

Université KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la
Terre et de l'Univers

Département : Forage et Mécanique des chantiers pétroliers



Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Hydrocarbures

Option : mécanique des chantiers pétroliers

Thème

**ÉTUDE DE DIMENSIONNEMENT DES
INSTALLATIONS pétroliers PAR
PROTECTION CATHODIQUE-[SP1. bis – DJAAMA]-**

Présenté par:

- Khaled Debabi
- Zouhair khelaifa

dirigé par:

Dr:CHOUICHA SAMIRA

Soutenu publiquement le: 13 / 6/ 2021

Devant le Jury :

**Président:
Examineur:**

**M.C.B
M.A.A**

**Univ.Ouargla
Univ.Ouargla**

Universitaire: 2021/2022 Année

DÉDICACE

Pour chaque début il y a une fin, et ce qui beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte du but.

Je tiens à dédier ce modeste mémoire, fruit de très longues années

- *A mes très chers*
- *Parents, en témoignage et en gratitude de Leur soutien permanent durant toute ma vie. Leurs sacrifices, illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*
- *A mes frères et mes sœurs*

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord je tiens à remercier
Mon encadreur Mm. Samira Chouicha pour les efforts qu'il a
déployés pour que ce
modeste travail voie le jour.*

*Je tiens aussi à remercier tous les professeurs des
hydrocarbures qui ont contribué à
ma formation durant la période de mes études universitaires.
Mes sincères expressions s'adressent à tous les collègues de la
promotion 2016/2022.*

*D'autre part, je remercie du fond du cœur toute personne ayant
contribué de près ou
de loin à la réalisation de ce mémoire.*

Résumé

L'intérêt de ce travail vise à la protection cathodique par anodes sacrificielles et courant imposé du gazoduc SP8 au niveau de la station de pompage de Djamaa SP1. Les gazoducs en acier sont protégés par deux modes de protection par revêtements organiques (Protection passive) et une protection cathodique (protection active). En revanche, la structure à protéger risque de perdre son efficacité suite à l'effet de certains facteurs (courant vagabond, courant alternatif,...). Pour faire face à ce problème, il est indispensable de contrôler les valeurs de potentiels pendant plusieurs périodes de l'année. Les résultats de notre étude ont révélé que la valeur de potentiel est inférieure à $-850 \text{ mV}/\text{ECuSO}_4$ ce qui indique que la structure à protéger est dans son domaine de stabilité. Un tel comportement confirme la fiabilité de la protection cathodique en question.

De plus, il a été montré par le calcul de dimensionnement de protection que le gazoduc nécessite 2 anodes à installer pour chaque 2 km le long du pipe et 6 anodes en ferro-silicium pour un système à courant imposé pour assurer la protection totale. Prenant en considération que la maîtrise de maintenance du système de protection cathodique nous assure leur fonctionnement sans interruption pour une longue durée.

Mots clés : protection cathodique, gazoduc SP8, corrosion, anodes sacrificielles, courant imposé.

Abstract

The interest of this work aims at the cathodic protection by sacrificial anodes and impressed current of the gas pipeline SP8 at the level of the pumping station of Djaama.

Steel gas pipelines are protected by two types of protection by organic coatings (passive protection) and cathodic protection (active protection). On the other hand, the structure to be protected risks losing its effectiveness due to the effect of certain factors (stray current, alternating current, etc.). To deal with this problem, it is essential to control the values of potentials during several periods of the year. The results of our study revealed that the potential value is less than $-850 \text{ mV}/\text{ECuSO}_4$ which indicates that the structure to be protected is in its stability domain. Such behavior confirms the reliability of the cathodic protection in question.

In addition, it has been shown by the protection sizing calculation that the gas pipeline requires 2 anodes to be installed for every 2 km along the pipe and 6 ferro-silicon anodes for an impressed current system to ensure total protection.

Taking into consideration that the mastery of maintenance of the cathodic protection system we ensure their operation without interruption for a long time.

Key words: cathodic protection, SP8 gas pipeline, corrosion, sacrificial anodes, impressed current.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى الحماية الكاثودية بواسطة الأنودات المضحية والتيار المسلط لخط أنابيب الغاز SP8 على مستوى محطة الضخ في جامعة SP1

خطوط أنابيب الغاز الفولاذية محمية بنوعين من الحماية بواسطة الطلاءات العضوية والحماية الكاثودية من ناحية أخرى ، فإن الهيكل المراد حمايته يخاطر بفقدان فعاليته بسبب تأثير بعض العوامل (التيار المفاجئ ، التيار المتناوب... إلخ).

للتعامل مع هذه المشكلة، من الضروري التحكم في قيم فرق الكمون خلال عدة فترات من العام. كشفت نتائج دراستنا أن القيمة المحتملة أقل من $850 - mV/ECuSO_4$ مما يشير إلى أن الهيكل المراد حمايته يقع في مجال ثباته. يؤكد هذا السلوك موثوقية الحماية الكاثودية المعنية.

بالإضافة إلى ذلك ، فقد تبين من خلال حساب حجم الحماية أن خط أنابيب الغاز يتطلب تركيب 2 أنود لكل 2 كم على طول الأنبوب و 6 أنودات من السيليكون الحديدي لنظام التيار المسلط لضمان الحماية الكاملة. مع الأخذ في الاعتبار أن التمكن من صيانة نظام الحماية الكاثودية فإننا نضمن تشغيلها دون انقطاع لفترة طويلة.

الكلمات المفتاحية: الحماية الكاثودية ، خط أنابيب SP8 ، التآكل ، الأنودات ، التيار المسلط.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Table des matières	VI
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	X
Liste des abréviations	XI
Introduction générale	1
Chapitre I : Corrosion des conduites souterraines	
Introduction.....	3
I.1 Définition des pipelines.....	3
I.2 phénomènes de corrosion.....	4
I.2.1 Définition.....	4
I.2.2 Rappels: Métaux et électrolytes	4
I.2.3 L'électrode métallique.....	5
I.3 Les différentes formes de la corrosion	5
I.3.1 corrosion généralisé	5
I.3.2 corrosion localisée	6
I.4 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés.....	7
I.4.1 Le sol comme électrolyte	7
I.4.2 Agressivité du sol	8
I.4.2.1 paramètres déterminant l'agressivité du sol	8
I.4.2.2 Méthode de mesure de la résistivité du sol	9
I.4.2.3 Principe de mesure de la résistivité du sol.....	9
I.5 Corrosion par les courants vagabonds	10
Conclusion.....	12
Chapitre II :Généralités sur la protection cathodique	
I.1 La protection anodique.....	13

II .2 La protection cathodique	13
II .2 .1 Types des anodes	14
II .2.2. Densité de courant de protection	16
II.3 Protection par anode sacrificielle	17
II.3.1 Principe.....	17
II.3.2 Durée de vie	17
II.3.3 Les avantages anode sacrificielle.....	18
II.3.4 Les inconvénients anode sacrificielle.....	18
II.4. Protection par courant imposé.....	18
II.4.1 Principe.....	18
II.4.2 Domaines d'application.....	19
II.4.3 Réalisation des soutirages.....	19
II.4.4 Densité de protection.....	20
II.4.5 caractéristiques du générateur.....	20
II.4.6 choix du déversoir ou masse anodique.....	20
II.4.7 Calcul du nombre minimal d'anode.....	21
II.4.8. Calcul de la résistance anodique.....	21
II.4.9 Méthode de minimisation de la résistance.....	22
II.4.9.1 Augmentation du nombre d'anodes.....	22
II.4.9.2 Utilisation d'un backfil.....	22
II.4.10 Avantages anode à courant imposé.....	23
II.4.11. Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH – tension)	23
 Chapitre III : Evaluation de la protection cathodique en fonction	
III.1 Problématique	25
III.2 caractéristique des canalisations du transport.....	25
III.2.1 caractéristiques mécaniques.....	25
III.2.2 Caractéristiques du GAZODUC.....	26
III.3 Présentation de la station SP1 bis DJAMAA.....	26
III.4 DISPOSITIF DE PROTECTION CATHODIQUE	27
III.5 Identification du problème de la corrosion des canalisations de transport.....	27
III.6 Méthode inscription et détection de corrosion.....	28
III.6.1 le contrôle visuel.....	28
III.6.2 Méthode de Protection passive	29
III.6.2.1 Sélection des revêtements.....	29
III.6.2.2 Facture d'efficacité.....	29
III.6.2.3 Revêtement de tubes corrodés.....	30

III.6.2.4 Application du revêtement.....	31
III.6.3. Protection active.....	32
III.6.3.1. Conditions préalables à l'application de la protection cathodique.....	32
III.6.3.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique.....	33
III.7 Dimensionnement de calcul de protection du gazoduc par anode sacrificielle.....	36
III.8 Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour le gazoduc par courant imposé.....	38
III.9 Evaluation de l'efficacité de protection cathodique.....	43
III.9.1 Représentation graphique de la mesure de potentiel.....	43
III.10 Maintenance de la ligne de pipeline.....	44
III.10.1 Les inspections de poste de soutirage.....	44
III.10.2 Prise de potentiel.....	45
Conclusion générale.....	48
Bibliographie.....	49

Liste des figure

<i>Figure (I.1): Les différents types de corrosion</i>	<i>7</i>
<i>Figure(I.2): Principe de fonctionnement de la méthode de Winner.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure(I.3): La corrosion par courant vagabond</i>	<i>11</i>
<i>Figure(II.1): Protection anodique par courant imposé</i>	<i>13</i>
<i>Figure(II.2): Protection cathodique par anode sacrificielle.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure(II.3): Protection cathodique par courant imposé</i>	<i>19</i>
<i>Figure (II.4): Facteur de correction pour le calcul de la résistance équivalente....</i>	<i>22</i>
<i>Figure (II.4): Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure (III.1): L'installation de le transport par canalisation.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure (III.2): la corrosion externe une conduit enterrée.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure (III.3): le contrôle visuel.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure (III.4): les machines de transports des pipeline (STT).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (III.5): décapage manuel (STT).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (III.6):coupe et chan frein des pipes (STT).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (III.7): machine de sablage automatique (STT).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure (III.8): revêtement d'un tube de type thermodurcissable (STT).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure (III.9): électrode de référence Cu/CuSo4 pour l'utilisation dans les sols....</i>	<i>34</i>
<i>Figure (III.10): voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de PC.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure (III.11): méthode de la mesure de potentiel de la PC</i>	<i>35</i>
<i>Figure (III.12): photographes des different.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure (III.13) [a.b.c.d] : Relevés de potentiel en fonction longueur du gazoduc... </i>	<i>44</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau(I.1): classification du taux de corrosion.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau (I.2): Corrosivité du sol selon la résistivité.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau(II.1): comparaison entre deux systèmes de protection cathodique.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau(II.2): Densité de courant en pratique</i>	<i>16</i>
<i>Tableau(II.3): Formule de la résistance anodique.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau (III.1): les caractéristiques mécaniques selon API line pipe 5_L.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau (III.2): les caractéristiques de la canalisation</i>	<i>26</i>
<i>Tableau (III.3): caractéristiques de revêtement pour structure enterrée.</i>	<i>29</i>
<i>Tableau (III.4): fréquence des contrôles de fonctionnent.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau(III.5): résultats de dimensionnement.</i>	<i>42</i>
<i>Tableau(III.6): mesure de potentiel</i>	<i>43</i>
<i>Tableau (III.7): la maintenance de poste soutirage.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau (III.8): l'inspection de la protection cathode ligne et postes de soutirage..</i>	<i>47</i>

Liste des abréviations

A	:activité chimique
AFNORAPI	:association française de la normalisation
API	: American Petroleum Institut
C	: Capacité réelle du parc batterie, en Ah
CC	: cubique centré
$C_{\text{éq}}$: carbone équivalent
CFC	: cubique face centré
CODETT	: Code de Dimensionnement des Tuyauteries Industrielles
Da	: Diamètre d'anode, en mm
DDC	: densité de courant, en mA/m ²
Dp	: profondeur de la pique, en mm
Dt	: Diamètre du tube, en mm
Dv	: Durée de vie, en année
E	: épaisseur de tube, en mm
Ecj	: consommation énergétique journalière, en [Wh/j]
Ei	: ensoleillement du lieu, en [kWh/j]
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
F	: Constante de Faraday
G	: Accélération de la pesanteur, en m .s ⁻²
Ha	: hectare
HB	: dureté Brinell
HFI	: Induction à Haute Fréquence
I	: Intensité du courant, en A
Is	: courant de soutirage, en A
K	: Coefficient de perte de charge singulière
K	: constante dépendant de l'alliage et des conditions
Kd	: Coefficient de décharge : 0,7.
Kg	: kilogramme
Km	: kilomètre
Kp	: coefficient qui tient compte des pertes

M	: Masse nette de l'anode, en kg
M	: mètre
m^2	: mètre carré
Ma	: Consommation massique d'anode, en kg/A.an
H	: valence du métal
Hj	: nombre de jours d'autonomie sans ensoleillement
Ha	: Nombre d'anodes
Nb	: nombre de batteries
He	: Nombre d'électrons
Hm	: Nombre total de modules
Pc	: Puissance crête du champ photovoltaïque
PDC	: Phelps Dodge Corporation
PH	: potentiel d'hydrogène
Pmod	: Puissance crête d'un module
PVC	: polyvinyle chlorure
Q	: Débit, en $m^3.h^{-1}$
R	: Constante des gaz parfaits
Ra	: Résistance du déversoir, en Ω
Re	: Nombre de Reynolds
S	: surface à protéger, en m^2
T	: Température, en K
t.m	: taux minier
U	: Tension, en V
Up	: Tension minimal, en V
V	: Vitesse moyenne, en $m.s^{-1}$
WC	: Watt-crête
ρ	: Masse volumique, en $kg.m^{-3}$
ρ_e	: Résistivité du sol, en Ωm

Introduction générale

Les produits pétroliers sont acheminés par canalisation depuis les gisements jusqu'à leurs zones de raffinage, stockage et distribution. En Algérie, l'activité Transport par Canalisation exploité par la société SONATRACH assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat, gaz naturel et GPL) sur un réseau estimé à 18512 km. [1].

Les canalisations de transport sont protégées contre la corrosion par des différents traitements, tels que la protection cathodique, les traitements de surfaces ou encore la modification du milieu corrosif par ajout d'inhibiteurs de corrosion. Plus de 95% des canalisations en aciers sont sollicitées par le phénomène de corrosion qui se produit sur les surfaces extérieures des pipelines par suite des interactions du matériau avec l'environnement corrosif du sol [2]

A cet effet, et pour lutter contre la corrosion, deux méthodes sont utilisées, à savoir une protection passive par revêtement et une protection active dite la protection cathodique. Cette dernière consiste à maintenir le potentiel des conduites à une valeur d'immunité, de manière à éliminer la corrosion. La protection cathodique par soutirage de courant ou par anodes sacrificielles est la méthode préconisée dans ce travail, elle consiste à calculer le dimensionnement de protection cathodique d'une canalisation de transport gazoduc PS8 au niveau de station de pompage de Djamaa SPI et mettre à profit l'effet de protection sur la variation de potentiel le long de gazoduc PS8. Nous avons rassemblé par la suite un programme de maintenance du système de protection cathodique pour assurer leur fonctionnement sans interruption pour une longue durée.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres, nous présentons dans le premier chapitre une étude théorique sur la corrosion des conduites souterraines et dans le deuxième chapitre des généralités sur la protection cathodique des ouvrages métalliques, le troisième chapitre est consacré à la présentation du station de pompage SP1 et les caractéristiques du gazoduc PS8, cette présentation est suivie par une illustration des différents méthodes utilisées pour la protection contre la corrosion, ensuite nous

effectuons un calcul de dimensionnement du système de protection cathodique par deux méthodes (anode sacrificielle et courant imposé) , nous suivons l'efficacité de protection cathodique par les mesures de potentiel le long du gazoducs SP8 et par la mise d'un programme de maintenance d'un système de protection cathodique. Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Corrosion des conduites souterraines

Introduction :

De nombreux ouvrages métalliques, tels les canalisations de gaz, et de pétrole, les pipelines et les bacs de stockage de brut sont détériorés par la corrosion que l'on peut définir comme étant la destruction d'un métal par réaction chimique ou électrochimique. La corrosion des aciers est la plus répandue et apparaît comme un mal mystérieux, associant un milieu, ou l'un de ses composants, un métal, et diverses formes de dommages.

Dans la réalité, il faut donc soigneusement distinguer l'analyse d'un problème de corrosion et l'analyse des phénomènes de corrosion eux-mêmes. Or ces derniers ne peuvent être présentés simplement que dans une approche électrochimique, car c'est précisément là le fondement de la corrosion aqueuse. Cette approche électrochimique est souvent redoutée du profane, car perçue comme étrangère à son problème. En réalité, il s'agit là pour l'essentiel d'un problème de communication, et pour beaucoup le résultat des tâtonnements d'une pédagogie qui a mis longtemps à se trouver.

Un sol humide pouvant être considéré comme un électrolyte, il est fondé de considérer les processus de corrosion des métaux métallique dans le sol du point de vue de la théorie électrochimique, bien qu'un sol est différent d'un électrolyte.[1]

I.1. Définition des pipelines:

Les pipelines sont des canalisations particulières qui contribuent aux enjeux économiques d'un pays. Ils jouent un rôle extrêmement important dans le monde entier comme moyen de transport de gaz et de liquide à longue distance. Le premier pipeline a été construit en 1869 par Benson pour éviter le monopole du transport de pétrole par chemin de fer. Ces derniers permettent l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Selon la nature du fluide transporté, les professionnels distinguent l'oléoduc dans le cas de pétrole, du gazoduc dans le cas de gaz.

Un pipeline est une canalisation pompable formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, son diamètre courant est compris entre 15 cm à 1 mètre, son épaisseur varie de 4 à 13 mm. La profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1,5 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages.

Elle résiste a une pression de 100 bars environ et est destiné à l'acheminement d'un Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement, et presque toujours enterrées sauf dans certaines régions.

La réalisation d'un pipeline met en jeu des investissements considérables. [2]

I.2. Phénomènes de corrosion :

I.2.1.Définition:

La corrosion des métaux est un phénomène naturel. En effet, à quelques rares exceptions près (l'or et plus généralement tous les métaux de la famille du platine que l'on trouve à l'état natif naturellement, cuivre, argent, fer de provenance météoritique), le métal est présent sur Terre sous forme d'oxyde, dans les minerais (bauxite pour l'aluminium, hématite pour le fer). Depuis la préhistoire, le travail de métallurgie a consisté à réduire ces oxydes dans des bas-fourneaux puis des hauts-fourneaux pour - La corrosion des métaux c'est une attaque La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

I.2.2 Rappels : Métaux et électrolytes :

La corrosion est le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif. L'environnement est un milieu corrosif, à partir du moment où il contient de l'eau ; ce milieu, c'est, bien entendu, l'eau elle-même, milieu complexe contenant quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi les sols qui contiennent tous plus ou moins d'humidité, et encore les gaz amenant des condensations d'eau. Cet environnement c'est aussi la plupart des milieux industriels liquides.

La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, (une réaction est un échange - gain ou perte - de particules) dont les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre. Ces réactions, à l'interface d'une phase métallique et d'une phase aqueuse, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques, neutres ou ionisés, contenus dans la solution [1].

I.2.3 L'électrode métallique :

Un métal M est constitué par un édifice cristallin d'ions positifs Mn^+ dans lequel circulent des électrons libres. On sait que ce nuage électronique est responsable de la conductibilité des métaux. La particularité d'un conducteur métallique est de laisser passer le courant électrique sans subir de modification chimique.

En résumé, la distinction entre métal et électrolyte, en ce qui concerne la conduction du courant, s'établit comme suit :

Le métal conduit le courant par ses électrons.

Le métal est un conducteur électronique.

La tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant qui le traverse, c'est un conducteur ohmique auquel s'applique la loi d'Ohm $U=RI$ (I.1)

L'électrolyte conduit le courant par ses particules ionisées, il s'agit d'une conduction ionique.

L'application d'une tension minimale d'électrolyse est nécessaire ici pour assurer la circulation d'un courant dans l'électrolyte. Il y a existence d'une force contre-électromotrice, dépendant de l'électrolyte mais aussi des conditions d'expérience, qui retarde l'apparition du courant. L'électrolyte est un conducteur ionique auquel s'applique la loi d'Ohm généralisée : $U=E+RI$ (I.2)

I.3 Les différentes formes de la corrosion:

1.3.1 Corrosion généralisé (corrosion uniforme):

Elle est due à une réaction chimique ou électrochimique qui se produit uniformément sur toute la surface considérée. Sa vitesse est généralement facile à prévoir avec une précision suffisante pour déterminer la durée de vie probable d'un appareil.

$$\text{Taux de corrosion en (mm/an)} = \frac{\text{Masse perdue(mg).87,6}}{\text{Surface (mm)} \text{ densité(g/cm)} \text{ temps(heures)}} \quad (\text{I.3})$$

Tableau (I.1): Classification du taux de corrosion [3].

Taux de corrosion	Tenue
< 0,05 mm/an	Excellente
0,05 à 0,130 mm/an	Bonne
0,130 à 1,25 mm/an	Satisfaisante
> 1,25 mm/an	Non satisfaisante

I.3.2 Corrosion localisée:

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques.

- **Corrosion par piqure:** Dans certaines conditions d'environnement, les métaux et alliages protégés par un film passif peuvent subir une attaque par piquuration, lorsqu'il se produit une rupture localisée du film. Ces piqures se localisent en certains points de la surface métallique, elles développent de façon insidieuse et s'auto propagent : au fond de la Cavité créée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous entraîne une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion.

- **Corrosion inter granulaire:** C'est une attaque sélective aux joints de grains, par suite d'hétérogénéités locales : Appauvrissement de l'un des constituants ou au contraire, enrichissement par suite de précipitation lors d'un traitement thermique par exemple. Il a alors création de piles locales avec dissolution des zones anodiques.

- **Corrosion par crevasse:** Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène.

- **Corrosion galvanique:** Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux phases ou de la corrosion pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques placés dans le même environnement. Il y a formation d'une pile. En cas de couplage, plus les métaux en présence sont éloignés sur l'échelle galvanique, plus la pile formée dispose d'énergie pour provoquer les transformations. Les phénomènes de corrosion sont amplifiés à la fois dans la cinétique de dégradation et dans la génération d'ions dans le milieu biologique. La partie la moins noble est l'anode et la plus noble est la cathode. Le rapport de surface anode/cathode joue un rôle très important. Il faut retenir que, plus l'anode n'est de petite taille, plus la vitesse de dissolution n'est élevée. Ce fait a une grande importance dans la pratique clinique en odontologie, en particulier lors du choix des alliages utilisés pour les réalisations prothétiques.

- **Corrosion et dissolution sélective:** C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

- **Corrosion par frottement:** C'est la détérioration qui se produit à l'interface entre des surfaces en contact, suite à la conjugaison de la corrosion et d'un faible glissement réciproque des deux surfaces.

- **Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion:** C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (force de traction) et d'une réaction électrochimique. La corrosion sous l'effet de la fatigue est due à l'application répétée des contraintes.

- **Corrosion sous contrainte est une fissuration du métal:** qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique

- **Corrosion fatigue:** est observée lorsque l'effet est alterné, par conséquent l'attaque est en générale Trans granulaire .

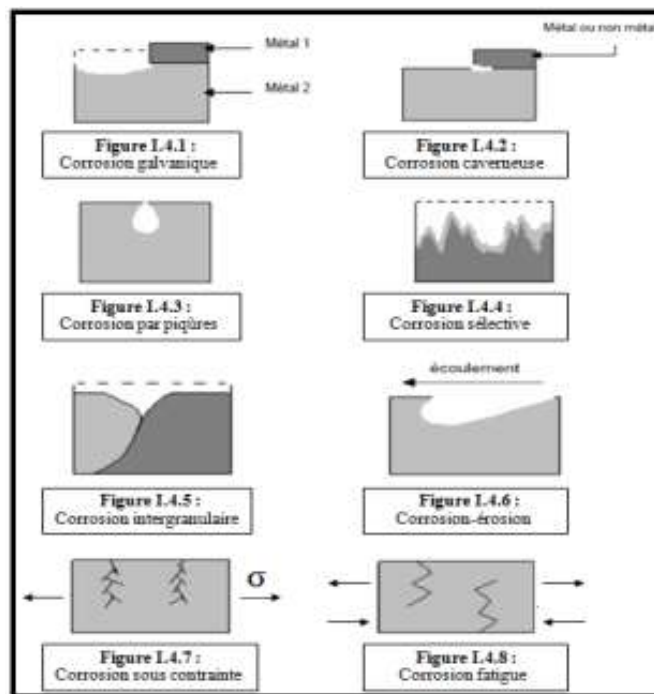


Figure (I.1): Les différents types de corrosion [3].

I. 4. Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés :

I.4.1 Le sol comme électrolyte :

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

I.4.2 Agressivité du sol :

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies. Un sol résistif a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau. La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés. À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités. Pour ces raisons, on s'est basé sur ces normes existantes afin de définir des limites de résistivité sur le terrain concernant les conduites d'aqueduc en fonte. Les limites de résistivité considérées sont présentées au Tableau (1) où cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles.

Tableau (I.2): Corrosivité du sol selon la résistivité [2]

Plage de résistivité du sol	Catégorie du sol
0 – 1500	Très corrosive
1500 – 3000	Corrosif
3000 – 5000	Moyennement corrosive
5000 – 10000	Faiblement corrosive
> 10000	Peu corrosive

La résistivité du sol est considérée comme le premier indicateur déterminant l'échelle d'activité de corrosion. Néanmoins, ils existent d'autres facteurs qui peuvent affecter le sol tels que les produits chimiques présents dans le sol, le taux d'humidité et la qualité du sol, etc.

I.4.2.1 Paramètres déterminant l'agressivité du sol :

L'analyse du taux d'agressivité du sol consiste en la détermination des paramètres suivants

- **Résistivité du sol :** La résistivité du sol est inversement proportionnelle à la capacité du courant de corrosion et donc à l'activité de la corrosion. Un sol avec une résistivité de

1500 Ohm cm ou moins se fait attribuer 10 points et est considéré comme potentiellement corrosif.

- **PH** : Le PH exprime la teneur en ions acidifiants dissous dans l'électrolyte (le sol) et indique l'aptitude d'un sol à être le siège de certaines réactions particulières influençant la corrosion. Un sol à faible PH indique un sol aux propriétés acides et un sol avec un PH élevé indique la présence de sels alcalins dans le sol.

- **Sulfures** : La présence des sulfures indique l'existence de bactéries sulfatoréductrices. L'analyse considère les degrés de la réaction du catalyseur de l'échantillon du sol étudié (positif, trace ou aucune).

- **Potentiel d'oxydoréduction (Redox)** : Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.

- **Humidité** : Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion.

I.4.2.2 Méthode de mesure de la résistivité du sol :

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner . Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables . [2]

I.4.2.3 Principe de mesure de la résistivité du sol :

Tel qu'illustré sur la Figure (1.3), on fait circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et on mesure la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs. Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE permettent de calculer la résistivité du sol selon l'équation 1.2.

Comme le sol n'est pas homogène, la valeur obtenue par la mesure ne correspond pas à la résistivité réelle du sol mais plutôt à une moyenne des résistivités des diverses couches le constituant. Ainsi, cette valeur est appelée la résistivité apparente.

La résistivité moyenne du sol peut être déterminée à partir de la résistance mesurée par l'Ohmmètre. Toutefois, la connaissance de la distance entre chaque piquet de terre est nécessaire dans chaque mesure.

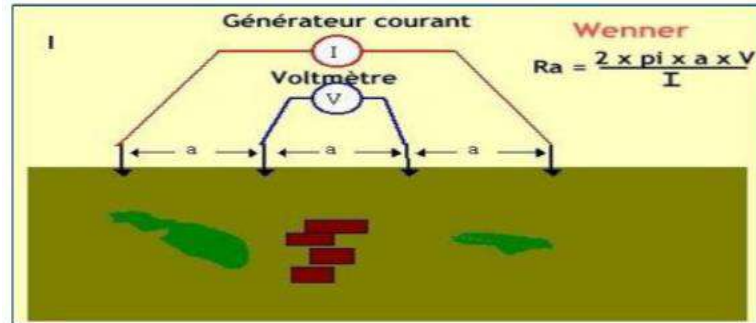


Figure (I.2): Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesurée avec l'application de la formule 1.3. .

$$\rho = 2\pi R d \quad (I.3)$$

Où :

ρ : Résistivité moyenne du sol ($\Omega \text{ cm}$).

R : Résistance moyenne du sol (Ω).

d : Espacement entre deux piquets (cm).

I.5 Corrosion par les courants vagabonds :

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (S.N.C.F. – tramways, métro), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds Figure (1.4). En effet, le courant amené par la caténaire, qui peut pour certains trains être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à la sous-station émettrice par le rail de roulement.

Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur des parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station . [1]

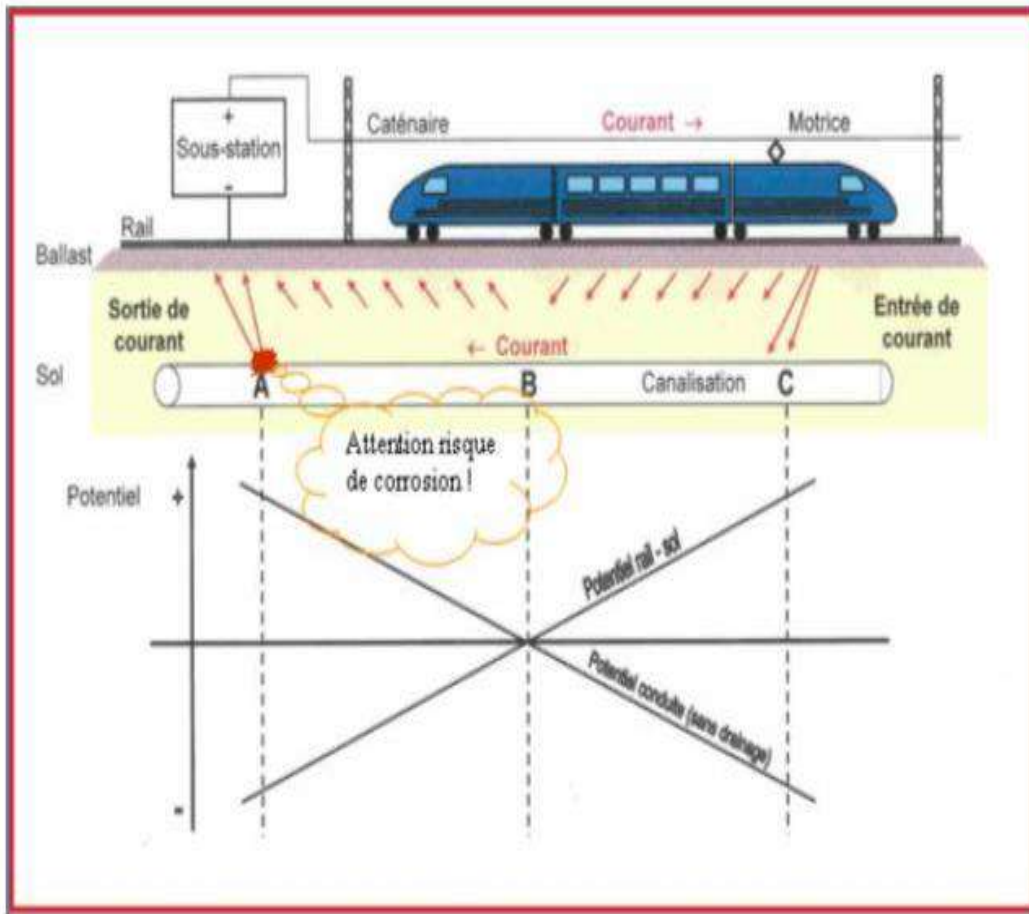


Figure (I.3): La corrosion par courant vagabond [1]

Conclusion

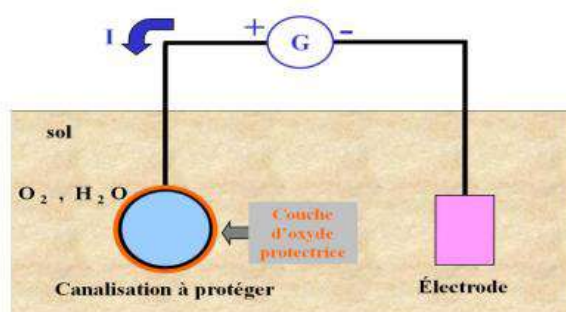
Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées.

Il est nécessaire de se préoccuper et de limiter les méfaits de la corrosion d'une part parce qu'elle impose des travaux d'entretien importants et coûteux. Le problème de lutte contre la corrosion est complexe par suite de nombreux facteurs. Qu'il faille intervenir ces facteurs dépendent du procédé et de l'élaboration et des traitements thermique, mécanique ou chimique que l'alliage a subi, ce dernier ne peut être qualifié de résistant à la corrosion que si l'on précise les conditions dans lesquelles il est utilisé et chaque problème de résistance à la corrosion doit être étudié d'une façon particulière. Il existe deux méthodes principales de protection contre la corrosion : Protection passive, protection active (cathodique).

Chapitre II :
Généralités sur la protection
cathodique

II. La protection anodique

La protection *anodique*, d'origine plus récente, repose sur l'aptitude à la passivation du matériau dans le milieu considéré. Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Le film passif est conducteur électronique et son épaisseur est de l'ordre de 10 nm. Sa formation ne doit pas nécessiter une quantité d'électricité supérieure à 10^{-2} C.cm⁻²; il doit être relativement insoluble dans les acides.



Figure(II.1): *Protection anodique par courant imposé*

La technique de protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitrique, sulfurique, ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, le zirconium, le hafnium, ou le niobium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés. Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une canalisation acier inoxydable destinée au transport de mélange d'acide. Avant d'employer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondant à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est à dire l'étendue du palier de passivité.

II .2 La protection cathodique :

La protection *cathodique* qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal.

Lorsque deux métaux différents plongés dans un milieu corrosif sont reliés électriquement, la vitesse de corrosion de l'un augmente alors que celle de l'autre diminue. Cet abaissement du potentiel est obtenu par passage d'un courant entre la surface à protéger (cathode) et une électrode auxiliaire (anode).

II .2 .1 Types des anodes:

Les anodes peuvent être de deux types :

-soit des anodes ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger, on parle de protection cathodique par anode sacrificielle.

-soit des anodes couplées à un générateur de courant imposant une différence de potentiel entre deux métaux. Dans ce cas, on parle de protection cathodique par courant imposé ou par soutirage de courant.

Le choix d'un système par rapport à un autre doit être établi en tenant compte des comparaisons techniques et des critères économiques (conception, équipement, installation, maintenance, consommation en matière et en énergie). La mesure du potentiel en chaque point permettra de vérifier si la condition $E < E_p$ est bien vérifiée, c'est à dire que le courant anodique passant de la structure à protéger vers le milieu corrosif est négligeable. Lorsque l'acier est enterré, on admet que pour le protéger dans des conditions aérobies son potentiel naturel doit être abaissé de 300 mV. En milieu anaérobie par contre, cette diminution doit être de 400 mV. L'emplacement des anodes est souvent imposé par des considérations géométriques ou techniques.

Toutefois, lorsque le choix est possible et dans le cas d'une corrosion uniforme. Les anodes seront plus efficaces en étant réparties de façon régulière. Par contre, dans le cas d'une corrosion localisée, les anodes seront plus efficaces si elles sont positionnées près d'une zone cathodique. De même, lorsqu'il y a circulation de liquide, on placera les anodes dans les régions les plus aérées.

Le tableau ci-après montre la comparaison des deux types de protection cathodique.

Tableau(II.1): comparaison entre deux systèmes de protection cathodique

	ANODE SACRIFICIELLE	SYSTEME A COURANT IMPOSE
Complexity de l'installation	Simple	Complexes
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Important surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peud'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageables si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Elevé
Numbers d' anodes	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucun	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requisse par un spécialiste

II .2.2. Densité de courant de protection

Pour atteindre le potentiel correspondant au seuil de la protection cathodique, la surface entière de l'objet doit être parcourue par un courant s'exprimant en densité de courant (A/m²). La densité de courant nécessaire à l'obtention du seuil de protection est fonction du matériau à protéger (nature de l'équipement, présence d'un revêtement...) et des paramètres physicochimiques de l'électrolyte au contact de celui-ci (présence de Ca²⁺et Mg²⁺, corrosivité du milieu...). Le tableau ci-dessous donne les valeurs de la densité de courant cathodique couramment utilisées en fonction des milieux électrolytiques en contact avec l'acier

Tableau(II.2): Densité de courant en pratique

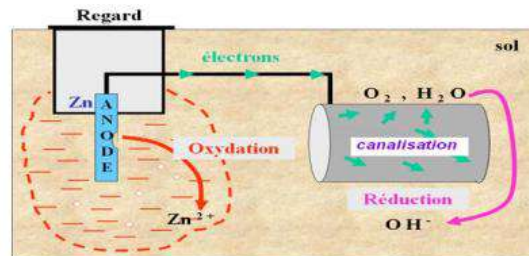
Milieu électrolytique	Densité de courant [mA/m ²]
Sols : a) sol sec b) sol humide agressif	10 jusqu'à 30
Acier enrobé de béton : a) béton de bonne qualité b) béton dégradé	0,1 (prévention) 1 10
Eaux douces : a) eau froide en mouvement b) eau chaude aérée	150 50
Eau de mer	60 à 220

Lorsque la protection cathodique est appliquée en conjonction avec un revêtement, les calculs du besoin de courant doivent prendre un coefficient de dégradation qui varie entre 2 à 10% en fonction de la qualité présumée du revêtement.

II.3 Protection par anode sacrificielle:

II.3.1 Principe:

La protection cathodique consistant à abaisser le potentiel par imposition d'un courant extérieur à partir d'une anode auxiliaire, on peut utiliser un courant d'origine galvanique par couplage avec un métal moins noble en créant ainsi une pile de corrosion à grande échelle dans laquelle le métal à protéger constitue la cathode, l'anode seule étant le siège d'une réaction de corrosion : c'est la protection par *anode sacrificielle*. Dans la protection par anode sacrificielle, le métal à protéger est à un potentiel supérieur ou égal à celui de l'anode, la différence possible étant due à la chute de potentiel introduite par la résistance de la liaison entre anode et cathode.



Figure(II.2): *Protection cathodique par anode sacrificielle*

II.3.2 Durée de vie:

La protection par anodes sacrificielles n'a pas une durée indéfinie. Elle s'arrête avec la disparition du matériau sacrificiel. L'évaluation de sa durée de vie est estimée par calcul du dimensionnement des anodes, les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
- Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel;
- Elles doivent se corroder de manière uniforme dans le milieu considéré, et ne pas être fortement attaquées en l'absence de courant
- Elles doivent avoir une bonne conductibilité, une bonne résistance mécanique, et pouvoir être obtenues facilement dans des formes et des dimensions variées
- Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable.

Dans la pratique, seuls trois matériaux satisfont ces critères, ce sont : le zinc, l'aluminium, et le magnésium. Les critères de choix pour ces anodes sont les suivants:

- Ne pas être attaquées par le milieu corrosif
- Avoir une bonne conductibilité, ainsi qu'une bonne résistance mécanique
- Ne pas être trop onéreuses.

On utilise dans la pratique des alliages fer-silicium avec faible addition de chrome, dont l'inconvénient majeur est la fragilité mécanique. Le graphite, le magnésium, sont utilisés pour la protection des structures enterrées. On emploie aussi parfois des alliages de plomb contenant de l'argent, de l'antimoine ou de l'étain que l'on polarise au préalable afin de favoriser la formation d'une couche protectrice de PbO_2 . Enfin, l'utilisation des métaux précieux comme le platine, ou les alliages platine-iridium et platine-palladium est aussi pratiquée. Le platine-palladium est notamment de plus en plus utilisé car il permet des densités de courant élevées de l'ordre de 30 A.dm^{-2} .

II.3 .3 Avantages d'application des anodes sacrificielles:

- Peu de surveillance.
- Installation facile.
- Pas d'isolement.

II .3 .4 Inconvénients d'application des anodes sacrificielles:

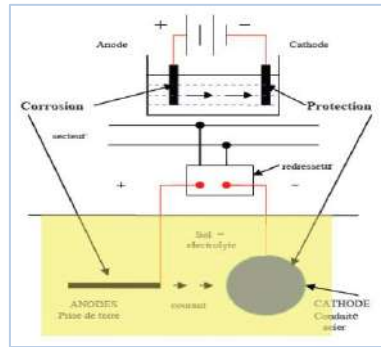
- Source de courant onéreuse
- Débit dépendant du bon contact avec le métal à protéger.
- Système lourd et encombrant.

II.4 Protection par courant imposé :

II.4.1 Principe:

Dans la protection cathodique, il est aussi possible d'utiliser un générateur de courant continu relié à la structure à protéger et à une anode qui sera dans ce cas non attaquable : c'est la protection par courant imposé.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger. Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché qui correspond à l'immunité du métal.



Figure(II.3): Protection cathodique par courant imposé

Il s'agit aussi d'une véritable cellule d'électrolyse et le potentiel du métal à protéger sera inférieur à celui de l'anode. Cette protection apparente résulte du fait que le système se comporte comme une pile (générateur de courant).

II.4.2. Domaines d'application:

La protection cathodique est généralement utilisée en association avec un autre mode de protection conventionnel par revêtement ou par peinture, ceci afin de limiter la densité de courant fournie par les anodes ou le générateur. Parmi les principaux domaines d'application on peut citer :

- Les structures enterrées : il s'agit des canalisations, des réservoirs de stockage, etc. La disposition des anodes est fonction de la taille des installations.
- Les structures immergées : carènes ou installations fixes (jetées, appontements, plates formes de forage offshore) en eau de mer ou en eau douce.
- Les structures contenant l'agent corrosif : réservoirs, citernes, cales de navires, conduites, condenseurs...

La protection cathodique peut aussi contribuer à limiter certains phénomènes particuliers de corrosion localisée comme la corrosion sous contrainte ou la fatigue corrosion pour les aciers inoxydables, les alliages d'aluminium, ou le bronze. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, elle est toutefois déconseillée lorsqu'il y a risque de production d'hydrogène cathodique pouvant fragiliser le métal.

II.4.3 Réalisation des soutirages:

Dans un système à courant imposé, la protection cathodique se définit par les paramètres suivants :

- la densité de courant de protection,
- les caractéristiques du générateur

II.4.4 Densité de protection:

La densité de courant de protection, qui est l'intensité par unité de surface, dépendant essentiellement :

- de la qualité de l'isolement du revêtement
- de l'agressivité du milieu environnant

II.4.5. Caractéristiques du générateur:

Le débit du générateur de courant I est défini par la loi d'ohm: $I = U/R$ (II.1)

Où U est la tension du générateur de courant continu et R la résistance du circuit. La tension U se situe dans la catégorie basse tension (TBT) où la tension est en général de 48 V, mais peut atteindre dans certains cas 120 V continu (EN C 15-100).

La résistance du circuit est en général conditionnée par la résistance de la masse anodique. Il y a donc intérêt à obtenir pour cette masse anodique une résistance aussi faible que possible pour éviter les pertes.

II.4.6. Choix du déversoir ou masse anodique:

C'est une masse de matériau conducteur d'électricité dont le rôle est d'injecter le courant dans le milieu où se trouve la structure à protéger. Sa résistance de contact avec le sol doit être le plus faible et sa masse est déterminée pour avoir sa longévité. Le choix de type d'anode à installer dépend des conditions suivantes :

- Le milieu, la consommation (la durée de vie)
- La densité de courant admissible
- Le prix (fourniture de mise en œuvre)

Les anodes sont classées en trois grandes familles :

- Consommables (produit ferreux, acier, fonte)
- Peu consommables (graphite, magnétite, magnésium....)
- Très peu consommable (titane platiné, niobium platiné, tantale platiné)

La masse de métal consommé est donnée par la *loi de Faraday* :

$$m_a = \frac{1}{96500} * \frac{A}{n} * I_s * t \quad (II.2)$$

m_a : masse d'anode (kg)

A : masse atomique du métal

n : valence

I_s : intensité de soutirage (A)

t : temps (s)

II.4.7 Calcul du nombre minimal d'anode:

Le nombre d'anodes minimal est donné par la formule :
$$n_a = \frac{D_v * I * m}{M * u} \quad (II.3)$$

u : le facteur d'utilisation de l'anode (généralement = 0,9)

m : la consommation pratique de l'anode en kg/A.an

D_v: la durée de vie souhaitée en an

M: la masse nette d'une anode en kg

II.4.8. Calcul de la résistance anodique

Le tableau suivant donne les formules le plus souvent utilisées :

Tableau (II.3): Formule de la résistance anodique

Géométrie	Formule	Auteurs
Anode cylindrique: Verticale (près de la surface) Ou off-shore Horizontale ou verticale Profondément enfouie Enterré à faible profondeur	$R_a = \frac{\rho_e}{2\pi L_a} \left(\ln \frac{4L_a}{r} - 1 \right) \quad (II.4)$	Dwight
	$R_a = \frac{\rho_e}{2\pi L_a} \left(\ln \frac{2L_a}{r} - 1 \right) \quad (II.5)$	Dwight
	$R_a = \frac{\rho_e}{2\pi L_a} \left(\ln \frac{4L_a}{D_a} \right) \quad (II.6)$	Peter
Anode massive de surface S (cm ²) utilisée en off-shore	$R_a = \frac{0,315\rho_e}{\sqrt{S}} \quad (II.7)$	Mac Coy
	$R_a = 1,33\rho_e S^{-0,727} \quad (II.8)$	Peterson

R_a: résistance de l'anode en Ω

L_a : longueur de l'anode en m

D : diamètre de l'anode en m

ρ_e: résistivité du sol en Ω.m

r : rayon de l'anode en m

S : surface en cm²

Le dimensionnement des systèmes de protection doit tenir compte de la résistance électrique des éléments qui les composent. Pour cela, la résistance opposée au courant par l'électrolyte doit être évaluée. Les lignes de courant sont généralement très concentrées autour des anodes, on parle de « résistance d'anode ».

On le calcule à partir de la résistivité de l'électrolyte environnant et de la géométrie de l'anode.

II.4.9 Méthode de minimisation de la résistance:

Pour minimiser la résistance du circuit, il faut :

- soit grouper plusieurs anodes en parallèles.
- soit améliorer la résistance individuelle de chaque anode par utilisation de «backfill»
» ou mélange régulateur.

Il y a donc compromis entre augmenter le nombre d'anodes ou utiliser du backfill. Ce sont les conditions économiques qui permettent de trancher.

II.4.9.1. Augmentation du nombre d'anodes:

Lorsqu'on groupe plusieurs anodes en parallèles, il y a interférence et chaque anode présente une résistance supérieure à la valeur calculée pour une seule anode. Le facteur de correction, appelé aussi coefficient de couplage dépend du nombre d'anode et de la distance entre les anodes.

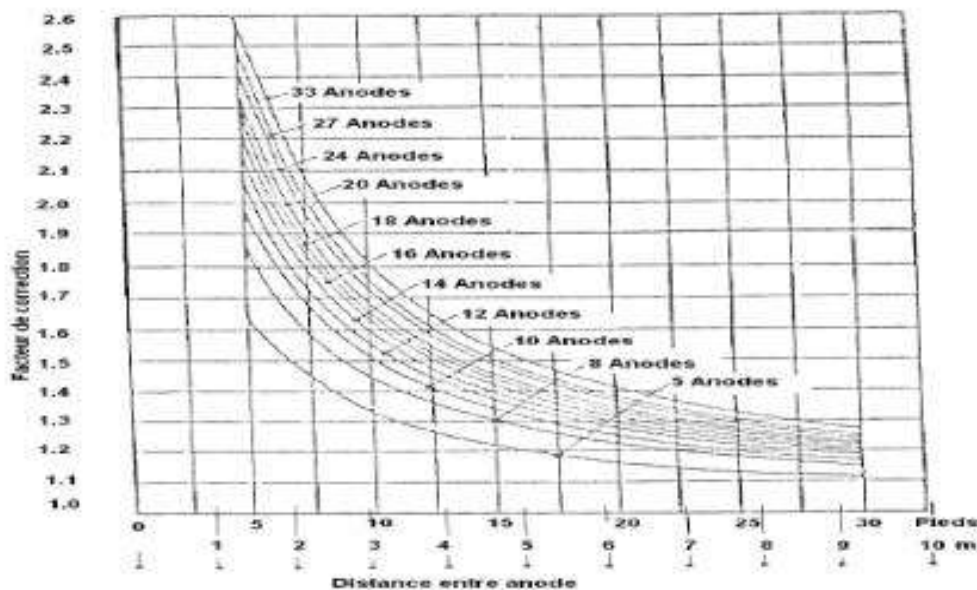


Figure (II.4): Facteur de correction pour le calcul de la résistance équivalente

II.4.9.2. Utilisation d'un backfill:

Un backfill est un mélange régulateur, composé de poudre de graphite, de granulométrie 0-3mm. Il est destiné à enrober les anodes. De manière générale, il est installé en vrac directement lors de la pose des anodes. Son rôle est de répartir la consommation sur toute la surface de l'anode, ce qui améliore la résistance du circuit.

II.4.10 Avantages et inconvénients des anodes à courant imposé :

- ✓ Le courant est ajusté à la valeur voulue,
- ✓ Système léger (peu d'anodes)
- ✓ Énergie électrique peu coûteuse.
- ✓ Difficulté d'installation,
- ✓ Coût élevé d'installation (isolation, écrans diélectriques),
- ✓ Système fragile et vulnérable.

II.4.11. Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH – tension):

Les diagrammes de Pourbaix potentiel- pH (E-pH) sont utilisés principalement pour aider à prévoir les états les plus stables d'un métal, de ses produits de corrosion et de ses ions associés (forme complexe) dans une solution aqueuse sous différentes conditions de potentiel et de pH. Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe-H₂O à 25°C [Figure \(II.4\)](#), plusieurs points thermodynamiques critiques peuvent être soulevés.

- Il est possible de ramener le potentiel de Fer à la région d'immunité en appliquant un moyen de protection cathodique adéquat.
- Il n'existe aucun pH pour lequel le fer métallique et le fer bivalent (ions ferreux) sont stables en présence de l'oxygène.
- Lorsque l'acier atteint des potentiels plus électropositifs en présence d'un milieu acide (pH faibles) ou intermédiaires, les ions Fe²⁺ et Fe³⁺, ont tendance à se stabiliser sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de corrosion et en présence des conditions thermodynamiques favorables.
- Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le Fe²O₃ ou le Fe³O₄ a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du Fer en formant une couche protectrice [2].

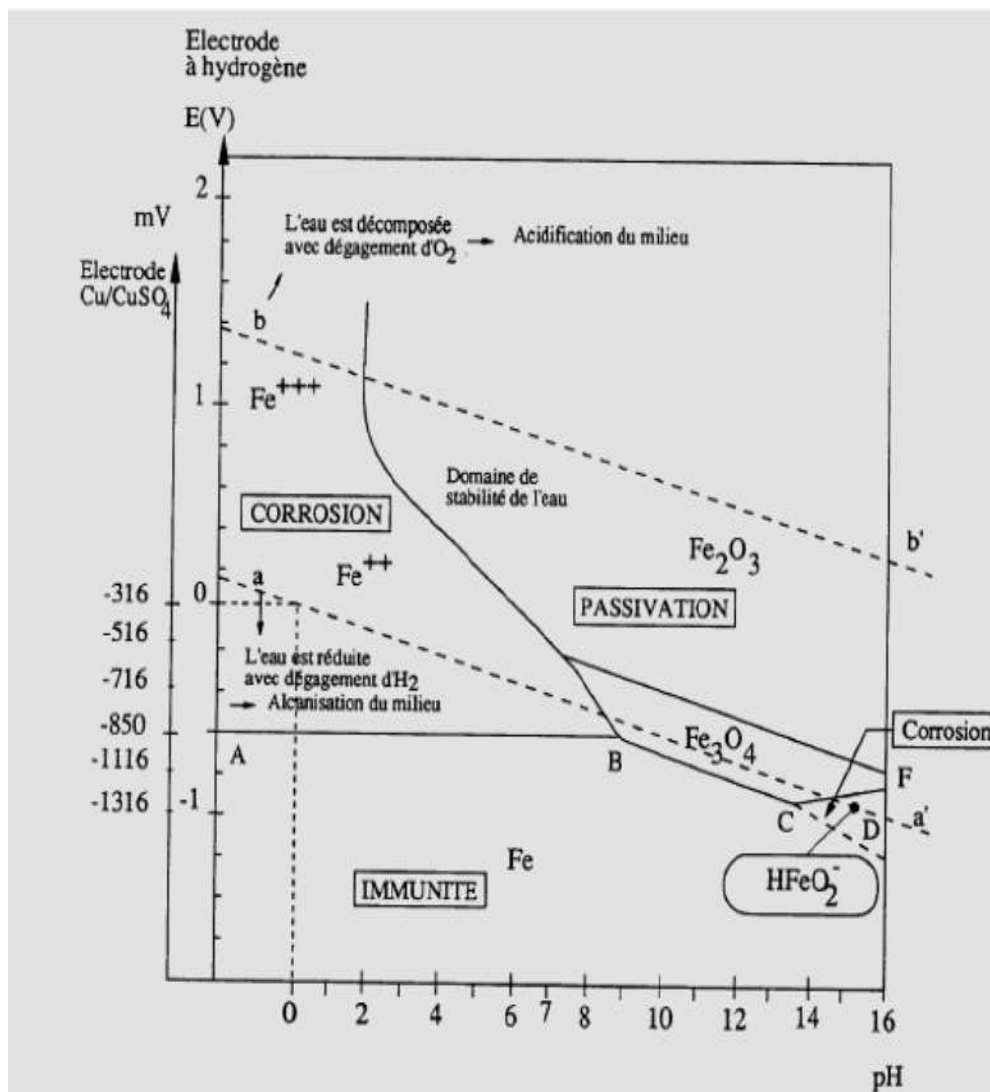


Figure (II.5): Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C [2].

Chapitre III
**Evaluation de la protection cathodique en
fonction**

III.1 Problématique:

L'Activité transport par canalisation assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, gaz naturel, GPL et condensât) depuis les champs de production jusqu'aux complexes et unités de traitement, de transformation, de stockage d'expédition et d'exportation. Le Transport des hydrocarbures par canalisation nécessite l'installation des stations de pompage au long de la ligne. Le problème majeur de ces installations est la corrosion des canalisations de transport qui est le cas discuté dans notre travail. La procédure de travail consiste à analyser la corrosion du gazoduc SP8 au niveau de station de pompage de djamaa, on a proposé une méthode de calcul de dimensionnement de protection cathodique et nous évaluons la protection par la mesure de potentiel et par la mise d'un plan de maintenance de système de protection cathodique

III.2 caractéristique des canalisations du transport :

III.2.1 Caractéristiques mécaniques:

Le tableau suivant résume les caractéristiques mécaniques selon API Line Pipe-5L:

Tableau (III.1) : Les caractéristiques mécaniques selon API Line Pipe-5L

Norme de référence: Américain Petroleum Institute (API) 5L, PSL1				Norme européenne comparable
Nuance	Limite d'élasticité Minimale R_{Eh}	Résistance à la traction minimale R_m	Allonge ment	EN10219-1: 1997
	N/mm^2	N/mm^2	%	
Gr.B	241	414	23	S235
X-42	290	414	23	S275
X-46	317	434	22	
X-52	359	455	21	S355
X-56	386	490	19	
X-60	414	517	19	S415
X-65	448	531	18	S460
X-70	483	565	17	

III.2.2 caractéristiques du gazoduc

Le gazoduc possède les caractéristiques suivantes :

Tableau (III.2) : Les caractéristiques de la canalisation

Gazoduc PS8/GEM – SP1 bis/OB1	
Diamètre	0,406 m (16'')
Départ	PS n° 8 du gazoduc GEM
Arrivée	Station SP1 bis de l'oléoduc OB1
Longueur totale	120 kms
Nuance	X60 API 5L
Epaisseur	6,35 mm (catégorie A) 9,53 mm (catégorie B)
Revêtement extérieur	Polyéthylène (usine)
Surface externe / km linéaire	1275,5 m ² / km linéaire
Surface externe totale	153060,0 m ²

III.3Présentation de la station sp1 DJAMAA :

La station sp1 bis (Djamaa) est comme les autres stations, leur but est de pomper le pétrole brut, arrivé de HEH (haoud elhamra) et le diriger vers sp2 (Biskra) par le gazoduc.

Pour ce but, la station doit être équipée par un groupe des équipements nécessaires, ce sont les pompes.

Ces pompes absorbons une grande puissance pour mise en service, ce point fait l'appel à un autre équipement : la turbine. (Les turbines installées dans le milieu sud sont généralement des turbines à gaz, grâce à la disponibilité de ce dernier dans le milieu sud).La turbine peut génère une puissance suffisante pour alimenter la pompe précédente.

La commande des vannes régulatrices ou les vannes d'isolement, le système d'auto nettoyage des filtres des turbines ainsi l'utilisation domestique de l'air (soufflage...) s'effectué par l'air, donc on a besoin à un pression et débit d'air dans un réseau spécial. La station sp1 bis a 03 compresseurs pour cette tâche. Le système de lutte contre l'incendie contient un réseau des tubes, un bac d'eau et 04 pompes (l'une électrique et l'autre diesel avec 02 pompes jockey).

Il y a 02 bacs dans la station : bac de détente et bac d'eau, le bac de détente est pour récupérer le pétrole brut en cas de surcharge dans le pipe ou le pétrole qui récupérer du surcuit de drainage, le bac d'eau est un réservoir d'eau pour l'utilise lorsque on a besoin d'eau (un feu, un exercice ...).



Figure(III.1):L'installation du transport par canalisation [7]

III.4 Dispositif des protection cathodique;

Le dispositif de protection cathodique par anodes sacrificielles sera mis en place au fur et à mesure de la pose du gazoduc. Il permettra d'atteindre le critère de protection du gazoduc du début de sa construction jusqu'à la fin de sa construction pour une durée minimale de 1 an. Les anodes sacrificielles seront raccordées au gazoduc par l'intermédiaire des prises de potentiel, La protection cathodique par anodes sacrificielles est strictement dimensionnée pour le gazoduc, son isolation électrique de toute autre structure métallique consommatrice de courant (mise à la terre...) doit être effective en permanence.

III.5 Identification du problème de la corrosion des canalisations de transport :

Les canalisations de transport peuvent subir à une corrosion externe Figure(III.2) suite :

- À la formation d'une pile électrochimique entre le terrain et la conduite sous l'effet de l'hétérogénéité du sol,
- À l'attaque agressive des produits chimiques infiltrés dans le sous-sol, qui proviennent de la boue de forage ou le ciment rejetés en surface du sol,

• Au croisement de deux conduites, l'une est protégée et l'autre est non protégée, ce qui engendre la formation d'une pile électrochimique par la transformation de la conduite non protégée en anode par rapport à la conduite protégée.



Figure (III.2): *La corrosion externe d'une canalisation enterrée*

III.6 Méthodes inspection et détection de corrosion

La détection de pertes en métal et de fissures est le domaine où l'utilisation d'outils intelligents connus le plus d'internet. Deux techniques sont mises en évidence concernant la détection des pertes de métal, Perte de épaisseur avec les méthodes non destructive,

- ❖ Détection par contrôle visuel ou par ultrason UT (technique ultrasonique).
- ❖ Perte de masse avec Les essais au laboratoire.

III.6.1 Le contrôle visuel :

Ce type d'inspection s'applique à l'état de l'équipement pour rechercher à l'œil toute corrosion de la surface du métal Figure(4.2). Cette inspection préliminaire, dans la plus part des cas, ne permet de déceler que des défauts majeurs à l'œil nu, et parmi ces défauts on peut citer :

- La déformation excessive (perte définitive de la géométrie originale de l'équipement)
- La perte d'épaisseur de l'équipement.

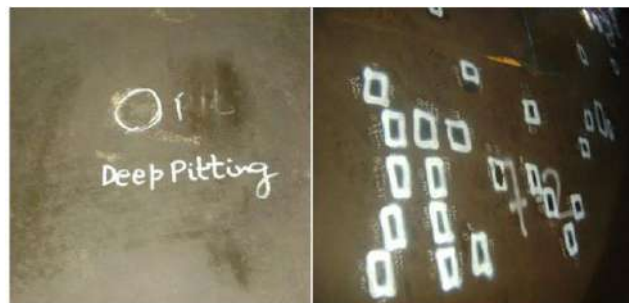


Figure (III.3): *Le contrôle visuel.*

III.6.2 Méthodes de protection passive

III.6.2.1-Sélection des revêtements

Sélection en fonction de :

- ✓ Résistivité électrique du revêtement
- ✓ La pénétration d'humidité et son évolution avec la température
- ✓ L'adhérence sur l'acier
- ✓ La sensibilité au décollement cathodique
- ✓ La résistance au vieillissement
- ✓ La résistance à l'endommagement (abrasion, poinçonnage ...).
- ✓ Le prix

III.6.2.2 Facteur d'efficacité (coating break-down) :

Facteur représentatif du vieillissement du revêtement. Il est défini par le ratio : densité de courant appliquée sur 1 m² de métal revêtu/ courant appliqué sur 1 m² de métal nu pour atteindre le potentiel minimal de protection (-850mV). Pourcentage de défaut (coating damages) : c'est le % de surface de métal mise à nu par rapport à la surface totale.

Par mesure de simplification pour les calculs on considère un « facteur d'efficacité » qui tient compte du pourcentage de défauts.

Pour des calculs préliminaires les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous peuvent être considérées en fonction de la durée de vie projetée.

Tableau(III.3):caractéristique de revêtement pour structure enterrée

Revêtement	Durée de vie(Ans)	Epaisseur (mm)	Défaut %	Facteur d'efficacité
Brais de houille de pétrole	5 à 10	4 à 6	1.5	8
	> 10	4 à 6	2.5	10
	> 25	4 à 6	3	12
Coaltar époxy (appl.Afroid)	5 à 10	<0.6	0.5	5
	> 10	<0.6	1.5	8
Epoxy poudre (appl.Achaud)	≤ 20	0.35 à 0.4	0.3	0.5
		5		
	≤ 20	0.3 à 0.4	0.5	0.5
Epoxy liquide Renforcé polyester	≤ 20	1.5 à 2	0.2	0.5
Couches PE ou PP	≤ 20	2 à 3	0.2	0.3
	> 20	2 à 3	0.3	0.4
Bandes bitumineuses (appl.Achaud)	≤ 20	5 à 6	0.3	3
	> 20	5 à 6	0.5	5
Bandes adhésives (appl.Afroid)	≤ 20	1 à 2	0.3	3
	> 20	1 à 2	0.4	5

III.6.2.3 Revêtement des tubes corrodés:

A Transport des tubes qu'on traite:

Le transport se fait par des camions lourds et par des appareils de relèvement des tubes comme nous montre la figure (III.4).



Figure (III.4): les machines de transports des pipelines(STT)

B Décapage:

Cette opération consiste à enlever l'ancien revêtement et la mise à nu de l'acier elle est effectuée manuellement par des ouvriers, ou le revêtement est plus facile après cette opération.(Figure3.5).



Figure (III.5): décapage manuel(STT)

C Pré sablage et Sablage:

L'opération du sablage consiste à projeter des grains de sable sur la surface de l'acier des tubes qu'on veut les réhabiliter, à une vitesse choisie pour bien nettoyer les tubes et sans les détériorer.

Cette opération s'effectue par deux types de machines:

- Machine manuel ou pré sablage
- après cette opération on coupe les tubes avec des machines de coupe et chanfrein.



Figure(III.6): coupe et chanfrein des pipes(STT)

Sablage avec une machine automatique modèle AOB 32636, donc c'est une période de préparation de surface pour le revêtement final des tubes. Cette opération est très importante pour la qualité de revêtement, afin de nettoyer la surface de toutes les imperfections pouvant exister. (Figure III.7).



Figure (III.7): *Machine de sablage automatique (STT).*

III.6.2.4 Application du Revêtement:

L'application du revêtement sur la surface est appliquée sur les tubes. Il constitue leur première protection contre les agressions extérieures (corrosion, enfoncement...).

Les matériaux bitumineux, dérivés de goudron de pétrole ou de houille peuvent répondre aux caractéristiques exigées d'un revêtement en sol. Les aciers X60 sont revêtus de bitume de pétrole appliqué sur chantier et renforcé d'un feutre de fibre de verre. Il est constitué d'une couche de peinture d'adhérence, dite "primer", appliquée à froid après sablage ou grenailage du tube, une ou plusieurs couches d'émail appliquées à chaud, d'épaisseur de 3 à 6 mm, un enroulement de voile ou tissu de verre noyé dans l'émail chaud afin d'augmenter la tenue et la résistance de la couche.

Ce revêtement doit assurer une protection efficace et de longue durée en constituant une barrière étanche et isolante avec le milieu agressif environnant. Les caractéristiques de ce revêtement est d'avoir une résistance d'isolement électrique élevée (haute permittivité diélectrique) en vue de s'opposer aux phénomènes électrochimiques tels que les potentiels provenant des courants vagabonds et permettre de maintenir des potentiels négatifs à coûts réduits de la protection cathodique (CP) (figure III.8)



Figure(III.8): *revêtement d'un tube de type thermodurcissable (STT)*

III.6.3 Protection active (Protection Cathodique):

III.6.3.1. Conditions préalables à l'application de la protection cathodique

La décision d'installer un système de protection cathodique dépend de l'importance et de la forme de la structure, du type de revêtement, de la résistivité du sol et de son action corrosive, des influences en courant continu et en courant alternatif, des règles nationale s ainsi que de critères techniques et économiques. Aucune des recommandations de la présente norme ne doit nuire à la sûreté de fonctionnement de la structure en question. Pour assurer la protection cathodique, les conditions suivantes doivent être réunies.

A-Continuité électrique

La structure ou partie de la structure à protéger doit être électriquement continue. La continuité doit se traduire par une faible résistance longitudinale. Les composants qui pourraient créer une augmentation de la résistance longitudinale de la structure doivent être court-circuités, en utilisant, par exemple, des câbles de section appropriée.

B-Isolation électrique

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

Il convient d'éviter les liaisons directes de la structure avec des systèmes de mise à la terre. S'il n'est pas possible de respecter cette condition, il est impératif de bien concevoir le système de protection cathodique en considérant la structure comme une structure complexe.

C- Revêtements externe

Il convient en principe de doter les structures à protéger d'un revêtement externe approprié.

Un bon revêtement externe diminue la quantité de courant de protection nécessaire, améliore la distribution de courant, augmente la surface protégée et réduit les influences sur les autres structures étrangères.

III.6.3.2 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique

Le contrôle de l'efficacité de la protection contre la corrosion d'un ouvrage enterré consiste à vérifier, par des mesures appropriées de potentiel et de courant, que les critères de protection cathodique sont bien atteints en tous points de l'ouvrage. Mais ce contrôle doit s'attacher à vérifier aussi que la protection passive, telle qu'elle a été précédemment définie dans ses divers rôles, est toujours intacte. C'est pourquoi il est nécessaire d'apprécier la valeur d'isolement apportée par le revêtement, comme il sera nécessaire de vérifier l'isolement par rapport à d'autres structures enterrées (conduites, fourreaux, tubages...), et l'efficacité des raccords isolants

Tableau(III.4):Fréquence des contrôles de fonctionnement.

Contrôle de fonctionnement	Fréquence
Pour les postes d'anode galvanique	Une fois par an, ou plus fréquemment si les conditions d'exploitation l'exigent
Pour les postes à courant imposé	Une fois par trimestre, ou plus fréquemment si les conditions d'exploitation l'exigent
Pour les postes de drainage	Une fois par mois, ou plus fréquemment en présence de courants vagabonds importants
Pour les liaisons avec des structures étrangères	Une fois par an, ou plus fréquemment si les conditions d'exploitation l'exigent
pour les dispositifs de découplage en courant continu et les systèmes de terre	Une fois par an, ou plus fréquemment si les conditions d'exploitation l'exigent
Pour les dispositifs de sécurité et de protection	Une fois par an, ou plus fréquemment si les conditions d'exploitation l'exigent
Pour les prises de potentiel	Une fois par an, aux points de mesure sélectionnés, et tous les trois ans à tous les points de mesure

III.6.3.2 a- Contrôle périodique du système de protection:

Le contrôle périodique de la protection cathodique effectué par un spécialiste certifié est indispensable pour maintenir son efficacité et prévenir contre les risques de défaillance.

Le contrôle porte essentiellement sur les points suivants :

- le fonctionnement correct et permanent des dispositifs produisant les potentiels d'immunité attendus .
- la mesure du potentiel du métal de la structure devra respecter les valeurs des recommandations.
- la vérification du maintien de ce potentiel à des valeurs acceptables sur toute la surface du métal à protéger .
- le contrôle et le suivi du débit de courant.

❖ Mesure d'un

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

i) Electrode de sulfate de cuivre:

C'est l'électrode de référence, très généralement utilisée pour la mesure de potentiel des structures enterrées telles que les canalisations et les bacs de stockage. La structure de cette électrode de référence est représentée sur la Figure(III.9)

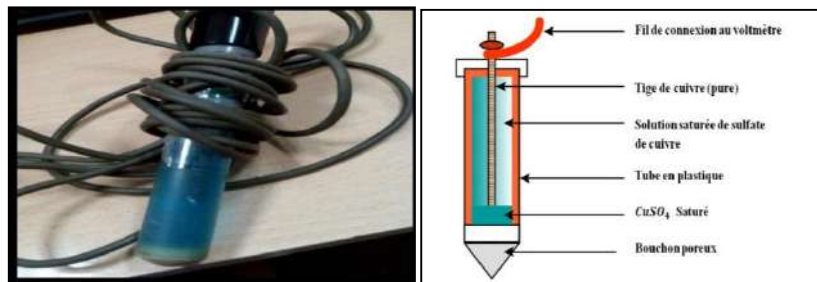


Figure (III.9): Electrode de référence $Cu/CuSO_4$ pour l'utilisation dans les sols.

ii) Voltmètre

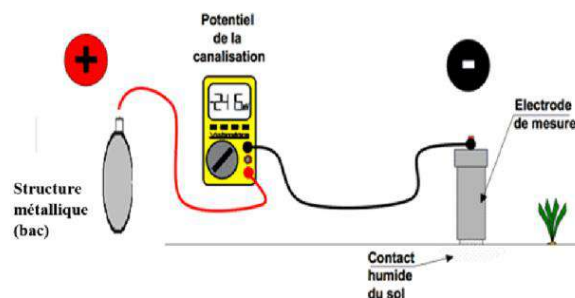
Il est plus précis dans les mesures du potentiel, avant d'effectuer les mesures, on doit le régler à une valeur de 2V.



Figure (III.10): Voltmètre utilisé pour mesurer le potentiel de PC.

III.6.3.2 b-Contrôle Méthode de mesure du potentiel:

On plonge la partie poreuse de l'électrode $Cu/CuSO_4$ dans le sol préalablement humidifié. La valeur du potentiel mesuré dépend de la position de l'électrode par rapport à la structure en acier comme le présente la figure II.7.



Figure(III.11): Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.

Des mesures multiples peuvent être effectuées sur chaque contact de la sonde avec la cathode en déplaçant l'électrode de référence à différents points de la surface du sol. La Figure II.8 présente des photos graphiques de la mesure du potentiel de protection. $E = -0,850V/E_{Cu/CuSO_4}$ est considérée comme une indication satisfaisante de la protection.



Electrode de référence $Cu/CuSO_4$
utilisé pour mesurer le potentiel de PC.



Type de voltmètre

Figure (III.12): Photographies des différents

III.7 Dimensionnement de calcul de protection du gazoduc par anode sacrificielle

III.7.1 Dimensionnement pour 1km :(par anode galvanique)

III.7.1.1 Surface à protéger:

Comme nous avons un alignement de diamètre nominal de 406 mm sur une longueur de 1000 m, la surface à protéger est de 1275,5 m² pour 1 km.

III.7.1.2 Courant de protection:

Les besoins en courants sont déterminés en fonction des surfaces à protéger et des densités de courant mentionnées précédemment.

$$I_s = S \cdot DDC$$

$$I_s = 1275,5 \cdot 0,005 = 6,38 \text{ mA}$$

$$I_s = 6,38 \text{ mA}$$

III.7.1.3 Nombre de dispositif anodique:

- Consommation massique d'anode

La masse de métal consommé est donnée par la loi de Faraday d'après la formule :

$$m_a = \frac{1}{96500} \cdot \frac{A}{n} \cdot I_s \cdot t$$

$$m_a = \frac{1}{96500} \cdot \frac{24,305}{2} \cdot 0,00638 \cdot 1 \cdot 8760 \cdot 60 \cdot 60$$

$$m_a = 1266,875 \text{ g}$$

$$m_a = 1,266 \text{ Kg pour 1 km}$$

III.7.1.4 Nombre minimale d'anode:

Comme nous avons vu que pour une longueur de 1 km, la consommation massique d'anode est de 1.266 kg,

La valeur de résistivités de sol prise en considération dans ce dimensionnement est de 50 ohm.m.

III.7.1.5 Résistance d'une anode:

La résistance d'anode prébackfillée (R_a) est la somme de 2 résistances :

- une résistance à l'interface matériau anodique / backfill (R_{back})
- une résistance à l'interface backfill / sol (R_{sol})

$$R_a = R_{sol} + R_{back} \dots \text{ formule de dwight} \quad (\text{III.1})$$

$$R_{sol} = \frac{0.159 \times p_{sol}}{L} \times \ln\left(\frac{L}{D} - 1\right)$$

$$R_{sol} = \frac{0.159 \times 50}{0.48} \times \ln\left(\frac{8 \times 0.48}{0.15} - 1\right)$$

$$R_{sol} = 37.1 \text{ ohm}$$

$$R_{back} = (0.159 \times P_{back}) \times \left(\left[\frac{1}{l} \ln \frac{8l}{d} - 1 \right] - \left[\frac{1}{L} \ln \frac{8L}{D} - 1 \right] \right)$$

$$R_{back} = (0.159 \times 2.5) \times \left(\frac{1}{0.22} \ln \frac{8 \times 0.22}{0.114} - 1 \right) - \left(\frac{1}{0.48} \times \ln \frac{8 \times 0.48}{0.15} - 1 \right)$$

$$R_{back} = 1.3 \text{ ohm}$$

$$R_a = R_{sol} + R_{back}$$

$$R_a = 37,1 + 1,3$$

$$R_a = 38,4 \text{ ohm}$$

La résistance d'une anode 4,1 kg de magnésium prébackfillée est de 38,4 ohms dans un sol de 50 ohm.m.

III.7.1.6 Courant effectif par anode

En assumant le potentiel de l'anode à -1,5 V/CuCuSO₄ et le potentiel de la cathode polarisé cathodiquement à -1V/CuCuSO₄, on obtient le courant effectif de l'anode comme suit :

$I_{\text{effectif}} = [\text{Potentiel de l'anode} - \text{potentiel de la cathode}] / \text{Résistance de l'anode}$
(R_a).....Loi d'Ohm

$$I_{\text{effectif}} = 0,5 / 38,4$$

$$I_{\text{effectif}} = 13,0 \text{ mA}$$

Le courant effectif débité par une anode 4,1 kg de magnésium prébackfillée est de 13 mA.

III.7.1.7 Nombre d'anodes / Km linéaire

Pour débiter le courant de protection requis de 6,38 mA / km linéaire de gazoduc, le nombre théorique d'anodes est donné par le calcul suivant :

$$\text{Nombre d'anodes} = I_{\text{requis}} / I_{\text{effectif}} \quad (\text{III.2})$$

$$N_a = 6,38 / 13$$

$$N_a = 0,49$$

1 anode de type 4,1 kg de magnésium prébackfillée fournit en propre le courant de protection

cathodique requis pour 2 kms linéaire de gazoduc.

III.7.1.8 Nombre d'anodes totale

La fréquence d'implantation des anodes magnésium de ce type doit être inférieure ou égale à 2 km

III.7.1.9 Consommation de la masse anodique

La consommation de la masse anodique totale pour fournir le courant requis sur l'ensemble du gazoduc 16'' durant 1 an est exprimé théoriquement comme suit :

$$M_a = (D_t \times 8760 \times I_{\text{total requis}}) / c \quad (\text{III.3})$$

Avec :

D_t = Durée de vie minimale exprimée en année (1 année = 8760 heures)

M_a = Masse anodique totale consommée en kg

c = Capacité pratique du matériau anodique en Ampère. Heure/kg

$I_{\text{total requis}}$ = courant de protection débité par l'ensemble des anodes exprimé en Ampère

$$M_a = (1 \times 8760 \times 0,766) / 1230$$

Masse théorique totale consommée = 5,5 kg

Pour une anode de 4,1 kg placée à minima tous les 2 kms le long des 120 kms du gazoduc, la masse moyenne de matériau consommée par anode est de 5,5 kg / 60, soit 0,1 kg / anode.

III.8 Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour le gazoduc par courant imposé:

III.8 .1 Calcul du nombre de postes, courants, tension et potentiel de pipeline

Dimensionnement de la protection cathodique pour une durée de vie de 25 ans sur le pipeline ayant une résistance d'isolement initiale $R_0=10000 \Omega\text{m}$.

-

Données de base :

$$R_0 = 10000 \Omega \cdot m^2$$

$$t = 25 \text{ ans}$$

$$\beta = 0,124$$

$$D = 40 \text{ Pouce (101,6 cm)}$$

$$\rho_{\text{acier}} = 18 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$S = 4,86 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$L = 120 \text{ km}$$

$$E_{\text{extremite propose}} = -950 mV$$

$$E_0 = (E_{\text{extremite}} - E_{\text{naturel}}) = (-950 - (-500)) = -450 mV$$

$$E_{\text{soutirage propose}} = -1200 mV$$

$$E_S = (E_{\text{soutirage}} - E_{\text{naturel}}) = (-1200 - (-500)) = -700 mV$$

III.8 .2 Calcul de la variation de la résistance d'isolement du revêtement

$$R_t \text{ pour la durée de vie « t » : } R_t = R_0(1 - e^{-\beta t})/\beta t \quad \text{(III.4)}$$

R_t = résistance d'isolement du revêtement en fonction du temps

R_0 = résistance d'isolement initiale du revêtement

β = coefficient de dégradation du revêtement.

$$R_t = \frac{R_0(1 - e^{-\beta t})}{\beta t} = \frac{10000(1 - e^{-0.124 \times 25})}{0.124 \times 25} = 3080,48 \Omega \cdot m^2$$

III.8 .3 calcul de la résistance transversale du revêtement R_T

$$R_T = R_t/\pi D^2$$

Où :

D : représente le diamètre extérieur de pipe.

$$R_T = \frac{R_t}{\pi D^2} = \frac{3080,48}{3,14 \times (1,016)^2} = 965,59 \Omega$$

III.8 .4 Détermination de la résistance linéaire de l'acier de la pipe pour une longueur de 1 mètre :

$$r = \rho L/S \quad \text{(III.5)}$$

ρ : Résistivité de l'acier de conduite ; $\rho = 18 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

L : Longueur de la conduite (L = 1 m)

S : Section de la conduite en m^2

$$r = \frac{\rho L}{S} = \frac{18.10^{-8} \times 1}{4,86.10^{-2}} = 3,7.10^{-6} \Omega m^{-1}$$

III.8 .5 Détermination des coefficients α (coefficient d'atténuation) et γ (résistance caractéristique de revêtement) :

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R_t}} \quad \text{et} \quad \gamma = \sqrt{r \times R_T} \quad \text{(III.6)}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R_t}} = \sqrt{\frac{3,7 \times 10^{-6}}{965,59}} = 6,19.10^{-5}$$

$$\gamma = \sqrt{r \times R_T} = \sqrt{3,7.10^{-6} \times 965,59} = 5,97.10^{-2} \Omega$$

III.8 .6 Calcul de la longueur du bras LB (portée d'un poste de soutirage)

$$L_B = \left[\ln\left(\frac{E_S}{E_0}\right) + \sqrt{\left(\frac{E_S}{E_0}\right)^2 - 1} \right] / \alpha \quad \text{(III.7)}$$

E_S : la chute de potentiel au point de soutirage.

E_0 : la chute de potentiel aux extrémités de la portée du poste de soutirage.

$$L_B = \frac{\left[\ln\left(\frac{E_S}{E_0}\right) + \sqrt{\left(\frac{E_S}{E_0}\right)^2 - 1} \right]}{\alpha} = \frac{\left[\ln\left(\frac{-700}{-450}\right) + \sqrt{\left(\frac{-700}{-450}\right)^2 - 1} \right]}{6,19.10^{-5}} = 1,63.10^4 m$$

III.8 .7 Portée totale (LP) d'un poste de soutirage :

$$L_P = 2L_B$$

$$L_P = 2 \times 1,63.10^4 = 3,26.10^4 m$$

Détermination du nombre de postes NP :

$$N_P = \left(\frac{L}{L_P}\right) + 1$$

Avec :

L : Longueur pipeline à protéger.

$$N_P = \frac{120 \times 10^3}{3,26 \times 10^4} + 1 = 4,68 \approx 5 \text{ postes}$$

III.8 .8 Evaluation de la nouvelle portée (LP') d'un poste :

$$L_{P'} = \left(\frac{L}{N_P}\right) \quad \text{(III.8)}$$

$$L_{P'} = \left(\frac{120 \times 10^3}{5}\right) = 2,4 \times 10^4 \quad \text{(III.9)}$$

$$E_0' = E_S / \cosh\left(\frac{\alpha L_{P'}}{2}\right) \quad \text{(III.10)}$$

$$E_0' = \frac{-700}{\cosh\left(\frac{6,19 \cdot 10^{-5} \times 2,4 \times 10^4}{2}\right)} = 42,135mV$$

III.8 .9 Détermination l'intensité de courant soutiré par poste :

$$I = 2 E_0' \sinh(\alpha LP^2/2)/\gamma \tag{III.11}$$

$$I = 2E_0' \sinh\left(\frac{\alpha L_P^2}{2}\right) / \gamma$$

$$I = \frac{2 \times 42,135 \times \sinh\left(\frac{6,19 \cdot 10^{-5} \times 2,4 \times 10^4}{2}\right)}{5,97 \cdot 10^{-2}} = 17,63 \times 10^3 mA = 17,63A$$

III.8 .10 Dimensionnement des anodes (déversoirs)

Hypothèse de calcul

- La durée de vie prévue est de 25 ans
- Caractéristique du transformateur redresseur 50 V /50 A.
- Les anodes utilisées sont en Ferro-silicium :
- La résistivité du sol : $\rho = 114,08\Omega m$
- Consommation : 0.3 Kg/A.an
- Densité de courant admissible : 0.2 A/dm².
- La masse de l'anode : 22.7 Kg²
- La longueur de l'anode : 1.524 m
- Le diamètre de l'anode : 10.16 cm.
- D : diamètre déversoir « anode + backfill » = 0,4 m
- Le potentiel au point de soutirage : $E_{sout} = -1.35 V$
- La résistance caractéristique $\gamma = 0.122 \Omega$.

III.8 .11 Calcul du déversoir

Calcul de R_d (résistance du déversoir):

- Courant débité par le poste à t = 25 ans : $I_{tott} = 17,63A$

La tension d'utilisation du poste est limitée à 70% de sa capacité, soit 35 V

$$U_{tot} = R_{tot} \times I_{tot} + E_{sout} \tag{III. 12}$$

$$U_{tot} = 35V , I_{tot} = 17,63A , E_{sout} = -1,35V$$

Donc:

$$R_{tot} = (U_{tot} - E_{sout})/I_{tot}$$

$$R_{tot} = (35 - (-1,35))/17,63A$$

$$R_{tot} = 2,06\Omega.$$

Tel que:

R_{cable} :Résistance du câble qui lie l'anode avec le poste de soutirage

$$R_{\text{c\^ab\le}} = \rho \left(\frac{L}{s} \right)$$

O\^u :

ρ : la r\^esistivit\^e du cuivre = $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$;

L : longueur du c\^ab\le positif + n\^egatif= 300 m ;

s : section du c\^ab\le = 50 mm²

$$R_{\text{c\^ab\le}} = 1,7 \cdot 10^{-8} (300 / (50 \cdot 10^{-6}))$$

$$R_{\text{c\^ab\le}} = 0,102 \Omega$$

R_{pipe} : la r\^esistance caract\^eristique de pipe : $\gamma = 0,122 \Omega$

Donc :

$$R_{\text{deversoir}} = R_{\text{tot}} - R_{\text{c\^ab\le}} - R_{\text{pipe}}$$

$$R_{\text{deversoir}} = 2,02 - 0,102 - 0,122 = 1,79 \Omega$$

Donc la valeur de la r\^esistance du d\^eversoir doit \^etre limit\^ee \^a $1,79 \Omega$

Calcul de la masse anodique du d\^eversoir.

Masse de Ferro-silicium minimal pour assurer la dur\^ee de vie :

M_t = la consommation du m\^etal (Kg/A ans) $\times t \times I_{\text{tot}}$

M_t : La masse totale de Ferro-silicium n\^ecessaire pour les 25 ans.

I_{tot} : Intensit\^e du courant n\^ecessaire pour les 25 ans

$$M_t = 0,3 \text{ (Kg/A ans)} \cdot 25 \text{ ans} \cdot 17,63 \text{ A}$$

$$M_t = 132,22 \text{ Kg}$$

Ce qui correspond \^a un nombre minimal d'anodes \^egale \^a :

$$N_a = M_t / M_a$$

$$N_a = 132,22 / 22,7$$

$$N_a = 5,82 \text{ donc } \approx 6 \text{ anodes}$$

Les r\^esultats de dimensionnement sont donn\^es sous forme de tableau :

Tableau(III.5):r\^esultats de dimensionnement.

La variation de la r\^esistance d'isolement du rev\^etement R_t	$R_t = 3080,48 \Omega \cdot m^2$
Le nombre de postes N_P	$N_P = 16 \text{ poste}$
La port\^ee (L_P') d'un poste	$L_P' = 3,159 \text{ m}$
La chute de potentiel aux extr\^emit\^es (E_0')	$E_0' = 461,35 \text{ mv}$
l'intensit\^e de courant soutir\^e par poste	$I = 17,63 \text{ A}$
Le nombre d'anodes N_a	$N_a = 6 \text{ anodes}$

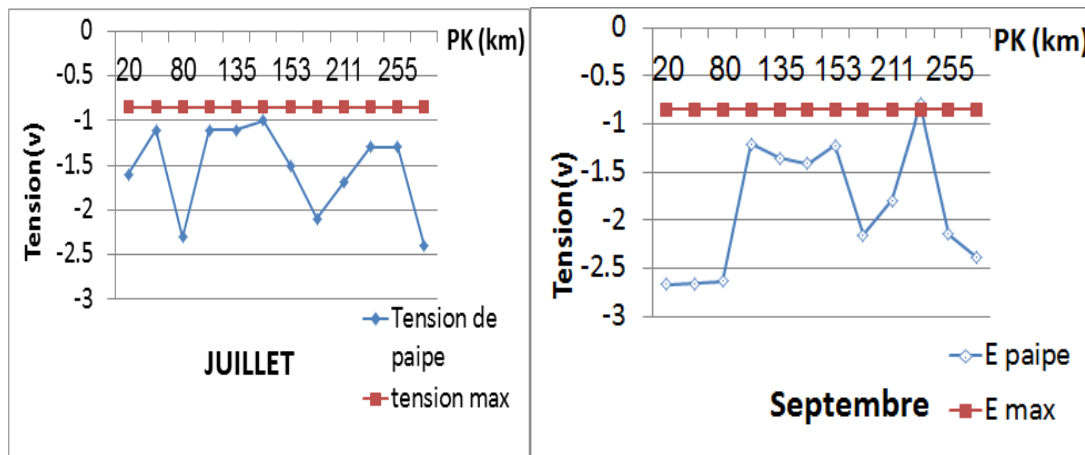
III.9 Evaluation de l'efficacité de protection cathodique :

La ligne du transport (gazoduc SP8) a une longueur de 280 km et est recouverte d'une couche de protection passive, afin d'assurer la protection continue de la ligne d'exportation nous avons procédé à l'installation des mesures de potentiel entre l'anode et la cathode (structure à protéger) pour différents mois de l'année

Tableau(III.6): mesure de potentiel

P K (km) Mois	20	39	80	120	135	143	153	172	211	232	255	270
JUILLET	-1.6	-1.1	-2.3	-1.1	-1.1	-1	-1.7	-2.1	-1.7	-1.3	-1.3	-2.4
SEPTEMBRE	-2.67	-2.65	-2.63	-1.21	-1.3	-1.41	-1.22	-2.15	-1.79	-0.79	-2.148	-2.37
DECEMBRE	-1.62	-1.93	-2.5	-1.24	-1.31	-1.213	-1.02	-1.013	1.22-	-1.4	-1.7	-2
AVRIL	-2.94	-1.5	-2.34	-1.13	-1.32	-1.55	-1.16	-2.2	-2.23	-1.45	-2.02	-2.98

III.9.1 Représentation graphique de la mesure de potentiel



[a]

[b]

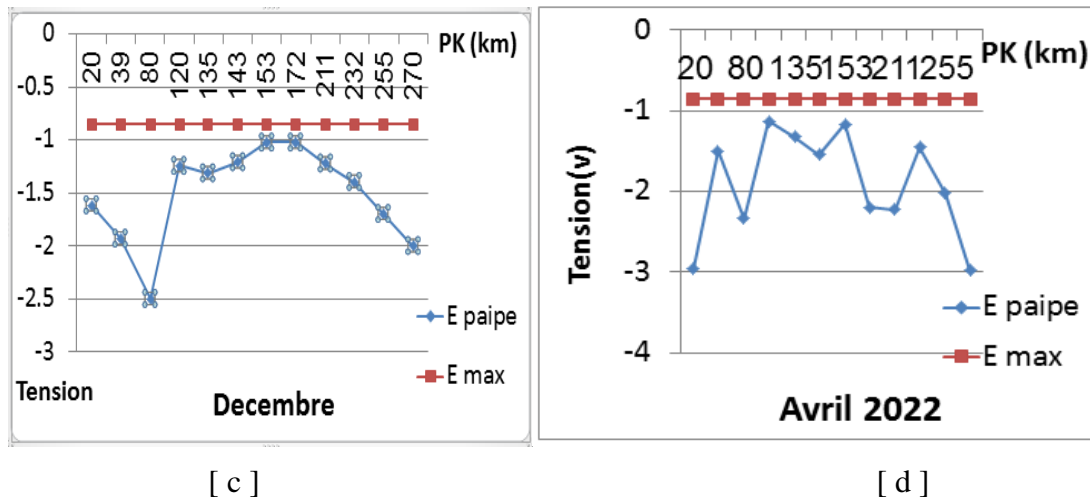


Figure (III.13) [a.b.c.d] : Relevés de potentiel en fonction longueur du gazoduc

D'après les résultats de mesure nous avons constaté que la protection de toutes les. Les points des lignes exposées à la mesure sont dans les normes de potentiel de protection c'est-à-dire les potentiels mesurés sont inférieurs au niveau de potentiel requis égal au moins à -850 mv cela est montré dans la représentation graphique par la distribution du potentiel de protection le long de la structure donc la maîtrise de la distribution du potentiel, qui doit être maintenue le long de la conduite à un niveau de protection minimum, passe nécessairement par le contrôle strict d'un nombre de paramètres caractéristique à la fois du milieu, de l'environnement et des outils de protection utilisés. La nature du sol, la nuance du matériau du pipeline et le type de revêtement.

III.10 maintenance de la ligne de pipeline

III.10.1 Les inspections de poste de soutirage:

Les installations de soutirage de courant doivent être soumises à des inspections a moins deux fois par mois au cours desquelles les opérations ci-après doivent être effectuées:

- Relevé de l'intensité du courant débité
- Relevé de la tension de sortie du redresseur
- Mesure du potentiel de la conduite par rapport au sol, à l'aide d'un millivoltmètre et l'électrode de référence de sulfate de cuivre Cu/CuSO₄
- Vérification par la mesure à l'aide d'un multimètre (une fois par mois)

- Le bon serrage des connexions
- Le bon réglage du débit du poste (Hiver-été)~80%(Rendement)
- Relevé de la consommation électrique (kW/h).

III.10.2 Prise de potentiel:

C'est un moyen qui nous permet d'accéder à la conduite pour relever le potentiel de celle-ci. La mesure du potentiel est faite à l'aide d'une électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre Cu/CuSO₄ et d'un voltmètre à forte résistance interne. En pratique lors des mesures, l'électrode de référence sera placée au niveau du sol à l'endroit de la pipe après avoir humidifié celle-ci. Il est important de vérifier la connexion des câbles de mesure de l'appareil : le plus (+) de l'appareil doit être relié à l'électrode et le moins (-) doit être relié à la conduite

.L'entretien de la prise de potentielle se fera par:

- Vérification de l'isolement des câbles conducteurs par rapport aux corps de la prise de potentiel
- Le maintien propre de la borne de mesure de la prise de potentielle
- Le graissage des boulons de couvercle de la prise de potentiel

Raccordisolant La vérification de l'efficacité du raccordisolant se fera par les mesures suivantes:

- ✓ Potentiel shunté
- ✓ Potentiel amont et aval dé shunté
- ✓ Mesure de l'intensité du courant traversant le shunt.

Tableau(III.7):la maintenance de poste soutirage.

01	Installation hors Service	Déclenchement disjoncteur	*Réenclencher le disjoncteur
02	Pas de tension de secteur au Redresseur	Fusible défectueux	*Remplacer les fusibles
03	Absence du courant de protection ou courant de protection trop Faible	Rupture de câble de liaison ou de contacts	*Mesurer la résistance conduite/anodes. *Localiser le défaut de câbles *Vérifier les bornes de connexions
		Résistance d'anodes très Elevées	*Augmenter la tension du redresseur ou installer une autre anode déversoir *Vérifier les connexions d'anode
04	Courant de protection trop important	Baisse de la résistance d'anode due à l'humidité du sol(Généralité hiver)	*Modifier légèrement le réglage du redresseur de manière à débiter le courant nécessaire de protection
		Contact avec d'autres canalisations étrangères non protégées	*Localiser les points de contacts et éliminer la cause du défaut sur la canalisation
05	Pas de potentiel de protection	Rupture du câble de Liaison	*Mesurer la résistance des câbles de liaison(anodes conduites etc.)
		Résistance élevée des Anodes	*Réajuster la tension du redresseur et vérifier l'installation d'anode
		Augmentation encourant protecteur due aux contacts métalliques Avec structures Etrangères	*Localiser le défaut et éliminer les contacts métalliques avec les structures étrangères
06	Pas de réglage de potentiel	Redresseur défaillant	*Vérifier le réglage des instruments de mesure *Vérifier la présence de la tension alternative aux bornes du redresseur et le remplacer

Tableau(III.8) :L'inspection de la protection cathodique ligne et postes de soutirage

Mesure du potentiel en marche	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure du potentiels conduite/sol ;mesure des courants de protection.
Relevés résistivité Du sol	Deux fois par an	<ul style="list-style-type: none"> • L'opération se fera le printemps et automne ;cette Opération sera renouvelée chaque cinq an.
Mesure du potentiel ON/OFF	Chaque six Mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure du potentiels conduite/sol ;mesure Des courants de protection
Mesure du potentiel et le courant pour anodes réactives Protection provisoire	Tous les trois mois	<ul style="list-style-type: none"> • L'opération se fera le printemps et automne. • Mesure du potentiel de l'anode seule • Mesure du potentiel de la conduite seul • Mesure du potentiel de la conduite et anode reliée. • Mesure du débit de l'anode.
Mesure de la résistance d'isolement du Joint isolant	Chaque Mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure du potentiel à l'amont du joint isolant • Mesure du potentiel à l'a aval du joint isolant.
Mesure du potentiel Tube gaine	Chaque trois mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure du potentiel de l'anode seule (protection de la gaine). • Mesure du potentiel de la gaine seule • Mesure du potentiel de l'anode et la gaine shunté. • Mesure du potentiel de la gaine et de la conduite.
Mesure au niveau des postes de soutirage	Chaque Quatre mois et à chaque orage	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure le courant de sortie du poste. • Mesuré la tension de sortie du poste. • Relevé de la consommation d'énergie du poste. • Contrôle de serrage des prises.
Mesure des résistances des prises de terre, déversoirs et poste de soutirage du courant	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mise à la terre du poste de transformation • Mise à la terre du poste de soutirage • Mise à la terre du poste des ouvrages concentrés (vanne). • Mesure de résistance des déversoir set des prises de terre. • Vérification de la connexion des câbles
Prise des mesures ampérométrique (PMA ou PPA)	Chaque 06mois	<ul style="list-style-type: none"> • S'assurer de la bonne protection cathodique de la pipe. • Vérification de la consommation du courant • Détection d'éventuelles fuites de courant.

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à la protection cathodique des structures métalliques enterrées dans le sol on a abordé la corrosion du gazoduc SP8 au niveau de la station de Djamaa SP1

Les canalisations de transport d'hydrocarbure dont le matériau constitutif est l'acier est protégé par des revêtements externe (revêtement organique) est associé à un système actif de protection cathodique dont le potentiel est maintenu à $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$.

Afin de maintenir la structure métallique dans son domaine d'immunité, il est nécessaire de surveiller régulièrement les facteurs influant tel que : le potentiel, les paramètres du sol sur lequel est disposé le gazoduc, le courant de protection et le nombre des anodes utilisés pour assurer la protection

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique du gazoduc SP8 par courant imposé et par anode sacrificielle nous a permis de connaitre le nombre d'anode nécessaire pour protéger toute la surface extérieur de ce dernier.

La mesure de potentiel le long du gazoduc à l'aide de l'électrode de référence de sulfate de cuivre Cu/CuSO_4 a montré que nous avons obtenu une valeur différente à celle de seuil de protection de l'acier qui est de $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$ mais comme cette valeur mesuré est inférieur à -850 mV la structure est toujours protégée, les valeurs de potentiel très négatifs peuvent entrainer une détérioration du revêtement.

En perspectives, pour aboutir aux meilleurs résultats, une protection par anode sera mise en place c'est à- dire mettre une seul anode chaque 2 km du gazoduc est recommandée pour la protection par courant imposé le nombre d'anode utilisées égale à 6 celle-ci permet une protection totale de gazoduc avec le suivie du programme de la maintenance du système de protection cathodique par une bonne surveillance et contrôle des dispositifs de protection et cathodique et assurer leur fonctionnement pour une longue durée En dernier nous recommandons que :

- La protection des pipes contre la corrosion est très importante de point de vue économique et environnemental.
- L'utilisation de l'énergie photovoltaïque comme une source électrique pour la protection cathodique des pipes par courant imposé est une nécessité impérieuse surtout dans les régions sahariennes. isolées sans réseaux électriques conventionnels

bibliographique

- [1] **Marec**, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.
- [2] **D. Bouzidi**, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [3] **D S. CHOUICHA** Cours résume corrosion 3 MCP
- [4] Matériaux Métalliques - Phénomènes de Corrosion.
- [5] Guide pratique de protection cathodique, édition TECHNIP
- [6] SP10-05-E-501-1-PROTECTION CATHODIQUE-PROVISOIRE.
- [7] **LAMOUR ABDELKADIR**-Contribution à la protection cathodique de pipelines
- [8] **Séminaire** de la protection cathodique, service protection cathodique/RTO,.
- [9] Document de STT (établie par la station de traitement des tubes).
- [10] **ISO 15589**, Petroleum and Natural gas industries — Cathodic protection of pipelinetrans portation system — Part 1 November 2003. Part 2 mai 2004.
- [11] **NACE Standard TM0497** Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systeme2002.
- [12] **M. Ghellai** Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL.
- [13] **NF EN 13509** Techniques de mesures applicables en protection cathodique octobre2003.
- [14] **RL.Bianchetti**, Control of pipeline corrosion, Nace International, Texas, 2nd edition,(2001)
- [15] **ABDELLI feriel** Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure.
- [16] **MARIF Abdelhakim** Etude sur la méthode de maintenance par protection cathodique-Cas de la ligne de pipeline GZ1 40.