

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



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'option do diplôme de

Master

Domaine : Sciences et technologie

Filière : hydrocarbure

Option : Génie mécanique :

Transport et distribution des Hydrocarbures

THEME :

**DIMENSSIONNENT DES PARAMETRES DE
PROTECTION CATHODIQUE DES BACS DE
STOCKAGE (SITE OUARGLA)**

Réalisé par : BOUDERSA Mohammed Islam

Suivi par : Mr. TIKOBAINI Mourad UNIVERSITE BOUMERDES

Examineur : UNIVERSITE BOUMERDES

..... UNIVERSITE BOUMERDES

Année universitaire :

2021/2022

REMERCIEMENT

REMERCIEMENT :

*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 de ce mémoire :*

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

- *Les enseignants et la totalité de l'équipement pédagogique de la faculté de l'hydrocarbure ;*
- *L'ensemble des **cadres du dépôt d'Ouargla et dépôt EL DJELFA** ;*
- *Mes parents, ma famille, ma femme et mes amis pour leur soutien constant et leurs encouragements ;*
- *Et tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

SOMMAIRE

SOMMAIRES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES RESERVOIRS	
Introduction	
I Généralité sur les réservoirs.....	
I.1 Notions sur les réservoirs.....	
I.2 Classification des réservoirs.....	
I.3 En fonction de la matière utilisée.....	
I.3 Accessoires de réservoir	
I.3.1 Accessoires d'accès.....	
I.3.2 Accessoires de mesurage.....	
I.3.3 Entrée et sortie du produit	
I.3.4 Accessoires de sécurité.....	
I.4 Dimension et construction.....	
1.4.1 Fond de réservoirs.....	
1.4.2 Robe de réservoir	
I.5 Stabilité des réservoirs.....	
I.5.1 Stabilité à La Pression.....	
I.5.2 Stabilité à La Dépression	
I.6 Essais des réservoirs avant l'exploitation finale.....	
I.6.1 Essais d'étanchéité	
I.6.2 Essais au l'eau	
I.6.3 Essais à la pression	
I.6.4 Essais de la dépression.....	
I.6.5 Essais aux hydrocarbures.....	
I.7 Les type de corrosion dans les bacs de stockage	
I.7.1 La corrosion externe	
I.7.2 La corrosion interne.....	
CHAPITR II : LA CORROSION.....	
Introduction.....	
II Généralités sur La corrosion.....	
II.1 Importance économique de la corrosion	

SOMMAIRE

II.2 Paramètres constitutifs des sols influençant la résistivité électrique.....	
II.2.1 Influence du Ph.....	
II.2.2 Humidité.....	
II.2.3 Aération	
II.2.4 Éléments chimiques présents dans le sol	
II.3 Classification de la corrosion.....	
II.3.1 La corrosion chimique.....	
II.3.2 La corrosion bactérienne.....	
II.3.3 La corrosion électrochimique.....	
II.3.4 Corrosion électrochimique du fer.....	
II.3.5 Double couche électrique.....	
II.4 Aspect morphologique de la corrosion.....	
II.4.1 Corrosion généralisée.....	
II.4.2 Corrosion localisée (zonale).....	
II.4.3 La corrosion galvanique (bimétallique).....	
II.4.4 La corrosion caverneuse (par crevasse).....	
II.4.5 La corrosion par piqûres.....	
II.4.6 La corrosion inter granulaire	
II.4.7 La corrosion sélective.....	
II.4.8 Corrosion frottement (tribocorrosion).....	
II.4.9 La corrosion sous contrainte	
II.4.10 Fragilisation par hydrogène.....	
II.4.11 Corrosion par les courants vagabonds.....	
II.5 Facteurs de la corrosion.....	
II.5.1 Facteurs liés au milieu.....	
II.5.2 Facteur lié au métal.....	
II.5.3 Facteurs liés aux conditions d'emploi.....	
II.5.4 Facteur lié au temps.....	
II.6 Lutte contre corrosion par l'oxygène (corrosion interne)	
II.6.1 Solution métallurgique.....	
II.6.2 Solution physique.....	

SOMMAIRE

II.6.3 Solution chimique.....	
II.6.4 Lutte contre la corrosion par CO ₂	
II.6.5 Lutte contre la corrosion par H ₂ S.....	
II.6.6 Protection cathodique.....	
II.6.7 Les systèmes de peinture	
II.6 L'importance de l'étude de la corrosion.....	
COCLUSION.....	

CHAPITRE III : LUTTE CONTRE CORROSION

Introduction.....	
III.1 Histoire de la protection cathodique (PC).....	
III.2 Lutte contre la corrosion des sols.....	
III.3 Protection électrochimique.....	
III.3.1 Protection anodique.....	
III.3.2 Protection cathodique.....	
III.4 Protection cathodique par courant imposé.....	
III.4.1 Principe de la protection cathodique par courant imposé.....	
III.4.2 Choix des anodes sacrificielles.....	
III.5 Protection cathodique par courant imposé.....	
III.5.1 Principe de la protection cathodique par courant impose.....	
III.5.2 Critères de la protection cathodique.....	
III.5.2.1 Densité de courant de protection cathodique :.....	
III.5.2.2 Résistance des éléments.....	
III.5.2.3 Revêtements associés à la protection cathodique.....	
III.5.3 Système de protection cathodique par courant imposé.....	
III.5.3.1 Réalisation de soutirages	
III.5.3.2 Caractéristiques du générateur.....	
III.5.4 Implantation des postes de soutirage.....	
III.5.4.1 Composition typique d'un poste de soutirage.....	
III.5.4.2 Source d'énergie.....	
III.5.4.3 Déversoir (masse anodique)	
III.5.4.4 Câbles de liaison.....	
III.5.4.5 Appareillage électrique auxiliaire.....	

SOMMAIRE

III.6 Facteurs de limitation d'efficacité de la protection cathodique.....	
III.6.1 Perte d'adhérence des revêtements.....	
III.7 Champs d'application de la protection cathodique	
III.7.1 Ouvrages au contact du sol	
III.7.2 Ouvrages immergés	
III.8 Contrôle de protection cathodique	
III.8.1 Mesure du potentiel.....	
III.8.1.1 Electrode de sulfate de cuivre	
III.8.1.2 Voltmètre.....	
III.9 Méthode de mesure du potentiel	
Conclusion	
CHAPITRE IV : CALCULS ET RESULTATS	
Introduction :.....	
IV.1 Illustration de l'installation du système de protection.....	
IV.2 Caractéristiques des bacs de stockage	
IV.3 La résistivité du sols	
IV.4 Mesure du Ph :.....	
IV.5 Calcul de surface à protéger pour le fond des bacs	
IV.6 Système de mise à la terre (malt)	
IV.7 DENSITÉ DE COURANT.....	
IV.8 Calcul du besoin en courant.....	
IV.9 Vérification de la puissance du transformateur redresseur	
IV.9.1 Le besoin de courant majoré.....	
IV.9.2 Hypothèses quant à la qualité du revêtement	
IV.9.3 Caractéristiques du transformateur-redresseur.....	
IV.10 Dimensionnements du déversoir anodique	
IV.10.1 Calcul de la masse anodique à installer	
IV.10.2 Installation de protection cathodique	
IV.10.3 Equipement de protection cathodique.....	
IV.10 Réalisation de protection cathodique au niveau de dépôt d'OUARGLA	
IV.10.1 Mise en service.....	
IV.10.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique.....	
IV.10.2.1 Critère de la protection cathodique.....	
IV.10.2.2 Mesure du potentiel de protection des bacs.....	
IV.11 Fréquence de contrôle de la protection cathodique.....	

SOMMAIRE

IV.11.1 Protection par revêtements	
IV.11.1.1 Préparation de surface	
IV.11.1.2 Système de peinture	
IV.11.1.2.1 Couche primaire	
IV.11.1.2.2 Couche intermédiaire	
IV.11.1.2.3 Couche de finition	
IV.11.1.2.3 Compatibilité des peintures avec la protection cathodique...	
Conclusion	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Figure I-1: réservoirs béton armé.....					
Figure II-2: Réservoirs à toit fixe.....					
Figure III-3: Réservoirs à toit mobiles.....					
Figure IV-4: Réservoirs semi fixe.....					
Figure V-5: réservoirs cylindriques.....					
Figure VI-6: réservoirs sphériques.....					
Figure VII-7: Jauge de niveau à flotteur					
Figure VIII-8: entrée et sortie du produit.....					
Figure IIX-1 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.....					
Figure IX-2 : Processus de la corrosion de l'acier.					
Figure IXI-3 : Interface métal- solution. La double couche.....					
Figure IXII-4 : Corrosion généralisée : exemple d'une porte et d'un véhicule corrodés.....					
Figure IXIII-5 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents ...robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.....					
Figure IXIV-6 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.....					

LISTE DES FIGURES

Figure IXV-7 : Corrosion par piqûre de

l'aluminium.....

Figure IXVI-8 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.....

Figure IXVII-9 : Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.....

Figure IXVIII-10 : La

tribocorrosion.....

Figure IXIX-11: La corrosion sous

contrainte.....

Figure IXX-12 : Corrosion par les courants

vagabonds.....

Figure IXXI-13 : corrosion par le gaz carbonique.....

Figure III-1 : Anodes installées horizontalement.....

Figure III-2 : Anodes installées verticalement.....

Figure III-3 : Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.....

Figure III-4 : Principe de la protection cathodique par courant imposé.....

Figure III-5 : Poste de soutirage.....

Figure III-6 : Boite de jonction.....

Figure III-7 : Schéma de formation d'un décollement cathodique.....

Figure III-8 : Electrode de référence $Cu/CuSO_4$ pour l'utilisation dans les sols.....

Figure III-9 : Voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de PC(Possède une impédance d'entrée élevée).....

Figure III-10 : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.....

Figure IV-1 : Protection cathodique par courant imposé d'un bac de stockage.....

Figure IV-2 : Résistivité du sol.....

Figure IV-3 : Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol.....

LISTE DES TABLEAUX

Figure IV-4 : Prélèvements de sol de 5 points différents.....	
Figure IV-5 : Faire introduire le mélange régulateur.....	
Figure IV-6 : Pose de l'anode.....	
Figure IV-7 : Pose de l'électrode de référence.....	
Figure IV-8 : Opération de câblage.....	
Figure IV-9 : Connexion négative.....	
Figure IV-10 : Redresseur et le coffret de jonction.....	
Figure IV-11 : Préparation de surface	
Figure IV-12 : Proposition d'un schéma pour la protection cathodique (chaque deux bac relié avec un déversoir de trois anodes).....	

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU II-1 : Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols.....

TABLEAU III-1 : Densité de courant de protection cathodique pour l'acier nu.....

TABLEAU III -2 : Anodes utilisées pour la protection cathodique par courant imposé.....

TABLEAU IV-1 : Densités de courant de protection cathodique pour différents sols.....

TABLEAU IV-2 : Résultats des calculs des résistivités.....

TABLEAU IV-3 : Résultats des calculs des surfaces à protéger.....

SOMMAIRE

LISTE DES ANNEXES :

- ANNEX 1** : Modèle d'anode en ferro-silicium disposée verticalement.....
- ANNEX 2** : Appareil DM4 avec palpeur pour la prise d'épaisseur à l'ultrason.....
- ANNEX 3** : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.....
- ANNEX 4** : Electrode de référence $Cu/CuSO_4$ pour l'utilisation dans les sols.....
- ANNEX 5** : Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs.....
- ANNEX 6** : Déversoir anodique posé horizontalement
- ANNEX 7** : Déversoir anodique posé verticalement.....

INTRODUCTION :

La corrosion est le processus qui conduit les éléments naturels à défaire ce que l'homme, par son travail et à grands frais d'énergie, a élaboré à partir des matériaux que la terre lui offre. La corrosion métallique ramène ainsi, métaux et alliages à leur état naturel d'oxydes ou de minerais.

La corrosion engendre, aussi bien pour les particuliers que pour les entreprises industrielles des coûts d'entretien et de renouvellement parfois très importants, des conséquences techniques fâcheuses, et des risques pour l'intégrité de l'homme lui-même.

Généralement enterrés, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production, de transport et de distribution, se faisant même oublier, les ouvrages gaziers et pétroliers baignent dans un milieu souvent agressif du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient. Ce milieu très varié se prête pas facilement à la modélisation et aux études scientifiques, tant en laboratoire que sur site, c'est pourquoi, les chercheurs en sont encore au stade de la compréhension des mécanismes de la corrosion et les ingénieurs au perfectionnement des techniques destinées à prémunir les ouvrages des effets de cette dégradation .

Le but de mon mémoire est de montrer une vue globale sur la corrosion, ses causes et conséquence, tous les moyens connus de lutte contre elle, avant de passer vers les spécifications du lieu étudié et le dimensionnement du système de protection cathodique dans un dépôt de stockage contenant un ouvrage de 9 bac aérien. En fin, je cite les méthodes de contrôle du système de protection afin de garantir une meilleure fonctionnalité pendant sa durée de vie.

CHAPITRE I :

**GENERALITES SUR LES BACS
DE STOCKAGE**

I : GENERALITE SUR LES RESERVOIRS :

I.1 Notions sur les réservoirs :

Un réservoir est un lieu aménagé pour y contenir un fluide dans le domaine des hydrocarbures les réservoirs sont destinés au stockage des bruts et des produits pétroliers; Fonctionnellement dans le domaine des hydrocarbures on peut distinguer trois types de réservoirs:

- Ceux dévolues au stockage du pétrole brut
- Ceux réservés au stockage des produits finis
- Enfin les réservoirs intermédiaires de travail qui sont utilisés comme capacité tampon.

L'exploitation pose de nombreux problèmes tels que la réduction des pertes par évaporation des produits volatils ou le réchauffage des produits noirs pour maintenir leur fluidité.

I.2 Classification des réservoirs :

Les réservoirs peuvent être classés suivant les différents critères :

- En fonction de la matière utilisée :

- ✓ En béton armé :

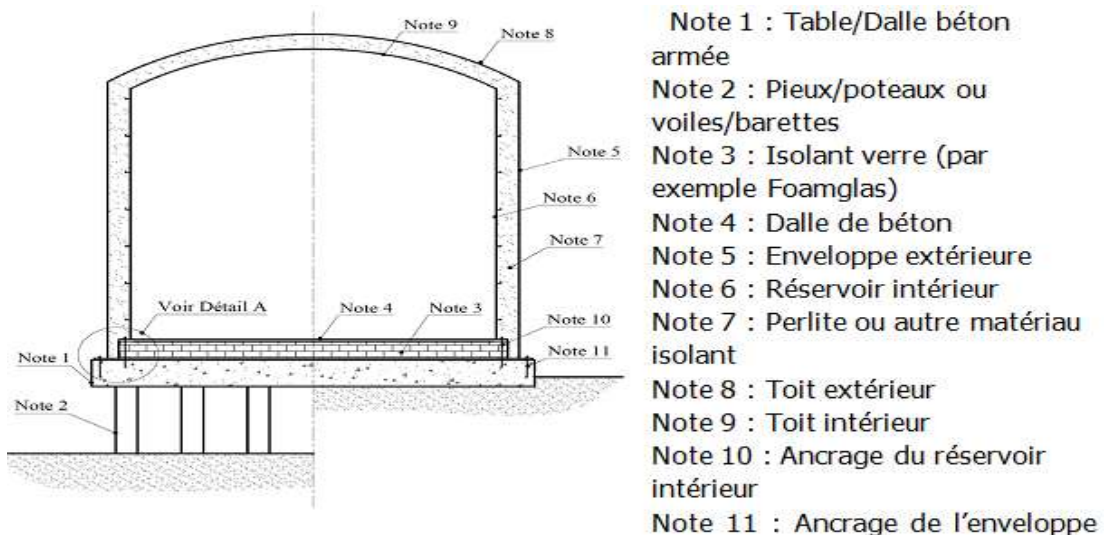


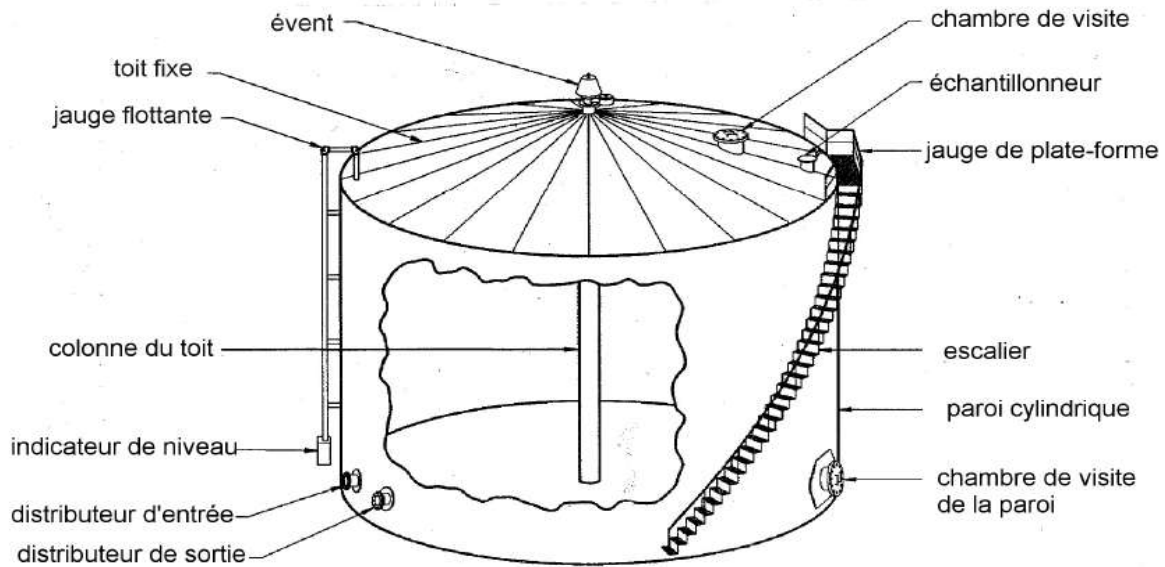
Figure XXII-1: réservoir béton armé.

- ✓ En matières souple ;
- ✓ Les réservoirs en acier ;
- ✓ Selon la position par rapport au niveau du sol on distingue ;

- ✓ Réservoirs aériens ;
- ✓ Réservoirs Semi enterrés ;
- ✓ Les réservoirs souterrains.

• Selon leurs modes d'exploitation, on distingue:

- ✓ **Réservoirs à toit fixes :**



FigureI-2 Réservoir à toit fixe.

- ✓ **Réservoirs à toit mobiles :**

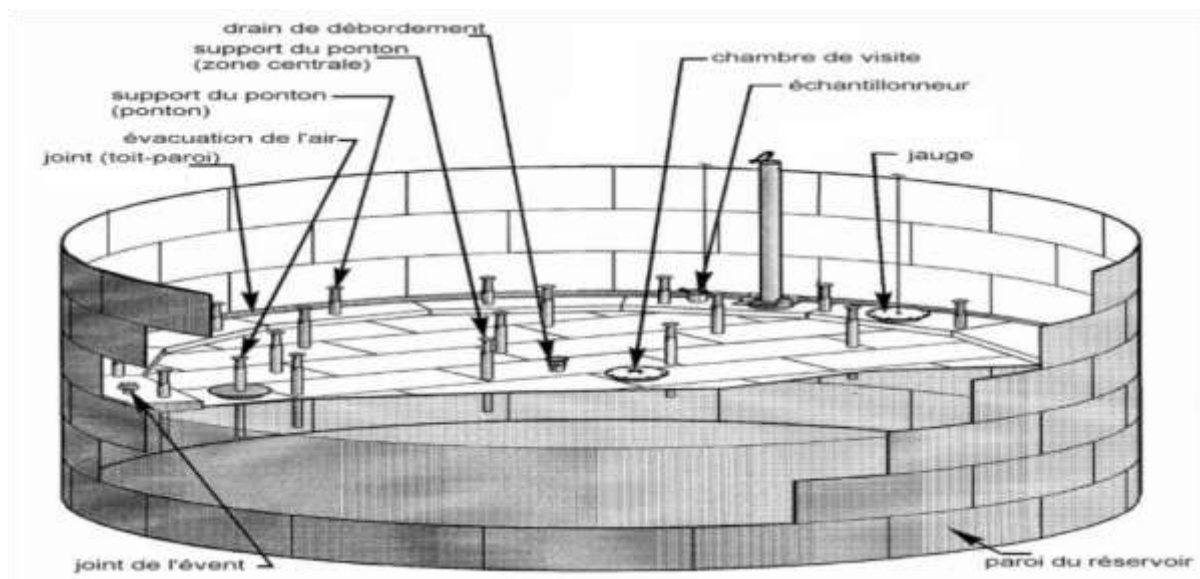


Figure XXIII-3 Réservoirs à toit mobiles.

✓ Réservoirs semi fixes.

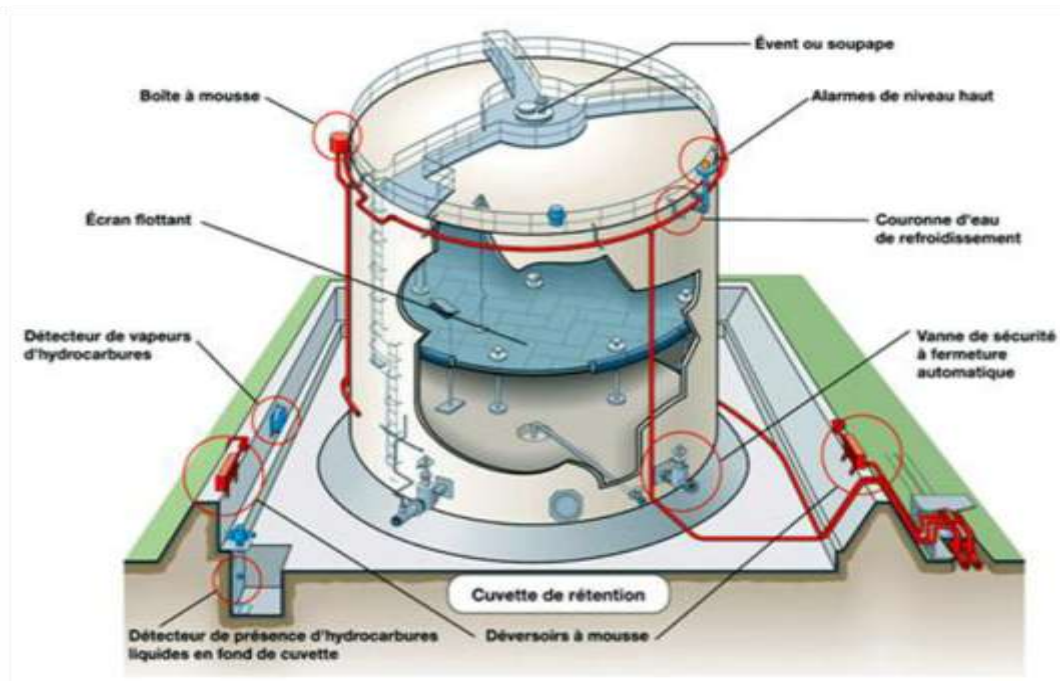


Figure XXIV-4 Réservoirs semi fixes.

- Selon la forme des réservoirs on distingue:
- ✓ Les réservoirs cylindriques :



Figure XXV-5 : Réservoirs cylindriques.

✓ **Les réservoirs sphériques :**

Figure XXVI-6 : Réservoirs sphériques.

✓ **Les réservoirs cigares :****I.3 Accessoires de réservoir :**

Les accessoires qui équipent les réservoirs, classiques peuvent être classés comme suit :

- Les accessoires d'accès ;
- Les accessoires de mesurage ;
- Les accessoires d'entrée et de sortie du produit ;
- Les accessoires de sécurité ;
- Autres accessoires.

I.3.1 Accessoires d'accès :

Ils comprennent escaliers, passerelles, et la visite à l'intérieur du réservoir se fait par des trous d'homme, le trou d'homme placé sur le toit est le plus souvent à simple opercule, par contre à la base de la robe est à double opercule.

Le rôle de ces accessoires c'est de nous permettre de faire le nettoyage et l'élimination des boues, sédiments de la rouille et de l'eau qui peuvent s'accumuler au fond.¹

Il y a l'opération de dégazage qui peut se faire par exemple par adaptation sur le trou d'homme du toit un ventilateur aspirant à l'intérieur du réservoir après ouverture des trous d'homme de la base de la robe.

I.3.2 Accessoires de mesure :

Pour répondre au nécessité d'exploitation (bilan périodique suivi des opérations de remplissage et de vidange, facturation) et aux exigences de la douane, on utilise les accessoires destinés au mesurage de la hauteur du produit dans le réservoir.

L'appareil le plus simple est l'indicateur de niveau à flotteur, le flotteur suit le niveau du liquide.

Certains réservoirs ne disposent pas de dispositif de mesurage à flotteur, on utilise dans ce cas le jaugeage manuel pour cela on utilise un ruban imprégné d'une croix spéciale (change la couleur en contact avec le liquide).

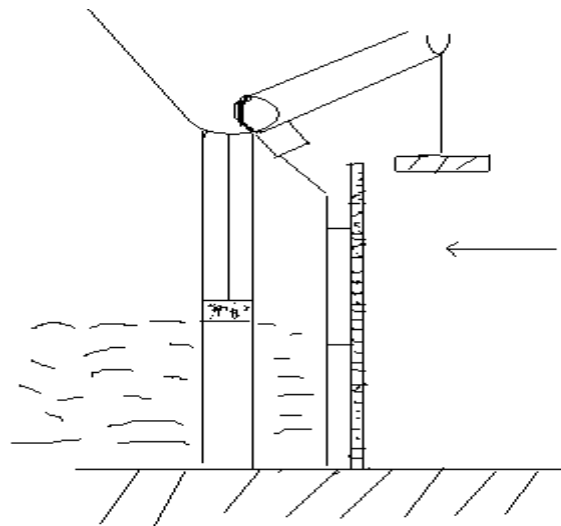


Figure XXVII-7 : jauge de niveau à flotteur .

I.3.3 Entrée et sortie du produit :

Ces accessoires comportent plusieurs tubulures d'entrée et de sortie des produits selon leur capacité, la tubulure d'entrée est généralement située à la base du réservoir à environ 0.5m du fond pour laisser un volume mort où les dépôts peuvent s'accumuler, ce sont des tubulures très résistantes fixées sur la paroi de réservoir, ces tubulures sont complétées par des robinets vannes à simple ou à double opercules.

Dans certains cas on place à l'intérieur du réservoir un clapet de retenue destiné à éviter les écoulements du produit en cas de rupture accidentelle de la vanne, le bag pas est destiné à égaliser les pressions s'exerçant sur le clapet afin de faciliter son ouverture.

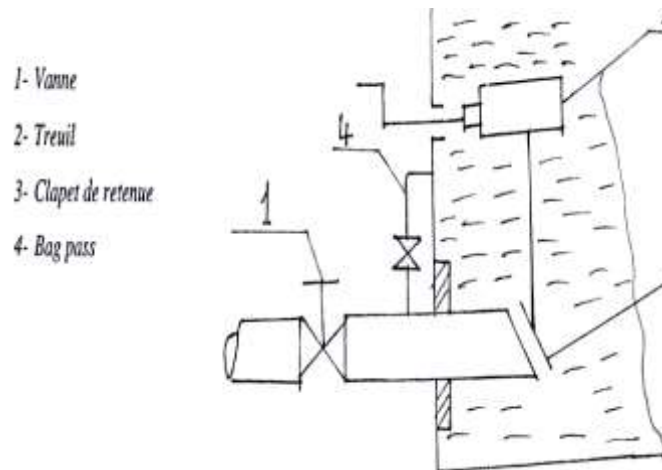


Figure XXVIII-8 : entrée et sortie du produit.

Les réservoirs sont également équipés de tubulures de purge destinées à évacuer l'eau de décantation.

I.3.4 Accessoires de sécurité :

Les variations de température ambiante et le remplissage des réservoirs peuvent provoquer une élévation de la pression de la phase gazeuse, si cette pression est trop importante, elle peut dépasser les limites de résistance de réservoir, de la même manière une chute de température peut provoquer la condensation de la vapeur et crée une dépression, l'opération du vidange crée également une dépression.

Pour protéger les réservoirs contre ces élévations de pression on utilise deux dispositifs:

- Les soupapes de sécurité, si le produit a une tension de vapeur élevée;
- Les évents (reniflards) pour les produits dont la TVR est faible ;

Si le débit de la soupape est suffisant, la pression de la phase gazeuse continue d'augmenter, il faut donc utiliser des dispositifs de sécurité complémentaires qui peuvent être ;

- Membrane de sécurité constituée par un disque mince qui se déchire ;
- Clapet d'explosion analogue à un opercule mobile de trous d'homme qui se soulève pour assurer l'échappement et se referme automatiquement dès que la pression est redevenue normale ;

- La tôle de déchirure qui est une tôle du toit dont l'assemblage aux tôles voisines est réalisée par cordons de soudure très faible de sorte qu'en cas de suppression c'est cette tôle qui se déchire ;

On installe aussi une arrête flammes pour lutter contre l'incendie.

I.4 Dimension et construction :

En prend un titre d'exemple le réservoir cylindrique constitués de:

- un fond généralement bombé (peut être plat) d'une robe ou viroles ;
- un toit fixe ou flottant ;
- De différents accessoires.

I.4.1 Fond de réservoirs :

Construit en plaques de tôles se recouvrant aux extrémités où elles sont soudées entre elles puis protégées par une peinture bitumineuse.

Pour permettre une vidange aussi complète que possible ainsi que des purges, il comporte une pente (environ 1 à 2 %) dirigé soit vers le centre (fond concave), soit vers les bords (fond convexe).

Le fond repose sur une galette de gravier enduit généralement (bitumes fluxés).

I.4.2 Robe de réservoir :

Elle est constituée par un empilage verticale de bandes de tôles soudés bout à bout de largeur 1,5 à 2.50 m et de longueur pouvant atteindre 10m.

L'épaisseur des tôles diminuent de bas en haut est calculée on supposant le bac plein d'eau puisque tous les bacs subissent une épreuve hydraulique après leur construction, un escalier fixé sur la virole permet d'accéder aux parties supérieurs du bac.

I.5 Stabilité des réservoirs :

I.5.1 Stabilité à La Pression :

On dit qu'un réservoir est stable à la pression lorsque, vide et soumis à la pression maximale admissible, l'étendue de son pont reste entièrement en contact avec la fondation (pas de soulèvement à la périphériques) la validation suivante doit être vérifié.

$PR + PT > SF \cdot PI$ Avec :

PR : Poids de la robe.

PT : Poids du toit.

SF : Surface du fond.

PI : Pression interne.

I.5.2 Stabilité à La Dépression :

Le fond du bac est dit stable à la dépression si à vide sous l'effet de la dépression maximale, il ne se soulève pas de la fondation (cas de d'écoulement) au centre.

Il faut donc que le poids /cm² de la tôle soit supérieur ou égal à la valeur de dépression.

I.6 Essais des réservoirs avant l'exploitation finale :

Les réservoirs d'hydrocarbures sont soumis aux essais suivants avant leur exploitation :

I.6.1 Essais d'étanchéité :

Il faut que le bac au moment de son remplissage ou au repos ne fuit pas ni par ses côtés (Robe) ni par le fond, ni par le toit

I.6.2 Essais au l'eau :

Avant de mettre des hydrocarbures dans le bac en procède à un essai dit essais à vide ou essais à l'eau, cette méthode nous mène à laisser le bac 72 heures de repos afin de déterminer les résultats de l'essai.

I.6.3 Essais à la dépression :

C'est la procédure la plus importante, elle nous montre le taux de dépression d'un bac et l'efficacité du toit flottant.

I.6.4 Essais aux hydrocarbures :

C'est la dernière opération avant de mettre le bac en exploitation finale.

I.7 LES TYPES DE COROSION DANS LES BACS DE STOCKAGE :

Les deux types de corrosion les plus rencontrés dans le fond d'un réservoir sont généraux et ponctuel. Quand 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 individuelle qui sont plus actives, entraînant une perte de métal concentrée dans des zones relativement petites, sans effet sur les zones considérables de la surface.

I.7.1 La corrosion externe :

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

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

Les causes de la corrosion externe des réservoirs peuvent être :

- Une mauvaise qualité de la couche supérieure de l'assis 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 aux niveaux 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'assis 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 marginale, particulièrement dans les parties où l'eau et les débris s'accumulent autour de la base du réservoir.
- Les restes de calamines sur les plaques.
- Des températures des produits stockés qui peuvent accroître la vitesse de corrosion

I.7.2 La corrosion interne :

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

La corrosion interne est due à :

- La respiration du réservoir en raison de différences de température et condensation de vapeur d'eau, entrée de pluie par le joint des toits flottants et la présence de l'eau dans le produit stocké ;
- La présence de substance corrosive dans le produit stocké ;
- mauvaise qualité des matériaux d'apport de soudure.

CONCLUSION :

Les dépôts de stockage. C'est une zone généralement de grande surface où se situe un ensemble des bacs de Stockage. Ils peuvent être de différente ou de même capacité. Ils sont bien sûr connectés à une canalisation d'entrée et une autre de sortie et éventuellement connectés entre eux.

CHAPITR II :

LA CORROSION

Introduction

La corrosion électrochimique est responsable de 97% des cas de corrosion industriels. Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu qui l'environne (ou les deux). Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal et si ce matériau se trouve dans un milieu électrolysable, il y aura formation de piles qui vont débiter dans la masse métallique car elles sont en court-circuit. Les zones anodiques se corrodent et disparaissent.

La corrosion métallique est une réaction irréversible qui se produit à l'interface métal/environnement corrosif, en présence d'un moteur de corrosion (O_2 , par exemple, est un moteur naturel). La corrosion est un problème majeur car elle détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde. Il faut noter que l'acier est élaboré à partir de minerais de fer et que les réserves sont en nette décroissance à cause de plusieurs facteurs dont la corrosion.

II. Généralités sur La corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état original d'oxydes, de sulfures, de carbonates, et ainsi, à subir une détérioration de leurs propriétés. C'est donc un processus de dégradation des métaux qui, à l'exception des métaux tels que l'or et le platine, ont toujours tendance à s'altérer au contact de l'atmosphère, des eaux et des divers milieux corrosifs.

II.1 Importance économique de la corrosion :

Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants :

- Pertes directes : remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés,
- Pertes indirectes : coûts des réparations et pertes de production (temps),
- Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

La diversité des coûts rend toute estimation des charges économiques dues à la corrosion difficile et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés.

II.2 Paramètres constitutifs des sols influençant la résistivité électrique :

Les facteurs influant sur la valeur de la résistivité électrique sont largement décrits dans la littérature. Nous le rappelons ici, en précisant que la conduction du courant électrique dans les sols est essentiellement électrolytique et fait intervenir le déplacement des ions en solution dans l'eau interstitielle. La conduction électrolytique est réalisée grâce aux connections interstitielles du sol dont la matrice est généralement considérée comme isolante ; les autres modes de conduction, Électronique ou les charges sont transitées par le déplacement des électrons libres dans les métaux et diélectrique faisant intervenir les courants de déplacement sous l'influence de champs de très haute fréquence.

II.2.1 Influence du pH :

Pour identifier les différents sols (en particulier les sulfatosols), le pH est le principal paramètre chimique qui sert à les définir. En effet, mesuré sur place et parfois enregistré par des sondes spécifiques, il est généralement voisin de la neutralité ou très légèrement acide entre 6 et 7. Mesuré sur échantillon séché à l'air, il peut diminuer à des valeurs inférieures à 4, voire 3,5. L'acidité qui se développe au cours du séchage des échantillons provient surtout de l'oxydation de la pyrite avec production d'acide sulfurique ; elle est appelée acidité potentielle et correspond à la différence « pH in situ – pH sec ». Le rôle du pH dans les phénomènes de corrosion est relativement bien connu à ce jour. Les travaux de référence en ce domaine sont ceux de Pourbaix. D'autres ont confirmé l'effet bénéfique d'un pH élevé sur la limitation de la dissolution anodique du fer dans l'eau (formation d'une couche protectrice de produits de corrosion). Par ailleurs, des conséquences néfastes sur les liaisons adhésives métal/revêtement ont été mises en évidence. L'une des raisons de l'élévation du pH du milieu aqueux au contact du métal est l'application de la protection cathodique à une canalisation directement en contact avec un électrolyte chargé en oxygène.

En milieu aéré, les courants générés par la PC réduisent l'oxygène et forment des anions OH^- selon la réaction suivante:



Le potentiel d'équilibre thermodynamique s'exprime par :

$$E^\circ = 1.228 - 0.058 \text{ pH} - 0.0295 \log P(\text{O}_2) \text{ [V/ENH] à } 25^\circ\text{C}$$

Cette augmentation de pH a été vérifiée expérimentalement et sur le terrain par de très nombreux auteurs sous des revêtements décollés, pour différents types d'acier et de solutions aérées. En solution désaérée le pH n'accuse pas d'augmentation et, malgré la PC, la seule réduction de l'eau à des pH neutres ne peut entraîner une alcalinisation importante.

De plus l'augmentation de pH joue un rôle très important dans les phénomènes de corrosion

en milieu sol, en effet, certains composés en solution peuvent précipiter avec l'augmentation de pH.

Caractéristiques du sol	Valeur du Ph	Taux de corrosion
	□ 4.5	
Milieu extrêmement acide	4.5-5.0	Très forte corrosion
Acide très fort	5.1-5.5	
Acide fort Acide moyenAcide faible	5.6-6.0	corrosion faible
Milieu neutre	6.1-6.5	
Alcalinité moyenneForte	6.6-7.3	
alcalinité Très forte alcalinité	7.4-7.8	corrosion très élevée
	8.5-9.0	
	9.1 et plus	

Tableau II-1 : Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols.

II.2.2 Humidité :

Sans constituer à vrai dire un facteur intrinsèque du sol, l'humidité est un facteur complémentaire, qui va jouer un rôle important sur les processus de corrosion, par son incidence sur la résistivité et sur l'aération.

Ce facteur dépend de la saison, endroit, type de sol, niveau d'eaux souterraines ; en présence de sols très humides autrement dit de sels très solubles, la corrosion se développe très fortement.

II.2.3Aération :

L'aération est une mesure de la présence de l'oxygène au contact du métal déclenchant le processus de corrosion. Les caractéristiques d'aération d'un sol dépendent principalement de la dimension des particules ; il est remarqué que la propagation de la corrosion diminue avec l'augmentation du taux d'aération.

II.2.4 Éléments chimiques présents dans le sol :

On distingue dans un sol des constituants solubles et des constituants insolubles. L'ensemble des anions et cations influenceront la force ionique de l'eau du sol et sa résistivité. Ils joueront dans l'eau du sol un rôle analogue à celui qu'on leur connaît dans les eaux salines.

Une attention particulière est portée aux chlorures et aux sulfates qui sont des éléments défavorables, leur effet néfastes apparaît respectivement pour des concentrations supérieures à 100 mg/kg et 200 mg/kg, tant par l'abaissement de résistivité qu'ils entraînent, que par leur rôle propre :

Action dépassivante des chlorures, intervention des sulfates dans les processus de corrosion bactérienne.

Actuellement on cherche à modéliser l'action de chacun des facteurs susceptibles de jouer un rôle et à juger ensuite de la corrosivité du sol d'après le résultat d'une formule empirique. Dans le but d'estimer la vitesse de corrosion d'acier enfouie dans le sol et de concevoir les méthodes de protection, la (National Institute of Standards and Technology) NIST a développé un modèle de type

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$$

Regroupant la résistivité du sol, la valeur du pH, l'humidité et l'aération.

Avec,

Y : vitesse de corrosion (mils (1.6 km)/an)

X₁ : Résistivité (ohm.cm)

X₂ : pH

X₃ : Humidité (%)

X₄ : Aération (%)

Après plusieurs itérations le modèle est donné comme suit :

$$y = 3.36 - 9.63 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 + 0.29 \cdot X_2 + 0.034 X_3 + 0.012 X_4$$

Ce modèle peut être appliqué pour différents sols.

II.3 Classification de la corrosion :

Selon la nature du milieu environnant avec lequel le matériau rentre en interaction, la corrosion peut être classée en trois grandes classes : chimique, bactérienne et électrochimique.

II.3.1 La corrosion chimique :

Un processus chimique se fait principalement sans échange d'électrons. Mais le plus souvent, les réactions chimiques font intervenir des échanges d'électrons, de ce fait il est très difficile de distinguer une corrosion chimique d'une corrosion électrochimique. L'attaque d'un métal par un autre métal fondu, et la corrosion de certains matériaux comme l'aluminium par des solutions organiques sont considérées comme des cas de corrosion chimique.

II.3.2 La corrosion bactérienne :

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en

créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de H₂SO₄ par certains types de bactéries).

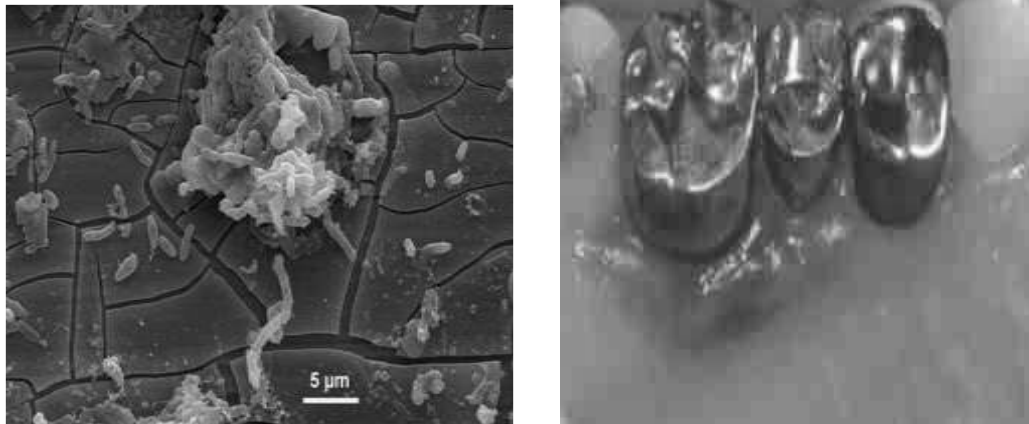


Figure IXXIX-1 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.

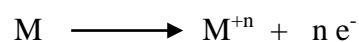
II.3.3 La corrosion électrochimique :

Le phénomène de corrosion est le plus souvent électrochimique car les matériaux sont au contact d'électrolyte ou d'humidité atmosphérique qui, par condensation, provoque la formation d'un film liquide suffisant pour agir comme solvant des agents corrosifs.

La corrosion d'un matériau métallique entraîne le passage partiel ou total de celui-ci sous forme d'ions. Deux réactions distinctes interviennent alors sur le métal qui constitue ainsi une électrode, l'une est anodique, l'autre est cathodique.

Les équilibres à l'interface métal-solution, au niveau de laquelle il se produit un transfert d'électrons entre le métal et la solution sont

- a) la réaction anodique ou réaction d'oxydation



- b) la réaction cathodique ou réaction de réduction

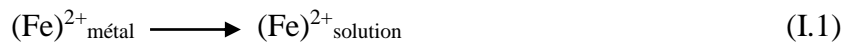


Ces réactions d'oxydo-réduction engendrent un courant anodique I_a correspondant à l'oxydation du métal, et un courant cathodique I_k correspondant à la réduction de l'espèce en solution. A l'état stationnaire, ces deux courants sont égaux en valeurs absolues $I_a = |I_k|$.

II.3.4 Corrosion électrochimique du fer :

L'état métallique n'est pas thermodynamiquement stable, dans des conditions naturelles d'utilisation, contrairement aux oxydes de fer Fe₂O₃ qui sont thermodynamiquement plus stables que le métal Fe. Le risque de corrosion est donc «

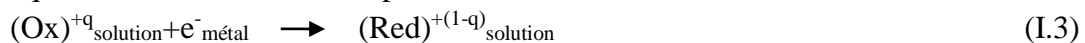
naturel ». Le processus de corrosion aqueuse est un processus électrochimique car il se traduit par une réaction à laquelle des espèces chimiques et des charges électriques prennent part. Il y est à la fois réaction chimique et transfert d'électrons. La corrosion électrochimique résulte de l'établissement de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction Cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes. Il se crée ainsi une différence de potentiel entre ces deux zones. La corrosion correspond à la formation, à partir de l'état métallique, d'ions passant en solution donc à une oxydation. Le plus souvent, un ion en solution est identique à celui existant dans la phase métallique:



A température ambiante, la corrosion des matériaux métalliques est exclusivement due à l'eau, même si d'autres facteurs peuvent intervenir. La réaction anodique correspond à la dissolution du fer.



La réaction (I.2) est nécessairement couplée avec une réaction de réduction dite réaction cathodique, éliminant les électrons produits:

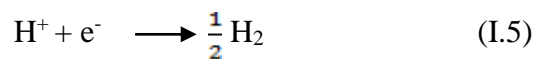


Les oxydants les plus communs sont :

-la d'eau selon la réaction



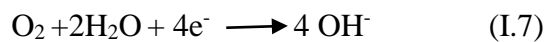
-les ions H⁺ par



-l'oxygéné dissous par



Ou par



-la valence supérieure d'un ion à valences multiples, par exemple :



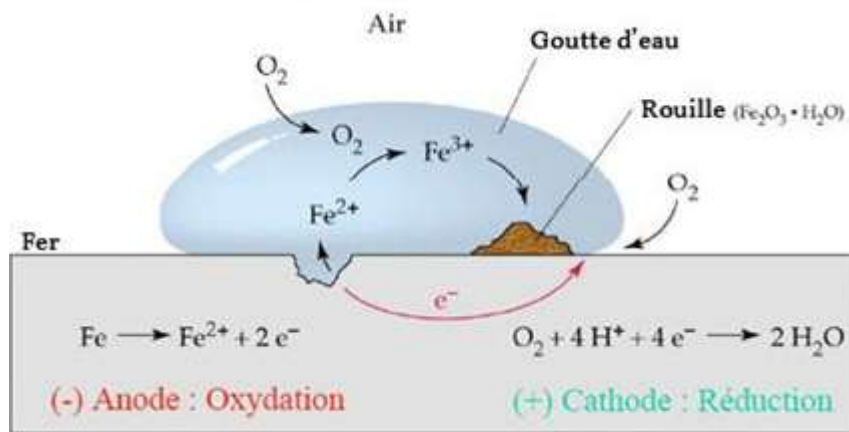


Figure IXXX-2 : Processus de la corrosion de l'acier.

Le processus électrochimique peut s'écrire sous la forme suivante :

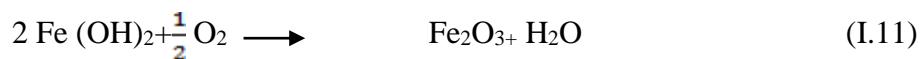


Les produits de réactions anodiques et cathodiques peuvent parfois réagir:

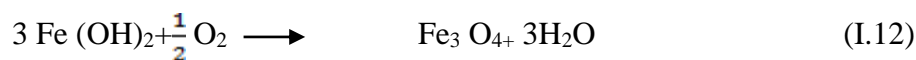


On obtient ainsi un hydroxyde qui recouvre la surface métallique et la protège (réaction de passivation). D'autres anions que OH⁻ comme Cl⁻, SO²⁻⁴ peuvent réagir et participer à la formation de la couche qui recouvre le métal.

Les réactions (I.6) et (I.10) réagissent selon les équations suivantes

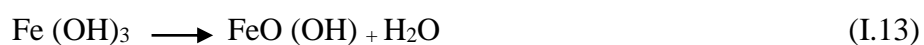


Donnant un composé rouillé rouge-brun, l'hématite :



Donnant un composé noir, la magnétite.

Si le taux d'oxygène est élevé et le pH > 6, alors Fe(OH)₂ précipite et est rapidement oxydé et hydrolysé en Fe(OH)₃. A long terme, Fe(OH)₃ peut se transformer en goethite par perte d'eau.



Les réactions (I.2) et (I.4) sont caractéristiques du couple Métal / Solution. Lorsque le conducteur électronique (Fe) est en contact avec un conducteur ionique par exemple électrolyte H₂O il constitue une électrode. Les ions superficiels Fe²⁺ tendent à passer dans l'eau en abandonnant dans le métal Fe deux charges négatives. Les charges négatives ainsi créées à la surface du métal Fe maintiennent les ions à courte distance et il se forme ainsi une couche d'ions positifs parallèle à la surface du métal. L'interface entre les deux phases représente pour chacune une très forte perturbation dans la distribution locale de leurs charges électriques, dont la densité moyenne locale est normalement nulle. Il s'établit ainsi de part et d'autre de l'interface des charges d'espace non nulles, électronique du côté du métal et ionique du côté de la solution. En première approximation. La répartition de ces densités de charge électriques de signe opposé peut être considérée comme située dans deux plans parallèles correspondant à un condensateur électrique (double couche helmholtz).

II.3.5 Double couche électrique :

Les réactions électrochimiques décrites ci-dessus ont lieu à l'interface métal/solution constituée de ce qu'on appelle « double couche » et dont l'épaisseur est de l'ordre de 10 nm. L'immersion du métal dans une solution aqueuse perturbe localement les arrangements des molécules et des ions modifiant la répartition des charges électriques dans l'espace de la double couche. Pour respecter la neutralité électrique, les charges qui apparaissent dans le liquide de l'interface doivent être neutralisées par des charges électriques superficielles égales et opposées sur la surface du métal. Comme le montre (figure I.2), la double couche est constituée de trois zones :

- La zone compacte de Stern, d'épaisseur de quelques dixièmes de nanomètres, dans laquelle on trouve des molécules d'eau et des espèces principalement des anions plutôt de petit diamètre comme les chlorures.
- La zone de Helmholtz, dans laquelle on trouve des ions solvatés.
- La zone diffuse de Gouy-Chapman, dont l'épaisseur dépend de la force ionique de la solution. Pour que les réactions électrochimiques aient lieu, il faut que les ions à réduire Xⁿ⁻ puissent accéder à la surface du métal et les cations Mⁿ⁺ puissent diffuser dans la solution. Cependant, plusieurs phénomènes tendent à freiner les mouvements des ions dans la solution, (par exemple une résistance) la diffusion de l'oxygène, ou à ralentir l'oxydation sur l'anode, ou la réduction sur la cathode, parce que la surface du métal a évolué pour de multiples raisons, par exemple le dépôt des produits de corrosion ou d'un inhibiteur.

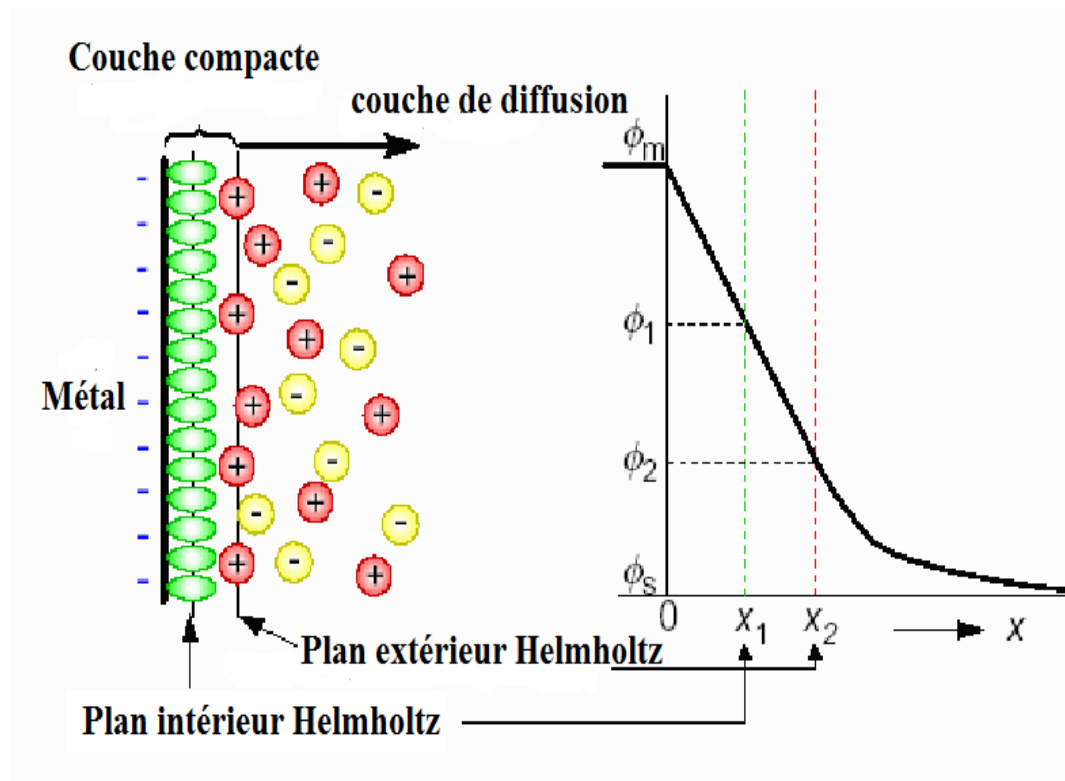


Figure IXXXI-3 : Interface métal- solution. La double couche.

II.4 Aspect morphologique de la corrosion :

La première approche de la corrosion étant généralement visuelle, la corrosion peut être divisée, d'un point de vue aspect morphologique, en deux grandes classes : corrosion généralisée et corrosion localisée appelée encore corrosion « zonale ».

II.4.1 Corrosion généralisée :

La corrosion généralisée ou uniforme est une corrosion progressant approximativement à la même vitesse sur la totalité de la surface d'un métal donné en contact avec un milieu environnant corrosif. C'est la forme de corrosion la plus simple.



Figure IXXXII-4 : Corrosion généralisée : exemple d'une porte et d'un véhicule corrodés.

II.4.2 Corrosion localisée (zonale) :

Ce mode de corrosion est le mode le plus fréquent et le plus ennuyeux car il vise uniquement certaines zones bien distinguées du matériau, on distingue plusieurs types, à savoir :

II.4.3 La corrosion galvanique (bimétallique) :

La corrosion galvanique ou bimétallique peut se définir simplement par l'effet résultant du contact de deux métaux ou alliages différents dans un environnement corrosif conducteur. Ce contact conduit à la formation d'une pile électrochimique entre les deux métaux ou alliages. Le métal le moins résistant, moins noble, se dégrade et sa dégradation s'intensifie avec le temps.

Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.

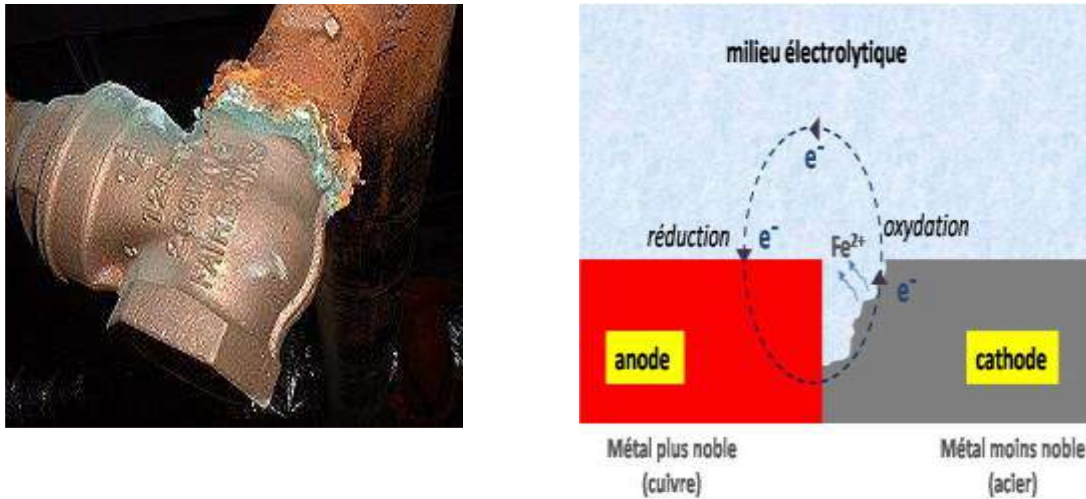


Figure IXXXIII-5 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.

II.4.4 La corrosion caverneuse (par crevasse) :

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution électrolytique stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets. Le sable, la poussière, le tartre, les produits de corrosion sont autant de corps solides susceptibles de créer des zones dans lesquelles le liquide n'est que difficilement renouvelé.

Ce phénomène concerne tous les matériaux. C'est aussi le cas des joints en matériau souple, poreux ou fibreux (bois, plastique, caoutchouc, ciment, amiante, tissus, etc.).

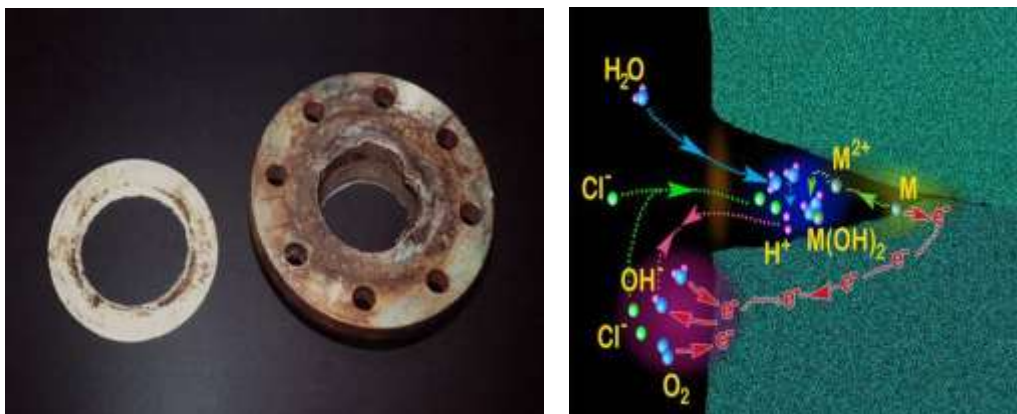


Figure IXXXIV-6 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.

II.4.5 La corrosion par piqûres :

C'est une forme de corrosion qui se produit par certains anions, notamment les ions chlorures, sur les métaux dit « passivables » (aluminium, chrome, cobalt, cuivre, acier inoxydable, acier dans le béton, etc.) qui sont protégés par un film d'oxyde passif.

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse, l'attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse.

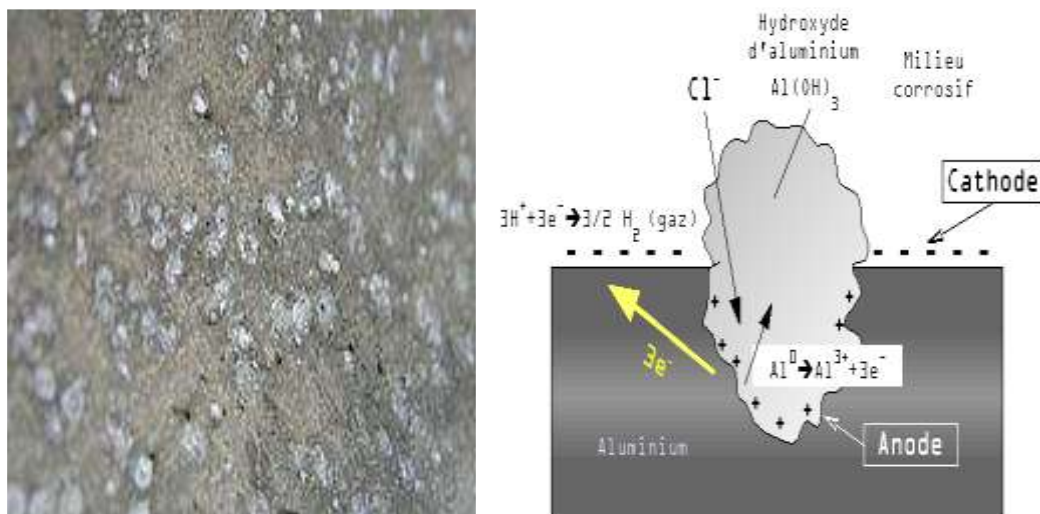


Figure IXXXV-7 : Corrosion par piqûre de l'aluminium.

II.4.6 La corrosion inter granulaire :

La corrosion inter granulaire est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion est due soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants ou bien à la précipitation des phases et combinaisons chimiques lors d'un traitement thermique (martensite, nitrures, carbures, etc.).

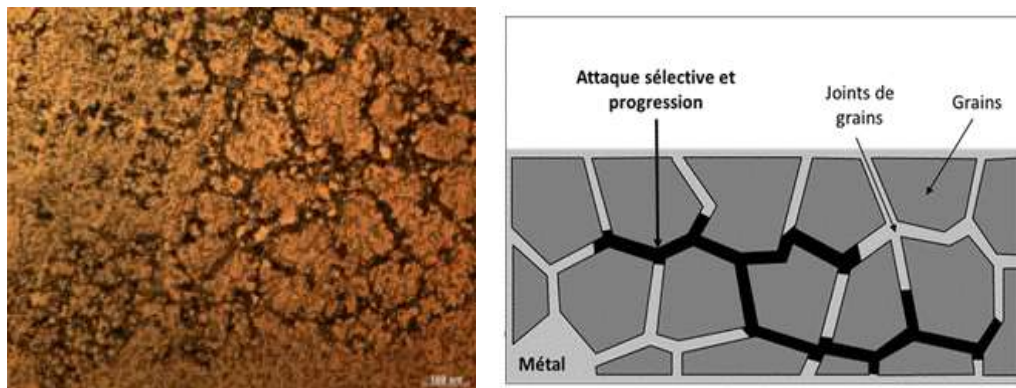


Figure IXXXVI-8 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.

II.4.7 La corrosion sélective :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé, conduisant ainsi à la formation d'une structure métallique poreuse. La dézincification (dissolution sélective du zinc) dans un laiton est l'exemple le plus connu.

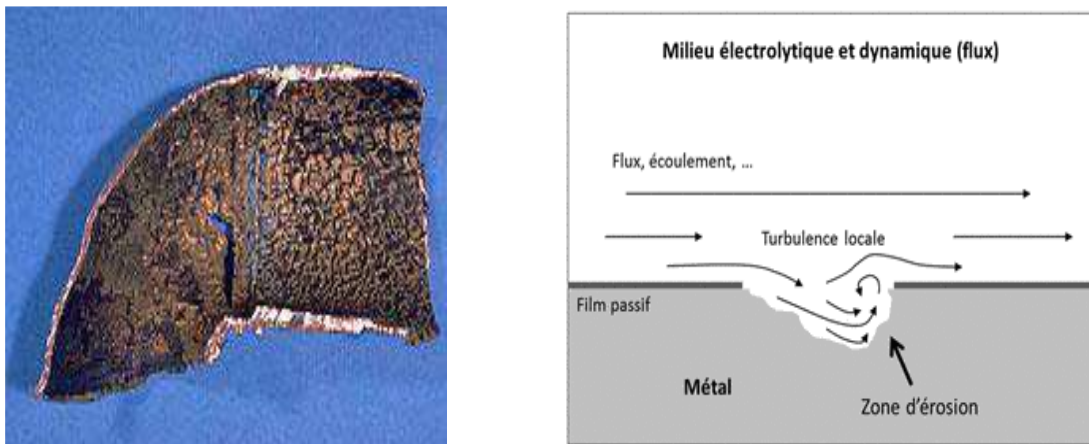


Figure IXXXVII-9 : Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.

II.4.8 Corrosion frottement (tribocorrosion) :

La corrosion-frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression.

En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion.

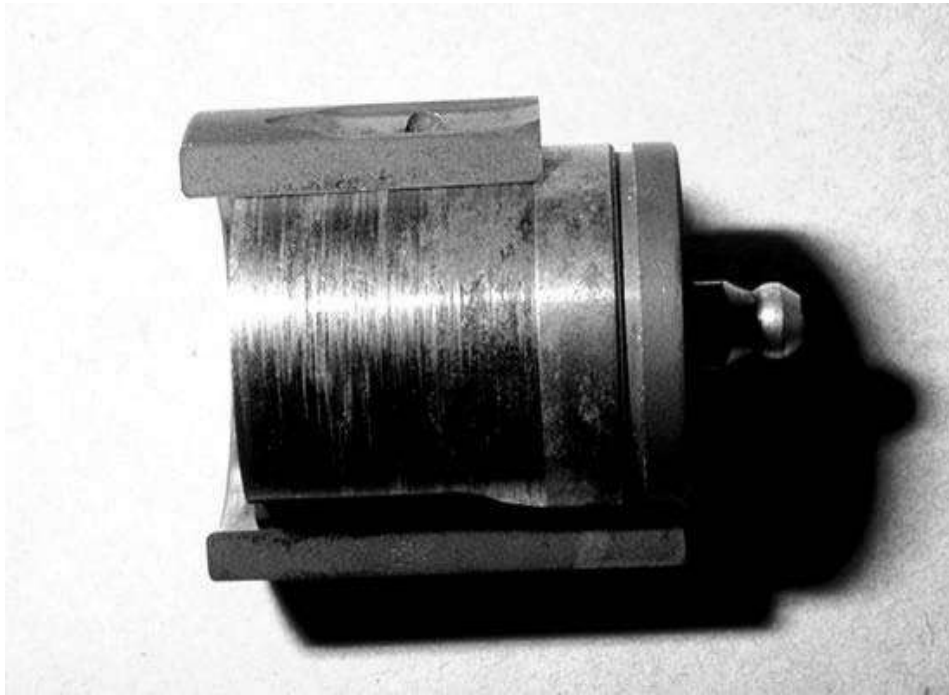


Figure IXXXVIII-10 : La tribocorrosion .

II.4.9 La corrosion sous contrainte :

Ce type de corrosion correspond à une fissuration du métal qui résulte d'une action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. Elle se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif.

Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion, qui sont dangereuses. Les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice.

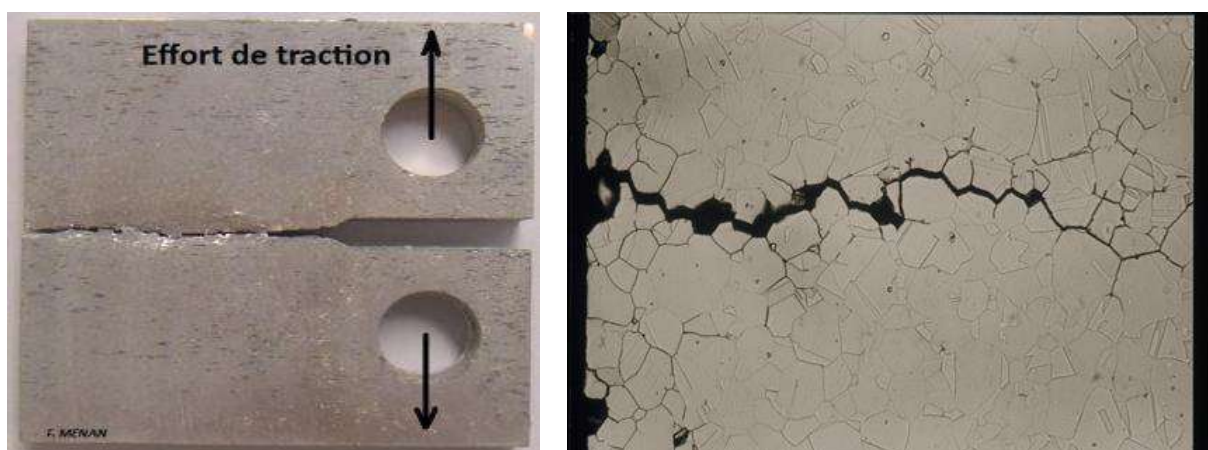


Figure IXXXIX-11: La corrosion sous contrainte.

Un autre phénomène très comparable à la corrosion sous contrainte, il s'agit de la fatigue-corrosion. La différence étant que la sollicitation est alors cyclique

(ex : les roues des trains en service). La rupture peut intervenir même si la contrainte appliquée est très inférieure à la résistance mécanique attendue pour l'acier.

II.4.10 Fragilisation par hydrogène :

La présence d'hydrogène dans un réseau métallique génère de très fortes pressions à l'intérieur du métal pouvant aboutir à une rupture différée. Ces atomes d'hydrogène ont pour origine : l'atmosphère environnante, les procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique.

II.4.11 Corrosion par les courants vagabonds :

Dans les sols, on a souvent affaire à des courants vagabonds. Tout écoulement de courant continu dans le sol, ligne de traction avec retour par les rails (tramways, métro), usines électrochimiques comportant des cuves à électrolyse, etc...., peut alors être cause de corrosion importante.

En effet, ces courants empruntent dans le sol des chemins de moindre résistance électrique, canalisations par exemple, créant sur un même matériau des zones à des potentiels électrochimiques différents. Les surfaces par où entrent les courants vagabonds sont plus électrochimiques que le sol. Ces courants apportent des électrons à l'interface métal/sol où il se produit une réduction; les surfaces par où sortent les courants sont devenues plus électrochimiques que le sol; à cet endroit une corrosion du métal se produira inévitablement. L'importance de la corrosion est directement proportionnelle aux intensités mises en jeu (la Loi de Faraday donne pour l'acier une consommation d'environ 10kg par ampère et par an). Or il n'est pas rare de voir transiter des courants de plusieurs dizaines d'ampères dans les conduites. Les pertes de métal se chiffrent alors en grammes par heure, et des percements de conduites peuvent alors se produire en quelques semaines.

On pourrait citer des cas où ce phénomène s'est produit avant même que la conduite ne soit en service et que les moyens de lutte contre la corrosion n'aient été mis en oeuvre.

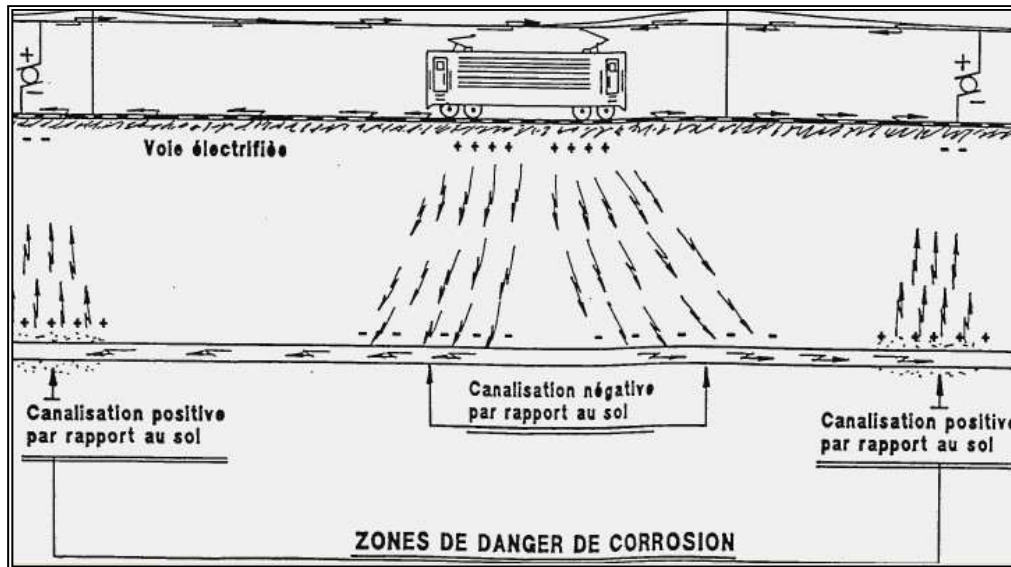


Figure IXL-12 : Corrosion par les courants vagabonds

II.5 Facteurs de la corrosion :

La corrosion peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil : corrosion généralisée ou uniforme, corrosion par piqûres, corrosion sous contraintes, etc. La prédominance d'une forme de corrosion dépendra d'un certain nombre de facteurs liés aux métaux, au milieu et aux conditions d'emploi.

II.5.1 Facteurs liés au milieu :

- Concentration du réactif oxydant ;
- teneur en oxygène et autre gaz dissous ;
- résistivité du milieu ;
- température, pression ;
- présence de bactéries ;
- vitesse d'écoulement .

II.5.2 Facteur lié au métal :

- homogénéité du métal ;
- impureté dans le métal ;
- nombre de coordination ;

-
- noblesse du métal ;
 - tendance à la passivation ;
 - contrainte résiduelle internes ;
 - nature du produit de corrosion.

II.5.3 Facteurs liés aux conditions d'emploi :

- La température d'utilisation ;
- les contraintes mécaniques ;
- l'état de surface ;
- le mode d'assemblage ;
- le contact avec d'autres métaux.

II.5.4 Facteur lié au temps :

- Fatigue ;
- modification des dépôts protecteurs ;
- dégradation des revêtements protecteurs.

II.6 Lutte contre corrosion par l'oxygène (corrosion interne) :

Selon le volume d'eau à transporter et la longueur des tuyauteries, on aura recours à l'une des solutions suivantes :

II.6.1 Solution métallurgique :

On choisira un matériau résistant : titane, cupro-nickel, aciers inoxydables (sauf dans les zones mortes, particulièrement si la température est supérieure à 30°C). On utilise parfois des revêtements internes du type époxy, avec des résultats variables selon les techniques d'application et l'état de surface du métal.

II.6.2 Solution physique :

Elles consistent à éliminer l'oxygène par un procédé physique de désaération (par le vide ou par balayage à l'aide d'un gaz inerte). Ce procédé ne permettant pas l'élimination totale d'oxygène, et la teneur résiduelle en oxygène va de 50 à 200 ppb selon les cas. Il faut donc impérativement compléter la désaération par l'injection de produit chimique.

II.6.3 Solution chimique :

Elle consiste à réduire l'oxygène par l'injection de sulfite ou d'hydrazine. Le paramètre important est alors la vitesse de réaction du produit injecté, qui nécessite l'addition d'un catalyseur (le plus souvent un sel de cobalt).

Corrosion par les gaz carbonique :

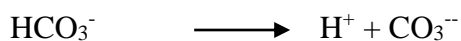
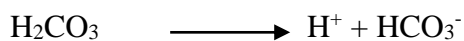
La corrosion par les gaz carboniques affecte surtout les puits à gaz et à huiles à fort et dans une moindre mesure, les installations de surface.

Cause :

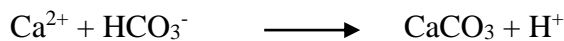
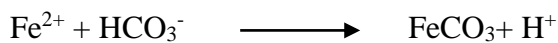
Les gaz carbonique CO_2 dessous forme de 14 acides carboniques:



Qui est un acide faible



La présence des gaz carbonique conduit donc à un abaissement du pH, avec, dans certaines condition, formation de couches de carbonate:



Formes de la corrosion par CO_2 :

La morphologie des attaques par CO_2 est souvent reconnaissable par les bords d'attaque dont les angles sont vifs ou même coupant. Et les lieux préférentiels d'attaque sont les suivants:

Dans les tubings, en particulier à quelque mm des joints lorsque ceux-ci ne sont parfaitement lisses : on remarque l'effet de turbulences localisées.

Dans les lignes de surface sur les génératrices inférieures des conduits horizontaux. Dans les lignes de gaz aux points de condensations d'eau.

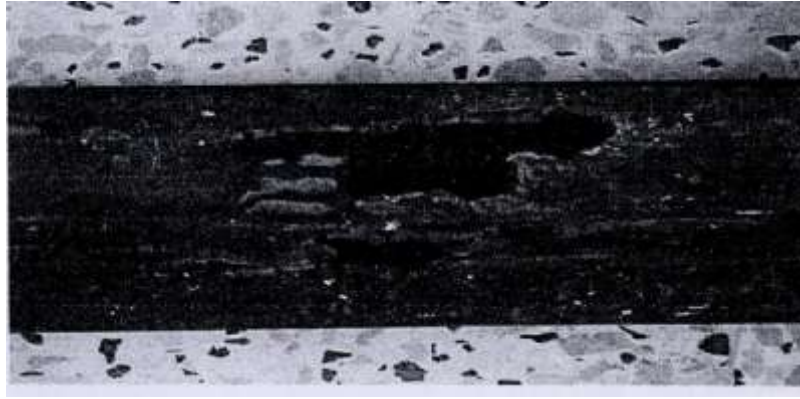


Figure IXLI-13 : corrosion par le gaz carbonique.

Vitesse de corrosion en présence de CO_2 :

La corrosion de l'acier en présence de CO_2 continue à faire l'objet de nombreuses études.

Les principaux paramètres sont les suivantes:

Influence de la teneur en CO_2 du gaz :

La vitesse de corrosion dépend de la teneur en CO_2 et plus précisément de la pression partielle P_{CO_2} .

$$P_{\text{CO}_2} = P_{\text{total}} \times \% \text{ molaire de } \text{CO}_2$$

La relation entre la vitesse de corrosion et la pression partielle n'est pas directe. Il existe un bon nombre de travaux permettant d'estimer la vitesse de corrosion de l'acier parmi ceux-ci

La règle "A.P.I" selon laquelle :

Si $P_{\text{CO}_2} < 0,5$ bar : pas de corrosion.

Si $0,5 < P_{\text{CO}_2} < 2$ bars : corrosion possible.

Si $P_{\text{CO}_2} > 2$ bars corrosion rapide.

La température de l'effluent :

La vitesse de corrosion augmente généralement avec la température, avec un maximum compris entre 60 et 100°C.

La composition de l'eau dans l'effluent :

La vitesse de corrosion de l'acier en présence de CO_2 dépend fortement de la composition de l'eau, que cette eau provienne de la formation ou de la condensation du gaz.

En effet, un phénomène essentiel dans le processus de corrosion par CO_2 est la capacité du milieu à engendrer un film protecteur de carbonate de fer, FeCO_3 . Ainsi, une forte teneur en Fe^{2+} a telle conduit à une diminution de la vitesse de corrosion de l'acier. De même, une

augmentation de pH, outre son effet favorable direct, agit indirectement en favorisant la stabilité des couches protectrices FeCO_3 .

La vitesse de fluide :

L'influence des turbulences sur la stabilité des couches de carbonates, et donc sur la vitesse de corrosion est très forte. L'API définit une vitesse critique au de laquelle les couches protectrices sont détruites dans les conditions habituelles de production des fluides pétrolières.

$$V = p K$$

Où:

V - est la vitesse de corrosion en m/s,

p - la densité du fluide en Kg/l

K = 3.85 (service continu) ou 4.6 (service intermittent).

Au-delà cette vitesse critique, la vitesse de corrosion augmente rapidement avec la vitesse de fluide (contrôle par le transport de masse) selon une loi de type.

$$C_{\text{Corrosion}} = K'(V_{\text{fluide}})$$

En pratique on s'efforce dans la mesure du possible, de maintenir la vitesse de circulation des gaz inférieurs à 6m/s. on tiendra compte également des recommandations de l'API, selon lesquelles l'inhibition de la corrosion par les gaz acides devient très difficile lorsque la vitesse de gaz dépasse 11m/s.

II.6.4 Lutte contre la corrosion par CO_2 :

La méthode la plus répandue de lutte contre la corrosion par CO_2 est l'inhibition, soit de la phase gazeuse, soit de la phase liquide.

Par ailleurs, il semble que des aciers, contenant des teneurs en chrome relativement basse (0.5 à 1.5%) résiste mieux que des aciers aux carbones normaux.

Enfin on note que des nombreux tubings de puits ou de têtes de puits sont équipés en acier à 13% de chrome, avec semble-t-il des résultats relativement satisfaisants.

Corrosion par H_2S :

Cause :

La présence de H_2S conduit à deux types d'attaques très différents :

A une corrosion généralisée (corrosion acide), car H_2S est un acide.

A une fragilisation du métal, car en présence de H_2S , une part d'hydrogène formé à la surface du métal du fait de la corrosion migre dans la paroi métallique. La recombinaison des atomes d'hydrogène peut alors provoquer des fissures ou des corrosions sous tension.

Influence de l'environnement :

Pour les aciers peu alliés, il est recommandé l'utilisation d'une métallurgie spéciale dès que la pression partielle de H_2S dépasse 0.05 psi (3.5 mbar). L'expérience montre que les problèmes liés à la présence de H_2S se rencontrent surtout en dessous de $60^\circ C$ et pour des pH inférieurs à 6.

Influence de la métallurgie :

La fragilisation ou la rupture différée par suite de la présence de H_2S n'affectent pas tous les aciers.

Il est recommandé d'utiliser des aciers à faible taux de manganèse (moins de 1%) et de soufre (moins de 0.005%)

II .6.4 Lutte contre la corrosion par H_2S :

La déshydratation ou l'inhibition du fluide à transporter permettent de protéger les installations contre la corrosion par H_2S , dans la mesure où la production d'hydrogène à la surface du métal est réduite ou éliminée.

Pour les installations nouvelles, on cherchera une solution métallurgique.

II.6.5 Protection cathodique :

Des études ont montré que la protection cathodique par potentiel imposé reste efficace même en présence de bactéries à condition que la surveillance soit régulière pour contrôler la bonne valeur du potentiel de la surface à protéger. Cependant, la présence d'un biofilm ou l'adhésion d'algues ou encore de coquillages, réduit l'efficacité des anodes galvaniques. C'est pourquoi, il est nécessaire de nettoyer plus souvent les anodes servant dans des zones portuaires, car la pollution y est plus importante que dans les zones maritimes ouvertes. Par précaution, pour éviter le risque de fragilisation des aciers en présence d'hydrogène sulfuré, une norme française EN 12473 recommande d'appliquer un potentiel de protection (-950 mV/ECS) inférieur à celui préconisé classiquement (-850 mV/ECS).

II.6.7 Les systèmes de peinture :

Un système de peintures est composé de plusieurs couches de peintures de compositions chimiques identiques ou différentes compatibles entre-elles. Chaque couche a une fonction bien déterminée dans le système. On trouvera :

- une couche primaire ;
- une ou plusieurs couches intermédiaires ;
- une ou plusieurs couches de finition.

II.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 la détérioration ou la rupture soudaine de tubulure, réservoirs, pièces métalliques de machines, coques de navires, structures marines ;
- ✓ La sécurité : c'est à propos des risques liés aux incidents causés par des appareils sous pression, réservoirs métalliques, produits radioactifs, conduite de transport... ;
- ✓ Raison écologique : Telles que la pollution de l'environnement, le gaspillage de l'eau et de l'énergie inutile à la transformation des matières premières en structure métallique.

CONCLUSION :

La corrosion fait partie 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 agressives jouent un rôle important dans l'amorçage de la corrosion.

Néanmoins, plusieurs études ont été conduites par spécialistes, et pas mal de méthodes de protection ont été inventées pour remédier ce problème et lutter contre ses effets catastrophiques.

CHAPITRE III :

**LUTTE CONTRE
CORROSION**

INTRODUCTION :

La lutte contre la corrosion est la lutte pour la productivité et la qualité des produits. La collaboration entre la science et l'industrie dans le domaine d'anticorrosion contribue à l'augmentation de la productivité. Pour cela, la lutte contre la corrosion exige la réalisation simultanée de la recherche fondamentale; de la recherche appliquée, de l'application de succès scientifiques à l'industrie.

La corrosion étant le résultat de l'action entre deux partenaires le métal ou l'alliage d'une part la solution, d'autre part

il sera possible de lutter contre ses effets en agissant sur l'un ou l'autre des deux partenaires en ce qui concerne la solution, il est dans la plupart du temps impossible de modifier sa nature, seule l'addition de faibles quantités d'un corps appelé inhibiteur de corrosion pourra être faite.

Il est en général plus facile d'agir sur la nature du métal, par exemple en utilisant un métal noble ou un alliage inerte chimiquement ou passif dans le milieu considéré.

Cependant, dans les problèmes de protection contre la corrosion, le facteur économique ne peut être ignoré. L'utilisation de métaux nobles ou d'alliages constitue toujours une solution onéreuse.

Une première méthode de protection souvent utilisée à construire les installations en alliage à bas prix et à les recouvrir d'un revêtement mince qui isole du réactif corrosif. Les métaux et alliages susceptibles de se passiver ont maintenant un très grand nombre d'application aussi bien dans l'industrie que pour les usages domestiques.

La seconde méthode, consiste à modifier le processus électrochimique de corrosion en portant le métal à protéger à un potentiel pour lequel l'intensité du courant anodique est très faible ou nulle. C'est la protection électrochimique.

La lutte contre la corrosion qui est un phénomène dépendant de très nombreux facteurs, consiste:

- À rechercher les alliages résistants à la corrosion dans les conditions de leur utilisation dans l'industrie.
- À la supprimer le contact milieu extérieur métal en recouvrant ce dernier d'une couche protectrice d'origine métallique ou non métallique.

On doit tenir compte aussi du travail mécanique qui lui destiné et de son assemblage éventuel avec d'autres de natures différentes.

III.1 Histoire de la protection cathodique (PC) :

La protection cathodique a été appliquée pour la première fois en 1824, lorsque Humphry Davy a protégé les coques de cuivre contre la corrosion marine par des anodes en fer, dans un projet financé par la marine Britannique. En effet, la PC est efficace pour la protection des navires qui a été décrite dès 1950 par la marine canadienne. La première utilisation de la protection cathodique par courant imposé pour protéger les structures souterraines, a été réalisée en Angleterre et aux Etats-Unis entre 1910-1912. Actuellement, la protection cathodique est largement utilisée dans divers domaines tels que les pipelines enterrés, les condenseurs, les réservoirs d'eaux, les équipements chimiques.

III.2 Lutte contre la corrosion des sols :

On se limitera, dans les paragraphes suivants, à évoquer la protection électrochimique (anodique et cathodique), la protection cathodique, la protection cathodique par courant imposé et par anodes sacrificielles et la protection anodique.

III.3 Protection électrochimique :

III.3.1 Protection anodique :

La protection anodique est surtout utilisée dans la protection des métaux passivables tels que Ti, Cr, FeCr, FeCrNi. Dans le principe, cela consiste à déplacer le potentiel du métal, dans le domaine correspondant à sa zone de passivation, par une polarisation en direction anodique. De ce fait, une couche d'oxyde plus ou moins conductrice protège la surface de la corrosion. Ce mode de protection est utilisé pour les réservoirs métalliques destinés au stockage des acides.

III.3.2 Protection cathodique :

Elle consiste à ramener le potentiel du métal dans la zone correspondant à son domaine d'immunité. Autrement dit, on applique une polarisation en direction cathodique. Elle peut être réalisée par deux méthodes soit par anode sacrificielle ou bien par courant imposé. On reviendra en détail sur ces deux techniques de protection.

Chaque structure à protéger possède un système spécifique de protection cathodique soit par anode sacrificielle ou bien par courant imposé. Le choix est défini sur la base des critères suivants :

L'environnement de la structure ; le potentiel de la conduite ; la géométrie de l'anode et de la cathode ; l'espacement entre l'anode et la cathode ; la conductivité de l'électrolyte.

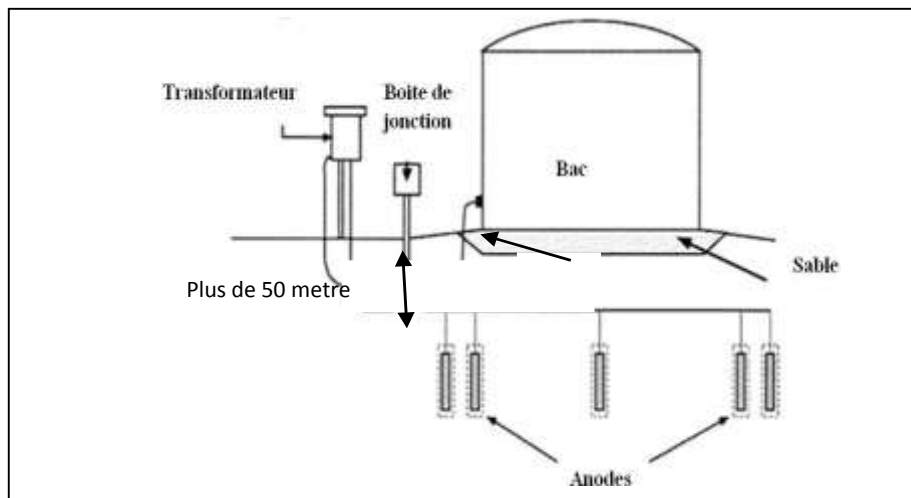


Figure III-1 : Anodes installées horizontalement.

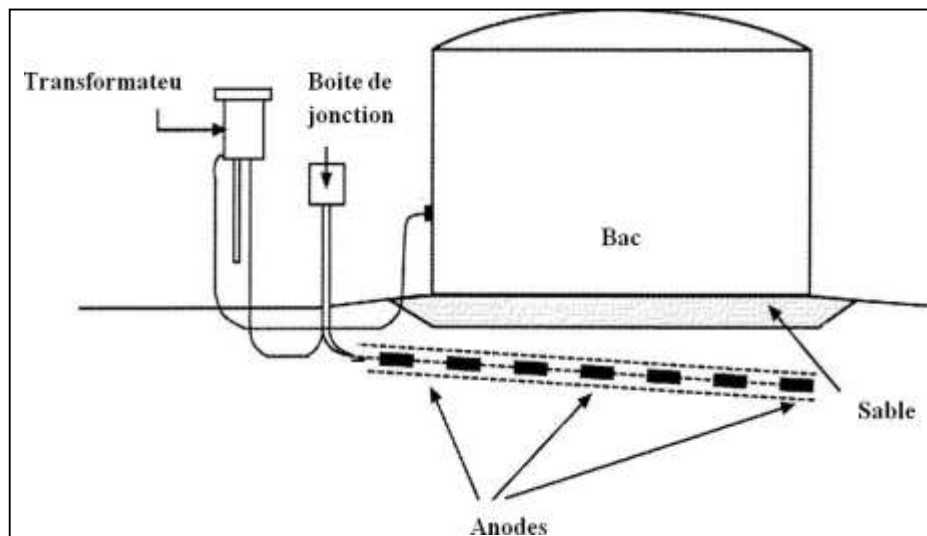


Figure III-2 : Anodes installées verticalement.

III.4 Protection par anodes sacrificielles :

III.4.1 Principe de la protection :

Le principe de cette méthode de protection consiste en l'association deux métaux qui présentent des valeurs de potentiel différentes où l'un est plus noble que l'autre, plongés dans un milieu conducteur (eau ou sol). Les deux métaux sont reliés par un conducteur électrique. Le métal le moins noble appelé anode réactive ou bien sacrificielle va se corroder, l'autre est la structure est protégée, en créant un système galvanique. Al et le Zn sont utilisés pour protéger l'acier dans l'eau de mer, et le Mg est utilisé dans les sols et l'eau douce.

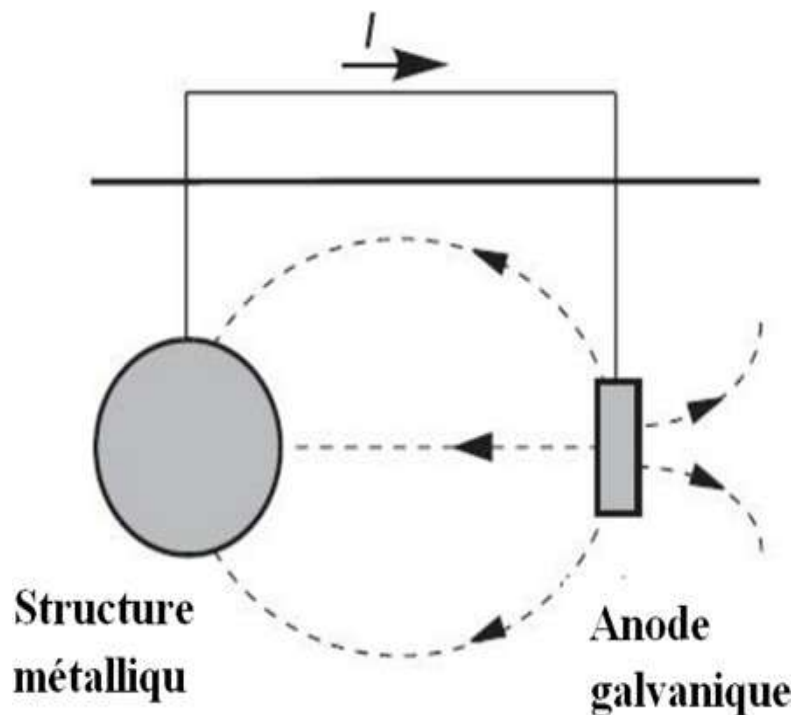


Figure III-3 : Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.

III.4.2 Choix des anodes sacrificielles :

- Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :
- un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à protéger ;
- ne doit pas se polariser lors du passage du courant ;
- se corrode de manière uniforme dans le milieu considéré ;
- une bonne conductibilité électrique et une bonne résistance mécanique ;
- un coût économiquement supportable.

Dans la pratique, trois matériaux satisfont à ces critères. Il s'agit du zinc, de l'aluminium, et le magnésium. De nombreux alliages à base de ces matériaux sont largement utilisés comme anodes sacrificielles.

III.5 Protection cathodique par courant imposé :

III.5.1 Principe de la Protection cathodique par courant imposé :

Il s'agit essentiellement de fixer un potentiel de protection cathodique pour lequel le métal se trouve dans sa zone d'immunité. Pour ce faire, on impose un courant continu à l'aide d'un générateur dont le pôle négatif est relié à la structure à protéger (la cathode) et le pôle positif est relié à l'anode. On utilise des anodes nobles : graphite, fer enrichi de silicium, notamment pour la protection des conduites enterrées .

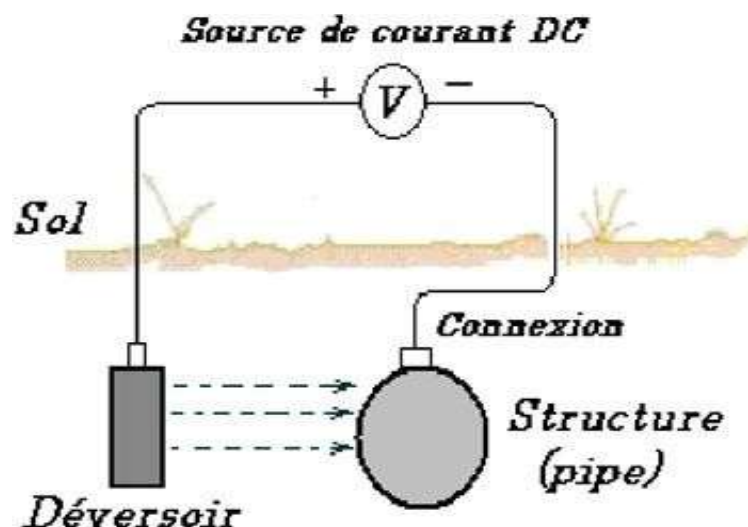


Figure III-4 : Principe de la protection cathodique par courant imposé.

III.5.2 Critères de la protection cathodique :**III.5.2.1 Potentiels de protection cathodique :**

Il s'agit d'appliquer un potentiel inférieur au potentiel de protection tel que la vitesse de corrosion soit réduite :

$$E \leq E_{prot.}$$

Il est admis et standardisé que le seuil de potentiel de PC pour l'acier enterré est de

$-0.85 \text{ V}/E_{Cu/CuSO_4}$ en milieu aéré. En revanche, pour les sols désaérés celui-ci est

$-0.95 \text{ V}/E_{Cu}$, ces valeurs ont été mesurées par rapport à une électrode de sulfate de cuivre.

III.5.2.2 Densité de courant de protection cathodique :

Au préalable, il faut garder le métal dans sa zone de stabilité où la structure est protégée. Pour ce faire, il faut obtenir un potentiel de protection en appliquant un courant appelé densité de protection cathodique. La protection cathodique n'est économique que dans les eaux, les sols et le béton. Le Tableau I. 2 présente quelques valeurs de la densité de courant de PC pour l'acier nu en contact de différents environnements.

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 III-1 : Densité de courant de protection cathodique pour l'acier nu.

III.5.2.3 Résistance des éléments :

Pour le dimensionnement d'un système de protection cathodique, on doit prendre en considération la résistance électrique des éléments qui le constituent. Le courant électrique se localise généralement autour des anodes. On a ce qu'on appelle « la résistance d'anode », la résistance de l'électrolyte doit être évaluée.

III.5.2.4 Revêtements associés à la protection cathodique :

Les revêtements offrent une protection passive qui nécessaire à une protection active dans le but d'arrêter la corrosion dans les zones de décollement du revêtement. Les revêtements doivent répondre aux exigences suivantes :

- diminuer les besoins en courant ;
- assurer une polarisation plus rapide ;
- assurer une portée de la protection cathodique dans des zones à géométrie complexe ;
- assurer une meilleure répartition du courant sur la structure ;
- réduire le coût global de la protection ;

Le revêtement protecteur doit avoir une bonne adhérence mais ne doit pas avoir d'effet corrosif sur la structure à protéger.

III.5.3 Système de protection cathodique par courant imposé :**III.5.3.1 Réalisation de soutirages :**

La protection cathodique par courant imposé est reliée aux paramètres suivants:

- ✓ La densité de courant de protection ;
- ✓ Les caractéristiques du générateur ;
- ✓ Densité de courant de protection.

C'est par définition l'intensité du courant par unité de surface qui doit circuler dans le circuit. Les critères suivants doivent être respectés:

- ✓ La qualité d'isolement du revêtement ;
- ✓ L'agressivité du milieu environnant.

III.5.3.2 Caractéristiques du générateur :

Le débit d'un générateur est défini par la loi d'ohm :

$$I = \frac{U}{R}$$

Où U est la tension de la source continue et R la résistance du circuit. La tension U est, en général, située dans la catégorie des très basses tensions (TBT), < 50V. Dans certains cas, la tension délivrée par le générateur de courant peut être supérieure à la limite de la TBT. L'installation de protection cathodique est soumise à la réglementation concernant les installations électriques. La résistance du circuit est, dans la plupart des cas, liée à la résistance des anodes. Il est important que la résistance de masse anodique soit aussi faible que possible, particulièrement pour les revêtements à forte valeur d'isolement où la résistance de la structure en contact avec le sol n'est pas négligeable.

II.5.4 Implantation des postes de soutirage :

L'implantation d'un poste de soutirage doit tenir compte des paramètres suivants:

- Possibilité d'occupation du sol ;
- Terrain de faible résistivité ;
- Disponibilité et coût d'alimentation en énergie électrique ;
- Facilité d'accès ;
- Evité de mettre un poste de soutirage à l'extrémité d'une conduite.

III.5.4.1 Composition typique d'un poste de soutirage :

Un poste de soutirage de protection cathodique par courant imposé est un appareil fournissant le courant nécessaire pour atteindre le potentiel de protection, il est constitué par :

- Une source d'énergie ;
- Un déversoir ;
- Des câbles de liaison.

- UN Appareillage Electrique Auxiliaire ;



Figure III-5 : Poste de soutirage.

III.5.4.2 Source d'énergie :

La source d'énergie comprend les éléments suivants :

- ✓ Réseau local de distribution ;
- ✓ Panneaux photovoltaïques qui fournissent une énergie électrique utilisée pour la PCCI ;
- ✓ Générateurs thermoélectriques ;
- ✓ Eoliennes.

Avec la possibilité d'utilisation des piles à l'avenir comme les piles au lithium

III.5.4.3 Déversoir (masse anodique) :

C'est un conducteur électrique, dont la fonction est d'injecter un courant dans l'environnement dans lequel se trouve la structure à protéger. La résistance de la masse anodique en contact avec le sol doit être très faible et sa masse est calculée pour déterminer la durée de vie de la protection.

Les anodes les plus utilisées pour la protection cathodique par courant imposé sont données dans le Tableau suivant :

Les anodes	Fer	Ferro-silicium			Graphite			Magnétite
Longueur(m)	1m	0.5	1.2	1.5	1	1.2	1.5	0.9
Diamètre (m)	0.3 0.13	0.04	0.06	0.075	0.06	0.06	0.08	0.04
Poids(Kg)	56	16	26	43	5	6	8	6
Densité (g/cm^3)	7.8	7	7	7	2.1	2.1	2.1	5.18
Perte pratique sans l'utilisation de backfill	10	0.2 à 0.3			1	1	1	0.002
Perte pratique avec backfill	5	Ca 0.1			Ca 0.2 à 0.5			
La durée de vie 1 A par anode sans backfill (année)	5	50	80	140	5	6	8	200
La durée de vie 1 A par anode avec backfill (année)	10	160	260	430	10	12	16	
Risque	Aucun	Modérer			Elever			Modérer
Site d'installation recommandé	L'installation des anodes avec backfill dans des sols faiblement conducteurs, très économique	Principalement utilisé pour les anodes par courant imposé avec une longue durée de vie, également sans backfill			Sols agressifs et solutions aqueuses également sans backfill, relativement économique			Sols eau de mer

Tableau III-2 : Anodes utilisées pour la protection cathodique par courant imposé.

III.5.4.4 Câbles de liaison :

Les câbles à gaine métallique sont évitables, il est préférable d'utiliser des gaines non métalliques telles que le PVC qui est le plus utilisable dans l'industrie. Il est généralement conseillé d'utiliser des câbles d'une section minimale de 25 mm^2 pour réduire le phénomène de la chute de tension et de chauffage des câbles.

La sortie de courant de l'anode à la structure désirée pour être protégée à travers le câble, peut provoquer une rupture de l'isolant qui entoure le câble dans ce cas le métal du câble se comportera comme une anode

III.5.4.5 Appareillage électrique auxiliaire :

- ✓ Appareils de coupure ;
- ✓ Appareils de protection : un disjoncteur doit être installé pour la protection du poste de soutirage contre les surcharges ;
- ✓ Appareils de mesure.
 - Les appareils de mesure nous donnent les informations suivantes:
 - ✓ Tension d'alimentation ;
 - ✓ Tension d'utilisation ;
 - ✓ Intensité débitée ;
 - ✓ Potentiel de la structure ;
 - ✓ Temps de fonctionnement.
 - Boite de jonction :

Le fil positif du rectificateur (redresseur) est relié aux anodes par une boîte de jonction (Figure I.6), elle permet de surveiller la mesure de courant aux anodes.



Figure III-6 : Boite de jonction.

III.6 Facteurs de limitation d'efficacité de la protection cathodique :

III.6.1 Perte d'adhérence des revêtements :

Le phénomène de décollement cathodique a été décrit par un mécanisme à trois étapes, avec une exigence que le revêtement ne soit pas étanche. Principalement ce phénomène est applicable pour les revêtements suivants :

Les revêtements minces et perméables : le dioxygène dissous et les molécules d'eau sont transportés à la surface du métal qui est considéré comme une étape indispensable. En premier lieu, l'eau et le dioxygène dissous pénètrent dans le revêtement engendrant un processus de réduction de ces espèces à l'interface métal-solution. La dernière étape traduit la rupture de la liaison métal-revêtement.

Les revêtements épais et quasi perméables : dans ce cas, la première étape n'existe pas. En présence de défauts ouverts, il y a un contact direct entre les agents corrosifs et la surface du métal. Dans la zone de contact, il se produit la réduction du dioxygène dissous et la formation des ions OH^- . L'augmentation locale du pH va provoquer la détérioration de la liaison entre le métal et le revêtement et donc la perte d'adhérence de ce dernier.

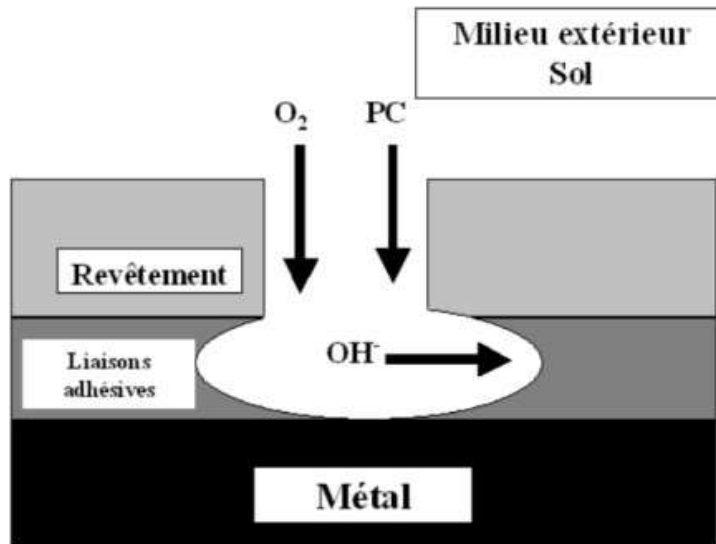


Figure III-7 : Schéma de formation d'un décollement cathodique.

III.7 Champs d'application de la protection cathodique :

III.7.1 Ouvrages au contact du sol :

- canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques ;
- L'extérieur des cuvelages de puits (pétrole, gaz) ;
- Les réservoirs enterrés ;
- Réservoirs (cylindriques, horizontaux ou sphères) de gaz liquéfiés inflammables comme le G.P.L ;
- Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés ;
- Réservoirs des stations-service les plus importantes.

III.7.2 Ouvrages immergés :

- Les installations offshore fixes et les navires ;
- Les bouées et ouvrages portuaires.

III.8 Contrôle de protection cathodique :

Le système de protection cathodique doit, obligatoirement, être contrôlé avant et après sa mise en marche. Ainsi, avant l'installation d'un système de PC on doit, au préalable, avoir des

données sur les points suivants :

- ✓ Déterminer le type de matériau à installer : acier, fonte et sa résistance électrique ;
- ✓ Savoir si le métal est associé à un revêtement et quel est le type de revêtement utilisé ;
- ✓ Connaître la position des sources de protection cathodique qui peuvent être proche de la structure à étudier.

Après l'installation du système, le contrôle s'effectue notamment sur deux points, en l'occurrence, le courant électrique qui circule dans la structure et la résistance électrique du revêtement. Notons que sur le plan industriel, le test le plus fréquent est la mesure du potentiel entre la structure à protéger et le milieu qui s'effectue en suivant les étapes suivantes :

III.8.1 Mesure du potentiel :

On mesure le potentiel cathodique grâce à une électrode de référence $Cu/CuSO_4$ à l'aide d'un voltmètre.

III.8.1.1 Electrode de sulfate de cuivre :

C'est l'électrode de référence, très généralement utilisée pour la mesure de potentiel des structures enterrées telles que les canalisations et les bacs de stockage. La structure de cette électrode de référence est représentée sur la Figure.

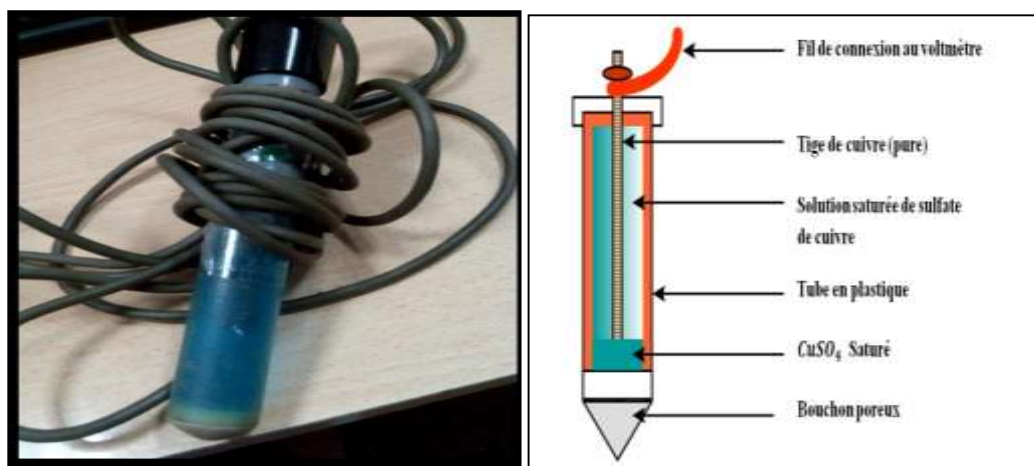


Figure III-8 : Electrode de référence $Cu/CuSO_4$ pour l'utilisation dans les sols.

III.8.1.2 Voltmètre :

Il est plus précis dans les mesures du potentiel, avant d'effectuer les mesures, on doit le régler à une valeur de 2V.



Figure III-9 : Voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de PC (Possède une impédance d'entrée élevée).

III.9 Méthode de mesure du potentiel :

On plonge la partie poreuse de l'électrode $Cu/CuSO_4$ dans le sol préalablement humidifié si ce dernier est sec. La valeur du potentiel mesuré dépend de la position d'électrode par rapport à la structure comme le présente la figure.

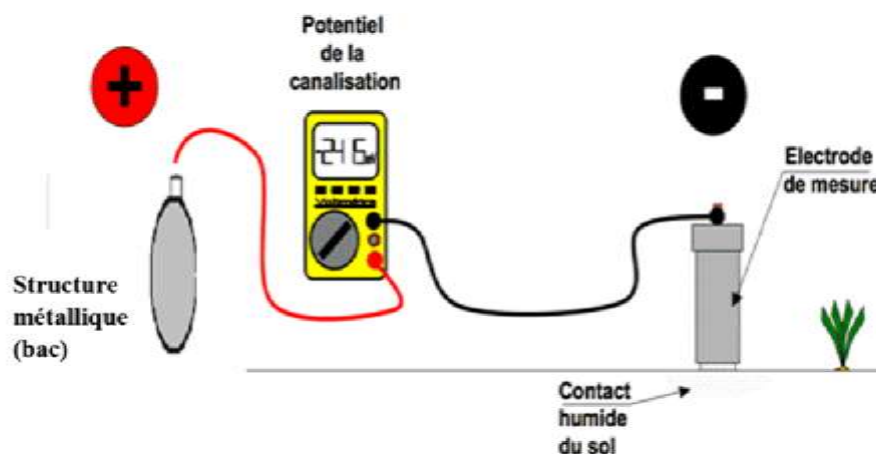


Figure III-10 : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.

Conclusion :

La protection cathodique est une méthode très rigoureuse pour lutter contre la corrosion des structures et équipements en aciers au carbone, placés dans un électrolyte conducteur. Cependant, il faut respecter un certain nombre de règles d'installation, l'expérience est indispensable. Il est nécessaire de faire appel à des spécialistes et à un personnel qualifié.

La protection cathodique semble très simple dans son emploi, mais la maîtrise de ses paramètres électriques demande une grande délicatesse et beaucoup de précaution.

Toute médaille a son revers : malgré son large utilisation, la protection cathodique mal conçue et mal employée présente divers effets néfastes et indésirables tels que la fragilisation par l'hydrogène d'aciers à haute limite élastique dans le cas de la surprotection, et aussi risque de cloquage de systèmes de peintures ou de revêtement incompatibles et surtout la dégradation du revêtement sous l'effet du courant de protection.

CHAPITR IV :

CALCULS ET RESULTATS

Introduction :

Le dimensionnement d'un système de protection cathodique est une affaire de spécialiste. Il s'agit avant tout de mesure 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 un bac de stockage. Sachant que le dépôt de Ouargla contient 8 bacs de stockage et un bac à eau pour le système anti-incendie les bacs sont de différentes dimensions.

A la fin chaque bac aura un poste de soutirage qui répond à leur besoin en courant, aucun problème ne se pose en regard de l'installation de ces postes. On cherche à utiliser des déversoirs de surface composés d'anode de Ferro-silicium backfillées, enterrées à 1 m de profondeur, et liées à un transformateur redresseur de 60V/60A en sortie avec des câbles de double isolement PE/PVC de longueurs appropriées et une section de mm²

Dans ce chapitre, je vais d'abord citer dans des tableaux les paramètres de départ que je vais ensuite introduire dans les formules de calcul afin d'obtenir les résultats.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de bac de stockage nous ont permis de connaître le nombre d'anode nécessaire pour protéger toute la surface extérieure de ce dernier.

IV.1 Illustration de l'installation du système de protection :

Voici un schéma descriptif de l'installation du système de protection cathodique par courant imposé d'un bac de stockage.

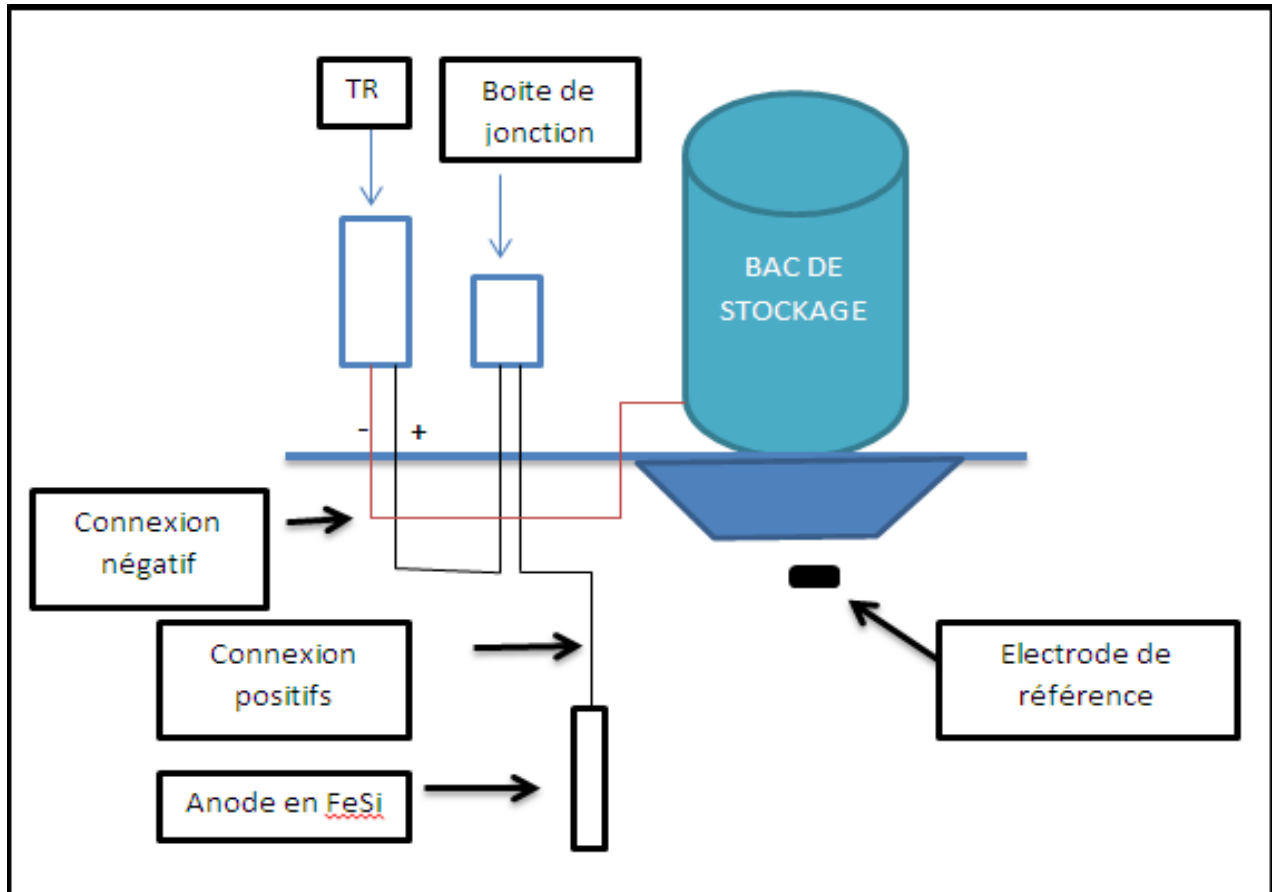


Figure IV-1 : Protection cathodique par courant imposé d'un bac de stockage.

IV.2 Caractéristiques des bacs de stockage :

Bac essence super :

Bacs	Diamètre	Capacité (m ³)
Essence super (N°01)	15,60 m	1 500,00
Essence super (N°02)	15,60 m	1 500,00

Bac kérosène :

Bacs	Diamètre	Capacité (m ³)
Kérosène (N°01)	22,00 m	3 000,00
Kérosène (N°02)	24,00 m	3 500,00
Kérosène (N°03)	24,00 m	3 500,00

Bac Gasoil :

Bacs	Diamètre	Capacité (m ³)
Gasoil (N°01)	18,00 m	2 000,00
Gasoil (N°02)	20,00 m	2 500,00
Gasoil (N°03)	20,00 m	2 500,00

Bac eau anti-incendie :

Bacs	Diamètre	Capacité (m ³)
Eau Anti-incendie	10,00 m	700,00

Nous présentons ici les calculs effectués sur le dépôt d'Ouargla. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux paramètres du sol tels que le pH et la résistivité. Nous avons aussi décrit la méthode suivie pour un dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé.

Avant d'envisager la méthode de protection cathodique par courant imposé il est indispensable d'effectuer une étude préalable du sol sur lequel sera disposé le bac de stockage comprenant :

- La résistivité du sol ;
- Le pH.

Ces deux paramètres nous permettent de définir le degré de corrosivité du sol.

IV.3 La résistivité du sol:

La résistivité est l'un des critères qui caractérise le sol. Elle indique à quel point celui-ci résiste à l'écoulement de courant électrique. La valeur de la résistance du sol peut varier selon l'humidité, la température et la composition chimique. Habituellement, les mesures relevées sur le terrain varient de $1 \Omega \cdot m$ à $100 \Omega \cdot m$. Cependant, on relève parfois des valeurs exceptionnelles de $1 \Omega \cdot m$ qui vont jusqu'à $10\,000 \Omega \cdot m$.

Différentes méthodes permettent l'accès à cette mesure. On peut citer celle de Wenner (la plus fréquemment utilisée dans l'industrie) et Schlumberger. Nous avons utilisé la méthode de Wenner, dite aussi la méthode des quatre piquets]. La mesure de la résistance du sol, nécessite les matériels suivants:

un marteau ;

Des sondes d'acier inoxydable ;

Des fils conducteurs ;

Une Telluromètre.

Mètre ruban.

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

Où :

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

R : Résistance moyenne du sol en Ω ;

a : Espacement entre les piquets ;

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \Delta U / I$$

Avec :

$$\Delta U / I = R \text{ (mesurée sur site).}$$

Les essais ont été réalisés durant mon stage :

Un exemple est effectué avec les paramètres suivants :

a = 1 m ; R = 4.1 Ω mesuré sur le site ;

$$\pi = 3.14.$$

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

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

Soit:

$$\rho = 2 \times 3.14 \times 1 \times 4.1 = 25.76 \ \Omega m$$

Les sols à faible résistivité sont plus corrosifs que les sols à haute résistivité. Le Tableau II.2 présente, à titre d'exemple, la densité de courant de protection cathodique pour différents sols. Il faut cependant, noter une augmentation de 2,5% pour chaque degré à partir d'une température supérieure à 30° C.

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

Tableau IV.1 : Densités de courant de protection cathodique pour différents sols.

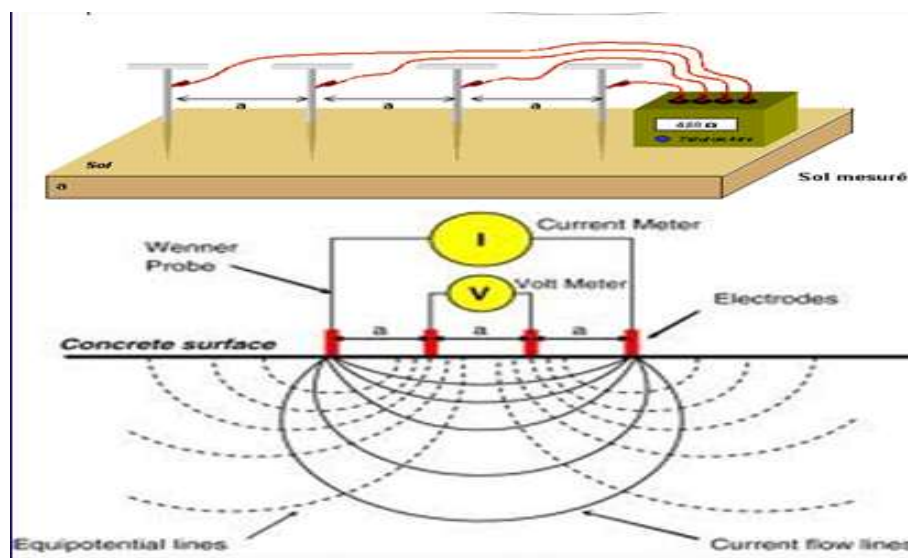


Figure IV-2 : Résistivité du sol.

Les résultats des mesures obtenues sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Bacs	Ecart entre Piquets (a) Mètre	Resistance Ω	Résistivité du sol (ρ) $\Omega.m$	Observations
S 106	1,00	4,10	25,76	
	1,25	3,56	27,96	
	1,50	---		Valeur > 2000 Ω
	2,00	---		Valeur > 2000 Ω
S 105	1,00	2,76	17,34	
	1,25	2,37	18,61	
	1,50	1,97	18,57	
	2,00	1,68	21,11	

TABLEAU IV.2 : Résultats des calculs des résistivités.



Figure IV-3 : Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol .

IV.4 Mesure du Ph :

Connaitre la valeur de pH du sol est l'un des critères qui décrit sa nature, pour cela il est nécessaire de le mesurer dans la terre sur laquelle notre étude s'effectuera. 3 illustre cinq échantillons de sols prélevés sur le chantier du dépôt d'Ouargla.



Figure IV-4 : Prélèvements de sol de 5 points différents.

IV.5 Calcul de surface à protéger pour le fond des bacs :

La surface totale du fond de bac à protéger se calcule selon la formule suivante :

$$S = n * D^2/4$$

Où

Bacs	Diamètre	Surface (m ²)
Essence super (N°01)	15,60 m	191,13
Essence super (N°02)	15,60 m	191,13
Kérosène (N°01)	22,00 m	379,94
Kérosène (N°02)	24,00 m	452,16
Kérosène (N°03)	24,00 m	452,16

Gasoil (N°01)	18,00 m	254,47
Gasoil (N°02)	20,00 m	314,16
Gasoil (N°03)	20,00 m	314,16
Eau Anti-incendie	10,00 m	78,54
Surface Totale		2627,85

TABLEAU IV-3 : Résultats des calculs des surfaces à protéger.

La surface totale des fonds de bac est de :

$$S = 2\,627,85 \text{ m}^2 \text{ soit } 2\,628 \text{ m}^2.$$

IV.6 Système de mise à la terre (malt) :

Le système de mise à la terre des neuf réservoirs et celui des autres ouvrages est constitué de câbles en cuivre nu de section 35 mm^2 ci-dessous :

- Câble cuivre nu 35 mm^2 de Longueur = 2500,00 mm.

La surface totale des câbles de la mise à la terre du cuivre nu à installer est de : 2628 m².

IV.7 DENSITÉ DE COURANT :

Le courant nécessaire à la protection d'une structure métallique enterrée dépend de :

- la résistivité du terrain;
- la résistance transversale du revêtement;
- la surface à protéger.

Les densités de courant requises pour la protection des conduites enterrées en fonction de leur résistance d'isolement sont déterminées par expérience (Voir tableau ci-dessous).

Résistance d'isolement en $\Omega.m^2$	Densité de courant en mA/m ² .
Acier nu	10 à 50
1000	0.35
2300	0.15
4500	0.07
9000	0.035

Structure	Densité de courant en A/m ² .
- Mise à la terre en cuivre Isolée	0,010
- Mise à la terre en cuivre nu	0,20

IV.8 Calcul du besoin en courant:

Densité de courant pour les fonds de bacs est de : 1,50 mA/m².

Densité de courant pour la mise à la terre en cuivre nu est de : 0,20 A/m²

Le besoin en courant se traduit par la multiplication de la surface à protéger par la densité de courant nécessaire :

Pour les Bacs de stockage :

Besoin en courant (I_s)= Surface à protéger {m²} * 1,50 mA/m²

Pour la mise à la terre :

Besoin en courant (I_{sn})= Surface à protéger {m²} * 0,20 A/m²

Bacs de stockage :

Bacs	Diamètre	Surface (m ²)	Courant I_s {mA}
Essence super (N°01)	15,60 m	191,13	286,70
Essence super (N°02)	15,60 m	191,13	286,70
Kérosène (N°01)	22,00 m	379,94	569,91

Kérosène (N°02)	24,00 m	452,16	678,24
Kérosène (N°03)	24,00 m	452,16	678,24
Gasoil (N°01)	18,00 m	254,47	381,71
Gasoil (N°02)	20,00 m	314,16	471,24
Gasoil (N°03)	20,00 m	314,16	471,24
Courant total des Bacs -- Is1			3 823,98

Bac Eau Anti-incendie :

Bac	Diamètre	Surface (m ²)	Courant Is {mA}
Eau Anti-incendie	10,00 m	78,54	117,81
courant total des Bacs -- Is2			117,81

CÂBLE DE MISE À LA TERRE :

Bacs & Locaux	Longueur	Surface (m ²)	Courant Is {mA}
Câble Cuivre Nu 35 mm ²	2 500,00 m	55,37	11 074,00
Total Besoin courant malt -- Is3			11 074,00

Le besoin théorique total du courant nécessaire à la protection cathodique des bacs de stockage sera donc de :

$$I_t = I_{s1} + I_{s2} + I_{s3}$$

$$I = 3\,823,98 + 117,81 + 11\,074,00 = 15\,015,79 \text{ mA soit :}$$

$$I = 15,02 \text{ Ampères}$$

IV.9 Vérification de la puissance du transformateur redresseur :

La vérification de la puissance du transformateur redresseur et le dimensionnement du déversoir (longueur, nombre d'anodes, poids des anodes) se fera sur la base du courant (théorique) majoré de 20%

IV.9.1 Le besoin de courant majoré:

Sera donc de :

$$I_t = I * 1,20 = 15,02 * 1,20 = 18,024 \text{ A}$$

$$I_t = 18,00 \text{ A}$$

IV.9.2 Hypothèses quant à la qualité du revêtement :

En considérant un défaut de surface de 20% et un facteur de vieillissement de 75 %, le besoin en courant effectif serait de :

$$I_{\text{eff}} = I_t * 0,2 * 1,20 = 18,00 * 0,2 * 1,20 = 4,32 \text{ A}$$

IV.9.3 Caractéristiques du transformateur-redresseur

Si on opte pour un Transformateur Redresseur de courant ayant comme capacité de sortie de :

$$U_N = 60 \text{ V} \quad I_N = 60 \text{ A}$$

Le transformateur redresseur fonctionnera donc à 22,00 % de sa charge nominale qui est inférieur au coefficient de charge maxi qui est donc de 75 %.

IV.10 Dimensionnements du déversoir anodique :

IV.10.1 Calcul de la masse anodique à installer:

La consommation des anodes Fe-Si-Cr est de 0,3Kg / A.an. Pour une durée de vie de 30 ans, et un courant de consommation (18,00 A) et un coefficient de 1,25 tenant compte du fait que l'anode consommée à 75% n'est plus opérationnelle, la masse à installer est de :

$$M = 0,30 \times 30 \times 18,00 \times 1,25 \approx 202,50 \text{ Kg.}$$

Coefficient
 Courant de Consommation en A
 Durée de vie de calcul en An
 Consommation d'une anode en Kg/A.an

Pour des anodes de masse unitaire 22,70 Kg (de dimensions 2''X60''),

le nombre d'anodes à installer est :

$$N_a = M / 22,70$$

$$N_a = 202,50 / 22,70$$

$$N_a = 8,92 \text{ (calcul théorique)}$$

Le nombre d'anodes est un nombre entier, d'où $N_a = 09$ Anodes

IV.11 Installation de protection cathodique :

IV.11.1 Equipment de protection cathodique :

1. Poste à courant imposé : Redresseur RVC ;
2. (T/R) input : 230 V - 60 HZ ;
3. (T/R) output: 0 - 21 V DC 12A ;
4. Alimentation électrique 230 V ;
5. Anode inerte titane platiné ;
6. Électrode de référence (Cu/CuSO₄) ;
7. Mélange régulateur (Backfill de coke) ;
8. Câbles de connexion ;
9. Les joints isolants ;
10. Points fixes de mesures ;
11. Coffret de jonction et mesure ADF : pour les bacs des carburants (milieu ATEX) ;
12. Coffret de jonction et mesure : pour le bac eau anti incendie.

IV.12 Réalisation de protection cathodique au niveau de dépôt D'OUARGLA :



Figure IV-5 : Faire introduire le mélange régulateur.



Figure IV-6 : Pose de l'anode.



Figure IV-7 : Pose de l'électrode de référence.



Figure IV-8 : Opération de câblage.



Figure IV-9 : Connexion négative.



Figure IV-10 : Redresseur et le coffret de jonction.

IV.12.1 Mise en service :

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion soit négligeable. Les paramètres contrôlent la protection cathodique : le potentiel de protection et la densité de courant de protection.

Le courant cathodique nécessaire pour imposer le potentiel de protection dépend de la surface à protéger et la densité de courant.

Le tableau suivant donne un les valeurs de potentiel de protection et le courant de protection nécessaire pour la protection cathodique des bacs.

Tableau :

Bac	Potentiel de protection (V)	Courant de protection (A)
Essence		
Gazole		
Jet A1		
Eau incendie		

IV.12.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique :

Le contrôle de l'efficacité de la protection cathodique des bacs de stockage consiste à vérifier, par des mesures appropriées de potentiel et de courant, que les critères de protection cathodique sont bien atteints.

IV.12.2.1 Critère de la protection cathodique :

Un Voltmètre à haute impédance connecté au métal par la borne + et à une électrode de référence par la borne - ou $\Delta E_{\text{mesuré}}$ doit être inférieur à - 850 mv avec une électrode de référence (Cu/CuSO₄) en tous les points prévus sur la structure métallique. La protection cathodique sert à abaisser le potentiel du métal à un niveau de - 850 mv dans la région immunisée.

IV.12.2.2 Mesure du potentiel de protection des bacs :

La protection cathodique étant en service, on mesure le potentiel dit à courant établi, ou potentiel "ON", qui est le potentiel du métal sous application du courant de protection cathodique.

A la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel à courant coupé, ou potentiel "OFF". Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques microsecondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection

cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans le sol.

Equipment de mesure :

- Electrode de référence (Cu/CuSO₄) ;
- Voltmètre ;
- Electrode de référence (Cu/CuSO₄) ;
- Voltmètre.

Tableau :

Bac	U (ON)	U (OFF)	Observation
Eau incendie			Bon

IV.13 Fréquence de contrôle de la protection cathodique :

Ce type de contrôle est généralement effectué une fois par année.

IV.13.1 Protection par revêtements :**IV.13.1.1 Préparation de surface :**

Le revêtement par peinture nécessite une préparation de la surface de la structure métallique, de façon que le revêtement soit adhérent. Le décapage de la structure métallique est particulièrement important.

Le décapage est effectué par voie mécanique, Sablage, il consiste à projeter des grains de sable sur la surface de la structure métallique à une vitesse choisie pour bien nettoyer les bacs et sans les détériorer.



Figure IV-11: Préparation de surface.

IV.13.1.2 Système de peinture :

Le Système de peinture comportant trois couches :

IV.13.1.2.1 Couche primaire:

Peinture anti corrosion (Epoxy) la couche primaire à base de peinture primaire réactive (PPR) est déposée en très faible épaisseur ($5 \mu\text{m}$). La peinture primaire d'atelier (PPA) doit bien adhérer au métal ; elle constitue un inhibiteur des amorces de corrosion. Le choix du pigment est alors très important. Cette couche primaire doit avoir une épaisseur de l'ordre de 30 à $40 \mu\text{m}$, généralement suffisante pour couvrir toutes les irrégularités de surface

IV.13.1.2.2 Couche intermédiaire :

Bonne adhésion au primaire et à la finition. Elles assurent au revêtement une épaisseur suffisante permettant de combler les inégalités de surface. Elles renforcent le pouvoir anticorrosif de la couche primaire et participent à l'étanchéité de l'ensemble, non assurée en général par la couche primaire parfois poreuse.

IV.13.1.2.3 Couche de finition :

Aspect de surface, couleur. Elles assurent une barrière aux premières attaques de la corrosion (exemple peinture antiacides, anti-bases, anti-salissures, résistance au choc, à l'abrasion, aux hautes températures etc.). Elles doivent donc être étanches et participer éventuellement à l'aspect esthétique demandé. Ce système courant à trois couches n'est pas limitatif. Il peut se résoudre à une couche de peinture poudre par exemple. En fonction de la nature des

revêtements appliqués et des contraintes d'utilisation, l'épaisseur des systèmes varie. On notera à ce sujet qu'un moyen de contrôle aisé de l'application totale d'une peinture sur un subjectile peut résulter de colorations différentes des couches appliquées.

IV.13.1.2.4 Compatibilité des peintures avec la protection cathodique :

La conjonction revêtements - protection cathodique universellement utilisée et très efficace. Le système de peinture permet de diminuer et économiser la demande en courant de la protection cathodique, Un courant relativement faible suffit donc à protéger une surface géométrique importante ainsi que la protection cathodique évite la corrosion aux endroits défectueux de revêtements.

Conclusion

Nous présentons ici les calculs effectués sur le site d'Ouargla. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux paramètres du sol tels que le pH et la résistivité. Nous avons aussi décrit la méthode suivie pour un dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé.

Avant d'envisager la méthode de protection cathodique par courant imposé il est indispensable d'effectuer une étude préalable du sol sur lequel sera disposé le bac de stockage comprenant :

- La résistivité du sol.
- Le pH.

Ces deux paramètres nous permettent de définir le degré de corrosivité du sol.

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.

La protection cathodique par courant imposé couplée à une protection passive (PE), présente l'inconvénient majeur d'exiger le contrôle et la maîtrise de toute une batterie de paramètres en temps réel et qui peuvent être affectés par le moindre défaut dans la structure ou dans le revêtement qui la protège. Une mauvaise distribution du potentiel appliqué sur les canalisations entraîne des protubérances (court-circuit), pertes énergétiques par effet joule. Lorsque la protection cathodique n'est pas totalement maîtrisée différents défauts peuvent apparaître sur les revêtements. Le nombre d'anodes à installer est de 12 anodes de 22,70 Kg de dimensions 2''X60''. Chaque deux bac un deversoir de trois anode de FeSi.

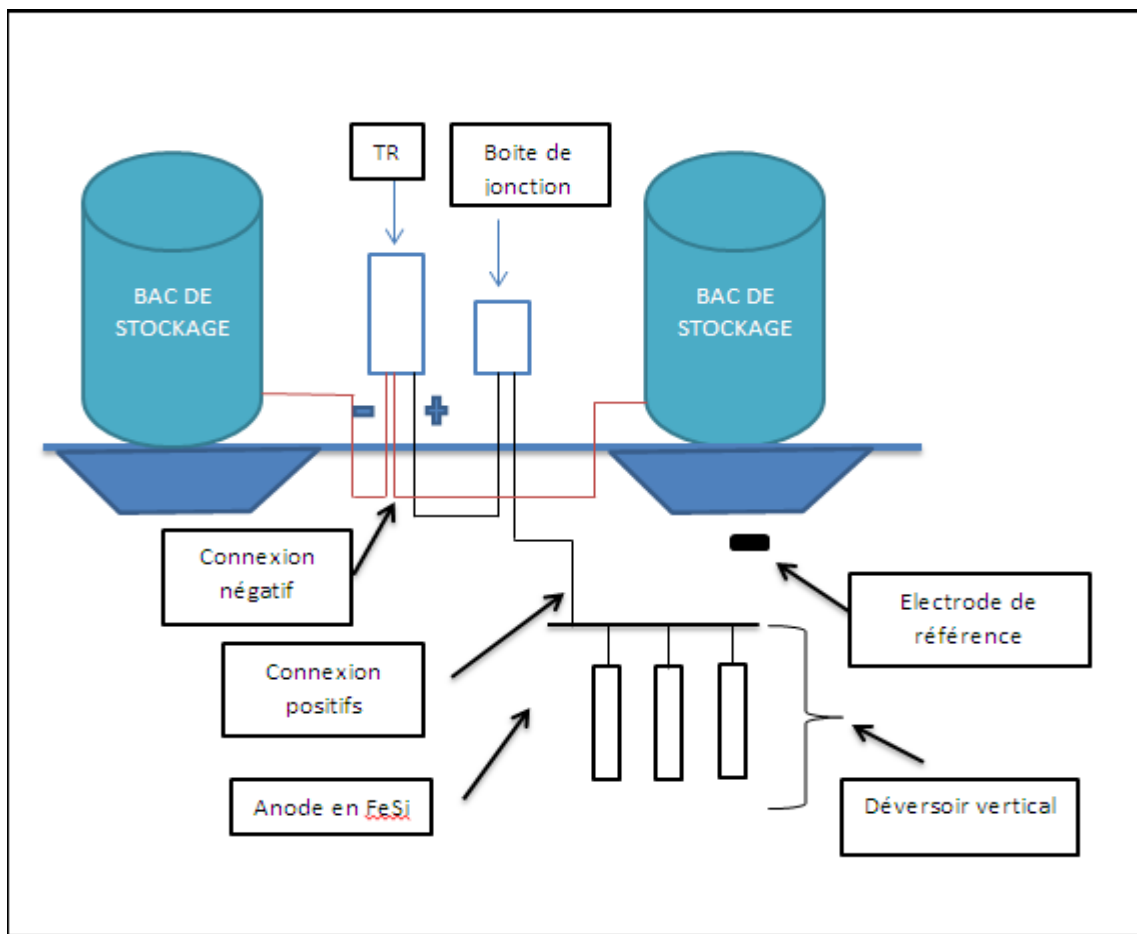
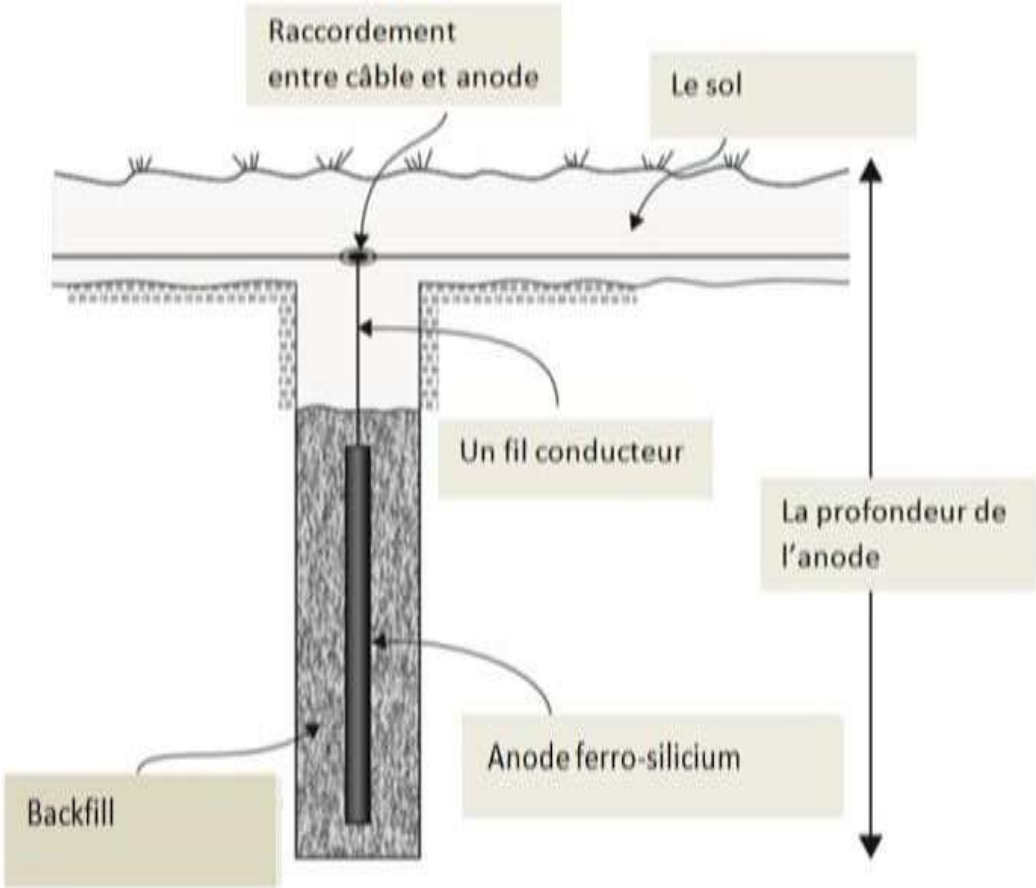


Figure IV-12 : Proposition d'un schéma pour la protection cathodique (chaque deux bacs reliés avec un déversoir de trois anodes).

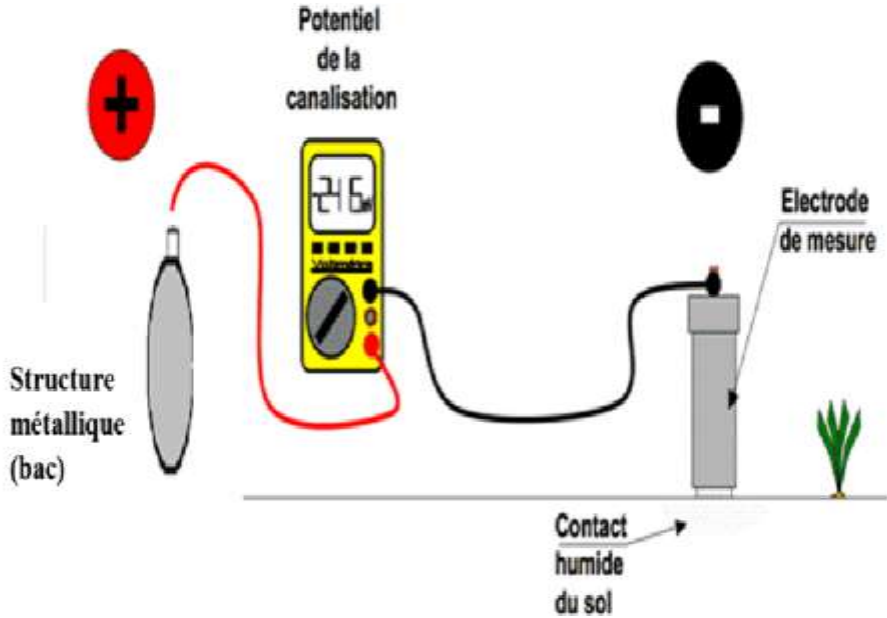
ANNEX 1 : Modèle d'anode en ferro-silicium disposée verticalement :



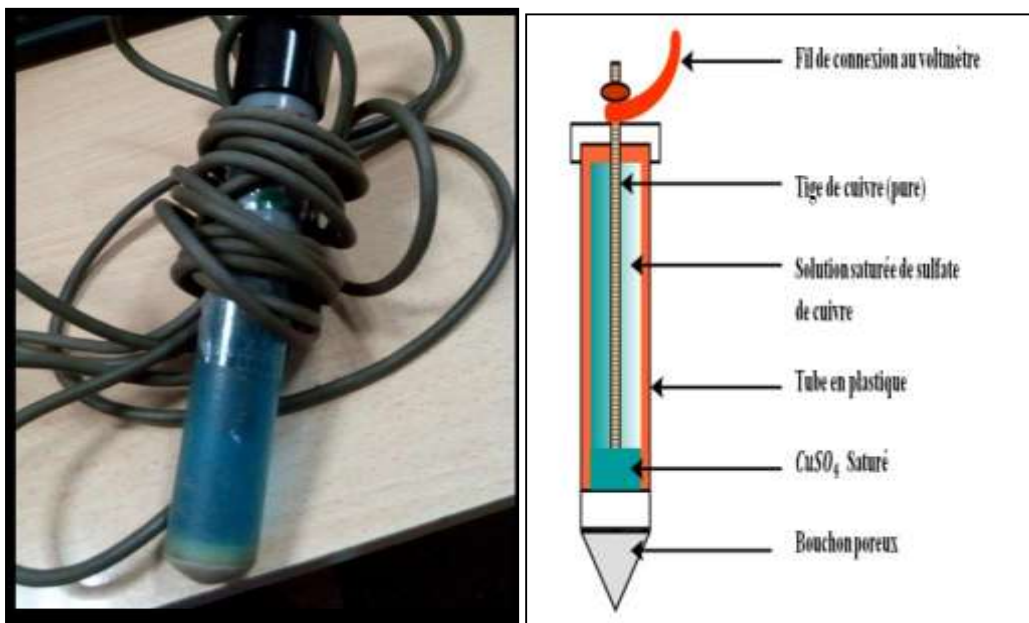
ANNEX 2 : Appareil DM4 avec palpeur pour la prise d'épaisseur à l'ultrason :



ANNEX 3 : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.



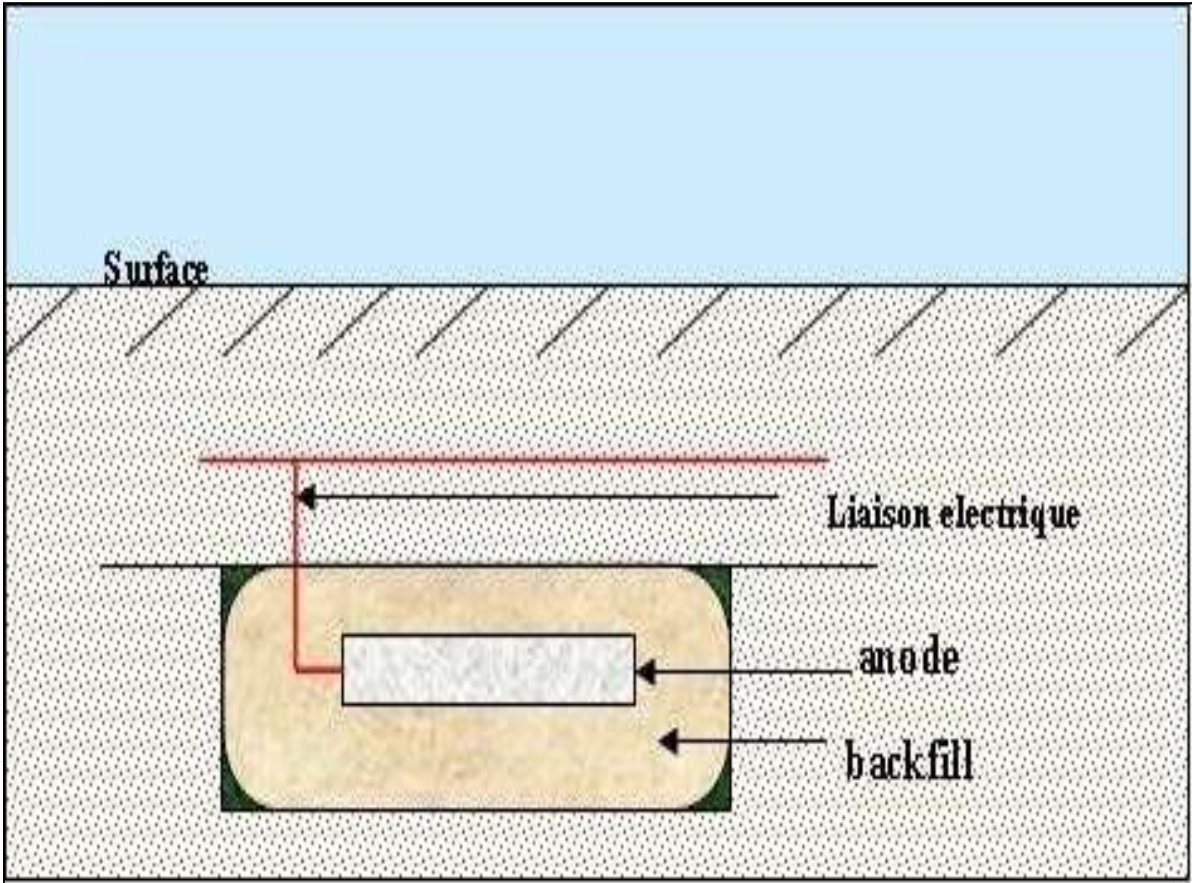
ANNEXE 4 : Electrode de référence $Cu/CuSO_4$ pour l'utilisation dans les sols :



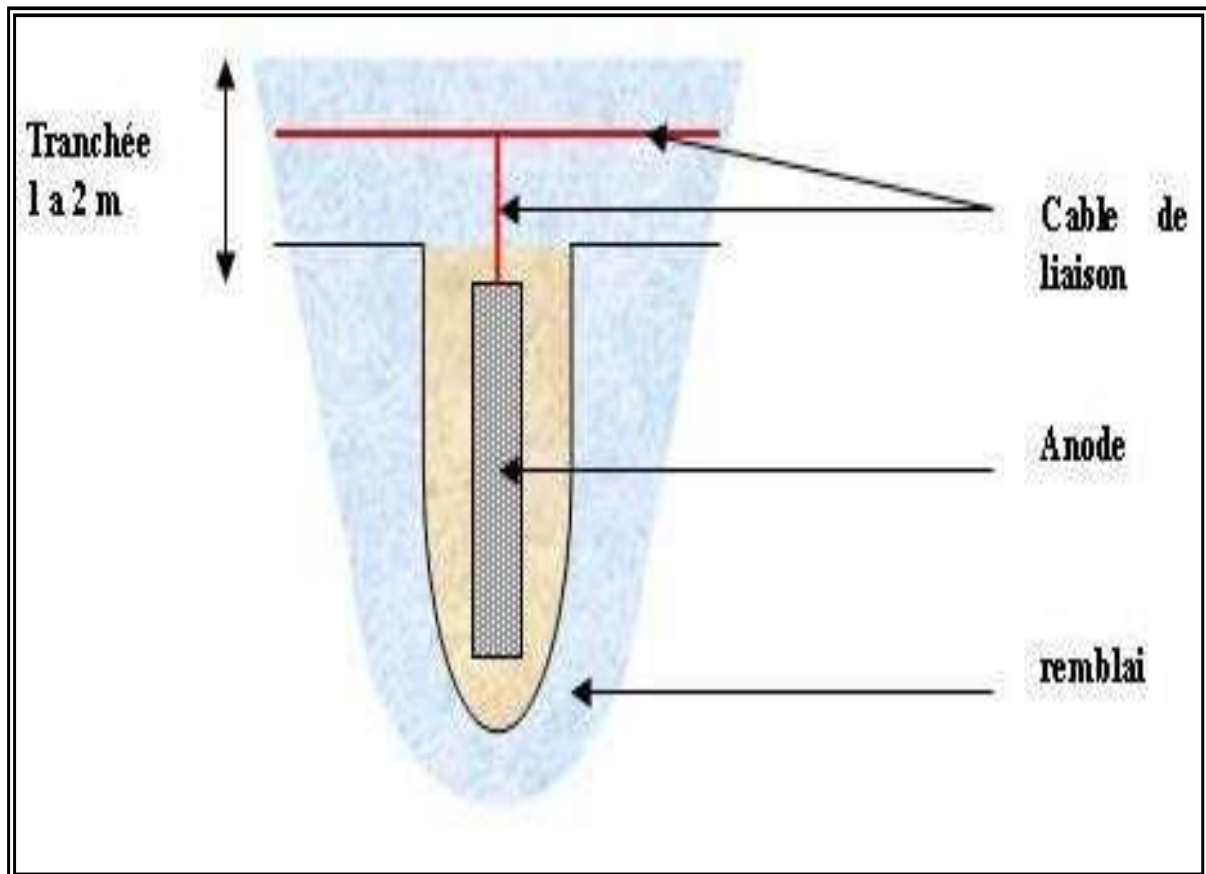
ANNEXE 5 : Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs :

Déversoir	Consommation (kg/A.an)	Milieu d'utilisation
Acier	9	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Graphite	0,25 à 0,5	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Ferro silicium	0,5	Tous types de sol Milieux liquides chlorurés Milieux de faible résistivité
Magnétite	1,5 g/A.an	Tous types de sol Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.an	Milieu de faible résistivité

ANNEXE 6 : Déversoir anodique posé horizontalement :



ANNEX 7 : Déversoir anodique posé verticalement :



Références bibliographiques

- 1- Bosich.J. F, Prévention de la corrosion, Entreprise moderne d'édition, Genève, (1972).
- 2-D.Landot, corrosion et chimie de surface des métaux, presse polytechnique et universitaires romande, Lausanne, (1993).
- 3-Mémoire : protection cathodique des canalisations et du bac de stockage ; par MEHRZI Mohamed Amine, 2005.
- 4-Mémoire de fin d'étude : Etude optimal de réseau de Pline par BRIKI et Blouin.
- 5-Mémoire : Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure par ABDELLI Feriel, 2017.
- 6- Vetter, Electrochemical kinetic theoretical aspect, Academic Press, New-York, (1967).
- 7-M.Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria in Aqueous Solutions, NACE International, 2nd edition, USA, (1974).
- 8-E.McCafferty, Introduction to corrosion Science, Springer, USA, (2010).
- 9- HS.Khatak,B.Raj, Corrosion of austenitic stainless steels: mechanism, Woodhead Publishing Limited. India (2002).
- 10-M.Kutez,Handbook of environmental degradation of materiels, wiliam Andrew, 2 nd edition.USA,(2012) .
- 11-Y.Bréchet, J.Charles, La corrosion des matériaux, Dunod, Paris, (2014).
- 12-Y.Chauvin, Corrosion et dégradation des matériaux métalliques, Technip, Paris, (2009).
- 13-Mémoire : dimensionnement optimal du système de la protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque ; par SEGHIRI et TAYEG Bilal,2015
- 14-Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et de gaz Naturel, Circuit Eau de Mer : Traitements et matériaux, Technip, Paris, (1993).
- 15-M, MALOU.(2002/2003).Etude de la corrosion et maintenance des installations pétrolières de shelle sénégal : cas du dépôt de jetée de nord. Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- 16-PA. Schweitzer, Corrosion engineering handbook, Taylor & Francis INC, New York,2 nd edition, vol 3, (1996).
- 17-C. Vargel, Corrosion of alluminium, Elsevier, New-York, 1st edition, (2014).
- 18-Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et de gaz

Naturel, Corrosion et inhibition des puits et collectes, Technip, Paris, (1981).

19-JC.Scully, O.Clavier, G.German, Corrosion protection : Principes fondamentaux, Masson, Paris, (1995).