : Ce sont des simples interrupteurs permettant d'établir ou d'interrompre l'alimentation du poste de soutirage.
- b) Appareils de protection : Un disjoncteur doit être installé lorsque le poste est raccordé à un réseau de distribution. Ce dernier joue un double rôle d'appareil de coupure et de protection contre les surcharges et surintensités.

Des limiteurs de tension peuvent être installés, en amont et en aval du poste, dans les zones orageuses ou à proximité de lignes électriques à haute tension.

On prévoit aussi des fusibles calibrés sur le circuit d'utilisation en aval du poste.

- c) Appareils de mesure : Leur but est d'indiquer la tension d'alimentation, la tension d'utilisation, le potentiel de la structure, l'intensité débitée et le temps de fonctionnement.
- d) Les dispositifs complémentaires : Pour permettre plusieurs fonctions telles que : La limitation de l'intensité, la régulation automatique, l'interruption périodique, la télésignalisation de l'état du poste, etc.
- e) La boîte de jonction : Elle relie le fil positif du transformateur-redresseur aux anodes afin de permettre de surveiller la mesure de courant aux anodes.

II.6.5.4 Facteurs limitant la protection par courant imposé :

- La continuité électrique insuffisante du système : Cette insuffisante peut intervenir dans l'électrolyte où il faut s'assurer de la conductivité électrique dans les anodes et l'ensemble de la structure à protéger. Elle peut aussi provenir de la structure à protéger où il faut s'assurer que la conductivité électrique soit effective en tout point de la structure.
- La perte d'adhérence des revêtements : Un revêtement à mauvaise adhérence ou un revêtement dégradé qui présente plusieurs défauts influe directement sur le besoin en courant de protection, alors sur l'efficacité de la protection cathodique.
- L'influence de la protection cathodique entre structures métalliques voisines : le courant électrique a tendance à circuler dans les conducteurs qui offrent une résistance minimale. Cela se traduit par la circulation de courant non contrôlés qui protègent l'ouvrage qui peut engendrer la corrosion du côté non protégé. C'est le cas de proximité de structures métalliques dans un électrolyte commun, conduisant à des interférences électriques néfastes quand l'une ou l'autre est protégée cathodiquement sans précaution suffisante. Ce problème est évité en installant des prises d'équipotential entre ces installations, équipées des résistances pour réglage et maîtrise du courant.
- L'influence d'une source de courant continu : On parle ici des courants vagabonds. Ce sont des courants liés à des fuites électriques provenant d'installations alimentées en courant continu mal isolé par rapport au sol. Exemple : les lignes ferrées électrifiées.
- L'influence d'une source de courant alternatif : C'est le cas en particulier des canalisations enterrées en acier qui sont susceptibles de subir ces influences en voisinage de lignes haute tension, de centrales électriques ou de système de traction.

II.7 Comparaison entre les systèmes de protection par anodes sacrificielles et les systèmes de protection par courant imposé :

Anodes Sacrificielles	Courant Imposé
Distribution du courant sur l'ouvrage à protéger dépend de l'implantation des anodes. Peut être prévue pour être homogène	La distribution de courant risque d'être hétérogène en absence de revêtement performant.
Installation simple	Installation relativement complexe
Pas de courant externe requis	Source de courant externe nécessaire
Généralement utilisé dans des électrolytes à basse résistivité	Peut être utilisé pour presque toutes résistivités des environnements
Généralement utilisé pour des structures qui sont petites ou très bien revêtues	Peut être utilisé pour n'importe quelles dimensions de structure
Courant généré par les anodes est constant	Courant et tension ajustables
Courant typiquement limité à 10-50mA	Courant illimité 10-100A
Ne cause pas la corrosion par courants vagabonds	Peut générer des courants vagabonds
Cout important par m^2 de métal protégé	Cout moins cher pour chaque m^2 de métal protégé
Cout par unité moins cher	Cout important par unité
Nombre d'anodes important	Nombre d'anodes faible
Faible entretien	Haute maintenance
Pas de risques humains	Risques humains possibles
Risque de surprotection quasi nul sauf si anodes de Mg ou si matériaux très sensibles à H	Risque de surprotection possible
Surveillance et maintenance faible mais le remplacement périodique des anodes est parfois nécessaire.	Surveillance et maintenance régulières et spécialisées
Auto régulation ou possibilité de régulation par résistances	Forte flexibilité dans le fonctionnement

Tableau 9: Comparaison entre les systèmes sacrificiels et de courant imposé

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, j'ai illustré en détail tout ce qui concerne la protection cathodique des ouvrages en contact avec un électrolyte. La protection permanente se base souvent sur des systèmes de courant imposé. Si bien étudiés, réalisés et surveillés, ces derniers peuvent fournir une protection adéquate durant toute la durée de vie désignée.

Le chapitre suivant parlera des bacs de stockage en particulier. Je vais présenter le site de mon étude et analyser les types des bacs dans le parc de stockage, la nature de la corrosion qui les touche, et différents moyens de les protéger.

CHAPITRE III:

LES BACS DE STOCKAGE

III.1 Présentation du site :



Figure 1: Photo du terminal marin de Bejaïa tirée de Google Earth

La Direction Régionale de Bejaïa est une des 7 régions composant l'activité de Transport des hydrocarbures par canalisations (TRC). Elle est chargée de l'exploitation de deux oléoducs, d'un gazoduc et d'un port pétrolier mis à la disposition de STH à compter de 2005.

Le terminal marin, situé à 2 km au sud-ouest de la ville de Bejaïa, est la dernière station de la chaîne de transport des hydrocarbures liquides depuis Haoud El Hamra. Il a pour rôle la réception et le stockage du pétrole brut ainsi que son expédition pour exportation par navires citerne.

Il est divisé en trois parties :

Le terminal Nord, le terminal Sud, et le port pétrolier qui se trouve à 5 km au nord-est du parc de stockage.

LES BACS DE STOCKAGE

Dans ce mémoire on s'intéresse aux bacs de stockage du Terminal Nord.

Les rôles principaux du terminal sont le stockage du pétrole brut arrivant par le pipe-line, le chargement des pétroliers, et assurer l'entretien du terminal marin.

■ Le parc de stockage du terminal Nord :

Il contient 12 bacs à toit flottant externes divisé en 6 unités, de capacité volumique de 35000 m³, d'un volume utile de 30000 m³ et un stock mort de 5000 m³. Ces réservoirs sont de formes cylindriques verticaux en acier qui sont utilisés pour le stockage des produits pétroliers, leur forme est simplement celle d'une grande cuve fermée dotée d'un toit. Chaque bac a un diamètre nominal de 56 m et une hauteur cylindrique totale de 14,4 m.

On note aussi la présence d'un bac de détente ou bien un bac de purge (4Y1) à toit fixe conique de 2900 m³ pour recevoir les résidus de la gare racleur et les décharges des soupapes de sécurité. Son diamètre est de 14.5 m et il a une hauteur de 16 m. Il est aussi utilisé pour emmagasiner le brut et le condensat en cas de surpression et lors de nettoyage des bacs, et récupérer les purges des collecteurs et des manifolds.

III.2 Construction des réservoirs :

Les bacs sont généralement construit en acier au carbone, acier inoxydable, ou en matériau composite. Le choix d'acier tient compte de leurs caractéristiques mécaniques et des contraintes propres à chaque élément.

III.2.1 Les bacs à toit flottant :

Le toit flottant flotte sur la surface du produit, tout en le couvrant et suivant ses mouvements de montée et de descente. Ces déplacements sont permis par un espace annulaire libre qui existe entre le toit et la robe du réservoir, qui est obturé par un système d'étanchéité déformable permettant au toit de coulisser sans entrave à l'intérieur de la robe.

LES BACS DE STOCKAGE

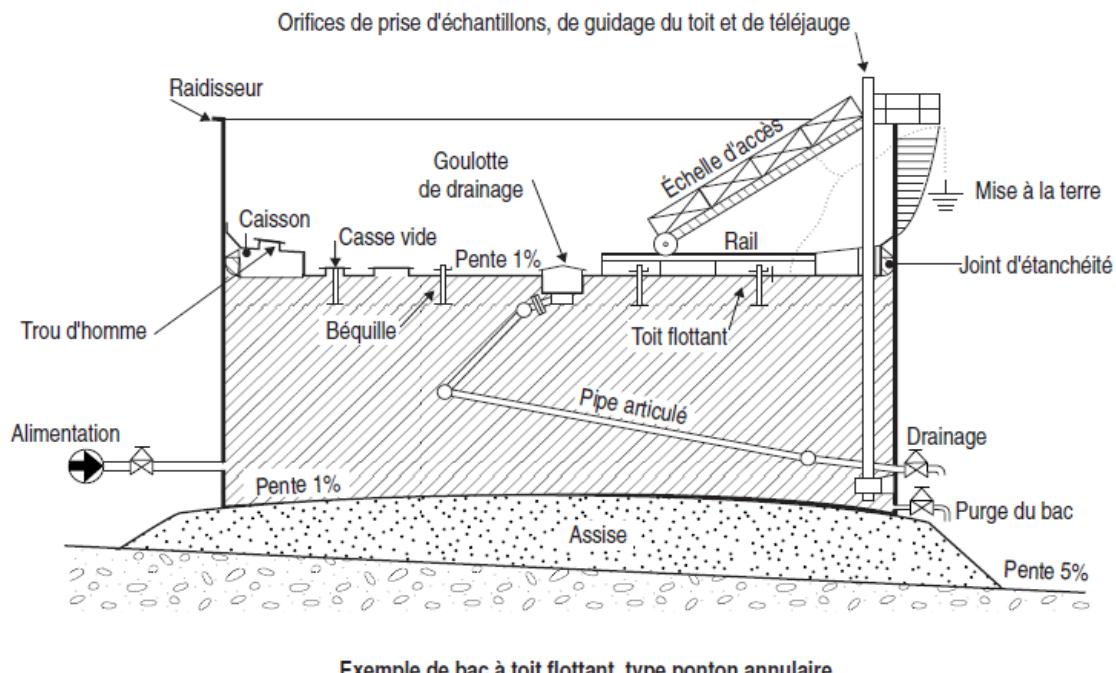


Figure 2: Un bac de stockage à toit flottant

♦ III.2.1.1 La Constitution d'un bac à toit flottant :

- Escalier d'accès : Un escalier d'accès à main courant avec marches orientables.
- Garde de corps : Pour la sécurité des personnels travaillant sur le bac.
- Echelle ou escalier d'intérieur : Pour l'accès au toit du bac.
- Trous d'hommes : Pour l'inspection et le nettoyage des réservoirs.
- Les caissons : Ce sont des compartiments dans les toits flottants munis d'orifices permettant le contrôle de leurs atmosphères.
- La vanne de vidange ou de remplissage : Elle se trouve au pied de bac.
- Système de jaugeage : Il y a trois trous pour le jaugeage, ils servent au prélèvement des échantillons.
- Agitateurs : Leurs rôle est de mélanger le pétrole brut pour son homogénéisation avant le chargement.
- Ligne de purge : Elle est équipée d'une vanne qui sert à la purge de l'eau avant la décantation.

LES BACS DE STOCKAGE

- Puisards : Dans lequel se trouve un flotteur de l'indicateur de niveau du bac.
- Les béquilles : Ils permettent le maintien du toit en flottaison lorsque la hauteur du liquide ne le permet pas, ou quand le bac est vidé pour des travaux de maintenance.
- La mise à terre : Du fait que les bacs possèdent trois prises de terre, l'intérieur est préservé de toutes influences électriques et l'écoulement des charges atmosphériques se fait en bonnes conditions. La mise à la terre des réservoirs de la DRGB se fait en plusieurs points symétriques de leurs robes (une prise tous les 20 m).
- Déversoirs : Ils sont constitués de tubes déflecteurs qui servent à ramener le jet de mousse contre la paroi du réservoir, la mousse s'écoule le long de cette dernière jusqu'à ce qu'elle s'étale sur la surface des hydrocarbures.
- Système fixe de refroidissement par eau : Il se compose d'une canalisation circulaire ($\phi=6''$) dotée de têtes d'arrosages est installée en gardant un certain intervalle. Les tuyaux d'alimentation en eau vers chaque réservoir sont avec la canalisation principale à incendie. L'eau est alimentée à travers le clapet d'arrêt et la crête.
- Circuit mousse : Des diffuseurs montés sur le haut de la robe étalent sur la surface du liquide un tapis de mousse capable d'étouffer les flammes en cas d'incendie.

Plusieurs diffuseurs sont judicieusement repartis sur le tour du réservoir pour assurer une couverture rapide et uniforme.

- Systèmes de détection et d'extinction automatique au Halon : Ce système est utilisé sur les bacs de stockage à toits flottants.

Voir Annexe 6 pour préciser les deux types de bacs à toit flottant : soit à toit flottant interne ou à toit flottant externe.

III.2.2 Les réservoirs à toit fixe :

Ce sont des bacs dotés d'un toit leur permettant la conservation des produits volatiles, dangereux ou polluants. Ils se composent de :

- Event : Ils se trouvent sur le toit, leur rôle est de permettre à l'air de rentrer et au gaz de s'échapper, en évitant ainsi les surpressions à l'intérieur du bac.

LES BACS DE STOCKAGE

- Soupape : Le bac à toit fixe doit éventer les vapeurs à l'atmosphère au fur et à mesure que le liquide monte ou que l'atmosphère se réchauffe, ce qui provoque une expansion du liquide.
- Arrêtes flammes : On place ces appareils sur des évents ou à la sortie des soupapes de sécurité.
- Trappes de jauge et trous d'hommes : Sont prévus sur les toits à pression atmosphérique pour permettre l'inspection et la mesure du contenu. Pour empêcher toute perte de vapeur et les risques d'incendie, ils devraient toujours être fermés lorsqu'on ne les utilise pas.

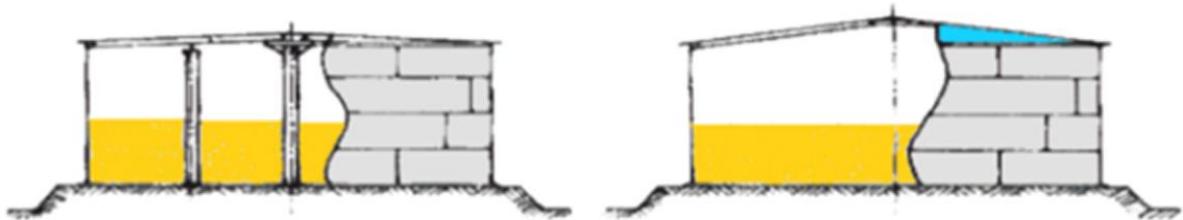


Figure 3: Bacs de stockage à toit fixe

III.3 Le rôle du stockage :

Le stockage des ressources énergétiques est nécessaire pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dû à toutes sortes d'aléas lors de la production, du transport et du raffinage, qui dépendent notamment des conditions météorologiques. Il est aussi stratégique afin d'assurer un minimum d'autonomie énergétique du pays consommateur.

Depuis le puits de production jusqu'aux lieux de consommation, le stockage doit être assuré aux différentes étapes de la chaîne pétrolière. On trouve les dépôts pétroliers importants essentiellement sur les lieux de production du pétrole brut, dans les terminaux de chargement et de déchargement du pétrole, aux extrémités des oléoducs et à proximité des raffineries.

III.4 Les types de corrosion dans un bac :

Les deux types de corrosion les plus rencontrés dans le fond d'un réservoir sont généraux et ponctuels. Quand à la corrosion générale, il y a formation de milliers de cellules microscopiques sur une zone de la surface métallique, ce qui entraîne une perte de métal. Cependant, la corrosion ponctuelle est dû à des cellules individuelles qui sont plus actives, entraînant une perte de métal concentrée dans des zones relativement petites, sans effet sur les zones considérables de la surface.

III.4.1 La corrosion externe :

L'extérieur du réservoir est soumis à une corrosion généralisée dû à son contact avec l'atmosphère. Le fond du bac est également soumis à un taux élevé de corrosion externe en raison d'aération différentielle. Parmi les zones les plus touchées par la corrosion on cite essentiellement :

Les coudes, les brides et les zones altérées thermiquement par les opérations de soudure.

Le soudage des aciers impose au métal des cycles thermiques complexes qui peuvent conduire les matériaux à des précipitations soit de carbures soit de phases intermétalliques nocives. Les zones immédiatement adjacentes au métal fondu présentent le siège de mécanismes de diffusion créant des compositions difficiles à maîtriser.

- Les causes de la corrosion externe des réservoirs peuvent être :

- Une mauvaise qualité de la couche supérieure de l'assise du réservoir, dont les polluants, tels que les pierres, l'argile, les cendres, ou d'autres matériaux acérés, peuvent conduire à une zone de concentration d'oxygène au niveau du contact du fond du réservoir. Ces zones de contact forment une anode pendant que le reste du fond forme la cathode, conduisant à une corrosion ponctuelle aux points de contact.

- Un mauvais contact entre la tôle marginale et l'assise du réservoir, permettant la pénétration d'eau de pluie et son accumulation au niveau de la marginale, des cornières sur les viroles ou sur les tôles de toit.

- La délamination de la tôle de marginale, particulièrement dans des parties où l'eau et les débris s'accumulent autour de la base du réservoir.

- Les restes des calamines sur les plaques.

- Des températures des produits stockés qui peuvent accroître la vitesse de corrosion.

LES BACS DE STOCKAGE

- Des conditions ambiantes agressives (atmosphères agricoles, industrielles, maritimes, tropicales, ...) où la corrosion s'aggrave en fonction de la température, du vent, de la pluie, de l'humidité relative, de la teneur en chlorures ou en espèces chimiques provenant de la pollution tel que SO₂.

III.4.2 La corrosion interne :

Il se peut aussi que les piqûres de corrosions puissent survenir à l'intérieur du fond comme à l'extérieur

- La corrosion interne est dû à :
 - La respiration du réservoir en raison de différences de températures et condensation de vapeur d'eau, entrée d'eau de pluie par le joint des toits flottants et la présence de l'eau dans le produit stocké, engendrant l'entrée et l'accumulation d'eau dans le réservoir et la naissance d'une corrosion.
 - La présence de substances corrosives dans le produit stocké (parfois en association avec d'autres conditions). Par exemple, la corrosion interne du toit et de la robe d'un réservoir dû à la présence des composés soufrés et de vapeur d'eau.
 - Une mauvaise qualité des matériaux d'apport de soudure.

III.5 Mesures de protection des bacs contre la corrosion :

- i. La conception et le tracé des assemblages : La conception n'est plus un problème puisque les équipements sont au stade d'exploitation. Cependant, en cas de nécessité des interventions de soudures, il est important de respecter les règles de soudage afin d'éviter les infiltrations de fluides qui risquent d'accélérer la corrosion.
- ii. L'infliction sur le milieu : En exerçant une action sur le milieu environnant qui modifie essentiellement la cinétique de la corrosion en diminuant le pouvoir oxydant de l'électrolyte. On parle ici des inhibiteurs et des passivateurs. Mais, étant donné que nous ne travaillons pas dans un milieu clos, aucune action directe ne pourra être appliquée. Il est toujours évident d'éviter toute action pouvant mener à des émanations corrosives.
- iii. Le choix des matériaux : Ce paramètre intervient surtout dans le renouvellement des pièces telles que les brides. Il faut faire attention aux associations des métaux nobles avec des matériaux moins nobles afin d'éviter la dégradation rapide de ces derniers.

- iv. La protection par revêtement et traitement de surface : Elle est appliquée à l'ensemble des équipements sachant qu'elle ne rencontre aucune contrainte ou sélectivité quant à son adoption.

III.6 La protection cathodique des bacs de stockage :

L'expérience a montré que les systèmes de protection par anodes sacrificielles ne fournissent pas la distribution de courant uniforme nécessaire le long de leur durée de vie et entraînent une défaillance prématuée tant que les anodes galvaniques se consomment. Les réservoirs de stockage aériens nécessitent un courant de protection important, ce qui exclut généralement l'utilisation des anodes galvaniques. Presque tous les systèmes de protection conçus pour les bacs aériens aujourd'hui sont par courant imposé pour fournir le courant requis sur une longue période de temps.

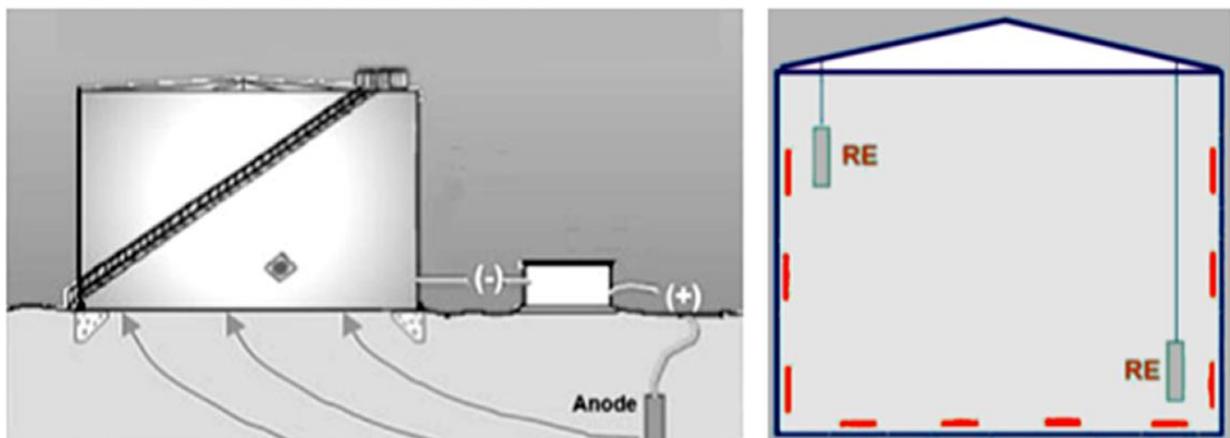


Figure 4: La protection des bacs contre la corrosion

III.6.1 La protection cathodique par courant imposé :

La protection cathodique peut être appliquée soit au moment de la construction du réservoir, soit ultérieurement, selon la configuration de ce dernier. Il existe plusieurs configurations d'anodes qui peuvent être utilisées pour fournir du courant au fond du réservoir. Elles varient en fonction de la surface à protéger et des caractéristiques du site.

Afin d'achever une meilleure répartition de courant, le type de déversoir le plus courant et le moins cher est le déversoir de surface. Le problème qui se pose ici c'est que la plupart du courant touche

LES BACS DE STOCKAGE

seulement la périphérie du réservoir, en conséquent, les centres des réservoirs restent mal protégés. L'évaluation de l'état de la protection au centre se fait par l'installation d'électrodes de référence permanentes sous le réservoir.

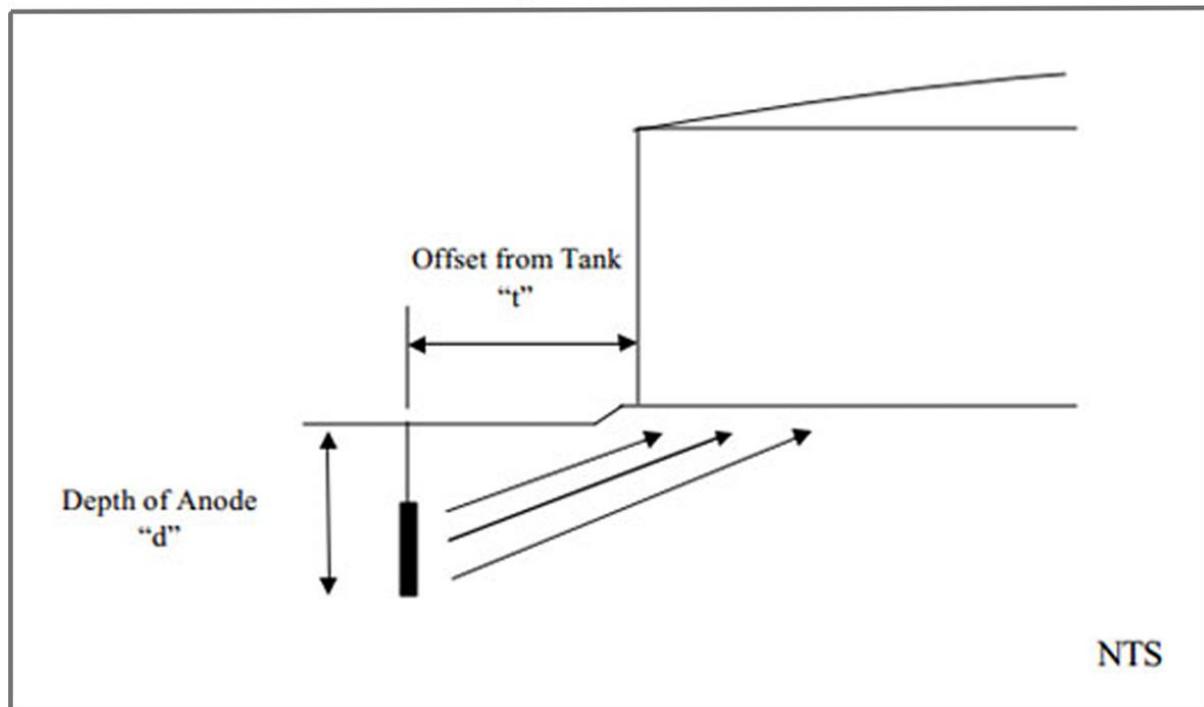


Figure 5: Déversoir de surface d'anodes distribuées

Les déversoirs en profondeur vont éliminer la question de la répartition uniforme du courant, tout en introduisant d'autres problèmes liés aux interférences avec les structures voisines, qui peuvent engendrer une corrosion sévère où le courant passe par d'autres structures afin de retourner au système.

DEEP WELL ANODE BED

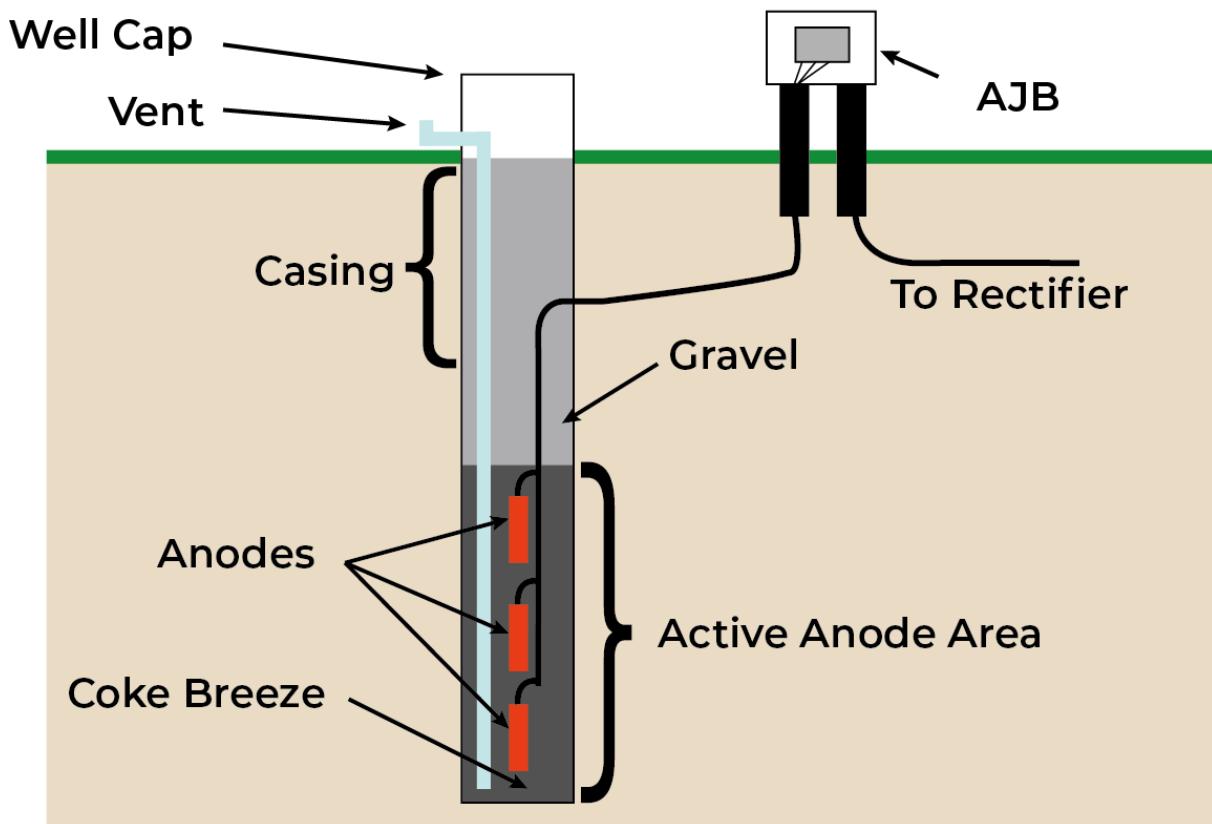


Figure 6: Déversoir en profondeur (tiré de www.corrosionpedia.com)

Cependant, il y a des zones où les déversoirs profonds ne peuvent pas être utilisés en raison des conditions du sol ou de la configuration du site. Dans ce cas là, les anodes peuvent être installées horizontalement, directement sous le réservoir, pour assurer une bonne distribution de courant à l'ensemble du fond du bac.

Les anodes utilisées pour la protection externe des bacs doivent être constituées de matériaux comme le Graphite, les métaux platinés, la Magnétite, la Fonte à haute teneur en Silicium, etc. Elles sont connectées à la borne positive de la source de courant continu, individuellement ou en groupe, par des conducteurs isolés, tandis que le bac est connecté à la borne négative.

Quand à la protection interne, elle est considérée plus économique si elle est prise en compte au stade de la conception, mais elle peut toujours être installée ultérieurement pour lutter contre la progression de la corrosion.

LES BACS DE STOCKAGE

Si on parle d'un système de protection par courant imposé, les anodes sont suspendues ou percées à travers le toit. Les matériaux d'anodes rencontrés peuvent être du MMO (oxydes métalliques mixtes) ou bien du Titane platiné sous forme de tube, fil, ou ruban.

Les extrémités des câbles des anodes doivent être renvoyées via des boîtes de jonction vers la source d'alimentation, normalement située dans une zone non dangereuse. Pour ce type de protection, il est recommandé d'installer un système de monitoring pour s'assurer que les meilleurs niveaux de protection sont atteints.

III.6.2 La protection cathodique par anodes sacrificielles :

Le nombre d'anodes nécessaires à la protection cathodique des réservoirs de stockage aériens dépend du besoin en courant total et du courant de décharge généré par les anodes vers le sol.

L'emplacement des anodes des déversoirs dépend de plusieurs facteurs influençant la distribution actuelle sur la géométrie de la structure. En général, une meilleure distribution du courant et une polarisation plus uniforme sont obtenues par une répartition uniforme des anodes autour du bac ou sous les bacs lors de leur conception.

Quand aux réservoirs enterrés, les anodes utilisées sont généralement fournies pré-conditionnées dans un sac en coton entouré d'un backfill, ce qui aide à générer un courant de sortie et une vitesse de dissolution plus uniformes, bien qu'il réduise la résistance de l'électrolyte. Dans le cas d'un sol à faible résistivité, les anodes peuvent être fournies nues.

L'intérieur des réservoirs de stockage de brut sont souvent protégés par des systèmes de protection par anodes sacrificielles en utilisant des anodes en Aluminium soudées à la base du réservoir. La surveillance de ces derniers n'est généralement pas requise.

III.7 Actions nécessaires pour l'optimisation du système de protection :

Il est fortement recommandé de procéder aux actions suivantes afin d'obtenir une meilleure protection :

- Des examens avancés par MFL sur les tôles des fonds pour une évaluation détaillée et un dossier technique complet de l'équipement. Sans oublier de procéder à des analyses de la composition chimique sur un échantillon d'une tôle découpée pour le but d'obtenir sa nuance.

LES BACS DE STOCKAGE

- Obtenir un relevé de la rotundité et la verticalité du bac depuis l'extérieur et des relevés de l'intérieur du fond pour vérifier la criticité des tassements et des déformations. (Selon le code API 653.).
- Remplacer les supports corrodés des tubes de jaugeage.
- Colmater les nids de piqûres et d'égratignures et les cratères de corrosion pour éviter toute propagation en profondeur.
- Faire des analyses sur l'agressivité du sol en prélevant des échantillons, bien que des analyses sur l'agressivité des substances stockées dans le bac
- Meuler les grains de soudage et recharger les joints de soudure des supports et des rustines.
- En cas de réparation d'un fond, suivre une méthode appropriée de tel sorte d'assurer l'intégrité générale de l'équipement.

III.8 Conclusion :

Après avoir introduit les éléments essentiels de mon étude, y compris le lieu géographique, les caractéristiques des bacs à protéger, et les différentes méthodes de protection cathodique qu'on peut appliquer, il est important de spécifier que le dimensionnement du système prenne en compte seulement la protection externe des fonds des réservoirs par courant imposé. Dans le chapitre prochain, je vais entamer les notions nécessaires pour les calculs et les valeurs numériques qui vont donner naissance au système de protection.

CHAPITRE IV :

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE

PROTECTION

IV.1 Introduction :

Le dimensionnement d'un système de protection cathodique est une affaire de spécialiste. Il s'agit avant tout de mesurer quand cela est possible, mais le plus souvent, d'estimer par le calcul, le besoin en courant de protection cathodique de l'ouvrage. C'est le courant que ce dernier doit recevoir pour atteindre le seuil de protection.

Le système que je dimensionne servira à protéger deux bacs de stockage. Sachant que le terminal Nord de Bejaia contient 12 bacs et qu'ils ont tous les mêmes dimensions, les résultats trouvés seront dupliqués pour le reste des réservoirs. Cependant, le bac de rétention 4Y1 est exclu de cette étude en raison de sa petite taille et de son emplacement isolé des autres réservoirs dans le site.

A la fin, chaque deux bacs auront un poste de soutirage en commun qui répond à leur besoin en courant. Vu la symétrie du site et la division des bacs en 6 unités, aucun problème ne se pose en regard de l'installation de ces postes. On cherche à utiliser des déversoirs de surface composés d'anodes de Ferro-silicium backfillées, enterrées à 0.8m de profondeur, et liées à un transformateur-redresseur de 100V/100A en sortie avec des câbles de double isolement PE/PVC de longueurs appropriées et une section de 50 mm².

Dans ce chapitre, je vais d'abord citer dans un tableau les paramètres de départ que je vais ensuite introduire dans les formules de calcul afin d'obtenir un tableau de résultats, suivit d'un schéma descriptif de l'installation finale du système.

IV.2 Illustration de l'installation du système de protection :

Voici un schéma descriptif de l'installation qu'on veut achever à la fin de ce travail. Plus de détails seront examinés dans un schéma global de la protection cathodique du parc entier, qui va se trouver au bas des résultats de calcul.

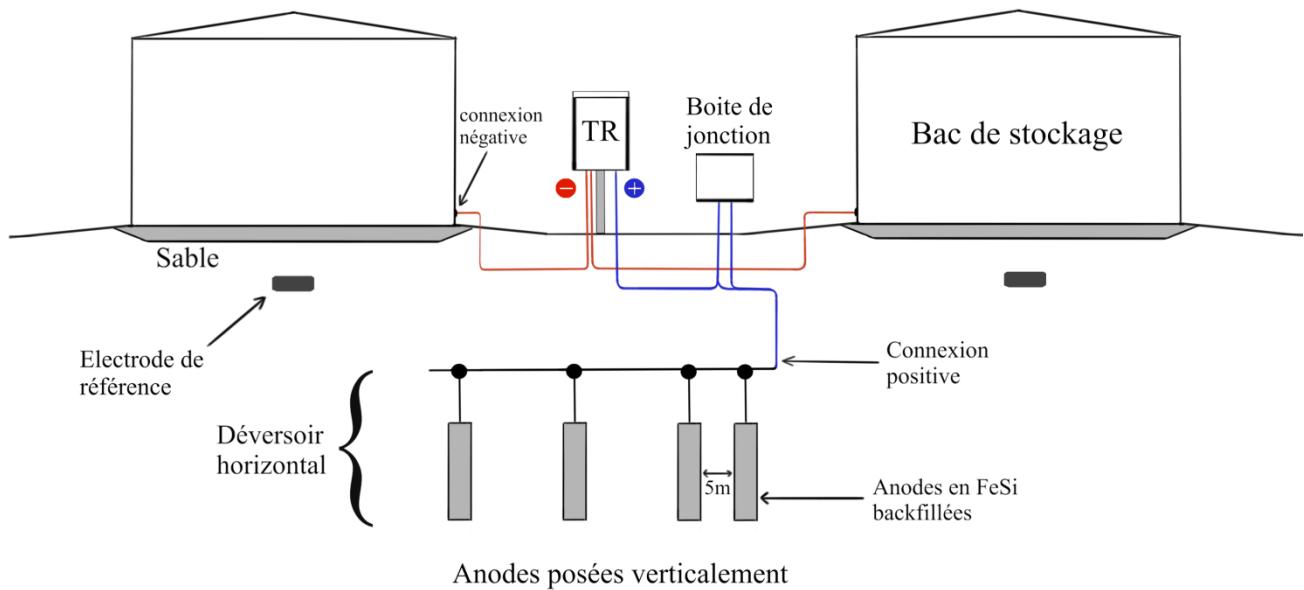


Figure 1: Protection cathodique par courant imposé de deux bacs de stockage

IV.3 Tableau des données :

paramètre	Valeur numérique
Le diamètre des réservoirs $D=2r$	56 m
La résistivité du sol ρ_s	10 $\Omega \cdot m$
La densité de courant J	20 mA/m ²
Le coefficient de dégradation du revêtement X	50%
La durée de vie du système t	20 ans
Le matériau d'anodes utilisé	Ferro-Silicium (FeSi)
Le diamètre de l'anode D_1	64 mm
La longueur de l'anode L_1	1525 mm
Le poids de l'anode m	35 kg
Le taux de consommation de l'anode C	0.5 kg/A.an
Le facteur d'utilisation de l'anode U	85%
L'efficacité du courant e	90%
Matériau de backfill	Coke de charbon
Diamètre du backfill D_2	200 mm
Longueur du backfill L_2	1800 mm
Résistivité du backfill ρ_b	50 $\Omega \cdot cm$
Les câbles de connexion	PE/PVC
Résistivité des câbles (Cuivre) ρ_c	$1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Section des câbles S_c	50 mm ²
Longueur du câble anodique L_a	90 m
Longueur du câble cathodique L_c	150 m
Sortie du transformateur redresseur	100V / 100A

Tableau 1: Les données de calcul

IV.4 Calculs :

IV.4.1 La surface à protéger :

On cherche à protéger seulement l'extérieur des fonds des bacs, ce qui nous donne :

La surface du fond du bac :

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

$$S_f = \pi * r^2$$

Avec :

r : le rayon du bac (m)

et $r=D/2$

La totalité des calculs se fait pour 2 bacs, d'où :

$$S_t = 2 * S_f$$

IV.4.2 Densité du courant de protection

Notée « J », c'est l'intensité par unité de surface. Elle dépend essentiellement de :

La qualité d'isolation de revêtement et de l'agressivité du milieu environnant.

La densité du courant est généralement estimée suivant l'expérience et des cas réels, et conformément aux normes. Voici un tableau qui donne des différentes valeurs de densité de courant pour l'acier nu pour des sols de résistivités variables.

Résistivité du sol en $\Omega \cdot m$	Densité de courant mA/m^2 (acier nu)
Inférieure à 10	20
10-100	10
100-1000	5
Supérieure à 1000	1

Tableau 2: Densités de courant de protection en fonction des résistivités des sols

IV.4.3 Calcul du courant de protection :

C'est le courant que la structure doit recevoir pour atteindre le seuil de protection. Il est mesuré quand cela est possible, mais le plus souvent estimé par le calcul qui se base sur la densité du courant et l'état du revêtement. On le calcule comme suit :

$$I_p = J * S_f * X$$

Avec :

J : La densité du courant (A/m^2)

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

S_f : La surface protégée (m^2)

X^* : le coefficient de dégradation du revêtement.

*Dans le cas d'une structure revêtue, on prend en compte un coefficient de mise à nu de l'acier par dégradation. Il est noté «X» et il est en fonction de la qualité présumée du revêtement.

IV.4.4 La masse totale d'anode requise :

$$M_a = \frac{C * t * I_p}{U * e}$$

Avec :

M_a : Masse totale en kg.

C : Consommation de l'anode en kg/A.an.

t : Durée de vie du système en ans.

I_p : Courant de protection total en Ampères.

U : Facteur d'utilisation de l'anode.

e : l'efficacité du courant.

IV.4.5 Le nombre d'anode requis :

$$N = \frac{M_a}{m}$$

Avec :

m : la masse d'une anode de Ferro-Silicium (kg).

IV.4.6 Calcul des résistances électriques :

Il est important de tenir compte des résistances électriques des différents éléments du circuit. Pour cela, on doit déterminer la résistance opposée au courant par l'électrolyte. On parle souvent de

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

résistance d'anode ou de déversoir en général qui est calculée en fonction des paramètres géométriques des anodes et de la résistivité de l'électrolyte environnant.

Puisque notre cas n'est pas celui d'une structure longiligne, on néglige la résistance électrique de la structure elle-même.

♦ La résistance d'une anode au backfill :

Le courant doit avant tout passer par le backfill afin d'atteindre de sol, ce qui nous exige de calculer la résistance du déversoir en plusieurs étapes. (Voir Annexe 8)

Parmi le nombre de formules connues, on choisit celle qui convient à un déversoir horizontal avec des anodes verticales. Elle s'écrit comme suit :

$$R_{a/b} = \frac{\rho_b}{2\pi L_1} \left(\ln \frac{4L_1}{r_1} - 1 \right)$$

Avec :

ρ_b : La résistivité du backfill ($\Omega \cdot \text{m}$).

L_1 : La longueur de l'anode (m).

r_1 : le rayon de l'anode (m).

♦ La résistance du backfill au sol :

La deuxième partie du calcul de la résistance du déversoir est de déterminer la résistance du backfill au sol. Il s'agit de la même formule précédente, avec quelques différences de paramètres. Le backfill utilisé ici est du coke de charbon.

$$R_{b/s} = \frac{\rho_s}{2\pi L_2} \left(\ln \frac{4L_2}{r_2} - 1 \right)$$

Avec :

ρ_s : La résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{m}$).

L_2 : La longueur du backfill (m).

r_2 : le rayon du backfill (m).

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

♦ La résistance du déversoir :

En considérant que l'anode et le backfill présentent des résistances au courant en série, elles doivent être additionnées :

$$R' = R_{a/b} + R_{b/s}$$

On introduit par suite le coefficient de couplage qui prend en compte le nombre d'anodes et l'espacement entre eux afin de générer un facteur qui corrige la valeur de la résistivité. Il est tiré de la courbe suivante :

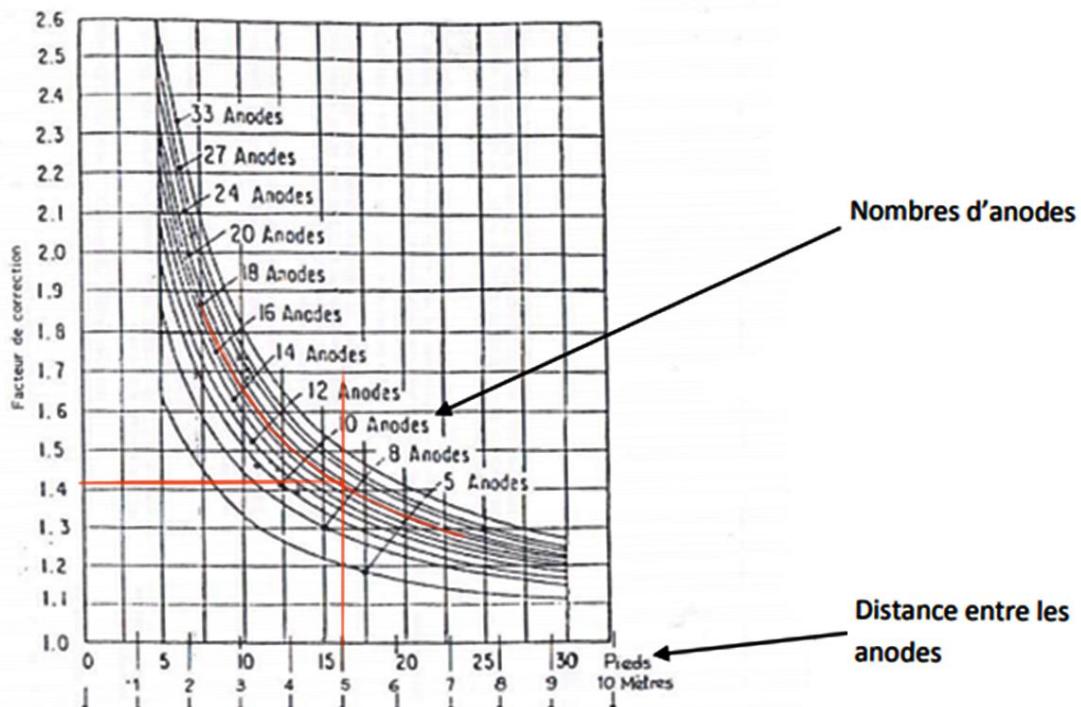


Figure 2: Le facteur de correction en fonction du nombre et la distance entre les anodes

La formule donc devient :

$$R'' = (Ra + Rb) * F$$

F : Le facteur de correction.

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

Sachant que les anodes sont liées en parallèle, la résistance du déversoir est calculée par la formule suivante :

$$R_d = \frac{R''}{N}$$

Avec :

R'' : la résistance corrigée (Ω).

N : le nombre des anodes dans le déversoir.

♦ **La résistance des câbles :**

Des câbles en PE/PVC sont employés avec des longueurs de 90m pour le câble anodique et 150m pour le câble cathodique. Ces derniers ont une section de 50mm^2 et le matériau conducteur s'agit du cuivre.

$$R_c = \rho_c * \frac{L_{cable}}{S_{cable}}$$

Avec :

ρ_c : La résistivité du matériau conducteur du câble ($\Omega \cdot \text{m}$).

L_{cable} : La longueur du câble (m).

S_{cable} : La section du câble (m^2).

♦ **La résistance totale du circuit :**

C'est la somme de toutes les résistances qu'on a calculé ci-dessus. On peut l'écrire comme :

$$R_t = R_d + R_c$$

IV.4.7 La tension du redresseur :

En employant la loi d'Ohm, la tension aux bornes du redresseur s'exprime avec la formule suivante :

$$U = R_t * I_p$$

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION

IV.5 Résultats :

Paramètre	Application numérique	Résultat
La surface à protéger « S_t »	$S_t = 2(\pi * 28^2)$	4926.02 m²
Le courant de protection « I_p »	$I_p = 20 * 4926.02 * 0.5$	50 A
La masse anodique totale « M_a »	$M_a = \frac{0.5 * 20 * 50}{0.85 * 0.9}$	653.6 kg
Le nombre d'anodes « N »	$N = \frac{653.6}{35}$	19 anodes
La résistance d'anode au backfill « $R_{a/b}$ »	$R_{a/b} = \frac{0.5}{2\pi * 1.525} (\ln \frac{4 * 1.525}{0.032} - 1)$	0.2218 Ω
La résistance du backfill au sol « $R_{b/s}$ »	$R_{b/s} = \frac{10}{2\pi * 1.8} (\ln \frac{4 * 1.8}{0.1} - 1)$	2.8972 Ω
La résistance apparente d'une anode « R'' »	$R'' = (0.2218 + 2.8972) * 1.43$	4.46 Ω
La résistance du déversoir « R_d »	$R_d = \frac{4.46}{19}$	0.2347 Ω
La résistance du câble anodique « R_{ca} »	$R_{ca} = 1.7 \times 10^{-8} * \frac{90}{50 * 10^{-6}}$	0.0306 Ω
La résistance du câble cathodique « R_{cc} »	$R_{cc} = 1.7 \times 10^{-8} * \frac{150}{50 * 10^{-6}}$	0.051 Ω
La résistance totale du circuit « R_t »	$R_t = 0.2347 + 0.0816$	0.3163 Ω
La tension du redresseur « U »	$U = 0.3163 * 50$	15.81 V

Tableau 3: Les résultats des calculs

IV.6 Interprétation des résultats :

On obtient pour chaque déversoir une masse anodique de 653.6 kg qui se traduit par 19 anodes après arrondissement. Toute anode circulera un courant de 2.63 A pour une totalité de 50 A débité par le poste de soutirage. Les anodes sont enrobées avec du coke de charbon et enterrées à une profondeur de 0.8 m dans le sol. Sachant que la résistance du déversoir doit être inférieure à 1Ω et celle du circuit doit être inférieure à 2Ω , on constate que les résultats obtenus (0.2347Ω et 0.3163Ω respectivement) conformément à ces critères. On trouve par suite une tension de redresseur égale à 15.81 V, qui est considérée une basse tension, mais on opte quand même pour un transformateur redresseur de sortie de 100V/100A pour s'adapter aux variations des exigences du système.

IV.7 Conclusion :

Finalement, on peut dire que les résultats obtenus se rapprochent du cas réel et n'ont pas du mal à s'appliquer sur le terrain du Terminal Marin de Bejaïa. L'installation globale est montrée dans le schéma inclus ci-dessous :

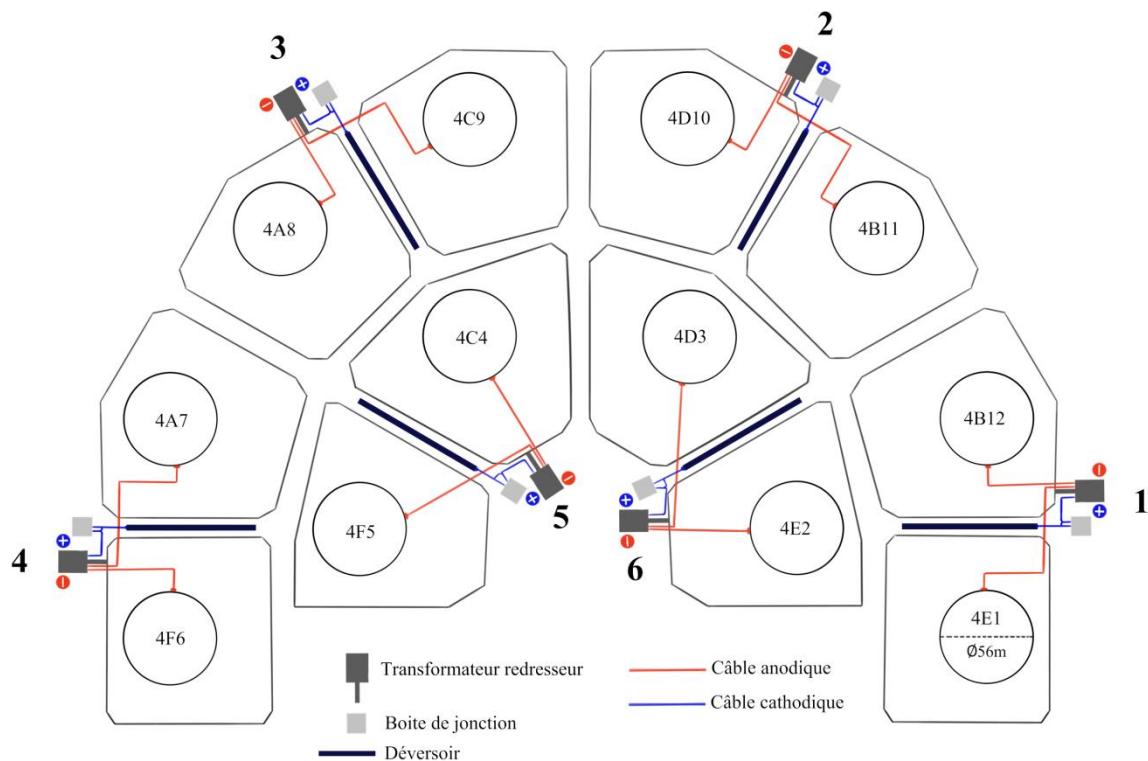


Figure 3: Schéma global de la protection cathodique du Terminal Marin de Bejaïa

CHAPITRE V :

CONTROLE ET SURVEILLANCE

V.1 Introduction :

L'évaluation de la protection cathodique permet de s'assurer que le système de protection fonctionne et maintient le potentiel de la structure métallique à un niveau protecteur vis-à-vis de la corrosion externe.

Une évaluation générale (mesures de potentiel à courant enclenché) est effectuée tous les ans.

Pour les ouvrages aériens, une inspection régulière et un entretien adapté des peintures sont réalisés en tant que de besoin.

En cas de l'emploi d'un système de protection par courant imposé, une inspection mensuelle du rectificateur est fortement recommandée par la NACE afin de s'assurer de son bon fonctionnement dans le cadre des paramètres établis par le design.

V.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique :

Le contrôle du fonctionnement d'un système de protection cathodique consiste à vérifier, par des mesures appropriées de potentiel de courant, que les critères de protection cathodique sont bien respectés en tous points de l'ouvrage. Mais il ne faut pas oublier de vérifier que l'état de la protection passive, telle qu'elle a été précédemment définie dans ses divers rôles, est toujours intact. Il est donc nécessaire d'apprécier la valeur d'isolement apportée par le revêtement, ainsi que la fonctionnalité des isolements par rapport à d'autres structures adjacentes et l'efficacité des raccords isolants.

V.2.1 Le contrôle de la protection cathodique des bacs de stockage :

Les obligations de mesures et de surveillance varient avec le type d'installation.

Pour les surfaces internes en contact avec un fluide, une électrode de référence portable peut être suspendue du toit du bac pour mesurer les potentiels. On peut aussi avoir des électrodes permanentes installées à des locations prédéterminées.

Pour les fonds des bacs, il est nécessaire de prendre en compte la surveillance durant le stage de conception. Il est possible de prendre plusieurs mesures exactes de potentiel en installant des électrodes de référence sous le bac avant sa construction.

V.3 Le contrôle de revêtement :

Chaque type de revêtement doit conformer aux exigences requises suivant les normes et régulations. Le contrôle du revêtement s'effectue juste avant la mise en fouille de l'ouvrage et tout défaut observé doit être réparé immédiatement. Les notions mentionnées ci-dessous doivent être observées :

- La vérification de l'aspect de revêtement.
- La mesure de l'épaisseur.
- Le contrôle de non porosité du revêtement.

V.4 Détection de décollement de revêtement :

Parmi les méthodes les plus précises de recherche de défaut de revêtement on trouve le DCVG (direct current voltage gradient). La détection des défauts se fait généralement en utilisant le courant de protection cathodique préalablement désigné avec une fréquence de 1Hz. Cette méthode permet de contrôler le revêtement externe des conduites mais elle n'est pas assez applicable pour une protection cathodique globale.

V.5 Efficacité des joints isolants :

Pour s'assurer de l'efficacité d'un joint isolant, on mesure le potentiel du joint d'une part et le la structure d'une autre. Si les valeurs prélevées sont différentes, on peut assumer que le joint est isolant. En cas de doute, il suffit de modifier le potentiel du coté modifié à partir d'un poste de soutirage et de reprendre les mesures de potentiel ; si ce dernier ne varie que du coté protégé, on déduit que le joint à une bonne efficacité.

V.6 Les mesures périodiques :

Ces dernières doivent inclure :

Les relevés de potentiel, relevés de courant, contrôle des appareillages, contrôle d'isolement.

CONTROLE ET SURVEILLANCE

Une périodicité minimale est imposée par la législation de certains pays. Par exemple, en France, d'après l'article 35 du règlement de sécurité des pipelines à hydrocarbure liquides, un contrôle de l'efficacité de la protection cathodique est imposé au moins deux fois par an.

Par ailleurs, la périodicité et l'ampleur des contrôles sont déterminées par le responsable en anti corrosion de l'ouvrage.

V.7 Le contrôle mensuel des postes de protection cathodique :

Son but est d'obtenir le relevé des paramètres suivants :

- Tension d'alimentation des transformateurs redresseurs.
- Tension de fonctionnement du poste.
- Température d'huile dans le cas des transformateurs redresseurs à bain d'huile.
- Potentiel en circuit fermé ON aux points d'injection par rapport à l'électrode de référence fixe.
- Potentiel en circuit fermé ON aux points d'injection par rapport à l'électrode de référence portative.
- Intensité du courant débité par le poste.
- Consommation de l'énergie électrique.
- Relevés des compteurs horaires.

V.8 Les techniques de mesure :

On parle ici de deux grandeurs électriques mesurables qui représentent l'état électrique d'une structure par rapport à son milieu :

- Les potentiels engendrés.
- Les courants électriques reçus par la structure.

CONTROLE ET SURVEILLANCE

Ces méthodes consistent donc à engendrer sur l'ouvrage enterrés ou immergé soit :

- Des gradients de potentiels mesurables en surface.
- Une polarisation de l'ouvrage.
- Un champ magnétique mesurable.

V.8.1 Les mesures de potentiels :

Il est indispensable de mesurer le potentiel des ouvrages en acier dans le sol pour contrôler l'efficacité de la protection cathodique. Ces mesures se font par l'intermédiaire d'électrodes de référence enterrées sous le réservoir ; C'une demi-pile qu'on associe à la structure qui constitue elle-même une demi-pile. La prise de potentiel entre ces deux dernières se fait à l'aide d'un voltmètre à forte résistance interne en raccordant le pole positif du voltmètre à l'électrode de référence et le pole négatif à la structure protégée. On emploi généralement des électrodes de référence en Cu/CuSO₄ (Voir Annexe 7), mais d'autres électrodes y compris : L'électrode à l'Hydrogène, à Calomel, à Chlorure d'Argent.

Les prises de potentiel sont réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé à la structure. L'installation est bien décrite dans le schéma suivant :

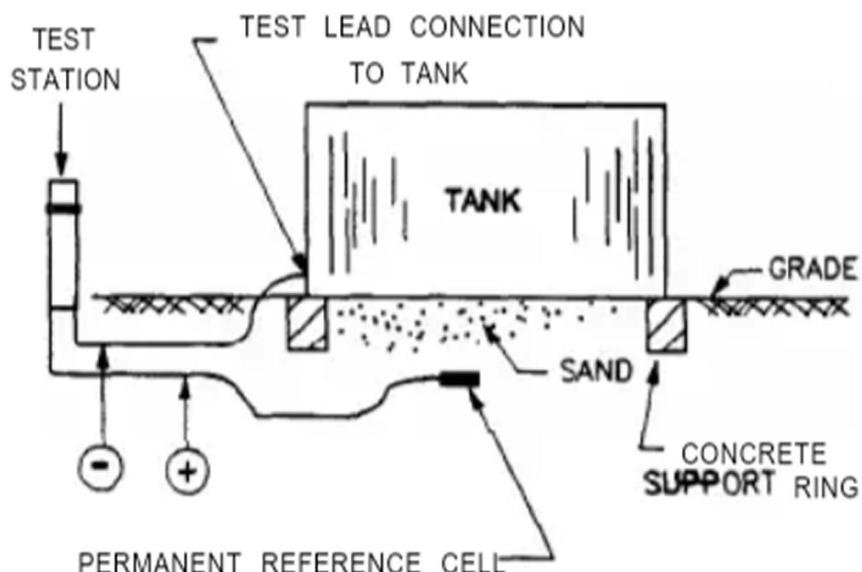


Figure 1: Système de surveillance de la protection cathodique

CONTROLE ET SURVEILLANCE

Potentiel ON : Dit potentiel à courant établi, il est mesuré avec la protection cathodique en service, c'est le potentiel du métal sous application du courant de protection cathodique.

Potentiel OFF : Le potentiel à courant coupé est mesuré à la coupure du courant de protection. Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques secondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dû à la circulation des courants de protection dans le sol.

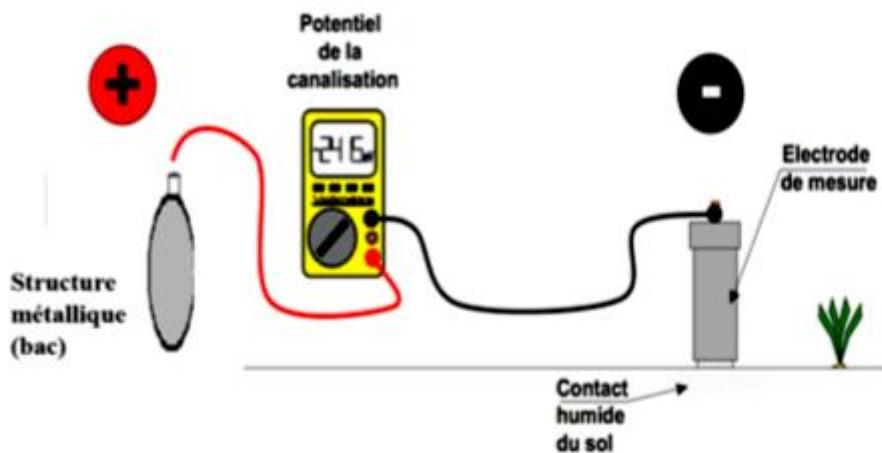


Figure 2: Méthode de mesure de potentiel d'une structure métallique

V.8.2 Les mesures de courant :

Les courants électriques constituent des éléments appréciables dans le contrôle de la corrosion. Ils sont produits soit par les piles géologiques, soit par la protection cathodique. L'appareil utilisé pour effectuer cette opération s'appelle un Multimètre (voir Annexe 9) qui sert aussi à mesurer la tension et la résistance électrique. Les courants se mesurent :

- Dans les structures longilignes pour détecter le sens de l'intensité d'un courant.
- Dans les interconnexions entre divers systèmes.
- Dans les circuits d'anodes pour mesurer le débit.
- Dans les bornes d'un raccord isolant.
- Par l'extérieur sur les canalisations.

V.9 Les facteurs de limitation de l'efficacité de la protection cathodique:

Certaines défaillances peuvent causer le système de protection à ne pas fonctionner proprement le long de sa durée de vie qui a été désignée. Parmi ces facteurs on trouve :

- ❖ La continuité électrique insuffisante du système.
- ❖ La perte d'adhérence du revêtement.
- ❖ L'influence des structures voisines.
- ❖ L'influence d'une source de courant continu.
- ❖ L'influence d'une source de courant alternative.

V.10 Eléments qui assurent un bon fonctionnement de la protection cathodique :

V.10.1 La continuité électrique parfaite de la structure à protéger :

Elle peut être assurée par le shuntage de tous les joints non soudés (joints à brides, joints caoutchouc, etc.), des vannes de ligne et autres accessoires non soudés, placés directement sur l'ouvrage, à l'exception des raccords isolants prévus.

V.10.2 L'isolation électrique de l'ouvrage par rapport au sol :

- a. La protection passive : achevée par l'utilisation d'un revêtement de bonne qualité sur tout élément ou pièce de raccord, sans oublier que les vannes et autres organes de robinetterie enterrés ou installés dans des chambres de vannes non étanches doivent aussi être bien revêtus.
- b. La suppression des mises à la terre : Il est nécessaire de prévoir des raccords isolants ou d'autres dispositifs afin de prévenir toute mise à la terre aux niveaux de :
 - L'entrée et la sortie des stations de pompage, des réservoirs, de reprise, des bâtiments et autres ouvrages métalliques ou de génie civil mis à la terre par construction ou en application des réglementations.

CONTROLE ET SURVEILLANCE

- Raccordements ou points de contact de la structure protégée cathodiquement avec d'autres structures conductrices non isolées par rapport au sol telles que des tuyaux de fonte ou de cuivre ou d'acier galvanisé.

Il faut assurer que le revêtement ne soit pas endommagé et reste intact, et que les raccords isolants sont prévus en des points judicieusement choisis, avec un nombre limité et un démontage facile, et de manière que n'importe quelle intervention sur ces derniers perturbe au minimum l'exploitation de l'ouvrage.

- a. L'éclateur de ligne : Il se compose d'une enveloppe contenant un gaz rare, neutre et isolant ou d'un ensemble de constituants électroniques. Il sert à bloquer les courants (continus et alternatifs) jusqu'à une tension d'amorçage, mais cette dernière est supérieure à la tension de sécurité pour l'homme. Il permet typiquement la protection d'un joint isolant en évitant de le détruire sur un choc de foudre.

V.11 L'automatisation de la protection cathodique :

Le but général de l'automatisation est de remplacer les interventions manuelles longues, fastidieuses et couteuses, par celles des machines. Il est important que les différents éléments qui composent la protection cathodique d'un ouvrage fonctionnent correctement et en permanence. Face au danger de courants vagabonds importants, il faut toujours vérifier par des enregistrements que le potentiel du métal protégé reste dans la zone d'immunité. Ces contrôles sont beaucoup plus facilement réalisés à l'aide d'un système automatisé. Sans oublier qu'afin d'éviter toute perturbation du milieu ambiant qui tendent à rendre la structure plus électropositive, on peut asservir directement le débit d'un soutirage de courant au potentiel du métal par rapport au sol ; ce qui est également réalisé dans le soutirage à régulation électronique de potentiel.

V.12 Conclusion :

Le succès du système de protection cathodique est le résultat de :

- ❖ Un excellent travail de surveillance ; de design et de travaux d'ingénierie.
- ❖ Une sélection judicieuse de système et de matériaux convenables et leur inspection.
- ❖ Mesures et maintenances périodiques parfaites.

CONCLUSION

CONCLUSION

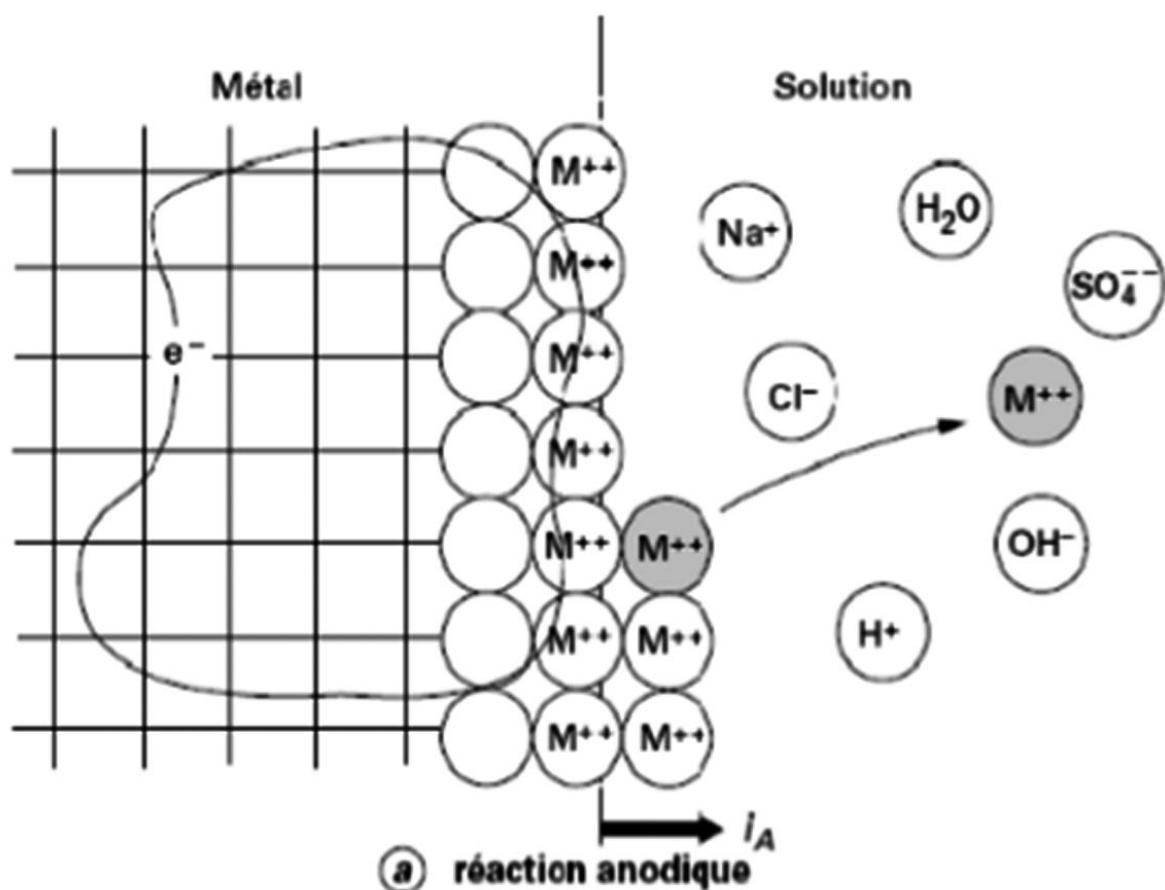
Ma recherche a été portée sur l'étude de la protection cathodique par courant imposé d'un ouvrage concentré défini par un parc de stockage de 12 bacs aériens à toit flottant de diamètres et volumes utiles similaires de 56 m et 3000 m³ respectivement. Je me suis intéressée spécifiquement à l'extérieur des fonds des bacs, tout en profitant de la symétrie du site pour distribuer les postes de soutirage d'une manière optimale.

Une grande partie de ce travail a été consacré à la description détaillée du phénomène de corrosion et les méthodes appliquées afin de gérer ce dernier et minimiser tous dégâts engendrés au cours des années. Après avoir détaillé les caractéristiques du site et lié les informations citées précédemment au cas spécifique des réservoirs de stockage de pétrole, Je suis passée vers le dimensionnement d'un poste de soutirage ayant la capacité de protéger avec efficacité deux bacs pendant une durée de vie de 20 ans. Les résultats obtenus seront donc dupliqué en six unités afin de couvrir le parc entier.

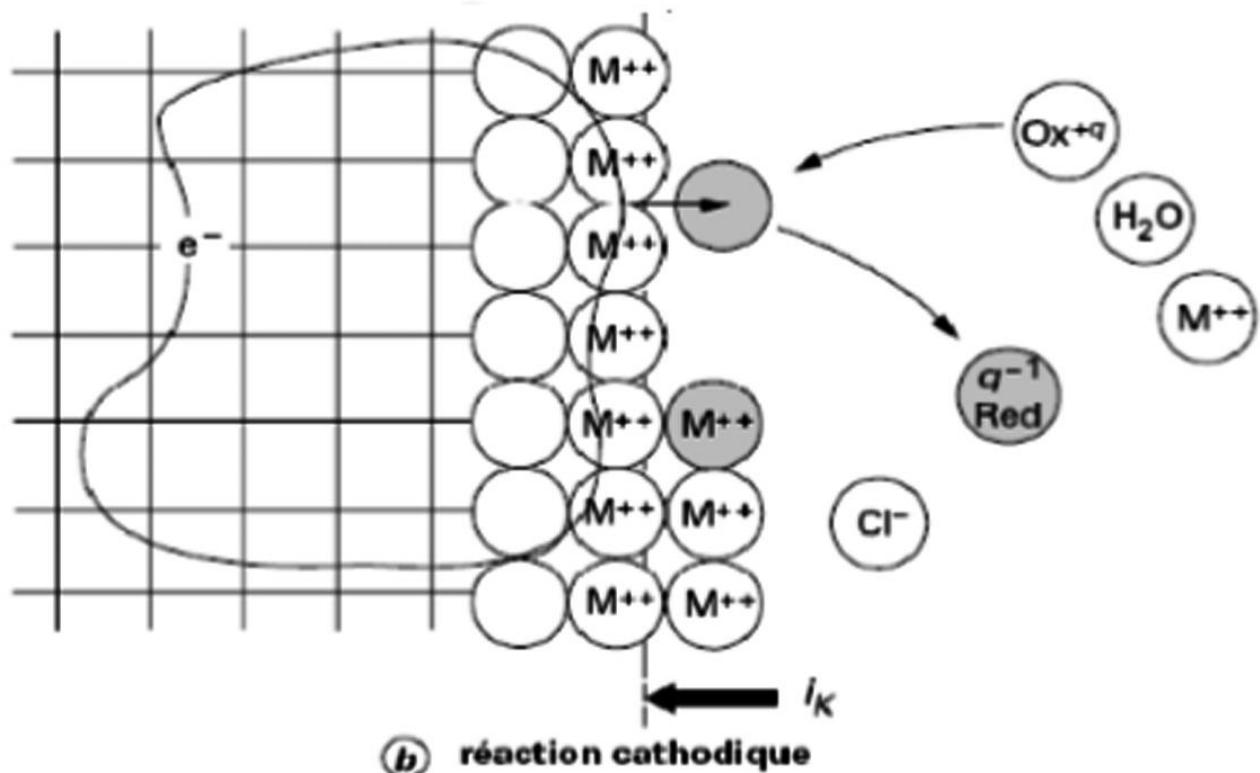
Suite à l'identification des paramètres de design et le choix de l'emplacement des postes et tous les équipements nécessaires au bon fonctionnement du système, il est important de le maintenir en état parfait afin de s'assurer de son efficacité. Pour cela, on s'intéresse à effectuer des contrôles et des mesures périodiques obligatoires que je mentionne dans le dernier chapitre comme un point final qui aide à relier toutes les informations et conclure l'étude.

ANNEXE

Annexe 1: La réaction anodique du Fer



Annexe 2: La réaction cathodique sur la surface de la structure métallique

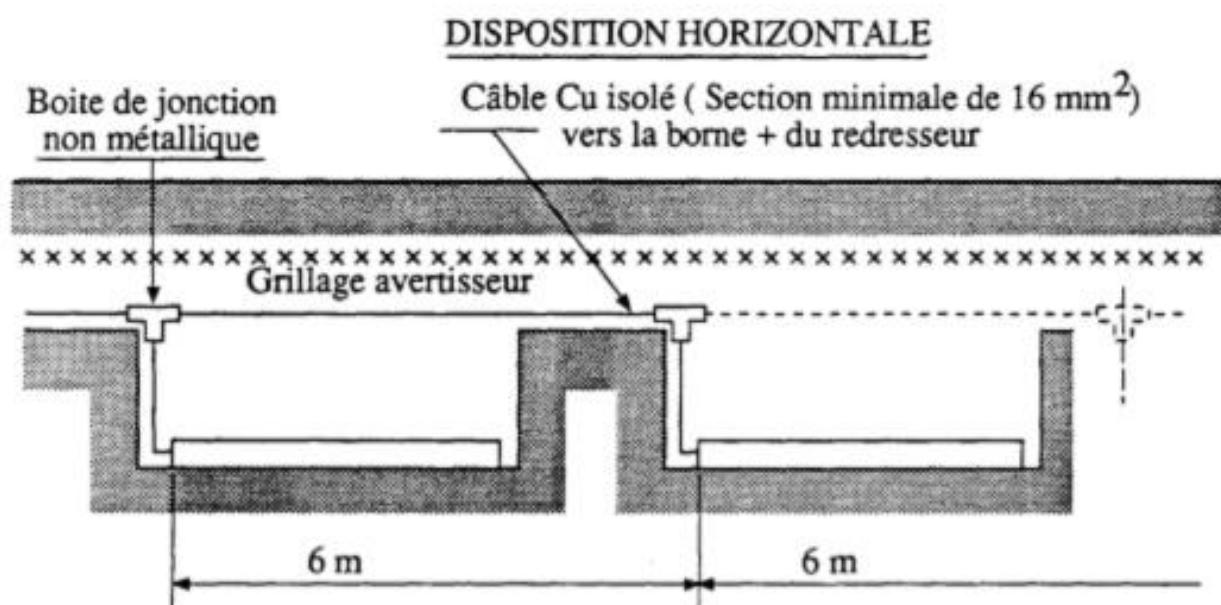


ANNEXE

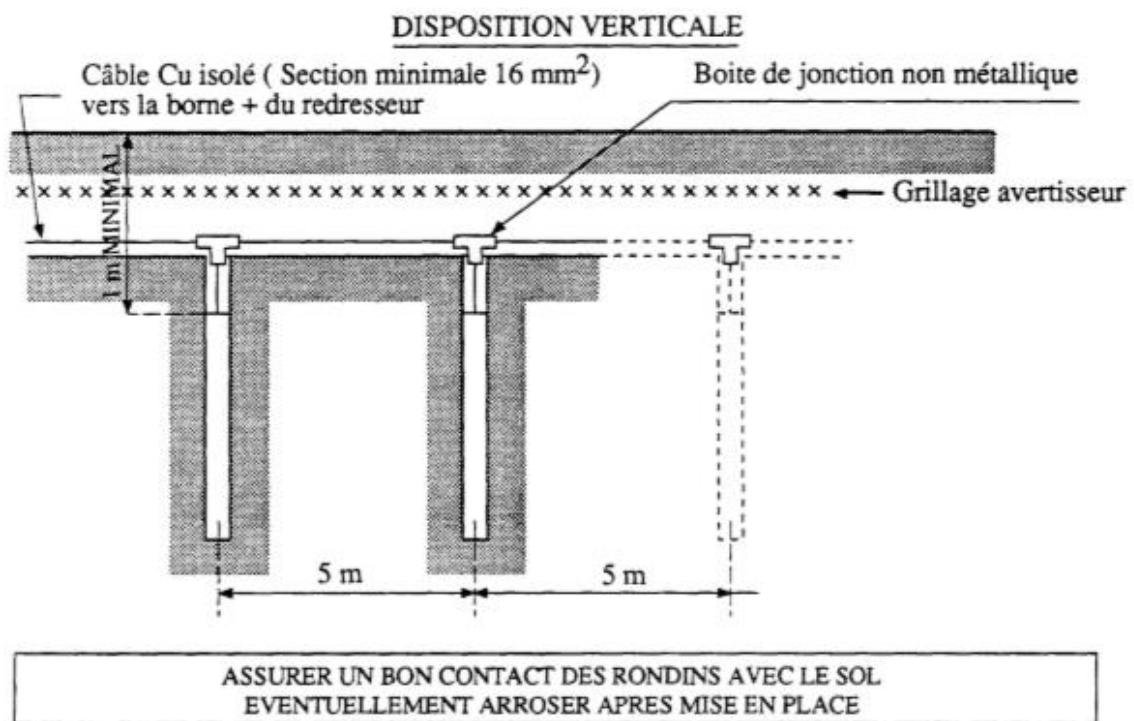
Annexe 3: Le transformateur redresseur utilisé dans la protection des bacs du Terminal Marin de Bejaia



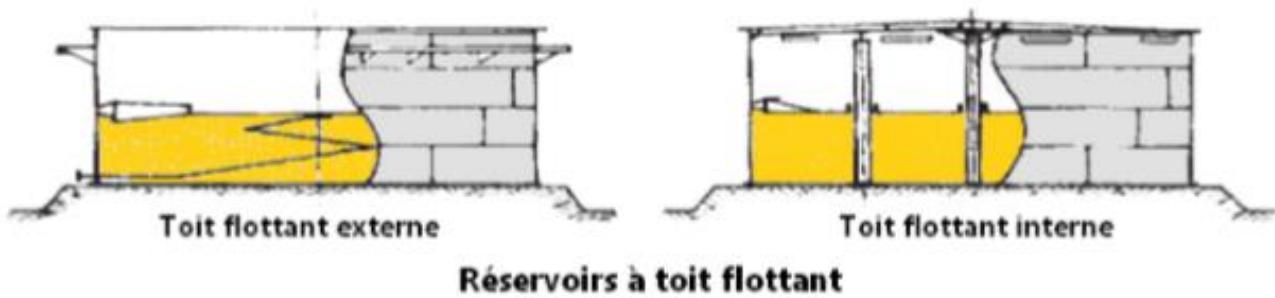
Annexe 4: La disposition horizontale des anodes de déversoir



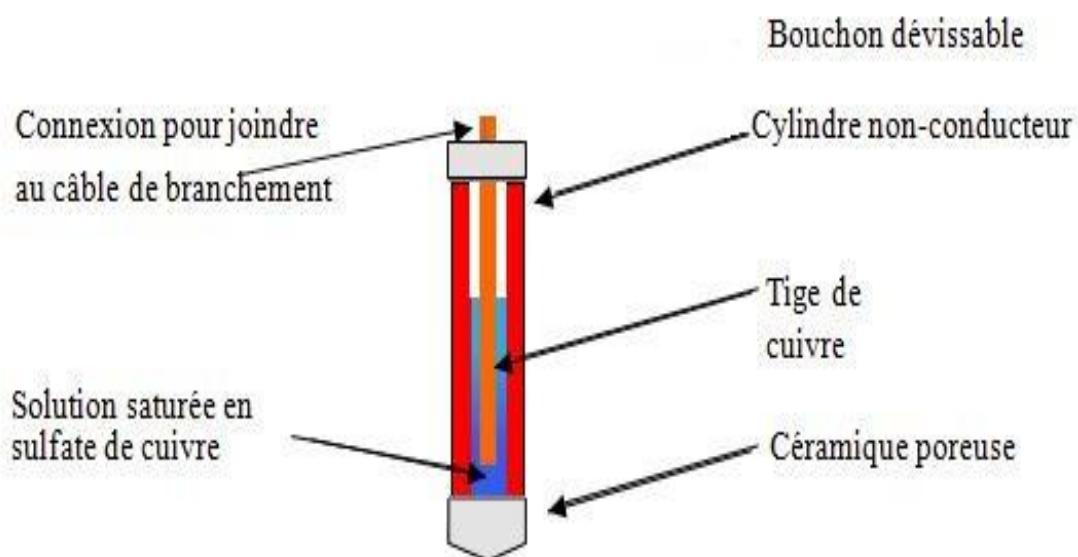
Annexe 5: La disposition verticale des anodes de déversoir



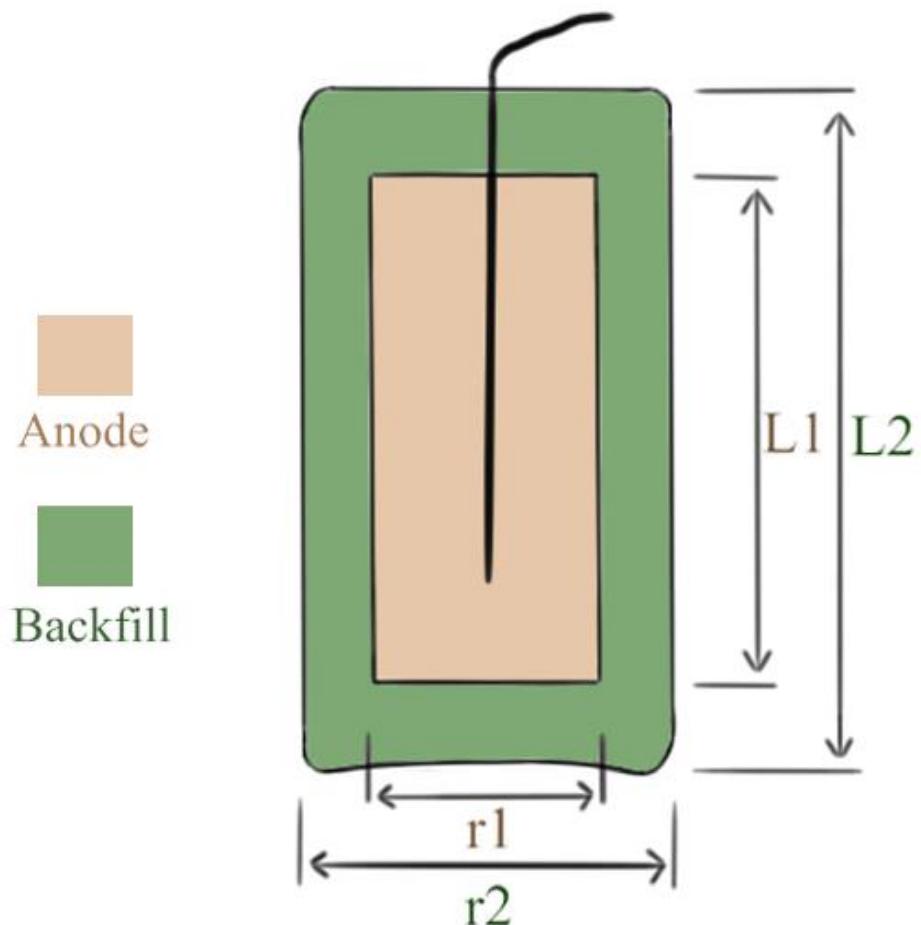
Annexe 6: Les types de réservoirs à toit flottant



Annexe 7: Electrode de référence en Cu/CuSo₄



Annexe 8: Paramètres de calcul d'une anode backfillée



Annexe 9: Un Multimètre



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. Mémoire: Dimensionnement optimal du système de la protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque; par SEGHIRI Youcef et TAYEG Bilal, 2015.
2. Mémoire: Protection cathodique des canalisations et du bac de stockage; par MEHRIZ Mohamed Amine, 2005.
3. Cathodic Protection: An Overview by Cathodic Protection Co. Limited.
4. Cathodic Protection by The Propane Education and Research Council (PERC).
5. Étude de dangers d'un ouvrage de transport de gaz naturel – Partie Générique, révision : 2016 – décembre 2017 par GRTgaz.
6. CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE, Révision 2 de 1996 par Monsieur MAREC.
7. Corrosion Control for Metallic Structure Using Cathodic Protection, by Mohammed Yousef El Shazley CAIROMATIC, Cairo – Egypt.
8. Mémoire: étude du dimensionnement optimal d'un système de protection cathodique alimenté par énergie solaire; par BROU N'Guéssan Bahet Stanislas, 2010.
9. Cathodic protection of tank by Rana M. Hussain, 2012.
10. Mémoire : Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure par ABDELLI Feriel, 2017.
11. Mémoire de fin d'études : Etude optimale de réseau de pipeline par Briki et Blouhi.
12. La protection cathodique : Guide pratique, par la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel ; Edition 1986.
13. La protection cathodique : Principe, dimensionnement, réalisation et contrôle ; par H. Zendaoui, 2012.
14. Cathodic protection ; TETCO Gadarif strategic depot project. External tank base system and internal tank systems ; by Cathodic Protection Co. Limited.
15. Appendix A, Cathodic protection : Nature of discharge for the Phase I Final Rule and Technical Development Document of Uniform National Discharge Standards (UNDS), 1999.

BIBLIOGRAPHIE

16. Corrosion and cathodic protection; by General Corrosion Corporation Minneapolis, MN.
17. Cathodic Protection; ME 472-061 Corrosion Engineering I; ME, KFUPM. by Dr. Zuhair M. Gase.
18. Mémoire: Corrosion localisée des aciers API 5L-X52 de la ligne ASR/MP sollicité en sol algérien; par Amina Bendjebbour; 2011.
19. Technologie des parcs de stockage et terminaux; par le département Génie des Transports U.M. Constantine.
20. Corrosion and Cathodic Protection Theory; by James B. Bushman, P.E. Principal Corrosion Engineer Bushman & Associates, Inc Medina, Ohio USA.
21. Mémoire: Etude des causes de la corrosion des bacs de stockage de pétrole ; par KHERBICHE Douadi et KEMER Younes, 2020.
22. Mémoire : Etude de la protection cathodique par anodes sacrificielles des fonds des bacs de stockage dans l'unité de Haoud Berkaoui ; par KOURDACHE Taous et HAMZI Yahia, 2006.