

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET LE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des sciences appliquées
Département de Génie des Procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies.

Filière : Génie des procédés.

Spécialité : Génie chimique.

Présenté par :

MEDJOUJJA RIMA RAYANE

Thème :

**Protection cathodique pour une conduite de gaz en
acier**

Soutenu publiquement le : **JUIN 2024**

Devant le jury composé de :

Mme ZOUBIDI NAWAL	MCA (UKMO Ouargla)	Présidente
Mme TIMEDJEGHDINE MEBARKA	MCB(UKMO Ouargla)	Examinatrice
Mme GUERDOUH AMEL	MCB (UKMO Ouargla)	Encadreur
Mr. GUENFOUD SALAH		Co-Encadreur
Mme. MEDJDOUB BERKAHOUM		Co-Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je remercie Allah, le Très Haut qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais remercier ma famille pour tout le soutien moral et matériel qu'elle m'a apporté.

Pour commencer, je tiens à remercier profondément Mme A.Guerdouh qui m'a honoré en acceptant de superviser ce travail et qui m'a aidé à le mener à bien.

De plus, je voudrais remercier Monsieur Salah et Mme B. Majdoub, qui m'ont guidé, assisté et ont fait preuve de patience avec moi dans la réalisation de ce travail, ainsi que tous les employés.

Je tiens à remercier tous les membres de jury pour avoir accepté de présider et D'examiner ce travail.

Je remercie nos enseignants du département génie des procédés l'université

KASDI MERBAH OUARGLA

Je remercie tous ceux qui nous ont tendu une main secourable, des prés ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parant ; À ma mère qui m'a éclairé le chemin et qui a toujours été côtés, me soutenant tout au long de ma vie, et à mon père qui a sacrifié pour me voir devenir ce que je suis maintenant.

Et aux précieuses soirées avec mes soirées avec mes sœurs et mon soutien dans cette vie.

Et à tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin.

Résumé

Cette étude vise à protéger les gazoducs en acier par le système de protection cathodique de la compagnie Sonelgaz de Touggourt, ces moyens étant notamment les plus susceptibles à la corrosion. L'étude comprend une partie théorique et une partie pratique, où nous avons abordé dans la partie pratique la protection de ces structures utilisant la protection cathodique par courant imposé, basée sur la mesure des potentiels entre les pipelines enterrés et le sol durant les trois mois (février, mars, avril), où la valeur ne doit pas dépasser -850 millivolts par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄.

Pendant le mois d'avril, il a été observé que les potentiels ont dépassé la valeur limite, ce qui est dû aux fortes pluies survenues en avril, comme le démontrent les résultats obtenus pour les points de mesure PP 11 et PP 12.

Mots clés : corrosion , protection cathodique , conduite en acier , potentiel.

ملخص

هدف من هذه الدراسة هو حماية خطوط الأنابيب الغازية الفولاذية من خلال استخدام نظام الحماية الكاثودية الخاص بشركة سونلغاز تقرت، حيث يُعد هذا النظام من بين الطرق الأكثر عرضة للتآكل. تضمنت الدراسة جانبين، نظري وتطبيقي، حيث تناولنا في الجزء التطبيقي استخدام الحماية الكاثودية عبر التيار الإجباري، الذي يعتمد على قياس الجهد بين خطوط الأنابيب المدفونة والأرض خلال ثلاثة أشهر (فبراير، مارس، أبريل)، والتي يجب أن لا تتجاوز القيمة -850 ميلي فولت مقارنة بالقطب المرجعي المرجعي Cu/CuSO₄.

خلال شهر أبريل، تم تجاوز القيمة المحددة بسبب الأمطار الغزيرة التي سقطت خلال ذلك الشهر، كما يظهر من النتائج التي تم الحصول عليها لنقاط القياس PP 1 و PP 11.

الكلمات المفتاحية : تآكل ، الحماية الكاثودية ، انبوب فولاذي ، الامكانات .

Abstract

This study aims to protect steel gas pipelines using the cathodic protection system of Sonelgaz Company in Touggourt, as these means are particularly prone to corrosion. The study consists of a theoretical part and a practical part, where in the practical part, we addressed the protection of these structures using cathodic protection by imposed current, based on measuring the potentials between the buried pipelines and the soil over three months (February, March, April), where the value should not exceed -850 millivolts compared to the Cu/CuSO₄ reference electrode.

During the month of April, it was observed that the potentials exceeded the limit value, which was due to heavy rains in April, as demonstrated by the results obtained for the measurement points PP 11 and PP 12.

Keywords: corrosion , cathodic protection , steel pipe , potential

Lise des tableaux

Tableau I.1: types de canalisation de gaz en Sonelgaz.	8
Tableau II .1: Facteurs de la corrosion.....	Error! Bookmark not defined.
Tableau III.1 : : Critère du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736 Tiré de Nace (2007).....	34
Tableau III.2 : crêtées du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN 30676 Tiré de NACE (2007).....	34
Tableau III.3: les valeurs de la résistance d'isolement Par rapport type de conduite	39
Tableau III.4 : Comparaison des éléments de systèmes P.C Tiré de Nguyen-Thuy (2008).	41
Tableau IV.1: mesure de l'intensité et la tension.....	46
Tableau IV.2 : mesure de potentiel(1)	47
Tableau IV.3 : mesure de potentiel (2)	49

Liste des figures

Figure I.1: Carte des gazoducs traversant le Sahara et la méditerranée.....	3
Figure I.2: Les régions de distribution en Alger	5
Figure I.3 : Les Filiales du groupe sonelgaz	6
Figure II.1: Corrosion chimique.....	12
Figure II.2: Corrosion bactérienne.	13
Figure II .3 : Corrosion électrochimique.....	13
Figure II .4 : Schéma de la cellule de corrosion.....	14
Figure II.5 : Branchement en cuivre sur canalisation acier.....	16
Figure II.6 : Corrosion par aération différentielle	17
Figure II.7: Effet d'EVANS ou aération différentielle	17
Figure II.8: Pile géologique.	18
Figure II.9: Courant vagabonds.	19
Figure II.10 : corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée.	20
Figure II.11: Diagramme de Pourbaix du fer.	22
Figure II.12: corrosion uniforme.....	24
Figure II.13: Corrosion localisées	24
Figure II. 14: corrosion par piqûres.	25
Figure II.15 : corrosion intergranulaire.....	25
Figure II.16 : corrosion sélective des tuyaux en laiton.	25
Figure II.17 : corrosion sous contrainte.	26
Figure II.18 : corrosion caverneuse.....	26
Figure II.19 : corrosion galvanique.....	27
Figure II.20 : Echelle galvanique des métaux	28
Figure II.21 : corrosion par aération différentielle.....	29
Figure III.1 : Anode de Magnésium.....	38
Figure III.2 : Système de protection par anode galvanique.	36
Figure III.3 : Système de protection par courant imposé.....	37
Figure IV.1: conduite gaz en acier par revêtement.	43
Figure IV.2 :Méthode de mesures de potentiels de la protection cathodique	44
Figure IV.3 : Poste soutirage -redresseur.....	45
Figure IV.4 : Electrode Sulfate de cuivre	45
Figure IV.5: Appareil de voltmètre.....	46

Figure IV.6 : Prise potentiel.....	47
Figure IV.7 : un diagramme de la différence de potentiel dans les mois (février, mars, avril	51
Figure IV.8: un diagramme de la différence de potentiel dans les mois (octobre, novembre, décembre, janvier)	53
Figure IV.9 : Courbe $R\rho_s = f$	53

Liste des abréviations

Nace : National Association of corrosion Engineers

PP :Prise Potentiel

BT : Basse tension

Cu/CuSO₄ : cuivre /sulfate de cuivre

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumé / ملخص / Abstrat

Lise des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1.Introduction.....	3
I.2. Historique de Sonelgaz	3
I.2.1 Création d'EGA	3
I.2.2 Dissolution d'EGA et Création de Sonelgaz	4
I.2.3 Le tournant de la première restructuration	4
I.2.4 Sonelgaz devient EPIC.....	5
I.2.5 Le Groupe industriel Sonelgaz est né	5
I.2.6 Le Groupe Industriel Sonelgaz est né	5
I.2.7 Parachèvement de la restructuration, le renouveau.....	6
I.3. Organisation.....	6
I.4. Exploitation et distribution du gaz.....	7
I.5. Transport du gaz	7
I.6. Les types de canalisation en installation de gaz	8
I.6.1 Les canalisation en polyéthylène(PE ou Plymouth)	8

Chapitre II

La corrosion et les moyens de protection

II.1. Introduction	11
II.2.Définition	12
II.3. Processus de la corrosion	12
II.3.1 Corrosion chimique (ou corrosion sèche).....	12

II. 3.2 Corrosion bactérienne.....	12
II.3.3 Corrosion électrochimique (ou corrosion humide).....	13
II.3.3.1.anode	14
II.3.3.2.cathode	14
II.3.3.3.electrolyte.....	14
II.3.3.4.connexion électrique	14
II.3.3.5.différence de potentiel.....	14
II.4.Aspect économique de la corrosion.....	14
II.5.Les facteurs influençant de la corrosion.....	15
II.6.Corrosion des ouvrages enterrés.....	16
II.6.1.Couple galvanique	16
II.6.2.Hétérogénéité de la matière	17
II.6.3.Hétérogénéité de la l'électrolyte	17
II.6.3.1.Aération différentielle ou Effet EVANS.....	17
II.6.3.2.Piles géologiques.....	18
II.6.4.Corrosion bactérienne	18
II.6.5.Corrosion par courant vagabonds	18
II.7.Mécanisme de la corrosion.....	20
II.7.1. Principe de la corrosion électrochimique	20
II.7.2.Potentiel d'électrode des métaux	21
II.7.3.Diagrammes de Pourbaix.....	21
II.8.Corrosion par les sols	23
II.8.1.Mécanismes et morphologie de la corrosion par les sols	23
II.8.1.1.Corrosion des aciers en milieu aqueux	23
II.8.1.2.Corrosion des aciers en milieu sol	23
II.9.Les formes de corrosion	24
II.9.1.Corrosion uniforme.....	23
II.9.2.Corrosion localisées.....	24
II.9.2.1.Corrosion par piqures.....	24
II.9.2.2.Corrosion intergranulaire	25
II.9.2.3Corrosion Sélective	25
II.9.2.4.Corrosion sous contrainte.....	26
II.9.2.5.Corrosion caverneuse	26
II.9.2.6.Corrosion galvanique	26
II.9.2.7.Corrosion par frottement.....	27

II.9.2.8. Corrosion par aération différentielle	27
II.10. Moyens de protection contre la corrosion	29
II.10.1. Le Choix du matériau	29
II.10.2. La protection par revêtement (Passive)	28
II.10.2.1. Le Revêtement métallique	28
II.10.2.2. Le Revêtement organique	30
II.10.3. La protection électrochimique (active)	30
II.10.3.1. Protection anodique	30
II.10.3.2. Protection cathodique	30
II.10.3. Protection par inhibiteur	31

Chapitre III

La protection cathodique

III.1. Introduction	33
III.2. Définition	33
III.3. Historique	33
III.4. Principe	34
III.5. Critère de protection cathodique	34
III.6. Facteurs affectant la validité des critères	35
III.6.1. Température	35
III.6.2. Bactérie Sulfate réductrice	35
III.6.3. Courant alternatif	35
III.6.4. Type métal	35
III.6.5. Métaux dissimilaires	37
III.6.6. Découlement de revêtement	37
III.7. Systèmes de protection cathodique	35
III.7.1. Protection par l'anode sacrificielle (ou galvanique)	35
III.7.1.1. Principe	35
III.7.2. Protection par courant imposé	36
III.7.2.1. Principe	36
III.7.3. Une installation de soutirage comprend	37
III.7.4. Essai de protection cathodique	37
III.7.4.1. essai pour déterminer le courant de protection	37
III.7.5. Détermination de la valeur moyenne d'isolement	38
III.7.6. Estimation	38
III.7.7. Différents techniques de protection cathodique	39

III.7.7.1 Soutirage de courant	39
III.7.7.1.1. Principe :	39
III.7.7.1.2. Constitution de l'installation	39
III.7.7.1.3. Champ d'application du soutirage	40
III.7.7.1.4. Choix de l'emplacement du poste de soutirage	40

Chapitre IV

Résultat et discussion

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Présentation de l'ouvrage à protéger	46
IV.2.1. Mode opératoire	47
IV.2.2. Méthode de mesure	47
IV.3. Appareillage utilisé	48
IV.3.1. Source d'énergie	48
IV.3.2. Les câbles de liaison	47
IV.3.3. Electrode Cu/CuSO ₄	46
IV.3.4. Appariel de voltmètre	49
IV.4. Résultats et discussion	49
IV.4.1.1. Analyse le résultat	48
IV.4.1. Mesures à l'aide d'un redresseur	49
IV.4.2. Mesure du potentiel	47
IV.5. Analyse le résultat.....	51
IV.6. Calcul (protection par soutirage)	54
IV.6.1. Calcul de la résistance longitudinale de la conduite	54
IV.6.2. Calcul de la résistance transversale de la conduite	54
IV.6.3. Calcul du coefficient d'atténuation	54
IV.6.4. Détermination du poids du rail.....	55
IV.6.5. Détermination de la longueur du rail	55
IV.6.6. Calcul de la résistance de terre d'un déversoir.....	55

Conclusion générale



Introduction générale

Le gaz est devenu un élément essentiel de notre vie quotidienne, étant donné qu'il constitue une composante centrale et une colonne vertébrale de l'économie mondiale. La société Sonelgaz assure la distribution de gaz via des conduites en acier, qui sont les moyens de transport les plus utilisés en raison de leur flexibilité, de leur rapidité de mouvement et de leur capacité à transporter les gaz de manière continue sur des dizaines de kilomètres, tout en garantissant la livraison de ces matières au centre de consommation rapidement de mouvement et à moindre coût ; cependant, ces conduites sont exposés à de nombreux risques, notamment la corrosion.

La corrosion est un processus naturel et inévitable qui affecte toute structure métallique. Elle est causée par des réactions chimiques ou électrochimiques entre les matériaux métalliques et leur environnement, entraînant la dégradation des conduites métalliques et pouvant causer des risques graves tels que des fuites et des explosions. Des mesures de maintenance et de prévention régulières sont donc nécessaires pour limiter les effets négatifs de ce phénomène. Pour faire face à ces défis plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour protéger les conduites contre la corrosion, y compris l'application de revêtements protecteurs, la protection cathodique et l'utilisation de matériaux anti-corrosion. De plus, la conception et la maintenance appropriées des systèmes jouent un rôle important dans l'allongement de la durée de vie des conduites en acier et dans la préservation de la sécurité des installations et des personnes.

La protection cathodique est l'une des méthodes d'ingénierie et des techniques les plus courantes et économiques largement utilisées dans l'industrie du pétrole et du gaz pour protéger les pipelines contre la corrosion ou pour réduire leur corrosion dans les environnements corrosifs. Cela inclut l'application de revêtements protecteurs en réduisant leur potentiel, et vise à empêcher la corrosion ou à minimiser ses effets secondaires et les pertes conséquentes. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées en protection cathodique par anodes galvaniques ou sacrificielles par le couplage de la structure à protéger avec des anodes galvaniques à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium ; et la deuxième méthode est la protection cathodique par courant imposé, qui est réalisée par un courant cathodique s'écoulant de l'électrode positive vers la structure à protéger, suffisant pour réduire le potentiel du métal en tout point sur la surface.

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

Chapitre I : présentation de l'entreprise

Chapitre II : la corrosion et les moyens de protection

Chapitre III : La Protection cathodique

Chapitre IV : Concerne la partie pratique à laquelle nous nous sommes consacrés concernait la mesure des potentiels pour protéger les lignes gazoducs contre le courant imposé dans le réseau.



Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1.Introduction

SONELGAZ Société Nationale de l'Electricité et du **Gaz**, Est un groupe industriel énergétique algérien, spécialisé dans la production, la distribution et la commercialisation de gaz naturel.

Elle est créée le 28 juillet 1969, en remplacement de l'entité précédente Electricité et gaz d'Algérie (EGA), et on lui a donné un monopole de la distribution et de la vente de gaz naturel dans le pays, de même pour la production, la distribution, l'importation, et l'exportation d'électricité. En 2002, le décret présidentiel N° 02-195, la convertit en une société par actions SPA entièrement détenue par l'Etat.

➤ En 2008, elle est dégroupée en quatre sociétés lesquelles

SDC : Société de Distribution Centre **SDA** : Société de Distribution Alger

SDE : Société de Distribution Est **SDO** : Société de Distribution Ouest

En 2017, et par fusion de ces dernières sociétés (**SDC,SDA,SDE** et **SDO**), se crée la Société algérienne de distribution de l'électricité et du gaz (**SADEG**) [1].



Figure I.1: Carte des gazoducs traversant le Sahara et la méditerranée

I.2. Historique de Sonelgaz

I.2.1 Création d'EGA

Au début du 20^{ème} Siècle, le secteur de l'électricité, était constitué de concessions aux mains d'entreprises coloniales.

L'adoption de la loi N°46-628 du 8 avril 1946 en France métropolitaine, instaurant la nationalisation des entreprises privées d'électricité et du gaz existantes à l'époque, consacra la création d'EGA (Electricité et Gaz d'Algérie) par décret N°47-1002 du 5 juin 1947.

L'Algérie disposait alors d'un réseau électrique de faible capacité relevant d'un modèle économique colonial, destiné aux domaines agricoles coloniaux, à de petites industries, à l'éclairage, aux besoins

domestiques, à quelques industries alimentaires (moulins, confiseries, semouleries) et industries diverses comme les industries extractives, les chemins de fer et les transports électrifiés (tramways) [1].

I.2.2 Dissolution d'EGA et Création de Sonelgaz

En rupture avec l'héritage colonial et afin de répondre à des choix politiques et économiques, l'année 1969 consacra la dissolution d'EGA et sa substitution par la création de SONELGAZ (Société Nationale de l'Electricité et du Gaz), par ordonnance N°69-59 du 28 Juillet 1969.

A la nouvelle entreprise est confié le monopole de la Production, le Transport, la Distribution, l'importation et l'exportation de l'électricité, ainsi que celui de la distribution et de la vente de gaz naturel dans le pays.

De taille déjà respectable, Sonelgaz entamait une nouvelle ère avec un effectif de 6 000 agents pour desservir 700 000 clients. Avec un taux d'électricité de 40%, elle disposait de 626 MW de puissance électrique installée, alimentant 665 000 clients BT, 3180 clients MT et 08 clients HT, ainsi que d'un réseau de transport gaz de 575 Km et d'un réseau de distribution gaz de 1 590 Km alimentant 168 032 foyers.

L'essor économique et le développement industriel du pays, sa croissance démographique, l'élévation du niveau de vie de la population, allaient propulser, Sonelgaz, durant ses 50 premières années et l'ancrer au statut de Groupe industriel de premier rang, d'envergure internationale.

Ainsi, elle compte aujourd'hui plus de 90 000 agents, dessert 9 184 962 clients électricité et 5 267 105 clients gaz ; dispose de 19 868 MW de puissance électrique installée, de 29 543 Km de lignes HT/THT et de 149 742 Km de lignes HTA, 179 292 Km de ligne BT, ainsi qu'un réseau de transport Gaz HP de 21 329 Km et un réseau de distribution gaz BP de 100 268 Km [1].

I.2.3 Le tournant de la première restructuration

En 1983, quatorze ans après sa naissance, Sonelgaz opère une première restructuration. Elle donnera le jour à cinq filiales dédiées aux travaux spécialisés et à une entité de fabrication : KAHRIF (électricité rurale), KAHRABIK (infrastructures et installations électriques), KANAGHAZ (réalisation des réseaux gaz), INERGA (Génie Civil), ETTERKIB (montage industriel), et AMC (fabrication des compteurs et appareils de mesure et de contrôle).

Le choix de ce modèle, (Maison-mère et Filiales), allait conféré à Sonelgaz de nouvelles capacités de déploiement et de gestion de ses projets.

Ce système d'organisation et de management a permis aux nouvelles sociétés de jouer un rôle prépondérant dans la réalisation des infrastructures électriques et gazières. Il devient alors le précurseur du mode actuel de fonctionnement : autonomie de gestion et réactivité dans un environnement dynamique constant [1].

I.2.4 Sonelgaz devient EPIC

Par le décret exécutif N° 95-280 du 17 septembre 1995, la Sonelgaz devient Etablissement public à caractère Industriel et Commercial (EPIC),...placée sous tutelle du Ministère chargé de l'Energie et des Mines. Dotée de la personnalité morale tout en jouissant de l'autonomie financière, elle est régie par les règles de droit public dans ses relations avec l'Etat et réputé commerçant dans ses rapports avec les tiers. Le même décret à la Sonelgaz la mission de service public [1].

I.2.5 Le Groupe industriel Sonelgaz est né

Par le Décret présidentiel N°02-195 du 01 juin 2002, Sonelgaz devient Société Algérienne de l'Electricité et du Gaz, une Société par Actions (SPA). Elle est régie par les dispositions de la loi relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations et par les dispositions du code de commerce .Ce statut lui donne de l'énergie et possibilité d'élargir ses activités à d'autres domaines relevant du secteur de l'énergie et aussi d'intervenir à l'international [1].

I.2.6 Le Groupe industriel Sonelgaz est né

En 2004, Sonelgaz se hisse en tête de liste des investisseurs nationaux et s'impose comme un acteur incontournable du développement national avec en perspective :

Devenir un catalyseur d'investissements nationaux et étrangers dans le secteur national de l'énergie. En conséquence, elle adopte une organisation de Groupe industriel par la transformation en filiales de ses entités en charge des matière de base : - production d'Electricité (SPE), Transport d'Electricité (GRTE) , Conduite du Système Electrique (SO),Transport du Gaz (GRTG), Distribution de l'Electricité et du Gaz d'Alger (SDA) , du Centre (SDC) , de l'Est (SDE) et enfin de l'Ouest(SDO) [1].

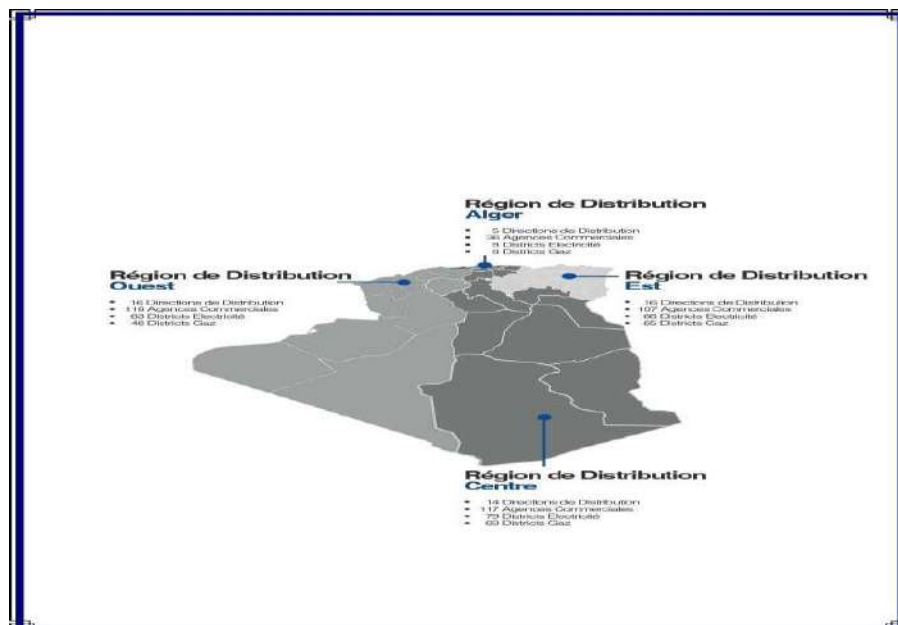


Figure I.2: Les régions de distribution en Alger

I.2.7 Parachèvement de la restructuration, le renouveau

Entre 2007 et 2009, toujours dans un souci d'accentuer ses performances, Sonelgaz adopte une nouvelle organisation. Celle-ci aboutit à un Groupe comptant 33 filiales et 6 Société en participation directe. Avec l'ouverture de l'institut de formation en Electricité et Gaz (IFEG) en 2007, ainsi que la création des sociétés d'engineering , des systèmes d'information et de la gestion immobilière (CEEG, ELIT & SOPIEG) et l'intégration de la société Rouïba Eclairage en 2009, il parachève sa transformation en une Holding de sociétés déterminée à développer et renforcer ses infrastructures électriques et gazières . La dynamique d'investissement que le Groupe va connaître concernera sans exception tous les métiers et toutes les zones géographiques du territoire Nationale [1].

I.3. Organisation

La Sonelgaz est organisé en groupe industriel constitué de 39 filiales et cinq sociétés en participation exerçant des métiers de bases, travaux ,périphériques.

Parmi ces filiales :

- La Société de production de l'électricité (SPE),
- Sharikat takat el moutajadida,
- La Société de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG),
- La Société de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE),
- La Société de gestion du réseau de transport gaz (GRTG),
- l'Opérateur système électrique (OS), chargée de la conduite du système de production et de transport de l'électricité.
- La Société algérienne de distribution de l'électricité et du gaz (SADEG).

Il y a aussi kahrif, kahrabik, Etterkib, Inerga et kanaghaz, qui sont spécialisées dans le domaine de la réalisation des infrastructures énergétiques (engineering ,montage industriel, réalisation de réseaux....) [2].



Figure I.3 : Les Filiales du groupe sonelgaz

I.4. Exploitation et distribution du gaz

Afin de l'extraction, la séparation et le traitement du gaz par Sonatrach, la société GRTG transporté le méthane (CH_4) sous pression de 70 bars vers les postes détente où elle ajoute la substance THT (TétraHydroThiophéne) à gaz pour le donner une odeur pour qu'il soit facile à détecter en cas de fuite.

Le SADEG fait les études préliminaires suivantes avant la distribution aux consommateurs :

- Compter le nombre de consommateurs et de matériaux nécessaires.
- Nomination d'un entrepreneur / contrôleur des travaux pour superviser les travaux (forage, installation des tubesetc.).
- Faire des essais primaires ; s'il ya un défaut, les travaux de l'entrepreneur sont annulés. S'il n'y a pas défaut, les réseaux sont alimentés en gaz à partir des postes détente sous pression de 4 bars [2].



I.5. Transport du gaz

Le transport du gaz consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution. Le réseau de transport du gaz est souvent comparé à une autoroute car il est constitué de grands axes alors que les réseaux de distribution sont composés d'axes plus courts acheminant le gaz directement chez le consommateur.

- Il existe deux moyens complémentaires pour transporter le gaz efficacement :
 - **La transformation en gaz naturel liquéfié(GNL) :** transporter du gaz sur de très grandes distances. Lorsque le transport par gazoduc est trop couteux ou impossible (ex : traverser l'océan Atlantique), le gaz est liquéfié puis acheminé par navire méthanier vers les zones de consommation.
 - **Les gazoducs :** ce sont des canalisations capables de transporter sur de longues distances du gaz sous pression. Ils peuvent être terrestres ou sous-marins. Le réseau de gazoducs est aujourd'hui dense : il permet d'acheminer rapidement et efficacement le gaz vers les zones de forte demande ;

Et fait de : (cuivre, fonte, acier)

Les méthodes de transport du gaz par gazoducs ou sous forme liquide reposent sur des techniques différentes. Une fois à destination, ces navires ne peuvent pas être amarrés sur les cotes. Ils réception

du GNL .Ce dernier est regazéifié avant d'être acheminé par conduites depuis le terminal jusqu'aux réseaux de distribution [2].

I.6. Les types de canalisation en installation de gaz

Il existe donc des exigences normatives quant aux canalisations d'une installation d'une chaudière gaz, concernant le matériau, sa fabrication mais également sa disposition à transporter du gaz. Les canalisations de Cuivre sont les plus utilisées pour transporter le gaz .Et pour cause, il s'agit d'un matériau très pratique et facile d'emploi :

- Il est résistant.
 - Il est facilement malléable.
 - Il est apte pour tous les types d'installation, qu'elles soient simples ou plus complexes.
- Le cuivre peut être utilisé dans toutes les parties d'installation : en élévation, incorporées au bâtiment ou entrées.

I.6.1.Les canalisations en polyéthylène (PE ou Plymouth) :

Les tubes de polyéthylène pour gaz sont des tubes de plastique, de couleur noire et repérables grâce à un filet jaune, contrairement au polyéthylène pour l'eau dont le filet est bleu.

Ce type de canalisation est utilisé pour des parties d'installation enterrées, mais il est également possible de l'installer en élévation sous certaines conditions.

Il est à noter que l'installation de tuyauteries en polyéthylène possède quelques exigences dont il faut tenir compte :

-les tubes de polyéthylène sont sensibles aux UV et ne peuvent donc être exposés directement à la lumière [2].

- Ils diffèrent en termes de diamètre et en termes de métal, selon la localisation du réseau [2].

Tableau I.1: types de canalisation de gaz en Sonelgaz.

les types de tube de gaz	Acier	PE Polyéthylène	Cuivre
Diamètre	50mm	40mm	
	100mm	63mm	20mm
	200mm	125mm	40mm
	300mm	200mm	63 mm
			250mm



Chapitre II

La corrosion et les moyens de protection

II.1. Introduction

Le gaz est transporté à travers des gazoducs, qui sont des tuyaux en acier enterrés ; Ils sont le moyen de transport du gaz le plus utilisé car ils sont fiables et rentables. Cependant, il est sensible à la corrosion dans la production pétrolière et gazière est souvent considérée comme le problème le plus traité au monde aujourd'hui. La plupart des pipelines de transport de produits pétroliers et des réservoirs souffrent de corrosion, ce qui provoque leurs dommages. Et la qualité des métaux utilisés dans ces industries pétrolières, ce qui demande beaucoup de temps et d'efforts pour leur traitement, ce qui coûte des millions de dollars chaque année.

La détérioration par corrosion des structures métalliques enterrées est due au contact direct de ces structures avec l'environnement. La détérioration par corrosion externe dans les canalisations enterrées est due à la formation des cellules de corrosion (c'est-à-dire des cellules à oxygène) entre la structure métallique et le sol.

On estime que, pour ce qui concerne l'acier 10 à 20 % de la production mondiale seraient détruits chaque année par la corrosion si l'on n'y prenait garde.

La corrosion est la détérioration des matériaux par interaction physico-chimique avec leur environnement, entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, etc.). Les mécanismes mis en jeu sont divers et conduisent à des formes différentes de corrosion.

Les dommages due à la corrosion sont une réalité dans ce type de systèmes. ces dommages, physiquement observable sous forme de dommages localisés, évoluent avec le défaut des systèmes de pipelines. Selon des études antérieures, la corrosion est l'une des principales causes de ruptures de canalisations avec une durée moyenne d'apparition de 0,2 an et le type de dommage le plus courant est la corrosion externe.

Pour préserver l'intégrité externe, les systèmes de pipelines sont conçus et construits avec des systèmes de protection physique (revêtement) et cathodique courant imposé ou anodes sacrificielles). Dans cette partie, nous présenterons le phénomène de corrosion et son effet sur les structures métalliques enterrées, les facteurs qui l'influencent, les types de corrosion et les moyens de la prévenir.

II.2. Définition

De façon générale la corrosion est souvent définie comme la dégradation d'un matériau ou d'une structure par réaction chimique ou physicochimique avec le milieu qui l'environne. C'est une attaque spontanée, non désirée, On peut définir écrit-il, la corrosion comme étant la détérioration d'une structure métallique commençant en surface et se propageant éventuellement au sein de la structure. Une telle dégradation résulte de causes externes.

la corrosion est une réaction interraciale irréversible d'un matériau avec son environnement [3].

La corrosion peut être définie comme un phénomène de destruction de la surface d'un métal ou d'un alliage par des agents chimique et /ou phénomène électrique. La corrosion est une réaction interfaciale d'un matériau d'une composante de l'environnement [4].

II.3. Processus de la corrosion

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

II.3.1 Corrosion chimique (ou corrosion sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (métal) et une phase liquide ou gazeuse (électrolyte). Le plupart du temps, il s'agit de l'oxydation des métaux par les gaz à haute température, donc nous parlons de corrosion sèche. Le gaz considéré est souvent de l'oxygène mais d'autres gaz tel que : Cl_2 , Br_2 , SO_2 ou H_2S doivent aussi être pris en considération. Ce type de corrosion se produit principalement au niveau Des fours, des chaudières et des turbines à gaz [5].

Au cours de cette corrosion l'oxydation du métal et réduction de l'oxydant se produisent en un seul acte [6].

Exemple :

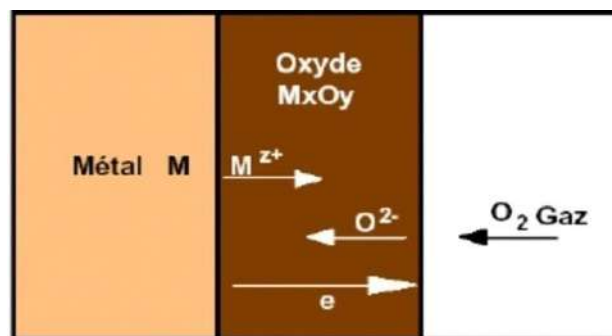
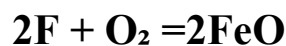


Figure II.1: Corrosion chimique.

II.3.2 Corrosion bactérienne

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme, en jouant un rôle clé, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions adéquates pour sa création (exemple : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries). Lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau, elles créent ce que l'on appelle alors un biofilm [4].



Figure II.2: Corrosion bactérienne.

II.3.3 Corrosion électrochimique (ou corrosion humide)

la corrosion électrochimique, appelé encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent . Elle n réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxyde.

La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur

(H_2O , O_2 , H_2 ,... etc.), sans celui –ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau est correspond à une réaction d'oxydoréduction, dont :

La réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique»,

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

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables [4].

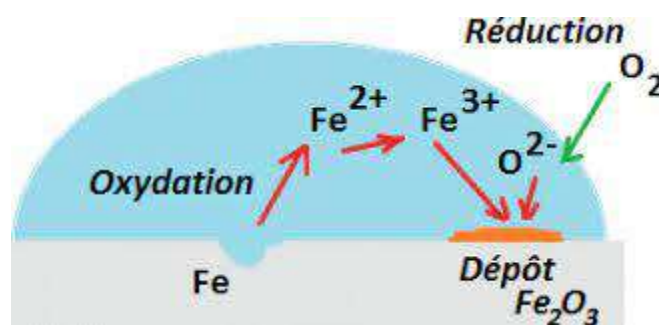


Figure II .3 : Corrosion électrochimique.

La corrosion est due à la formation de cellules électrochimiques. Pour que la réaction de corrosion se produise, cinq choses nécessaires. Si l'un de ces facteurs est éliminé, la corrosion ne se produira pas. c'est la clé du contrôle de la corrosion; les facteurs nécessaires pour que la corrosion se produise sont :

II.3.3.1.anode: le métal ou l'endroit sur le métal où se produit l'oxydation (perte d'électrons). L'anode a un potentiel plus négatif par rapport à (par rapport) à la cathode et est qualifiée de moins noble par rapport à la cathode.

II.3.3.2.cathode : le métal ou l'endroit sur le métal où se produit la réduction (gain d'électrons). La cathode a un potentiel plus positif par rapport à l'anode et la cathode.

II.3.3.3.électrolyte : le milieu électriquement conducteur dans lequel résident l'anode et la cathode.

II.3.3.4.connexion électrique : l'anode et la cathode doivent être connectées électriquement.

II.3.3.5.différence de potentiel : une différence de tension doit exister entre l'anode et la cathode [6].

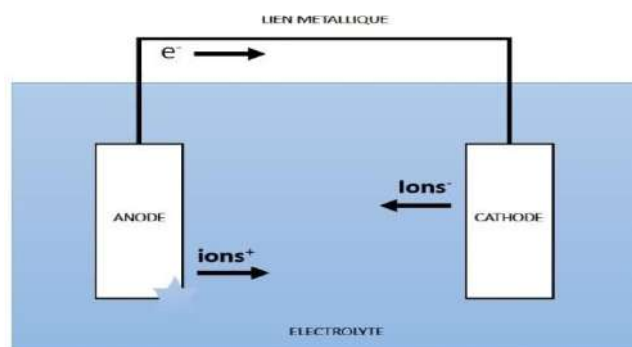


Figure II .4 : Schéma de la cellule de corrosion.

II.4.Aspect économique de la corrosion

La corrosion a un impact économique et environnemental considérable sur pratiquement toutes les facettes des infrastructures mondiales, depuis les autoroutes les ponts et les bâtiments jusqu'au pétrole et au gaz, en passant par le traitement des eaux usées [7].

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

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

La diversité des coûts rend toute estimation des charges économiques dues à la corrosion difficile et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés [4].

II.5.Les facteurs influençant de la corrosion

La corrosion de l'acier dans le sol se ramène à un phénomène électrochimique, elle dépend d'une part de l'agressivité propre du sol dans lequel la canalisation est posée, d'autre part l'existence des phénomènes d'électrolyse liés à la nature de produit transporté.

Les problèmes les plus importants posés par la corrosion dans les puits et conduites en acier sont causés par des substances chimiques conduisant à une acidification de l'eau contenue dans le brut ou le gaz naturel. Les principaux facteurs conférant à l'eau (sol) agressivité [8].

Peuvent être classés en quatre groupes principaux sont :

- Facteurs définissant les modes d'attaque,
- Facteurs métallurgiques,
- Facteurs définissant les conditions d'emploi,
- Facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

La corrosion dépend d'un très grand nombre de facteurs dont nous avons dressé une liste (Tab.1) [9].

Tableau II .1: Facteurs de la corrosion.

Facteurs définissant le réactif	Facteurs définissant le métal ou l'alliage	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-concentration	-composition chimique	-état de surface	-vieillessement
-teneur en oxygène	-procédé d'élaboration	-forme des pièces	-tensions mécaniques
-pH	-impuretés	-sollicitations mécaniques	-température
-additions d'inhibiteurs	-traitements thermiques	-emploi d'inhibiteurs	-modification des revêtements protecteurs
-température	-traitements mécaniques	-procédés d'assemblage	
-pression	-additions protectrices		

II.6. Corrosion des ouvrages enterrés

Pour comprendre les caractéristiques distinctives du processus de corrosion dans les installations SONELGAZ, nous les avons classées selon leurs causes comme suit :

II.6.1. Couple galvanique

Un couple galvanique se forme lorsque deux métaux de natures différentes sont reliés électriquement et plongés dans le même électrolyte. Cela crée une pile galvanique où l'un des métaux est attaqué. Le métal ayant le potentiel le plus négatif devient l'anode et se corrode, tandis que l'autre métal devient la cathode et est protégé. Ce phénomène est courant dans les systèmes de distribution de gaz en acier, où les raccords sont en cuivre, conduisant à la corrosion de l'acier.

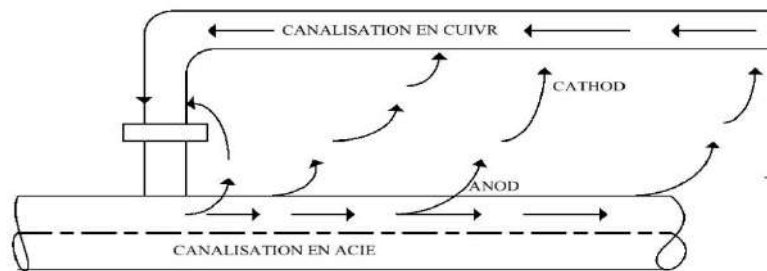


Figure II.5 : Branchement en cuivre sur canalisation acier.

II.6.2. Hétérogénéité de la matière

En milieu aqueux il existe toujours un manque d'homogénéité spatiale à l'interface métal-électrolyte du fait des fluctuations moléculaires au sein de la double couche. Selon les conditions, cette hétérogénéité peut s'amplifier et conduire à des vitesses d'attaque différentes selon les zones considérées.

Le manque d'homogénéité spatiale à l'interface métal-électrolyte provoque plusieurs formes de corrosion localisée [10].

II.6.3. Hétérogénéité de la l'électrolyte

II.6.3.1. Aération différentielle ou Effet EVANS

Ce phénomène a été étudié par EVANS qui a démontré que les concentrations différents d'oxygène en étaient responsables. Dans les zones aérées l'oxygénation se fait aisément (cathode), et la demi-réaction de réduction peut s'écrire :



Dans les zones, l'oxygène pénètre mal (cathode) et la demi-réaction d'oxydation du fer est :



Les électrons vont de l'anode à la cathode à travers le métal, tandis que les ions ferreux partent de la zone anodique vers électrolyte.

Exemples:

- ✓ Cas d'un défaut de revêtement ;

- ✓ Corrosion de la génératrice inférieure d'une conduite posé sur un fond de fouille constitué de terre vierge (non remué), alors que remblai est constitué de la même terre mais plus aérée car elle est remuée. Pour éviter ce phénomène les conduites doivent être posées sur un lit de sable [11].

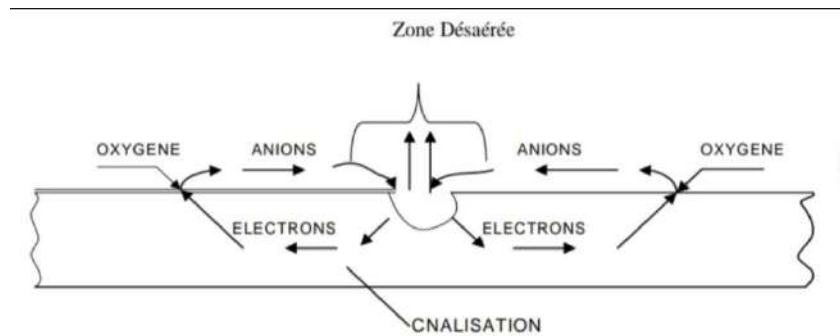


Figure II.6 : Corrosion par aération différentielle

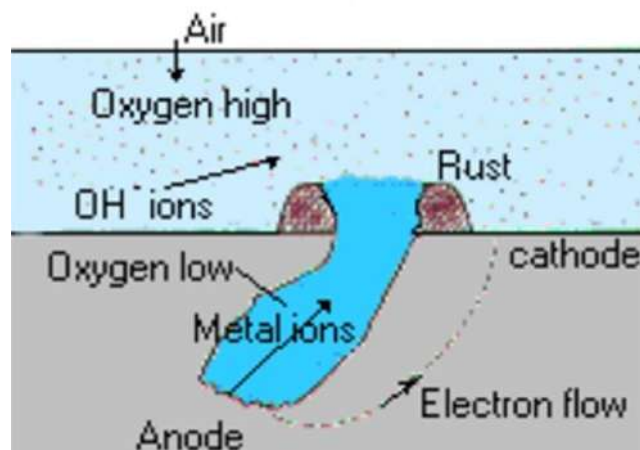


Figure II.7: Effet d'EVANS ou aération différentielle

II.6.3.2. Piles géologiques

Une conduite enterrée dans un terrain bien défini, prend par rapport à ce terrain un potentiel bien déterminé. Le potentiel pour un métal donné varie suivant les électrolytes. En pratique, il est fréquent que la conduite rencontre des terrains de nature très différente ; elle y prendra donc des potentiels locaux différents, ce qui provoque la formation de piles géologiques dont les zones anodiques seront celles où le métal présentera le potentiel le plus négatif

L'importance de la corrosion étant fonction du rapport des surfaces anodiques et cathodiques, elle sera d'autant plus rapide que la zone cathodique est importante par rapport à la zone anodique [11].

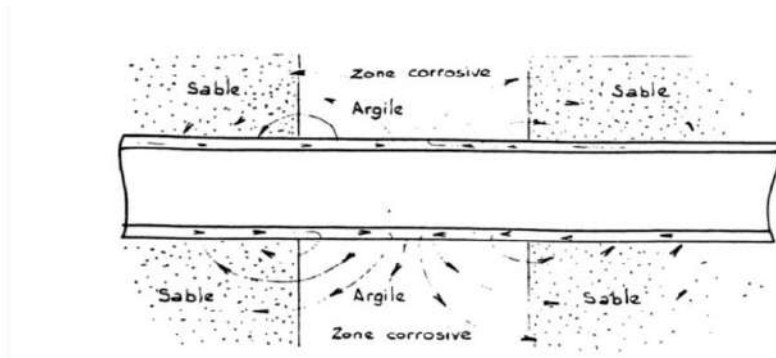


Figure II.8: Pile géologique.

II.6.4. Corrosion bactérienne

Cela se produit de la manière suivante : le courant électrique provenant d'une centrale électrique à continu ou d'une autre source d'alimentation atteint le consommateur (par exemple un locomotive) à travers un rail ou un fil suspendu. Le courant traversant le consommateur est complété par un rail de retour relié à la terre [12].

Dans certains terrains, il peut y avoir des bactéries qui attaquent les métaux par le processus chimique et électrochimique, c'est souvent la principale cause des cas d'attaques relativement rapides que l'on a pu constater sur les structures métalliques, de même pour la fonte dont la corrosion s'est traduite généralement par *la graphitisation, parmi ces bactéries on trouve :

Des bactéries sulfatoréductrices responsable de la corrosion en milieu anaérobie.

Elles réduisent les sulfates en sulfures;

Des sulfobactéries dont le rôle est d'oxyder le soufre (formé par d'autres bactéries) en sulfates ;

Des ferrobactéries qui transforment les ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+} , ces dernières sont aérobies, par contre les sulfatoréductrices sont anaérobies et se rencontrent dans les milieux riches en sulfate, pauvres en oxygène comme certains argileux ou vase compactes ou des sols noyés par une nappe stagnante anaérobie. En plus elles profilèrent dans des conditions de $PH= 5,5$ à $8,5$ (au-delà de ces limites elles sont quasiment inactives), et température $T= 30\text{ C}^\circ$ à 50 C° [11].

II.6.5. Corrosion par courant vagabonds

Les courants vagabonds créent toujours des phénomènes de corrosion électrique très violents et rapides. Ces courants sont dus à des fuites provenant d'installation en courant continu mal isolées par rapport au sol. Ils sont particulièrement fréquents aux abords des lignes à traction électrique (métro, train électrifié etc.....).

En effet le courant de traction est amené à la motrice par des conducteurs aériens et le retour s'effectue par le rail jusqu'à la sous station. Une fraction plus ou moins importante du courant de retour peut pénétrer dans le sol, en dérivation du circuit constitué par le rail. Le courant dans le sol peut emprunter des ouvrages métalliques enterrés avoisinants pour revenir aux rails généralement dans la zone proche

de sous stations. La circulation de courant dans le sol conduit à la formation de deux cellules électrolyses :

Rail /Sol/Conduite	c'est le rail qui se corrode.
Conduite /Sol /Rail	c'est la conduite qui se corrode.

Dans le premier cas c'est le rail qui se corrode, le second phénomène se produit au droit de la sous station, la conduite a le potentiel positif par rapport au sol et dans cette zone, elle est le siège de sortie de courants donc de corrosion.

Dans le deuxième cas c'est la conduite qui se corrode [11].

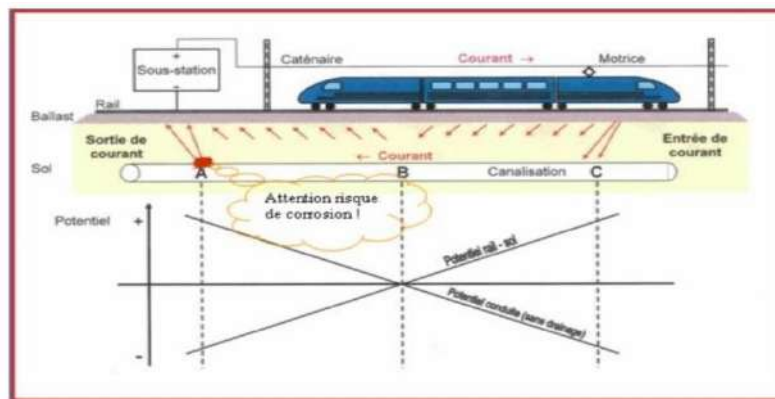
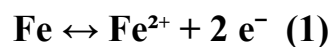


Figure II.9: Courant vagabonds.

II.7.Mécanisme de la corrosion

II.7.1. Principe de la corrosion électrochimique

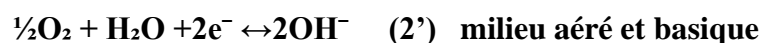
La corrosion d'un métal comme le fer est la résultante d'un processus qui peut être schématisé par l'équation suivante :



Cette équation signifie simplement que les atomes du métal (Fe) sous l'action d'un processus de corrosion se transforment en ions positifs (Fe^{2+}) qui quittent le métal pour passer dans le milieu.

Il y a changement d'état de la matière lié à la réaction de dissolution du métal. Ce changement d'état s'accompagne de la libération d'électrons (2e^- dans le cas du fer).

La conservation de la neutralité du milieu impose que les électrons émis par la réaction de dissolution (1) soient consommés dans une deuxième réaction qui peut être par exemple :



La deuxième réaction (2 et 2') est liée à la nature du milieu avec lequel le matériau est en contact (électrolyte). Cette réaction s'agit de la décomposition du milieu.

Lors d'un processus de corrosion, la surface du matériau est donc nécessairement le siège de deux réactions :

Réaction de dissolution ou d'oxydation (réaction anodique) ; la réaction de décomposition du milieu : « réduction » (réaction cathodique).

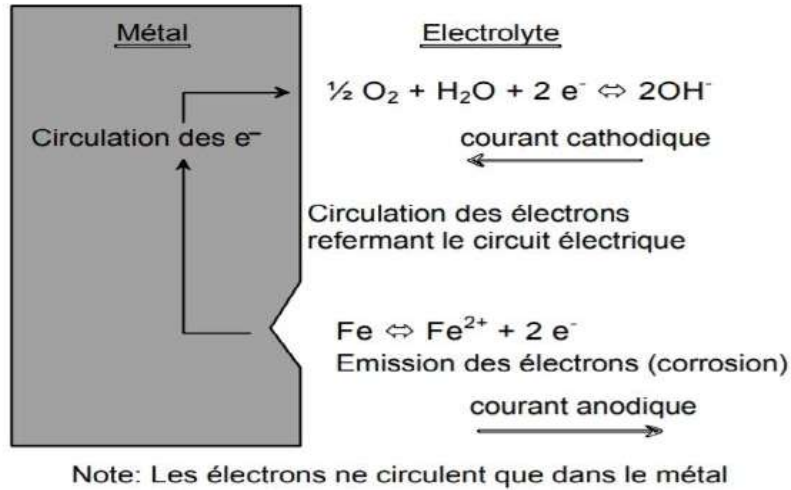


Figure II.10 : corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée.

Le processus de corrosion, superposition des réactions anodiques et cathodiques, s'accompagne de la circulation d'un courant électrique (circulation d'électrons dans le métal et d'ions dans l'électrolyte) entre les deux zones de l'interface.

Les électrons libérés par l'anode (libération d'un ion Fe^{2+} en solution) sont consommés par le processus cathodique. Pour ce faire, les électrons circulent dans le métal de l'anode vers la cathode dont le potentiel électrique est supérieur à celui de l'anode.

Pour qu'un processus de corrosion se déclenche, il faut donc :

Une surface métallique comportant des zones anodiques des zones cathodiques, donc des hétérogénéités de potentiel ; un électrolyte assurant le transport des ions afin de refermer le circuit électrique pour permettre la circulation des électrons. L'électrolyte est assurée par le milieu (sol immergé, eau...).

« Lorsque la corrosion est généralisée, les différents points de la surface du métal sont successivement cathodiques et anodiques et la perte d'épaisseur.

II.7.2. Potentiel d'électrode des métaux

Lorsque la corrosion est généralisée, les différents points de la surface du métal sont successivement cathodiques et anodiques et la perte d'épaisseur est globalement uniforme. Dans ce cas, la vitesse de corrosion peut être évaluée, par exemple, par la mesure de l'épaisseur ou de la perte du poids permettant ainsi d'estimer la durée de vie de la pièce concernée. Exemple de corrosion généralisée : enrouillement de l'acier dans les environnements naturels

A la différence de la corrosion généralisée, les corrosions localisées proviennent de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, pour des raisons d'hétérogénéité dans le métal (défauts du métal) ou dans l'électrolyte. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible (insuffisance de la protection par anodes sacrificielles

Les échanges de courant électrique à l'interface métal-électrolyte sont régis par des différences de potentiel. A chaque réaction chimique correspond un potentiel dit d'électrode qui peut être déterminé par l'équation de Nernst :

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{ared}{aox}$$

$$\leftrightarrow E = E^{\circ} + \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln \frac{aox}{ared}$$

Où :

- E° correspond au potentiel standard (ou normal) de la réaction électrochimique. Par convention, le potentiel standard de la réaction :



Est pris égal à zéro. L'électrode standard à hydrogène constitue l'électrode officielle de mesure des potentiels d'électrode.

- **R** est la constante des gaz parfaits, égale à 8,314570 J.K-1.mol-1
- **T** est la température en Kelvin
- **a** est l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur (généralement égale à la concentration)
- **F** est la constante de Faraday, égale à 96 485 C.mol⁻¹ = 1 F
- **n** est le nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction
- **[ox]** est la concentration de l'oxydant
- **[red]** est la concentration du réducteur

II.7.3.Diagrammes de Pourbaix

Les diagrammes de Pourbaix, aussi appelés diagrammes potentiel-[pH], indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément. Ils sont construits à partir de données thermodynamiques. La figure donne l'exemple d'un diagramme simplifié de Pourbaix du fer.

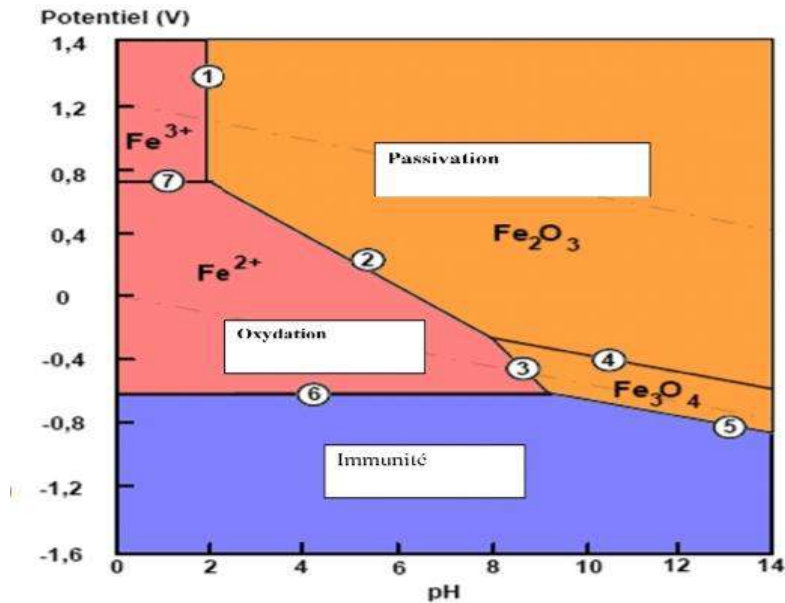


Figure II.11: Diagramme de Pourbaix du fer.

Selon le diagramme de la figure 2, le fer peut se trouver dans trois états thermodynamiques suivant son potentiel et le pH de la solution dans laquelle il est immergé :

- **Passivation thermodynamique** s'il se trouve dans les domaines de stabilité des hydroxydes ferreux ou ferrique (Fe_2O_3);
- **Activité ou corrosion** dans les domaines de stabilité des ions ferreux et ferrique (Fe^{3+} , Fe^{2+} et HFe vers les pH extrêmes);
- **Immunité** dans le domaine du diagramme correspondant à la stabilité du fer (Fe) [12].

II.8. Corrosion par les sols

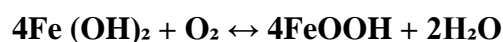
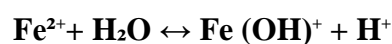
La corrosion des métaux par les sols est presque exclusivement de nature électrochimique. Elle résulte donc essentiellement de la mise en contact du matériau métallique avec l'électrolyte du sol.

Le milieu sol est en fait un milieu hétérogène par excellence, qui est constitué de trois phases distinctes : solide, liquide et gazeuse [3].

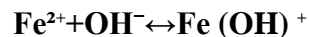
II.8.1. Mécanismes et morphologie de la corrosion par les sols

II.8.1.1. Corrosion des aciers en milieu aqueux

Les mécanismes à la base de la corrosion des aciers ordinaires non ou faiblement alliés en solution aqueuse aérée, les solutions aqueuses pouvant générer les plus typiquement des corrosions actives sont les solutions de sels (neutres) d'acides fortes et de bases fortes (typiquement les sels alcalins NaCl , Na_2SO_4). Pour ces chercheurs,



Notons que, du fait de l'équilibre ionique de l'eau, les deux réactions d'hydrolyse des ions ferreux peuvent tout aussi bien s'écrire :



La protection de la couche de produits de corrosion observée dépendrait fondamentalement du lieu où se produit la réaction de précipitation de l'hydroxyde ferreux.

II.8.1.2. Corrosion des aciers en milieu sol

Dans les sols, l'accessibilité de l'oxygène dissous à la surface de l'acier va dépendre de la teneur en eau et de la capacité de drainage du milieu. On pourra distinguer typiquement des sols bien aérés et pour lesquels la proportion d'eau est le plus souvent faible et les sols relativement engorgés faiblement aérés, pour lesquels la proportion d'eau est en permanence proche de la saturation. Une troisième catégorie sera constituée des sols qui offrent des variations saisonnières importantes de teneur en eau avec, par exemple, des alternances marquées de phase «humides» et de phases «sèches».

Dans le premier cas, les films d'eau présents à la surface du métal sont minces et la vitesse de diffusion de l'oxygène dissous peut être élevée, même s'il n'y a pas de mouvement de convection important de la phase aqueuse. L'attaque corrosive est dans ce cas en général faible du fait de la formation d'un film «protecteur», cf. Dans le second cas, l'arrivée de l'oxygène dissous à la surface de l'acier est au contraire assez ralentie et la vitesse d'attaque est également faible, mais dans ce cas par manque d'accessibilité de l'oxygène dissous.

Dans la troisième situation, l'on peut obtenir souvent des vitesses d'attaque nettement supérieures aux deux cas précédents, du fait que pendant les phases transitoires entre les phases humides et sèches, il se produit des attaques rapides de l'acier et que, malgré la présence d'une forte disponibilité d'oxygène, il ne se forme pas dans ces conditions de films protecteurs stables comme dans le premier cas [3].

II.9. Les formes de corrosion

Si les processus élémentaires de la corrosion métallique humide sont toujours les mêmes, la morphologie de l'attaque peut prendre des métal-électrolyte et, éventuellement, de l'interaction d'autres phénomènes (électriques, mécaniques, biologiques....) avec la corrosion. Le classement suivant peut en être donné [13].

II.9.1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est le type de corrosion le plus important et également appelée corrosion généralisée. Parce que le type le plus souvent uniforme la corrosion s'est produite. En corrosion uniforme, une substance corrosive donne une répartition uniforme du taux de corrosion dans l'ensemble Surface métallique et réduit l'épaisseur de la densité du métal. C'est la liaison électrique de deux électrodes infiniment compatibles qui permet de manquer l'effet ohmique de la résistance

électrolytique en raison à la similitude spatiale des deux électrodes. Ici l'ion ferreux est converti en oxyde ferrique donné par la surface en raison du maintien de l'équilibre de la réaction de surface du métal. La corrosion localisée (par opposition à la corrosion générale) se propage rapidement et observé dans des zones locales spécifiques de métaux. Divers les modes de corrosion localisée se différencient par les piqûres, les crevasses, intergranulaire, galvanique [14].

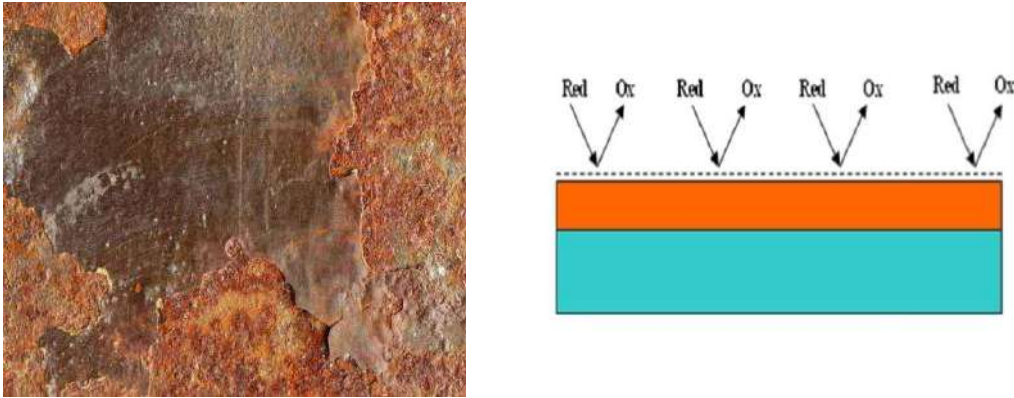


Figure II.12: corrosion uniforme.

II.9.2. Corrosion localisées

Elles proviennent de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, pour des raisons d'hétérogénéité dans le métal ou dans l'électrolyte. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible [13].

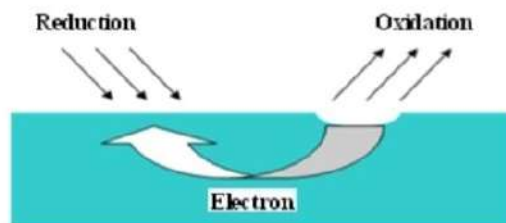


Figure II.13: Corrosion localisées

II.9.2.1. Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est une forme localisée de corrosion et elle se produit dans régions distinctes des métaux et prend beaucoup de temps à sortir. Il est induit par des trous profonds et des cavités d'une zone spécifique d'ion métallique et c'est la corrosion la plus dangereuse par rapport aux autres en tant que suite à l'identification et à la réparation, la corrosion par piqûre devient progressivement gênante. La population microbienne est la principale raison pour la corrosion par piqûres qui s'est accumulée (à maintes reprises) obligatoire) le seul endroit précis où il mène aux stands. Les piqûres la corrosion provoque d'abord un film passif qui commence la rupture de l'oxyde et la teneur en chlorure est élevée à faible vitesse et stagnante conditions [14].



Figure II. 14: corrosion par piqûres.

II.9.2.2. Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques sensibilisés à chaud par précipitation du carbure de chrome aux joints des grains; [13].



Figure II.15 : corrosion intergranulaire.

II.9.2.3 Corrosion Sélective

Comme son nom l'indique (en anglais dealloying ou sélective leaching), ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si l'alliage est homogène, ou de l'une de ses phases si l'alliage est polyphasé [3].

Les corrosions sélectives, touchant la phase la moins noble de la structure métallurgique (graphitisation des fontes grises, dezincification des laitons, désaluminisation des cupro – aluminiums, etc.) [13].



Figure II.16 : corrosion sélective des tuyaux en laiton.

II.9.2.4. Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte (CSC) est un mode d'endommagement des matériaux qui repose sur un couplage entre une microstructure, un environnement chimique (et physique) et un état de contraintes ; elle se traduit par une fissuration du matériau qui, par un certain nombre de caractéristiques, se différencie d'une rupture mécanique pure [15].

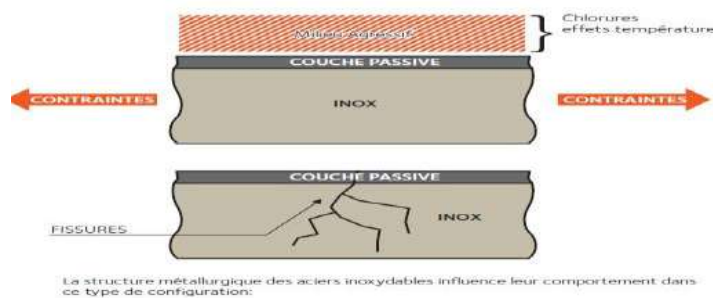


Figure II.17 : corrosion sous contrainte.

II.9.2.5. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est également appelée corrosion par dépôt et elle est une des formes localisées de corrosion. Cela s'est produit dans une crevasse et zones confinées en raison de la présence d'une concentration différente des constituants chimiques et des facteurs environnementaux (oxygène, pH la teneur est plus élevée) qui conduit à la fracturation du métal [14].

La corrosion caverneuse des aciers inoxydables en milieux chlorurés, procède d'un phénomène plus complexe, mais se traduit aussi par une attaque préférentielle des zones où le milieu est le moins renouvelé (sous les dépôts, dans les recoins, sous les joints, etc.) [13].



Figure II.18 : corrosion caverneuse.

II.9.2.6. Corrosion galvanique

Corrosion Galvanique, corrosion accélérée du métal noble lorsqu'il est couplé à un ou plusieurs autres métaux. Les métaux les plus nobles sont protégés de la corrosion par cette action [16].

La corrosion galvanique, ou bimétallique, qui se traduit par l'accélération de la corrosion du métal le moins noble quand celui-ci est en continuité électrique avec un métal plus noble, exposé au même électrolyte [13].



Figure II.19 : corrosion galvanique.

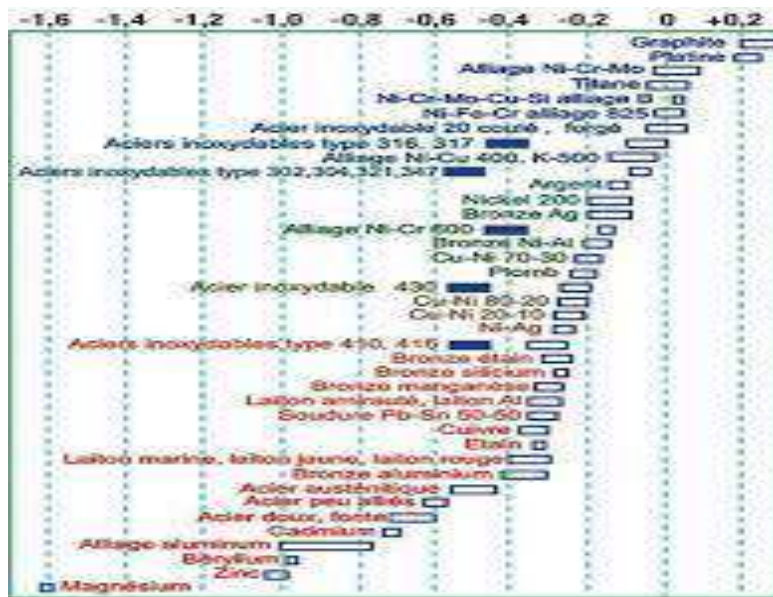


Figure II.20 : Echelle galvanique des métaux.

II.9.2.7. 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 [17].

II.9.2.8. Corrosion par aération différentielle

La corrosion par aération différentielle se produit lorsqu'un même matériau est en contact avec deux milieux de teneurs en oxydant différentielle.

La corrosion par aération différentielle se produit lorsqu'un même matériau est en contact avec deux milieux de teneurs en oxydant différentes. Par exemple, si un piquet est planté dans la terre ou la vase, la partie proche de la surface est en contact avec plus de dioxygène que la partie profonde, il peut donc se créer une pile entre la partie profonde et la partie en surface [18].

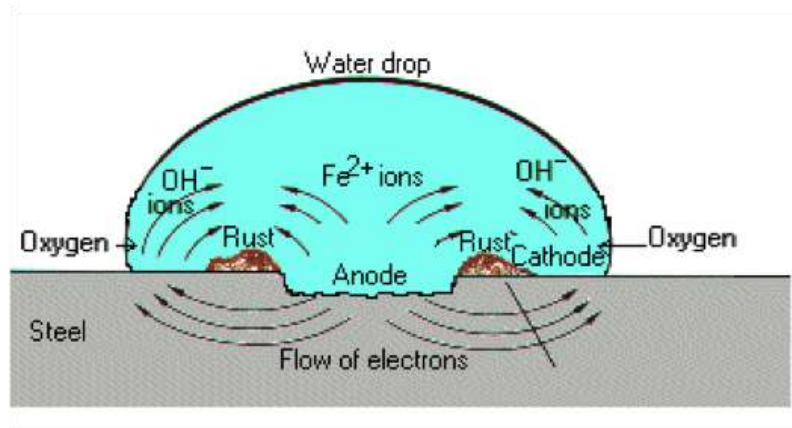


Figure II.21 : corrosion par aération différentielle.

II.10. Moyens de protection contre la corrosion

La protection contre la corrosion est un souci majeur pour les entreprises. La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de planification. En d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation [19].

II.10.1. Le Choix du matériau

La première idée est de choisir un matériau qui ne se corrode pas du moins qui se corrode moins vite dans l'environnement considéré. On peut utiliser des aciers dits inoxydables, des polymères (plastiques), mais le choix du matériau doit aussi prendre en compte les contraintes de l'application (résistance mécanique, esthétique, etc.). Dans l'absolu, il n'existe pas de matériau réellement inoxydable [20].

II.10.2. La protection par revêtement (Passive)

Le revêtement est généralement constitué par un ensemble de matériaux isolants. Pour assurer correctement son rôle dans le temps, il s'agit des revêtements métalliques et des revêtements organiques :

II.10.2.1. Le Revêtement métallique

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique aussi sur d'autres substrats comme le cuivre et la laiton, à l'instar des revêtements de chrome sur les robinets d'eau ou les revêtements d'or dur les contacts électriques des circuits imprimés les revêtements métalliques, outre les effets anticorrosion, remplissent souvent une fonction décorative, on les utilise aussi comme protection l'usure.

II.10.2.2. Le Revêtement organique

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu. Certaines peintures constituent en plus un réservoir d'inhibiteurs de corrosion, on classe les revêtements organiques pour la protection des métaux contre la corrosion en trois familles :

- Les revêtements en bitume,

- Les revêtements polymériques,
- Les peintures et vernis [19],

II.10.3. La protection électrochimique (active)

II.10.3.1. Protection anodique

Il se forme une couche d'oxyde, protectrice. Ce procédé est très intéressant pour les alliages légers et pour les alliages de titane.

La pièce à protéger est placée à l'anode, la cathode est en plomb, l'ensemble est plongé dans un électrolyte.

Sous l'effet du passage du courant, il se produit un dégagement d'oxygène à l'anode accompagné d'une dissolution superficielle due à l'acide et formation d'une couche d'oxyde qui protège l'alliage [21].

II.10.3.2. Protection cathodique

Le principe de base est de porter le potentiel d'un métal à un niveau dit de passivation. Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, on utilise une anode installée dans le même électrolyte [21].

La protection cathodique supprime le courant de corrosion qui provoque des dommages dans une cellule de corrosion et force le courant à circuler vers la structure métallique à protéger. Ainsi, la corrosion ou la dissolution du métal est évitée.

En pratique, la protection cathodique peut être obtenue par deux méthodes d'application, qui diffèrent en fonction de la source du courant de protection. Un système à courant imposé utilise une source d'énergie pour forcer le courant des anodes inertes vers la structure à protéger. Un système d'anode sacrificielle utilise des anodes métallique actives, par exemple du zinc ou du magnésium, qui sont connectées à la structure pour fournir le courant de protection cathodique [22].

II.10.3. Protection par inhibiteur

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en petite quantité au réactif corrosif, permet de diminuer la vitesse de corrosion ou d'annuler son agressivité vis-à-vis du métal. Il ne modifie donc pratiquement pas la nature, ni la concentration du milieu [23].



Chapitre III

La protection cathodique

III.1. Introduction

Les États –Unis d’Amérique sont considérés comme les premiers à suivre et à développer le système de protection cathodique, et ils sont considérés comme la protection cathodique comme la méthode de base pour protéger toute origine métallique de la corrosion dans n’importe quelle position métallique, immergée dans l’eau, enterrée ou encastrée dans le béton. Elle est une méthode importante pour prévenir la corrosion des canalisations métalliques enterrées. Chaque exploitant de pipeline doit effectuer des mesures régulières de la protection cathodique au niveau des redresseurs de transformateurs et des points d’essai (dans les systèmes à courant imposé) et au niveau des anodes sacrificielles (dans les systèmes galvaniques). Dans ce chapitre la protection cathodique est présentée avec deux principales méthodes utilisées dans les ouvrages métalliques.

III.2. Définition

La protection cathodique est le moyen le plus efficace de protéger les structures métalliques souterraines. Il fonctionne en arrêtant le flux de courant du métal vers l’électrolyte en le neutralisant avec un courant plus fort de polarité opposée provenant d’une source externe. Deux méthodes essentiellement utilisées dans les systèmes de protection cathodique, l’anode sacrificielle et le courant imposé. Elle est couramment utilisée pour protéger les structures en acier enfouies dans le sol ou immergé dans l’eau [24].

La protection cathodique est une procédure utilisée pour protéger les structures métalliques et en fer, telles que les canalisations, de la corrosion résultant de l’exposition de leurs surfaces au contact du sol, de l’humidité ou de l’eau [25].

III.3. Historique

La protection cathodique des métaux dans l’eau de mer a été signalée pour la première fois en 1824 par Humphry Davy. Cependant, elle n’a pas eu beaucoup de succès dans l’application pour laquelle elle a été développée. Au début des années 1940, la production a été appliquée à un ancien réseau de gazoducs qui connaissait des fuites de plus fréquentes. La diminution du nombre de fuites était perceptible immédiatement après l’installation de la protection cathodique [26].

Le développement le plus rapide des systèmes de protection cathodique a été effectué aux États-Unis d’Amérique afin de répondre aux exigences de l’industrie du pétrole et du gaz naturel. L’objectif était de bénéficier des avantages liés à l’utilisation de tuyaux en acier à parois minces pour la transmission souterraine. Dans ce but, la méthode était bien établie aux États-Unis 1945.

Au Royaume Uni, où des tuyaux basse-pression ont été intensivement utilisés, la protection cathodique a été très peu appliquée jusqu’au début des années 50. L’utilisation croissante de la protection cathodique a résulté du succès de la méthode employée à compter de 1952 pour protéger environ 1000 miles de réseau de carburant-ligne qui avaient été endommagés entre 1940 et 1944. La

méthode est maintenant bien établie. Elle est comme pour être faible et peu coûteuse par rapport aux risques encourus. La protection cathodique permet de protéger un métal contre la corrosion [27].

III.4.Principe

La protection cathodique est une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte (milieu aqueux conducteur ionique comme les eaux, les sols, le béton). Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu'à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative. La protection cathodique est obtenue par l'application d'une tension capable de fournir un courant cathodique suffisant à la surface métallique pour diminuer son potentiel à un niveau correspondant à une vitesse de corrosion résiduelle suffisamment faible pour l'application concernée [28].

La corrosion est l'action d'un métal extrait du minerai qui revient à son état primaire lorsqu'il est exposé à l'oxygène et à l'eau. L'exemple le plus courant est la rouille de l'acier. La corrosion est un processus électrochimique, qui se produit normalement à l'anode mais pas à la cathode.

Le principe de la protection cathodique consiste à connecter une anode externe au métal à protéger et à faire passer un courant continu entre elles afin que le métal devienne cathodique et ne se corrode pas [29].

Le principe de la mesure conventionnelle de la protection cathodique est de fournir une charge électrique unidirectionnelle à un tuyau qui est protégé pour devenir la cathode d'une cellule électrochimique. La source de cette charge électrique provient d'une anode en magnésium intégrée à côté du tuyau et la connexion s'effectue via une boîte de test [30].

III.5.Critère de protection cathodique

Quel que soit le système utilisé pour fournir le courant de protection, l'efficacité de la protection dépend du potentiel atteint sur la surface du métal à protéger. C'est la valeur du potentiel ainsi obtenue qui sert de critère pour estimer l'efficacité de la protection. Une installation de protection cathodique doit être suivie et contrôlée régulièrement pour s'assurer du respect de ce critère. Dans les milieux électrolytiques naturels comme les sols ou les eaux, une protection cathodique est efficace [28].

1^{er} critère (de potentiel) : ce critère est plus employé parce qu'il est le plus aisé à appréhender. Dans le diagramme de POURBAIX apparaît un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique, donc le potentiel du métal doit être abaissé pour se trouver dans ce domaine.

La mesure de potentiel s'effectue à l'aide d'une électrode de référence Cuivre/Sulfate de Cuivre (Cu/CuSO_4). Dans ces conditions, la protection cathodique :

- de fer est assurée dessous de -850mV , ce seuil doit être porté à -950mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfatoréductrices,
- du cuivre est assurée en dessous de -250mV .
- du plomb est assurée en dessous de -580mV .

Pour l'acier enterré, lors des mesures de potentiel, il faut tenir compte d'une part, du gradient de potentiel qui existe dans le sol (gradient entre la conduite enterrée et le point de l'emplacement de l'électrode de référence), et d'autre part, de l'imprécision de la masse. Le potentiel maximal à prendre en compte est fixé entre -1000 et -1500 mV quel que soit le type de revêtement, et ceci en fonction de la façon dont la mesure du potentiel est prise.

Ces potentiels doivent être atteints en chaque point du métal considéré en contact avec le sol, indépendamment du champ électrique existant dans celui-ci [31].

III.6.Facteurs affectant la validité des critères

Les critères de protection cathodique peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que la température, la bactérie, l'influence du courant alternatif (AC) et la qualité du métal de la structure.

III.6.1.Température

Il semble que la température affecte les critères de protection pour un acier enterré dans le sol. À des températures plus élevées pour assurer une protection adéquate. À 60°C, il est recommandé d'abaisser le seuil de protection à -950 mV, comparé à -1000 mV à des températures plus basses. Cela garantit une protection efficace contre la corrosion.

III.6.2.Bactérie Sulfato-réductrice

Les bactéries à faible teneur en sulfate à température ambiante affectent la norme recommandée pour la protection contre la corrosion des structures en acier enterrées, de sorte que sa norme augmente à -950 mV (Cu/CuSO₄) au lieu de -850 mV avec un décalage de polarisation de 200 mV. Lorsque la température atteint 60 °C en présence de bactéries, le décalage de polarisation doit être ajusté de 200 à 300 mV.

III.6.3.Courant alternatif

Les études menées pour évaluer le niveau d'interférence des sources de courant alternatif non désirées ont révélé que l'effet d'interférence directement proportionnel à la densité du courant présente à l'interface du métal / électrolyte. En pratique, une densité de courant (δ) de 20 A/ m² ne perturbe pas les critères de protection, alors que pour une densité dépassant les 100 A/m², les dommages dus à la corrosion deviennent considérables.

III.6.4.type de métal

Chaque métal possède son propre potentiel de corrosion. Les limites de protection sont ajustées en fonction de chaque type de métal. Comme le montrent les tableaux ci-dessous.

Tableau III.1 : Critère du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736 Tiré de Nace (2007)

Matériel	Potential, CSE Soil and fresh Water	Potential, Silver-silver Chloride Seawater
Iron and steel Aerobic environment	-850 Mv	-800 mV
Iron and steel anaerobic environment	-950 Mv	-900 mV
Lead	- 600 mV	-550 mV
Aluminum	-950 mV	-900 mV
Not to exceed	-1200 mV	-1150 mV
Copper Alloys	-500 to -650 mV	-450 to -600 mV

Tableau III.2 : crêtées du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN 30676 Tiré de NACE (2007)

Matériel	Température, °C or Electrolyte	Potentiel Vcse
Unalloyed & low-alloy ferrous Materials	Below 40°C (104°F)	-850m V
Same	Greater than 60 °C (140°F)	-950mV
Same	Anaerobic media	-950m V
Same	Sandy soil, 500-m	-750m V
Stainless with Cr \geq 16 %	Soil or fresh water and less than 40°C	-100m V
Same	Soil or fresh water and higher Than 40°C	-300m V
Same	Salt water	-300m V
Copper, copper-nickel alloy		-200m V
Lead		-650m V
Aluminum	Fresh water	-800m V
Same	Salt water	-900m V
Steel in contact with concrete		-750m V
Galvanized steel		-1200m V

III.6.5.Métaux dissimilaires

Lorsqu'il y a connexion entre deux structures métalliques différentes via un moyen approprié, l'effet de la corrosion galvanique entraîne développement d'un potentiel mixte différent du potentiel individuel de chacune d'elle. Pour cette raison, il critères de protection qui ont été appliqués précédemment pour l'acier ou la fonte.

III.6.6.Décollement de revêtement

Lorsque le potentiel de la protection cathodique atteint le niveau de $-1,12 \text{ V}$ (Cu/CuSO_4) à l'instant «OFF», l'évaluation de l'hydrogène gazeux commence à se produire. Le gaz généré est généralement piégé à l'interface métal/revêtement, ce qui entraîne le décollement du revêtement (décollement cathodique). Il en résulte que ce phénomène empêche le courant de protection d'atteindre la zone de la structure affectée. De même, l'électrolyte entourant la structure métallique peut remplir le vide créé à l'interface métal / revêtement/ métal et ce qui active les cellules de corrosion .En conséquence, les critères de protection à ces endroits du décollement deviennent difficiles à atteindre [32].

III.7.Systemes de protection cathodique

III.7.1.Protection par l'anode sacrificielle (ou galvanique)

III.7.1.1.Principe

La protection cathodique par anodes sacrificielles a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créée par l'association, dans même électrolyte, de deux métaux différents : le métal à protéger et un métal moins noble qui constitue l'anode. Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger au-delà de son potentiel d'immunité.

La protection par anode sacrificielles n'a pas une durée indéfinie. Elle s'arrête avec la disparition du matériau sacrificiel ou par blocage électrochimique. L'évaluation de sa d'expérience, généralement une quinzaine d'années [33].

La protection par anode sacrificielle ne s'applique qu'aux réseaux de petite longueur ou très bien isolés, pour lesquels l'intensité de protection cathodique ne dépasse pas quelques milliampères.

La protection par anode sacrificielle ne s'applique qu'aux réseaux de petite longueur ou très bien isolés, pour lesquels l'intensité de protection cathodique ne dépasse pas quelques milliampères. En ce qui concerne les conduites enterrées, les anodes utilisées sont à base de Zinc ou de Magnésium.

Son rendement sera meilleur si elle est dans des conditions suivantes :

- au milieu de l'ouvrage,
- placée à une distance supérieure à 3 mètres de la conduite (et de tout autre ouvrage métallique enterrée),
- la partie supérieure de l'anode située sous le niveau de la génératrice inférieure de la canalisation , ohm .m pour les anodes en magnésium.

- dans un terrain humide (les emplacements à proscrire sont les chaussées ou trottoirs recouverts d'un matériau étanche : bitume, béton, etc.....).

Chaque anode (zinc ou magnésium) est livrée avec son régulateur de corrosion composé d'un mélange de bentonite et de gypse. Ce régulateur permet une consommation régulière de l'anode et réduit la résistance de contact anode /sol.

L'ensemble anode et son régulateur, doit être abondamment arrosé avant le remblai et livrée avec son câble de raccordement [31].



Figure III.1 : Anode de Magnésium.

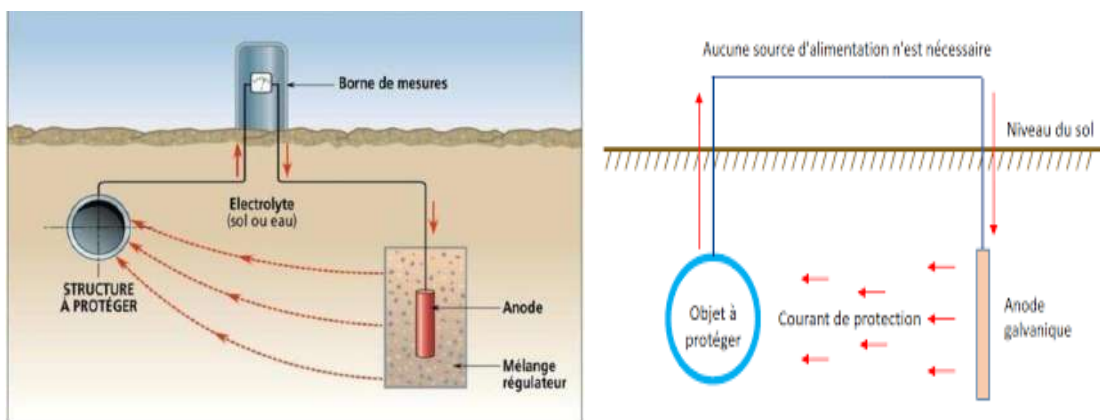


Figure III.2 : Système de protection par anode galvanique

III.7.2. Protection par courant imposé

III.7.2.1. Principe

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant : Un déversoir (ou masse anodique), l'électrolyte (sol ou eau) et la structure à protéger.

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 correspondant à l'immunité du métal [33].

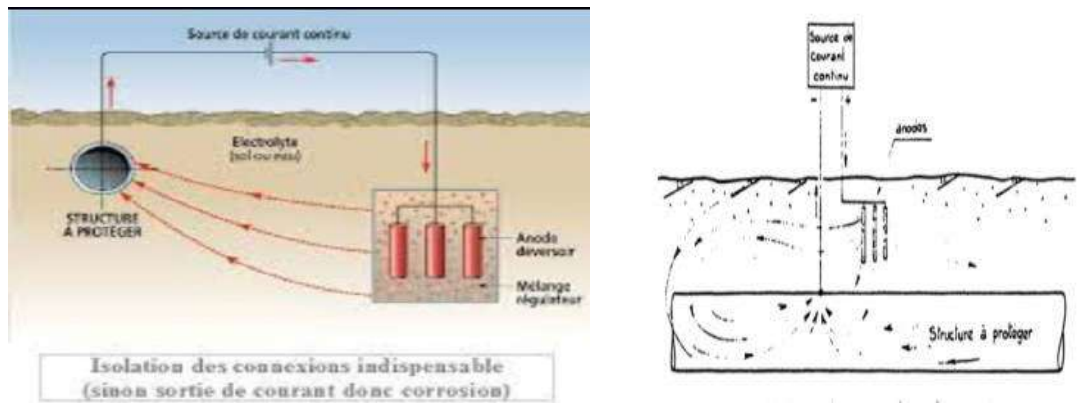


Figure III.3 : Système de protection par courant imposé.

III.7.3. Une installation de soutirage comprend

- une source d'énergie BT.
- un coffret comprenant le compteur, le disjoncteur et le générateur de courant continu qui est le transfo-redresseur.
- un déversoir (rail ou anodes ferrosilicium).
- des liaisons électriques du pôle négatif du redresseur au réseau à protéger et du pôle positif au déversoir.

Le déversoir doit être implanté à une distance d'environ 50m de la conduite à protéger et de préférence perpendiculaire à celle-ci. Il doit être écarté d'au moins 50m des ouvrages métalliques des autres occupants du sous sol (réseaux de télécommunication, Eau, etc.....), afin d'éviter toute influence néfaste sur ces structures.

Le meilleur emplacement pour poste de soutirage est celui qui permet d'assurer une protection la plus efficace sur la plus grande portée avec une puissance minimale.

Ce mode de protection est appliqué en fonction des paramètres suivants :

- dimension et géométrie des structures à protéger,
- le point le plus favorable pour l'installation de déversoir (terrain de faible résistivité),
- l'encombrement du sous-sol en structures métalliques diverses,
- proximité d'une source électrique BT [31].

III.7.4.Essai de protection cathodique

III.7.4.1.essai pour déterminer le courant de protection

Il consiste en un essai d'isolement de l'ouvrage, l'utilisation d'une source de courant continu, qui doit permettre après vérification des potentiels de l'ouvrage par rapport au sol, la connaissance de l'intensité nécessaire à la protection cathodique.

Pour faire cet essai il faut disposer :

- d'une source de courant continu soutirage d'essai (provisoire) ;

-d'une prise de terre d'essais (déver soir) à proximité de l'ouvrage ; celle-ci peut être existante (prise de terre de poste, grillage, piquet de clôture , etc.....). A défaut, on peut enfoncer dans le sol une ou plusieurs "barres à mines".

L'essai d'isolement peut également être effectué par liaison électrique à un réseau existant sous protection cathodique.

Pour une intensité débitée par ce soutirage, on relèvera le long du réseau les potentiels conduite-sol. Trois cas peuvent se présenter :

-les potentiels de protection cathodique sont trop électro-négatifs. L'intensité nécessaire à la protection cathodique doit être inférieure à celle de l'essai-il est utile de procéder à un nouvel essai à intensité plus faible pour ne pas créer un moyen de protection cathodique trop puissant.

-les potentiels de protection cathodique sont trop faibles ou bien ne sont pas atteints en tous points. L'intensité nécessaire à la protection cathodique devant être supérieure à celle de l'essai à intensité plus forte et/ou de rechercher les défauts.

-les potentiels de protection cathodique sont atteints en tous points. L'intensité nécessaire à la protection cathodique correspond à celle de cet essai [31].

III.7.5.Détermination de la valeur moyenne d'isolement

Dans le cas d'un réseau de distribution, la valeur d'isolement moyenne approchée peut être calculée à partir de la formule :

$$R = \frac{\Delta U}{I} \times S$$

R : en $\Omega \text{ m}^2$ (valeur d'isolement moyenne approchée).

I : en A (intensité débitée au cours de l'essai),

S : en m^2 (surface de l'ouvrage à protéger),

ΔU : en V (moyenne des grains de potentiel déterminée en calculant la différence entre le potentiel de l'ouvrage à courant établi, valeur relevée lors de l'essai décrit au 1.1, et le potentiel spontané de l'ouvrage avant l'essai.

Cette valeur calculée n'est qu'un indicateur du niveau d'isolement moyen d'un ouvrage.

Dans le cas de faible valeur d'isolement, on procède à une recherche de défauts permettant de déceler :

- l'existence de contacts avec d'autres ouvrages,
- les raccords isolants manquants ou défectueux,
- les détériorations de revêtement.

III.7.6.Estimation

En absence d'éléments relevés sur le site d'essais, des valeurs d'isolement sont données à titre indicatif dans le tableau ci-dessous.

Les conditions de pose difficiles, la présence de sol très rocheux ou de terrain imbibé d'eau peuvent abaisser les limites fixées dans ce tableau :

Tableau III.3: les valeurs de la résistance d'isolement Par rapport type de conduite [31].

TYPE DE CONDUITE	RISISTANCE D'ISOLEMENT ($\Omega.m^2$)
Réseau de canalisation enterrée avec revêtement très dégradé	500 à 1000
Réseau maillé de canalisation enterrée avec revêtement type c	5000 à 15000
Conduite en acier avec revêtement type C enterrée	500 à 10000
Conduite en acier enterrée en bande PE	10^4 à plus de 10^5
Conduite en acier enterrée revêtue en PE extrudé	10^4 à plus de 10^5

III.7.7. Différents techniques de protection cathodique

III.7.7.1 Soutirage de courant

III.7.7.1.1. Principe : l'abaissement de potentiel des canalisations à la valeur portant le fer an phase d'immunité est obtenu en connectant le réseau, en un ou plusieurs de ces pints au pôle négatif d'une source électrique de courant continu. Généralement on ne dispose que de courant alternatif, donc il est nécessaire de transformer le courant alternatif du secteur basse tension, en courant continu à l'aide des redresseur est reliée au réteur basse tension, en courant continu à l'aide des redresseur est reliée au réteur basse tension, en courant continu à l'aide des redresseur est reliée au réteur basse tension, en courant continu à l'aide des redresseur.

-La borne négative du redresseur est reliée au réseau de conduite à protéger.

-La borne positive du redresseur est reliée à une masse métallique enterrée, ou anode sacrificielle et sur laquelle la corrosion sera reportée.

Le courant continu venant de l'anode deservoir traverse le sol, puis rentre dans la conduite à travers le revêtement créant entre le sol et la conduite une chute de tension qui rend la conduite négative par rapport au du poste de soutirage donc il faut qu'aux points extrêmes (Par rapport au poste de soutirage) on obtient le potentiel minimal de protection du métal considéré.

III.7.7.1.2. Constitution de l'installation

Une installation de soutirage de courant comprend :

-le branchement basse tension qui a son organique habituellement à un poteau de ligne et qui aboutit aux bornes d'entrée du redresseur.

-Un coffret contenant : le compteur, le disjoncteur, le redresseur

-Le conducteur de liaison de la prise de terre au borne positive du redresseur

-Le Conducteur de liaison de la conduite au borne négative du redresseur.

-La Prise de terre.

III.7.7.1. 3. *Champ d'application du soutirage*

-Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante.

-Conduites enterrées revêtues dont la longueur dépasse quelques kilomètres.

-Conduites enterrées non revêtues ou dont le revêtement est mauvais.

-Casings de forage.

-Structure marine importante dont le revêtement n'est pas possible

-Conduites sous marines revêtues ou non

III.7.7.1.4 .*Choix de l'emplacement du poste de soutirage*

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée pour une puissance minimale.

-Les paramètres qui interviennent sont :-La forme générale et sa longueur.

-Le diamètre des conduites (là où le diamètre est le plus important pour avoir une bonne conductibilité longitudinale afin de démunir le nombre de redresseur apposer).

-Le degré d'agressivité des sols où les conduites sont posées.

-Le ou les points les plus favorables pour l'installation de la prise de terre.

-La proximité des lignes basse tension.

-L'encombrement du sous-sol en structures diverses.

Il est bon d'examiner, tout d'abord le plan d'ensemble du réseau afin d'en déduire les emplacements les plus indiqués [34].

L'un des avantages de l'utilisation d'un système de protection cathodique est qu'il est toujours utile et efficace, et l'un de ses inconvénients est que le choix du système approprié dépend généralement des conditions environnementales, énergétiques et économiques. À cet égard, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le tableau donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question [32].

Tableau III.4 : Comparaison des éléments de systèmes P.C

Tiré de Nguyen-Thuy (2008) [32].

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



Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1.Introduction

Une fois produit par Sonatrach, le gaz est distribué via des sociétés spécialisées de distribution avec une pression moyenne de 70 bars. La Société Sonelgaz Touggourt distribue du gaz aux habitants à une pression moyenne de 4 bars à travers une conduite en acier, d'une longueur totale d'environ 5382 m, située au quartier RIMAL Touggourt, le reste une conduite en polyéthylène dans la plupart des quartiers ; Cette conduite composite comprend deux sections en acier : la première, d'une longueur de 2000 m et d'un diamètre de 300 mm, et la seconde, d'environ 3382 m de longueur et d'un diamètre de 200 mm, assemblées ensemble. Ce chapitre se propose d'étudier les méthodes d'entretien et de protection de ces canalisations contre toute détérioration, en mettant particulièrement l'accent sur l'application de la protection cathodique.

IV.2.Présentation de l'ouvrage à protéger

Lors de la construction de telles structures, le chemin doit être étudié d'un point de vue géographique et géologique et de l'étendue de l'influence du climat souterrain (sol) sur celui-ci. Ce sont les moyens de transport les plus vulnérables aux attaques des composants du sol, ainsi qu'aux changements de température qui affectent ces canalisations. Par exemple, la température en hiver n'est pas la même qu'en été. Information sur ce travail :

- **Longueur** : $L = 5382$ m,
- **Diamètre** : $D = 12$ pouce = 0,3 m,
- **Epaisseur** : $e = 0,02$ m,
- **Surface** : 5069,844 m²,

Il s'agit d'un tuyau soudé avec une épaisse couche de peinture noire (spécialisée pour les tuyaux) en forme de spirale afin d'isoler le tuyau du sol, pour éviter toute interaction avec celui-ci mais il est possible que cette peinture soit rayée par composants du sol (roche,...etc.) ou il peut s'isoler. La peinture sur le tuyau en acier vieillit naturellement. Nous avons utilisé le système de protection cathodique pour éviter tous ces risques, car il s'agit d'une méthode efficace et peu coûteuse.



Figure IV.1: conduite gaz en acier par revêtement.

IV.2.1.Mode opératoire

Ce travail appliqué se concentre sur la méthode de protection cathodique par courant imposé ; il fonctionne en utilisant un courant continu, c'est-à-dire une source d'énergie appelée poste soutirage ou redresseur, et un rail. Le tube en acier est un tube recouvert d'une épaisse couche noire ; peindre en forme de spirale enterrée à une profondeur de 5 mètres de la surface de la terre avec rail. De sorte électrique négatif soit connecté au tube en acier et le conducteur électrique positif soit connecté au rail. Il s'agit de former un circuit électrique pour transformer le tube en cathode et le rail en anode.

En bref, l'anode est le métal (le rail) qui va s'oxyder, c'est-à-dire fondre et envoyer des électrons à la cathode, ce qui signifie que le pipeline est protégé. Cette méthode dépend de la mesure de la tension entre les lignes et le sol, selon ses besoins. Contrôle périodique, dans le but d'éviter toute panne ou défaut, par exemple, il pourrait y avoir une rupture dans l'un des câbles, ou la durée de vie du rail a expiré, entre autre raisons.

IV.2.2.Méthode de mesure

- Humidifier le site de test avec de l'eau et insérez dans la cellule de test (électrode) un type de sulfate de cuivre (Cu/CuSO_4) afin d'assurer un bon contact avec le sol.
- Connectez l'électrode positive du voltmètre au point de surveillance ou d'inspection (redresseur ou prise potentiel), et l'électrode négative du voltmètre à l'électrode (Cu/CuSO_4).
- Lecture du résultat de la mesure du voltmètre et la lecture est négatif ; La différence de potentiel entre le réseau et le sol doit être inférieure à -850 mV pour que le réseau soit protégé.
- **Remarque :** les lectures seront différentes à chaque point de la Terre. Par conséquent, plusieurs lectures doivent être prises jusqu'à ce que la meilleure lecture soit atteinte et faible à l'avenir.

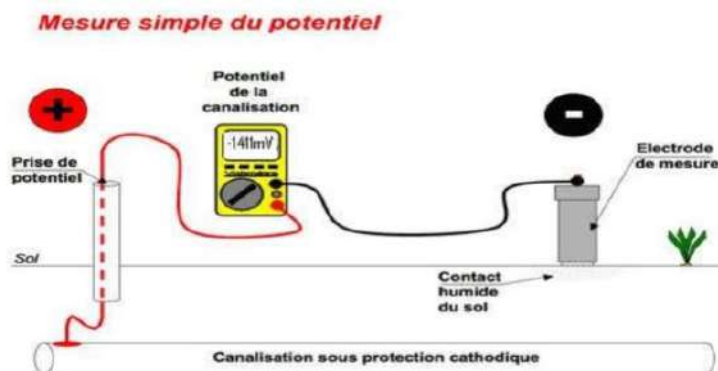


Figure IV.2 : Méthode de mesures de potentiels de la protection cathodique .

IV.3.Appareillage utilisé

IV.3.1.Source d'énergie (Poste soutirage ou redresseur) : C'est une masse de matériau utilisée pour injecter du courant électrique dans le sol afin de protéger les structures enterrées.



Figure IV.3 : Poste soutirage -redresseur.

IV.3.2.Les câbles de liaison : Il est utilisé pour transférer le courant de la source d'alimentation vers la structure.

IV.3.3. Electrode (Cu/CuSO₄) : Il permet de mesurer la potentiel électrique entre la structure protégée et la terre.

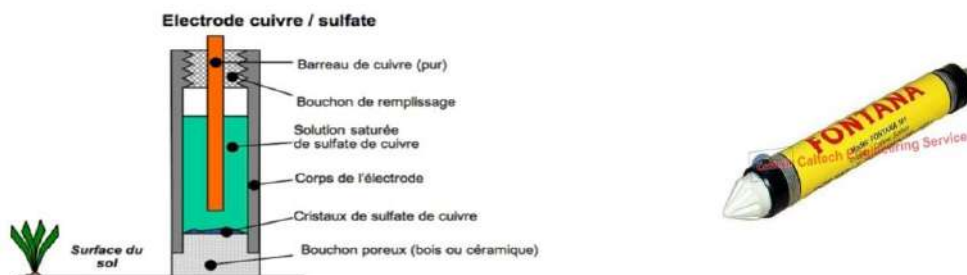


Figure IV.4 : Electrode Sulfate de cuivre

IV.3.4.Appareil de voltmètre : Appareil de mesure.



Figure IV.5: Appareil de voltmètre.

IV.4.Résultats et discussion

IV.4.1.Mesures à l'aide d'un redresseur

A l'aide d'un voltmètre, nous avons mesuré la tension et l'intensité.

Tableau IV.1: mesure de l'intensité et la tension

	Février	March	Avril
Intensité	1,5 Amp	1,5Amp	1,5 Amp
Tension	3Volt	3 Volt	2.5 Volt

IV.4.1.1.Analyse le résultat

Les résultats du tableau montrent les valeurs de mesure de tension et de courant. Nous constatons que les valeurs de tension sont constantes pendant les trois mois (février, mars et avril), tandis que les valeurs d'intensité sont constantes pendant les mois de février et. Mars. Mais en avril, ils ont changé, c'est-à-dire qu'ils ont diminué par rapport aux mois précédents. Cela est dû aux fortes pluies du 10 avril, dues à la coupure du câble électrique ; Cela peut affecter le flux de courant.

IV.4.2.Mesure du potentiel

A Sonelgaz Touggourt il y a douze prises potentielles. On dit donc qu'il est mesuré périodiquement, environ tous les mois derniers, à l'aide d'un voltmètre.



Figure IV.6 : Prise potentiel.

Tableau IV.2 : mesure du potentiel pour les trois mois (Février, Mars , Avril) .

PRISE POTENTIL N°=	Février	Mars	Avril
1	-1328	-1339	-1280
2	-1337	-1352	-1295
3	-1364	-1377	-1320
4	-1421	-1425	-1390
5	-1471	-1504	-1450
6	-1598	-1574	-1530
7	-1689	-1714	-1760
8	-1693	-1717	-1600
9	-1634	-1642	-1600
10	-1643	-1655	-1555
11	-1564	-1575	-843
12	-1585	-1607	-820

IV.5.Analyse le résultat

On remarque dans le Prise Potentiel N°1 que la valeur du potentiel était de 1328 mV en février, en mars est -1339 mV, et en Avril elle est devenue 1280 mV. Cela signifie qu'il n'y a aucun problème et que le courant fonctionne bien, sachant que la valeur du potentiel doit être inférieure à -850 mV. Une

valeur supérieure à cette plage est considérée comme problématique. Nous avons remarqué que les choses étaient différentes en avril, car elle est devenue supérieure à la valeur imposée (-850 mV) dans les Prise Potentiel 11 et Prise Potentiel 12. Cela est dû aux fortes pluies tombées le 10 avril qui ont entraîné la coupure du câble, ainsi qu'à la situation nature du sol. Cela indique que la canalisation de gaz n'est pas protégée.

L'équipe de maintenance intervient pour identifier cette défaillance et ensuite détecter le problème qui est dû à la rupture d'un câble électrique connecté à la canalisation de gaz à cause des fortes pluies.

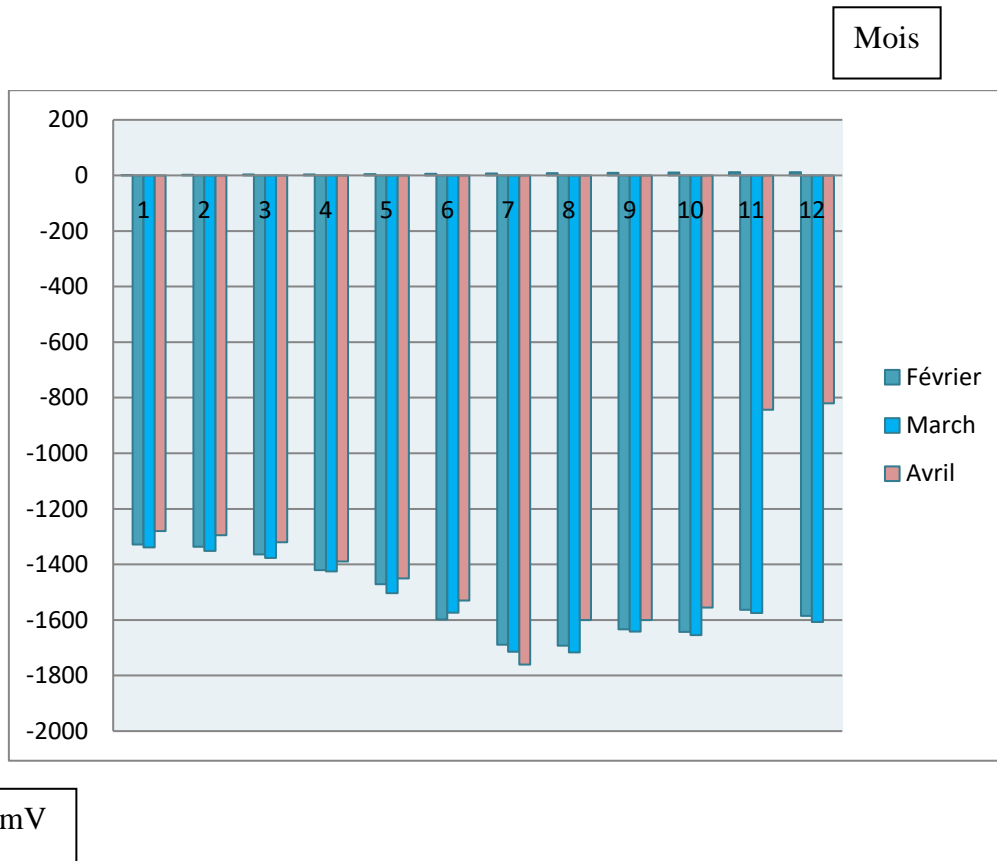


Figure IV.7 : un diagramme de la différence de potentiel les trois mois (février, mars, avril) 2024

Tableau IV.3 : mesure de potentiel pour les mois (novembre, Décembre, Janvier)

	Novembre2023	Décembre2023	Janvier2024
Prise potentiel			
1	-1256	-1272	-1360
2	-1285	-1293	-1382
3	-1290	-1309	-1407
4	-1321	-1336	-1456
5	-1365	-1357	-1525
6	-1406	-1409	-1538
7	-1481	-1492	-1756
8	-1495	-1504	-1732
9	-1444	-1487	-1702
10	-1409	-1468	-1690
11	-1395	-1443	-1624
12	-1320	-1379	-1623

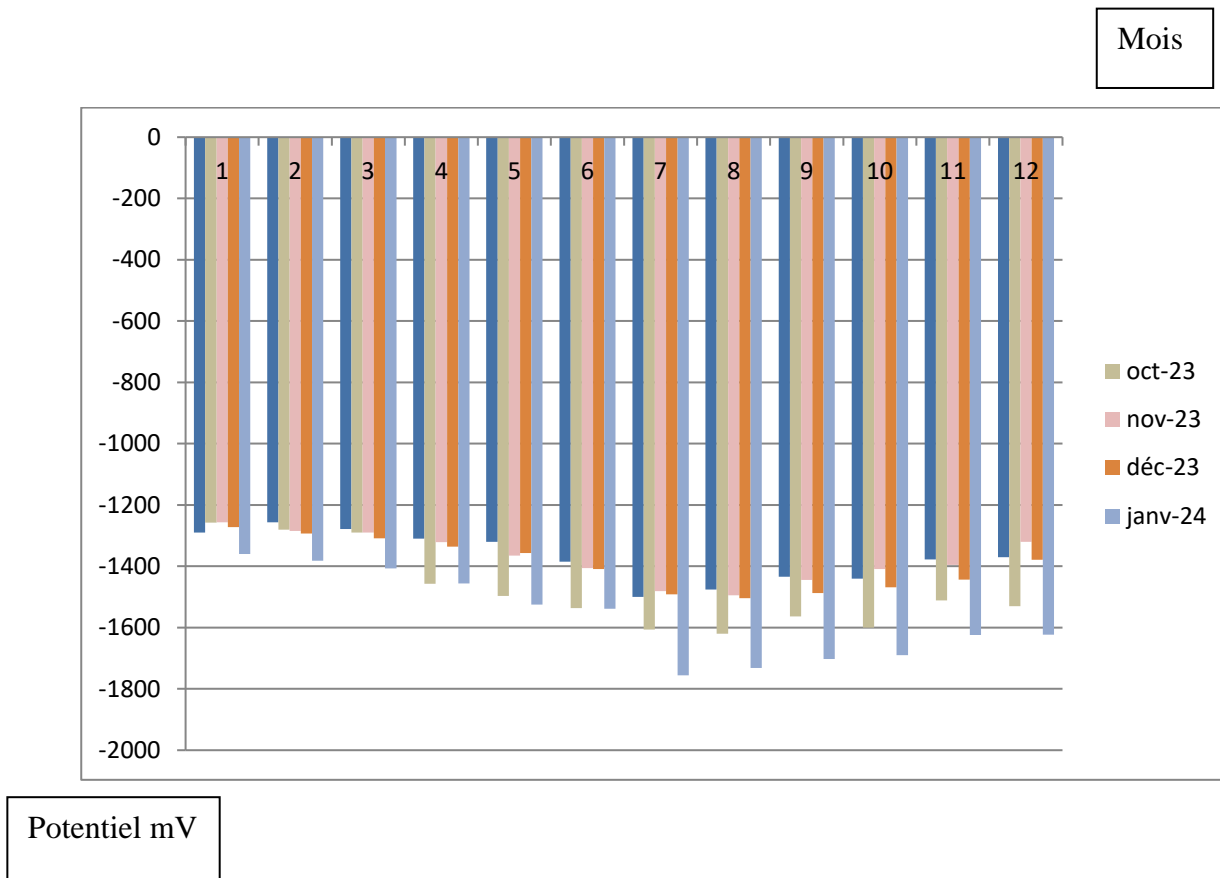


Figure VI.8 : un diagramme de la différence de potentiel pour les mois (octobre ,novembre, décembre, janvier)

Discussion

en comparant les graphiques IV.7 et IV.8,nous constatons que la valeur des potentiels change d'une période à l'autre, ce qui est dû à un changement dans les conditions climatique, c'est-à-dire les facteurs externes (température , humiditéetc). le taux d'humidité est plus élevé en hiver qu'en été . Par conséquent, les potentiels diminuent lorsque le taux d'humidité dans le sol augmente, ou inversement.

Cependant, nous remarquons dans le graphique IV.7 qu'au mois d'avril le potentiel augmente et le niveau d'humidité du sol augmente, en raison de l'accumulation d'eau dans cette zone, ce qui a conduit à la rupture du câble.

L'humidité peut entraîner de la corrosion et des dommages aux câbles électriques utilisés en protection cathodique. Ce qui peut entraîner une panne du système.

Il est très important d'identifier et de protéger les zones de câbles et les composants de protection cathodique de l'humidité, et un entretien périodique doit être effectué pour garantir leur efficacité et la sécurité des structures qu'ils protègent, grâce à des matériaux isolants résistants à l'eau et à l'humidité, en éloignant les câbles. Des zones exposées à l'humidité ou à l'eau, ou en installant des câbles à l'intérieur de tubes de protection tels que le polychlorure de vinyle PVC.

IV.6.Calcul (protection par soutirage)

Cette étude diffère suivant qu'elle est réalisée au niveau du projet d'ouvrage à réaliser ou lorsque l'ouvrage est déjà posé. Dans ce dernier cas, la méthode la plus sûre consiste à effectuer un essai de protection cathodique à l'aide d'une installation provisoire .

Dans tous les cas, il sera tenu compte du vieillissement possible de l'isolement de la canalisation pour déterminer la puissance de l'installation.

Avant de déterminer les formules de calcul d'intensité et de potentiel on doit connaître certains paramètres qui rentrent dans les calculs à savoir :

IV.6.1.Calcul de la résistance longitudinale de la conduite

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

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega \cdot m^{-1}$,

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

E : épaisseur du tube en m,

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite en mètre.

$$r = \frac{17 \times 10^{-8}}{3,14 \times 0,3} = 9,02335 \times 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$$

IV.6.2. Calcul de la résistance transversale de la conduite

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

R : résistance transversale de la conduite en Ω

R_{is} : résistance d'isolement en $\Omega \cdot m^2$,

D_{ext} : diamètre extérieure de la conduite en mètre.

$$R = \frac{500}{3,14 \times 0,3} = 530,785 \Omega$$

IV.6.3.Calcul du coefficient d'atténuation

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R}} \quad [m^{-1}]$$

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega \cdot m^{-1}$

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

Ce coefficient varie de 1 à $20 \cdot 10^{-5}$, il est inversement proportionnel à la valeur d'isolement, plus la valeur d'isolement est importante plus le α est faible et plus la portée de soutirage est importante [31].

$$I = i \cdot S_T = i \cdot \pi \cdot \sum_{i=1} D_{\text{exti}} \cdot L_i$$

I : courant de protection du réseau en ampère,

i : densité de courant en mA/m². Calculer par la formule :

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

E_{rep} : potentiel de la conduite au repos (sans protection) = (-0,75) ou (-0,4V) / (Cu/CuSO₄),

E_{prot} : potentiel seuil de la conduite sous protection = -1V (Cu/CuSO₄),

R_{is} : une valeur estimée par le tableau en fonction du revêtement,

Et de lui :

$$\alpha = \sqrt{\frac{9,02335 \times 10}{530,785}} = 1,3038 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$I = i \cdot \pi \cdot \sum_{i=1} D_{\text{exti}} \cdot L_i$$

$$I = 5 \times 10^{-4} \times 3,14 \times 0,3 \times 5382 = 2,543 \text{ A}$$

$$\text{Et : } i = \frac{-0,75 - (-1)}{500} = 5 \times 10^{-4} \text{ mA/m}$$

IV.6.4. Détermination du poids du rail

D'après la loi de Faraday, on sait que la consommation du fer est de 9.15 kg/Amp.an.

$$P = 9,15 \times I \times t \quad [\text{kg}]$$

P : le poids du rail qu'il faut pour un débit de courant I,

t : la durée de vie du rail voulue (20 à 30 ans)

Faire un calcul pour un rail dont la durée de vie est de 25 ans.

$$P = 9,15 \times 2,543 \times 25 \text{ ans} = 581,922 \text{ kg}$$

IV.6.5. Détermination de la longueur du rail

Sachant que la masse d'un (01) mètre linéaire du rail = 46 kg

$$L = \frac{P}{46} \quad [\text{m}]$$

L : longueur du rail en mètre,

P : poids du rail en kg.

$$L = \frac{581,922}{46} = 12,65 \text{ m}$$

IV.6.6. Calcul de la résistance de terre d'un déversoir

La résistance de terre d'un déversoir doit être calculée pour être compatible avec la possibilité du générateur de courant continu et fournir le courant nécessaire pour la protection, compte tenu des extensions prévisibles. Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions de la résistivité du sol.

Pour le rail posé horizontalement, la résistance de terre est calculée par la formule ci-après : [31]

$$R = \frac{0,366 \rho_s}{L} \times \left[\text{Log} \frac{3L}{2d} + \text{Log} \frac{3L}{8h} \right] \quad [31]$$

R : résistance de terre d'un déversoir en Ω .

ρ_s : résistivité du sol en $\Omega.m$,

L : longueur du rail en m,

d : diamètre du rail en m = 0.10 m,

h : profondeur de pose du rail en m,

Cette résistance peut être déterminée pour chaque type de déversoir à l'aide de courbe donnant : [31]

$R/\rho_s = f(\text{longueur du déversoir})$. Voir figure IV.7.

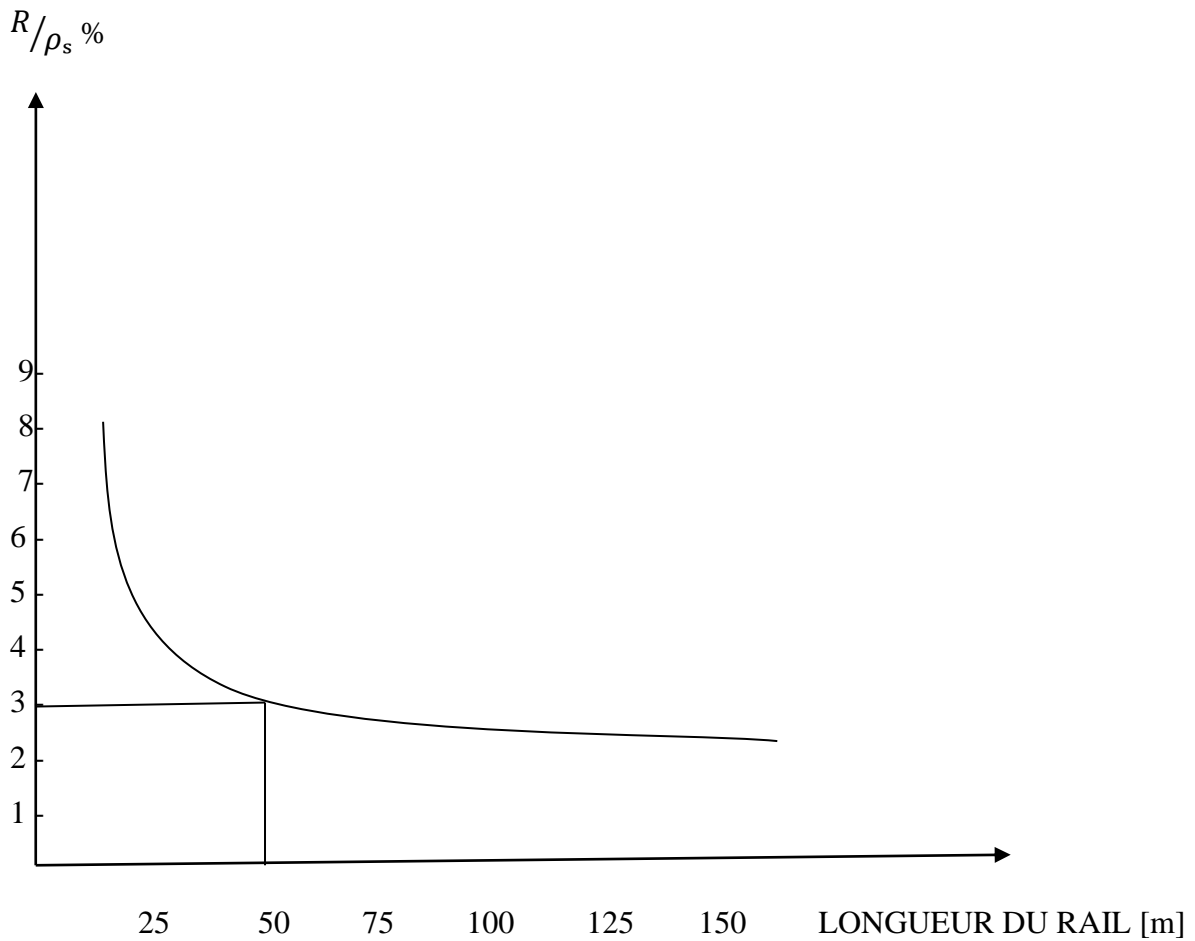


Figure IV.9 : Courbe $R/\rho_s = f$

Pour une longueur donnée du rail, on détermine R/ρ_s en %, et pour avoir la résistance, on multiplie ce rapport par ρ_s [31].



Conclusion générale

Considérant la gravité de la corrosion et son impact sur les systèmes de canalisation, cette étude met en lumière l'importance de l'entretien régulier et de l'efficacité de l'utilisation de la protection cathodique comme outil efficace pour préserver ces infrastructures vitales. La protection cathodique représente une stratégie globale de prévention de la corrosion, ralentissant la dégradation des matériaux des canalisations et prolongeant significativement leur durée de vie.

Le succès de cette stratégie de maintenance dépend d'une compréhension précise des conditions environnementales, des caractéristiques des matériaux utilisés et des dynamiques propres au flux des matériaux dans les canalisations. De plus, l'application de la protection cathodique nécessite un suivi continu et une étude approfondie des systèmes de contrôle de la corrosion, incluant l'entretien régulier, la vérification des systèmes électriques protecteurs et la performance des appareils assistés.

En outre, il est impératif de prendre en compte les innovations technologiques récentes dans le domaine de la protection contre la corrosion pour garantir une utilisation optimale des ressources et limiter les pannes imprévues qui pourraient entraîner l'arrêt de la production ou même des catastrophes environnementales. Il est également essentiel de former et de qualifier les équipes de travail sur les méthodes et technologies les plus récentes de surveillance et d'analyse, permettant l'identification précoce de tous signes de corrosion et une intervention rapide pour la réparation.

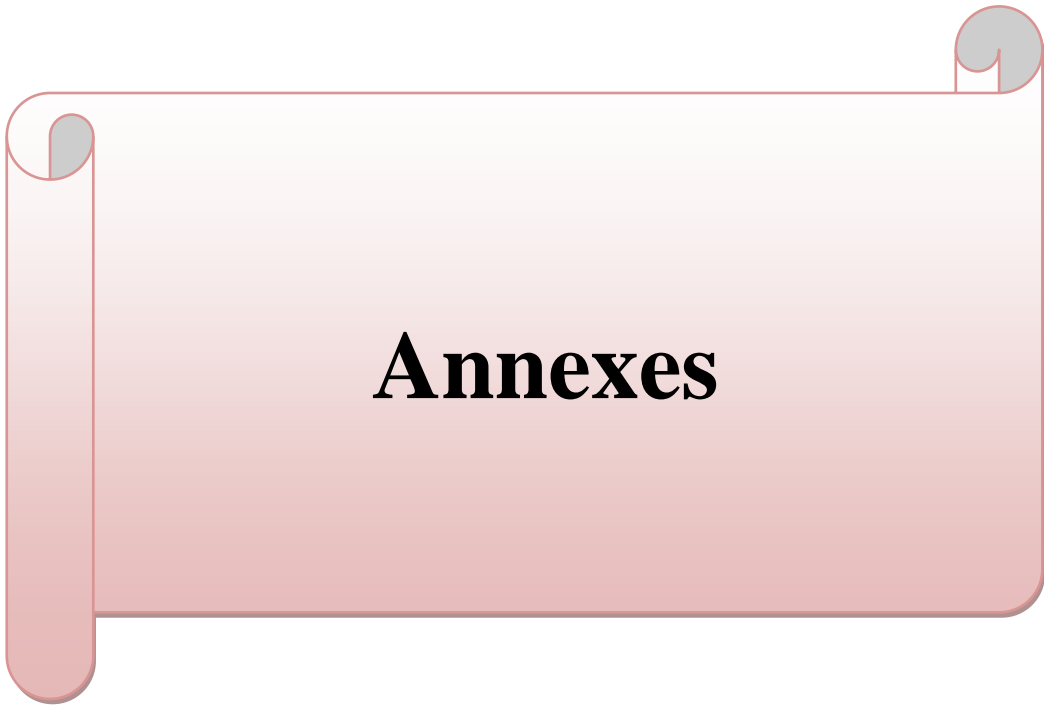
Ainsi, nous concluons que la reconnaissance du rôle vital joué par la protection cathodique dans la maintenance des pipelines mène à des politiques et mesures qui améliorent la sûreté publique, renforcent l'efficacité opérationnelle et réservent la qualité de l'environnement. L'attention croissante portée à la précision des performances montre une évolution de la conscience de la responsabilité sociale et environnementale, ce qui signifie atteindre les normes les plus élevées de sécurité et de durabilité pour nos citoyens et notre planète.



Référence

- [1] Bouklachi .A« Rapport de stage SADEG » S1/2022, Sonelgaz Touggourt
- [2] rapport de stage (2020/2021) master 02 ,Sonelgaz Touggourt
- [3] Audisio S, BérangerG. Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels. PPUR Presses polytechniques. 2010.
- [4] Bensabra, H. Cours de corrosion et protection des métaux. Université de JIJEL. 2016.
- [5] KHIATI. Z , MRAH . L. Polycopié de cours : Corrosion et protection des métaux. Oran:Université Oran , faculté de CHIMIE,2023.
- [6] Swain (1996), Schultz (1997) and Dawson (2003). Naval Material Science and Engineering USNA. United States Naval Academy. p2-18.
- [7] Alamri AH. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines–An overview. Engineering failure analysis.(2020);116:104735.
- [8] Kouache, Amel. Synthèse,ammonium quaternaire platformat application a l'inhibition de la corrosion acide d'acier [Mémoire de Magister]. Blida : Université Saad Dahlab - Blida, Faculté des Sciences de l'Ingénieur ; 2011.
- [9] DAUFIN, GEORGES,TALBOT, JLL. Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages.1971 ;51(507): 375-398.
- [10] HAMADI, Latifa. Étude comparative de la corrosion localisée d'un acier ordinaire et d'un acier inoxydable [Thèse de Magister], Batna : Université de Batna 2,Faculté de Technologie ;2014.
- [11] KESSAB. A. Les effets de corrosion dans l'industrie « causes Et remèdes » Application : Protection cathodique des Ouvrages enterrés [Projet de Fin d'études].Ecole Nationale polytechnique ;2010.
- [12] Nguyen-Thuy. LE Protection cathodique. Badoris-document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS), Paris,2008.
- [13]Chambre Syndicale de la recherche et du gaz naturel.La protection Cathodique guide pratique .Editions Technip.1986.
- [14] Kokilaramani, S., Al-Ansari, M. M., Rajasekar, A., Al-Khattaf, F. S., Hussain, A., & Govarathanan, M. Microbial influenced corrosion of processing industry by re-1-circulating waste water and its control measures-A review,Chemosphere,2020;265:129075.
- [15] Blanc Ch, Aubert I. Couplage «mécanique–microstructure–corrosion»: Concepts, essais, modélisation et cas concrets. 1ère éd, Britain : ISTE Editions Ltd,2018.
- [16] Craig, Bruce D, Anderson, David S.Handbook of corrosion data.2ème éd, ASM international,1994.
- [17] Grosgeat B,Colon P.La corrosion. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires,(2009/2010).
- [18] Karboua Bachir .Corrosion des aciers et leur protection.Editions universitaires européennes,2021.

- [19] Cheriet Nabil. Développement d'un système expert dans l'évaluation de l'endommagement d'éléments de structure métallique cas de corrosion électrochimique [Thèse de doctorat]. Blida : université Blida-1, Faculté de Technologie ;2019.
- [20] Bouaoud Moufida. Tenue à la corrosion en milieu acide d'un dépôt de Zn Sn sur acier inoxydable [Thèse de MAGISTER]. Sétif : Université Ferhat Abbas- Sétif 1, Faculté de Technologie;2014.
- [21] Dra Rafik El Arslene. Polycopie «CORROSION» cours et exercices. Université de Sidi Bel Abbes, Faculté de Technologie.
- [22] Davis, Joseph R. (ed). Corrosion: Understanding the basics. Asm International. 2000.
- [23] S.Bensaada. COURS DE CORROSION. Université Mohamed khider biskra.
- [24] Hussain M, Verma C, Aslam J, Aslam R., Zehra S. Handbook of corrosion engineering: modern theory, fundamentals and practical applications, 1ère éd, ELSEVIER. 2023.
- [25] Abdulla PMP . Cathodic Protection .29 aout 2022.
<https://ae.linkedin.com/pulse/cathodic-protection-abdulla-pmp->
- [26] Khattab.Karim ,azzag el bahi, Allali Khairredine, lekhel abdelaziz. Analyse expérimentale sur l'Impact de courant Injecter dans un de Protection Cathodique .(2019).
- [27] BARGIEL, Maxim. *Étude et extension du procédé L-is pour la vérification et l'enrichissement automatiques de glossaires formels*. Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa,2011.
- [28] Roche, M. L'essentiel sur la protection cathodique. Centre français de l'Anticorrosion (CEFRACOR), 14. (2015).
- [29] BERNARD Marielle. Protection Cathodique .05 Juliet 2022).
<https://carbonimpulse.com/category/protection-cathodique/>
- [30] Herlambang K, Wibowo I S, Junaedi M. Cathodic Protection Online Monitoring Using a Low Power Wide Area Network Communication System. Natural Sciences Engineering and Technology Journal.2023; 3: 224-231.
- [31] EXTRAIT GUIDE TECHNIQUE DISTRIBUTION GAZ Sonelgaz Toggourt. (2020).
- [32] Bouzidi Djamel. Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines. Université du Québec, l'Ecole de technologie supérieure; 2011.
- [33] Mohellebi F, Hellal F, Khalfi M, Kaci S. Utilisation de l'énergie solaire dans la protection cathodique de canalisations enterrées. Revue des Energies Renouvelables.2014;17:159-171.
- [34] Fillali.S, chaabi.A. Methodes de calcul pour la conception des systemes de protection cathodique des structures longilignes». Ecole nationale polytechnique bibliotheque. Alger :université d'alger,1978.



Annexes



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

- Région de Ouargla -

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode OCTOBRE 2023

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01

Lecture sur les cadrans de redresseur :

Intensité :1,5.....Ampères
Tension :2,5.....Volts
Rhéostat :13.....%

Lecture sur compteur électrique :

Nouvel index2275..... KWh
Ancien index :2263.....KWh
Consommation :12.....KWh

Mesures sur redresseur :

Intensité débitée :1,5.....Ampères
Tension de sortie:2,5.....Volts
Résistance déversoir/sol :Ohm

MESURES DE POTENTIELS (mV)

Φ.Φ.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1258		
2	-1280		
3	-1290		
4	-1457		
5	-1497		
6	-1536		
7	-1606		
8	-1620		
9	-1564		
10	-1600		
11	-1511		
12	-1530		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

→ Région de Ouargla →

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode NOVEMBRE 2023

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :2,5.....Ampères Tension :2,5.....Volts Rhéostat :13.....% <u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2286..... KWh Ancien index :2275.....KWh Consommation :11.....KWh		<u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :2,5.....Ampères Tension de sortie:2,5.....Volts Résistance déversoir/sol :Ohm	
• MESURES DE POTENTIELS (mV)			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1256		
2	-1285		
3	-1290		
4	-1321		
5	-1365		
6	-1406		
7	-1481		
8	-1495		
9	-1444		
10	-1409		
11	-1395		
12	-1320		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

• Région de Ouargla •

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode DECEMBRE 2023

PICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<p><u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :2,5.....Ampères Tension : ...2,5.....Volts Rhéostat :13.....%</p> <p><u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2295..... KWh Ancien index :2286.....KWh Consommation :9.....KWh</p>	<p><u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :2,5.....Ampères Tension de sortie:2,5.....Volts Résistance déversoir/sol :Ohm</p>		
<p>•</p> <p>MESURES DE POTENTIELS (mV)</p>			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1272		
2	-1293		
3	-1309		
4	-1336		
5	-1357		
6	-1409		
7	-1492		
8	-1504		
9	-1487		
10	-1468		
11	-1443		
12	-1379		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

• Région de Ouargla •

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode JANVIER 2024

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :2.....Ampères Tension :2,5.....Volts Rhéostat :13.....%		<u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :2.....Ampères Tension de sortie :2,5.....Volts Résistance déversoir/sol :Ohm	
<u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2312.....KWh Ancien index :2295.....KWh Consommation :17.....KWh			
• MESURES DE POTENTIELS (mV)			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1360		
2	-1382		
3	-1407		
4	-1456		
5	-1525		
6	-1538		
7	-1756		
8	-1732		
9	-1702		
10	-1690		
11	-1624		
12	-1623		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

• Région de Ouargla •

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode FEVRIER 2024

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :1,5.....Ampères Tension :3.....Volts Rhéostat :13...% <u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2195..... KWh Ancien index :2177.....KWh Consommation :18.....KWh		<u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :1,5.....Ampères Tension de sortie :3.....Volts Résistance déversoir/sol :Ohm	
• MESURES DE POTENTIELS (mV)			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1328		
2	-1337		
3	-1364		
4	-1421		
5	-1471		
6	-1598		
7	-1689		
8	-1693		
9	-1634		
10	-1643		
11	-1564		
12	-1585		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز-التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

• Région de Ouargla •

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode MARCH 2024

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :1,5.....Ampères Tension :2,5.....Volts Rhéostat :13.....% <u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2211..... KWh Ancien index :2195.....KWh Consommation :16.....KWh		<u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :1,5.....Ampères Tension de sortie:2,5.....Volts Résistance déversoïr/sol :Ohm	
• MESURES DE POTENTIELS (mV)			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1339		
2	-1352		
3	-1377		
4	-1425		
5	-1504		
6	-1574		
7	-1714		
8	-1717		
9	-1642		
10	-1655		
11	-1575		
12	-1607		

Protection cathodique



الشركة الجزائرية للكهرباء والغاز - التوزيع
Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution

Direction de Distribution Touggourt
Service Technique Gaz
Service Technique Gaz Touggourt

• Région de Ouargla •

N°
Année

Mesures par Poste soutirage/ Anode AVRIL 2024

FICHE DE MESURE MENSUELLE

POSTE DE SOUTIRAGE N° : 01			
<u>Lecture sur les cadrans de redresseur :</u> Intensité :1,5.....Ampères Tension :2,5.....Volts Rhéostat :13.....% <u>Lecture sur compteur électrique :</u> Nouvel index2223..... KWh Ancien index :2211.....KWh Consommation :12.....KWh		<u>Mesures sur redresseur :</u> Intensité débitée :1,5.....Ampères Tension de sortie:2,5.....Volts Résistance déversoir/sol : 13.....Ohm	
• MESURES DE POTENTIELS (mV)			
P.P.N=°	Marche	Arrêt	OBS
1	-1280		
2	-1295		
3	-1320		
4	-1390		
5	-1450		
6	-1530		
7	-1760		
8	-1600		
9	-1600		
10	-1550		
11	-1520		
12	-1500		