

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire AbdelHafid Boussouf-Mila  
Institut des Sciences et Technologie  
Département de Génie Mécanique et Électromécanique



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparée en vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER**  
Spécialité : Électromécanique

***ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE PROTECTION  
CATHODIQUE DES PIPES PAR COURANT IMPOSÉ***

Réalisé par :  
- Abdelmalek Hezoual  
- Ismail Khelafa

Soutenu devant le jury :

Mr Rafik Bouhenach  
Mme Samira Dib  
Mr Billel Smaani

Président  
Examineur  
Promoteur

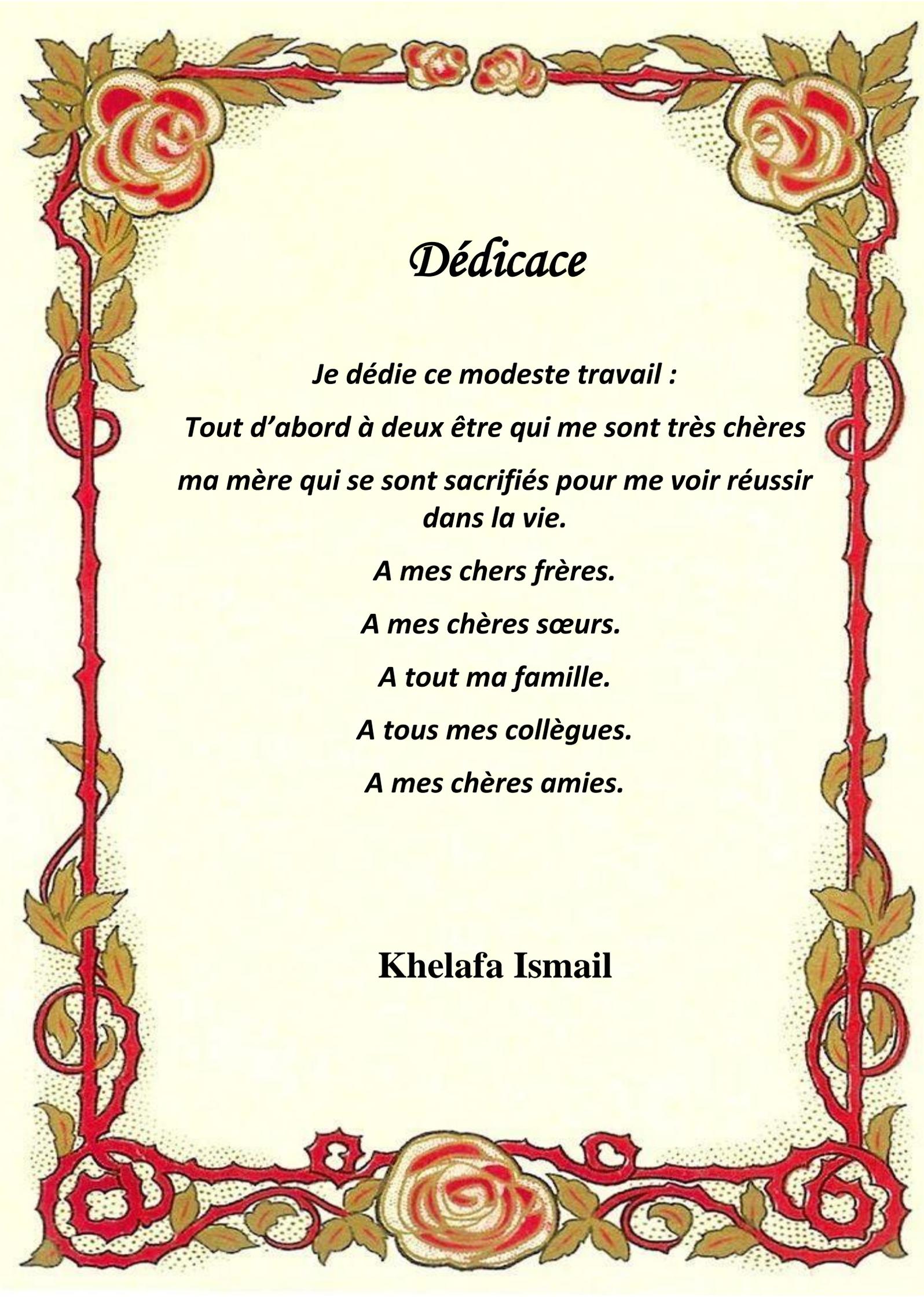
Année universitaire : 2022/2023



## *Remerciement*

*Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu notre Dieu,  
qui nous a donné la force et qui nous à aider à faire ce travail.*

*Comme, nous tenons à remercier vivement nos Promoteur  
Mr :**Smaani Billel** pour son aide, son disponibilité, son soutien et son  
orientation, et qui ouvris devant nous les portes de leur bureau*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Tout d'abord à deux être qui me sont très chères  
ma mère qui se sont sacrifiés pour me voir réussir  
dans la vie.*

*A mes chers frères.*

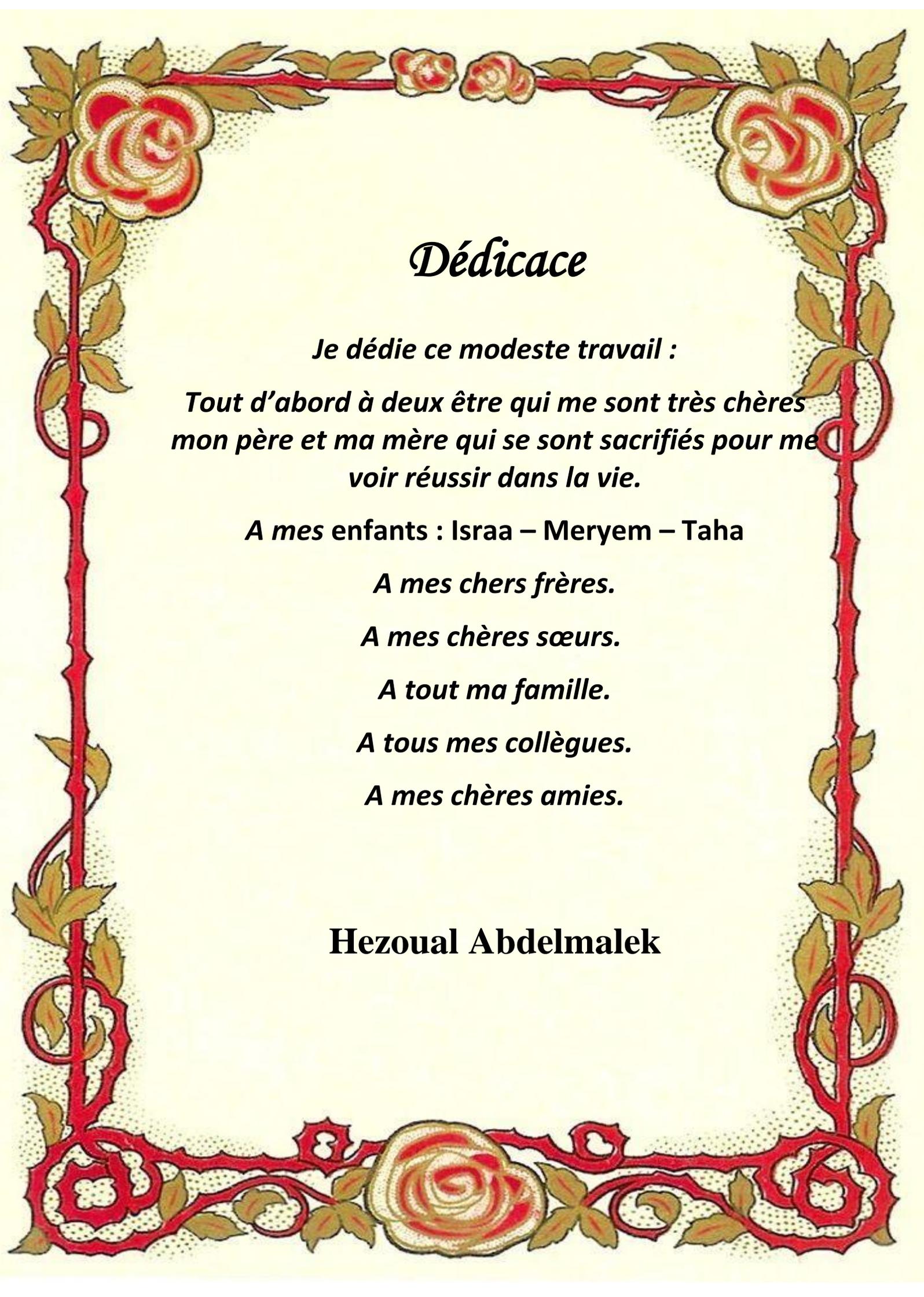
*A mes chères sœurs.*

*A tout ma famille.*

*A tous mes collègues.*

*A mes chères amies.*

**Khelafa Ismail**



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Tout d'abord à deux être qui me sont très chères  
mon père et ma mère qui se sont sacrifiés pour me  
voir réussir dans la vie.*

*A mes enfants : Israa – Meryem – Taha*

*A mes chers frères.*

*A mes chères sœurs.*

*A tout ma famille.*

*A tous mes collègues.*

*A mes chères amies.*

**Hezoual Abdelmalek**

<b>Table des matières</b> .....	I
<b>Liste des abréviations</b> .....	IV
<b>Liste des figures</b> .....	V
<b>Liste des tableaux</b> .....	VII
<b>Introduction générale</b> .....	2-3

**Chapitre I**

**Le phénomène de corrosion et les techniques de protection des pipes contre la corrosion.**

I.1. Introduction .....	5
I.2. Phénomènes de corrosion .....	5
I.3. Définition de la corrosion .....	5
I.4. Types de corrosion .....	6
I.4.1 Corrosion électrochimique .....	6
I.4.2 Corrosion par aération différentielle .....	7
I.4.3. Corrosion galvanique .....	7
I.4.4. Corrosion biologique .....	8
I.4.5. Corrosion par piles géologique .....	8
I.4.6. Corrosion par des courants vagabonds .....	9
I.4.7 Corrosion par piqûres .....	10
I.5. Facteurs de la corrosion .....	11
I.5.1 Corrosion atmosphérique .....	11
I.5.2 Corrosion par les sols .....	11
I.6. Etablissement des diagrammes de pourbaix (pH_tension) .....	12
I.7. Mécanisme de corrosion .....	13
I.8. Conséquences de la corrosion sur les conduites .....	14
I.9. Moyens de lutte contre la corrosion .....	14
I.9.1.1. Protection passive .....	14
II.9.1.2. Propriétés principales des revêtements .....	15
II.9.1.3. Les différents types de revêtements .....	15
I.9.2. Protection en présence de courants vagabonds .....	15
I.9.3. Protection active ou cathodique .....	16
I.10. Histoire de la protection cathodique (PC) .....	16
I.11. Principe de la protection cathodique .....	16

## *Table des matières*

---

I.12 Critères de la protection cathodique.....	17
I.13.Facteurs affectant la validité des critères .....	17
I.13.1.Température.....	17
I.13.2.Type de métal .....	18
I.13.3.Décollement derevêtements .....	18
I.14. Types de protection cathodique.....	18
I.14.1.Protection par anodes sacrificielles .....	19
I.14.2.Choix des anodes sacrificielles.....	20
I.14.3.Caractéristiques de quelques anodes sacrificielles .....	21
II.15. Protection cathodique par courant imposé .....	22
I.16. Paramètres influant sur l'efficacité de la protection cathodique .....	23
I.17.Avantages et inconvénients des systèmes de la protection cathodique.....	23
I.18.Conclusion.....	25

## **Chapitre II**

### **Conception du dispositif de protection cathodique par courant imposé**

II.1. Introduction.....	27
II.2.Conditions préalables à l'application de la protection cathodique.....	27
II.3.Equipements de protection cathodique .....	28
II.3.1. Transformateur-redresseur(poste de soutirage) .....	28
II.3.2. Source d'énergie .....	31
II.4. Caractéristiques des sols .....	31
II.4.1. Le sol comme électrolyte .....	31
II.4.2. Résistivité.....	31
II.4.3. Classification des sols .....	34
II.4.4. Revêtements associés à la protection cathodique .....	34
II.4.5. Le déversoir ou masse anodique .....	34
II.4.6. Joint isolants et câbles de liais .....	36
II.4.7. Poste de drainage .....	38
II.4.8. Points de mesure .....	38
II.4.8.1. Prises de potentiel.....	38
II.4.8.2.Prises de courant.....	38
II.4.9. Liaisons électriques.....	38

II.4.10. Appareillages électriques auxiliaires .....	39
II.4.11. Electrode de sulfate de cuivre .....	39
II.4.12. Mesure et contrôle.....	41
II.4.12.1. Mesure de potentiel .....	41
II.4.12.2. Mesure de courant .....	41
II.4.13. Méthode de recherche de défaut de revêtements .....	42
II.4.14. Interprétation des résultats de mesure .....	43
II.4.15. Conclusion .....	44

### **Chapitre III**

#### **Dimensionnement des installations de protection cathodique par courant imposé**

III.1 Introduction.....	46
III.2 Mesure de résistivité des sols .....	46
III.3 Détermination de la valeur de la résistance d'isolement .....	47
III.4 Détermination des formules pour le calcul de la protection cathodique.....	47
III.4.1 Protection par anode sacrificielle.....	47
III.4.1.1. Calcul de résistance d'anode .....	48
III.4.1.2 Détermination du courant débité par l'anode.....	49
III.4.1.3 Détermination du courant de protection du réseau .....	49
III.4.1.4 Détermination du nombre d'anode pour un trançon .....	50
III.4.2. Protection par poste soutirage.....	51
III.4.2 .1. Caractéristiques physiques .....	52
III.4.2 .2. Paramètres pour le dimensionnement de la protection .....	52
III.4.2 .2.1 Potentiel d'injection .....	53
III.4.2.2. 2 Courant de protection .....	53
III.4.2.2.3 Résistance longitudinale de la conduite .....	53
III.4.2.2.4 Résistance transversal de la conduite .....	54
III.4.2.2.5 Coefficient d'atténuation.....	54
III.4.2.2.6 Résistance caractéristique .....	54
III.4.2.2.7 Calcul des paramètres $R, \alpha, R_c$ .....	55
III.4.2.2.8 Calcul du courant de protection.....	55
III.4.2.2.9 Calcul des caractéristiques du rail .....	56
III.5. Détermination de la puissance de soutirage.....	58

*Table des matières*

---

III.6. Etude de sensibilité .....	62
III.7. Conclusion .....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>En perspectives.....</b>	<b>68</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>70-71</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>72-73</b>

## *Liste des abréviations*

---

**PC** : Protection Cathodique.

**CU/CUS04** : Cuivre/Sulfate de cuivre.

**Pc** : Prises de potentiel.

**PP** : Pries de courant.

**BT**: Basse tension.

**NACE**: National Association of Corrosion Engineers

**Nppc** : Nombre de postes de protection cathodique

## *Liste des figures*

---

<b>Figure I.1</b> Corrosion électrochimique par couple galvanique .....	6
<b>Figure I.2</b> Corrosion par aération différentiel.....	7
<b>Figure I.3</b> Corrosion galvanique .....	8
<b>Figure I.4</b> Corrosion par piles géologique .....	8
<b>Figure I.5</b> Corrosion par des courants vagabonds .....	9
<b>Figure I.6</b> Pile galvanique de corrosion : +Cathode, -Anode .....	10
<b>Figure I.7</b> Exemples de morphologie des piqûres de corrosion.....	10
<b>Figure I.8</b> diagramme de pourbaisE-ph de fer eau a 25°c .....	12
<b>Figure I.9</b> Conduite d'acier corrodée.....	14
<b>Figure I.10</b> Conduit d'acier protégé.....	14
<b>Figure I.11</b> Conduite d'acier revêtir .....	15
<b>Figure I.12</b> Décollement de revêtement de conduite d'acier .....	18
<b>Figure I.13</b> Protection par anodes sacrificielles.....	20
<b>Figure I.14</b> Protection par anodes sacrificielles en position verticale .....	21
<b>Figure I.15</b> Protection par anodes sacrificielles en position horizontale .....	21
<b>Figure I.16</b> Principe de la protection cathodique par courant imposé (soutirage de courant) .....	22
<b>Figure II.1</b> Equipements de protection (poste de soutirage simple).....	28
<b>Figure II.2</b> Poste de soutirage simple (Sonelgaz de Mila).....	29
<b>Figure II.3</b> Le Telluromètre .....	32
<b>Figure II.4</b> Principes de la mesure de résistivité du sol par la méthode de Wenner(à distance entre deux piquets, $a/20$ -profondeur d'enfoncement des piquets) .....	33
<b>Figure II.5</b> Le milieu en tourant l'anode sacrificielle en Ferro silicium .....	35
<b>Figure II.6</b> Le joint isolant.....	36
<b>Figure II.7</b> Les câbles de liaison.....	37
<b>Figure II.8</b> Prises de potentiel et courant .....	38
<b>Figure II.9</b> Electrode de référence Cu/CuSo4 pour l'utilisation dans les sols.....	40
<b>Figure II.10</b> Voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de Pc .....	40
<b>Figure II.11</b> Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique .....	41
<b>Figure II.12</b> Méthode de recherche de défaut de revêtement .....	42
<b>Figure II.13</b> Défauts de revêtement .....	43
<b>Figure III.1</b> Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner .....	46
<b>Figure III.2</b> Plan de réseau d'acier de région BOUKARANA.....	48
<b>Figure III.3</b> Plan de réseau d'acier de région MILA .....	51

*Liste des figures*

---

**Figure III.4** Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) en fonction de la résistivité du sol ..... 62

**Figure III.5** Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) en fonction de la résistance initiale du revêtement ..... 63

**Figure III.6** Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) sur la consommation du rail (déversoir)..... 64

**Figure III.7** Variation de la distance entre le déversoir et la conduite sur l'intensité du courant protecteur ..... 64

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau. I.1</b> Taux de corrosion pour différentes valeurs de PH des sols .....	11
<b>Tableau. I.2</b> l'échelle de Nernst.....	20
<b>Tableau. I.3</b> Caractéristique de quelques anodes sacrificielles .....	21
<b>Tableau. I.4</b> Comparaison entre anodes sacrificielles et anode à courant imposé .....	24
<b>Tableau. II.1</b> Densité de courant par rapport type de conduit .....	30
<b>Tableau. II.2</b> Exemples chiffrés de résistivités .....	33
<b>Tableau. II.3</b> Degré d'agressivité du sol en fonction de la résistivité .....	34
<b>Tableau. II.4</b> Les sections de câbles normalisées à utiliser en fonction de l'intensité .....	37
<b>Tableau. II.5</b> Résumé toutes l'interprétation des résultats de mesure.....	44
<b>Tableau.III.1</b> Résultats de dimensionnement de résistivité $\rho_{sol}$ de région de BOUKARANA.....	47
<b>Tableau. III.2</b> Caractéristiques physique des conduites acier de DP MILA .....	52
<b>Tableau. III.3</b> Résultats de dimensionnement des valeurs numériques de paramètres $r, R$ $\alpha, R_c$ .....	55
<b>Tableau. III.4</b> Résultats de dimensionnement du courant de protection.....	56
<b>Tableau. III.5</b> Résultats de dimensionnement de la masse du rail M.....	57
<b>Tableau. III.6</b> Résultats de dimensionnement de la résistance de terre d'un déversoir (pour le rail posé horizontalement).....	58
<b>Tableau. III.7</b> Résultats de dimensionnement de la surface.....	59
<b>Tableau. III.8</b> Résultats de dimensionnement de la puissance du soutirage .....	59
<b>Tableau. III.9</b> Les valeurs numérique de potentiels .....	60
<b>Tableau. III.10</b> Résultats de dimensionnement de la coefficient $K$ .....	61
<b>Tableau. III.11</b> Résultats de dimensionnement de la longueur de protection d'un poste de soutirage $L_p$ .....	61
<b>Tableau.III.12</b> Résultats de dimensionnement du nombre de postes de protection cathodique $N_{ppc}$ .....	62

*Introduction*  
*générale*

## **Introduction générale**

La majorité des conduites enterrées utilisées pour acheminer le gaz de leurs sources émettrices vers les consommateurs sont fabriquées en aciers tel que le PE. La plupart de ces aciers se trouvent, à l'état naturel, sous forme de minerais (oxydes). Lorsqu'on enterre ces conduites dans un sol agressif, elles s'oxydent et se dégradent tendant ainsi à retourner à son état naturel (oxydes).

La quantité d'acier détruite chaque année par les phénomènes de corrosion est estimée à un quart de la production mondiale annuelle de fer. Les évaluations du coût des dégâts directs et indirects causés par la corrosion est très important. Ce coût comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection. Ce qui est considérable et reflète l'importance du problème.

Pour combattre ce phénomène (la corrosion), il existe plusieurs types de traitement anticorrosion pour protéger les canalisations du milieu corrosif. Le revêtement est le plus utilisé en raison de son double rôle : sa facilité d'application et le pouvoir de séparer le métal du milieu dans lequel il est placé. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré que les défauts de revêtements constatés sont dus aux arrachements ponctuels du film de revêtement durant la pose et le remblaiement de la conduite. Vu les inconvénients de la protection par revêtement, la protection cathodique est incontournable pour suppléer la protection de la conduite. Elle consiste à amener l'ensemble de la surface de l'acier exposé au milieu environnant à un potentiel suffisamment « électronégatif » pour le placer en situation de corrosion pratiquement négligeable.

Il existe deux techniques pour abaisser ce potentiel, la première consiste à établir une liaison électrique entre la structure à protéger et une masse métallique moins noble qui va se corroder préférentiellement. Ce procédé se limite à la protection des ouvrages à courte distance, cette protection est dite protection cathodique par anode sacrificielle. La seconde consiste à utiliser un générateur qui débite un courant continu entre la canalisation et un électrode auxiliaire enterrée à proximité appelée déversoir. On parle alors d'une protection par soutirage de courant.

Généralement, la protection cathodique par un courant imposé est alimentée par un réseau Local de distribution via un transformateur redresseur.

## *Introduction générale*

---

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons quelques aspects théoriques sur les phénomènes de corrosion et les techniques de protection des pipes contre la corrosion.
- Dans le second chapitre, nous décrivons la démarche permettant la conception d'un dispositif de protection cathodique avec anode sacrificielle et courant imposé.
- Dans le dernier chapitre, nous présentons avec détails la partie calcul et dimensionnement pour protéger le réseau acier de la wilaya de Mila.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

# *Chapitre I*

*Le phénomène de corrosion  
et les techniques de  
protection des pipes center la  
corrosion.*

## **I.1 Introduction**

Le transport et distribution des hydrocarbures liquides et gazeux s'opèrent par canalisations. D'importants réseaux de pipelines ont été construits à travers le monde. Les tubes sont en acier et sont exposés des interactions avec les sols ayant pour conséquence le développement des pics de corrosion par perte de métal. La présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmentée les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable. La protection des ouvrages métalliques contre la corrosion peut se faire par protection passive (revêtements), protection active (protection cathodique) et par inhibition.

Dans ce chapitre, le phénomène de corrosion ainsi que les techniques et approches de protection des pipes contre le problème de la corrosion.

## **I.2 Phénomènes de corrosion**

La corrosion d'un matériau est un phénomène complexe dont la définition exacte est délicate. Etudier un phénomène de corrosion c'est d'abord faire appel à plusieurs parties des sciences physiques et plus particulièrement la chimie et l'électrochimie. De plus l'aspect métallurgique et la thermodynamique sont tout aussi indispensables ainsi que les propriétés mécaniques du matériau qui peuvent jouer un rôle prépondérant. [1]

## **I.3 Définition de la corrosion**

La corrosion est parfois utile lorsqu'elle permet aux objets abandonnés dans la nature de se biodégrader ou lorsque la formation d'un produit de corrosion à la surface du matériau le protège d'une dégradation future.

Les matériaux métalliques et plus particulièrement les aciers et les aciers inoxydables constituent des matériaux de base à la construction de nombreuses structures. Ils sont fortement exposés à la corrosion qu'ils soient au contact d'atmosphères humides, immergés en eau douce ou saline, implantés dans les sols ou en présence de solutions plus ou moins agressives. [2]

Avant d'aller plus loin posons-nous la question suivante : **qu'est-ce que la corrosion ?**

La corrosion métallique est un phénomène qui existe depuis que les hommes ont réussi à préparer des métaux qui ne se trouvaient pas à l'état pur dans la nature. Elle désigne le phénomène par lequel, les métaux tendent à revenir à l'état sous lequel ils se trouvent dans

La nature. Autrement dit sous forme d'oxydes de sulfates, carbonates, ... : minerais

Le fer, par exemple, est présent, à l'état naturel, sous forme d'oxydes. Il doit être réduit dans des hauts-fourneaux. En revanche, les métaux qui, comme l'or, se trouvent dans le sol à l'état natif résistent très bien à la corrosion.

La corrosion est l'interaction destructive d'un matériau (alliage métallique, plastique, béton, etc...) avec un milieu agressif. Le phénomène se traduit par une réaction chimique ou électrochimique obligatoirement hétérogène qui se produit à la surface du matériau. [3]

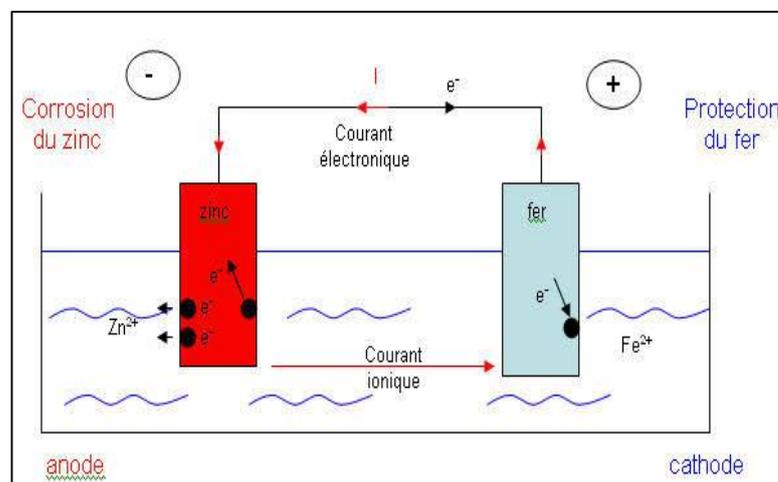
## **I.4 Types de corrosion**

Dans ce contexte, on distingue plusieurs formes de corrosion.

### **I.4.1 Corrosion électrochimique**

Le mécanisme du processus de corrosion électrochimique est étroitement lié d'une part à la structure de métal et d'autre part à la structure de la solution (la solution est caractérisée par le pH, il s'agit du milieu acide, basique ou neutre). La solution est caractérisée par la circulation (formation) de courant électrique, c'est-à-dire par le déplacement d'électrons au sein de la masse métallique et par le déplacement des ions positifs et négatifs au sein de l'électrolyte. [4]

Les métaux, par la répartition des électrons sur les orbites autour du noyau ont tendance à perdre des électrons, il y a alors l'excès de charge positive, l'atome est devenu un ion positif.



**Figure I.1 :** Corrosion électrochimique par couple galvanique.

Le processus de corrosion s'accompagne d'un passage de courant électrique. Les électrons libérés par l'anode s'écoulent à travers le métal vers la cathode.

### I.4.2 Corrosion par aération différentielle

La corrosion par aération différentielle est un type de corrosion qui se produit lorsque la concentration en oxygène est différente sur différentes parties d'une surface métallique exposée à un environnement corrosif. Cette différence de concentration en oxygène crée des cellules électrochimiques locales, où une région de la surface est oxygénée (anodique) et une autre région est privée d'oxygène (cathodique). Cela entraîne une corrosion accélérée dans la région anodique, tandis que la région cathodique est relativement protégée. [5]

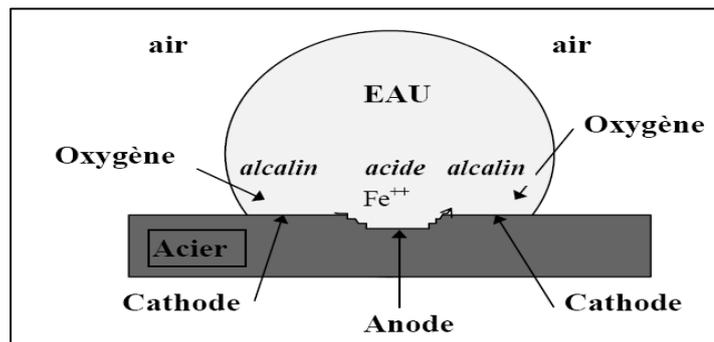


Figure I.2: Corrosion par aération différentiel.

### I.4.3 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique est un phénomène de corrosion qui se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique direct dans un environnement conducteur, tel qu'un électrolyte, il y'a formation d'une pile dite **galvanique**, et l'un des deux métaux est obligatoirement attaqué. En effet le métal dont le potentiel est le plus négatif devient l'anode de la pile et il se corrode (se dissout) ; l'autre métal devient cathode et il est protégé. Ce phénomène est utilisé pour la protection des canalisations en acier, par anodes sacrificielles.

L'existence des couples galvaniques peut se rencontrer dans les métaux de Distribution de gaz en acier dont les branchements d'abonnés dans les réseaux en cuivre (cas des joints isolant fuyards ou non posés). Le cuivre étant le métal le plus noble représente la cathode du système, l'acier en est l'anode et se corrode. [6]

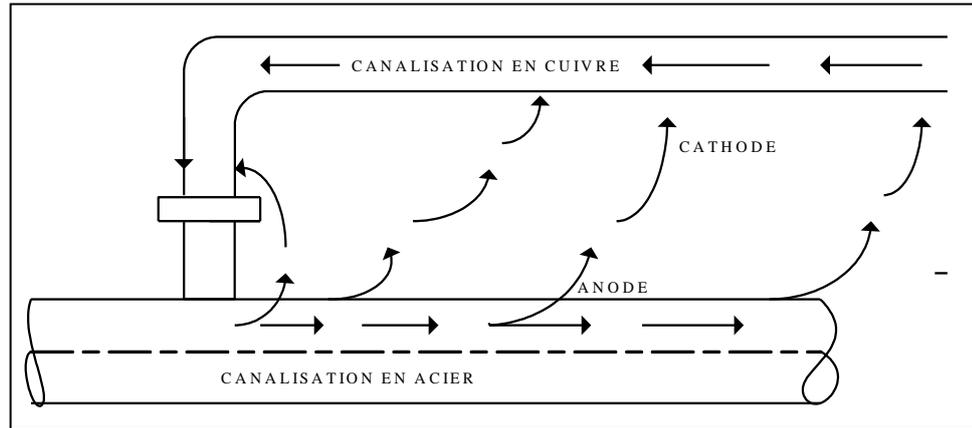


Figure I.3 : Corrosion galvanique.[6]

#### I.4.4 Corrosion biologique

Si l'on met un matériau en présence d'oxygène et de bactéries anaérobies, il y a une réaction qui se forme avec le soufre, donnant des sulfures provoquant une violente attaque encore accrue par les phénomènes électrochimiques.

Les principaux micro-organismes associés à la corrosion biologique sont les bactéries réduisant les sulfates. Les pH favorables aux bactéries sulfate-réductrices sont voisins de la neutralité entre (5.5 et 9.5).

L'endroit où il quitte, celui-ci subit une attaque anodique, quelque fois rapide et locale.

#### I.4.5 Corrosion par Piles géologiques

La corrosion par piles géologiques, également appelée corrosion par piles telluriques, est un phénomène de corrosion qui se produit lorsque des courants électriques naturels se forment dans le sol en raison de différences de potentiel électrique entre différentes zones géologiques. Ces courants peuvent entraîner une corrosion accélérée des structures métalliques enterrées ou immergées dans le sol. [4]

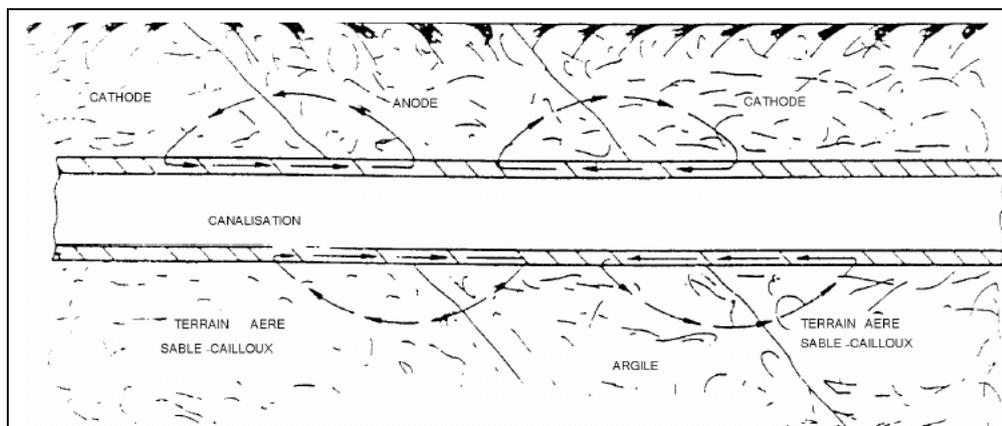


Figure I.4: Corrosion par Piles géologiques.

### I.4.6 Corrosion par des courants vagabonds

La corrosion par des courants vagabonds, également connue sous le nom de corrosion par courants parasites ou corrosion par courants indésirables, est un type de corrosion qui se produit lorsque des courants électriques non intentionnels circulent à travers des structures métalliques, généralement enterrées ou immergées, en raison d'une différence de potentiel électrique. Ces courants vagabonds peuvent être générés par des sources externes telles que les systèmes de distribution d'énergie, les voies ferrées électrifiées, les pipelines adjacents, les lignes de transport d'énergie, etc.

#### ✚ Exemple

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (SNTV, tramways métro...), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds. En effet, si des courants de ce genre pénètrent dans une structure métallique, ils causent la corrosion aux endroits où ils ressortent pour pénétrer dans le sol. Le courant amené par la caténaire, qui peut, pour certains trains, être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à sous station émettrice par le rail de roulement.

Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse s'échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur les parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station. [7]

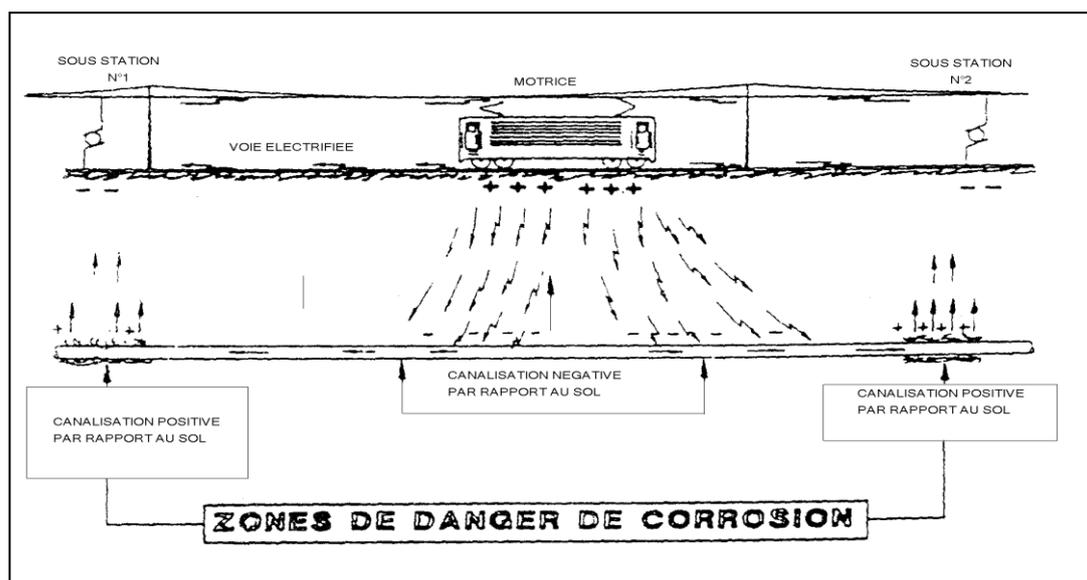
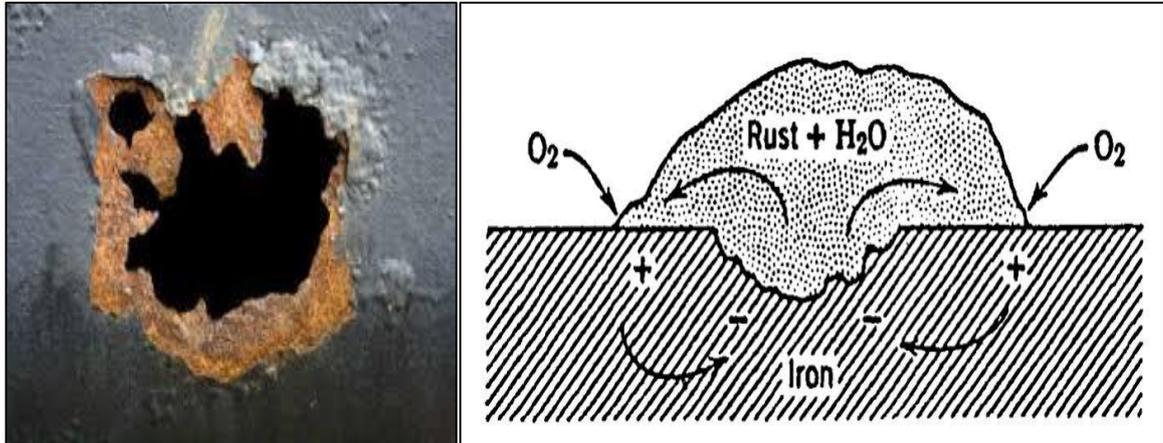


Figure I.5 : Corrosion par des courants vagabonds.[7]

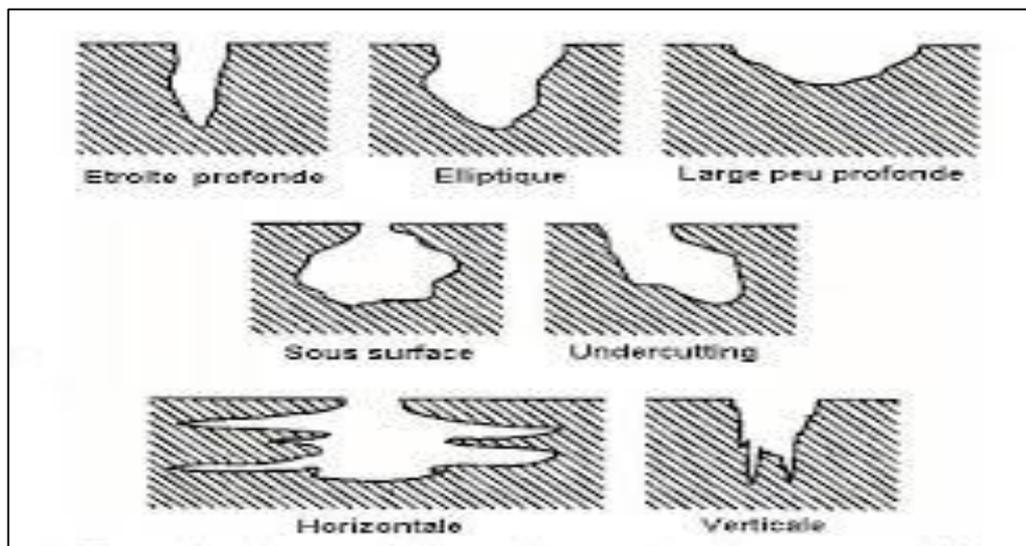
### I.4.7 Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûre se développe localement en formant une pile galvanique de corrosion entre la surface extérieure, passive et cathodique, et l'intérieur de la piqûre, actif et anodique (voir figure (I.6)) entraînant une Cavite qui peut rapidement devenir profonde bien qu'une petite quantité de métal se dissolve globalement.



**Figure I.6:** Pile galvanique de corrosion : + Cathode, - Anode.

La morphologie des piqûres de corrosion peut prendre plusieurs aspects selon les conditions expérimentales. La figure (I.4) illustre des exemples de formes de corrosion ([Bar04]).



**Figure I.7:** Exemples de morphologie des piqûres de corrosion.

## **I.5 Facteurs de la corrosion**

### **I.5.1 Corrosion atmosphérique**

La corrosion atmosphérique est un type de corrosion qui se produit lorsque des matériaux métalliques sont exposés à l'air ambiant. Elle est principalement causée par l'action des composés chimiques présents dans l'air, tels que l'oxygène, l'humidité, les gaz acides et les polluants atmosphériques. [4]

### **I.5.2 Corrosion par les sols**

La corrosion par les sols, également connue sous le nom de corrosion du sol, est un type de corrosion qui se produit lorsque des matériaux métalliques sont en contact direct avec le sol. Le sol peut contenir différents agents corrosifs tels que l'humidité, les sels, les acides organiques, les gaz corrosifs et les microorganismes, qui peuvent contribuer à la dégradation des métaux, par conséquent l'apparition des zones cathodique et anodique. Le mécanisme de cette réaction est électrochimique. L'aération différentielle, la différence de pH dans le sol ( $6 < pH < 9$ ) ou la différence de concentration de sel (NaCl) conduisent à la formation d'une pile de corrosion la corrosion augmente avec la conductivité du sol (en effet, pour des valeurs de conductivité élevées la corrosion sera plus sévère). [9]

**Tableau II** Taux de corrosion pour différentes valeurs de pH des sols. [10]

<b>Caractéristique de sol</b>	<b>Valeur de pH</b>	<b>Taux corrosion</b>
Excrément acide	Inférieur à 4,5	Très forte corrosion
Acide très for	4,5-5,0	
Acide fort	5,1-5,5	
Acide moyen	5,6-6,0	
Acide faible	6,1-6,5	
Neutre	6,6-7,3	Corrosion faible
Alcalinité moyenne	7,4-7,8	
Modérément alcalin	7,9-8,4	
Forte alcalinité	8,5-9,0	Corrosion très élevée
Très forte alcalinité	9,1 est plus	

### I.6 Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - tension)

Les nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques intervenant dans les phénomènes de corrosion dépendent du **pH** de la solution. POURBAIX [11] a établi des diagrammes potentiel-pH qui délimitent différents domaines :

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

[11]

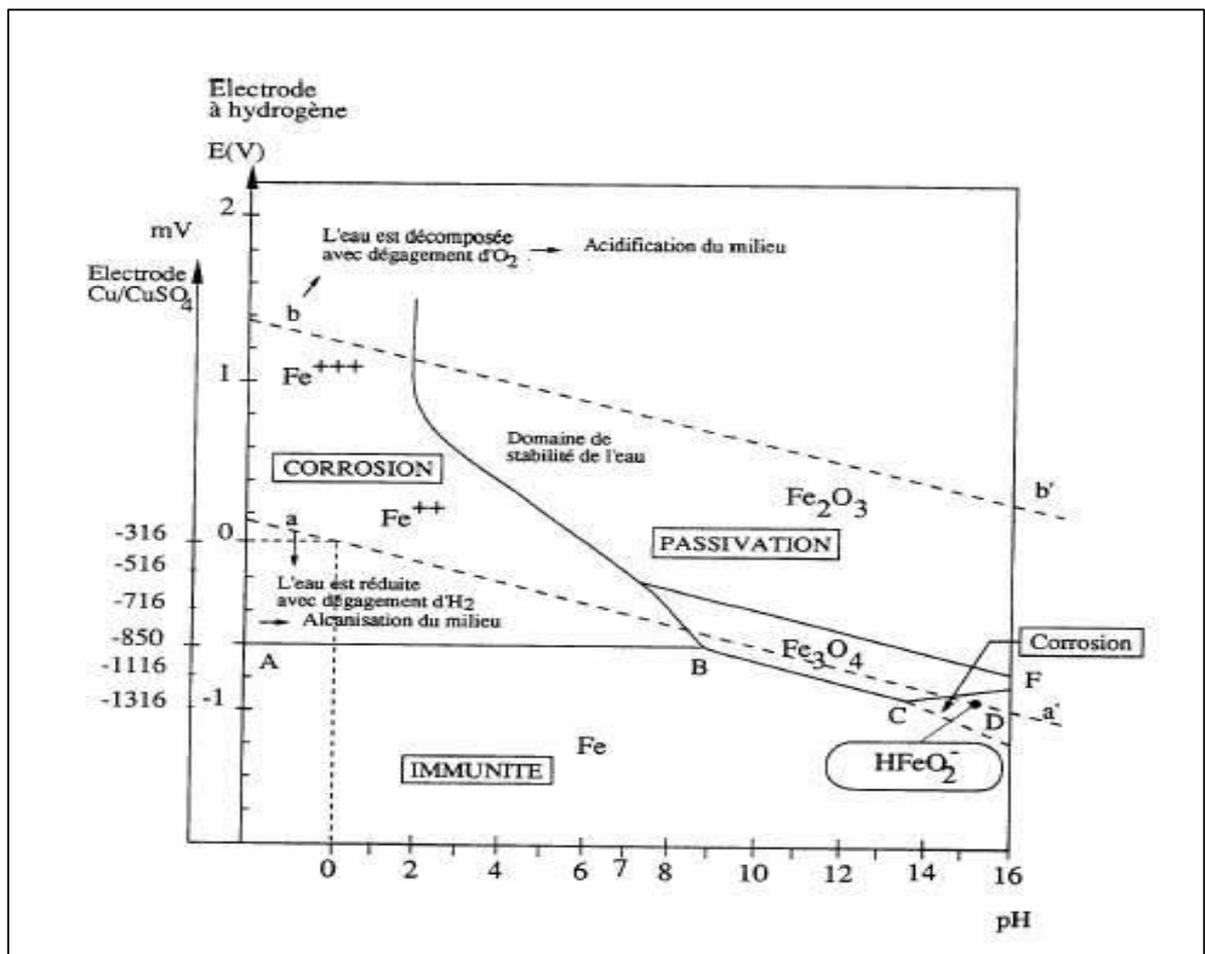


Figure I.8: diagramme de Pourbaix E-Ph de fer eau à 25°C. [11]

D'après le diagramme en déduire trois domaines théoriques de situation du métal, tel que :

- **Domaine de passivité** : C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion.

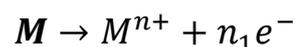
- **Domaine de corrosion** : Dans cet état de système, le métal se transforme d'un niveau stable à un niveau actif (corrosion). Cette transformation se traduit par la dissolution de métal en ions solubles dans l'électrolyte.

- **Phase d'immunité** : À cet état thermodynamique, la corrosion du métal ne peut pas se produire dans son milieu environnant parce qu'il atteint un état stable assuré par l'effet d'équilibre thermodynamique provoqué par le niveau énergétique emmagasiné dans le métal (polarisation).[11]

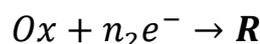
### **I.7 Mécanisme de corrosion**

Bien que les formes de corrosion soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique sont au départ de nature électrochimique. Ils résultent d'un ensemble de réactions se produisant à l'interface métal-solution et mettant en jeu des électrons et des espèces chimiques. Les réactions électrochimiques simplifiées peuvent être décrites de la façon suivante :

Réaction anodique de dissolution du métal M



Réaction cathodique de réduction d'une espèce  $Ox$  de l'électrolyte



La corrosion a toujours pour cause un phénomène électrochimique : galvanique ou électrolytiques. Dans le premier cas, elle est due à la formation locale d'éléments galvaniques dans lesquels des réactions chimiques entre le métal et les agents corrosifs entraînent un passage de courant. Dans d'autres cas c'est le passage du courant primaire qui provoque une véritable électrolyse avec la dissolution anodique du métal. Il convient de les examiner séparément.

Dans le premier cas, la corrosion est due à une ou plusieurs réactions chimiques qui reproduisent à l'interface métal substances de nature électrolytiques dissoutes dans le milieu. La présence de l'eau ou d'un autre solvant est essentiel pour que la corrosion se produise. Dans de nombreux cas où le métal n'est en contact qu'apparent avec l'eau,

l'humidité atmosphérique provoque, par condensation, la formation d'un film liquide suffisant pour agir comme solvant. [4]

### **1.8 Conséquences de la corrosion sur les conduites enterrées**

Ce risque est énorme et imprévisible. Nous devons comprendre les conditions naturelles locales et les conditions météorologiques dans les opérations de construction et de pipelines, et connaître les caractéristiques des sols.

Corrosion, la corrosion des pipelines, matériel, et installations dans l'environnement peuvent provoquer des fuites à grande échelle des pipelines de gaz naturel, Station d'essence naturelle, et le feu et les accidents d'explosion. Déterminer le risque de dangers potentiels en vérifiant régulièrement l'épaisseur de la paroi de l'équipement de récipient sous pression et la tuyauterie et la corrosion externe de l'équipement.



**Figure I.9 :** Conduite d'acier corrodée.

**FigureI.10 :** Conduite d'acier protégé.

### **1.9 Moyens de lutte contre la corrosion**

Il existe plusieurs moyens de lutte contre la corrosion, qui peuvent être appliqués individuellement ou en combinaison en fonction de la situation spécifique. Et la présence permanente de la conduite dans un sol agressif, augmente la probabilité d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion est indispensable.

#### **I.9.1.1 Protection passive**

Il s'agit d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement permet d'augmenter la durée de vie des installations et de réduire les besoins en courant de protection par coupure du circuit ionique entre le métal et le sol. Mais cette isolation ne fournit pas une protection absolue et

définitive en raison des défauts susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. [6]



**Figure I.11:** Conduite d'acier revêtir.

### **I.9.1.2 Propriétés principales des revêtements**

Les revêtements sont largement utilisés pour protéger les surfaces métalliques de la corrosion. Le choix d'un revêtement anticorrosion doit répondre aux impératifs suivants :

- Faible transmission d'espèces ioniques.
- Résistance d'isolement élevée.
- Imperméabilité à la vapeur d'eau et à l'air.
- Inertie chimique et bactériologique.
- Adhérence et mouillabilité à la surface métallique.
- Résistance mécanique, afin que les propriétés d'anticorrosion puissent être maintenues de façon durable.

### **I.9.1.3 Les différents types de revêtements**

Les canalisations en acier destinées à être enterrées doivent être protégées au moyen d'un revêtement appliqué à chaud ou froid, ces revêtements sont :

- Revêtement en PE extrudé.
- Revêtement par gaine thermo rétractable.
- Revêtement par bande adhésive.
- Revêtement à liants hydrocarboné de type C (brai de bouille).

## **I.9.2 Protection en présence de courants vagabonds**

La protection en présence de courants vagabonds est une discipline complexe et multidisciplinaire, qui peut impliquer des connaissances en électricité, en électronique, en génie des matériaux et en corrosion.

Cette technique de protection n'est pas au vrai sens de la protection cathodique, on ne cherche pas à porter le métal de la conduite à son potentiel d'immunité. Mais il est nécessaire d'établir une liaison électrique entre la conduite et la source émettrice pour éviter les risques de corrosion. Cette liaison, autrement dit, le drainage s'effectue entre l'ouvrage et le pôle négatif de la source. [12]

### **I.9.3 Protection active ou cathodique**

La protection cathodique est une technologie qui permet de réduire la vitesse de corrosion d'un matériau métallique, en présence d'un milieu corrosif (eau ou sol), réduisant ainsi le potentiel de corrosion du métal (cathode polarisation, d'où le terme protection cathodique). Puis il est protégé dans une position acceptable pour que la vitesse de corrosion soit acceptable sur toute la surface du métal en contact avec le milieu corrosif.

Pour cela on fait circuler un courant électrique entre une anode auxiliaire et le matériau à protéger qui circule donc du milieu vers le métal, est ajustée de façon à atteindre une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse de corrosion du métal devient très faible. Cette protection s'applique à toute structure métallique en contact avec un milieu corrosif notamment les ouvrages en acier au carbone enterré ou immergés, les surfaces internes de capacités métalliques contenant un électrolyte, ainsi qu'aux armatures du béton. Cette protection est souvent associée à des procédés de prévention de la corrosion tels que les revêtements (peinture, polymères ...).

### **I.10 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. [2]

### **I.11 Principe de la protection cathodique**

A partir des constatations établies ci avant, on peut imaginer la possibilité de créer la circulation d'un courant électrique entre un métal et la solution qui l'entour, circulation telle que le sens du courant passe de la solution vers le métal, et de favoriser ainsi la

réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion, en reportant la réaction d'oxydation sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation. [6]

### **I.12 Critères de la protection cathodique**

Les critères de la protection cathodique sont des mesures utilisées pour évaluer l'efficacité d'un système de protection cathodique. Ces critères permettent de s'assurer que la structure d'acier enterrée dans le sol est correctement protégée contre la corrosion. Voici quelques critères couramment utilisés pour évaluer la protection cathodique

Le seuil de potentiel de protection cathodique relevé sur la structure d'acier par l'intermédiaire d'une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre doit atteindre la valeur de  $-850\text{ mV}$ .

Cette valeur est le critère le plus souvent utilisé pour accepter le niveau de protection cathodique.

La valeur du seuil de potentiel de  $-850\text{ mV}$  représente le potentiel de polarisation de la structure qui peut être réduit par la chute Ohmique créée entre l'électrode de mesure et la structure mesurée. Pour cela, l'électrode doit être toute proche de la structure pour réduire la chute Ohmique durant le relevé de potentiel.

Une différence de polarisation (niveau de polarisation) de  $100\text{ mV}$  peut être également utilisée comme un critère de protection pour une structure métallique soumise à une protection cathodique. Ce critère s'applique souvent sur une structure nue ou avec un revêtement endommagé où il est impossible d'atteindre le seuil de  $-850\text{ mV}$

### **I.13 Facteurs affectant la validité des critères**

Il existe certains facteurs qui peuvent affecter la validité de ces critères.

#### **I.13.1 Température**

Pour un acier enterré dans un sol sous une température ambiante allant de  $20$  à  $25^{\circ}\text{C}$ , les critères de protection de  $-850\text{ mV}$  (Cu/CuSO<sub>4</sub>) et une polarisation de  $100\text{ mV}$  restent valables. Cependant, à une température de  $60^{\circ}\text{C}$ , ces critères ne sont plus jugés satisfaisants et auquel cas le seuil de protection doit être ajusté à  $-950\text{ mV}$  (Cu/CuSO<sub>4</sub>) et le niveau de polarisation de  $150$  à  $250\text{ mV}$  au lieu de  $100\text{ mV}$ .

#### **I.13.2 Type de métal**

Chaque métal est défini par son propre potentiel de corrosion. Ainsi, les seuils de protection sont ajustés convenablement à chaque type de métal.

### **I.13.3 Décollement de revêtement**

Le décollement de revêtement, également connu sous le nom de délaminage ou de détachement de revêtement, fait référence au phénomène où un revêtement appliqué sur une surface se sépare ou se détache de cette surface. Cela peut se produire dans différents types de revêtements tels que les peintures, les vernis, les revêtements de protection, etc. Le décollement de revêtement peut résulter de divers facteurs tels que l'adhésion inadéquate, les contraintes mécaniques, l'humidité, la corrosion sous le revêtement,

ce qui provoque le décollement du revêtement (décollement cathodique). Il en résulte que ce phénomène va empêcher le courant de protection d'atteindre la zone de la structure affectée. De même, l'électrolyte entourant la structure métallique peut venir combler le vide créé à l'interface métal/revêtement/métal et ce qui permet d'activer les cellules de corrosion. En conséquence, les critères de protection à ces endroits du décollement deviennent difficiles.[13]



**Figure I.12:** Décollement de revêtement de Conduite d'acier.

### **I.14 Types de protection cathodique**

Deux techniques de protection cathodique sont utilisées pour fournir le courant nécessaire pour contrer les phénomènes de corrosion :

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive.
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé.



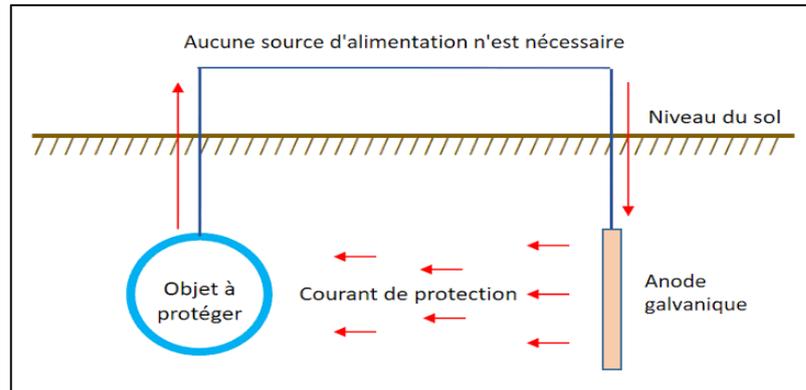


Figure I.13: Protection par anodes sacrificielles.

❖ L'échelle de Nernst permet de voir la valeur des potentiels de chaque élément par rapport à une **électrode à hydrogène**.

L'échelle de Nernst permet de calculer le potentiel électrochimique d'une demi-réaction redox en fonction de la concentration des espèces réactives dans la solution. Elle est largement utilisée en électrochimie et en chimie analytique pour déterminer les potentiels de réduction ou d'oxydation des espèces chimiques. [14]

Tableau I.2: L'échelle de Nernst. 14]

Eléments	Potentiels
Or	+1420
Cuivre	+1200
Bronze	+700
Plomb	-130
Fonte	-390
<b>Fer</b>	<b>-440</b>
Zinc	-760
Aluminium	-1660
Magnésium	-2370

### I.14.2 Choix des anodes sacrificielles

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes.

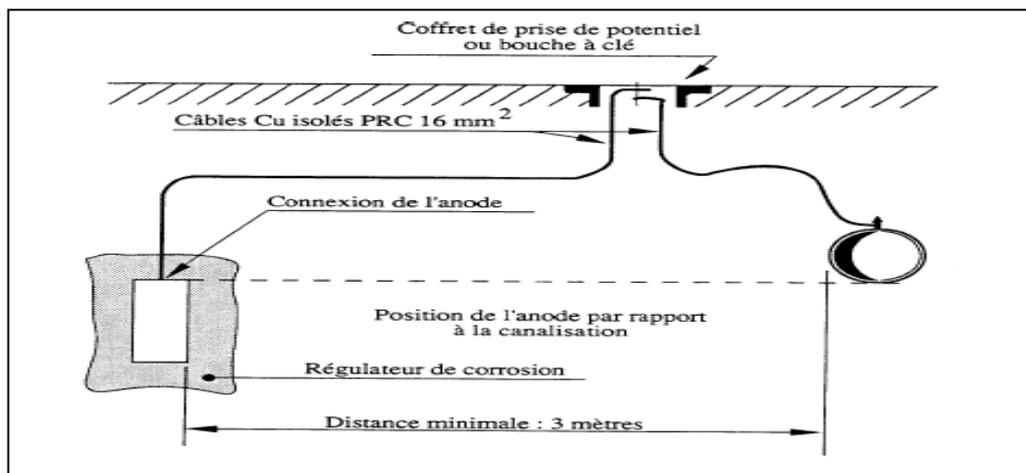
Dans le cas de la protection de l'acier, les anodes utilisées sont à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium. Des études et l'expérience ont permis de déterminer, pour chacun des métaux les seuils d'impureté admissibles ainsi que les éléments d'alliage complémentaires nécessaires pour obtenir les meilleures performances. De nombreux alliages spécifiques pour la protection cathodique existent aujourd'hui sur le marché.

### I.14.3 Caractéristiques de quelques anodes sacrificielles

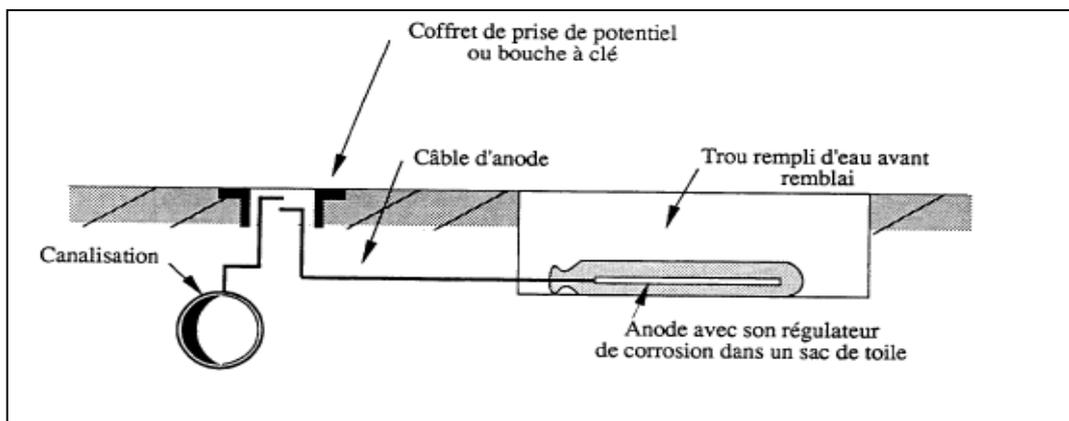
Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydoréduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode ( $g/A \times Ans$ ) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement.

**Tableau I.3 :** Caractéristiques de quelques anodes sacrificielles.[6]

Type d'anode	Potentiel en v / (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	Consommation (Kg/A.an)
Zinc	-1,10	11,9
Magnésium	-1,55	7,9



**Figure I.14:** Protection par anodes sacrificielles en position verticale.



**Figure I.15:** Protection par anodes sacrificielles en position horizontale.

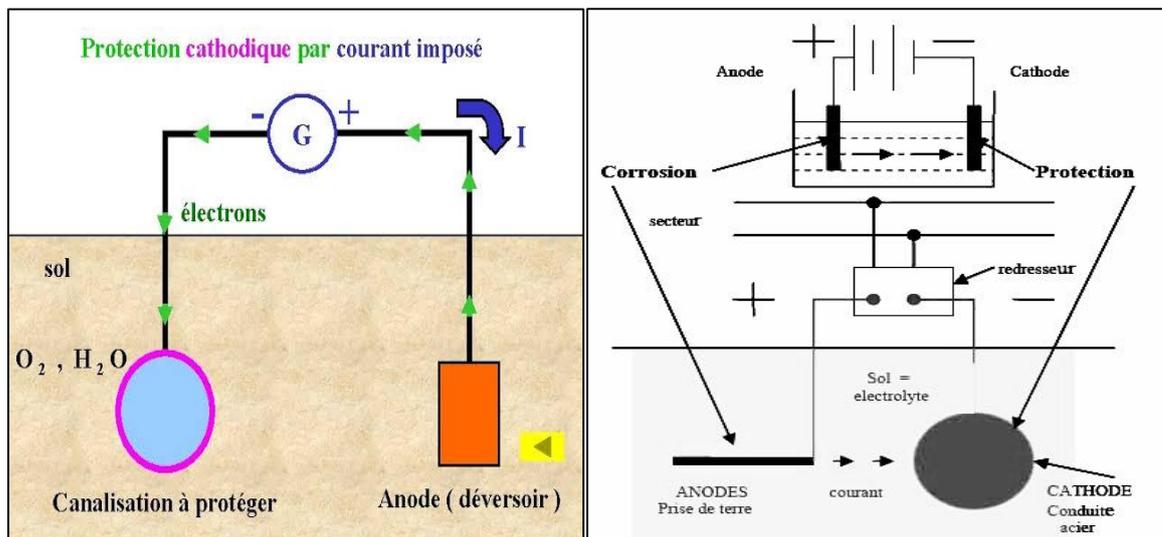
### I.15 Protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique par un courant imposé, encore appelée par soutirage de courant consiste à relier les structures à protéger au pôle négatif d'un générateur à courant continu, dont le pôle positif est connecté à un déversoir de courant plongeant dans le même électrolyte que la structure à protéger (sol). Le courant continu débité par le générateur est diffusé dans l'électrolyte ambiant par le déversoir et est capté par les structures à protéger qui sont ainsi. Portées à un potentiel électro-négatif par rapport au milieu dans lequel elles se trouvent. La durée de vie assez longue. Les matériaux les plus utilisés sont :[15]

-L'acier (rails de chemin de fer, vieux tubes ou tiges de forage rebutés...).

-Le graphite.

-Le Ferro silicium.



**Figure I.16:** Principe de la protection cathodique par courant imposé (soutirage de courant).

#### ✚ Remarque :

La prise de terre devra pouvoir être posée en un point favorable à une distance d'au moins «30m » des conduites à protéger et aussi près que possible du redresseur pour réduire la longueur des câbles. De plus. Cet emplacement devra être choisi en un point du réseau où le diamètre des conduites est suffisamment important pour avoir la conductibilité longitudinale la plus favorable, afin de diminuer autant que possible le nombre de redresseurs à poser.

## **I. 16 Paramètres influant sur l'efficacité de la protection cathodique**

L'efficacité d'un système de protection cathodique appliqué peut être diminuée par certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui peuvent se manifester sous différentes formes : [15]

- Insuffisance de continuité électrique.
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger.
- Influence des structures adjacentes.
- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif).

## **I.17 Avantages et inconvénients des systèmes de la protection Cathodique**

L'utilisation d'un système de protection cathodique soit toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujettie à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. Pour cela, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. A titre d'exemple, le tableau **I.4** donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

**Tableau I.4 :** Comparaison entre anodes sacrificielles et anode à courant imposé. [15]

	Anode galvanique ou sacrificielle	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du Milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Élevé
Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucun	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requise par un spécialiste



# *Chapitre II*

## *Conception du dispositif de protection cathodique par courant imposé*

## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons se focaliser sur l'étude et la conception d'un système de protection conforme aux normes industriels, cela afin d'aboutir à l'établissement des documents et des données ci-après :

- Plan général ou plan d'ensemble faisant ressortir l'emplacement et prévus pour les installations de protection et les points de mesure, ainsi que des joints isolants et des gaines.
- Procès-verbaux de mesures et, au besoin, courbes indiquant la résistivité du sol le long de la conduite.
- Nombre et plan de situation détaillé des installations de protection (anode, redresseurs).
- Plans d'exécution des installations de protection prévues.
- Schéma de connexion pour les installations et les points de mesure.
- Calcule des densités de courante protection et de la portée de chaque installation de cathodique).
- Mesures de sécurité pour la protection de personnel contre les contacts accidente.

## **II.2 Conditions préalables à l'application de la protection cathodique**

La décision d'installer un système de protection cathodique dépend de l'importance et de la forme de la structure, du type de revêtement, de la résistivité du sol et de son action corrosive, des influences en courant continu et en courant alternatif, des règles nationales ainsi que de critères techniques et économiques :[16]

### **-Continuité électrique**

La structure ou partie de la structure à protéger doit être électriquement continue.

### **-Isolation électrique**

Dans le cas de structures à protéger munies de revêtement, il est essentiel qu'il n'y ait aucun contact métallique de la structure avec des parties de la structure qui ne sont pas à protéger, ni avec d'autres structures enterrées.

### **-Revêtement externe**

Il convient en principe de doter les structures à protéger d'un revêtement externe approprié. Un bon revêtement externe diminue la quantité de courant de protection nécessaire, améliore la distribution de courant, augmente la surface protégée et réduit les influences sur les autres structures étrangères.

## II.3 Equipements de protection cathodique

La protection par courant imposé utilise une source de courant continu (poste soutirage) qui débite dans un circuit comprenant. [6]

- Un déversoir (ou masse anodique).
- L'électrolyte (sol ou eau).
- La structure à protéger (Canalisation).

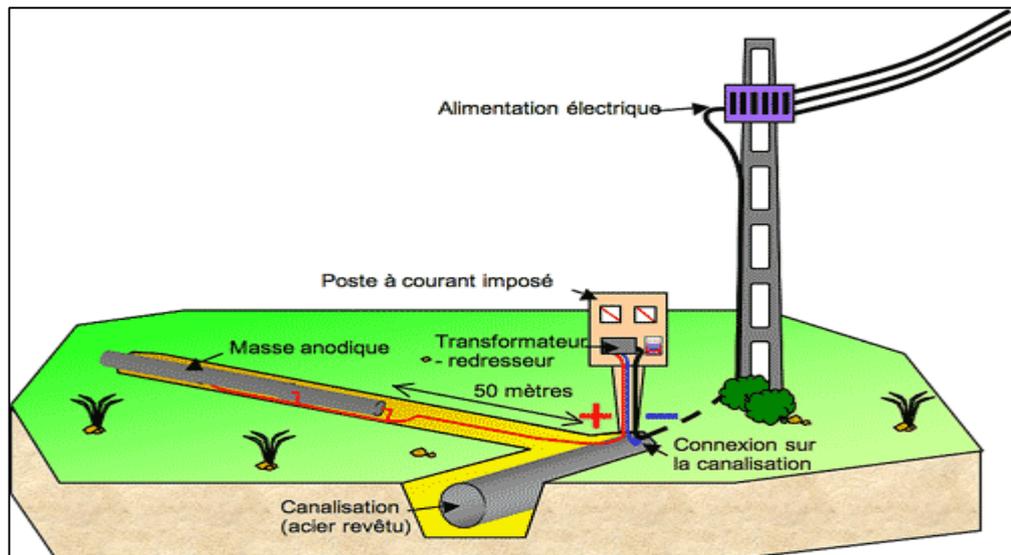


Figure II.1 Equipements de protection (Poste de soutirage simple).

### II.3.1 Transformateur-redresseur (poste de soutirage)

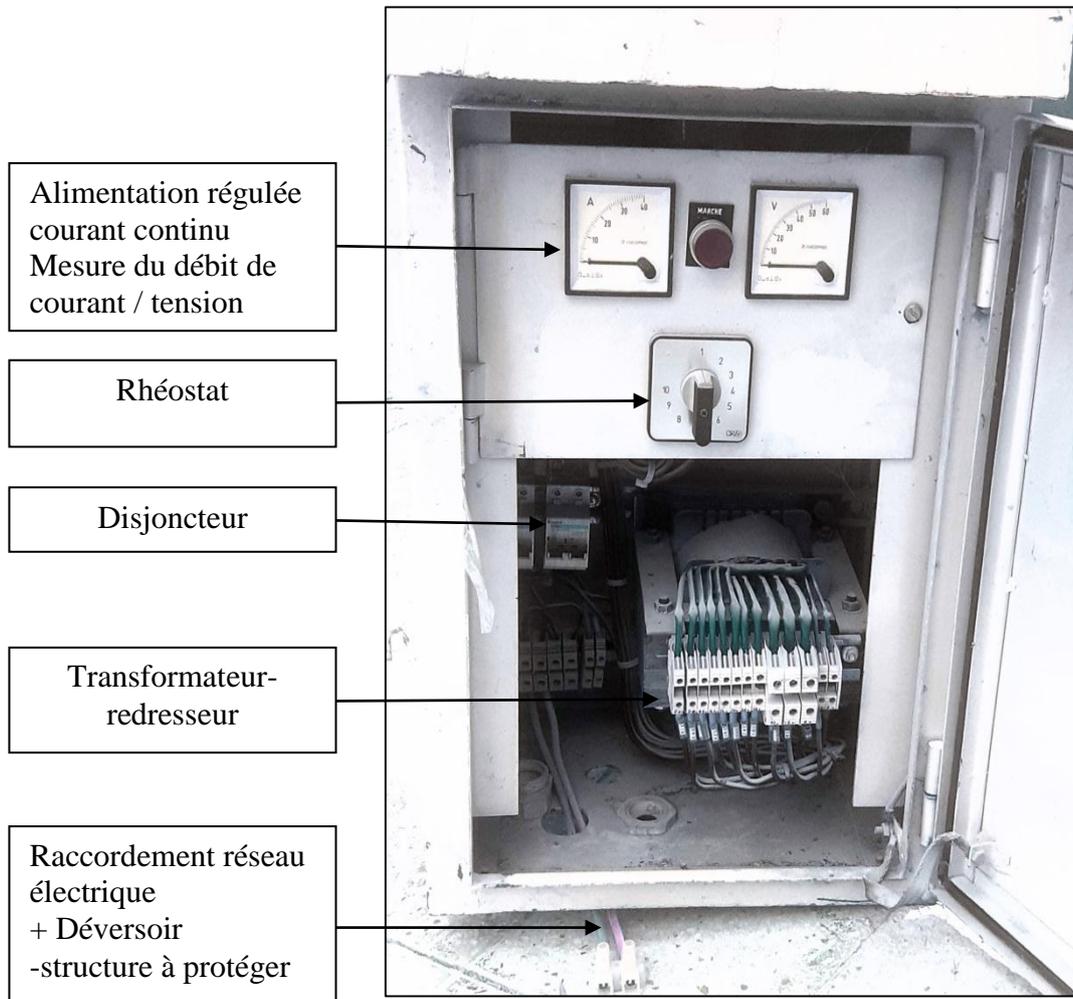
Le poste de soutirage est habituellement constitué par un transformateur redresseur, le meilleur emplacement d'un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée pour une puissance minimale. [6]

- ✓ Les paramètres qui interviennent sont :
- La forme générale du réseau et sa longueur.
  - Les diamètres des conduits.
  - Le degré d'agressivité des sols où les conduites sont posées.
  - Les points les plus favorables pour l'installation des déversoirs.
  - Encombrement du sous-sol en structures diverses.
  - Disponibilité et coût de l'alimentation en énergie électrique.

Il est donc nécessaire d'examiner, tout d'abord, le plan d'ensemble du réseau afin dépourvoir dimensionner le système de protection cathodique à installer et d'en déduire les emplacements les plus indiqués, quant à la disposition des canalisations et des lignes électriques.

❖ **Constitution du poste de soutirage**

- Le branchement basse-tension.
- Un coffret de soutirage sur un support. Il comprend le disjoncteur, le compteur et le redresseur.
- Le conducteur de liaison à la prise de terre.
- Le conducteur de liaison à la canalisation.
- La prise de terre.



**Figure II.2** Poste de soutirage simple (Sonelgaz de Mila).

❖ **Réalisation de poste de soutirage**

La production cathodique par courant imposé se définit par deux paramètres

- La densité de protection cathodique.
- Les caractéristiques du générateur.

❖ **La densité de courant de protection**

La densité de courant, qui est l'intensité par unité de surface, dépend essentiellement

- De la qualité d'isolement du revêtement.
- De l'agressivité du milieu environnant.

Nous présentons un tableau sur les densités de courant nécessaires pour chaque type de revêtement.

**Tableau II.1:** Densité de courant par rapport type de conduit. [16]

Type de conduite	Densité de courant mA/m <sup>2</sup>
Réseau de canalisations immergées avec revêtement type C	0,5 à 1
Réseau de canalisations enterrées avec revêtement type C dégradé	0,3 à 0,6
Conduite d'acier enterrée avec revêtement type C en bon état	0,01 à 0,15
Conduite d'acier enterrée revêtue de PE ou d'époxy	0,001 à 0,1

### ❖ Les caractéristiques du générateur

Le débit des appareils est uniquement fonction des caractéristiques de l'installation réalisée, le débit étant défini par la loi d'OHM.

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

V : La tension de la source de courant continu.

R : La résistance du circuit. Généralement.

La tension V est, en général, située dans la catégorie des très basses tensions (TBT),  $V < 50V$ . 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 d'anode déversoir la plus faible possible. Dans chaque cas, le courant de protection devra être déterminé par un essai de soutirage. [18]

### **II.3.2 Source d'énergie**

Les sources d'énergie conçues pour la protection cathodique doivent débiter sur les anodes un courant continu et en permanence pendant la durée de vie estimée pour la structure à protéger. [15]

✓ La source d'énergie peut être constituée par :

- La source locale de distribution.
- Les groupes électrogènes : le générateur électrique (alternateur ou dynamo) est entraîné par un moteur thermique.
- Les turbogénérateurs : le combustible, provenant d'une source extérieure ou du fluide. Véhiculé, transmet directement son énergie à une turbine entraînant un alternateur.
- Les piles à combustible, dont le prix est très élevé.
- Les piles au lithium qui sont prévues pour 10 ans avec un débit de quelques ampères.
- Des éoliennes.
- L'énergie photovoltaïque.

## **II.4 Caractéristiques des sols**

### **II. 4.1 Le sol comme électrolyte**

Le sol est un amalgame complexe de solides, liquides et gaz, qui font qu'il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qu'il est, dans certains cas, parfaitement inerte et n'a qu'une action tout à fait négligeable. L'agressivité absolue du sol pour un métal découle de ses propriétés physiques et chimiques.

-Comme il est montré à **FigureI.15** (Chapitre I).

### **II.4.2 Résistivité**

La résistivité des sols est une mesure de leur capacité à résister au passage du courant électrique.

La valeur de la résistance du sol peut varier selon l'humidité, la température et la composition chimique.

La mesure de la résistance du sol, nécessite les matériels suivants :

- Un marteau.
- Des sondes d'acier inoxydable.
- Des fils conducteurs.
- Mètre ruban.
- Une Telluromètre.

➤ **Telluromètre**

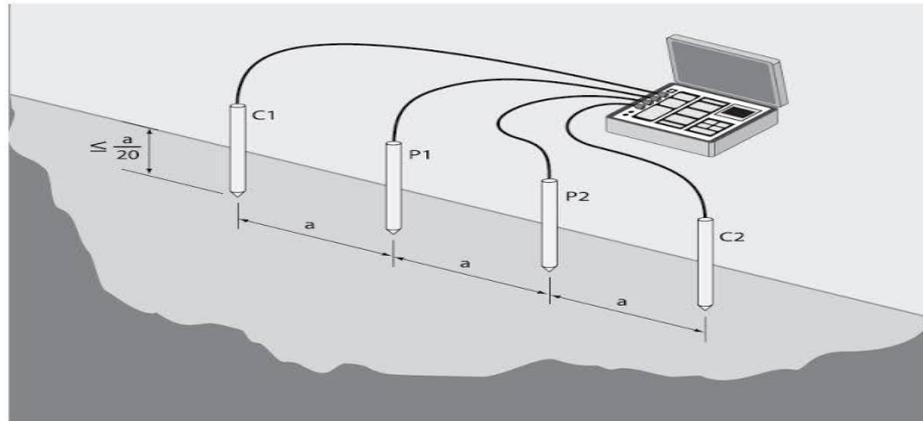
Le telluromètre est un instrument utilisé pour mesurer la résistivité électrique des sols. Il est spécifiquement conçu pour mesurer la résistivité in situ, c'est-à-dire sur le terrain. Le telluromètre envoie un courant électrique à travers le sol et mesure la tension résultante pour calculer la résistivité du sol.



**Figure II.3 :** Le Telluromètre.

➤ **Principe de la méthode**

Il consiste à planter quatre sondes (piquets) en acier inoxydable en ligne droite et équidistantes qu'on relie avec des câbles électriques distant entre eux d'un intervalle égal à « a » et de profondeur « $a/20$ » reliés aux bornes d'appareil. On injecte ensuite un courant continu ou alternatif entre les deux sondes extérieures et on mesure la tension dans les deux piquets internes. Le dispositif est illustré par la Figure II.4. [2]



**Figure II.4.** principes de la mesure de résistivité du sol par la méthode de Wenner (a- distance entre deux piquets,  $a/20$ - profondeur d'enfoncement des piquets)

**Tableau II.2 :** Exemples chiffrés de résistivités.[16]

Electrolyte	Résistivité approximative ( $\Omega$ )
Eau de mer	0.20 à 0.33
Eaux minéralisées	5 à 15
Eaux potables douces faiblement minéralisées	50 à 100
Marais	3 à 8
Argiles et marnes	5 à 20
Tourbières	50 à 200
Alluvions anciennes	10 à 20
Limons des plateaux	30 à 50
Terre sablonneuse	50 à 150
Sables sec/graves	200 à 2000

### **II.4.3 Classification des sols**

L'agressivité des sols, évaluée en fonction de la résistivité est d'autant plus forte que la résistivité est plus faible. Une classification assez communément admise de degré d'agressivité (corrosivité) en fonction de la résistivité du sol est la suivante :

**Tableau II.3** : Degré d'agressivité du sol en fonction de la résistivité.

<b>Degré d'agressivité du sol</b>	<b>Résistivité du sol</b>
Très Fortement agressif	< 10
Fortement agressif	10 - 20
Moyennement agressif	20 - 35
Faiblement agressif	35 - 50
Très faiblement agressif	50 - 100
Non agressif	> 100

### **II.4.4 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. Le revêtement protecteur doit avoir une bonne adhérence mais ne doit pas avoir d'effet corrosif sur la structure à protéger.

### **II.4.5 Le déversoir ou masse anodique**

Le déversoir est un matériau conducteur d'électricité, il est soumis à la corrosion du système électrochimique conduite-sol-déversoir. Son rôle est d'injecter le courant de protection dans l'électrolyte. Il est relié à la borne positive de la source électrique. La valeur mesurée de son potentiel dans le sol, est souvent positive, Plusieurs matériaux sont utilisés comme anodes déversoirs. [19]

Le choix de type d'anodes installer dépend des facteurs suivants :

-le milieu.

- la consommation (durée de vie d'exploitation).
- la densité de courant admissible.
- le prix (fournitures et mise en œuvre).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- Ferrailles (anodes à forte consommation).
- Ferro-silicium (anodes à faible consommation).
- Graphite.

#### ❖ Milieu entourant l'anode (déversoir)

C'est un milieu qui assure une corrosion uniforme de l'anode et maintient autour d'elle une humidité constante ainsi que la résistance de contact anode-sol. Généralement, ces anodes sont livrées dans un sac contenant le régulateur (Backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau, avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement. [15]

Une anode de 20 kg livrée sans Backfill nécessite

- 50 kg de bentonite.
- une grande quantité d'eau.
- 12.5 kg de gypse (sulfate de calcium).



**Figure II.5 :** Le milieu entourant l'anode sacrificielle en Ferro-silicium.

## II.4.6 Joints isolants et câbles de liaison

### ➤ Les joints isolants

Les joints isolants sont des organes de raccordement électriquement discontinu, installés pour assurer une discontinuité électrique entre deux longueurs de canalisation comportant ou non une protection cathodique. En général, dès qu'une canalisation sort du sol pour se raccorder à des installations aériennes, il faut mettre un joint isolant. Parmi les matériaux couramment employés pour la constitution de ces joints figurent les matières plastiques thermodurcissables ou thermoplastiques, Ces dernières permettent grâce à leur résistance élevée, une discontinuité électrique. [15]

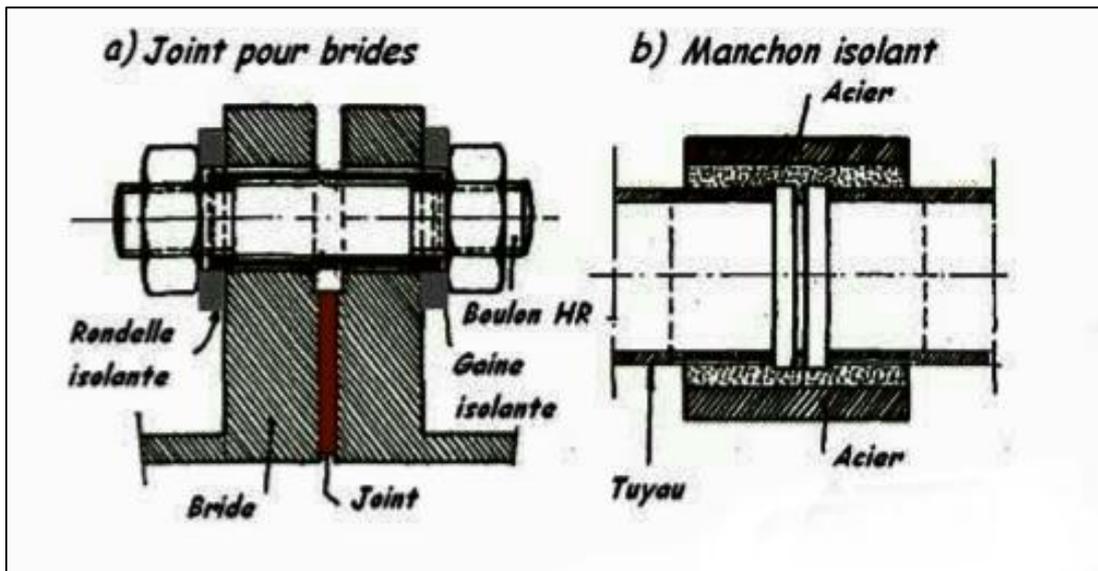


Figure II.6 : Le joint isolant.

### ➤ Les câbles de liaison

Dans le système de protection cathodique, les câbles de liaison doivent être soigneusement choisis pour éviter des pertes de courant. Et conseillé d'utiliser des câbles d'une section minimale de  $25 \text{ mm}^2$  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. [6]

Les principaux critères de choix de câblages sont :

- Très bon isolement par rapport au milieu (en particulier la liaison déversoir).
- Faible résistance électrique.

Le tableau II.2 présente quelques caractéristiques des câbles utilisés.

**Tableau II.4 :** Les sections de câble normalisées à utiliser en fonction de l'intensité.

Intensité (A)	5	10	15	20	35	45	60
Section du câble ( $mm^2$ )	10	16	25	35	50	70	95
Résistance pour 100 m ( $m \Omega$ )	174	112	71	51	36	26	19

Des câbles électriques spécifiques assurent le raccordement entre le générateur, le déversoir et la structure à protéger.

Les câbles électriques les plus utilisés actuellement, pour connecter les différents éléments du système, sont ceux à double isolement type unipolaire avec isolation en polyéthylène, gaine de bourrage et enveloppe extérieur en PVC.



**Figure II.7 :** Les câbles de liaison (conduite, déversoir).

### **II.4.7 Poste de drainage**

Un poste de drainage comprend l'équipement et les matériels nécessaires pour assurer le drainage des courants vagabonds de la structure influencée vers la source de courant continu influençant. Les postes de drainage peuvent être prévus lors de l'étude, mais d'une manière générale, leurs nécessités et leur spécification ne sont établies qu'après la mise en service et pendant la vie du système de protection cathodique.

### **II.4.8 Points de mesure**

Des points fixes de mesures sont nécessaires. [20]

#### **II.4.8.1 Prises de potentiel**

Les prises de potentiel sont prévues pour la mesure de potentiel de la conduite.

#### **II.4.8.2 Prises de courant**

Les prises de courant sont prévues pour la mesure du courant.



**Figure II.8 :** Prises de potentiel et courant.

#### **✓ Observation**

Les câbles des PP et PC doivent être isolés de la paroi de l'offert (soit par un domino ou un autre isolant afin d'éviter le contact avec le métal du coffret).

### **II.4.9 Liaisons électriques**

Différents types de liaisons existent :

- Liaison directe (Shunt).
- Il convient de prévoir des liaisons métalliques de faible résistance.
- Liaison résistante.

- Liaison présentant une résistance électrique suffisante pour limiter le passage de courant.
- Liaison unidirectionnelle (ou liaison de drainage polarisé).
- Liaison qui permet le passage du courant dans un seul sens.

#### **II.4.10 Appareillages électriques auxiliaires**

Il s'agit essentiellement des appareils de coupure, de protection et de mesure installés à poste fixe. [21]

##### **- Outils de coupure**

Ce sont de simples interrupteurs qui permettent d'établir ou d'interrompre l'alimentation du poste de soutirage.

##### **- Appareils de protection**

Lorsque le poste est raccordé à un réseau de distribution, un disjoncteur doit être installé. Cet appareil joue le double rôle d'appareil de coupure et de protection contre les surcharges et sur intensités.

##### **- Appareils de mesure**

Les appareils de mesure ont pour but d'indiquer :

- La tension d'alimentation.
- La tension d'utilisation.
- L'intensité débitée.
- Le potentiel de la structure.
- Le temps de fonctionnement.

#### **II.4.11 Electrode de sulfate de cuivre**

L'électrode de référence généralement utilisée en exploitation est l'électrode au (cuivre /sulfate de cuivre) Cu /CuSO<sub>4</sub>. Elle se compose d'un tube en plastique ou plonge ou barreau de cuivre dans une solution de sulfate de cuivre saturée un poreux (en bois) pour le contact avec le sol. On emploie une telle électrode afin que le contact avec le sol soit toujours fait, avec la même matière. Elle ne se polarise pas et est stable sans le temps.[20]

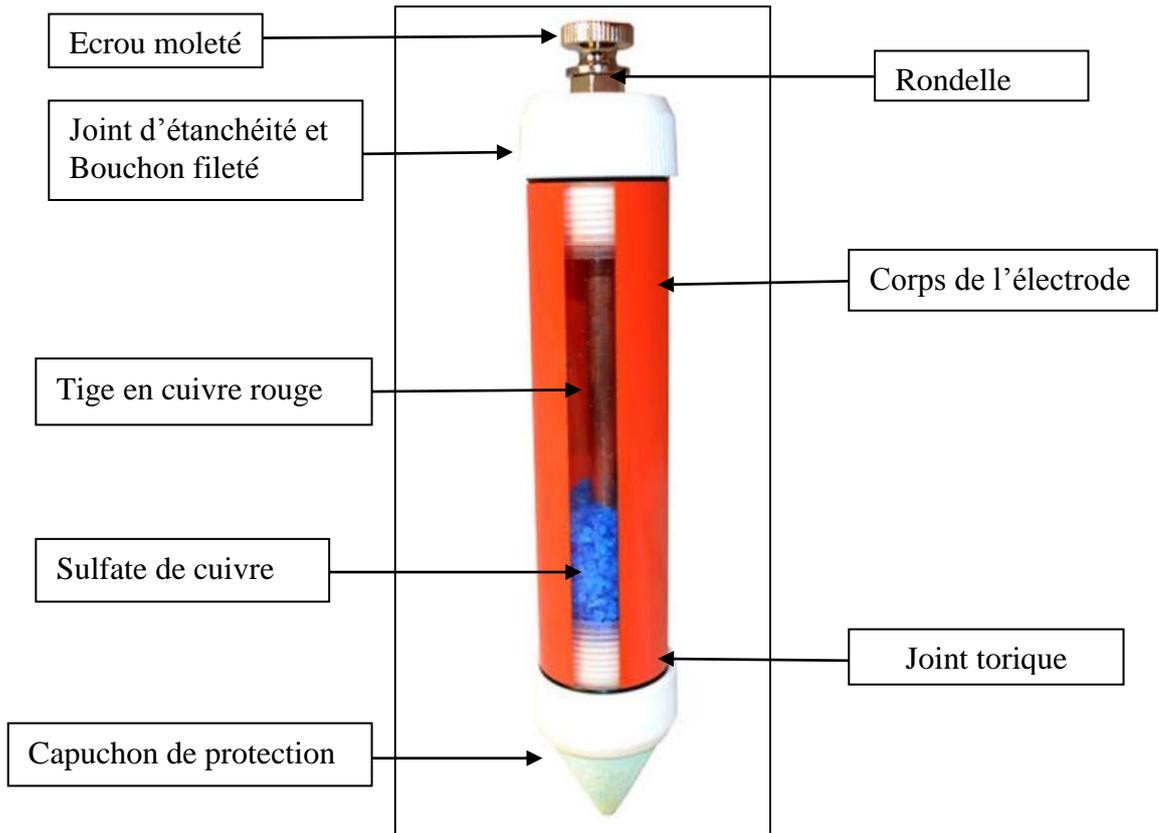


Figure II.9 : Electrode de référence  $Cu/CuSO_4$  pour l'utilisation dans les sols.

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



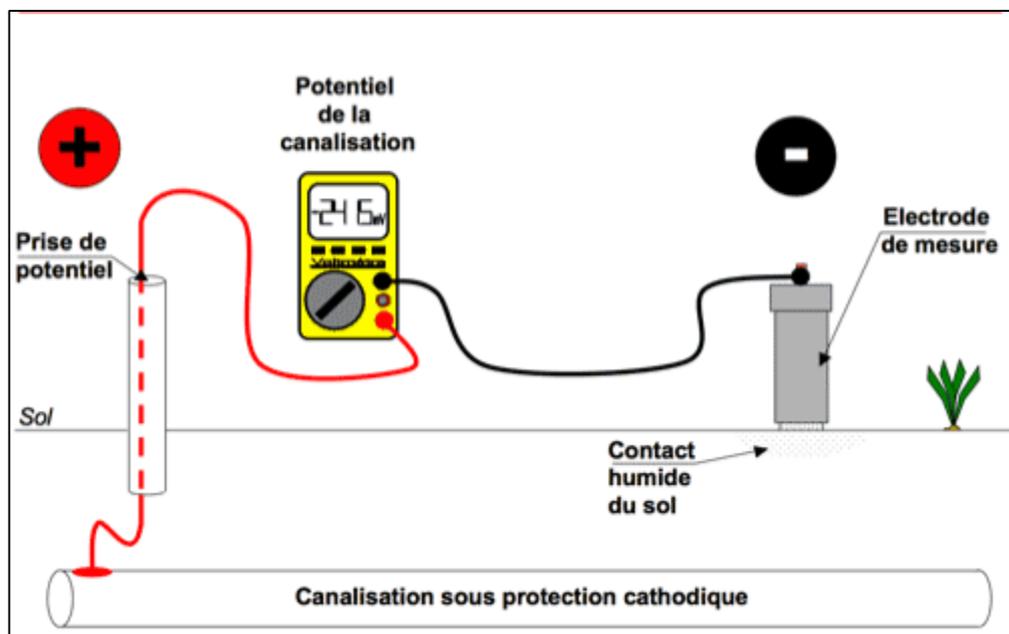
Figure II.10 : Voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de PC.

## II.4.12 Mesure et contrôle

Ils sont destinés à contrôler le potentiel d'une canalisation par rapport au sol. Le nombre de points de mesure dépend de la configuration de l'ouvrage. [22]

### II.4.12.1 mesure du potentiel

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinet de branchement...) par des postes de détente et comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite. On prévoit en général au moins un point de mesure tous les 500 m en zone urbaine et tous les 2 à 4 Km selon les accessibilités en dehors.



**Figure II.11 :** Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.

### II.4.12.2 Mesure de courant

Les courants électriques produits par le phénomène de corrosion ou par la protection cathodique constituent des éléments appréciables dans le contrôle anticorrosion. Ils se mesurent : [22]

- Dans les structures longilignes, pour apprécier le sens et l'intensité d'un courant.
- Par l'extérieur sur les canalisations.
- Dans les interconnexions entre divers systèmes.

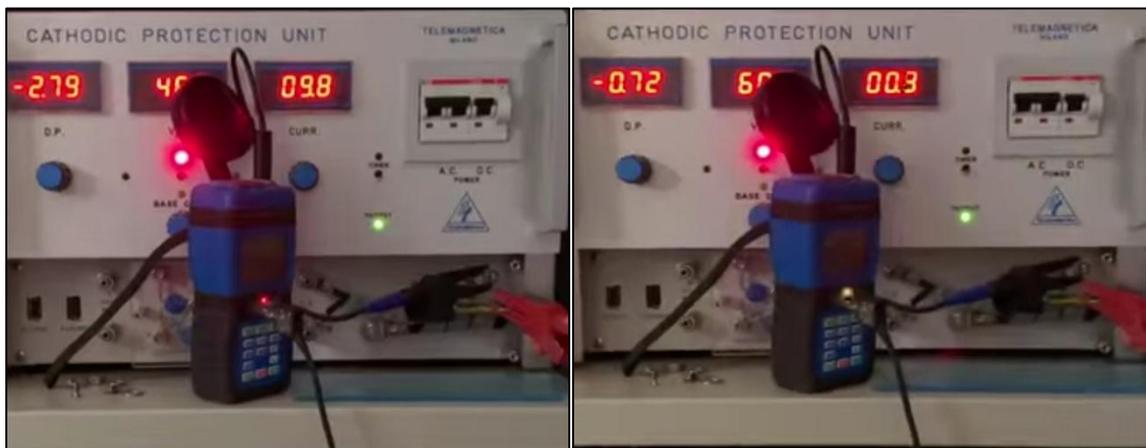
- Dans l'électrolyte, par la détection du champ électromagnétique engendré par le courant de protection issu d'un redresseur.
- Dans l'électrolyte, par des mesures de champ électrique. (Cette méthode ne donne que la direction et l'importance des courants).

### II.4.13 Méthode de recherche de défaut de revêtement

C'est la méthode à courant coupé (ON/OFF). Pour les mesures Marche/Arrêt du potentiel de la conduite, brancher l'interrupteur périodique automatique entre la borne négative du redresseur et le câble de liaison à la conduite à protéger :

- Interrompre l'alimentation électrique par le déclenchement du disjoncteur.
- Déconnecter le câble de la conduite de la borne négative du transfo-redresseur.
- Relier un câble de l'interrupteur à cette borne et le deuxième câble au câble de la conduite.

Brancher l'interrupteur périodique (séquenceur) à la prise d'alimentation électrique, enclencher le disjoncteur et mettez en marche le séquenceur, puis vérifier son fonctionnement en séquence 12/3 secondes.



Interrompre ON

Interrompre OFF

**Figure II.12 :** Méthode de recherche de défaut de revêtement.

#### **Attention**

La déconnexion des deux câbles de la conduite et du déversoir en même temps, risque d'inverser les polarités de leur reconnexion. Il est strictement interdit de connecter le câble de la conduite à la borne positive du redresseur. [22]

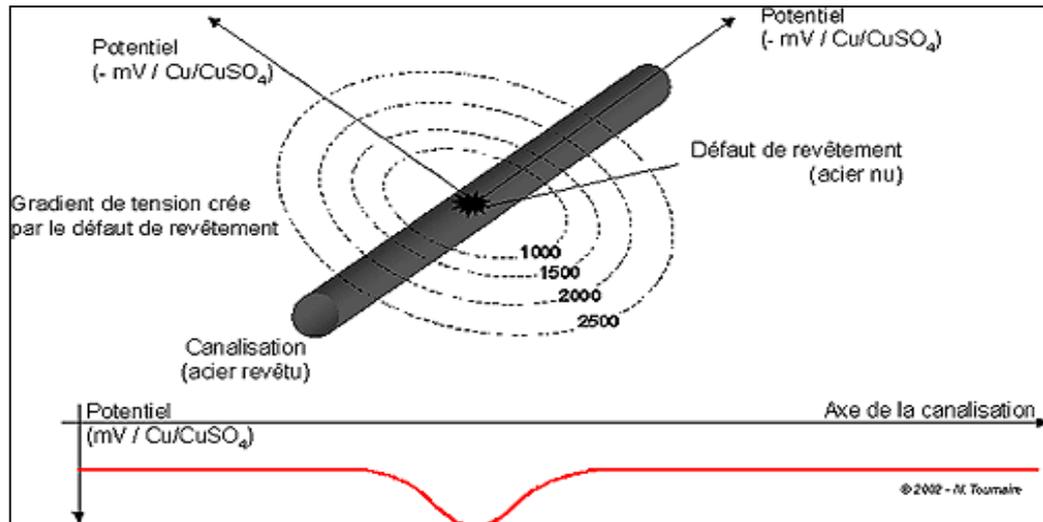


Figure II.13 : Défauts de revêtement.

❖ L'appareillage utilisé est composé des éléments suivants :

- 1 interrupteur périodique.
- 1 récepteur voltmètre : contrôle de sensibilité et amplificateur avec indication visuel.
- 1 paire d'électrodes Cu/CuSO<sub>4</sub> saturé.
- Les électrodes sont tenues par un opérateur se déplaçant bras écartés au-dessus de la canalisation et en contact avec le sol.

#### II.4.14 Interprétation des résultats de mesure

L'origine des variations significatives des grandeurs mesurées, constatées entre deux campagnes de mesure excepte les variations normales inter saisonnières, doit être recherchée :[6]

- Erreur de mesure.
- Shunte ouvert.
- Raccord isolant défectueux.
- Défaut d'isolement.

Nous avons résumé toutes l'interprétation dans le tableau suivant :

**Tableau II.5** Résumé toutes l'interprétation des résultats de mesure.

<b>Constats</b>	<b>Causes</b>	<b>Vérifications</b>
-Potentiel conduite /sol>-1000mv -Dégradation du potentiel entre 2 campagnes de mesures	-erreur de mesure  -Câble de pp coupé -défaut de protection passive  -courant de protection insuffisante	-mauvais contact entre l'électrode et le sol -mauvais entretien de l'électrode de référence -Réparer le câble -contact avec un ouvrage tiers -raccords isolants défectueux -détérioration du revêtement -vérification s'il à eu accroissement de la zone protégée -résistance de déversoir élevée -déversoir consommé ou câble coupé
-Accroissement sensible du Courant de protection		-joint isolant défectueux -contact avec un ouvrage tiers -un défaut d'isolement important de la conduite
-Abaissement du Potentiel conduite/sol Entre 2campagnes de mesure	-erreur de mesure -modification des réglages du dispositif de protection -ouverture de shunt d'un raccord isolant (une partie de réseau se trouve hors protection cathodique -variation inter saisonnière	-Voir plus haut  -rétablir le shunt  -période d'hiver le déversoir arrosé
-baisse de courant de protection	-ampèremètre défectueux (fusible) -câble de liaison au redresseur coupé -déversoir résistant ou consommé	-à remplacer  -à réparer  -arroser le déversoir
-absence de courant	-fusible d'entrée de redresseur est défectueux (fusionné) aux diodes claquées -redresseur en position d'arrêt	-remplacer le fusible -remplacer la diode  -remettre en marche

### **II.4.15 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous décrivons l'approche qui permet la conception du système de protection cathodique par courant imposée, nous avons également abordé certaines mesures nécessaires et à la fin nous avons résumé toute l'interprétation des résultats de mesure.

# *Chapitre III*

## *Dimensionnement des installations de protection cathodique par courant imposé*

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons déterminer les formules ainsi que les données de bases permettant l'étude et le calcul exact des installations de protection cathodique. Dans ce contexte, nous allons déterminer :

- La durée d'exploitation prévue pour l'ouvrage à protéger.
- Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage : longueur, diamètre, épaisseur, etc.
- Les résistivités du sol le long de la trace.
- Valeur d'isolement de la structure revêtue.

### III.2 Mesure de résistivité des sols

Elle est généralement effectuée avant la pose de l'ouvrage. SONELGAZ utilise la méthode des quatre piquets ou du Docteur WENNER qui consiste à enfoncer dans le sol en ligne droite et équidistants quatre piquets. On alimente les piquets extrêmes à l'aide d'un générateur de courant et on mesure aux bornes des deux piquets intermédiaires la chute de potentiel. En faisant varier la distance d'écartement des électrodes (a) on peut mesurer la résistivité à différentes profondeurs.[2]

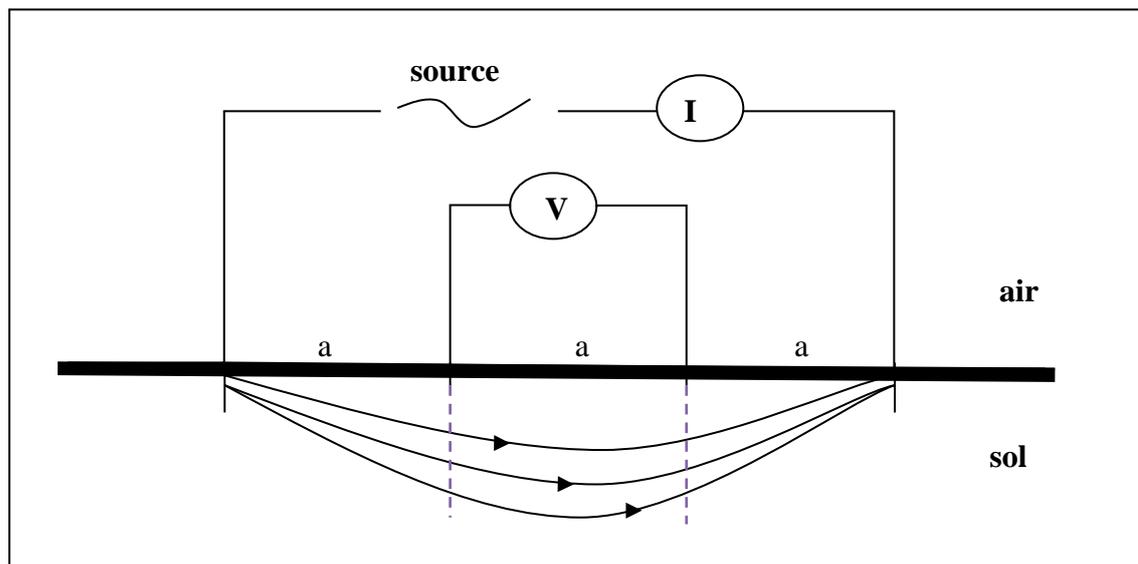


Figure III.1 : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.

La résistivité du sol s'exprime selon WENNER comme suit :

$$\rho_{sol} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Ou 
$$\rho_{sol} = 2\pi a R \quad (1)$$

Où,

$\rho_{sol}$  : Résistivité moyenne du sol en  $\Omega.m$ .

$a$  : Espacement entre les piquets en mètre.

$R$  : Résistance moyenne du sol en  $\Omega$ .

$\Delta V$  : Différence de potentiel en volts entre piquets.

$I$  : Intensité de courant en ampère entre les piquets.

Avec :  $\frac{\Delta V}{I} = R$  (mesurée sur site).

✓ Les résultats de dimensionnement de la résistivité  $\rho_{sol}$  de la ligne d'état de BOUKARANA se présentent comme suit :

$a = 2.8$  m

$R = 2.60 \Omega$  mesuré sur le site

$\pi = 3.14$

$$\rho_{sol} = 2 \times 3.14 \times 2.8 \times 2.6$$

$$\rho_{sol} = 45.71 \Omega m$$

**Tableau III.1:** Résultats de dimensionnement de la résistivité  $\rho_{sol}$  de région de BOUKARANA.

$a(m)$	$R(\Omega)$	$\rho_{sol}(\Omega m)$
2.8	2.60	45.71 Faiblement agressif

Les sols à faible résistivité sont plus corrosifs que les sols à haute résistivité. Le Tableau II.3 montre 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.

### III.3 Détermination de la valeur de la résistance d'isolement

Dans ce cas étude, nous ne pouvons pas calculer la valeur de la résistance d'isolement car il n'y a pas assez de données, mais nous utilisons un type de conduit (Réseau maillé de canalisations enterrées avec revêtement type C) qui est valorisé la valeur de la résistance d'isolement entre (5000 à 15000)  $\Omega m^2$ . [17]

### III.4 Détermination des formules pour le calcul de la protection cathodique

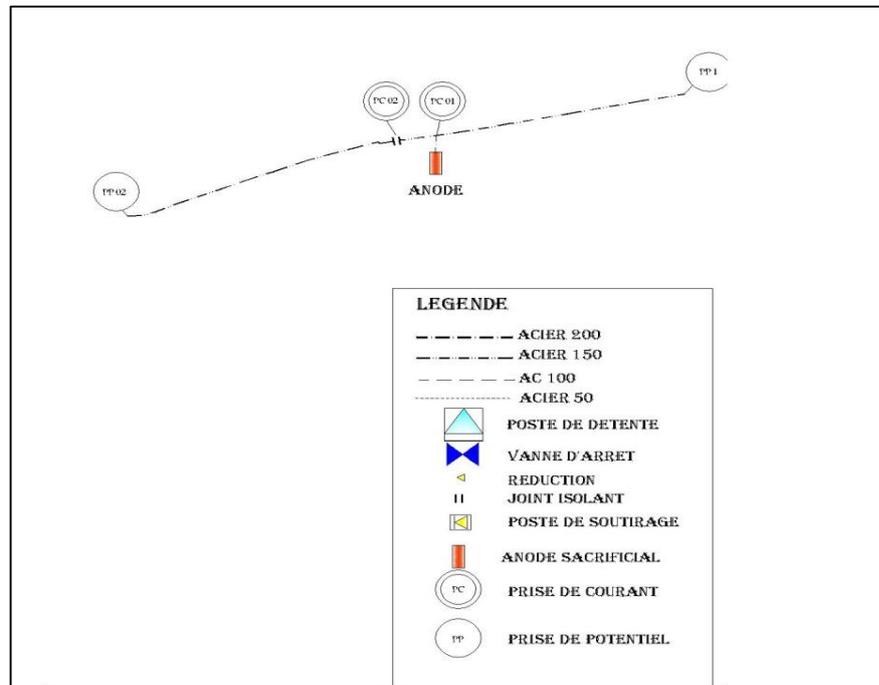
#### III.4 .1 Protection par anode sacrificielle

Ce mode de protection n'est utilisé que pour la protection des réseaux peu étendus (petites longueurs), doté d'un revêtement de bonne qualité (une bonne résistance

d'isolement) et pour lesquels on peut être sûr que des extensions ne seront réalisées dans le futur.

➤ Le réseau de gaz DP BOUKARANA supposons qu'on a un réseau acier revêtu en revêtement en type C, et constitué de :

1.35KM d'acier diamètre 150mm.



**Figure III.2**Plan de réseau d'acier de région BOUKARANA. [23]

Les caractéristiques des anodes en Mg à poser sont comme suit :

- Le poids de l'anode = 17 Kg.
- La longueur de l'anode  $L = 73 \text{ Cm}$ .
- Le diamètre de l'anode  $d = 16 \text{ Cm}$ .

### III.4 .1.1 Calcul de résistance d'anode

La résistance d'anode est calculée comme suit : [24]

$$R_A = \frac{\rho_{SOL}}{2\pi L} \times Ln \frac{2L}{d} \quad (2)$$

$$R_A = 0.366 \times \frac{\rho_{SOL}}{L} \times Log \frac{2L}{d}$$

Où,

$R_A$  : Résistance d'anode en  $\Omega$ .

$\rho_{sol}$  : Résistivité moyenne du sol en  $\Omega m$ .

$L$ : Longueur de l'anode en  $m$ .

$Ln$ : Logarithme népérien.

$d$ : Diamètre de l'anode en  $m$ .

$Log$  : Logarithme décimal.

Sachant que  $Ln(x) = 2.33 \log(x)$

Nous calculons et saisisse  $R_A$  comme suit,

$$R_A = 0.366 \times \frac{\rho_{SOL}}{L} \times Log \frac{2L}{d}$$

$$R_A = 0.366 \times \frac{45.71}{73 \times 10^{-2}} \times Log \frac{2 \times 73 \times 10^{-2}}{16 \times 10^{-2}}$$

$$R_A = 28.87 \Omega$$

### III.4.1.2 Détermination du courant débité par l'anode

Sachant que le potentiel est donné par,

$$U = I_A \times R_A \quad (3)$$

$$I_A = \frac{U}{R_A} = \frac{U_S - U_A}{R_A}$$

Où,

$U_S$  Est le potentiel seuil de protection entre  $-0.85V$  à  $-1V$  (mesurer par rapport à l'électrode **Cu/CuSO4**).

$U_A$ : Potentiel naturel de l'anode =  $-1.55V$  pour le Mg et  $-1.1V$  pour le Zn.

$I_A$ : Débit de l'anode en A.

$R_A$ : Résistance d'anode.

$$I_A = \frac{U}{R_A} = \frac{U_S - U_A}{R_A} = \frac{-1 - (-1.55)}{28.87} = 0.019$$

$$I_A = 19 \text{ mA}$$

### III.4.1.3 Détermination du courant de protection du réseau

Le courant de protection est calculé selon la formule suivante. [2]

$$I_X = i \times s \rightarrow i \times \pi \times D_{ext} \times L \quad (4)$$

$$(s = \pi \times D_{ext} \times L) \quad (5)$$

Où,

$I_X$ : Courant de protection du tronçon calculer pour chaque diamètre en A

$D_{ext}$  : Diamètre extérieur du tube

$L$  : Longueur du tube

$i$ : Densité de courant en  $mA/m^2$

Le calcul du courant  $i$  est effectué par la formule.

$$i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}} \quad (6)$$

Où,

$E_{rep}$ : Potentiel de la conduite au repos (sans protection) entre  $-0.75V$  à  $-0.4V$  (mesurer par rapport à l'électrode **Cu/CuSO4**).

$E_{prot}$ : Potentiel seuil de la conduite sous protection  $-1V$  (mesurer par rapport à l'électrode **Cu/CuSO4**).

$R_{is}$  : Une valeur estimée par le tableau **II.2** en fonction du revêtement.

Après une application numérique, nous trouvons :

$$s = \pi \times D_{ext} \times L = 3.14 \times 159.3 \times 10^{-3} \times 1350 = 675.27 \text{ m}^2$$

$$s = 675.27 \text{ m}^2$$

$R_{is}$  Estimée  $10000 \Omega m^2$

$$i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}} = \frac{-0.75 - (-1)}{10000} = 0.05 \text{ mA/m}^2$$

$$i = 0.025 \text{ mA/m}^2$$

$$I_x = i \times s = 0.025 \times 675.27 = 0.016A$$

$$I_x = 0.016A$$

#### **III.4.1.4 Détermination du nombre d'anode pour un tronçon**

Afin de déterminer le nombre d'anode pour un tronçon, nous utilisons la formule suivante :

$$N = \frac{I_x}{I_A} \quad (7)$$

Où,

$I_A$ : Débit de l'anode en A.

$I_x$ : Courant de protection du tronçon calculer pour chaque diamètre en A.

AN :

$$N = \frac{I_x}{I_A} = \frac{0.016}{0.019} = 0.84 \cong 1$$

Alors, le nombre d'anode nécessaire pour protéger cette conduite est égal à : 1

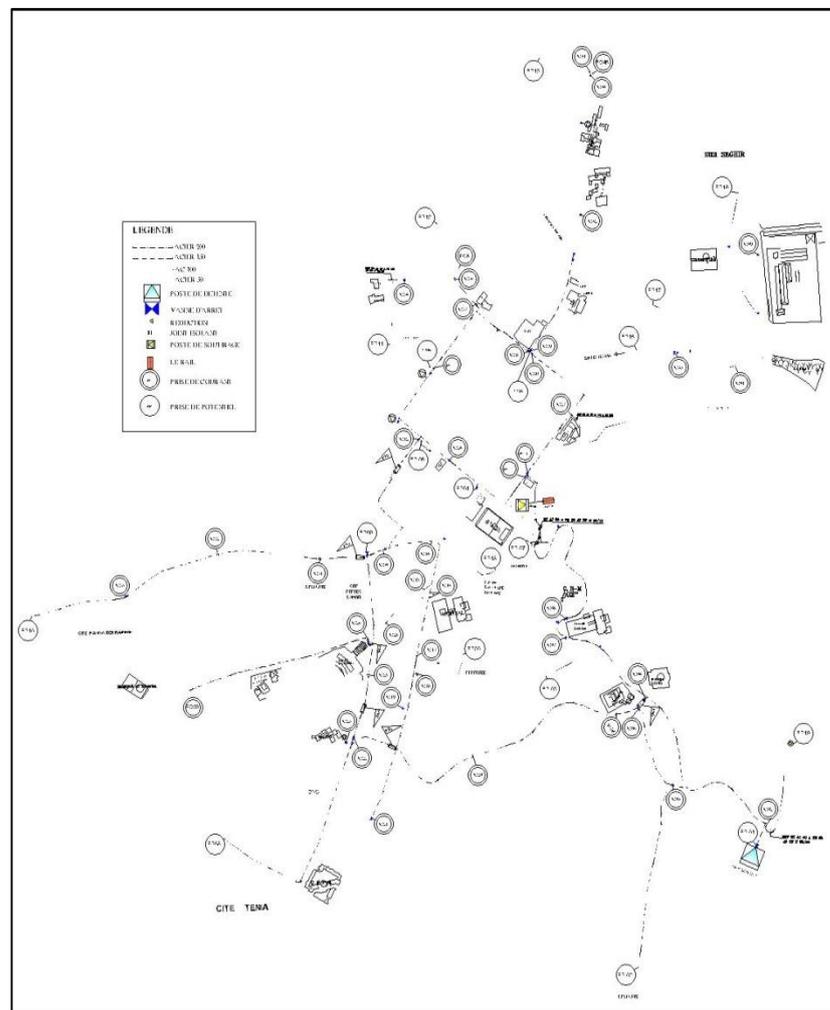
$N = 1$  Anode.

De cela, on peut dire que le nombre d'anodes égal à « 1 » est dû à la résistance d'isolement qui est moyenne ( $15000 \Omega m$ ) et à la longueur du réseau ( $1350m$ ) petite longueur.

Il est, donc recommandé de protéger par anode sacrificielle que le cas des réseaux peu étendus (petites longueurs), doté d'un revêtement de bonne qualité (une bonne résistance d'isolement).

### III.4.2 Protection par poste soutirage

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante. Les Conduites enterrées revêtues, dont la longueur dépasse quelques kilomètres. La figure III.3 montre le plan de réseau d'acier de région DP MILA [23]. Dans ce cas, on a un réseau maillé de canalisations enterrées avec revêtement type C, et constitué de :



**Figure III.3 : Plan de réseau d'acier de région MILA. [23]**

#### ➤ Le réseau de région Mila

La longueur totale (ACIER) est égale à 15.500Km.

- Résistivité de l'acier  $\rho_a = 17 \times 10^{-8} \Omega m$ .

- Résultats de dimensionnement de la résistivité  $\rho_{sol}$  de la région de Mila

Pour calculer  $\rho_{sol}$  nous utilisons la méthode de Wenner :

$$\rho_{sol} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Où

$$\rho_{sol} = 2\pi a R$$

$$a = 2.8 \text{ m}$$

$$R = 1.71 \Omega \text{ mesuré sur le site}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\rho_{sol} = 2 \times 3.14 \times 2.8 \times 2.6$$

$$\rho_{sol} = 32.21 \Omega m \implies \text{Le sol est moyennement agressif.}$$

### III.4.2.1 Caractéristiques physique

La surface de la conduite est calculée avec la formule suivante :

$$S = \pi \times D_{ext} \times L$$

**Tableau III.2:** Caractéristiques physique des conduites acier de DP Mila.

Diamètre Nominale ( mm )	Longueur ( m )	Diamètre extérieur ( mm )	Epaisseur ( mm )	Surface ( m <sup>2</sup> )
200	4694	219.1	3.9	3229
150	7975	160.3	3.6	4006.5
100	2829	114.3	3.6	1012.5
Surface total				8248

### III.4.2.2 Paramètres pour le dimensionnement de la protection

Le dimensionnement de la protection cathodique est un travail de spécialiste. Néanmoins, il est utile de donner quelques principes de base. Il s'agit tout d'abord de mesurer, quand cela est possible, mais le plus souvent d'estimer par le calcul.

Le besoin en courant cathodique de la structure, c'est-à-dire, le courant le qu'elle doit recevoir pour que le seuil de protection soit atteint.

Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience donne les valeurs de densité de courant cathodique couramment utilisées dans les sols ou dans le besoin en courant de protection sert à la détermination de la masse et du nombre d'anodes, l'eau de mer pour

l'acier au carbone. Ainsi, qu'au dimensionnement électrique de la source de courant du poste de soutirage (protection par courant imposé).

Dans ce cas, le courant délivré doit être estimé au mieux, non seulement pour des considérations économiques, mais aussi à cause de certains effets néfastes tels que le décollement des revêtements lorsque le courant est trop important l'étude permettra de définir :

- Le type et la puissance des installations de protection.
- Leur implantation géographique, en particulier celles des masses anodiques.
- Le nombre et le positionnement des dispositifs de contrôle (prises de potentiels).

Avant de déterminer les formules de calcul, on doit expliquer les principales notions, et donner certains paramètres qui entrent dans les calculs à savoir.

#### **III.4.2.2.1 Potentiel d'injection**

Le potentiel d'injection est défini comme étant l'abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point de soutirage afin d'avoir aux extrémités de la conduite des valeurs inférieures aux seuils de protection ( $< -850 \text{ mV}$  (mesurer par rapport à l'électrode  $\text{Cu/CuSO}_4$ )).[10]

#### **III.4.2.2.2 Courant de protection**

Il est défini comme étant l'intensité de courant nécessaire à injecter dans la structure afin d'assurer un abaissement du potentiel par rapport au critère de protection.

#### **III.4.2.2.3 Résistance longitudinale de la conduite**

Les ouvrages métalliques traversés par le courant de protection sont considérés comme des conducteurs, ces conducteurs présentent une résistance au passage d'un courant électrique.

Cette résistance est appelée résistance longitudinale et dépend de la nature du matériau

et de ses dimensions.

Cette résistance est donnée par la formule suivante :

$$r = \frac{\rho_a}{s} \quad (8)$$

Et 
$$s = \pi \times e \times D_{ext}$$

Donc

$$r = \frac{\rho_a}{\pi \times e \times D_{ext}}$$

Où,

$r$ : Résistance longitudinal de la conduite en  $\Omega m^{-1}$

$\rho_a$ : Résistivité de l'acier qui varie entre  $17 \times 10^{-8}$  et  $24 \times 10^{-8} \Omega m$

$e$ : L'épaisseur de la conduite en  $m$ .

$D_{ext}$ : Diamètre extérieur de la conduite en  $m$

#### **III.4.2.2.4 Résistance transversal de la conduite**

La résistance transversale  $R$  est exprimée en  $\Omega m$ , est la résistance électrique par rapport au sol d'un mètre de canalisation revêtue :[24]

$$R = \frac{R_{is}}{\pi \times D_{ext}}$$

Où, 
$$R = \frac{\rho_a}{2\pi} \times \left( Ln \frac{8L}{D_{ext}} - 1 \right) \quad (9)$$

$R$  : Résistance transversale de la conduite en  $\Omega m$ .

$R_{is}$  : Résistance d'isolement en  $\Omega m^2$  calculée ou estimée.

$D_{ext}$ : Diamètre extérieur de la conduite en  $m$ .

$\pi \times D_{ext}$  : Périmètre.

#### **III.4.2.2.5 Coefficient d'atténuation**

Il est aussi appelé la constante de la distribution du potentiel le long de la conduite, il traduit l'abaissement du potentiel le long de bras de potentiel.

Il est donné par la relation suivante :[24]

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R}} \quad (10)$$

Où,

$r$ : Résistance longitudinal de la conduite en  $\Omega m^{-1}$

$R$  : Résistance transversale de la conduite en  $\Omega m$

Ce coefficient varie de 1 à  $20 \times 10^{-5} m^{-1}$ , il est inversement proportionnel à la valeur d'isolement, plus la valeur d'isolement est importante plus le  $\alpha$  est faible et plus la portée de soutirage est importante.

#### **III.4.2.2.6 Résistance caractéristique**

La résistance caractéristique d'un tronçon représente la résistance de terre d'une conduite de longueur infinie,

$$R_c = \frac{\sqrt{r \times R}}{2} \quad (11)$$

Où,

$r$ : Résistance longitudinal de la conduite en  $\Omega m^{-1}$ .

$R$ : Résistance transversale de la conduite en  $\Omega m$ .

### III.4.2.2.7 Calcule des paramètres : $r, R, \alpha, R_c$

Dans ce cas, la résistance  $R_{is}$  estimée est  $10000 \Omega m^2$  et la résistivité  $\rho_a$  est égale à  $17 \times 10^{-8} \Omega m$ .

**Tableau III.3:** Résultats de dimensionnement des valeurs numériques de paramètres  $r, R, \alpha, R_c$ .

Diamètre Nominale (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Epaisseur (mm)	Résistance $r$ $\Omega m^{-1}$	Résistance $R$ $\Omega m$	Coefficient $\alpha$ $m^{-1}$	Résistance $R_c$ $\Omega$
200	219.1	3.9	$0.8 * 10^{-5}$	$14.55 * 10^3$	$0.234 * 10^{-4}$	0.17
150	160.3	3.6	$1.21 * 10^{-5}$	$20 * 10^3$	$0.245 * 10^{-4}$	0.25
100	114.3	3.6	$2.12 * 10^{-5}$	$35 * 10^3$	$0.246 * 10^{-4}$	0.40
TOTAL			$4.13 * 10^{-5}$	$69.55 * 10^3$	$0.73 * 10^{-4}$	0.82

### III.4.2.2.8 Calcul du courant de protection

La densité de courant exprimé en  $mA/m^2$  est calculée par la formule suivante.[22]

$$i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}}$$

Où,

$E_{rep}$ : Potentiel de la conduite au repos (sans protection) entre  $-0.75V$  à  $-0.4V$  (mesurer par rapport à l'électrode **Cu/CuSO4**).

$E_{prot}$ : Potentiel seuil de la conduite sous protection  $-1V$  (mesurer par rapport à l'électrode **Cu/CuSO4**).

Pour un bon revêtement on à  $R_{is}$  varie entre  $5000$  et  $15000 \Omega.m^2$ .

On suppose que :  $R_{is} = 10000 \Omega m^2$

$$i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}} = \frac{-0.44 - (-1)}{10000} = 0.054 mA/m^2$$

La longueur du réseau à protéger est de  $15.500 Km$

Sa superficie est de  $8248m^2$ .

Donc, le courant est égal à :

$$I = i \times s$$

$$I = 0.054 \times 8248 = 445.39 \text{ mA}$$

$$I = 0.445 \text{ A}$$

Pour cette valeur, nous rajoutant 1A de part et d'autre de l'emplacement du soutirage et ceci pour les futures extensions, ce qui donne un courant de  $I_s = 1.445A$

**Tableau III.4:** Résultats de dimensionnement du courant de protection.

$E_{rep}(V)$	$E_{prot}(V)$	$R_{is}(\Omega m^2)$	$i(mA/m^2)$	$s(m^2)$	$I(A)$
0.44	1	10000	0.054	8248	1.445

On note que le courant à la fin de l'exploitation est relativement élevé par rapport à celui nécessaire au début de l'exploitation ; cela serait dû au revêtement. En effet au début de l'exploitation, le revêtement à toutes ses caractéristiques donc il participe fortement à la protection.

Ce qui réduit l'impact de la protection active, mais au fil du temps le revêtement (la protection passive) perd de ses qualités, et donc il faut plus de courant pour assurer la protection de la structure.

### III.4.2.2.9 Calcul des caractéristiques du rail

#### ✓ Calcul de masse

La masse de métal déposé sur une cathode, ou la masse de métal consommé à l'anode est proportionnelle à la quantité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique  $M$  du métal, et inversement proportionnelle à sa valence  $n$ .

Si un courant de 1A sort de la canalisation, on a d'après la loi de FARADAY une masse perdue de :[25]

$$m = \frac{1}{96500} \times \frac{M}{n} \times I \times t \quad (12)$$

Où,

$m$  (9,15 Kg) : Masse du métal déposée en grammes.

$M$ : Masse atomique du même métal en grammes.

$n$  : Valence du métal (nombre d'électron échangés).

$I$ : Intensité du courant en ampères.

$t$  : La durée de vie du rail voulue (20 à 30 ans) en secondes.

Donc la masse du rail pour 1,445A à une durée de vie de 30 ans.

Afin de tenir compte de l'hétérogénéité du sol et de la répartition non uniforme du courant sur le rail, on introduira un coefficient de sécurité de deux (2) :

Consommation du rail :

$$9,15(\text{kg/A} \times \text{ans}) \times 1,445(\text{A}) \times 30(\text{ans}) \times 2(\text{Coeff}) = 793.30\text{kg}$$

**Tableau III.5:** Résultats de dimensionnement de la masse du rail *M*.

I(A)	T (ans)	M (Kg)
1.445	30	793.30

**✓ Calcul de la résistance spécifique d'isolement après une durée D'exploitation :**

La résistance spécifique d'isolement après une durée d'exploitation est donnée par.

$$R_{is(t)} = R_{is} \times \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta t} \quad (13)$$

Où,

$R_{is}$  : Résistance d'isolement du revêtement initial ( $\Omega m^2$ )

$\beta$ : Coefficient de vieillissement ( $1/\text{ans}$ ) = 0.126.

$t$  : Durée d'exploitation (30 ans).

$$R_{is(t)} = 10000 \times \frac{2.06}{3.78}$$

$$R_{is(t)} = 10000 \times 0.545$$

$$R_{is(t)} = 5450 \Omega m^2$$

On remarque que la résistance d'isolement du revêtement après une durée d'exploitation (30 ans) diminue.

Cette diminution fait augmenter le courant de protection.

**ex:**

$$R_{is(t)} = 5450 \Omega m^2$$

$$I = i \times s \quad Et \quad i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}} \quad \rightarrow \quad I = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is(t)}} \times s$$

$$I = 0.847 + 1 = 1.847\text{A}$$

**✓ Calcul de la longueur**

On à 1 mètre de rail = 46kg.

$$L = \frac{M}{46} \quad (14)$$

$$L = \frac{793.30}{46} = 17.24 \text{ m}$$

✓ **Calcul de la résistance de terre d'un déversoir**

La résistance de terre d'un déversoir doit être calculée pour être compatible avec les possibilités du générateur de courant continu, qui fournit le courant nécessaire pour la protection du réseau, compte tenu des extensions prévisibles. Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions et de la résistivité du sol :[16]

❖ Pour le rail posé horizontalement :

$$R = \frac{0.366 \times \rho_{sol}}{L} \times \left[ \log \frac{3L}{2d} + \log \frac{2L}{8h} \right] \quad (15)$$

Où,

R: Résistance de terre d'un déversoir en  $\Omega$

$\rho_{sol}$  : Résistivité du sol en  $\Omega m$

L : Longueur du rail en m

d : Diamètre du rail en m = 0.10m

h: Profondeur de pose du rail en m

$$R = \frac{0.366 \times \rho_{sol}}{L} \times \left[ \log \frac{3L}{2d} + \log \frac{2L}{8h} \right]$$

$$R = \frac{0.366 \times 32.21}{17.24} \times \left[ \log \frac{3 \times 17.24}{2 \times 0.10} + \log \frac{2 \times 17.24}{8 \times 1.8} \right]$$

**Tableau III.6 :** Résultats de dimensionnement de la résistance de terre d'un déversoir  
R (Pour le rail posé horizontalement).

$\rho_{sol}(\Omega m)$	L(m)	d(m)	h(m)	R( $\Omega$ )
32.21	17.24	0.10	1.8	1.89

**III.5 Détermination de la puissance de soutirage**

Le dimensionnement du redresseur est donné par la tension, l'intensité et la puissance.

$$P = \frac{U \times I}{\eta} \quad (16)$$

On à  $U = R \times I \rightarrow P = \frac{R \times I^2}{\eta}$

Où,

$\eta$ : Le rendement du redresseur en générale il est de 60 à 75 %

R : la résistance du circuit =  $\Sigma R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

R1 : résistance du déversoir/sol= 1.89 $\Omega$

R2 : résistance de la conduite /sol= 0.5  $\Omega$

R3 : résistance de la conduite

$$R_3 = \frac{\rho_a \times L_t}{S_t} \quad (17)$$

$$S_t = \pi \times D_{ext} \times e$$

**Tableau III.7:** Résultats de dimensionnement de la surface.

Diamètre Nominale ( mm )	Diamètre extérieur (mm)	Epaisseur (mm)	Surface (m <sup>2</sup> )
200	219.1	3.9	2.68 × 10 <sup>-3</sup>
150	160.3	3.6	1.81 × 10 <sup>-3</sup>
100	114.3	3.6	1.29 × 10 <sup>-3</sup>
<b>S<sub>t</sub></b>			<b>5.78 × 10<sup>-3</sup></b>

La longueur totale (ACIER) = 15.500 Km

La résistivité  $\rho_a = 17 \times 10^{-8} \Omega m$

$$R_3 = \frac{17 \times 10^{-8} \times 15500}{5.78 \times 10^{-3}}$$

$$R_3 = 0.45 \Omega$$

R4 : résistance des câbles elle est fonction de l'intensité et de la section, généralement

Elle varie entre 0.279 et 0.07  $\Omega = 0.174 \Omega$ .

**Tableau III.8:** Résultats de dimensionnement de la puissance du soutirage.

R( $\Omega$ )	I(A)	U(V)	$\eta$ (%)	P(watt)
3	1.445	4.33	60	10.44

### ❖ Valeurs des potentiels

Dans les calculs de protection cathodique, on distingue en général pour les conduites enterrées trois potentiels. Ils sont donnés par rapport à l'électrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

### **-Potentiel naturel**

Ce potentiel est noté «  $E_n$  », c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol.

### **-Potentiels de protection ( $E_{pmax}$ , $E_{pmin}$ )**

Les potentiels de protection sont considérés comme un intervalle entre une valeur de protection maximum ( **$E_{max}$** ) et une valeur de protection minimum ( **$E_{min}$** ) auxquelles le métal ne s'oxyde pas.

Le potentiel  **$E_{pmax}$**  est choisi en fonction du type de revêtements. Car certains revêtements ne supportent pas des potentiels trop négatifs. Donc le potentiel de protection est limité. Tandis que le potentiel  **$E_{pmin}$**  est relevé à partir du diagramme de Pourbaix.

Pour l'acier la plus petite valeur (valeur absolue) est de  **$850mV$**

### **✓ Gain de potentiel ( $E_{amax}$ , $E_{amin}$ )**

C'est la différence du potentiel que prend le métal par rapport au potentiel naturel lorsqu'il connecte au poste de soutirage. On distingue un gain de protection maximum et minimum, notés respectivement  **$E_{amax}$**  et  **$E_{amin}$**

$$E_{a_{max}} = E_{p_{max}} - E_n \text{ Et } E_{a_{min}} = E_{p_{min}} - E_n \quad (18)$$

**Tableau III.9:** Les valeurs numériques de potentiels.

Potentiels	(mV)/Cu/CuSO4
Potentiel naturel ( $E_n$ )	-450
Potentiel de protection maximum ( $E_{p_{max}}$ )	-1250
Potentiel de protection minimum ( $E_{p_{min}}$ )	-950
Gain de potentiel max ( $E_{a_{max}}$ )	-800
Gain de potentiel min ( $E_{a_{min}}$ )	-500

### **✓ Coefficient, K, tenant compte des postes voisins**

Dans la plupart des temps les canalisations de transport et distribution de gaz sont assez longues.

Un seul poste de soutirage ne suffit pas à livrer le courant nécessaire pour protéger la canalisation. C'est pourquoi on tient compte d'un facteur, **K**, dans les calculs de la longueur de protection. Ce coefficient est donné par la relation suivante : **[15]**

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left[ \left( \frac{Ea_{min}}{Ea_{max}} \right)^2 \left( \frac{2 \times \pi \times R_c \times \gamma + \rho_{sol}}{2 \times \pi \times R_c \times \gamma} \right) \right]}} \quad (19)$$

$$K = 0.581$$

Où  $\gamma$  représente la distance entre la masse anodique et la conduite à protéger ( $m$ ).

**Tableau III.10 :** Résultats de dimensionnement de la Coefficient **K**.

$Ea_{max}(mV)$	$Ea_{min}(mV)$	$R_c(\Omega)$	$\rho_{sol}(\Omega m)$	$\gamma(m)$	$K$
-800	-500	0.82	32.21	50	0.581

✓ **Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage  $L_p$**

La longueur de protection «  $L_p$  » représente la longueur maximale de conduite qui peut être protégée à l'aide d'un courant fourni par un poste de soutirage. En d'autre terme c'est la porte du poste de soutirage.

Un poste de soutirage à deux bras de protection, c'est-à-dire, il est judicieux de placer le poste de soutirage au milieu afin d'assurer une portée de protection plus importante.  $L_p$  s'exprime en mètre ( $m$ ) et est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$L_p = \frac{2}{\alpha} \ln \left( \frac{2 \times \pi \times R_c \times \gamma}{K \left( \frac{Ea_{min}}{Ea_{max}} \right) (2 \times \pi \times R_c \times \gamma + \rho_{sol})} \right) \quad (20)$$

Donc la portée du poste de soutirage est de :

$$L_p = 24351 m$$

**Tableau III.11:** Résultats de dimensionnement de la longueur de protection d'un poste de soutirage  **$L_p$** .

$Ea_{max}$ (mV)	$Ea_{min}$ (mV)	$R_c$ ( $\Omega$ )	$\rho_{sol}$ ( $\Omega m$ )	$\gamma$ (m)	$K$	$\alpha$ ( $m^{-1}$ )	$L_p$ (m)
-800	-500	0.82	32.21	50	0.581	$0.73 * 10^{-4}$	24351

✓ **Calcul du nombre de postes de protection cathodique  $N_{ppc}$**

Connaissant la longueur de la conduite et la longueur de protection d'un seul poste de soutirage. Donc, on peut déterminer facilement le nombre de postes nécessaire pour assurer la protection de toute la conduite.

$$N_{ppc} = \frac{L}{L_p + 1} \quad (21)$$

$$N_{ppc} = 0.63$$

Alors le nombre de postes de protection cathodique nécessaire pour protéger cette conduite est égal à : **1**

$$N_{ppc} = \text{UN POSTE}$$

**Tableau III.12:** Résultats de dimensionnement du nombre de postes de protection cathodique  $N_{ppc}$ .

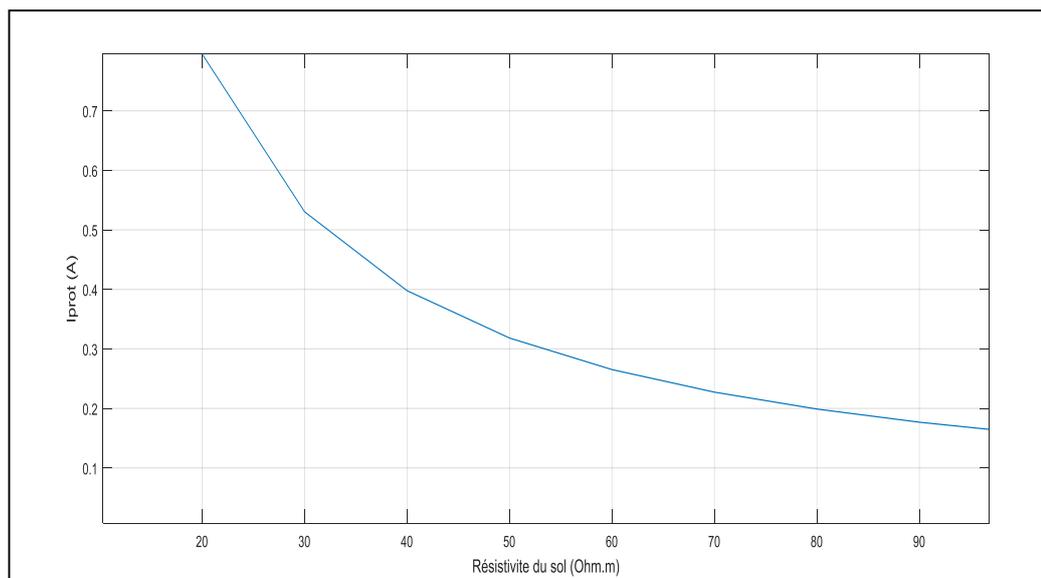
$L(m)$	$Lp(m)$	$N_{ppc}$
15500	24351	1

### III.6 Etude de sensibilité

#### ✓ Influence de la résistivité du sol sur l'intensité du courant protecteur

En utilisant les équations établies précédemment, et pour une distance entre le lit anodique et la conduite maintenue 50 m, avec les caractéristiques de l'oléoduc, on effectue une simulation sous Matlab.

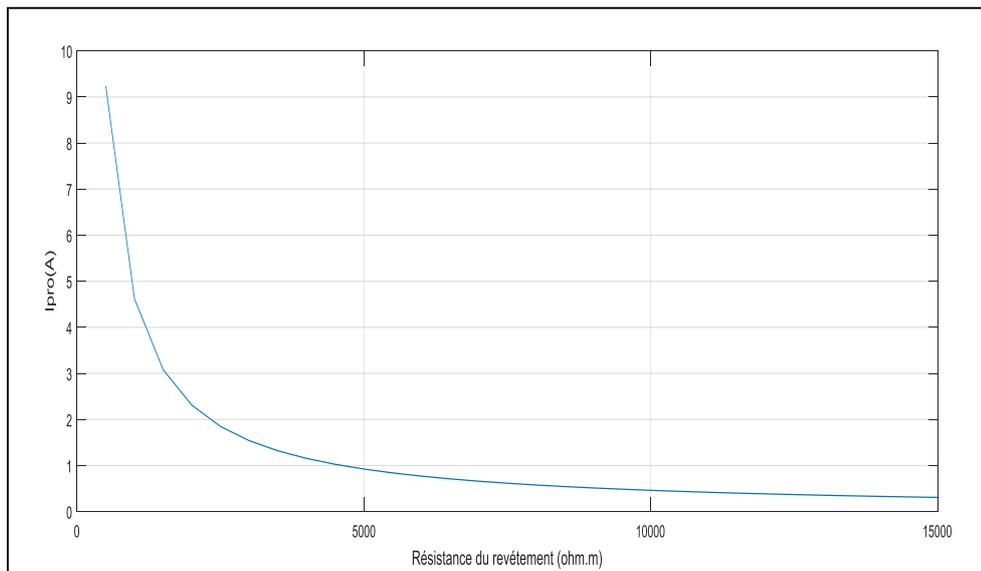
À partir de la figure III.4, on constate que le courant est inversement proportionnel à la résistivité du sol. C'est-à-dire, que pour de faibles valeurs de la résistivité du sol, l'intensité du courant protecteur ( $I_{prot}$ ) est importante. En effet, pour de faibles résistivités, le terrain est plus agressif donc il est nécessaire de prévoir un courant plus grand pour contenir cette agression.



**Figure III. 4 :** Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) en fonction de la résistivité du sol.

✓ **Influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant protecteur**

La figure III. 5 montre l'influence de la résistance initiale du revêtement ( $R_{is}$ ) sur l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ). Les résultats de la figure III. 5 révèlent que l'intensité du courant de protection varie de manière inverse avec la résistance initiale du revêtement. Pour cela, afin d'assurer une protection avec moins d'énergie électrique, il faut par conséquent utiliser un revêtement de bonne qualité avec une mise en œuvre rigoureuse.



**Figure III.5 :** Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) en fonction de la résistance initiale du revêtement.

✓ **Influence de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) sur la consommation du rail (déversoir)**

La figure III. 6 montre l'influence de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ). En consommation du rail (déversoir). Les résultats sont dans la figure III. La figure 6 montre que l'intensité du courant de protection a un impact significatif sur la consommation du rail (déversoir). . Plus l'intensité du courant de protection est élevée, plus la consommation du rail est élevée.

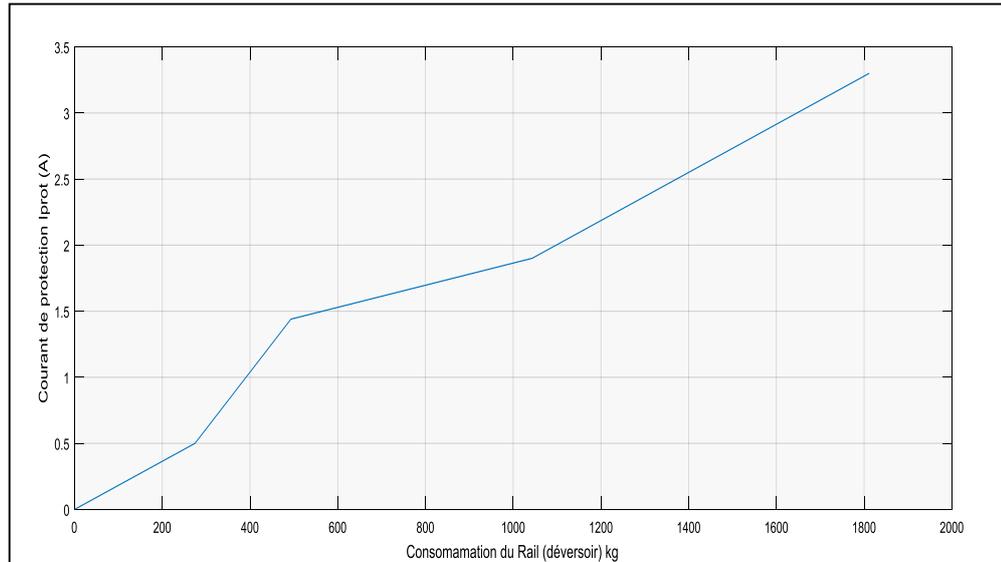


Figure III. 6 : Variation de l'intensité du courant de protection ( $I_{prot}$ ) sur la consommation du rail (déversoir).

✓ Influence de la distance entre le déversoir et la conduite sur l'intensité du courant protecteur

La figure III. 7 montre l'influence de la distance entre le déversoir et la conduite sur l'intensité du courant protecteur. Malheureusement ceci entraîne une augmentation de l'intensité du courant dans le point de drainage d'où la nécessité d'augmenter la puissance du poste de soutirage, c'est-à-dire une augmentation des coûts de protection.

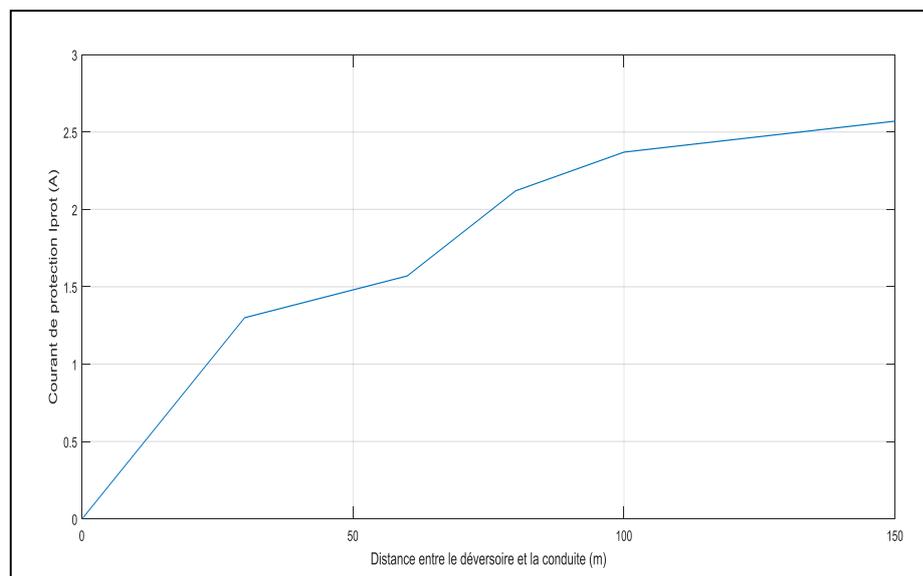


Figure III.7 : Variation de la distance entre le déversoir et la conduite sur l'intensité du courant protecteur.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détaille la partie calcule et dimensionnement pour protéger le réseau acier par protection cathodique de la wilaya de Mila et nous avons commencé par l'élément le plus important dans ce système qui est la résistivité du sol et comment la calculer dans la société Sonelgaz.

Les résultats obtenus montrent l'importance de la protection cathodique, notamment parcourant imposer.

*Conclusion*  
*générale*

## **Conclusion générale**

Le choix de transport et de distribution de gaz par les canalisations en acier enterrées reste le moyen le plus efficace, notamment lorsqu'il s'agit de l'évacuation de quantités importantes sur de longues distances. Donc il est important de les préserver et de lutter contre le phénomène de corrosion car il représente un problème majeur pour ces canalisations a démontré que la sécurité de ces ouvrages repose plus particulièrement sur la fiabilité du système de protection anticorrosion.

Parmi les techniques de protection contre la corrosion, on parle des efficacités de la protection cathodique qui ont été démontrées à travers une quarantaine d'années d'expérience. En fait, dans certains pays il a été même conféré un caractère réglementaire et obligatoire à son application dans le cas des conduites de gaz.

Dans l'optique de ce travail, on s'est intéressé à l'étude de la protection cathodique par un Courant imposé. Ainsi, les avantages d'une telle protection sont :

- L'augmentation des durées d'exploitation.
- La réduire les frais d'entretien.
- L'évitement des arrêts imprévus.
- Un système économique à long terme,

Les résultats de cette présente étude indiquent que l'efficacité du système de protection cathodique serait assurée par

- Une bonne qualité de revêtement.
- Un bon dimensionnement.
- Une maintenance des installations.
- Une élimination des courants vagabonds par le drainage.
- Une continuité électrique.

Aussi, les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres tels que :

- L'influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant protecteur.
- L'influence de la distance entre le déversoir et la conduite.
- L'influence de la résistivité du sol sur l'efficacité les paramètres de protection cathodique.

A cause de ce phénomène de corrosion, la société Sonelgaz subit d'énormes pertes. Economique et technique

- Techniquement, il mobilise une équipe professionnelle de soudure et de maintenance.

❖ **En perspectives**

A travers ce travail, trois méthodes de recherche nous sont apparues et pourraient faire l'objet de travaux ultérieurs et aussi de compléter ce travail à savoir :

- Dimensionnement le système de protection cathodique par courant imposé (la tension, l'intensité et la puissance).
- Il est utile de se pencher sur d'autres travaux en visant un dimensionnement du système de protection cathodique de plusieurs conduites par un seul poste de soutirage.
- L'influence des courants vagabonds sur l'efficacité du système de protection cathodique est un problème majeur dans le secteur de transport des hydrocarbures par canalisation. Pour les études avenir, il faut étudier l'influence de ces courants sur l'efficacité du système de protection cathodique. Cela peut se faire par des enregistrements magnétiques (suivre l'évolution de ces courants sur le système (PC)).

*Références*  
*bibliographies*

## **Références bibliographies**

- [1] D. Landolt. “Corrosion et chimie de surfaces des métaux »(TM volume 12) PPUR - Collection : Traité des Matériaux- 3e édition ”, 2003.
- [2] A. Ferial, “Dimensionnement d’un système de protection cathodique pour un bac de stockage d’hydrocarbure”,mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [3] V. S. Sasti, E. Ghali, M. Elboujdaini “Corrosion Prévention and protection practical solutions”,Wiley, 2007.
- [4] M.G. Fontana, “Corrosion Engineering”, McGraw-Hill, 1986.
- [5] A.J. Bard, L. R. Faulkner, “Electrochemical Methods: Fundamentals andApplications-2nd Edition”, Wiley, 2000.
- [6] Formation de protection cathodique, Centre de formation Ain-m’lila (Sonelgaz), 2013.
- [7] R.E. Melchers, “Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair -2nd Edition”. CRC Press, 2008.
- [8] L. L. Shrier, R. A.Jarman, G.T.Burstein, “Corrosion /environment reaction, Butterworth-Heinemann”, Great Britain, vol.1, 1994.
- [9] PK. Sen, K. Malmedal, JP.Nelson, “Steel grounding design guide and application notes”.IEEE Rural Electric Power, Conference May 5-7, 2002.
- [10] NACE International. (National Association of Corrosion Engineers). Technicalpapersrelated to corrosion in soils.
- [11] M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. NACE International, 1974.
- [12] A. Edris, “Protection of Electrical Networks Against Direct Lightning Strikes”, Wiley, 2010.
- [13] D. A. Jones, “Principles and Prevention of Corrosion-2nd Edition”. UpperSaddle River, NJ: Prentice Hall. 1996.
- [14] A. J. Bard, L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications-2ndEdition,Wiley, 2001.
- [15] B. Mourad, “Utilisation l’énergie solaire dans la protection cathodique d’une canalisation enterrée”, mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2020.

## *Références et bibliographie*

---

- [16] A. Messaoud, “Méthodologie d'étude de la protection cathodique des réseaux en acier dans la région d'Ouargla”, mémoire de Master, Sciences et technologies. Université Kasdi-Merbah Ouargla, 2021.
- [17] Séminaire de la protection cathodique, service protection cathodique/RDO, 2011
- [18] A. Bourget, “Manuel de protection cathodique”. Editions Technip 1970.
- [19] R. W. Revie, “Cathodic Protection: Industrial Solutions for Protecting Against Corrosion”. Gulf Professional Publishing, 2013.
- [20] NACE Standard TM0497 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, 2002.
- [21] M. E. Parker, E.G. Peattie “Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection”, Elsevier Science, 1999.
- [22] Guide de mesure pour la protection cathodique, service maintenance, Sonalgaz 2003.
- [23] Société SONELGAZ MILA - division technique gaz – service exploitation.
- [24] Sonelgaz Transport du Gaz-GRTG. Méthodologie d'étude de PC de réseau transport gaz. JUIN 2008
- [25] A. J. Bard, L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, Wiley, 2001.

## Résumé

Plusieurs établissements et entreprises de transport et de distribution de gaz souffrent de la corrosion des structures métalliques enterrées dans le sol, ce qui coûte beaucoup de pertes matérielles et économiques. Le but de ce travail est la protection cathodique des tuyaux en acier de la société nationale SONELGAZ à Mila qui sont utilisés pour la distribution de gaz naturel.

Des tuyaux dont le matériau constitutif est l'acier, qui est protégé par des couches externes (protection passive), le revêtement organique est relié à un système de protection cathodique active par courant forcé dont le potentiel est maintenu à  $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$ . En effet, le degré d'agressivité du sol est déterminé en mesurant sa résistivité car les sols très érosifs (faible résistivité) ont un taux d'érosion très élevé, contrairement aux sols peu érosifs (forte résistivité), le taux d'érosion est très faible.

Afin de déterminer les valeurs de résistivité du sol, nous avons utilisé la méthode de Wenner qui nous a permis de déterminer le degré d'agressivité du milieu, et les résultats obtenus ont montré que le sol était érodé. Nous avons fourni des calculs de dimensionnement pour la protection cathodique des canalisations. Il est permis de connaître le nombre d'anodes nécessaires et les caractéristiques du rail pour bien protéger la surface extérieure du conduit.

**Mots clés :** corrosion, résistivité du sol, protection cathodique, la tension.

## ملخص

تعاين العديد من مؤسسات وشركات نقل الغاز وتوزيعه من تآكل الهياكل المعدنية المدفونة في الأرض، مما يكلف الكثير من الخسائر المادية والاقتصادية. والغرض من هذا العمل هو الحماية الكاثودية لأنابيب الفولاذ التابعة لشركة سونلغاز الوطنية في ميلة والتي تستخدم لتوزيع الغاز الطبيعي.

من الأنابيب التي تكون المادة المكونة لها فولاذية، والتي تحميها طبقات خارجية (حماية سلبية)، يتم توصيل الطلاء العضوي بنظام حماية كاثودي نشط عن طريق التيار القسري الذي يتم الحفاظ على إمكاناته عند  $850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$  في الواقع، يتم تحديد درجة عدوانية التربة من خلال قياس مقاومتها لأن التربة شديدة التآكل (منخفضة المقاومة) لديها معدل تآكل مرتفع جداً، على عكس التربة منخفضة التآكل (عالية المقاومة)، فإن معدل التآكل منخفض جداً.

من أجل تحديد قيم مقاومة التربة، استخدمنا طريقة Wenner التي سمحت لنا بتحديد درجة عدوانية الوسط، وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن التربة قد تآكلت. لقد قدمنا حسابات تصميم للحماية الكاثودية لخطوط الأنابيب. من الممكن معرفة عدد الأنودات المطلوبة وخصائص السكك الحديدية لحماية السطح الخارجي للأنبوب بشكل صحيح.

**الكلمات الرئيسية:** التآكل، مقاومة التربة، الحماية الكاثودية، التوتر،

## **Abstract**

Many gas transmission and distribution establishments and companies suffer from corrosion of metal structures buried in the ground, which costs a lot of material and economic losses. The purpose of this work is the cathodic protection of the steel pipes of the national company SONEGAS in Mila which are used for the distribution of natural gas.

From pipes of which the constituent material is steel, which is protected by external layers (passive protection), the organic coating is connected to an active cathodic protection system by forced current whose potential is maintained at  $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$ . Indeed, the degree of aggressiveness of the soil is determined by measuring its resistivity because the very erosive soils (low resistivity) have a very high rate of erosion, unlike the low erosive soils (high resistivity), the rate of erosion is very low.

In order to determine the soil resistivity values, we used the Wenner method which allowed us to determine the degree of aggressiveness of the medium, and the results obtained showed that the soil was eroded. We have provided design calculations for cathodic protection of pipelines. It is possible to know the number of anodes required and the characteristics of the rail to properly protect the outside surface of the pipe.

**Keywords:** corrosion, soil resistivity, cathodic protection, tension.