

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



Université D'El Oued  
Echahid Hamma Lakhdar



Faculté de Technologie

## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Département: Génie mécanique

Spécialité: Electromécanique

### Thème

**Dimensionnement d'un système de protection  
cathodique par courant imposé alimenter par  
énergie solaire**

Réaliser par :

MR MILOUDI ABDELMALEK

MR BEKKOUCHE ABDELKRIM

MR BEKKOUCHE ZIAD

Encadrer par :

MR MILOUDI KHALED

Devant le jury composé de :

MR MENACER Nouredine

MR DJOKHRABE Alaeddine

Président

Examineur

Soutenu en JUIN 2021

Année Universitaire 2020/2021

## Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr. MILOUDI KHALED pour son dévouement, ces conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

Ainsi que nous remercions pour toute l'aide et le soutien qu'il nous a offert tout au long de nos études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

---

# Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail*

*A Notre cher encadreur, **Mr Miloudi khaled** pour leur aides et leurs conseils tout le long de l'élaboration de ce travail*

*Aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier*

*A Nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens*

*A Nos chers amis de près ou de loin en classe master Electromécanique*

*A Nos enseignants pour leurs efforts épargnés*

*A Nos professeurs qui nous ont suivi pendant le cursus Universitaire*

---

# Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Listes des abréviations et des symboles

Introduction générale ..... 01

## Chapitre I : Généralité sur la corrosion et la technique de protection contre de la corrosion

I.1 Introduction ..... 03

I.2.1 Aspects théoriques sur la corrosion électrochimique ..... 03

I.2.1.1 Oxydation et réduction ..... 03

I.2.1.2 Circuits électrochimiques ..... 05

I.2.2 Cellule de corrosion ..... 06

I.2.2.1 Réactions anodiques ..... 06

I.2.2.2 Réactions cathodiques ..... 06

I.2.2.3 Chemin métallique ..... 07

I.2.2.4 l'électrolyte ..... 08

I.2.3 le taux de corrosion ..... 08

I.2.4 Facteurs influant le taux de corrosion ..... 09

I.2.4.1 Rapport anode / cathode ..... 09

I.2.4.2 Influence de l'environnement ..... 09

I.2.5 Les causes de corrosion ..... 11

I.2.5.1 Généralité ..... 11

I.2.5.2 Corrosion naturelle ..... 11

I.2.5.3 Courants Vagabonds ..... 13

I.3 Techniques de protection contre la corrosion ..... 14

I.3.1 Isolation électrique ..... 14

I.3.2 Contrôle environnemental ..... 14

I.3.2.1 Les inhibiteurs ..... 14

I.3.2.2 Ajustement du pH ..... 15

I.3.3 Protection passive (revêtements protecteurs) ..... 16

I.3.3.1 Structures souterraines ou submergées ..... 16

I.3.3.2 Types de revêtements souterrains appliqués en usine ..... 17

I.3.4 Protection active (protection cathodique) ..... 17

I.4 Conclusion ..... 18

## Chapitre II. Conception du système de protection cathodique

II.1 Introduction ..... 20

II.2 Principe de la protection cathodique ..... 20

II.2.1 Intensité du courant de protection ..... 20

II.2.2 Potentiel de protection (critères de protection) ..... 21

II.3 Protection cathodique par anode galvanique (sacrificiel).....	22
II.3.1 Définition.....	22
II.3.2 Anodes galvanique.....	23
II.3.2.1 Anode en Magnésium.....	23
II.3.2.2 Anode en Zinc.....	24
II.3.2.3 Anode en Aluminium.....	24
II.3.3 Domaine d'application.....	24
II.3.4 Avantages de la protection cathodique par anodes sacrificielles.....	25
II.3.5 Limitations de la protection cathodique par anodes sacrificielles.....	25
II.4. Protection cathodique par courant imposé.....	26
II.4.1 Principe.....	26
II.4.2 Domaines d'application.....	26
II.4.3 Avantages des systèmes à courant imposé.....	27
II.4.4 Limitations de la protection cathodique par courant imposé.....	27
II.4.5 Composants de la protection cathodique à courant imposé.....	27
II.4.5.1 Le déversoir ou masse anodique.....	27
II.4.5.2 Les câbles de liaison.....	28
II.5 Différents systèmes d'alimentation des postes de protection cathodique.....	28
II.5.1 L'énergie électrique provenant de la distribution publique BT.....	29
II.5.2 Utilisation des thermo-générateurs.....	29
II.5.3 Turbogénérateur.....	30
II.5.4 L'énergie éolienne.....	31
II.5.5 Utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.....	31
II.5.5.1 Généralité.....	31
II.5.5.2 Principe de fonctionnement.....	32
II.5.5.3 Spécification de conception de l'installation PV.....	32
II.5.5.4 Avantages et Inconvénients.....	37
II.6 Conclusion.....	38
<b>Chapitre III. Dimensionnement du système de PC du gazoduc GR4</b>	
III.1. Introduction.....	39
III.2. Informations de base pour la conception de la protection cathodique.....	39
III.2.1 Informations sur les pipelines.....	39
III.2.2 Informations environnementales.....	40
III.2.3 Action préliminaire.....	40
III.2 Hypothèses de calcul.....	40
III.3 Procédure de dimensionnement du système de PC du gazoduc GR4.....	43
III.5 Théorie et note de calcul.....	43
III.5.1 Les équations mathématiques utilisées pour les calculs d'atténuation.....	43
III.5.1.1 Résistivité du sol.....	43
III.5.1.2 Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur $R_c$ .....	44
III.5.1.3 Résistance transitoire "conduite-sol" $R_t$ .....	45
III.5.1.4 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite $R_r$ .....	45
III.5.1.5 Calcul du coefficient d'atténuation $\alpha$ .....	46

III.5.2 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes.....	46
III.5.2.1 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue $Z$ .....	46
III.5.2.2 Valeurs des potentiels.....	46
III.5.2.3 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins $K$ .....	48
III.5.2.4 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage $L_p$ .....	48
III.5.2.5 Calcul du nombre de postes de protection cathodique $N_{PPC}$ .....	49
III.5.3 Calcul de l'intensité du courant de drainage $I_{dr}$ .....	49
III.5.4 Calcul du nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection $N_a$ .....	50
III.5.5 Calcul de la résistance de terre du déversoir $R$ .....	50
III.5.5.1 Calcul de la résistance de polarisation $R_{pol}$ .....	50
III.5.5.2 Calcul de la résistance du matériau de l'anode $R_{ma}$ .....	51
III.5.5.3 Calcul de la résistance du lit d'anodes $R_t$ .....	51
III.5.6 Calcul de la puissance du poste de soutirage.....	52
III.5.6.1 Détermination de la tension du poste de soutirage $U$ .....	52
III.5.6.2 Détermination de la puissance du poste de protection cathodique $P$ .....	53
III.6 Dimensionnement du système photovoltaïque.....	53
III.6.1 Données d'entrée d'ensoleillement.....	53
III.6.2 Données d'entrée de la demande énergétique.....	54
III.6.2.1 Calcul de l'énergie nécessaire au poste de soutirage $E_n$ .....	54
III.6.2.2 Calcul de l'énergie à produire par le générateur photovoltaïque $E_f$ .....	54
III.6.2.3 Calcul de la taille du générateur photovoltaïque à installer.....	55
III.6.2.4 Dimensionnement du parc batteries.....	55
III.6.3 Choix des câbles de connexions.....	56
III.6.3.1 Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier).....	56
III.6.3.2 Détermination de la section des câbles (boitier –régulateur).....	57
III.6.3.3 Détermination de la section des câbles (régulateur-batterie).....	57
III.7 Dimensionnement du système de protection cathodique du GR4.....	58
III.7.1 Description de l'ouvrage.....	58
III.7.2 Caractéristiques du gazoduc GR4 Sud.....	58
III.7.3 Caractéristique de l'électrolyte (résistivité du sol).....	58
III.7.4 Caractéristiques des anodes.....	59
III.7.5 Caractéristiques du générateur photovoltaïque.....	59
III.7.5.1 Caractéristiques Techniques Module photovoltaïque MODUL PS.....	60
III.7.5.2 Caractéristiques techniques de la batterie.....	60
III.7.5.3 Caractéristiques techniques du régulateur.....	60
III.7.5.4 Généralités du système.....	60
III.7.6 Dimensionnement du système de protection.....	61
III.7.6.1 Calcul de la résistivité moyenne du sol.....	61
III.7.6.2 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur.....	61
III.7.6.3 Résistance transitoire moyenne, "conduite-sol".....	61
III.7.6.4 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement.....	61
III.7.6.5 Calcul du coefficient d'atténuation.....	61

III.7.6.6 Calcul de la résistance d'entrée de la conduite.....	61
III.7.6.7 Calcul des gains de potentiel.....	62
III.7.6.8 Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins.....	62
III.7.6.9 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage.....	62
III.7.6.10 Calcul du nombre de postes de protection cathodique.....	62
III.7.6.11 Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation....	62
III.7.6.12 Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection.....	63
III.7.6.13 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées.....	63
III.7.6.14 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage.....	64
III.7.6.15 Calcul de la puissance requise par le poste.....	64
III.7.7 Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	65
III.7.7.1 Estimation de l'énergie consommé.....	65
III.7.7.2 Détermination de l'énergie fournir par le générateur.....	65
III.7.7.3 Calcul de la puissance crête du générateur.....	65
III.7.7.4 Détermination du nombre de modules solaires à installer.....	65
III.7.7.5 Calcul de la capacité des batteries.....	66
III.7.7.6 Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier).....	66
III.7.7.7 Détermination de la section des câbles (boitier –régulateur).....	66
III.8 conclusion.....	67
<b>Chapitre IV. Contrôle et évaluation l'efficacité du système de la protection cathodique</b>	
IV.1 Introduction.....	68
IV.2 Instruments de mesure.....	68
IV.2.1 Les électrodes de référence.....	68
IV.2.1.1 Les électrodes de référence portable.....	69
IV.2.1.2 Les électrodes de référence permanent.....	69
IV.2.2 Enregistreurs de données.....	70
IV.2.3 Résistivité-mètre.....	71
IV.2.4 Interrupteurs cyclique.....	71
IV.3. Différents type du prise de mesure.....	72
IV.3.1 Prise de potentiel simple.....	72
IV.3.2 Prise ampérométrique.....	73
IV.3.3 Prise de gain.....	73
IV.3.4 Prise de croisement.....	74
IV.3.5 Prise du mesure de joint isolant.....	75
IV.4 Méthode de mesure.....	76
IV.4.1 Méthode de potentiel.....	76
IV.4.2 Méthode de courant au niveau de prise ampérométrique.....	77
IV.4.3 Méthode du mesure de potentiel à espace rapproche.....	78
IV.4.4 Méthode de vérification de revêtement.....	79
IV.5 Conclusion.....	80
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>81</b>
<b>Bibliographie</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Mots-clés</b>	

# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Processus anodique (demi-réaction) .....	4
<b>Figure I.2:</b> Processus cathodique (demi-réaction) .....	5
<b>Figure I.3:</b> Cellule de corrosion de base - Un circuit électrochimique .....	5
<b>Figure I.4:</b> Cellule de corrosion microscopique à la surface d'un pipeline .....	7
<b>Figure I.5:</b> Flux d'électrons et d'ions .....	7
<b>Figure I.6:</b> Diagramme de Pourbaix de fer .....	16
<b>Figure I.7:</b> Cellule de corrosion microscopique .....	18
<b>Figure I.8:</b> Protection cathodique sur une structure .....	19
<b>Figure II.1:</b> Protection cathodique d'anode galvanique typique .....	22
<b>Figure II.2:</b> Cellule de corrosion galvanique .....	23
<b>Figure II.3:</b> Schéma d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle .....	25
<b>Figure II.4:</b> Protection cathodique à courant imposé typique .....	26
<b>Figure II.5:</b> Unité moteur-générateur .....	30
<b>Figure II.6:</b> Installation d'une génératrice éolienne .....	31
<b>Figure II.7:</b> Schéma d'un système de protection cathodique par énergie solaire .....	32
<b>Figure II.8:</b> Panneau solaire (générateur photovoltaïque).....	34
<b>Figure II.9:</b> Batteries d'accumulateurs .....	35
<b>Figure II.10:</b> Régulateur de charge des batteries .....	36
<b>Figure II.11:</b> Coffret de distribution .....	37
<b>Figure III.1:</b> Variation du potentiel de protection le long d'une conduite .....	48
<b>Figure III.2:</b> Circuit électrique du système de protection .....	52
<b>Figure IV.1:</b> Électrodes de référence portables en sulfate de cuivre-cuivre .....	69
<b>Figure IV.2:</b> Électrodes de référence permanent en sulfate de cuivre-cuivre .....	70
<b>Figure IV.3:</b> Enregistreurs de données .....	70
<b>Figure IV.4:</b> Appareil de mesure de la résistivité du sol .....	71
<b>Figure IV.5:</b> Interrupteur cyclique .....	72

---

<b>Figure IV.6:</b> Station de test de mesure de potentiel post-montée typique .....	72
<b>Figure IV.7:</b> Prise ampérométrique .....	73
<b>Figure IV.8:</b> Prise de gain .....	74
<b>Figure IV.9:</b> Prise de croisement .....	75
<b>Figure IV.10:</b> Prise de joint isolant .....	75
<b>Figure IV.11:</b> Une illustration d'une mesure typique des potentiels de sol de pipeline .....	76
<b>Figure IV.12:</b> Mesures du potentiel structure-sol .....	77
<b>Figure IV.13:</b> Mesure du courant de canalisation à l'aide de la boucle de détection .....	77
<b>Figure IV.14:</b> Calibrage d'une plage de courant de pipeline .....	78
<b>Figure IV.15:</b> Longueur du tuyau échantillonné dans une mesure du potentiel tuyau-sol.....	78
<b>Figure IV.16:</b> Détection des vacances de revêtement à l'aide de la méthode du gradient.....	79

de tension

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Série galvanique des métaux .....	12
<b>Tableau II.1:</b> Densité de courant en fonction de type de canalisation et de revêtement.....	21
<b>Tableau III.1:</b> Facteurs de dégradation de revêtement selon le type de conception .....	41
<b>Tableau III.2:</b> Densité de courant de conceptions typiques pour les conduites revêtues.....	42
<b>Tableau III.3:</b> Irradiation moyenne de certaines régions.....	54
<b>Tableau III.4:</b> Composition chimique d'anodes Ferro silicium.....	59

# Liste des abréviations et des symboles

ISO: International standard organization  
 NACE: National association of corrosion engineers  
 PC: Protection cathodique  
 PE: Protection passive  
 DC: Direct courant  
 AC: Alternation courant  
 PV: Panneaux photovoltaïque  
 Cu- Cu SO<sub>4</sub>: Cuivre-sulfate de cuivre  
 SHE: L'électrode à hydrogène standard  
 CSE: L'électrode en sulfate de cuivre  
 Wt: Perte de poids en [Kg]  
 K: Équivalent électrochimique t en [ kg/A-an]  
 I: Courant électrique [Ampère]  
 T: Temps [an]  
 R<sub>c</sub> : Résistance longitudinale de la conduite [ $\Omega$ /m]  
 f<sub>f</sub>: Facteur final de dégradation du revêtement  
 f<sub>i</sub>: Facteur initial de dégradation du revêtement au début de l'exploitation de la canalisation  
 Δf: Augmentation annuelle moyenne du facteur de dégradation du revêtement  
 t<sub>DV</sub>: Durée d'exploitation [an]  
 N : Nombre de tronçons = 893  
 ρ<sub>sm</sub> : Résistivité moyenne du sol [ $\Omega$ .m]  
 ρ<sub>i</sub> : Résistivité du sol de tronçon [ $\Omega$ .m]  
 ρ<sub>c</sub> : Résistivité électrique du matériau de la structure [ $\Omega$ .mm<sup>2</sup>/m]  
 Ø<sub>ext</sub> : Diamètre extérieur de la structure [mm]  
 δ : Epaisseur moyen de la conduite [mm]  
 I<sub>t</sub>: Courant total de protection [A]  
 k: Facteur de contingence  
 S: Surface de la canalisation [m<sup>2</sup>]  
 I<sub>pc</sub>: Courant de protection cathodique [A]  
 S: Surface de la canalisation [m<sup>2</sup>]  
 k: Facteur de contingence [ $> 1.25$ ]  
 i<sub>pc</sub>: Densité de courant de protection cathodique pour une canalisation revêtue [A/m<sup>2</sup>]  
 PPC: Postes protection cathodique  
 E<sub>nat</sub>: Potentiel de protection naturel [mV]  
 E<sub>p</sub> max: Potentiel de protection maximale [mV]  
 E<sub>p</sub> min: Potentiel de protection minimale [mV]  
 K: Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins  
 L<sub>p</sub>: Longueur de protection d'un poste de soutirage [m]  
 N<sub>PPC</sub>: Nombre de postes de protection cathodique  
 I<sub>dr</sub>: Intensité du courant de drainage [A]  
 N<sub>a</sub> : Nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection  
 t : Durée de l'exploitation [ans]

$m$  : Consommation massique de l'anode [Kg/A.ans]  
 $M_a$  : Masse d'une anode [Kg]  
 $\mu$  : Coefficient d'utilisation de l'anode  
 $R_{\text{dév p}}$  : Résistance de terre du déversoir profond [ $\Omega$ ]  
 $R_t$  : Résistance du lit d'anode [ $\Omega$ ]  
 $R_{ma}$  : Résistance du matériau de l'anode [ $\Omega$ ]  
 $R_{\text{pol}}$  : Résistance de polarisation [ $\Omega$ ]  
 $U_a$  : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes [V]  
 $I_{da}$  : Moyenne arithmétique entre  $I_{\text{dr}(0)}$  et  $I_{\text{dr}}$  [A]  
 $\rho$  : Résistivité du sol en profondeur [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ]  
 $d_{\text{puits}}$  : Diamètre du puits anodique [cm]  
 $N_{\text{Anode}}$  : Nombre d'anodes à courant imposé  
 $L_{\text{Active}}$  : Longueur active du déversoir [m]  
 $L_{\text{Anode}}$  : Longueur d'une anode [m]  
 $e$  : Espacement entre anodes [m]  
 $P$  : Puissance du poste de soutirage [W]  
 $U$  : Tension du poste de soutirage [V]  
 $R_{\text{tot}}$  : Résistance totale [ $\Omega$ ]  
 $R_c$  : Résistance du câble [ $\Omega$ ]  
 $R_{ps}$  : Résistance due à la protection passive [ $\Omega$ ]  
 $Z$  : Impédance [ $\Omega$ ]  
 $R_{\text{dev}}$  : Résistance de terre du déversoir [ $\Omega$ ]  
 $R_s$  : Résistance du sol entre la canalisation et le déversoir [ $\Omega$ ]  
 $E_n$  : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]  
 $P$  : Puissance du poste de soutirage [w]  
 $t_f$  : Temps de fonctionnement du poste du générateur solaire [h/j]  
 $E_f$  : Energie fournir par le générateur photovoltaïque [Wh/j]  
 $F$  : Pertes ; estimée de 25 à 45%  
 $E_n$  : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]  
 $PC_G$  : Puissance crête (maximale) du générateur photovoltaïque [w]  
 $I_f$  : Irradiation quotidienne moyenne annuelle [kWh/m<sup>2</sup>.j]  
 $N_{ps}$  : Nombre de panneau solaire  
 $C$  : Capacité du parc de batteries [Ah]  
 $E_n$  : Energie nécessaire = énergie consommée [Wh]  
 $A$  : Autonomie de la batterie [Jours]  
 $D$  : Limite de décharge profonde  
 $U$  : Tension de fonctionnement du système [V]  
 $L_s$  : Longueur du pipeline échantillonné  
 $d$  : Profondeur du pipeline [m]  
 $V_g$  : Gradient de tension [V/longueur unitaire]  
 $\rho_e$  : Résistivité de la terre [ $\Omega$ ]  
 $i$  : Densité de courant au point d'intérêt



**Introduction**  
**Générale**

## Introduction générale

L'augmentation de la demande d'énergie telle que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. Le pipeline est un système de canalisations à haute pression qui peut supporter jusqu'à 100 bars, il est utilisé pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux.

Les pipelines pour le transport du pétrole, du gaz et des produits pétroliers sont d'une grande importance pour l'économie des pays producteurs d'hydrocarbures. Le principal facteur de leur détérioration est la corrosion, qui provoque jusqu'à 30% des défaillances.

La corrosion est le phénomène de dégradation le plus courant dans la production d'hydrocarbures et est la cause de la plupart des défaillances des équipements sous pression. A noter également qu'un quart de la production mondiale annuelle d'acier est détruit par la corrosion, et environ 5 tonnes d'acier sont endommagées par seconde.

A cet effet, et pour lutter contre la corrosion, deux méthodes sont utilisées, à savoir la protection passive par revêtement et la protection active dite cathodique. Cette dernière consiste à maintenir le potentiel des tubes à valeur immunogène, de manière à éliminer la transmission de substances corrosives.

La protection cathodique par courant de tirage est la méthode recommandée dans ce travail. Elle consiste à exploiter l'effet du courant électrique injecté dans l'électrolyte d'une anode de coiffage. Pour cela, nous avons utilisé une source de courant continu dont l'électrode positive est reliée à l'électrode positive et l'électrode négative à la structure à protéger.

Habituellement, les systèmes de protection cathodique sont alimentés à partir des réseaux de distribution d'énergie électrique via des transformateurs redresseurs. En l'absence de tels réseaux ou pour d'autres raisons techniques ou économiques, il peut être utile de disposer de sources indépendantes dont le lieu d'installation ne dépend plus du réseau.

Le développement des générateurs photovoltaïques apporte une nouvelle solution sécuritaire et économique pour l'énergie nécessaire à la protection cathodique d'autant plus que l'Algérie est un pays riche en pétrole et en gaz et très ensoleillé.

Pour ce faire, nous aborderons d'abord la notion fondamentale sur la corrosion et le lute anticorrosion, suivi la conception et condition d'utilisation de système de protection cathodique. Ensuite, sous certaines hypothèses simplificatrices, nous envisagerons de

---

développer un modèle d'optimisation pour réduire les coûts d'investissement dans un système de protection cathodique alimenté par un générateur solaire photovoltaïque. Enfin, la surveillance de l'efficacité de la protection cathodique.

# **Chapitre I**

**Généralité sur la corrosion et  
la technique de protection  
contre de la corrosion**

## **I.1. Introduction**

La corrosion est la cause du sujet de notre thèse, dans cette partie nous mettons en évidence ce phénomène. Ainsi, dans ce chapitre, nous fournirons une définition de la corrosion, puis définirons les types, puis soulignerons ceux qui sont courants dans le transport et la distribution d'hydrocarbures par pipeline. Cette partie permettra au lecteur de s'initier à la corrosion des métaux.

Après avoir déterminé le phénomène de corrosion, il faut maintenant définir des moyens préventifs et curatifs pour protéger les structures métalliques de toute altération électrochimique.

Nous présenterons donc également quelques-uns des "bons moyens" que l'on peut observer pour protéger les structures métalliques qui entrent en contact avec un environnement agressif, ou dont l'assemblage peut être à l'origine de la détérioration d'un des métaux. Nous parlerons également de la protection dite passive utilisant des revêtements par exemple, et enfin nous parlerons de la protection cathodique.

## **I.2. Notion fondamentale sur la corrosion**

### **I.2.1. Aspects théoriques sur la corrosion électrochimique**

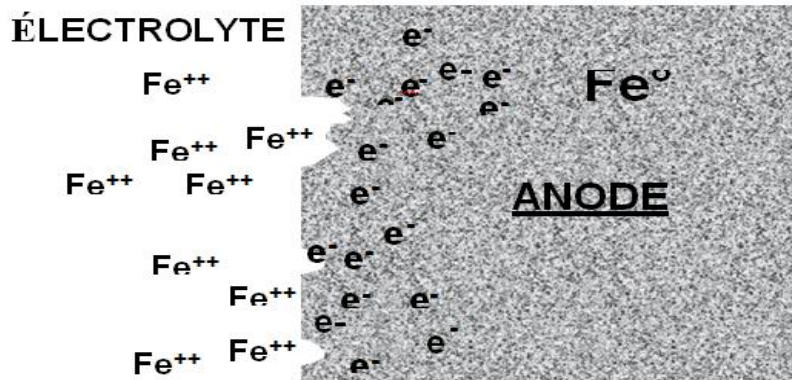
L'électrochimie est la division de la chimie qui traite du transfert de charge électrique dans les réactions chimiques. Ces réactions chimiques sont des réactions électrochimiques. Une branche traite des réactions à l'état solide qui ont lieu dans les semi-conducteurs tels que les transistors et les diodes. La corrosion et la protection cathodique appartiennent à la branche de l'électrochimie concernée par le transfert de charge dans des environnements aqueux ou autres liquides.

#### **I.2.1.1. Oxydation et réduction**

##### **A) Oxydation**

L'oxydation est le terme appliqué à la perte d'un ou plusieurs électrons d'un atome ou d'une molécule, qui forme alors un ion chargé positivement. Une réaction d'oxydation se produit chaque fois que des électrons sont abandonnés par un atome ou une molécule. L'atome ou la molécule diminue en charge négative.

Par exemple, lorsqu'un atome de fer neutre (Fe) s'oxyde, il peut perdre deux ou trois électrons, produisant des ions de fer chargés positivement (Fe ++ ou Fe +++), comme le montre la **figure I.1**.



**Figure I.1:** *Processus anodique (demi-réaction)*

L'électrode ou le site métallique où se produit l'oxydation est appelé anode.

Remarque: Le terme oxydation n'est pas nécessairement associé à l'oxygène.

## B) Réduction

La réduction est le terme appliqué au gain d'un ou plusieurs électrons sur un atome ou une molécule, qui forme alors un ion chargé négativement ou un élément neutre.

Une réaction de réduction se produit chaque fois que des électrons sont gagnés par un atome ou une molécule. L'atome ou la molécule augmente en charge négative.

Par exemple, lorsqu'un ion hydrogène (H +) est réduit, il gagne un électron, produisant un atome d'hydrogène neutre (H).



L'électrode ou le site métallique où la réduction se produit est appelé cathode. Le processus apparaît dans **la figure I.2**.

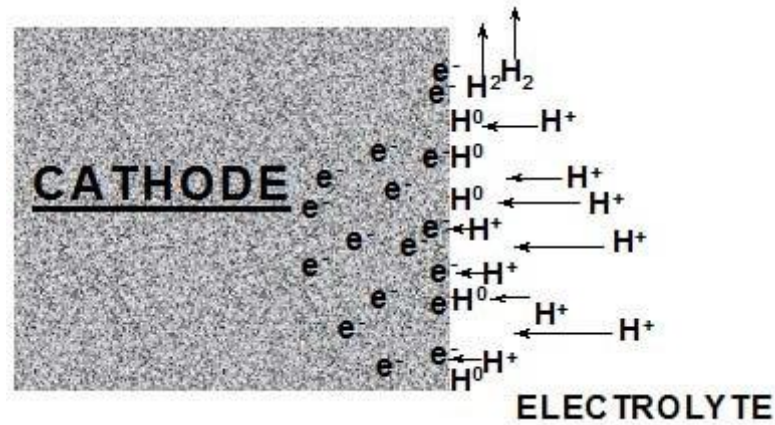


Figure I.2: Processus cathodique (demi-réaction)

### I.2.1.2. Circuits électrochimiques

La cellule de corrosion électrochimique de base est illustrée à la figure I.3. Les différentes parties de la cellule de base sont décrites à la suite de la figure.

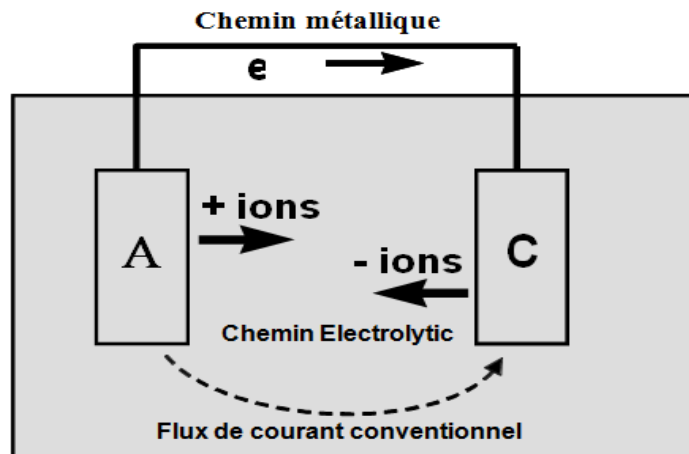


Figure I.3 : Cellule de corrosion de base - Un circuit électrochimique

#### A) Électrolyte

L'électrolyte est une solution ionisée capable de conduire l'électricité.

#### B) Ionisation

En plus des ions qui peuvent être produits dans les réactions d'oxydation et de réduction, des ions peuvent être présents dans l'électrolyte en raison de la dissociation des molécules ionisées. Les cations sont des ions chargés positivement et les anions sont des ions chargés

négativement). Ces ions sont des charges porteuses de courant. Par conséquent, les électrolytes avec une ionisation plus élevée ont une plus grande conductivité.

### I.2.2. Cellule de corrosion

La corrosion est un processus électrochimique impliquant le flux d'électrons et d'ions. Une perte de métal (corrosion) se produit au niveau de l'anode. Aucune perte de métal ne se produit au niveau de la cathode (la cathode est protégée).

La corrosion électrochimique implique le transfert d'électrons à travers les interfaces métal / électrolyte. La corrosion se produit dans une cellule de corrosion. Une cellule de corrosion se compose de quatre parties:

- Anode
- Cathode
- Chemin métallique
- Électrolyte

#### I.2.2.1. Réactions anodiques

La réaction chimique qui se produit à l'anode, la réaction anodique, est une réaction d'oxydation. La corrosion est le résultat de la réaction d'oxydation dans une cellule de corrosion. L'oxydation est la perte d'électrons comme le montre la réaction suivante:



où n est le nombre d'électrons impliqués.

#### I.2.2.2. Réactions cathodiques

La réaction chimique qui se produit à la cathode, la réaction cathodique, est une réaction de réduction. La réduction est le gain d'électrons. La réaction cathodique réelle qui se produit dépendra de l'électrolyte. Les réactions suivantes sont les deux réactions de réduction les plus courantes qui se produisent à la surface de la cathode.

Réduction de l'oxygène la plus courante dans les environnements neutres.



Réduction des ions hydrogène la plus courante dans les environnements acides



La corrosion ne se produit jamais à la cathode d'une cellule de corrosion.

L'anode et la cathode peuvent être sur différents métaux ou sur le même métal comme indiqué sur la figure I.4.

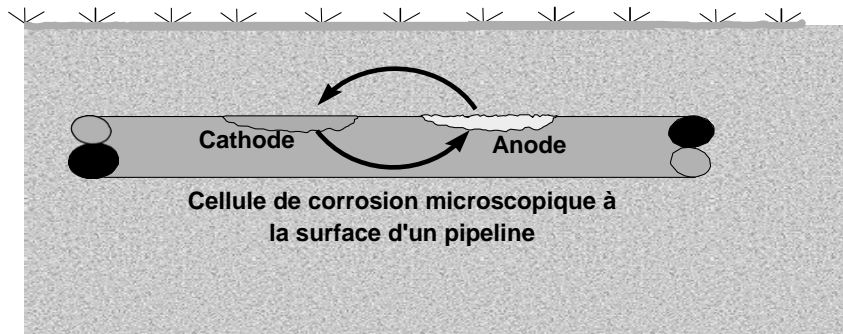


Figure I.4: Cellule de corrosion microscopique à la surface d'un pipeline.

### I.2.2.3. Chemin métallique

Le circuit externe fait référence aux parties d'un circuit électrochimique dans lesquelles le mouvement de charge est électronique; c'est-à-dire qu'il implique le mouvement d'électrons.

Le courant électrique produit par oxydation et réduction circule à travers le chemin électronique au moyen d'un mouvement d'électrons. Les électrons produits dans la réaction d'oxydation s'écoulent de l'anode à la cathode pour fournir des électrons pour que la réaction de réduction se produise. Ceci est illustré à la figure I.5.

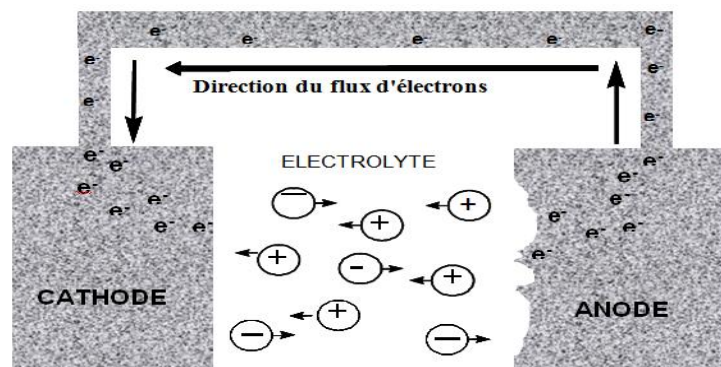


Figure I.5: Flux d'électrons et d'ions.

#### I.2.2.4. l'électrolyte

Le mouvement des ions chargés est le mécanisme de transfert de charge à travers un électrolyte par opposition au flux d'électrons dans un conducteur métallique solide. Les ions chargés positivement (cations) s'éloignent de l'anode et se dirigent vers la cathode. (Remarque: les ions ne se plaquent pas sur la cathode.) En revanche, les ions chargés négativement (anions) se déplacent vers l'anode et s'éloignent de la cathode. Ce transfert de charge est appelé flux de courant électrolytique. Ce transfert de charge est illustré à **la figure I.5.**

Les ions sont relativement lourds et se déplacent lentement. Par conséquent, les électrolytes ont des résistivités beaucoup plus élevées que les métaux. Cela provoque un phénomène appelé polarisation.

#### **NB: Flux de courant conventionnel**

La figure I.6 montre le flux de courant électrochimique réel qui existe dans une cellule de corrosion. Dans les travaux de protection contre la corrosion et la protection cathodique, un flux de courant conventionnel est utilisé. Il s'agit d'un flux de courant dans la direction du transfert d'ions positifs (dit courant positif). L'utilisation du courant conventionnel simplifie la compréhension des cellules de corrosion et l'utilisation de la protection cathodique.

#### I.2.3. le taux de corrosion

Le poids de tout matériau déposé sur la cathode (ou libéré de l'anode) est directement proportionnel à la quantité de charge électrique traversant le circuit. La loi de Faraday relie la perte de poids de métal dans une cellule de corrosion avec le temps et le flux de courant. La loi s'exprime dans la formule suivante:

$$W_t = KIT = \text{kg} \quad (\text{I.7})$$

Où:

W<sub>t</sub>: perte de poids en Kg

K: équivalent électrochimique t en kg/A-ans

I: Ampère

T: ans

## **I.2.4. Facteurs influant au taux de corrosion**

### **I.2.4.1. Rapport anode / cathode**

La zone relative entre l'anode et la cathode d'une cellule de corrosion affecte grandement la vitesse à laquelle l'anode se corrode. Si la surface anodique est petite par rapport à celle de la cathode (un rivet en acier dans une plaque de cuivre, par exemple), l'anode (rivet en acier) se corrodera rapidement. En effet, le courant de corrosion est concentré dans une petite zone (grande densité de courant). De plus, la grande cathode peut ne pas se polariser facilement, maintenant ainsi une vitesse élevée de corrosion.

Lorsqu'une petite cathode est connectée à une grande anode (rivet de cuivre dans une plaque d'acier par exemple), la densité de courant de corrosion sur l'anode (acier) est bien inférieure à celle du cas contraire évoqué ci-dessus, et l'anode se corrode plus lentement. La polarisation peut également jouer un rôle important ici. La petite cathode peut se polariser rapidement, ce qui réduit le débit du courant de corrosion.

### **I.2.4.2. Influence de l'environnement**

#### **A) Teneur en humidité**

La corrosion électrolytique nécessite la présence d'humidité. Un environnement complètement sec ne supportera pas cette forme de corrosion. Une surface métallique humide et bien aérée peut subir une corrosion générale plus rapide qu'une surface totalement immergée. Un exemple de ceci est la zone d'éclaboussure sur les pieux en acier immergés. Dans ce cas, la réduction de l'oxygène est la réaction cathodique primaire et la corrosion de l'acier est la réaction anodique. Les anodes et les cathodes sont proches les unes des autres et la corrosion est caractérisée comme une perte générale de métal.

Dans la corrosion souterraine, une teneur élevée en humidité est généralement associée à des taux de corrosion accrus. Cependant, l'immersion totale (sol saturé) n'est pas forcément la situation la plus agressive.

En général, les argiles sont déficientes en oxygène et dans les sols mixtes les zones d'une structure en contact avec l'argile deviennent les anodes d'une cellule de concentration en oxygène. Dans de telles cellules, c'est la différence d'oxygène disponible entre les zones de sable et d'argile en contact avec la structure qui produit l'énergie électrique qui entraîne le processus de corrosion.

## **B) Conductivité**

La quantité de courant traversant un électrolyte est affectée par la teneur en ions. Plus il y a d'ions, plus la conductivité est élevée; plus la conductivité est élevée, plus il y a de courant pour une tension de cellule donnée; et plus le courant est élevé, plus la vitesse de corrosion est élevée. La conductivité est égale à l'inverse de la résistivité. L'unité de mesure est le Siemen / cm.

La conductivité ou sa réciproque (résistivité) est un paramètre important dans l'étude de la corrosion et de sa prévention. Une conductivité élevée elle-même n'indique pas un environnement corrosif; il indique seulement une capacité à supporter le flux de courant.

## **C) Activité chimique**

C'est l'activité chimique de l'électrolyte qui fournit les réactions redox (oxydation-réduction) nécessaires pour entraîner une cellule de corrosion. Certaines des espèces chimiques présentes dans un électrolyte peuvent aider à retarder ou ralentir l'action chimique en aidant à la production de films protecteurs. Les carbonates, par exemple, peuvent conduire à la formation d'un film passif sur le zinc; dans de tels environnements, les structures galvanisées peuvent ne subir pratiquement aucune corrosion. S'il y a des ruptures dans la galvanisation, cependant, l'acier sous-jacent à de telles ruptures peut se corroder rapidement, car il aura un potentiel plus actif que le film de carbonate de zinc. La passivation peut également rendre les anodes en zinc inefficaces.

Le pH, qui exprime la concentration en ions hydrogène dans l'électrolyte, est particulièrement intéressant. Plus la concentration d'ions hydrogène est élevée, plus le pH est bas. Les ions hydrogène acceptent facilement les électrons lorsqu'ils sont en contact avec des métaux qui sont plus électro-chimiquement actifs que l'hydrogène. Par exemple, le magnésium, l'aluminium, le zinc, le fer et le plomb sont tous plus actifs que l'hydrogène. D'autres métaux, comme le cuivre, sont moins actifs (ou plus nobles) que l'hydrogène. Ainsi, dans un environnement acide, les métaux plus actifs que l'hydrogène seront corrodés, et ceux plus nobles ne seront pas corrodés.

Les environnements fortement alcalins, généralement avec un pH supérieur à 8, peuvent provoquer une corrosion accélérée des métaux amphotères tels que l'aluminium et le plomb.

## I.2.5. les causes de corrosion

### I.2.5.1. Généralité

La quasi-totalité de la corrosion que vous rencontrerez peut être divisée en deux types: soit une réaction naturelle, soit une réaction de courant parasite. Une corrosion naturelle a lieu en raison de cellules d'action locale à la surface de la structure. Ces cellules résultent de différences de tension causées par des facteurs tels que les irrégularités de surface, l'échelle du broyeur, les concentrations d'oxygène, les différences dans l'électrolyte autour de la structure, etc. Des réactions de courant parasite se produisent lorsqu'une source de courant, externe à la structure elle-même, provoque une corrosion de la structure.

### I.2.5.2. Corrosion naturelle

#### A) Métaux différents (corrosion galvanique)

Le métal lui-même peut être une source de tension d'excitation d'une cellule de corrosion. Une différence de tension peut survenir en raison de différences dans les niveaux d'énergie naturelle de différents métaux ou de variations de composition formées pendant l'alliage.

Les métaux se présentent dans la nature sous la forme de divers composés chimiques appelés minerais. Une fois le minerai extrait, le composé métallique est retiré du minerai ressemblant à de la roche et raffiné pour produire un état presque pur du métal. Divers procédés - mécaniques, chimiques et électriques - sont utilisés pour transformer les minerais en métaux utiles. Quel que soit le processus, le métal absorbe de l'énergie lors de la transformation. La quantité d'énergie requise par un métal pendant le processus de raffinage détermine la tension ou l'état actif du métal. La tension est relativement élevée pour des métaux tels que le magnésium, l'aluminium et le fer, et relativement faible pour des métaux tels que le cuivre et l'argent.

Une manière utile de visualiser les métaux dans l'ordre de leur activité est représentée dans ce que l'on appelle la série galvanique. Cette série est basée sur les métaux dans l'eau de mer, mais s'applique aux métaux dans l'eau douce et souterraine. La série est présentée dans le **Tableau I.1** «Série Galvanique Pratique. Les potentiels sont indiqués approximativement car ils varient quelque peu en fonction de l'environnement. Les valeurs de potentiel (v) mesurer par rapport l'électrode de référence Cu-CuSO<sub>4</sub>.

<b>Anode(actif)</b>	
Magnésium	-1.60 à -1.75
Zinc	-1.10
Aluminium	-1.05
Acier au Carbone (Sain)	-0.50 à -0.80
Acier au Carbone (Rouillé)	-0.20 à -0.50
Fonte ductile	-0.50
Plomb	-0.50
Acier dans le béton	-0.20
Cuivre	-0.20
Ferro silice	-0.20
Carbone, Graphite	+0.30
<b>Cathode(noble)</b>	

**Tableau I.1:** Série galvanique des métaux.

### **B) Contraintes mécaniques**

Lorsqu'un métal subit une contrainte mécanique, la zone la plus sollicitée est généralement la zone la plus active et devient l'anode de la cellule de corrosion.

### **C) Alliage**

Dans le processus d'alliage, des joints de grains sont formés. Semblable à des métaux différents, la limite de grain peut être plus active ou plus noble que le métal adjacent provoquant une différence de tension. En outre, le métal le plus actif utilisé pour fabriquer un alliage peut se corroder, laissant derrière lui le métal le plus noble. Ceci est généralement appelé lixiviation du métal actif de l'alliage, tel que le zinc du laiton (dézincification).

### **D) Différences de température dans le métal**

Si des parties d'une structure sont à des températures différentes, la zone de température la plus élevée est généralement la zone la plus active et devient l'anode de la cellule de corrosion.

### **E) Différences de température dans l'électrolyte**

Pour les différences de température dans un électrolyte, la zone de métal à la température la plus élevée est généralement la zone la plus active et devient l'anode de la cellule de corrosion.

### **F) Sols dissemblables**

Des sols différents, tels que l'argile et le sable, en raison de leurs différences de résistivité (réciproque de conductivité) et de teneur en oxygène, peuvent fournir la force motrice de la corrosion. Le métal au voisinage du sol à résistivité inférieure est généralement plus actif et constitue l'anode.

### **G) Cellule de concentration d'oxygène**

Un métal exposé à différentes concentrations d'oxygène peut subir une différence de tension. Le métal au voisinage de la concentration plus élevée d'oxygène sera plus noble, ou la cathode, car l'oxygène est un réactif cathodique.

### **H) Cellule de concentration d'ions métalliques**

Plus la concentration d'ions métalliques identiques à celle du métal adjacent est élevée, plus le métal devient noble. Pour les ions métalliques qui sont différents du métal adjacent, l'effet peut être difficile à déterminer. Lorsqu'un sel simple est présent qui ne contient pas d'ion métallique, la zone du métal à la concentration la plus élevée de sel est généralement l'anode.

### **I) Influences microbiologiques**

La corrosion induite microbiologiquement (CMI) est courante. Diverses bactéries entrent dans des réactions de type redox. Certaines de ces bactéries ne vivent que dans des environnements sans oxygène. Cette classe de bactéries est appelée anaérobie. D'autres espèces se développent dans des conditions aérées et forment des acides. Bien que les bactéries elles-mêmes n'attaquent pas les métaux, les métaux sont impliqués dans les différentes réactions redox associées au métabolisme des bactéries.

#### **I.2.5.3. Courants Vagabonds**

Un courant vagabond est défini comme étant le courant qui s'échappe de sa source pour venir circuler dans le sol. Ce dernier cherche le chemin lui opposant un minimum de résistance, il

embarque sur le plus proche chemin métallique qu'il rencontre, telle une conduite enfouie, offrant ainsi une faible résistivité.

### **I.3. Techniques de protection contre la corrosion**

#### **I.3.1. Isolation électrique**

Des dispositifs d'isolation électrique peuvent être utilisés pour séparer différents métaux ou d'autres composants anodiques et cathodiques d'une cellule de corrosion. L'insertion d'un matériau diélectrique interrompt la partie électronique de la cellule de corrosion, isolant ainsi l'anode de la cathode.

L'isolation électrique est également une partie importante des travaux de protection cathodique et sera discutée en détail dans les chapitres suivants.

#### **I.3.3. Contrôle environnemental**

Dans les environnements aqueux, divers produits chimiques peuvent être introduits dans l'eau ou le flux de traitement pour réduire sa corrosivité pour le métal exposé. Des mesures similaires sont utilisées dans les pipelines transportant des gaz ou des liquides corrosifs.

Il y a eu une certaine application du contrôle environnemental aux installations souterraines, mais le succès a été limité. L'utilisation efficace du contrôle environnemental est essentiellement limitée aux liquides dans les espaces confinés tels que la tuyauterie, les chaudières et les réservoirs.

##### **I.3.3.1. Les inhibiteurs**

Des inhibiteurs sont ajoutés aux liquides pour modifier les caractéristiques du liquide ou pour former des films protecteurs à la surface du métal. Certains inhibiteurs forment des films sur des points anodiques ou cathodiques le long de la surface métallique. Certains, comme ceux utilisés dans les systèmes d'eau potable, déposent un film protecteur sur toute la surface métallique.

L'oxygène, qui joue un rôle important dans la réaction de corrosion, peut être contrôlé par l'ajout de piègeurs d'oxygène. Ceci est particulièrement important dans le traitement de l'eau de chaudière.

### I.3.3.2. Ajustement du pH

Le pH de l'eau affecte sa capacité à précipiter un tartre protecteur. Le contrôle du pH est utilisé pour créer une eau qui ne sera pas agressive pour la tuyauterie métallique et les récipients avec laquelle elle entre en contact.

Afin d'évaluer le pH du milieu, il existe plusieurs méthodes, mais à l'échelle industrielle, un pH-mètre est utile. L'instrument se compose généralement d'un boîtier électronique qui permet de lire la valeur du pH (y compris un millivoltmètre en plus d'autres équipements électriques), une sonde de pH composée d'électrodes en verre (permettant la mesure) et une électrode de référence.

Comme tout appareil de mesure ; il doit être étalonné si l'on veut obtenir des résultats satisfaisant.

#### **-Diagramme de Pourbaix**

Le Professeur Marcel POURBAIX a établi un diagramme de pH-potentiel d'équilibre de réaction pour la plupart des métaux, qui décrit les différentes réactions théoriques qui peuvent se produire entre les métaux et leurs ions en présence d'eau. En se basant sur la solubilité de l'objet formé, il en déduit le champ théorique de l'état du métal. Par conséquent, pour le fer, nous avons trouvé:

-un domaine de corrosion où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.

-Zone de passivation, où le fer est protégé par un film de surface qui isole le fer de l'environnement environnant. Si le film peut être formé de manière uniforme, si le film reste adhérent et ne le détruit pas mécaniquement, la zone protégera partiellement le métal de la corrosion.

-un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc pas se corroder, les réactions d'oxydation n'étant plus possibles. C'est le domaine de la protection cathodique

Ces trois domaines et les circonstances (pH - tension) qui les définissent peuvent être établis pour tous les métaux purs, et en particulier pour le plomb, le cuivre et le fer.

Quand bien même que ce diagramme est très important pour la lutte contre la corrosion.

La Figure I.6 présente le diagramme  $E - pH$  de Pourbaix du système ( $Fe - H_2O$ ) à  $25^\circ C$ .

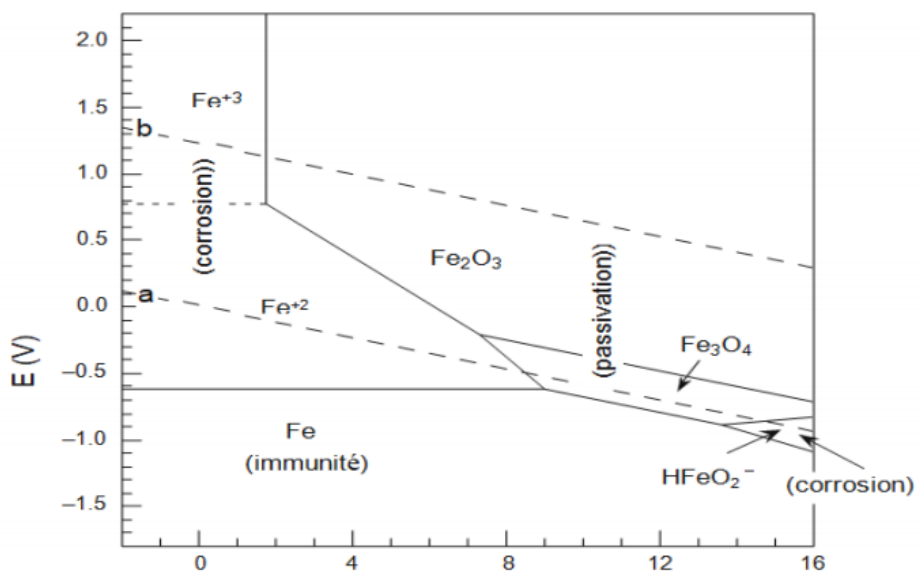


Figure I.6: Diagramme de Pourbaix de fer

### I.3.3. Protection passive (revêtements protecteurs)

#### I.3.3.1. Structures souterraines ou submergées

Les revêtements sont la première ligne de défense dans de nombreux programmes de contrôle de la corrosion. Malheureusement, les revêtements ne sont pas parfaits et une corrosion accélérée se produit aux pauses (vacances) dans un revêtement. La protection cathodique est utilisée pour empêcher la corrosion du substrat en acier pendant les vacances dans le revêtement.

Le revêtement joue également un rôle important dans l'ingénierie de la protection cathodique. Bien qu'il soit possible de protéger une structure nue, si la structure est revêtue, il est nécessaire de ne protéger que le métal exposé pendant les vacances. Cela réduit considérablement la taille et le coût des systèmes de protection cathodique. L'inspection du revêtement est importante car il est souhaitable d'installer la structure avec le revêtement dans les meilleures conditions possibles. Cela garantira que le système de protection cathodique fonctionne comme prévu.

### **I.3.3.2. Types de revêtements souterrains appliqués en usine**

#### **A) Émaux Bitumineux**

Ces revêtements sont formulés à partir de brai de goudron de houille ou d'asphalte naturel et sont renforcés avec du verre et une enveloppe en feutre pour fournir une résistance mécanique et une résistance aux chocs supplémentaires. L'extérieur du tuyau est enveloppé de papier kraft pour une protection pendant le transport et la manutention. Ces revêtements sont utilisés depuis le début des années 1990, mais sont de moins en moins utilisés aujourd'hui en raison de la toxicité et des préoccupations environnementales. Les tuyaux revêtus d'émail doivent être manipulés avec soin pour éviter d'endommager le revêtement.

#### **B) Polyoléfine et polyéthylène extrudés**

Ces systèmes de revêtement sont constitués de polyoléfine ou de polyéthylène extrudé sur un adhésif mastic butyle ou asphalte. Les revêtements ont une résistance élevée aux chocs et résistent au développement des vacances au fil du temps.

#### **C) Revêtements de bande**

La plupart des systèmes de bande sont appliqués à froid. Le système se compose d'un apprêt, d'une couche interne de scellant anticorrosion, avec un support de couche externe de protection mécanique, généralement du polyéthylène ou du polybutylène

. Il existe également plusieurs systèmes multicouches disponibles. Ils doivent être expédiés et manipulés avec soin pour éviter tout dommage et sont susceptibles de se décoller si la bande n'est pas correctement tendue.

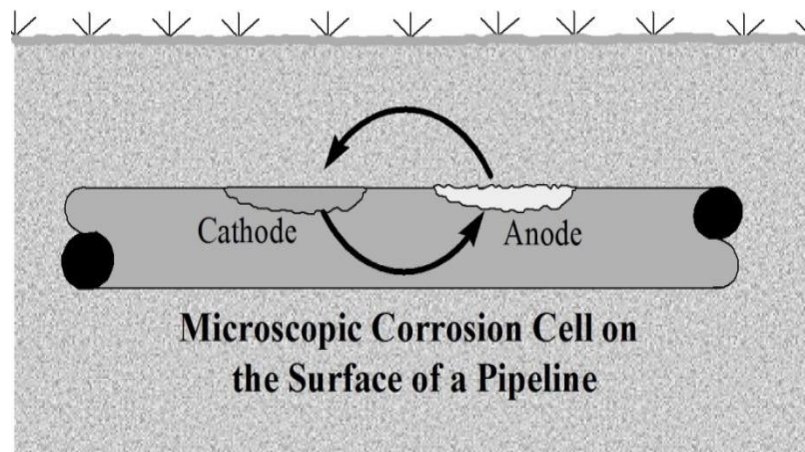
### **I.3.4. Protection active (protection cathodique)**

Cette approche de contrôle de la corrosion à l'aide de courant électrique est limitée aux métaux exposés à un électrolyte tel que le sol, l'eau et le béton. Cela ne fonctionne pas dans l'atmosphère.

La protection cathodique est souvent utilisée en conjonction avec d'autres méthodes de contrôle de la corrosion, y compris les revêtements protecteurs et l'isolation électrique.

### -Théorie

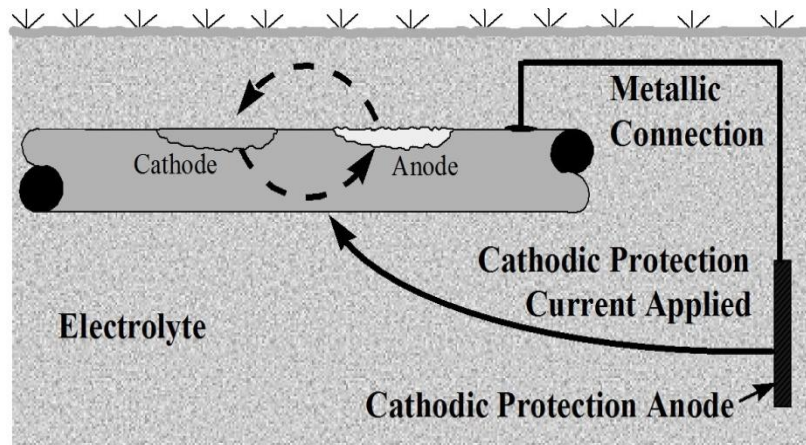
Sur une surface corrodée, il y a des centaines de cellules de corrosion locales ou microscopiques. **La Figure I.7** illustre une telle cellule à la surface d'un pipeline. Il existe une différence de potentiel ou de tension entre l'anode et les cathodes de ces cellules; cette différence de potentiel entraîne le courant de corrosion.



**Figure I.7:** *Cellule de corrosion microscopique*

Le concept de protection cathodique consiste à réduire à zéro la différence de potentiel entre les sites anodiques et cathodiques locaux sur une surface métallique, ce qui entraîne un flux de courant de corrosion nul. Ceci peut être accompli en faisant circuler un courant sur la structure à partir d'une anode externe dont le courant polarise les sites cathodiques dans une direction électro-négative. Au fur et à mesure que les potentiels des sites cathodiques se polarisent vers les potentiels des sites anodiques, le courant de corrosion est réduit. Lorsque les potentiels de tous les sites cathodiques atteignent le potentiel de circuit ouvert des sites anodiques les plus actifs, la différence de tension entre les anodes et les cathodes locales est éliminée et la corrosion cesse.

La protection cathodique n'élimine pas réellement la corrosion. Au lieu de cela, il la transfère de la structure à protéger vers la ou les anodes de protection cathodique. La structure est maintenant la cathode d'une cellule de corrosion intentionnelle. La corrosion du métal cessera une fois que le courant de protection cathodique appliqué sera égal ou supérieur au courant de corrosion. Ceci est illustré dans **la figure I.8**.



**Figure I.8:** *Protection cathodique sur une structure.*

## I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions sur le phénomène de la corrosion électrochimique, les différents paramètres et les facteurs qui influent le taux de corrosion ainsi que les techniques de lutttes et prévention contre la corrosion dans ces deux aspects passive et active qui seront étalés dans le chapitre suivant.

# **Chapitre II**

## **Conception du système de protection cathodique**

## II.1 Introduction

Dans les structures métalliques enterrées ou immergées le revêtement à la surface du métal constitue une barrière protectrice isolante contre la corrosion. Dont l'efficacité est limitée par toute dégradation due aux imperfections, blessures et vieillissement dans l'environnement.

Pour les pipelines en particulier la protection cathodique est utilisée en conjonction avec des revêtements afin d'assurer la protection contre la corrosion dans façon permanente et cela par injection de courant électrique continu limitée aux métaux exposés à un électrolyte tel que le sol, l'eau elle permet d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger à un potentiel où la réaction de corrosion ne peut avoir lieu; ce potentiel est dit 'seuil d'immunité'.

## II.2 Principe de la protection cathodique

Pour rendre le potentiel du métal suffisamment négatif, il faut que l'interface métal-électrolyte soit saturée d'électrons ; cela permettra d'empêcher le départ des cations métalliques positifs vers l'électrolyte, d'où la suppression de la réaction d'oxydation qui est responsable de la corrosion.

Dans le cas pratique cet objectif est atteint en faisant circuler un courant entre deux structures de telle sorte que :

- Celle à protéger constitue la cathode
- Celle à sacrifier constitue l'anode

Ceci étant il faut savoir que la protection cathodique est caractérisée par certains paramètres dont :

- La nature des structures mis en jeu
- Le potentiel pris par la structure protégée
- L'intensité du courant injecté pour la protection
- La résistance électrique des éléments du circuit

### II.2.1 Intensité du courant de protection

Comme on le verra dans le chapitre suivant, le potentiel que prend la structure à protéger dépend de l'intensité du courant de protection. En effet sa valeur doit permettre à la structure d'atteindre en tout point le critère de potentiel choisi.

Cependant, il est important que sa valeur ne soit pas trop élevée car un courant assez grand, pourrait avoir plusieurs inconvénients dont le décollage des revêtements(en effet un courant trop élevé favorise la migration de l'eau et des ions à travers le revêtement et une augmentation du PH de l'électrolyte à la surface de la conduite ; si le potentiel devient suffisamment négatif, l'hydrogène peut également y évoluer sous forme de gaz en entrant ainsi le décollement du revêtement et en fragilisant l'acier par pénétration.) , la perturbation des structures métalliques voisines, l'insécurité des exploitants de la structure, etc.

Selon le type de revêtement choisi, la densité de courant est donnée dans le tableau suivant :

Type de canalisation et de revêtement	Densité de courant (mA/m <sup>2</sup> )
Canalisation immergée avec revêtement type C	0.5 à 1
Canalisation enterrée avec revêtement type C Dégradé	0.3 à 0.6
Canalisation enterrée avec revêtement type C	0.01 à 0.15
Canalisation enterrée avec revêtement de PE ou d'Epoxy	0.001 à 0.1

**Tableau II.1:** Densité de courant en fonction de type de canalisation et de revêtement

**NB :** Ce tableau est donné à titre indicatif et ne saurait justifier à lui seul un calcul de protection cathodique.

### II.2.2 Potentiel de protection (Critères de protection)

Pour qu'une structure soit protégée il faut que son potentiel par rapport au milieu ambiant soit inférieur ou égal à une certaine valeur. Cette valeur dépend du métal en question, de l'électrolyte et de l'électrode de référence par rapport au quel ce potentiel est mesuré.

En effet dans le cas d'une canalisation en acier enterrée, selon le diagramme de Pourbaix

On admet que pour un potentiel inférieur ou égal à -850 mV, et pour un PH de l'électrolyte n'excédant pas 10, le métal est dans la zone dite d'immunité d'où la protection de celui-ci contre toute forme de corrosion électrochimique ; c'est le critère le plus usité en protection cathodique.

Les critères de protection cathodique pour la protection contre la corrosion des pipelines enfouis sont au nombre de trois. Deux sont basées sur un potentiel atteint de la structure de l'ordre de -850 mV par rapport à une électrode de référence de cuivre/sulfate de cuivre (Cu/CuSO<sub>4</sub>) et la dernière sur une polarisation d'au moins 100 Mv.

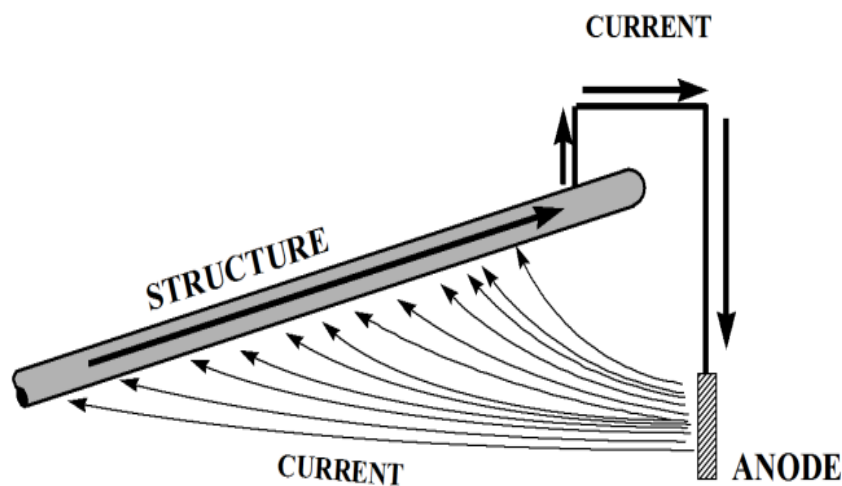
- Un potentiel lu de  $-850$  mV ou plus négatif lorsque la protection cathodique est appliquée. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence de cuivre sulfate de cuivre en contact avec l'électrolyte. Les chutes de tension (chute ohmique « IR Drop »), autres que celles à travers structure/électrolyte environnant, doivent être prises en considération pour valider l'interprétation des voltages mesurés
- Un potentiel de polarisation de  $-850$  mV ou plus négatif, mesuré par rapport à une électrode de référence de cuivre / sulfate de cuivre en contact avec l'électrolyte
- Une polarisation cathodique d'au moins  $100$  mV entre la structure et une électrode de référence stable en contact avec le sol ce-à-dire une différence entre les lectures de potentiels « statique » et « instant off » supérieure à  $100$  mV permettra de s'assurer du respect de ce critère

## II.3 Protection cathodique par anode galvanique (sacrificiel)

### II.3.1 Définition

Il existe quatre composants de base d'un système de protection cathodique à anode galvanique est l'anode, le remblai d'anode (backfill), un moyen de connecter l'anode à la structure, et la structure.

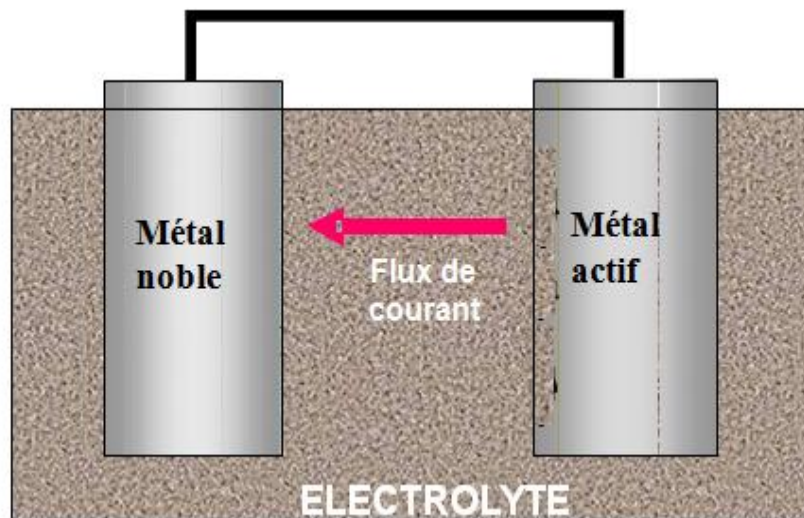
Pour réaliser une protection par anode galvanique, le métal à protéger est relié électriquement à une électrode constituée d'un métal moins noble, jouant le rôle d'anode dans la pile électrochimique ainsi formée la **figure II.1** est illustré typique système de protection cathodique galvanique.



**Figure II.1:** Protection cathodique d'anode galvanique typique

### II.3.2 Anodes galvanique

La protection cathodique galvanique fonctionne sur le principe qu'un métal plus réactif connecté à un matériau moins actif formera une cellule de corrosion galvanique. Ceci est utilisé à notre avantage pour protéger le métal le moins actif. L'alliage le plus actif se corrode (se «sacrifie») pour protéger le métal protégé; par conséquent, ces anodes sont souvent appelées anodes sacrificielles (voir Figure 3.2)



**Figure II.2:** *Cellule de corrosion galvanique*

La série galvanique pratique de métaux montre trois métaux plus actifs que le fer-magnésium, le zinc et l'aluminium. Ces derniers sont Les métaux actifs les plus couramment utilisés comme anodes pour protéger les alliages de fer.

#### II.3.2.1 Anode en magnésium

Ces anodes sont le plus souvent utilisées pour la protection des canalisations enterrées sur une faible longueur et celle des conduites offshore sur de grandes distances. Par rapport aux autres anodes ils ont un rendement médiocre, un coût élevé et un potentiel également élevé grâce, au quel ces anodes peuvent être utilisées dans des terrains de fortes résistivités et en eau douce Les anodes de magnésium sont disponibles en deux alliages: un alliage à fort potentiel ayant un potentiel de corrosion nominal de  $-1,75$  V et un alliage à faible potentiel ayant un potentiel de corrosion nominal de  $-1,55$  V (les deux valeur est mesurée par rapport électrode de référence cuivre/sulfate de cuivre).

### II.3.2.2 Anode en zinc

Le zinc utilisé dans la fabrication des ces anodes est à haute pureté avec un faible ajout d'éléments d'addition tels que : le plomb, le fer (très faible quantité pour éviter la passivation), le cadmium, le cuivre, l'aluminium.

Très adapté pour la protection des ouvrages compacts, surtout pour les ouvrages marins. Ces anodes bénéficient d'une fiabilité excellente, d'un rendement élevé, d'une longue durée de vie et sont peu sensibles aux salissures marines, mais ils admettent des limites au niveau de la température d'utilisation qui est fixé à un maximum de 60°C.

Dans l'industrie on rencontre très souvent deux types d'anodes de zinc qui se distinguent par les éléments d'additions en plus de ceux cités précédemment :

- Norme américaine : ajout de silicium (Si)
- Norme française : ajout de magnésium (Mg) et d'étain (Sn)

### II.3.2.3 Anode en aluminium

Les anodes en alliage d'aluminium sont principalement utilisées dans les applications d'eau de mer et sont produites dans une variété d'alliages, dont les alliages de mercure et d'indium sont les plus courants. L'alliage d'indium a un potentiel de corrosion légèrement plus élevé mais est moins efficace que l'alliage contenant du mercure.

L'aluminium est préféré pour les applications en eau de mer car il a un taux de consommation beaucoup plus faible que le magnésium ou le zinc. Les anodes en aluminium ne sont pas utilisées dans l'eau douce, sauf comme anodes à courant imposé. Ils ne sont pas utilisés sous terre. Un alliage d'aluminium-zinc et d'indium est utilisé comme structure sacrificielle en béton armé. Les anodes en aluminium ont un potentiel de corrosion nominal de -1,05 V .

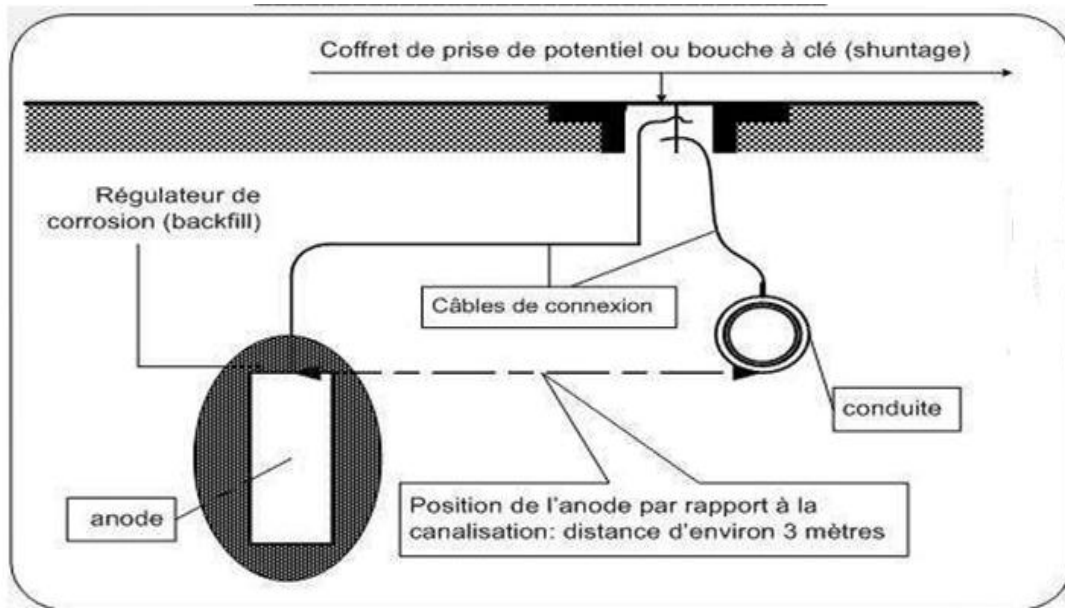
### II.3.3 Domaine d'application

Cette méthode de lutte contre la corrosion des métaux est utilisée couramment pour la protection des équipements en contact de l'eau, mais également l'on l'utilise pour la protection des ouvrages enterrés de faible distance et surtout pour une protection provisoire des canalisations en cours de réalisation

Une fois l'anode choisie, elle est installée dans le sol à trois mètres de la génératrice inférieure de la conduite. Lorsque la liaison conduite-anode est établie, le courant circule dans le sens conduite-anode et les électrons dans le sens contraire soit anode-conduite

Pour que cette protection soit réalisée correctement il faut que :

- La pile crée débite (fonctionne)
- La structure à protéger et l'anode baignent dans le même électrolyte
- L'installation soit adaptée à la structure (nombre d'anodes, dimension...)
- Prévoir un régulateur de corrosion ou un backfill sur l'anode
- Installer l'anode dans une zone humide afin de réduire la résistivité du milieu autour de celle-ci.



**Figure II.3:** Schéma d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle

### II.3.4 Avantages de la protection cathodique par anodes sacrificielles

- Aucune source d'alimentation externe
- Faibles besoins de maintenance
- Petite sortie de courant entraînant peu ou pas d'interférence de courant vagabond
- Facile à installer
- Assurer une distribution uniforme du courant
- Coûts de mise en place et de surveillance est minimales

### II.3.5 Limitations de la protection cathodique par anodes sacrificielles

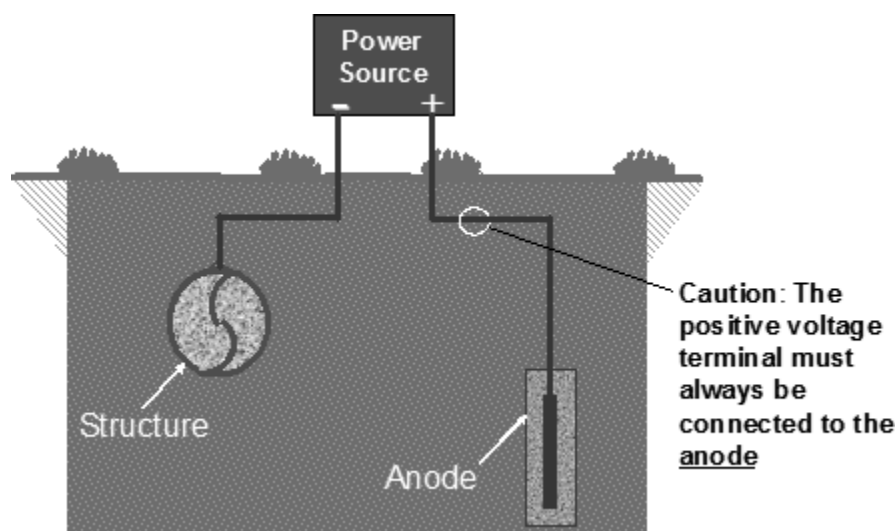
- Faible courant de protection
- De nombreuses anodes peuvent être nécessaires pour les structures mal revêtues
- Peut être inefficace dans les environnements à résistivité élevée
- Non ajustable

## II.4 Protection cathodique par courant imposé

### II.4.1 Principe

La protection par courant imposé, appelée également protection par soutirage de courant utilise une source de courant continu qui débite dans un circuit comprenant :

- Un déversoir (ou masse anodique) en métal ou graphite
- L'électrolyte (le sol ou l'eau)
- La structure métallique à protéger



**Figure II.4:** Protection cathodique à courant imposé typique

L'anode est connectée à la borne positive du redresseur alors que la structure est connectée à la borne négative de celui-ci. On ajuste la tension générée de telle sorte que l'intensité du courant soit supérieure au courant de corrosion

Les courants de protection voyagent à travers l'électrolyte, de l'anode à la structure et le courant de retour prend le chemin électrique du câble négatif, vers la borne négative du redresseur de courant. La figure suivante schématise l'installation d'un système de protection cathodique à courant imposé

### II.4.2 Domaines d'application

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante ou que la portée demandée est élevée :

- Conduites enterrées ou immergées, revêtues ou non
- Pour assurée la protection à l'intérieur des réservoirs de stockage d'eau
- Ouvrage concentrés (station de pompage ou de compression, terminaux, etc.)
- Pour les réservoirs de stockage souterrains
- Casings de forages

#### **II.4.3 Avantages des systèmes à courant imposé**

- Flexible avec la capacité de gérer une large gamme de sorties de tension et de courant
- Répondent aux exigences de courant élevé avec une seule installation
- Efficace pour protéger les structures non revêtues et mal revêtues
- Efficace dans les environnements à résistivité élevée
- Moins de consommation d'anode qu'avec des anodes galvaniques

#### **II.4.4 Limitations de la protection cathodique par courant imposé**

- Coût d'inspection et de maintenance plus élevé qu'avec les anodes galvaniques
- Nécessite une alimentation externe
- Risque élevé de provoquer des interférences de courant parasite
- Peut entraîner une surprotection entraînant :
  - Dommages de revêtement
  - La fragilisation par l'hydrogène

#### **II.4.5 Composants de la protection cathodique à courant imposé**

Pratiquement, un système de protection cathodique à courant imposé comprend :

- Les structure a protégé
- Le déversoir
- Les câbles de liaison
- La source d'énergie

##### **II.4.5.1 Le déversoir ou masse anodique**

C'est une masse en matériau conducteur de l'électricité dont le rôle est d'injecter le courant de protection dans le milieu où se trouve la structure à protéger

Les anodes utilisées dans un système de protection cathodique à courant imposé sont composées d'un métal noble suivie à l'autre extrémité de la série galvanique relativement aux

anodes sacrificielles. Ces anodes étant constituées d'un métal noble, ont donc une très faible réactivité et ne peuvent être utilisées à titre d'anodes sacrificielles. Les anodes les plus couramment utilisées dans les systèmes protection cathodique à courant imposé sont constituées de graphite, de Ferro-silice, de platine et d'alliage de métaux précieux (MMO)

Les anodes installées nécessitent la mise en place autour de backfill afin de minimiser la résistance autour de ces dernières et de favoriser la distribution des courants. Le backfill le plus couramment utilisé dans ce type de système est la poudre de coke, qui se consumera en une réaction anodique se traduisant par une extension de la surface de l'anode

En pratique il est conseillé de poser le lit d'anode au moins à une distance de 100 mètres de la conduite, afin d'augmenter la portée du poste de protection.

#### **II.4.5.2 Les câbles de liaison**

Les fils et câbles électrique assurent la transmission et la distribution d'énergie. Il existe une variété pour répondre à toutes les utilisations électriques

Toutes les connexions électriques utilisées dans les systèmes de protection cathodique à courant imposé (à l'exception des surfaces anodiques actives) doivent être gainé avec des matériaux isolants diélectriques. De plus, les connexions ne doivent pas avoir de résistance électrique importante pour éviter la surchauffe.

Le dimensionnement des fils est également une considération importante. Tout le câblage et les connexions doivent être conformes aux codes électriques applicables.

Le concepteur doit tenir compte des éléments suivants lors de la spécification du fil et du câble :

- Les exigences de transport du courant
- La chute de tension admissible dans le câble
- Le type et les propriétés chimiques de l'environnement auquel le fil sera exposé
- Température de fonctionnement
- Besoin de protection physique (conduit)
- Codes électriques en vigueur

### **II.5 Différents systèmes d'alimentation des postes de protection cathodique**

La protection des ouvrages métalliques contre la corrosion par la méthode de la protection cathodique par courant imposé nécessite la disponibilité d'une source de courant électrique continu et sans interruption.

En général cette source d'énergie est assurée par :

- L'énergie électrique provenant directement des lignes électriques
- La thermoélectricité par le biais des générateurs thermoélectriques
- Turbogénérateur
- L'énergie éolienne
- L'énergie solaire photovoltaïque

### **II.5.1 L'énergie électrique provenant de la distribution publique BT**

Cette source d'énergie étant la plus disponible et relativement à bon prix, elle est restée longtemps la principale source d'énergie utilisée dans ce domaine.

Cependant elle présente des inconvénients :

- Les variations sur le réseau de distribution électrique étant nombreuses, bien que les équipements avals soient protégés par des disjoncteurs, ils ne restent pas couverts des risques de surtensions ou de surintensités
- Les canalisations de transport des hydrocarbures sont parfois isolées, alors l'utilisation de cette source nécessite des travaux d'extension supplémentaire occasionnant parfois, des sur coût considérables
- Possibilité d'avoir un délestage prolongé

### **II.5.2 Utilisation des thermo-générateurs**

Par rapport à la source d'énergie électrique précédente l'utilisation de la thermoélectricité en protection cathodique est plus récente.

Son principe est simple : le système fonctionne sur le principe d'une pile thermoélectrique, c'est-à-dire des thermocouples connectés en série. Quand la chaleur est appliquée à un côté des thermocouples et que le côté opposé est gardé frais, une portion de l'énergie thermique est convertie en énergie électrique. Le courant continu de circuler dans la charge aussi longtemps que la chaleur sera fournie.

Scientifiquement parlant, le principe des thermo-générateurs utilisé en protection cathodique est dû à l'Effet Seebeck :

Soit deux matériaux et de nature différente reliés entre eux par deux jonctions de température  $T$ . Une des jonctions est portée à la température  $T_1$  tel que  $T_1 > T$ . Une différence de tension apparaît alors entre les jonctions froide et chaude

Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge,  $e^-$  (électrons) ou  $e^+$

(trou) du côté chaud vers le côté froid. Pour un circuit ouvert les e<sup>-</sup> (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les e<sup>+</sup> (trou) se massent dans la partie froide du matériau de type p. La partie froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une différence de charges qui a pour effet de créer une différence de potentiel entre les deux extrémités d'où la création d'une source d'électricité.

Ce système offre de multiples avantages :

- Absence de système mécanique et de désagréments sonores
- Grande fiabilité
- Durée de vie quasi illimitée

Mais aussi des inconvénients qui non négligeables :

- Faible rendement des modules thermoélectriques
- Limitation d'une utilisation à grand échelle à cause du prix élevé
- Pas de possibilité d'extension
- Problème de maintenance de la source, produisant le combustible nécessaire à la flamme
- Faibles besoins en courant.

### II.5.3 Turbogénérateur

Les groupes moteur-générateur peuvent être utilisés comme source d'énergie pour les systèmes à courant imposé. Ces unités alimentent généralement des redresseurs standards comme illustré à la Figure.

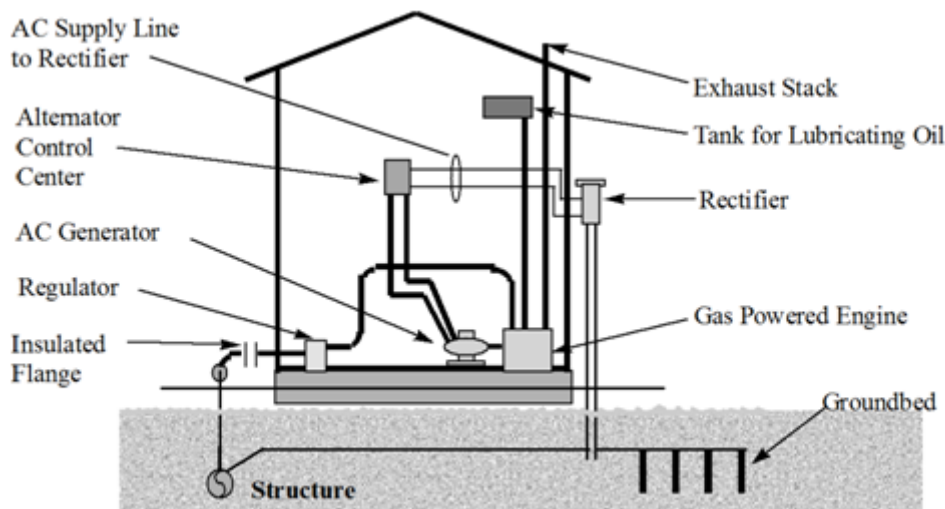


Figure II.5: Unité moteur-générateur

## II.5.4 L'énergie éolienne

Les générateurs éoliens peuvent être utilisés dans les zones avec des vents dominants à une vitesse suffisante. Les générateurs chargent également des batteries de stockage de manière à fournir un courant de protection cathodique constant.

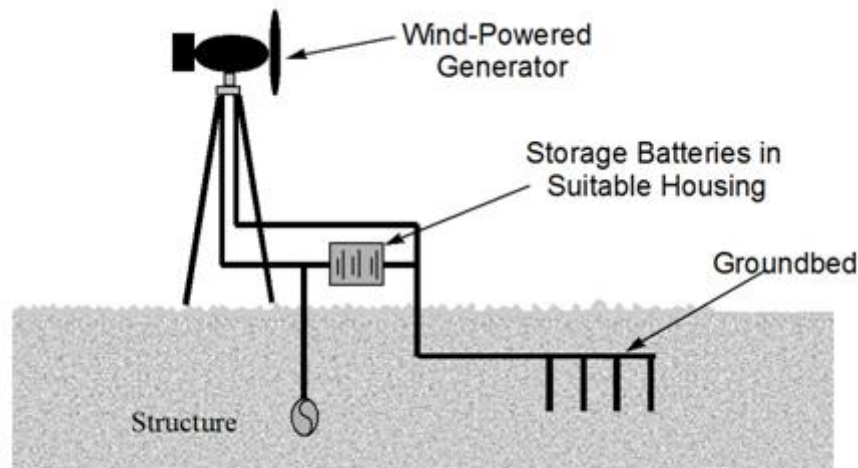


Figure II.6: Installation d'une génératrice éolienne

## II.5.5 Utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque

### II.5.5.1 Généralité

Comme la thermoélectricité, la production d'électricité par les cellules photovoltaïques est une science relativement récente. Le contexte énergétique, politique et environnemental lui est très favorable, ce qui permettant le développement de ce mode de production d'électricité.

Les forces de l'énergie solaire photovoltaïque reposent également sur des technologies microélectroniques, conservant une bonne marge de progrès et d'innovations.

Ainsi les modules photovoltaïques sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs, avec une fiabilité du fonctionnement dépassant les 99,9 % et il est important de souligner que, le photovoltaïque est l'une des rares activités qui peut être installée n'importe où, y compris en centre ville, en montagne et même dans une zone désertique, par conséquent assez pratique pour des sites isolés, ce qui est le cas des canalisations de transport des hydrocarbures dans certains pays.

Cependant son point faible le plus récurrent reste le stockage de cette énergie, qui demeure le maillon faible de ce procédé, et l'ensoleillement qui reste également un handicap pour certaine région de notre planète.

### II.5.5.2 Principe de fonctionnement

Le panneau solaire photovoltaïque (PV) est une méthode de production d'énergie électrique en convertissant la lumière du soleil en électricité à courant continu à l'aide de matériaux semi-conducteurs qui présentent l'effet PV. Un système PV utilise des modules solaires composés d'un certain nombre de cellules solaires pour fournir de l'énergie solaire utilisable. La production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque a longtemps été considérée comme une technologie d'énergie propre et durable qui s'appuie sur la source d'énergie renouvelable la plus abondante et la plus répandue de la centrale, le soleil. La conversion directe de la lumière du soleil en électricité se produit sans effet secondaire et ni émissions environnementales pendant le fonctionnement

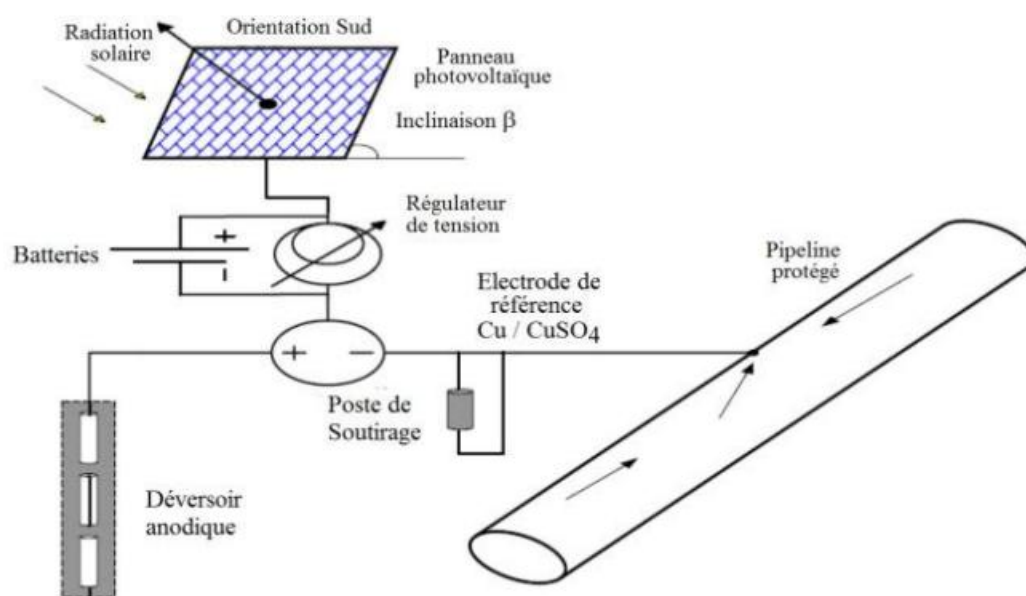


Figure II.7: Schéma d'un système de protection cathodique par énergie solaire

### II.5.5.3 Spécification de conception de l'installation PV

Chaque unité d'alimentation solaire comprendra au minimum les composants suivants :

- Panneau solaire (générateur photovoltaïque)
- Batteries d'accumulateurs au nickel-cadmium de type ventilé (ouvertes).
- Régulateur de charge de batterie.
- Régulateur ou contrôleur de tension.
- Coffret de distribution.

- Voyants lumineux, appareils de mesure et signalisation.
- Structure de support.
- Câbles d'interconnexion des équipements susmentionnés, fournis par le Fournisseur

### **A) Conditions de service**

Les conditions climatiques suivantes régiront la conception de l'équipement :

- Température nominale (max. / min.) 55°C / -5°C
- Température du sol (max. / min.) 25°C / 15°C
- Atmosphère Chargée de poussières (tempêtes de sable fréquentes)
- Humidité relative (max. / min.) 98 % / 30 %
- Vitesse du vent 180 km/h à 10 m
- Éclairs Fréquents pendant les tempêtes

### **B) Description des unités d'alimentation solaire**

Les unités d'alimentation solaire seront installées en zone non dangereuse. Elles constitueront une source d'alimentation modulaire et autonome, capable de fournir l'alimentation correspondant aux charges mentionnées dans le troisième chapitre.

### **C) Spécifications de tension continue de sortie**

Les unités d'alimentation solaire fourniront une tension de sortie de 24 V CC et le service nominal sera établi sur base des exigences d'alimentation et de la durée de chaque charge reprise dans la liste des charges électriques.

Les batteries d'accumulateurs au nickel-cadmium seront conçues et dimensionnées pour un fonctionnement autonome minimal de cinq (5) jours (sans ensoleillement).

### **D) Panneau solaire (générateur photovoltaïque)**

Les panneaux solaires seront constitués de verre et conçus de manière les effets de l'environnement sur leurs performances

Chaque panneau solaire (cellule) sera fabriqué conformément aux spécifications suivantes :

- Les cellules solaires seront constituées de silicium cristallin de haute qualité, les cellules seront des jonctions NP

- Les panneaux solaires auront un service nominal de 20 années avec une dégradation électrique prévue de moins de 10 % de la puissance nominale au cours de la vie du panneau
- Le rendement des modules sera supérieur à 10 %
- Le rapport puissance/charge d'un panneau sera au minimum de 1,087 dans les pires Conditions.
- Les boîtiers de dérivation seront étanches, avec un code de protection IP de 65



**Figure II.8:** *Panneau solaire (générateur photovoltaïque)*

### **E) Batteries d'accumulateurs**

Toutes les batteries seront du type cycle profond au nickel-cadmium et ventilées (ouvertes). Les batteries utilisées dans le système doivent posséder une conception éprouvée pour les applications d'unités d'alimentation solaires. Les batteries seront conçues pour un service et une durée de vie de vingt (20) années, compte tenu des conditions d'utilisation indiquées dans les présentes spécifications.

Les batteries seront dimensionnées pour une température minimale de 5°C. Les batteries seront dimensionnées pour subvenir aux besoins d'alimentation des charges précisées dans la liste des charges électriques pour un minimum de cinq jours sans ensoleillement (batterie de secours). Au terme de ce cycle, la tension finale des cellules des batteries sera d'au moins 95 % de la tension nominale des cellules de batterie. Les batteries seront dimensionnées de manière à ne pas tomber en-dessous de 20 % de la capacité nominale au cours de leur fonctionnement de service et dimensionnées de manière à fournir une

alimentation suffisante au microrupteur prévu sur le circuit de sortie du coffret de distribution en cas de panne positive-négative.

Les batteries seront dotées d'un boîtier ventilé en polyéthylène. Le contenant des cellules de batterie disposera d'un espace inférieur adéquat pour la collecte des saletés afin d'éviter tout court-circuit des plaques d'accumulateur du fait de leur accumulation. Le contenant sera en outre suffisamment grand pour accueillir un supplément d'électrolyte au-dessus du niveau de la plaque, de manière à garantir que le remplacement de l'électrolyte évaporé ne sera nécessaire que tous les six mois au plus, même à température ambiante maximale.



**Figure II.9:** Batteries d'accumulateurs

#### **F) Contrôleur / régulateur de charge des batteries**

Toutes les unités d'alimentation solaire seront dotées d'un chargeur de batterie automatique et d'un régulateur / contrôleur faisant partie intégrante de la conception. Le panneau solaire sera subdivisé en deux (2) sous-panneaux. Chaque sous-panneau sera commandé indépendamment de l'autre. Chaque sous-panneau sera protégé contre les courts-circuits et doté d'un sectionneur manuel. Chaque contrôleur du système reposera sur un microprocesseur doté des caractéristiques minimales suivantes :

- Indicateur de l'état de chargement de la batterie
- Vitesse et surveillance du cycle charge / décharge
- Charges basse et haute tension de sectionnement
- Commandes de charge de batterie afin d'offrir un rendement maximum de charge pour les panneaux solaires

- Le contrôleur inclura un appareil de mesure numérique d'une précision de 2 % ou mieux, L'affichage présentera au minimum : la tension de la batterie, le courant du panneau et le courant de charge
- Le contrôleur sera protégé des hausses de tension provoquées par la foudre



**Figure II.10:** *Régulateur de charge des batteries*

### **G) Régulateur de tension**

Les unités d'alimentation solaire auront une tension nominale de 24 V CC  $\pm$  10% quel que soient les conditions de fonctionnement. Le régulateur de puissance sera automatiquement déconnecté de sa charge lorsque la tension de sortie atteint un point prédéterminé. Le régulateur maintiendra la tension de sortie à 1 % d'écart maximum de la valeur de la tension de charge « Float and Boost » définie.

### **H) Coffret de distribution**

Le coffret de distribution des charges sera doté du nombre requis de sorties comme indiqué par le schéma unifilaire des unités d'alimentation solaire.

Les unités d'alimentation seront protégées des hausses de tension provoquées par la foudre à l'aide d'un parafoudre directement connecté via la sortie CC de chaque unité



**Figure II.11:** *Coffret de distribution*

### **I) Voyants, mesures et signalisations**

Le système sera auto-contrôlé par des voyants lumineux et des appareils de mesure indiquant les défaillances des principaux composants ou modules. Au minimum, les indications suivantes seront disponibles :

- Voyants d’alerte de dépassement d’une tension supérieure de sortie prédéfinie
- Voyants indiquant un sectionnement suite au passage sous une certaine tension de sortie
- Tension de batterie faible
- Défaillance du régulateur de charge
- Fonctionnement normal

Au minimum, les instruments suivants seront fournis :

- Voltmètre de sortie
- Ampèremètre de sortie

### **II.5.4 Avantages et Inconvénients**

#### **A) Avantages**

- L’absence des pièces mobiles et haute fiabilité
- Energie gratuite et renouvelable
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d’autres pollutions
- L’autonomie et une moindre sensibilité à la foudre.

**B) Inconvénients**

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible
- Le photovoltaïque n'assure pas le chauffage et la production de l'eau chaude
- Il est impératif d'utiliser des appareils économes en énergie
- Il existe un décalage entre la période de production et de la consommation
- Difficulté de stockage de l'énergie photovoltaïque

**II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents composants du système de protection cathodique des deux types, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque composant, nous permettant de commencer à quantifier les installations d'un système qui font l'objet du chapitre trois.

# **Chapitre III**

## **Dimensionnement du système de PC du gazudec GR4**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, il constitue le cœur de ce mémoire. Il expose en première partie une note de calcul pour le dimensionnement du système de protection cathodique d'un pipeline, puis une note de calcul y est également associée pour traiter du dimensionnement du générateur solaire qui fournira le courant électrique continu au poste de soutirage

Les principaux objectifs de conception de la protection cathodique pour fournir une densité de courant suffisante en continu à toutes les parties de la structure pour polariser la structure à un critère acceptable et assurer la sécurité du public et du personnel d'exploitation et respecter tous les codes et normes applicables

### **III.2 Informations de base pour la conception de la protection cathodique**

Le processus de conception de la protection cathodique pour certaines structures peut être très complexe, nécessitant de nombreuses itérations avant d'obtenir à une conception acceptable. La première étape du processus de conception consiste à collecter et à évaluer les données pertinentes concernant la structure, ses caractéristiques opérationnelles et son environnement. Pour un nouveau projet de protection cathodique de pipeline, l'ensemble de données possible comprendrait les éléments suivants:

#### **III.2.1 Informations sur le pipeline**

- Spécifications de construction
- matériau de la canalisation, diamètre, épaisseur de paroi et pression nominale
- Type, épaisseur et conductance du revêtement de canalisation et des joints
- Plages de température, du fluide à l'intérieur de la canalisation
- Tracé au profil de canalisation, nombre et emplacement des interconnexions aux systèmes de tuyauterie connexes et faisabilité de l'installation d'une isolation électrique
- Continuité électrique du pipeline
- Disponibilité de l'alimentation CA et accès routier aux installations de CP possibles
- Nombre, longueur et emplacement des gaines de tuyauterie
- Nombre, emplacement et fonctionnement des vannes de canalisation principale et type de revêtement

## III.2.2 Informations environnementales

### III.2.2.1 Conditions du sol

- Résistivité du sol le long du tracé à la profondeur de la pipe
- Informations géotechniques (types de sol et profondeur)
- Variabilité de l'humidité (saisonnière)
- Variabilité de la température et pH

### III.2.2.2 Interférences électriques

La présence, l'emplacement et les caractéristiques opérationnelles des systèmes suivants doivent être examinés:

- Systèmes de protection cathodique à courant imposé sur les pipelines étrangers ou d'autres structures
- Systèmes de transit électrique, lignes électriques DC haute tension, opérations de soudage et tout autre système électrique utilisant la terre indirectement ou directement comme chemin de courant
- Systèmes de transmission ou de distribution d'énergie AC parallèles au pipeline ou dont les pieds de tour ou les terres électriques sont adjacents au nouveau pipeline
- Les structures métalliques étrangères et leur susceptibilité aux dommages causés par les interférences

### III.2.3 Action préliminaire

- Mesures la résistivité du sol le long du tracé à la profondeur du pipeline et aussi au niveau des l'emplacement les anodes au l'endroit approprié
- Inspection visuelle du tracé du pipeline afin de vérifier la disponibilité de l'énergie électrique.
- Test de courant alternatif induit sur un fil isolé le long du tracé de conduite parallèle aux lignes électriques AC
- Localisation des «points chauds» de corrosion de la longue ligne sur la tuyauterie nue

## III.3 Hypothèses de calcul

Selon la norme ISO 15589-1 : 2015; l'étude des besoins en courant de protection est calculée, en prenant les hypothèses suivantes:

- Basée sur les facteurs de dégradation du revêtement
- Basée sur la densité de courant pour les canalisations revêtues

Le calcul des facteurs de dégradation du revêtement peut être effectué à partir des valeurs données dans le tableau III.1. Le choix des facteurs de dégradation du revêtement pour d'autres types de revêtements de canalisations doit être justifié et documenté.

Type de revetment	$F_i$	$\Delta f$
FBE	0,005	0,003
3LPE	0,001	0,000 3
3LPP	0,001	0,000 3
Liquid epoxy	0,008	0,01
urethane de goudron / houille	0,008	0,01

**Tableau III.1 :** Facteurs de dégradation de revêtement selon le type de conception

Pour les nouveaux pipelines, le besoin en courant totale est déterminé à l'aide de la formule  
 Suivant: Surface nue = Surface totale x Facteur de dégradation du revêtement

$$S_{nue} = f_f * S_{total} \quad \text{et} \quad f_f = f_i + (\Delta f \times t_{DV}) \quad \text{(III.1)}$$

Sachant que:

$f_f$ : Facteur final de dégradation du revêtement

$f_i$ : Facteur initial de dégradation du revêtement au début de l'exploitation de la canalisation

$\Delta f$ : Augmentation annuelle moyenne du facteur de dégradation du revêtement

$t_{DV}$ : Durée d'exploitation [an]

Après de évaluer le surface nue, il doit être calcule la valeur nécessaire de courant pour assurée la protection de notre ouvrage à partir le formuler suivant:

$$I_t = k * f_f * S * i_{acier\ nue} \quad \text{(III.2)}$$

Avec:

$I_t$ : Courant total de protection [A]

k: Facteur de contingence

$f_f$ : Facteur final de dégradation du revêtement

S: Surface de la canalisation [m<sup>2</sup>]

$I_{nu}$ : Densité de courant de protection cathodique pour un acier nue [A/m<sup>2</sup>]

K est un facteur lié à une Eventuelle distribution de courant non uniforme le long de la canalisation, à une atténuation et à un effet d'écran, des valeurs k supérieures à 1,25 sont normalement utilisées.

Les densités de courant de conception typiques pour les canalisations en acier nu ou en fonte doivent être comprises entre 100 mA / m<sup>2</sup> et 1 A / m<sup>2</sup>, principalement en fonction du taux de diffusion de l'oxygène à la surface du métal et de la résistivité de l'électrolyte pour atteindre les critères de protection cathodique et selon NACE SP0193 (2016) :  $i_{nu} = 10$  à 20 mA/m<sup>2</sup> pour la PC des fonds de bacs.

Cette méthode ignore la quantité de courant qui passe à travers le revêtement, mais la tolérance pour la zone nue est tellement surdimensionnée pour une structure bien revêtue que l'exigence de courant calculée est généralement plus que suffisante.

La deuxième méthode est la méthode la plus courante et la plus utilisée pour dimensionnement le système de protection cathodique a courant imposé. Elle est basée sur le calculer la surface totale du pipeline et à appliquer la densité de courant pour les canalisations en acier revêtues donnée dans le tableau III.2 et en utilisant la formule (III.3)

Type de revêtement	Densité de courant pour un dimensionnement optimisé (mA/m <sup>2</sup> )	Densité de courant pour un dimensionnement conservateur (mA/m <sup>2</sup> )
3LPE ou 3LPP	0.001 à 0.02	0.05 à 0.2
FBE	0.02 à 0.2	0.4 à 0.7
uréthane de goudron	0.2 à 0.3	0.3 à 0.8

**Tableau III.2:** Densité de courant de conceptions typiques pour les conduites revêtues

$$I_{PC} = k * S * i_{Acier\ revêtu} \quad (III.3)$$

Avec:

$I_{PC}$ : Courant de protection cathodique [A]

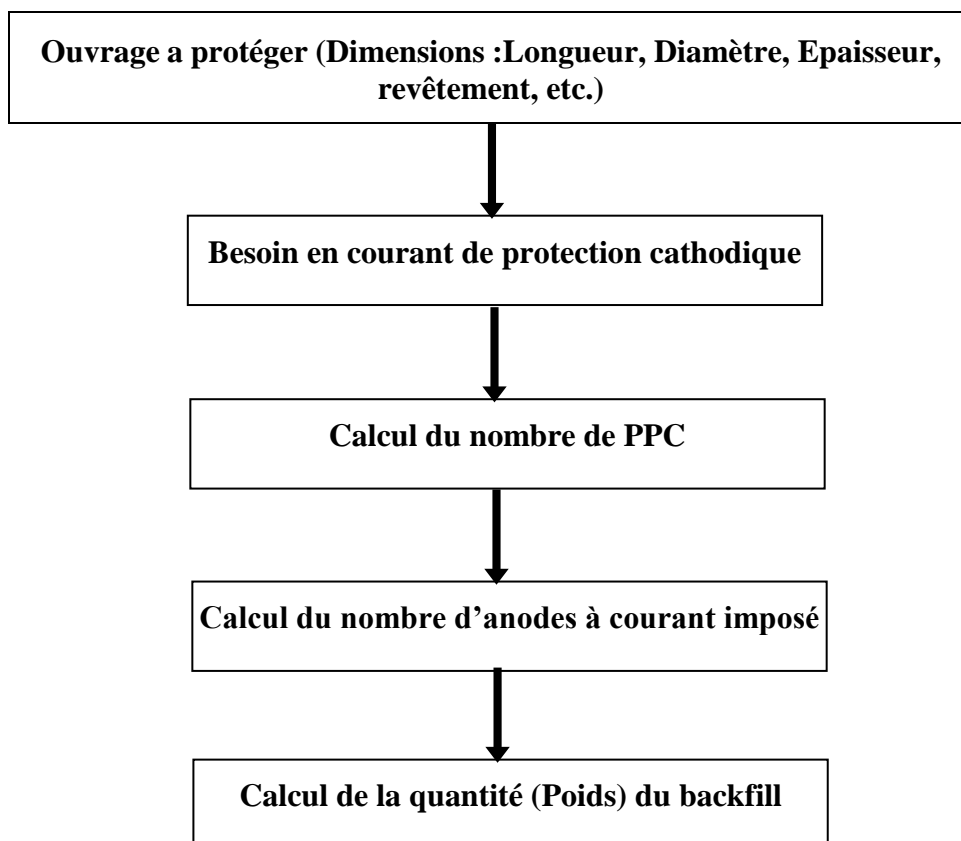
S: Surface de la canalisation [ $m^2$ ]

k: Facteur de contingence [ $> 1.25$ ]

$i_{PC}$ : Densité de courant de protection cathodique pour une canalisation revêtue [ $A/m^2$ ]

### III.4 Procédure de dimensionnement du système de PC du gazoduc GR4

Le diagramme général de calcul des systèmes de protection cathodique est comme suit



### III.5 Théorie et note de calcul

#### III.5.1 Les équations mathématiques utilisées pour les calculs d'atténuation

##### III.5.1.1 Résistivité du sol

Comme précisé dans le chapitre premier, ce paramètre très important est déterminé par la méthode des quatre piquets. De façon générale elle est mesurée le long de la structure avec un intervalle de 100 à 500 m pour un ouvrage en projet et à chaque 100 à 200 m pour un ouvrage existant.

Ceci étant pour une longue structure, tels les pipelines, plusieurs mesures sont effectuées, la résistivité du sol est donc être estimée à une valeur moyenne, qui est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\rho_{sm} = \frac{1}{N} * \sum \rho_i \quad (\text{III.4})$$

Où :

N : Nombre de tronçons = 893

$\rho_{sm}$  : Résistivité moyenne du sol

$\rho_i$  : Résistivité du sol de tronçon

Les instruments de mesure de la résistivité du sol par cette technique sont largement disponibles La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre piquets de Wenner.

### III.5.1.2 Résistance Longitudinale de la conduite par unité de longueur $R_c$

Les structures métalliques traversées par le courant de protection sont considérées comme des conducteurs et tout conducteur présente une résistance au passage d'un courant électrique.

Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinales et dépend de la nature du matériau et de ses dimensions.

Autrement appelé résistance transversale, par unité de longueur elle s'exprime en [ $\Omega/m$ ] et est donnée par :

$$R_c = \frac{\rho_c}{\pi * (\phi_{ext} - \delta) * \delta} \quad (\text{III.5})$$

Avec:

$\rho_c$  : Résistivité électrique du matériau de la structure [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]  $\rho_c$  de l'acier peut être accepté pour  $0.245 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

$\phi_{ext}$  : Diamètre extérieur de la structure [mm]

$\delta$  : Epaisseur moyen de la conduite [mm]

### III.5.1.3 Résistance transitoire "conduite-sol" $R_t$

La variation de la résistance transitoire « conduite-sol » notée  $R_t(t)$  et exprimée en  $[\Omega.m^2]$ , peut être évaluée, pour des pipelines en projet ou en exploitation par la relation suivante :

$$R_t(t) = R_{ti} * e^{-\beta * t} \quad (III.6)$$

Néanmoins, en général pour les calculs en protection cathodique on utilise plutôt la valeur moyenne de la résistance transitoire conduite — sol qu'on note ( $R_{tm}$ ) pour une durée de protection « t » connue. Exprimée en  $[\Omega.m^2]$ , elle est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta * t)} * [1 - e^{(-\beta * t)}] \quad (III.7)$$

Avec:

$\beta$  : Coefficient de vieillissement du matériau de la conduite [1/an]

$\beta_{acier}$  peut être égal à 0.124: 1/an

t : Durée d'exploitation du système de protection [an]

$R_{ti}$  : Résistance initiale d'isolement du revêtement; à t = 0  $[\Omega.m^2]$

### III.5.1.4 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite $R_r$

Elle s'exprime en  $[\Omega.m]$  et est notée  $R_r(t)$  pour une durée d'exploitation t.

$$R_r(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi * \phi_{ext})} \quad (III.8)$$

En outre, au début de l'installation du système de protection la résistance d'isolement du revêtement est plus importante. Notée  $R_r(0)$ , elle est donnée par :

$$R_r(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi * \phi_{ext})} \quad (III.9)$$

### III.5.1.5 Calcul du coefficient d'atténuation $\alpha$

Est appelé aussi 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 :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_{r(t)}}} \quad \text{(III.10)}$$

### III.5.2 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes

Selon les caractéristiques du pipeline, un certains nombre de postes de soutirage est nécessaire pour abaisser suffisamment le potentiel de la conduite afin de satisfaire au critère de protection.

#### III.5.2.1 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue $Z$

Dans le domaine du transport des hydrocarbures par canalisation, les pipelines sont toujours revêtus, et ce revêtement constitue le siège d'une résistance ; dite résistance d'entrée.

Comme toutes résistances, elle s'exprime en ohm et est donnée par :

$$Z = \frac{\sqrt{R_c * R_{r(t)}}}{2} \quad \text{(III.11)}$$

#### III.5.2.2 Valeurs des potentiels

Généralement on distingue pour les structures métalliques immergées ou enterrées trois types de potentiels pris en compte dans les calculs de protection cathodique. Ces potentiels sont donnés par rapport à une électrode de référence, qui sera tout au long de ce travail, l'électrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu-CuSO<sub>4</sub>)

- Le potentiel naturel : c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol ; on le notera  $E_{nat}$ . L'expérience montre que pour l'acier cette valeur est dans l'intervalle de -0.45 à -0.617 volts, en revanche, si elle n'est pas connue on peut supposer que  $E_{nat} = -0.55$  V
- Les potentiels de protection  $E_{max}$  et  $E_{min}$  : ils constituent un intervalle à l'intérieur duquel le métal ne s'oxyde point, ils sont choisis d'après le diagramme de Pourbaix. Pour l'acier la plus petite valeur en valeur absolue est de 850 mV. Quant à  $E_{max}$ , il est choisie en fonction du type de revêtement, c'est-à-dire que pour une valeur

donnée, le gain de potentiel correspondant;  $E_{pmax}$  ne doit pas excéder 1200 (-mV) pour un revêtement en PE tri-couche.

- Gain de potentiel : c'est la différence de potentiel que prend le métal par rapport au potentiel naturel lorsqu'il est relié au poste de soutirage. On distingue un gain de potentiel de protection maximum et minimum, notés respectivement  $E_{pmax}$  et  $E_{pmin}$ .

$$\boxed{E_{pmax} = E_{max} - E_{nat}} \quad \text{(III.12)}$$

$$\boxed{E_{pmin} = E_{min} - E_{nat}} \quad \text{(III.13)}$$

Comme le courant qui est déversé dans l'électrolyte pour ensuite pénétrer dans la conduite, afin de baisser son potentiel, le potentiel que prend le métal une fois connecté au système de protection cathodique n'est pas constant, il varie suivant l'allure d'une loi exponentielle.

Afin d'établir l'expression de cette variation du potentiel et du courant j'émetts les hypothèses suivantes :

- L'électrolyte (sol) est homogène le long du pipeline
- Le diamètre, l'épaisseur de la paroi et la résistance électrique des tubes soudés sont constants.
- Le revêtement de la conduite est uniforme le long de la canalisation.

Ainsi, après calcul on retrouve les expressions donnant la variation du potentiel et du courant à un point « x » quelconque de la conduite :

$$\boxed{E(x) = E_{max} \cdot \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot z + \rho_{ms}} \cdot e^{-\alpha \cdot x} + \frac{\rho_{ms} \cdot y}{(2 \cdot \pi \cdot y \cdot z) \cdot \sqrt{y^2 + x^2}} \right]} \quad \text{(III.14)}$$

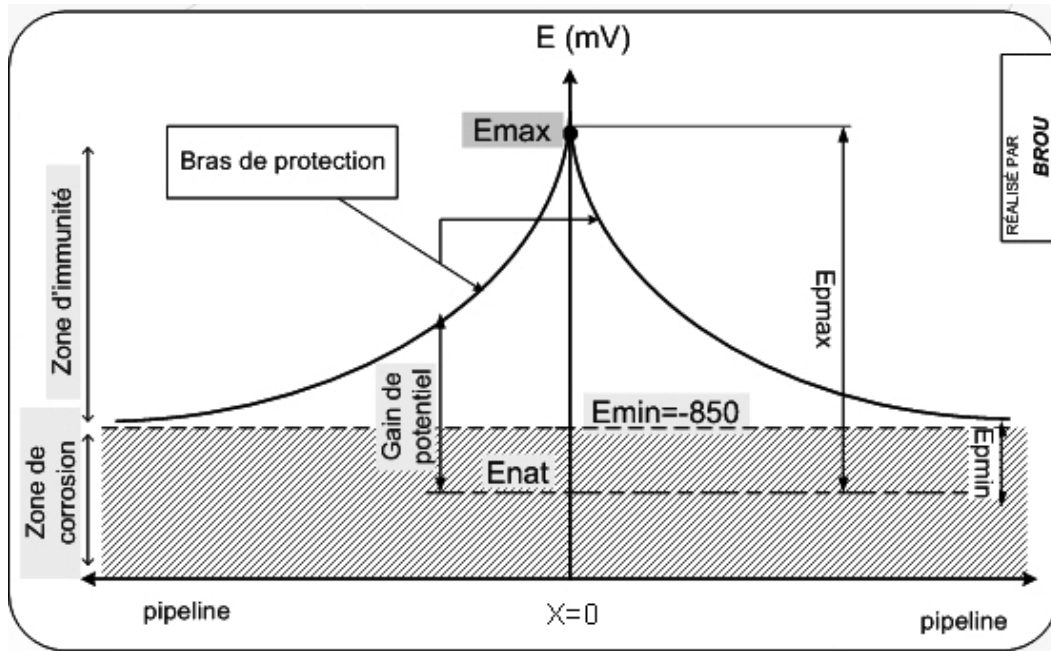


Figure III.1: Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

### III.5.2.3 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins K

La plupart du temps les canalisations de transport d'hydrocarbures sont assez longues, par conséquent, un seul poste de soutirage ne suffirait pas à livrer le courant nécessaire pour la protection. C'est pourquoi l'on tient compte d'un facteur (de valeur approximative 0.5) dans les calculs de la longueur de protection d'un poste donné. Ce coefficient est obtenu par l'expression ci-dessous :

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{p \min}}{E_{p \max}}\right)^2 * \frac{2 * \pi * y * z + \rho sm}{2 * \pi * z * y}}} \quad (\text{III.15})$$

### III.5.2.4 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage $L_p$

On appelle longueur de protection  $L_p$  [m], d'un poste de protection cathodique, la longueur maximale de conduite qui peut être protégée à l'aide du courant fourni par ce poste. En d'autre terme, c'est la portée du poste de soutirage.

Quant au bras de protection, c'est la moitié de la longueur de protection. Ainsi, un poste de soutirage à deux bras de protection.

$L_p$  s'exprime en mètre [m] et est déterminé suivant la relation :

$$L_p = \left(\frac{2}{\alpha}\right) * L_n \left[ \frac{2 * \pi * y * z}{k * \frac{E_{P \min}}{E_{P \max}} * (2 * \pi * y * z + \rho sm)} \right] \quad (\text{III.16})$$

Où Y [m] désigne la distance entre le lit d'anode et la conduite.

### III.5.2.5 Calcul du nombre de postes de protection cathodique $N_{PPC}$

Connaissant la longueur totale (L) exprimée en mètre, du pipeline à protéger et ayant déterminé la portée d'un poste de soutirage, nous pouvons établir l'expression donnant le nombre de postes de soutirage.

$$N_{ppc} = \frac{L}{L_p + 1} \quad (\text{III.17})$$

### III.5.3 Calcul de l'intensité du courant de drainage $I_{dr}$

Quant au courant de drainage, c'est le courant nécessaire que doit fournir le poste de protection afin de satisfaire au critère de protection en tout point de la conduite. Elle est exprimée en Ampère, et donnée par la relation ci-dessous :

$$I_{dr} = \frac{E_{pamx}}{z * [1 + 2 * EXP(-\alpha * L_p)] + \frac{\rho sm}{2 * \pi * y}} \quad (\text{III.18})$$

Il est important de noter que le courant délivré par le poste de soutirage au début de l'installation est relativement plus faible que le courant nécessaire, à la fin de la durée d'exploitation. Cela est particulièrement lié à la résistance d'isolement du revêtement qui est assez élevé en début d'exploitation. Le courant en début d'exploitation est déterminé par la relation suivante tout en négligeant les variations de k :

$$I_{dr}(0) = \frac{|E_{pamx}|}{z(0) * [1 + 2 * EXP(-\alpha * L_p)] + \frac{\rho sm}{2 * \pi * y}} \quad (\text{III.19})$$

### III.5.4 Calcul du nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection $N_a$

Connaissant la durée de vie de la protection et les caractéristiques de l'anode choisie, nous pouvons estimer le nombre d'anodes nécessaire à la protection contre la corrosion d'une structure par la relation ci-dessous :

$$N_a = \frac{I_{dr} * t * m}{\mu * M_a} \quad \text{(III.20)}$$

Sachant que:

$I_{dr}$  : Courant de protection (ou de drainage) [A]

$t$  : Durée de l'exploitation [an]

$m$  : Consommation massique de l'anode [Kg/(A.ans)]

$M_a$  : Masse d'une anode [Kg]

$\mu$  : Coefficient d'utilisation de l'anode

### III.5.5 Calcul de la résistance de terre du déversoir $R_{dév p}$

La résistance du déversoir est donnée par :

$$R = R_{ma} + R_t + R_{pol} \quad \text{(III.21)}$$

Avec :

$R_t$  : Résistance du lit d'anode [ $\Omega$ ]

$R_{ma}$  : Résistance du matériau de l'anode [ $\Omega$ ]

$R_{pol}$  : Résistance de polarisation [ $\Omega$ ]

#### III.5.5.1 Calcul de la résistance de polarisation $R_{pol}$

Elle est exprimée en ohm et donnée par l'expression :

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I_{da}} \quad \text{(III.22)}$$

$U_a$  : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes [V],  $U_a = 2v$

$I_{da}$  : Moyenne arithmétique entre  $I_{dr(0)}$  et  $I_{dr}$  [A]

### III.5.5.2 Calcul de la résistance du matériau de l'anode $R_{ma}$

Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{ma} = \rho_a * L_a / S_a \quad (\text{III.23})$$

### III.5.5.3 Calcul de la résistance du lit d'anodes $R_t$

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul ce paramètre. Mais nous utiliserons celles données par NACE (National association of corrosion engineers)

La résistance totale des anodes dépend de plusieurs facteurs :

- Position des anodes, verticalement ou horizontalement
- La profondeur de pose des anodes
- L'espace entre les anodes
- La résistivité du backfill

Pour le cas des anodes placés verticalement dans un puits profond , la résistance totale est donnée par la relation ci-dessous

$$R_{Dev-P} = [\rho / (2 * \pi * L_{Active})] * [\ln ((8 * L_{Active}) / d_{puits}) - 1] \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$R_{Dev-P}$  : Résistance d'un déversoir profond [ $\Omega$ ]

$\rho$  : Résistivité du sol en profondeur 120 [ $\Omega.cm$ ]

$d_{puits}$  : Diamètre du puits anodique 8" [cm]

$$N_{Anode} = (L_{active} - e) / (L_{Anode} + e) \quad (\text{III.25})$$

Et:

$N_{Anode}$ : Nombre d'anodes à courant imposé

$L_{Active}$ : Longueur active du déversoir [m]

$L_{Anode}$ : Longueur d'une anode 1.5 [m]

$e$ : Espacement entre anodes 5 [m]

### III.5.6 Calcul de la puissance du poste de soutirage

La puissance  $P$  [W] du poste de soutirage permet de dimensionner la source d'énergie. Mais avant de déterminer ce paramètre, il faut estimer la tension de la station de soutirage

#### III.5.6.1 Détermination de la tension du poste de soutirage $U$

La tension du poste  $U$  [V], est obtenue en appliquant la loi d'Ohm. Mais pour une régulation et disponibilité du courant de protection lors de l'exploitation du système, le poste de protection cathodique doit avoir une réserve en tension, ce qui nous conduit à une correction de la tension en tenant compte du rendement du poste noté ;  $\eta=0.85$

$$U = \frac{[R_{tot} * I_{dr}]}{\eta} \quad (III.26)$$

Par ailleurs, l'application de cette relation nécessite la connaissance de la résistance totale  $R_{tot}$ . En effet du point de vue électrique le système protection cathodique par courant imposé peut être schématisé comme le circuit suivant

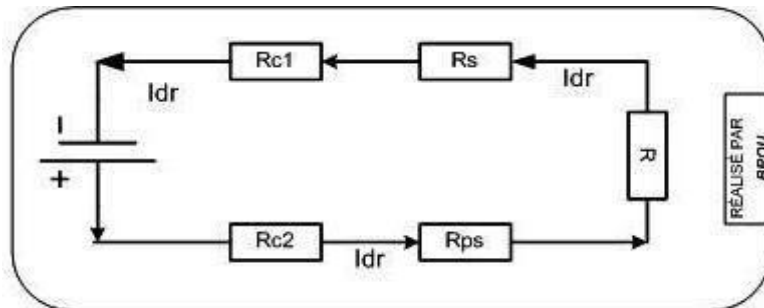


Figure III.2 : Circuit électrique du système de protection

Toutes ces résistances étant en série on peut déterminer la résistance équivalente  $R_{tot}$ , qui est la résistance totale du système tout en négligeant  $R_s$  pour sa valeur assez faible devant les autres

$$R_{tot} = R_c + R + R_{ps} \quad (III.27)$$

Où

$R_c = R_{c1} + R_{c2}$  : résistance du câble [ $\Omega$ ]

$R_{ps}$  : résistance due à la protection passive =  $z$  [ $\Omega$ ]

R : résistance de terre du déversoir [ $\Omega$ ]

$R_s$  : résistance du sol entre la canalisation et le déversoir [ $\Omega$ ]

### III.5.6.2 Détermination de la puissance du poste de protection cathodique P

D'après les lois de l'électricité connaissant le courant délivré par le poste et sa tension, sa puissance peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = U * I_{dr} \quad \text{(III.28)}$$

Ayant la puissance, nous pouvons procéder au choix et au dimensionnement de la source d'alimentation en énergie électrique du poste de soutirage

Pour cette étude nous avons choisie d'utilisé l'énergie solaire photovoltaïque suite aux raisons évoqué dans le chapitre précédent

## III.6 Dimensionnement du système photovoltaïque

Etant donnée une localisation géographique et donc des données météorologiques, le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque est la recherche de l'équilibre entre la satisfaction de la demande énergétique exprimée

Le générateur solaire ainsi préconisé est donc, étroitement lié aux valeurs d'entrée (données d'ensoleillement, demande énergétique) et l'autonomie du générateur peut être affectée, par exemple par une augmentation de la consommation lors des périodes critiques, qui peut être résolu suite à la flexibilité de ce procédé de production d'électricité

### III.6.1 Données d'entrée d'ensoleillement

Comme, souligné précédemment l'ensoleillement ; durée d'exposition d'un lieu au soleil est un facteur très important dans le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque

A titre indicatif l'ensoleillement (irradiation) journalier reçu à l'angle optimal pendant le mois le moins favorable de toute l'année de certaines régions est consigné dans le tableau ci-dessous :

Localité	Irradiation moyenne
Sud algérien	6 à 7 Kwh/m2
Cote d'ivoire	4 à 5 Kwh/m2
France	2 à 4 Kwh/m2

**Tableau III.3:** Irradiation moyenne de certaines régions

### III.6.2 Données d'entrée de la demande énergétique

Elle consiste en l'évaluation de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la charge qui est le poste de soutirage dans le cas présent

#### III.6.2.1 Calcul de l'énergie nécessaire au poste de soutirage $E_n$

L'énergie nécessaire au poste de soutirage, c'est l'énergie minimale dont le poste a besoin pour assurer sa fonction sous une puissance et pendant un temps de fonctionnement donnés

$$E_n = P * t_f \quad \text{(III.29)}$$

Avec:

$E_n$  : énergie nécessaire au poste de soutirage [wh/j]

P : puissance du poste de soutirage [w]

$t_f$  : temps de fonctionnement du poste du générateur solaire [h/j]

#### III.6.2.2 Calcul de l'énergie à produire par le générateur photovoltaïque $E_f$

L'énergie à fournir par le générateur photovoltaïque est donc donnée par:

$$E_f = \frac{E_n}{[1 - F]} \quad \text{(III.30)}$$

$E_f$  : Energie à fournir [Wh/j]

F : Pertes; estimée de 25 à 45%

$E_n$  : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]

Ces pertes ont plusieurs origines :

- Pertes par accumulation de poussière sur le panneau

- Pertes (chutes de tension) dans le câblage et les équipements de conditionnement de l'énergie.
- Pertes dues aux batteries.
- L'incertitude météorologique...

### III.6.2.3 Calcul de la taille du générateur photovoltaïque à installer

#### A) Calcul de la puissance crête (maximale) du générateur photovoltaïque $PC_G$

La puissance crête totale du champ photovoltaïque, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, elle est donnée par:

$$PC_G = \frac{E_f}{I_r} \quad (\text{III.31})$$

$I_r$ : Irradiation quotidienne moyenne annuelle [kWh/m<sup>2</sup>.j]

#### B) Détermination du nombre de panneau solaire $N_{ps}$

Le nombre de module solaire est un nombre entier fonction de la puissance crête du générateur et de la puissance crête du panneau ( $PC_{ps}$ ) solaire choisi.

$$N_{ps} = \frac{PC_G}{PC_{ps}} \quad (\text{III.32})$$

### III.6.2.4 Dimensionnement du parc batteries

#### A) Calcul de la capacité des accumulateurs nécessaires C

Pour déterminer la capacité des batteries, on utilise l'équation suivante:

$$C = \frac{[E_n * A]}{[D * U]} \quad (\text{III.33})$$

Sachant que:

C : Capacité du parc de batteries [Ah]

$E_n$  : Energie nécessaire = énergie consommée [Wh]

A : Autonomie de la batterie [Jours]

D : Limite de décharge profonde

U : Tension de fonctionnement du système [V]

D'après les conditions climatique du site, le meilleur type de batterie c'est; (Ni-Ca) Parce que sa marge de fonctionnement correspond à notre site (-5° +50°C)

### B) Calcul du nombre de batteries nécessaires

Le nombre de batteries à prévoir est donné par le rapport entre la tension choisie (tension sous laquelle fonctionnent les équipements du système) et la tension délivrée par une batterie. Ainsi, les batteries sont assemblées en série pour fournir la tension nécessaire

### III.6.3 Choix des câbles de connexions

Il est nécessaire de limiter la longueur des câbles électriques entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres

En effet les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12V, 24V, 48V), donc; avec un courant élevé ( $P = U \times I$ ), Si U est faible, I est très élevé pour la même puissance). Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères provoque des pertes par effet joule aux niveaux des conducteurs

#### III.6.3.1 Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier)

Elle se fait en suivant les étapes suivantes :

##### A) Calcul du courant de sortie d'un panneau à sa puissance nominale Is

$$I_s = \frac{PC_{PS}}{U} \quad \text{(III.34)}$$

##### B) Détermination de la section des conducteurs

Soit  $\Delta U_{\max}$ , la chute de tension maximale entre panneaux – boîte de raccordement et  $R_{\max}$  [ $\Omega$ ], la résistance maximale de la ligne ; la surface en [ $\text{mm}^2$ ] du câble de résistivité  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{mm}$ ] et de longueur L [mm] est donnée par :

$$S_{ps\text{-boitier}} = \frac{\rho * L}{R_{\max}} \quad \text{(III.35)}$$

$$\Delta U = U * \Delta U_{\max} \quad \text{(III.36)}$$

$$R_{\max} = \frac{\Delta U}{I_s} \quad (\text{III.37})$$

### III.6.3.2 Détermination de la section des câbles boîtier –régulateur

Elle s'effectue également en deux étapes, qui sont :

#### A) Calcul du courant circulant entre le boîtier et le régulateur $I_{b-o}$

$$I_{b-o} = \frac{[N_{ps} * PC_{ps}]}{U} \quad (\text{III.38})$$

#### B) Détermination de la section des conducteurs

Pour une longueur L et une résistance R

$$S_{b-ol} = \frac{\rho * 2 * L}{R} \quad (\text{III.39})$$

### III.6.3.3 Détermination de la section des câbles régulateur-batterie

Calcul du courant circulant entre les batteries et le régulateur :  $I_{o-b} = I_{\max B}$

Ce courant est calculé en supposant que la batterie débite à sa puissance nominale

$$I_{\max B} = \frac{P_{\max \text{ Ondul.}}}{U} \quad (\text{III.40})$$

$$S_{B-ol} = \frac{\rho * L}{R} \quad (\text{III.41})$$

Ayant les relations et les données nécessaires, nous passons à la partie suivante qui consistera au dimensionnement du système de protection cathodique du gazoduc GR4.

## III.7 Dimensionnement du système de protection cathodique du GR4

### III.7.1 Description de l'ouvrage

Le projet est composé d'une canalisation en acier d'une longueur de 222 km et  $\Phi$  48". Cet ouvrage assure le transport de gaz naturel à partir de la Terminal départ Rhoud Nous (PK0+00) jusqu'à PC3 Hassi Messaoud se compose de:

- Une canalisation 48" X 222, 926km
- Un (01) terminal de départ correspondant au (PK 0+000), Rhoud Nous
- Trois (03) postes de coupure (Gassi Touil, Zina et PC3 Hassi Messaoud)
- Neuf (09) postes de sectionnement

Le gazoduc sera enterré sur toute sa longueur, à une profondeur de 0,80 m au minimum par rapport à la génératrice supérieure excepté les endroits nécessitant une sur profondeur tels que les traversées de routes, etc

### III.7.2 Caractéristiques du gazoduc GR4 Sud

- Longueur de la canalisation = 222 Km.
- Diamètre de la canalisation = 48"
- Epaisseur de la canalisation = 12.89 mm.
- Nuance de l'acier de la canalisation : API 5L X70
- Type de revêtement: Polyéthylène tri-couche PEHD
- Résistivité électrique du matériau:  $0.18 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
- Coefficient de vieillissement du revêtement:  $0.124 \text{ an}^{-1}$
- Durée de vie de la protection: 25 ans
- Résistance d'isolement initial du revêtement:  $20000 \Omega \cdot \text{m}^2$
- Potentiel naturel du tube: 550 (-) mV
- Potentiel de protection Max: 1200 (-) mV
- Potentiel de protection Min: 850 (-) mV

### III.7.3 Caractéristique de l'électrolyte (résistivité du sol)

Le relevé des mesures de résistivité du sol a été effectué à chaque 250 m. Un total de 893 mesures (points) a été effectué sur la totalité de la Longueur de la trace 222 Km, qui est divisée en trois sections:

**Section 1:** Rhoud Nous à Gassi Touil (72 km),  $\rho_{sm}=150.00 \Omega.m$

**Section 2:** Gassi Touil à Zina (82 km),  $\rho_{sm}=104.23 \Omega.m$

**Section 3:** Zina à Hassi messaoud (68km),  $\rho_{sm}=237.76 \Omega.m$

### III.7.4 Caractéristiques des anodes

Pour cette étude nous utiliserons Les anodes à courant imposé seront en alliage Ferro-Silicium additionné de Chrome appelé communément Ferro silicium (Fe-Cr-Si)

ELEMENT	%
Carbonne	0.70 - 1,1
Silicium	14.25 -15.25
Magnésium	1.75
Cuivre	0,3 – 0.6
Molybdène	0,2
Chrome	3,5 - 5
Fer	Reste

**Tableau III.4:** *Composition chimique d'anodes Ferro silicium*

- Dimension des anodes : 3''X60'' double tête
- Poids des anodes Fe-Si-Cr : 49 a 52Kg
- Anodes en chapelets
- Chaque chapelet est composé de 4 anodes
- La consommation des anodes Ferro-silicium-chromé est de 0,3 Kg /Ampère. An.
- Densité de courant admissible est de 0,2 A/dm<sup>2</sup>.
- Masses spécifique : 6,6 a 7 g / cm<sup>3</sup>
- Profondeur de pose:150 m

### III.7.5 Caractéristiques du générateur photovoltaïque

Spécifications techniques des équipements d'un poste de protection cathodique alimenté par énergie photovoltaïque:

### III.7.5.1 Caractéristiques Techniques Module photovoltaïque MODUL PS

- Tension : 12 V
- Puissance Maximale (P<sub>MAX</sub>) : 75 W
- Rendement module : 17.96 %
- Tension à puissance maximale (V<sub>mp</sub>) : 18.2 Volt
- Intensité à puissance maximale (I<sub>mp</sub>) : 4.13 Amp
- Tension circuit ouvert (V<sub>oc</sub>) : 22.5 Volt
- Courant de court circuit (I<sub>sc</sub>) : 4.28 A
- Tolérance de puissance : 0% à +5%
- Tension max de système : 1000 Volt

### III.7.5.2 Caractéristiques techniques de la batterie

- Type Batterie: au Plomb (SERELIO)
- Tension: 12 V
- Capacité : 130 Ah
- Autonomie: 5 jours
- Décharge maximale admissible: 80 %

### III.7.5.3 Caractéristiques techniques du régulateur

- Type: Studer Inno Compact C 2324S Régulé
- Tension nominale : 24Vdc
- Courant d'entrée maximal supporté : 70 A

### III.7.5.4 Généralités du système

- Irradiation moyenne : 7 KWh/m<sup>2</sup>.jours
- Tension de fonctionnement : Tension du poste (normalisée)
- Chute de tensions maximale : 0.02 V
- Perte : (F) 20 %
- Distance panneau-boîtier : 7 m
- Distance boîtier –régulateur : 10 m
- Distance batterie –régulateur : 4 m
- Temps de fonctionnement : 24 H/jours

### III.7.6 Dimensionnement du système de protection

En utilisant la note de calcul exposée dans la première partie de ce chapitre et les données concernant la structure à protéger et les éléments de protection, j'effectue les calculs ci-après afin de dimensionner le système de protection

#### III.7.6.1 Calcul de la résistivité moyenne du sol

En utilisant la relation (III.4) j'obtiens :

$$\rho_{sm} = 150 \Omega.m$$

#### III.7.6.2 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur

L'application de la relation (III.5), nous donne :

$$R_C = 3.68 * 10^{-6} \Omega/m$$

#### III.7.6.3 Resistance transitoire moyenne, "conduite-sol"

Par application de la relation (III.7) ; j'effectue le calcul suivant :

$$R_{tm} = 6.16 * 10^3 \Omega/m$$

#### III.7.6.4 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation

Elles s'obtiennent par application des formules (III.8) et (III.9) respectivement

$$R_r(t) = 1.6 * 10^3 \Omega.m$$

$$R_r(0) = 5.22 * 10^3 \Omega.m$$

#### III.7.6.5 Calcul du coefficient d'atténuation

Il est déterminé par application de la relation (III.10)

$$\alpha = 4.77 * 10^{-5}$$

#### III.7.6.6 Calcul de la résistance d'entrée de la conduite

En appliquant l'équation (III.11), j'obtiens

$$Z = 0.038 \Omega$$

$$Z(0) = 0.069 \Omega$$

### III.7.6.7 Calcul des gains de potentiel

Elles s'obtiennent en appliquant les relations (III.12) et (III.13)

Gain de potentiel

$$E_p \text{ max} = - 650 \text{ mV}$$

$$E_p \text{ min} = - 300 \text{ mV}$$

### III.7.6.8 Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins

D'après l'équation (III.15), en optant pour  $y = 300 \text{ m}$ , j'ai

$$K = 0.62$$

### III.7.6.9 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage

Par application de la relation (III.16), j'obtiens :

$$L_p = 39.54 \text{ km}$$

### III.7.6.10 Calcul du nombre de postes de protection cathodique

Le nombre de postes de soutirage doit être un entier, par conséquent au cas où le calcul nous donne un nombre décimal, j'arrondirai cette valeur à l'entier immédiatement supérieur. La formule (III.17), donne :

$$N_{ppc} = 2$$

Sachant le nombre de postes à prévoir pour la protection de ce gazoduc, la question qui se pose immédiatement est d'évaluer le courant débité par chaque poste

### III.7.6.11 Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation

En appliquant respectivement les relations (III.18) et (III.19), j'obtiens :

$$I_{dr} = 5.07 \text{ A}$$

$$I_{dr}(0) = 3.86 \text{ A}$$

**NB :** On remarque que le courant en fin d'exploitation est relativement élevé par rapport à celui nécessaire en début d'exploitation ; cela est directement lié au revêtement. En effet en début d'exploitation le revêtement à toutes ces 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.7.6.12 Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit être un nombre entier. Il est donné par l'équation (III.20)

$$N_a = 4$$

### III.7.6.13 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées

#### A- Calcul de la résistance de polarisation

L'application de la relation (III.22) nous donne

$$R_{pol} = 0.45 \Omega$$

#### B- Calcul de la résistance du matériau des anodes

D'après l'équation (III.23), on a :

$$R_{ma} = 0.96 \cdot 10^{-4} \Omega$$

#### C- Calcul de la résistance totale des anodes

Pour la résistance du déversoir est d'après l'équation (III.24)

$$R_{dev p} = 3.76 \Omega$$

Elle s'obtient par application de les formules (III.21):

$$R = 0.45 + 0.96 \cdot 10^{-4} + 3.76$$

$$R = 4.21 \Omega$$

**NB :** En pratique, l'une des contraintes à la quelle doit satisfaire un dimensionnement de protection cathodique est que, la résistance de terre du déversoir soit la plus faible possible, réduisant ainsi la tension aux bornes du générateur ce qui implique une réduction du coût de l'installation du système de protection

### III.7.6.14 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage

Selon la relation (III.26), la tension est donnée par

$$U = 25.11 \text{ V}$$

### III.7.6.15 Calcul de la puissance requise par le poste

D'après l'équation (III.28) j'ai :

$$P = 127.31 \text{ W}$$

#### - Interprétation des résultats

Le résultat du dimensionnement d'un système de protection cathodique doit permettre de répondre à une série de questions dont :

- Combien de postes de protection seraient nécessaires pour une protection certaine de la structure ?
- Quelle est l'intensité du courant maximal à délivrer par chaque poste en fin d'exploitation ?
- Quelle est le nombre minimal d'anodes par station de protection faut-il pour assurer la protection de la structure ?
- Existe-t-il des conditions spéciales, à certains endroits qui exigent des modifications dans le plan général de protection établis ?
- Les paramètres de dimensionnement déterminés précédemment sont-ils ceux qui nous assurent un minimum d'investissement ?

A ce stade du travail, sur la base d'une résistivité moyenne de 150  $\Omega \cdot m$  et pour un puits d'anode posé à 300 m du pipeline, la protection contre la corrosion du gazoduc GR4 par la méthode de soutirage du courant nécessite 02 postes de soutirage pour la première section (rhoud nous-gassi touil). Chaque poste de protection, ayant une portée de 39.54 Km, débitant un courant en fin d'exploitation (25 ans) de 5.07 A et d'un puits profond constitué de 04 anodes en fer-silicium chrome, sous une puissance de 127.31 w. Toutefois, nous ne saurions apporter une réponse satisfaisante aux deux dernières questions sans passer par d'autres analyses (étude de sensibilité) et calculs, mais avant nous passons au dimensionnement du générateur solaire.

### III.7.7 Dimensionnement Du Générateur Photovoltaïque

Avant de passer au dimensionnement du générateur photovoltaïque, il faudrait d'abord évaluer l'énergie consommée par la charge. Une fois que cette énergie est déterminée, j'évaluerai l'énergie que doit fournir le générateur en tenant compte des pertes.

Ensuite le nombre de panneaux ou modules solaire est définie par la puissance crête du générateur et enfin on déterminera les caractéristiques de la batterie et des câbles.

#### III.7.7.1 Estimation de l'énergie consommée

C'est l'énergie nécessaire dont le poste de soutirage à besoin pour assurer la protection du gazoduc. Elle est donnée par la relation (III.29)

$$E_n = 3055.44 \text{ Wh/j}$$

#### III.7.7.2 Détermination de l'énergie fournir par le générateur

L'application de l'équation (III.30) nous donne :

$$E_f = 4073.92 \text{ Wh/j}$$

#### III.7.7.3 Calcul de la puissance crête du générateur

Elle représente la puissance maximale que le générateur doit développer afin de répondre convenablement aux besoins de la charge, Selon la formule (III.31)

$$P_{CG} = 581.98 \text{ W}_c$$

#### III.7.7.4 Détermination du nombre de modules solaires à installer

Connaissant la puissance maximale du générateur et celle d'un panneau ; on peut détermine aisément le nombre de panneaux nécessaires comme suit :

$$N_{ps} = 08 \text{ Panneaux}$$

Nous avons puis déterminé précédemment le nombre de panneaux, mais nous ne pouvons comment sont assemblés ces panneaux.

En effet pour une tension de fonctionnement du système fixée, on détermine le nombre de module en série comme suit :

$$N_{p \text{ serie}} = 2 \text{ Panneaux}$$

Le nombre de modules en série étant de deux, on déduit que le système sera constitué de quatre rangées de deux modules chacune.

### III.7.7.5 Calcul de la capacité des batteries

D'après l'équation (III.33), on a :

$$C = 760.5 \text{ Ah}$$

Afin de stocker cette énergie, on utilise des batteries solaires pour les deux installations ayant pour tension : 12 V et une capacité : C batterie=130 Ah.

Cet ensemble de batteries étant disposé en parallèle et en série, le nombre de batteries montées en série est évalué comme suit:  $N_s = V_{ch} / V_{batterie}$

Ce qui donne :  $25.11/12=2.09$  ,on prendra au minimum 2 batteries

le nombre de batteries montées en parallèle est évalué comme suit:  $N_p = C_{ch} / C_{batterie}$

Ce qui donne :  $N_p = 760.5/130 = 5.85$ , on prendra au minimum 6 batteries

Nombre total de batteries  $N = N_p \times N_s = 6 \times 2 = 12$

Donc le nombre de batteries nécessaires

$$N = 12$$

### III.7.7.6 Détermination de la section des câbles (panneaux –boîtier)

- Calcul du courant de sortie d'un panneau à sa puissance nominale  $I_s$

D'après l'équation (III.34), on a :

$$I_s = 2.98 \text{ A}$$

- Détermination de la section des conducteurs

D'après la relation (III.35), on a :

$$S = 1.5 \text{ mm}^2$$

### III.7.7.7 Détermination de la section des câbles (boîtier –régulateur)

- Calcul du courant circulant entre le boîtier et le régulateur  $I_{b-o}$

D'après la relation (III.38), on a :

$$I_{b-o} = 23.89 \text{ A}$$

- Détermination de la section des conducteurs

D'après la relation (III.39), on a :

$$S = 8.09 \text{ mm}^2$$

Donc on prendra :

$$S=10 \text{ mm}^2$$

- **Détermination de la section des câbles : régulateur-batterie**

D'après la relation (III.40), on a :

$$I_{\max B} = 66.90A$$

Et la relation (III.41), On a :

$$S = 9.09 \text{ mm}^2$$

Donc on prendra :

$$S = 10 \text{ mm}^2$$

### III.8 Conclusion

Le travail effectué précédemment nous a donc permis de dimensionner le système de protection capable de protéger le gazoduc GR4 ( $\Phi 48''$ ) au niveau de la section (TD Rhoud Nouss, PC Gassi Touil) et suite à l'étude du projet, nous avons puis déterminer nécessité d'installation deux (2) postes de soutirage en type de panneaux solaire avec tout son équipement sur un parcours de 72Km est suffisant pour assurer la protection cathodique de ce canalisation dans cette section.

Mais pour connaître l'étendue de son efficacité, il y a plusieurs méthodes qui doivent être suivies, que nous aborderons dans le chapitre suivant

# **Chapitre IV**

**Contrôle et évaluation  
l'efficacité du système de la  
protection cathodique**

## IV.1 Introduction

La raison la plus évidente de surveiller la protection cathodique est de s'assurer que la corrosion est sous contrôle. Lorsque la structure se corrode, des fuites peuvent se produire, du produit peut être perdu et des dommages structurels peuvent survenir. La sécurité publique et les dommages environnementaux sont également préoccupants. Pour cette raison, des réglementations ont été adoptées pour garantir que les structures contenant des produits dangereux sont correctement protégées afin de réduire les risques pour l'homme et l'environnement.

## IV.2 Instruments de mesure

Il est essentiel de collecter des données claires avec des outils de mesure précis. Les données seront utilisées pour évaluer l'efficacité de la protection cathodique, si les données sont inexactes et correctes, l'évaluation sera erronée et peut entraîner des dysfonctionnements, des fuites, des incendies, des explosions et d'autres situations dangereuses. Dans le système de protection cathodique, il y a de nombreux outils de mesure nous mentionnons les plus importants.

### IV.2.1 Les électrodes de référence

Les électrodes de référence, ou demi-cellules, sont des dispositifs importants qui permettent de mesurer le potentiel d'une surface métallique exposée à un électrolyte. L'électrode à hydrogène standard (SHE) est considérée comme une électrode de référence principale car elle est utilisée pour déterminer le potentiel d'autres électrodes de référence (secondaires) mieux adaptées à une utilisation sur le terrain. Un potentiel structure-électrolyte est en fait la différence de potentiel entre la structure et une électrode de référence.

L'électrolyte lui-même n'a pas de valeur de potentiel par rapport à laquelle le potentiel d'une structure peut être mesuré indépendamment du potentiel de l'électrode de référence utilisée. Par conséquent, avant de discuter de la façon de mesurer les potentiels le long d'une structure, nous devons discuter des cellules de référence.

### IV.2.1.1 Les électrodes de référence portable

Les électrodes de référence portable en sulfate de cuivre (CSE) sont l'électrode de référence la plus couramment utilisée pour mesurer les potentiels des structures souterraines et également pour celles exposées à l'eau douce.

Il ne convient pas pour une utilisation dans un électrolyte chlorure car les ions chlorure migreront à travers le bouchon poreux et contamineront le CSE. L'électrode est composée d'une tige de cuivre, immergée dans une solution saturée de sulfate de cuivre, maintenue dans un cylindre non conducteur avec un bouchon poreux au fond, comme le montrent **la figure IV.1**. Les ions cuivre dans la solution saturée empêchent la corrosion de la tige de cuivre et stabilisent l'électrode de référence.



**Figure IV.1:** *Électrodes de référence portables en sulfate de cuivre-cuivre*

### IV.2.1.2 Les électrodes de référence permanent

Une électrode de référence fixe en sulfate de cuivre-cuivre est utilisée pour l'installation souterraine. Ces électrodes sont utilisées pour réduire la chute IR des mesures de potentiel à des endroits inaccessibles comme le montrent **la figure IV.2**.



**Figure IV.2:** *Électrodes de référence permanent en sulfate de cuivre-cuivre*

### IV.2.2 Enregistreurs de données

Les enregistreurs de données sont des instruments informatisés par lesquels les données sont prises par un compteur intégré tel qu'un voltmètre et la lecture est ensuite stockée dans une mémoire. Les caractères «alpha» peuvent également être saisis et enregistrés dans la mémoire pour identifier les données enregistrées telles que l'emplacement, la date et l'heure en plus des informations globales de l'enquête.

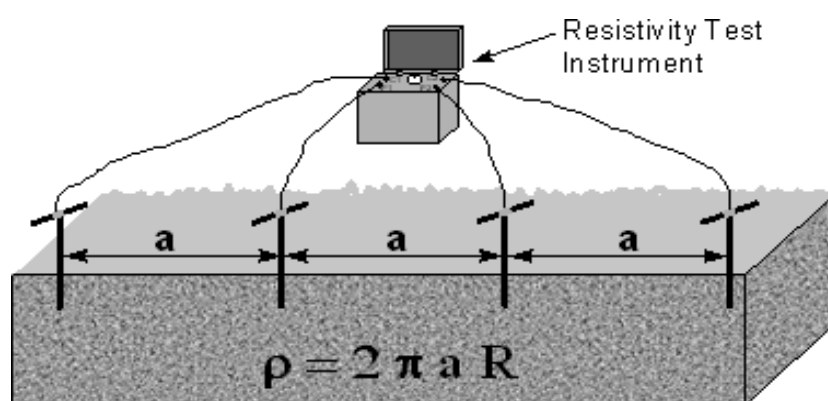
les enregistreurs peuvent être programmés pour mesurer et enregistrer des données sur commande ou régulièrement sur une période de temps. Certains d'entre eux sont si petits qu'ils peuvent s'intégrer dans une station d'essai au niveau du sol. Après utilisation, les enregistreurs de données sont connectés à un ordinateur et les informations sont téléchargées. L'ordinateur peut également créer des graphiques de données comme le montrent **la figure IV.3.**



**Figure IV.3:** *Enregistreurs de données*

### IV.2.3 Résistivité-mètre

Utilisé pour déterminer la résistance du sol dans la zone implique la procédure de pousser quatre broches métalliques dans le sol, en ligne droite, à des distances égales. L'espacement des broches est égal à la profondeur de la sonde dans la résistance moyenne du sol, comme indiqué sur **la figure IV.4**. La résistance moyenne à la terre est fonction de la chute de tension entre la paire centrale de broches lorsque le courant circule entre les broches externes. Après avoir mesuré la résistance à une certaine distance, l'espacement peut alors être modifié et la résistance mesurée au nouvel espacement.



**Figure IV.4:** Appareil de mesure de la résistivité du sol

### IV.2.4 Interrupteurs cyclique

Il est souvent souhaitable de déterminer l'effet d'une source de courant à divers endroits éloignés. Pour ce faire, un interrupteur de courant est inséré dans la source de courant. Un interrupteur est un interrupteur qui est alternativement activé et désactivé sur un cycle chronométré régulier par des moyens mécaniques ou électroniques. Un interrupteur de courant est illustré à **la figure IV.5**.



Figure IV.5: Interrupteur cyclique

### IV.3. Différents type du prise de mesure

Diverses prise du mesure sont une partie très importante de la surveillance de tout système de contrôle de l'usure. Bien que de nombreux systèmes de télésurveillance soient utilisés aujourd'hui, il est encore nécessaire de suivre les technologies appropriées dans ce domaine pour s'assurer que les systèmes de protection cathodique fonctionnent correctement et fournissent une protection adéquate à la structure. Nous les mentionnons dans ce chapitre.

#### IV.3.1 Prise de potentiel simple

Des stations d'essai de mesure potentielles sont utilisées pour surveiller l'efficacité de la protection cathodique, vérifier les effets des courants parasites et sur les canalisations non protégées ou partiellement blindées, pour identifier les zones de corrosion active. Ces stations de test se composent généralement de deux fils isolés, soudés avec de la thermité dans le tube. La tête de la station de test est montée sur un poteau comme indiqué sur la figure IV.6.

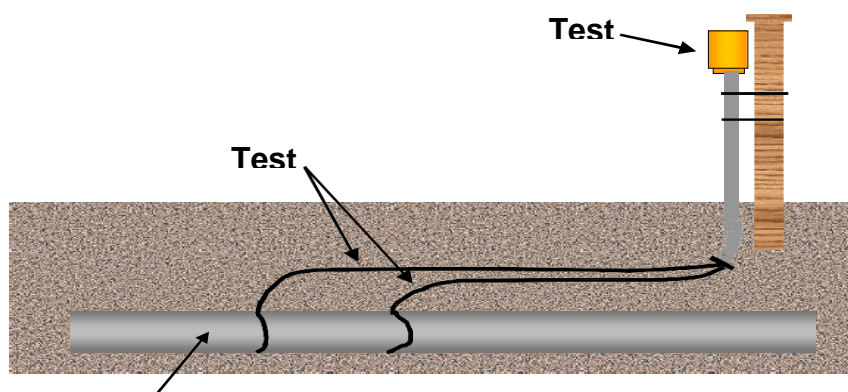
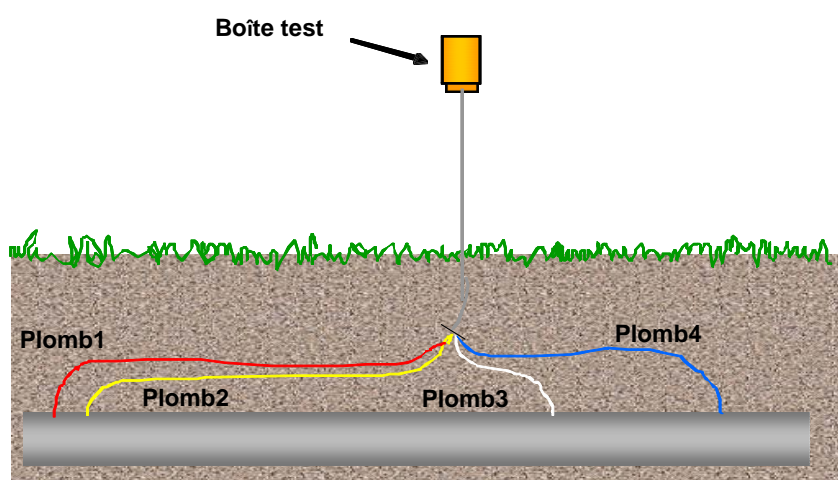


Figure IV.6: Station de test de mesure de potentiel post-montée typique

### IV.3.2 Prise ampérométrique

Ces stations d'essai sont utilisées pour mesurer l'amplitude et la direction du courant sur un pipeline. Ces informations sont utiles pour surveiller la propagation de la protection cathodique, localiser les zones de mauvais revêtement sur une canalisation et pour trouver les zones où des courts-circuits peuvent exister.

Dans ce type de station de test, le pipeline agit comme une résistance; la magnitude du courant est déterminée en mesurant la chute de tension sur la portée des fils de test. La direction du courant est déterminée par la polarité de la tension. Une station de largage typique est illustrée à la **figure IV.7**.



**Figure IV.7:** *Prise ampérométrique*

Lors de l'installation de ce type de station d'essai, il est important que les fils de différentes couleurs soient placés sur le tuyau exactement comme indiqué sur les plans de construction. En effet, les fils sont utilisés pour l'étalonnage de la station et également pour mesurer le flux de courant. Si les fils ne sont pas installés comme prévu, une lecture erronée sera obtenue. Si un ou plusieurs fils sont installés différemment de la palette de couleurs conçue, assurez-vous que l'emplacement réel des fils est indiqué sur les croquis tels que construits.

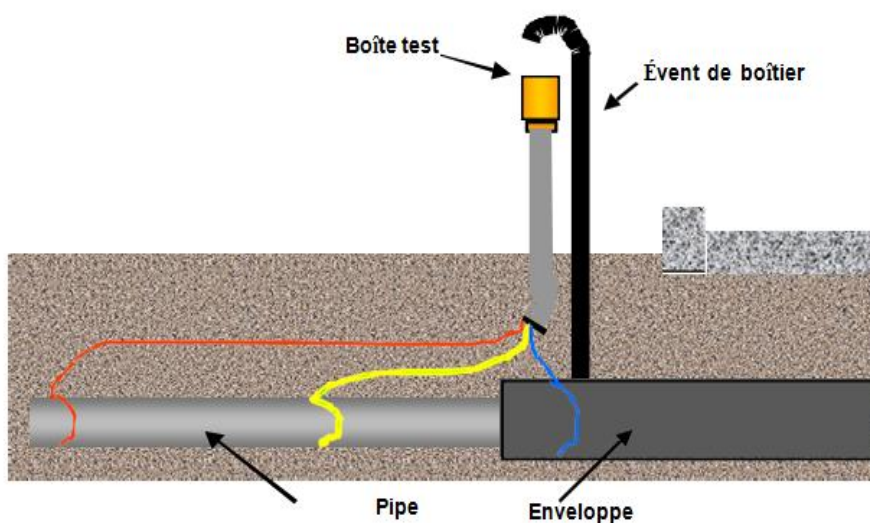
### IV.3.3 Prise de gain

L'intention initiale de la tuyauterie encastrée était que le tubage supporte les charges dynamiques causées par le trafic routier ou les trains afin d'éviter d'endommager la tuyauterie. Cependant, les boîtiers deviennent un écran électrique contre le courant de protection cathodique lorsque le boîtier et la tuyauterie sont en court-circuit électrique. Une inspection

suffisante doit être effectuée pour s'assurer qu'aucun contact métallique n'existe ou n'est susceptible de se développer entre le tubage et le tube porteur.

Notez que des fils de couleurs différentes sont utilisés sur le tuyau et le boîtier. Là encore, il est essentiel que le code couleur soit exactement comme indiqué sur les dessins de conception. Deux fils peuvent être utilisés sur le boîtier, ou l'évent du boîtier peut servir de l'une des connexions au boîtier.

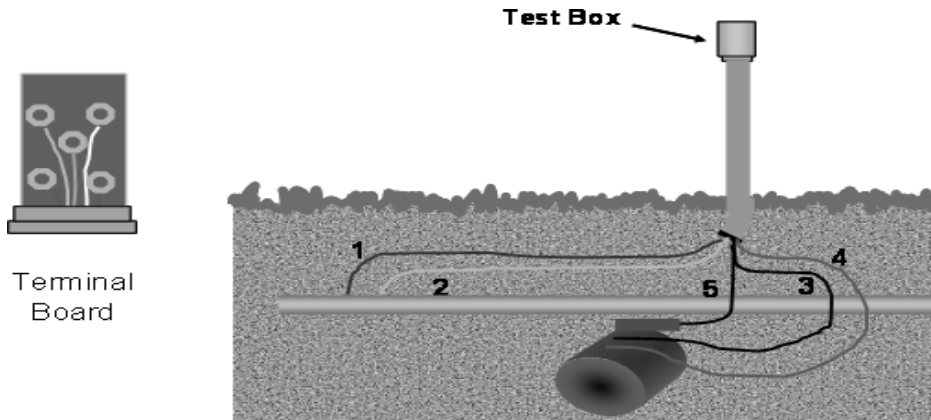
Les deux connexions au tubage et au tube porteur sont nécessaires pour effectuer des tests de résistance tubage-tuyau comme indiqué sur **la figure IV.8**.



**Figure IV.8:** *Prise de gain*

#### IV.3.4 Prise de croisement

Les structures souterraines telles que les pipelines ou les câbles se croisent fréquemment ou se trouvent à proximité d'autres installations. Lorsqu'une ou les deux structures ont une protection cathodique, il peut y avoir une interaction entre les deux. C'est ce qu'on appelle l'interférence cathodique. Pour déterminer quels effets se produisent et pour fournir une installation pour atténuer les effets indésirables, une station d'essai de ligne étrangère est installée. Voir **la figure IV.9**.

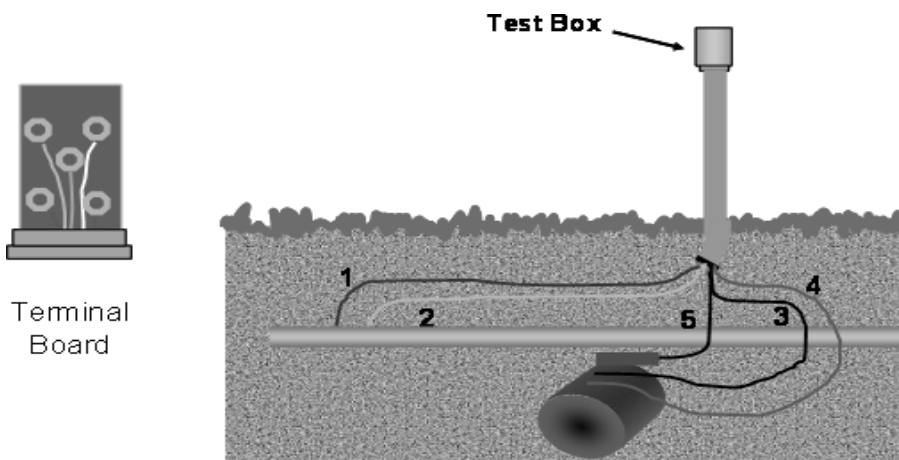


**Figure IV.9:** prise de croisement

### IV.3.5 Prise du mesure de joint isolant

Tous les codes locaux et nationaux doivent être respectés lors de l'installation d'isolateurs électriques. En aucun cas, un dispositif d'isolation ne doit être installé dans un environnement explosif ou combustible. Si un joint isolant est installé dans une zone où une atmosphère ou une fuite de produit pourrait provoquer une inflammation en cas d'étincelle, une cellule de mise à la terre ou un parasurtenseur doit être installé sur le joint.

Une station d'essai de joint d'isolation typique est illustrée à **la figure IV.10**. Notez que des cordes de couleurs différentes sont utilisées de chaque côté de l'articulation. Ceci est important pour que vous puissiez savoir quel côté de l'articulation est testé. Comme pour les autres stations de test contenant des fils de différentes couleurs, il est important que les fils soient disposés comme indiqué dans les dessins de conception.



**Figure IV.10:** Prise de joint isolant

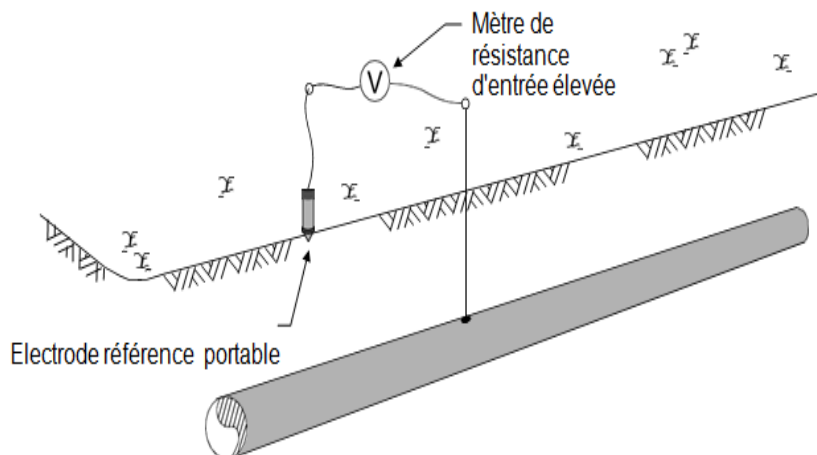
## IV.4. Méthode de mesure

L'efficacité d'un système de protection cathodique est finalement confirmée par le fait qu'il contrôle ou non la corrosion de manière adéquate. Bien que la corrosion puisse être identifiée sur certains pipelines à l'aide de racleurs intelligents, la détermination directe du taux de corrosion n'est généralement pas un processus simple. Par conséquent, des méthodes indirectes d'évaluation de l'adéquation d'un système de protection cathodique doivent être invoquées. La méthode principale est la mesure du potentiel de la structure pour comparaison avec le critère choisi. Les courants du système sont également mesurés en tant que paramètre de performance supplémentaire. En effet, pour les oléoducs et les gazoducs, les potentiels doivent être mesurés régulièrement pour se conformer aux réglementations gouvernementales.

### IV.4.1 Méthode de potentiel

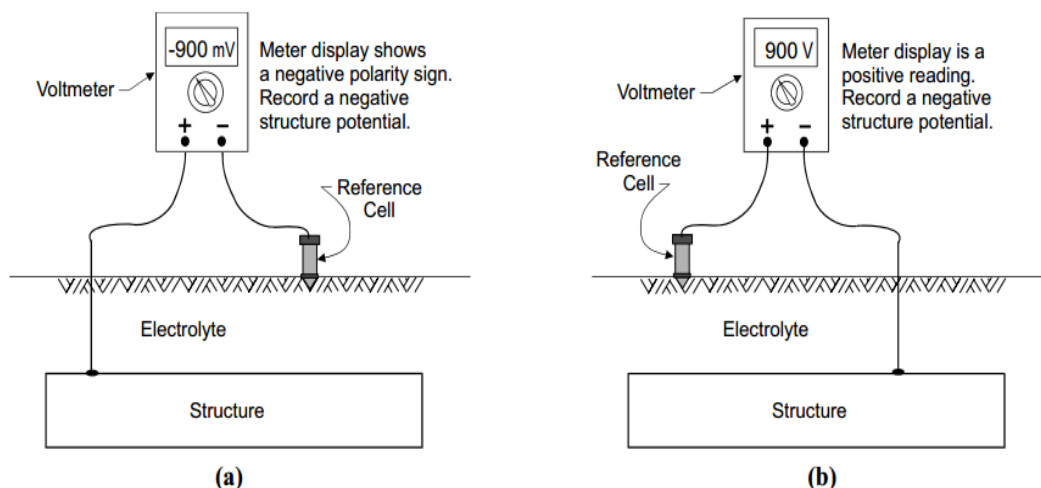
Une mesure de potentiel de structure à électrolyte implique l'utilisation d'un compteur d'entrée à haute résistance connecté entre le cordon de test de structure ou de structure et une électrode de référence portable placée en contact avec l'électrolyte, comme illustré pour une canalisation sur **la figure IV.11**.

On suppose que le potentiel de l'électrode de référence ne change pas lors du déplacement d'un endroit à l'autre, sinon une erreur est introduite dans la mesure. Pour garantir la précision et la reproductibilité des mesures, l'électrode de référence doit être maintenue en bon état.



**Figure IV.11:** Une illustration d'une mesure typique des potentiels de sol de pipeline

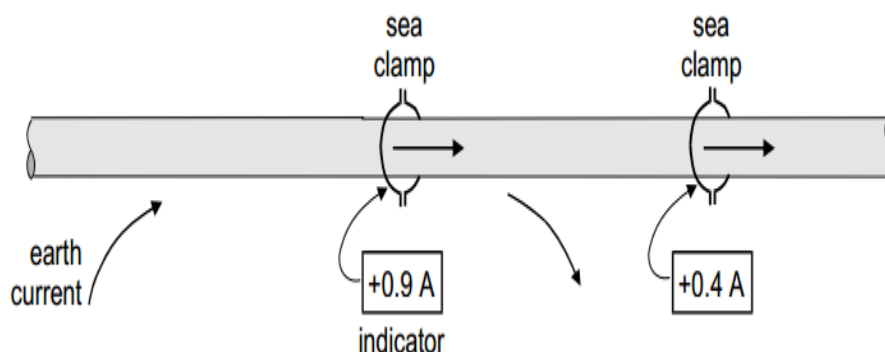
**NB:** Il existe deux pratiques courantes pour connecter le voltmètre entre l'électrode de référence et la structure dont le potentiel est mesuré comme indiqué sur le **figure IV.12**.



**Figure IV.12:** *Mesures du potentiel structure-sol*

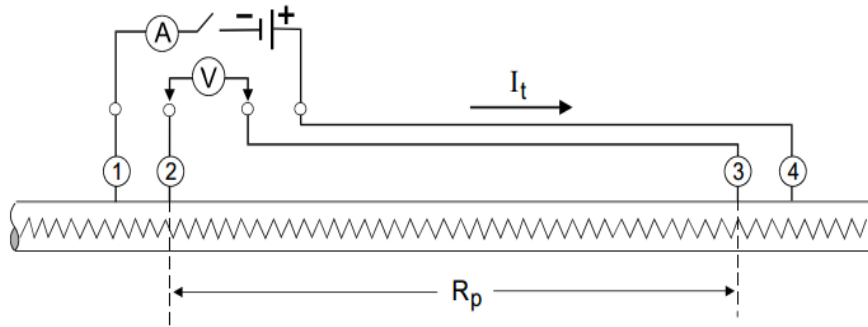
#### IV.4.2 Méthode de courant au niveau de prise ampérométrique

Les courants de canalisation peuvent être mesurés avec une pince composée de plusieurs tours de fil, comme illustré à la **figure IV.13**.



**Figure IV.13:** *Mesure du courant de canalisation à l'aide de la boucle de détection*

Le courant du pipeline peut également être mesuré à l'aide de la portée à quatre fils illustrée à la **figure IV.14**. Pour une mesure précise, la plage est étalonnée en injectant un courant de test CC connu à travers le tuyau à l'aide des cordons de test extérieurs **1** et **2** et en mesurant la chute de tension résultante entre les cordons de test **3** et **4**.



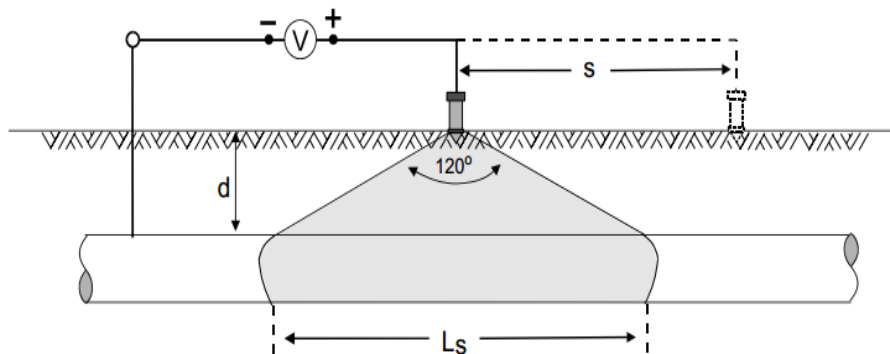
**Figure IV.14:** Calibrage d'une plage de courant de pipeline

La résistance du tuyau entre les cordons de test d et e est calculée à partir de la loi d'Ohm:

$$R_p = \Delta V_{2-3} / \Delta I_t$$

#### IV.4.3 Méthode du mesure de potentiel à espace rapproché

Lors de la mesure d'un potentiel à un endroit, la quantité de tuyau échantillonnée dans la mesure est considérée comme la longueur de tuyau englobée par un arc de  $120^\circ$  centré sur l'électrode de référence, comme illustré à la **figure IV.15**.



**Figure IV.15:** Longueur du tuyau échantillonné dans une mesure du potentiel tuyau-sol

Cette figure montre que les données de test sur le terrain sur un pipeline à nu 24 ont vérifié les prédictions d'un modèle d'éléments finis. Par conséquent, la longueur du pipeline échantillonné ( $L_s$ ) dans une mesure de potentiel est donnée par l'équation:

$$L_s = 3.5 d + l$$

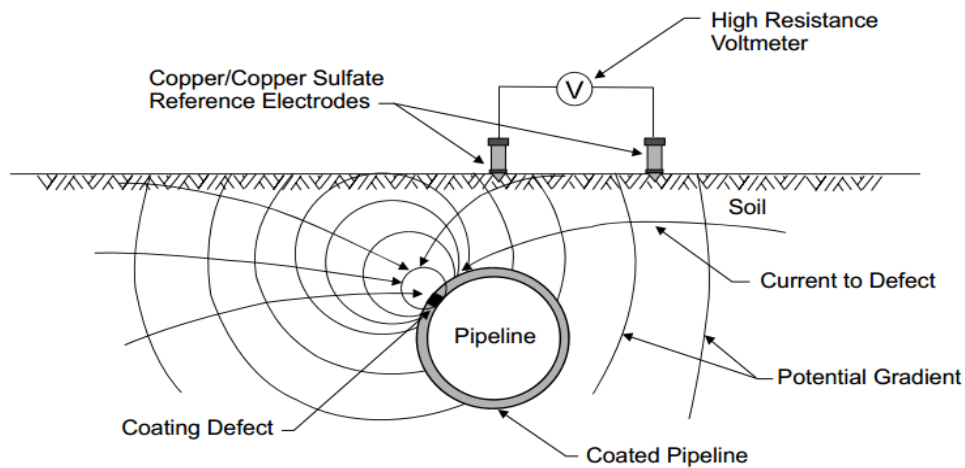
Où:

d = Profondeur du pipeline

#### IV.4.4 Méthode de vérification de revêtement

Puisqu'une étude de potentiel à intervalle rapproché est peu susceptible d'identifier des vacances de revêtement ayant une surface inférieure à environ 20 cm<sup>2</sup>, d'autres moyens d'identifier les vacances de revêtement et les conditions générales de revêtement sont utilisées. Une de ces techniques d'enquête repose sur la détection du gradient de tension produit lors d'un jour férié par un courant de signal.

Méthode de gradient de tension pour détecter les vacances dans un revêtement de tuyau Le principe de cette technique consiste à détecter une différence de tension à la surface de la terre à l'aide de deux électrodes portables ou plus séparées par une courte distance, comme illustré à la **figure IV.16**.



**Figure IV.16:** Détection des vacances de revêtement à l'aide de la méthode du gradient de tension

Un générateur de signaux est connecté entre le tuyau et la terre à un emplacement de point de test. Lorsque le courant du signal passe du pipeline à la terre pendant un jour férié, un gradient de tension est créé dans le sol radialement à partir du jour férié. Des électrodes de surface séparées situées soit transversalement au tuyau soit le long de l'axe du pipeline détecteront un changement de potentiel entre elles lors de leur passage sur le gradient. L'amplitude du gradient de tension en tout point de la terre est donnée par l'équation suivant:

$$V_g = \rho_e i$$

où:

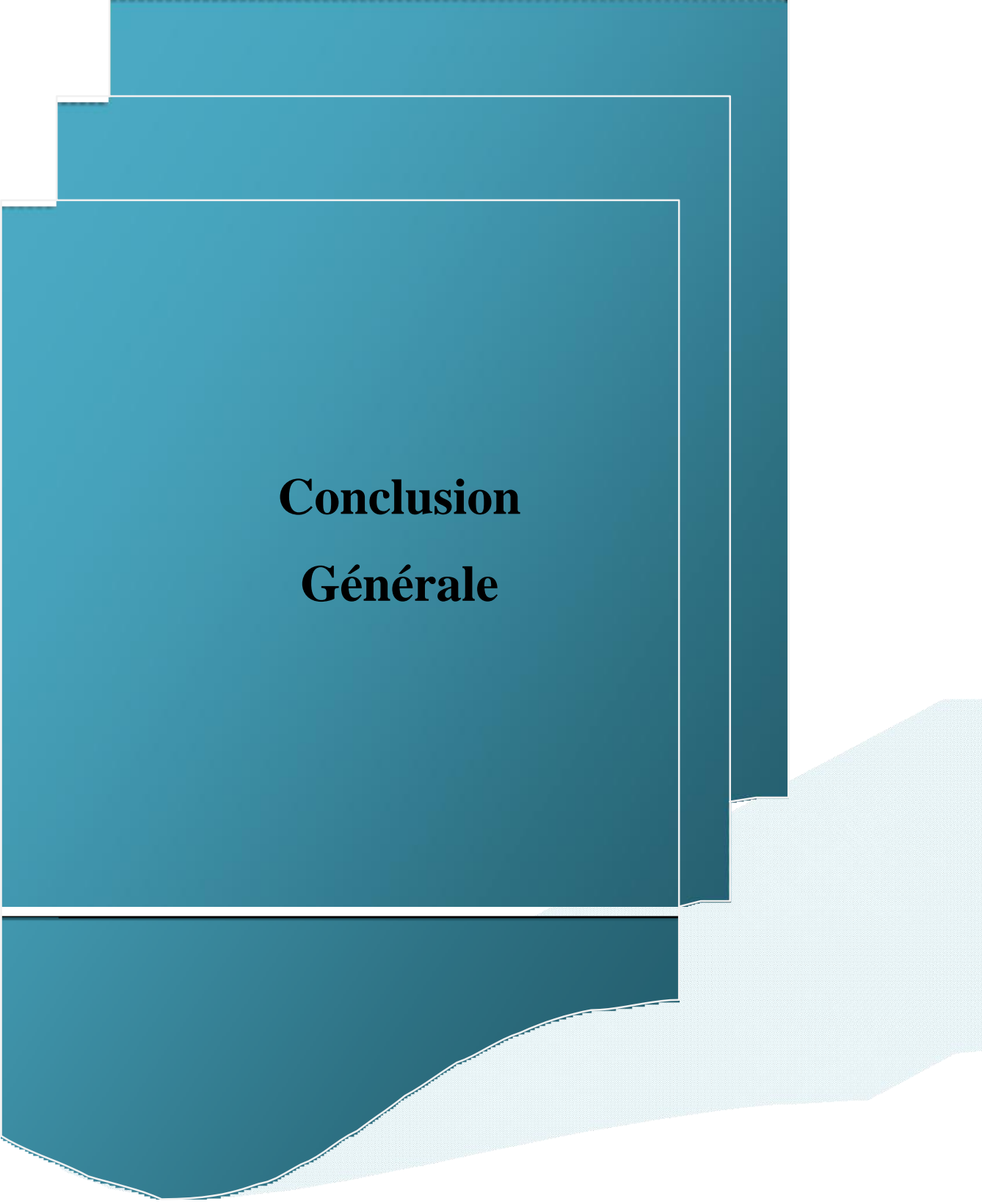
$V_g$  : Gradient de tension (V/longueur unitaire)

$\rho_e$  : Résistivité de la terre

$i$  : Densité de courant au point d'intérêt

## **IV.5 Conclusion**

Le dernier chapitre traitait de la surveillance et de l'évaluation de l'efficacité du système de protection cathodique avec différentes mesures et méthodes de surveillance de tout système de contrôle de la corrosion. Bien que de nombreux systèmes de mesure et de surveillance soient utilisés aujourd'hui, il est encore nécessaire de suivre les techniques appropriées dans ce domaine pour fonctionner correctement et assurer une protection adéquate de l'ouvrage.



**Conclusion  
Générale**

## Conclusion générale

Le transport des hydrocarbures par canalisation s'effectue de nos jours, sur des distances, avec des diamètres, et à des pressions de service de plus en plus considérables, on pourrait notamment citer, à titre d'exemple, Le pipeline Roud nous Hassi messaoud, d'une longueur de 222 Km, un ouvrage de transport se doit d'assurer sa fonction, durant la durée pour laquelle, il a été prévu. Cela implique que, ce type d'ouvrage, très souvent isolé, doit bénéficier d'une protection continue, contre la corrosion, afin d'éviter d'éventuel éclatement de conduite, menaçant l'intégrité de l'environnement et des êtres vivants.

Le travail effectué précédemment nous a donc permis de dimensionner le système de protection capable de protéger le gazoduc de telles menaces.

D'une part, il ressort, de ce mémoire que, le calcul classique de dimensionnement d'un système protection ne peut être appliqué, car il suscite une consommation énergétique très élevée. Aussi en tenant compte du fait que les pipelines sont généralement isolés, nous pensons que l'utilisation de l'énergie solaire, serait beaucoup plus économique et adaptée, tout en augmentant le nombre d'anodes par déversoir, afin de réduire considérablement sa résistance, par conséquent la consommation énergétique.

Par ailleurs, l'étude de sensibilité effectuée, sur différents paramètres du modèle permettant de dimensionner le système de protection cathodique a permis de mettre en exergue la variabilité de ces paramètres et leurs importances sur les résultats finaux tels que le nombre et la puissance des postes par exemple.

D'où l'intérêt de l'élaboration d'un modèle d'optimisation visant à minimiser le coût d'investissement du système de protection, en définissant les paramètres optimaux à prendre en compte lors du dimensionnement.

l'alimentation renouvelable proposée est la solution la plus fiable pour alimenter le système de protection cathodique à courant imposé, qui est disponible tout au long année.

Mais afin de s'assurer qu'il continue à protéger adéquatement. Il faudrait aussi penser à une télésurveillance a distance pour assurer une protection jusqu'aux limites de la portée des postes permet d'éviter les difficultés associées aux systèmes de la protection cathodique conventionnels. où la nécessité intégrer automate programmable dans le système de la protection cathodique pour permet une gestion correcte de l'utilisation du système, afin de lui assurer une durée de vie maximale dans les limites des conditions requises.



# **Bibliographie**

# Bibliographie

- [1] Groupe de membres NACE, " *CP 2 - Cathodic Protection Technician Course Manual*," ed. January 2013, USA.
- [2] Groupe de membres NACE, " *CP 1–Cathodic Protection Tester Course Manual*," ed. January 2012, USA.
- [3] Groupe de membres NACE, " *CP 3–Cathodic Protection Technologist Course Manual*," ed. January 2012, USA.
- [4] ERM Automatismes., Catalogue systèmes photovoltaïques site isolé, (2009).
- [5] Mukund, R.P, Wind and solar power systems.Ed CRC Press. New York (1999).
- [6] M. Pourbaix « Atlas des équilibres électrochimiques » Gauthier-Villars, 1963 Paris.
- [7] M. E. Parker, E.G. Peattie “Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection” Third Ed. G.P.P. Elsevier Science (USA) 1999 ISBN 0-87201-149-6
- [8] NACE SP0207 Performing Close-Interval Potential Surveys and DC Surface Potential Gradient Surveys on Buried or Submerged Metallic Pipelines -2007.
- [9] NACE SP0169- Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems 2007.
- [10] NACE SP0572- Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Anode Beds 2007.
-

## Résumé

En Algérie, les pipelines sont utilisés pour transporter les hydrocarbures des champs pétroliers vers les raffineries et les réservoirs de stockage. Ces pipelines sont largement utilisés car ils constituent le moyen le plus sûr et le plus économique de transporter des hydrocarbures. Cependant, l'un des défis auxquels l'industrie pétrolière et gazière est confrontée est la corrosion des installations d'infrastructure. La protection par courant imposé est une méthode utilisée pour protéger les pipelines en contact avec le sol de la corrosion. Le système photovoltaïque fournit une solution fiable qui permet aux modules PPC d'être placés le long de la canalisation souterraine, assurant ainsi la distribution d'énergie pour des exigences de protection efficaces.

## Mots clés

pipeline - Corrosion - Canalisations souterraines - Protection cathodique - Poste soutirage - système photovoltaïque.

## Abstract

In Algeria, pipelines are used to transport hydrocarbons from oil fields to refineries and storage tanks. These pipelines are widely used because they are the safest and most economical way to transport hydrocarbons. However, one of the challenges facing the oil and gas industry is the corrosion of infrastructure facilities. Impressed current protection is a method used to protect pipelines in contact with soil from corrosion. The photovoltaic system provides a reliable solution that allows the PPC modules to be placed along the underground pipeline, thus ensuring the power distribution for efficient protection requirements.

## Keywords

pipeline - Corrosion - Underground pipes - Cathodic protection - Withdrawal station - photovoltaic system.

## ملخص

في الجزائر، تُستخدم خطوط الأنابيب لنقل الهيدروكربونات من حقول النفط إلى المصافي وخزانات التخزين. تستخدم خطوط الأنابيب هذه على نطاق واسع لأنها الطريقة الأكثر أماناً والأكثر اقتصاداً لنقل الهيدروكربونات. ومع ذلك، فإن أحد التحديات التي تواجه صناعة النفط والغاز هو تآكل مرافق البنية التحتية، تعتبر الحماية بالتيار القسري هي طريقة تستخدم لحماية الأنابيب الملامسة للأرض من التآكل. يوفر النظام الكهروضوئي حلاً موثوقاً والذي يسمح بوضع وحدات PPC في على طول خط الأنابيب تحت الأرض، وبالتالي ضمان توزيع الطاقة لمتطلبات الحماية الفعالة.

## الكلمات المفتاحية

خط أنابيب - التآكل - أنابيب تحت الأرض - الحماية الكاثودية - محطة السحب - نظام كهر وضوئي