



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur  
Et de la recherche scientifique  
Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie mécanique



**Mémoire**  
**Pour l'Obtention du Diplôme du Master**  
**Génie mécanique**  
**Option: maintenance industrielle**

**Thème**

**Etude sur la méthode de maintenance par protection  
cathodique - Cas de la ligne de pipeline GZ1 40''**

**Présenté par:**

**MARIF Abdelhakim**

**Soutenu le:24 /06/2014**

**Devant le jury composé de :**

**Président : Mr BOURDIM Abdelghaffour**

**Encadreur : Mr BENMOUSSAT Abderrahim**

**Examineurs : Mr SEBAA Fethi**

**Mr BELKAID Mohamed**

**Membre invité Mr BELABACI Djelloul**

**Dpt génie mécanique Université de Tlemcen**

**Dpt génie mécanique Université de Tlemcen**

**Dpt génie mécanique Université de Tlemcen**

**Dpt génie mécanique Université de Tlemcen**

**Directeur DRC/Sonatrach – Bethioua Oran**

**Année universitaire 2013-2014**

# ***Remerciements***

*Louange à notre seigneur et créateur ALLAH qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir incité à acquérir le savoir. C'est à lui que j'adresse ma gratitude en premier lieu.*

*Je tiens à remercier vivement :*

*Monsieur BENMOUSSAT Abederahim ; professeur au département de génie mécanique à l'Université de l'ingénieur Abou Baker Belkaid de Tlemcen pour m'avoir orienté dans mon travail, d'avoir accepté d'être mon encadreur qu'en plus de sa disponibilité, ses orientations et ses conseils avisés a su bien m'encadrer et me soutenir tout au long de ce travail.*

*Toute la direction et le personnelles de la DRC (direction de la réparation des canalisations) SONATRACH, Bethioua, et surtout Le directeur monsieur D Belabassi, et les travailleurs de la station STT (station de traitement des tubes).*

*Le chef département de protection cathodique Mr Memchoute et les personnels de service PC ; particulièrement Mr Henni Bachir (ingénieur) qui m'aider et conseiller durant mon stage.*

*Je tiens à remercier tous les membres de jury pour avoir accepté de présider et d'examiner ce travail :*

*Monsieur BOURDIM Abdelghafour président de jury*

*Messieurs SEBAA Fethi et BELKAID, de l'Université de Tlemcen, pour l'examination du mémoire.*

*Tous mes remerciements profonds vont également à tous les enseignants de Génie mécanique de la faculté de technologie, université Abou Bekr Belkaid TLEMEN, et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin.*



# ***Dédicaces***

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.*

*A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études.*

*A ma grand-mère, mes frère Yassine, Miloud et ma sœur.*

*A toute La famille, MARIF et la famille ZITOUNE.*

*A tous mes amis (es) : Abderrazzak, Hadi, Hichem, Ghoulem-eddin, Ismail, Soufiane, Med.*

*Mes collègues de master en génie mécanique option Maintenance Industrielle (Med, Rouba, Ali,...) 2013-2014.*

## Table des matières

Liste des figures et des tableaux

Liste des abréviations et symboles

المخلص

Résumé

Abstract

### **Introduction générale**

Introduction générale.....1

### **Chapitre 01 : Corrosion et prévention des conduites souterraines**

Introduction.....3

1. Corrosion des aciers..... 3

2. Types de corrosion .....4

3.1 Corrosion électrochimique.....4

3.2 Corrosion par piqûres.....5

2.3Corrosion par aération différentielle.....6

2.4Corrosion galvanique .....7

2.5 Corrosion sélective .....7

2.6 Fissuration par corrosion sous contrainte (FCC).....7

2.7 Corrosion inter granulaire.....8

2.8 Corrosion par frottement, usures et cavitation .....8

2.9 Corrosion biologique.....8

2.10 Corrosion par courants vagabonds.....9

2.11 Corrosion généralisée.....9

4. Moyens de lutte contre la corrosion.....10

5. Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH-tension).....10

6. Prévention de la corrosion des conduites enterrées .....12

6.1 Protection passive par revêtements.....12

6.2 Protection par inhibiteur de corrosion.....14

6.3 La protection active (Protection cathodique).....14

6.3.1 Principe de la protection cathodique.....15

6.3.2Critères de la protection cathodique.....16

6.3.3 Facteurs affectant la validité des critères.....16

6.3.4 Type de protection cathodique.....	17
6.3.5 Avantages et inconvénients des systèmes de la protection cathodique.....	20
6.3.6 Facteurs affectant la protection cathodique.....	20
6.3.7 Effets de la protection cathodique.....	22
7. Synthèse bibliographique.....	24
CONCLUSION.....	26

**Chapitre 02 : Contexte industriel**

Introduction.....	27
1. Présentation de l'entreprise.....	27
2. Missions de RTO.....	28
3. Présentation de ligne GZ1 40'' .....	29
4. Méthodes de détection CND (ultrasons et flux magnétique).....	32
4.1 Inspection en ligne et diagnostic.....	32
4.2 Action de pré-inspection.....	32
4.3 Outils d'inspection en ligne.....	32
4.3.1 Les outils de configuration.....	33
4.3.2 Outil de détection de pertes de métal.....	33
4.4 Evaluation des défauts détectés durant L'inspection.....	35
5. Méthodes de prévention les pipelines enterrées.....	36
5.1 Protection Passive.....	36
5.1.1 Sélection des revêtements.....	36
5.1.2 Facteur d'efficacité (coating break-down).....	36
5.2.3 Revêtement des tubes corrodés.....	37
5.1.4 Nature et conséquences des défauts de revêtements.....	39
5.2 Protection active (Protection Cathodique).....	40
5.2.1 Conditions préalables à l'application de la protection cathodique.....	40
5.2.2 Equipements de protection cathodique.....	41
5.2.3 Mise en service.....	45
5.2.4 Protection contre les sur tensions, la foudre et les courants vagabonds.....	45
5.2.5 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique.....	46
Conclusion.....	48

## **Chapitre 03 : Matériels et méthodes**

Introduction.....	49
1. Caractérisation de l'acier X60 API 5L.....	49
1.1 Évolution.....	49
1.2Caractéristiques des aciers API.....	50
2. Résistivité du sol.....	51
2.1 Généralité.....	51
2.2. Degré de résistivité ( $\rho$ ).....	52
2.3Méthodes de mesure de la résistivité du sol – ligne GZ1.....	52
2.4Calcul de la résistivité.....	53
3. pH du sol.....	58
4. L'humidité du sol.....	58
5. Dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé de pipeline gazoduc (GZ1 40'').....	59
5.1. Calcul du nombre de postes, courants, tension et potentiel de pipeline.....	59
5.2 Dimensionnement des anodes (déversoirs).....	61
6. Méthode de relevés de potentiel.....	63
6.1 Campagne de mesures de potentiels en position ON- (1 <sup>er</sup> semestre 2012).....	65
Conclusion.....	77

## **Chapitre 04 : Résultats et discussion**

Introduction.....	78
1. Résistivité du sol.....	79
2. Dimensionnement de la protection cathodique.....	79
3. Potentiels de protection.....	80
4. maintenance de la ligne de pipeline.....	81
Conclusion.....	82

## **Conclusion générale**

Conclusion et perspectives.....	83
---------------------------------	----

Bibliographie

Annexe

## Liste des figures :

Figure 1.1 : L'équilibre d'un métal dans une solution.

Figure 1.2 : Bilan des différentes formes de corrosion.

Figure 1.3 : Corrosion électrochimique par couple galvanique.

Figure. 1.4 : Pile galvanique de corrosion : + Cathode, - Anode.

Figure 1.5 : Exemples de morphologie des piqûres de corrosion.

Figure 1.6 : Corrosion par aération différentiel.

Figure 1.7 : corrosion galvanique.

Figure 1.8 : corrosion sélective.

Figure 1.9 : corrosion biologique.

Figure 1.10 Corrosion par courant vagabond.

Figure 1.11 : diagramme de Pourbaix E-Ph de fer- eau à 25°C.

Figure1.12 : principe de protection cathodique (anode sacrificielle et courant imposé).

Figure 1.13 : Principes de la protection par anodes sacrificielles.

Figure 1.14 : Principe de la protection par courant imposé.

Figure 1.15 : Effet d'un courant cathodique sur le décollement du revêtement.

Figure 1.16 : Schéma de la zone MPEI (Métal/Polymère/Electrolyte/Interface).

Figure 2.1 : organigramme de SONATRACH.

Figure2.2 : réseau national de transport des hydrocarbures.

Figure 2.3 : la ligne GZ1 montrant les sets station de compression du gaz naturel.

Figure 2.4 : outils intelligents.

Figure 2.5 : les machines de transports des pipelines.

Figure 2.6 : décapage manuel.

Figure 2.7 : coupe et chanfrein des pipes.

Figure 2.8 : Machine de sablage automatique.

Figure 2.9 : revêtement d'un tube de type thermdurcissable.

Figure 2.10 : Le point de mesure.

Figure 3.1 principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode de Wenner



Figure3.2 : résistivité de sol en fonction du pk (pk0-pk170).  
Figure3.3 : résistivité de sol de pk170-pk340.  
Figure3.4 : résistivité de sol de pk342-pk505+500.  
Figure3.5 : Matériels pour la mesure du pH.  
Figure3.6: Methode de mesures de potentiels de la protection cathodique.  
Figure3.7 : Voltmètre.  
Figure3.8 : Différents types d'électrodes de référence.  
Figure3.9 : Potentiel de l'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CNDG/ CC1).  
Figure3.10 : potentiel d'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CC1/ CC2).  
Figure3.11 : potentiel d'ouvrage RGZ1 40" Tronçon (CC2/ CC3).  
Figure3.12 : potentiel d'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CC3/ CC4).  
Figure3.13 : potentiel d'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CC4/ CC5).  
Figure 3.14 : potentiel d'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CC5/ TA).  
Figure 4.1 : Etat de protection de la canalisation sous protection cathodique

**Liste des tableaux :**

Tableau 1.1 Comparaison des éléments de systèmes P.C.  
Tableau 2.1 : liste des caractéristiques des canalisations du sud algérienne.  
Tableau 2.2 implantation des stations de compression, ligne GZ1.  
Tableau 2.3 Spécification technique de l'implantation de ligne GZ1 40".  
Tableau 2.4 : caractéristique de revêtement pour structure enterrée.  
Tableau2.5 : Anodes pour système de protection à anodes solubles (anodes sacrificielles).  
Tableau2.6 : Anodes pour système de protection à courant imposé.  
Tableau 2.7 : type de bakfill.  
Tableau2.8 : les sections de câble normalisées à utiliser en fonction de l'intensité.  
Tableau 2.9 : Fréquence des contrôles de fonctionnement.  
Tableau 3-1 : Evolution des conditions de transport des gazoducs.  
Tableau 3-2 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API.  
Tableau 3-3 : composition chimiques en % de l'acier grade X60 et X100.  
Tableau 3.4. L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité.  
Tableau3.5 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk0-pk170 pour l'Ouvrage GZ1.

Tableau3.6 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk170-pk340 pour l'ouvrage GZ1.

Tableau3.7 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk342-pk505.5 pour l'ouvrage GZ1

Tableau3.8 : Méthodes de mesures indirectes de l'humidité.

Tableau3.9 : résultats de dimensionnement.

Tableau3.10: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1 (CNDG/ CC1)

Tableau3.11: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage RGZ1(CC1/CC2).

Tableau3.12: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC2/CC3).

Tableau3.13: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC3/CC4).

Tableau3.14: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC4/CC5).

Tableau3.15: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC5/TA).

### **Liste des abréviations**

DRC : Direction de réparation des canalisations.

RTO : Région de transport ouest.

STT : Station de traitement des tubes.

GZ1 : Ligne gazoduc n°1.

PC : Protection Cathodique.

API : American Petroleum Institute.

/Cu/CuSo<sub>4</sub> : Par rapport à l'électrolyte de cuivre-sulfate de cuivre saturé

PH : Pression d'hydrogène.

FCC : Fissuration par corrosion sous contrainte.

CND : Contrôle non destructif.

PK : Point kilométrique

Fe/Si : Fer-Silicium.

PPS : Prise de potentiel simple.

PMA : Prise de mesure ampérométrique.

PJI : Prise joint isolant.

PTG : Prise tube/Gaine.

PEP : Prise équipotentiel

## Listes des symboles

Symbole	signification	unité
$\rho$	Résistivité du sol	$\Omega \text{ m}$
$a$	Espacement entre les piquets	m
$b$	Profondeur des piquets	m
$R_0$	résistance d'isolement initiale	$\Omega \text{m}^2$
$\rho_{\text{acier}}$	Résistivité d'acier	$\Omega \text{ m}$
$t$	Durée de vie en année	an
$R_t$	résistance d'isolement du revêtement	$\Omega$
$E_0$	la chute de potentiel aux extrémités de la portée du poste de soutirage	mv
$E_s$	la chute de potentiel au point de soutirage	mv
$R_T$	résistance transversale du revêtement	$\Omega$
$D$	diamètre extérieur de pipe	m
$L$	Longueur de la conduite	m
$S$	Section de la conduite en $\text{m}^2$	$\text{m}^2$
$\alpha$	coefficient d'atténuation	-
$\Upsilon$	résistance caractéristique de revêtement	$\Omega$
$L_B$	la longueur du bras	m
$L_P$	Portée totale d'un poste de soutirage	m
$N_P$	nombre de postes	-
$I$	l'intensité de courant soutiré par poste	A
$R_d$	résistance du déversoir	$\Omega$
<b>R câble</b>	résistance du câble	$\Omega$
$R_{\text{pipes}}(\Upsilon)$	résistance caractéristique de pipe	$\Omega$
<b>Mt</b>	La masse totale de Ferro-silicium nécessaire pour les 25 ans	kg
<b>Na</b>	nombre d'anodes	-

## ملخص

ركزت هذه الدراسة على الحفاظ على نظام حماية الهياكل المعدنية لخط أنبوب الغاز الذي يربط حاسي الرمل وأرزيو، ونخص بذلك الحماية المزدوجة لأنابيب الصلبة التي تتمثل في الحماية السلبية ونعني بها الطلاء والحماية الكاثودية بواسطة الأنودات او التيار، الا ان خطر التآكل يصعب تفاديه ونخص بذلك بعض المناطق التي تكون فيها المقاومة التربة منخفضة (جهة الشمال).

المنهجية التي اعتمدها في هذه الدراسة تمثلت في دراسة قياسات المقاومة التربة وكذا القياسات المتعلقة بالكمون على خط الغاز GZ1، بعد التصميم الحسابي لنظام الحماية الكاثودية.

وأظهرت النتائج أن القيم المقاسة لتوثر الحماية يتغير من 900 mv إلى -2500-mv مع العلم ان عتبة الحماية مقدرة بـ 850 mv / Cu/CuSO4 باستثناء بعض القياسات التي كانت دون ذلك. القيم تبين ان مقاومة التربة بين حاسي رمل ومحطة الضخ رقم 4 ان التربة اقل تآكل لكن بين هذه الأخيرة و ارزيو نجد التربة تآكلية. واطهرت حسابات التصميم نظام الحماية الكاثودية ان الخط يتطلب 16 محطة و6 انودات لكل محطة من نوع Fe-Si.

**الكلمات الرئيسية:** تآكل -المقاومة التربة API- فولاذ -الحماية الكاثودية -المحتملة.

## *Abstract*

*The study focused on the maintenance of the system of protection of metal structures: that of the pipeline GZ1 line that connects Hassi R'Mel and Arzew. Generally, despite the double protection of steel pipes by the passive protection provided by coatings and cathodic protection by impressed current or sacrificial anodes, you can save by corrosion failures, including peaks corrosion (Pitting corrosion) and particularly in areas where the soil resistivity is low (of the north). The methodology we have adopted in this work is to take measurements of soil resistivity measurements and potential GZ1 line after a sizing calculation Of Cathodic Protection system.*

*The results showed that the measured values of the protection potential range from - 900 MVA - 2500 mv, et whose protection level is - 850 mv / Cu/CuSO4.*

*There are exception points of potential drop. Values determined de résistivité soil have shown that soils are moins corrosifsà GZ1 line from Hassi R'Mel to CC4, but AC4 Arzew the soil is generally corrosive.*

*The calculation sizing cathodic protection system considering the landfill environment of the pipe (G) showed that the line rectifier stipule 16 posts six anodes and Fe-Si-type by weir.*

*Keywords: Corrosion - Soil Resistivity - API Steels - Cathodic Protection - Potential.*

## Résumé

*L'étude a porté la sur maintenance du système de protection des ouvrages métallique : celle du la ligne gazoduc GZ1 qui relie entre Hassi R'mel et Arzew. Généralement, malgré la double protection de l'acier des canalisations par la protection passive assurée par des revêtements et la protection cathodique par courant imposé ou anodes sacrificielles, on peut enregistrer des défaillances par corrosion, notamment par pics de corrosion (Pitting corrosion) et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible (partie de nord).*

*La méthodologie que nous avons adoptée dans ce travail consiste à relever des mesures de résistivité du sol et les mesures de potentiel de la ligne GZ1, après un calcul de dimensionnement du système de protection cathodique.*

*Les résultats ont montrés que les valeurs mesurées du potentiel de protection varient de  $-900$  mv à  $-2500$  mv et dont le seuil de protection est de  $-850$  mv /Cu/CuSo<sub>4</sub>. On exception des points de chute de potentiel. Les valeurs de résistivité du sol déterminées ont montrés que les sols de la ligne GZ1 sont moins corrosifs à partir de Hassi R'mel jusqu'à CC4, mais de CC4 à Arzew le sol est généralement corrosif.*

*Le calcul de dimensionnement du système de protection cathodique tenant compte le milieu d'enfouissement de la canalisation (Sol) a montré que la ligne besoin de 16 postes redresseurs et 6 anodes de type Fe-Si par déversoir.*

**Mots clés :** Corrosion – Résistivité du sol - Aciers API – Protection cathodique – Potentiel.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'acheminement des hydrocarbures depuis leurs gisements vers les zones de raffinage et les centres de distribution et de consommation, produits pétroliers et gaz naturel s'effectue par canalisation. Un réseau de pipelines sur plusieurs kilomètres a été construit à travers le monde. En Algérie on estime ce réseau à plus de 18000 Kms tout diamètre confondu et exploité par la société SONATRACH.

On s'est intéressé dans ce travail à la ligne GZ1 de ce réseau qui relie le gisement de gaz naturel à HassiR'Mel (HR) et la raffinerie d'Arzew (AR) sur une distance de 505.5 Kms. Les canalisations, dont le matériau constitutif est l'acier micro allié de nuance API 5L X60 selon la norme API (American Petroleum institute). Elles sont protégées par un revêtement externe et interne (protection passive) aussi étanche que possible afin d'isoler l'acier des milieux corrosifs. Ces revêtements sont à base de liants hydrocarbonés (brai de houille ou de bitume de pétrole) ou encore constitués par système multicouche associant un primaire époxy pour l'adhérence à l'acier, un adhésif intermédiaire et une couche de plusieurs millimètres en polymères PE polyéthylène, ou PP polypropylène. Cette protection est complétée par une protection cathodique active dont le potentiel est maintenu à  $-850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$  par courant imposé ou par anode sacrificielle.

Des travaux d'inspection menés sur cette ligne [12], [14] après une quarantaine d'années d'exploitation ont montrés que les aciers sont particulièrement exposés à des risques de défaillances du faite de leur environnement (tubes enterrées) et l'apparition des phénomènes de dégradation par corrosion et par fissuration sur les surfaces extérieures de la ligne :

- la formation des piqures de corrosion (pitting corrosion)
- Perforation des canalisations par suite de la propagation des défauts de surface (pics de corrosion, fissures...)
- Déformation géométriques
- Dégradation et décollement des revêtements
- Ruptures en mode fragile ou en mode ductile de la canalisation sous pression

Les causes de la corrosion, soit 84% sont d'origine technologique et peuvent se développer sur les surfaces de l'acier sous certaines conditions telles que le détachement des revêtements, l'insuffisance et/ou l'inexistence de la protection cathodique mettant l'acier à nu en interaction avec le milieu environnant de sol.



L'étude dans le cadre de ce projet portera sur la maintenance du système de protection des structures métalliques enterrées. On s'intéressera particulièrement à la ligne GZ1 du réseau de pipelines exploité par la société SONATRACH – Algérie.

La méthodologie qui sera développée dans ce projet est qu'à partir de l'acquisition des données du contexte industriel géré par DRC (Direction de réparation des canalisations) et RTO (région de transport ouest) - SONATRACH Bethioua – Oran comprenant des mesures du potentiel de la protection cathodique en position on et des mesures de résistivité de sol. Des études seront réalisées dans le but de prédire les défaillances particulièrement les défaillances par corrosion afin d'éviter l'apparition des pics de corrosion (Pitting corrosion) et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible et de maintenir le potentiel de la ligne par rapport au potentiel standard de protection soit  $-850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$  par courant imposé. Ces études seront terminées par des études de dimensionnement de l'ouvrage métallique GZ1.

Le mémoire sera présenté comme suit :

Une étude bibliographique sur les phénomènes de corrosion par les sols et les systèmes de protection passive et active seront donnés dans le chapitre 1 qui sera terminé par une synthèse bibliographique.

Le deuxième chapitre sera consacré au contexte industriel et à la description de la ligne d'étude GZ1 qui comprendra les méthodes de détection CND par ultrasons et par flux magnétique et les méthodes utilisées pour la prévention des conduites enterrées.

Au troisième chapitre, nous introduisons les données de la résistivité du sol et du potentiel de la ligne GZ1 et les calculs du dimensionnement de cette ligne.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons une discussion sur les résultats obtenus et les méthodes de maintenance.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et les perspectives.

# **Chapitre 01**

Corrosion et protection  
des ouvrages  
métalliques

## Introduction

Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux s'opère par canalisations. D'importants réseaux de pipelines ont été construits à travers le monde. En Algérie on estime à plus de 18000Kms le réseau pour tout diamètre confondu. Les tubes sont en acier et sont exposés à des interactions avec les sols ayant pour conséquence le développement des pics de corrosion par perte de métal.

La corrosion est l'action destructrice des métaux qu'exerce le milieu ambiant sur un métal. Elle pose des problèmes techniques et économiques très importants. La corrosion désigne le phénomène par lequel, les métaux tendent à revenir à l'état sous lequel ils se trouvent dans la nature.

La présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmente les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable

La Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion peut se faire par protection passive (revêtements), protection active (protection cathodique) et par inhibition.

### 1. Corrosion des aciers

On désigne sous le nom de corrosion métallique tout processus de dégradation de métaux et alliage faisant intervenir, ou moins partiellement, la composition chimique de leur environnement. La corrosion métallique ramène métaux et alliages à leur état naturel d'oxydes ou de minerais, elle est donc le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif.

A partir du moment où il contient de l'eau, l'environnement devient un milieu corrosif, dit «électrolyte», ce milieu est bien entendu, l'eau elle-même, qui contient certaine quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais il y a aussi les sols qui contiennent plus ou moins de l'humidité.

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

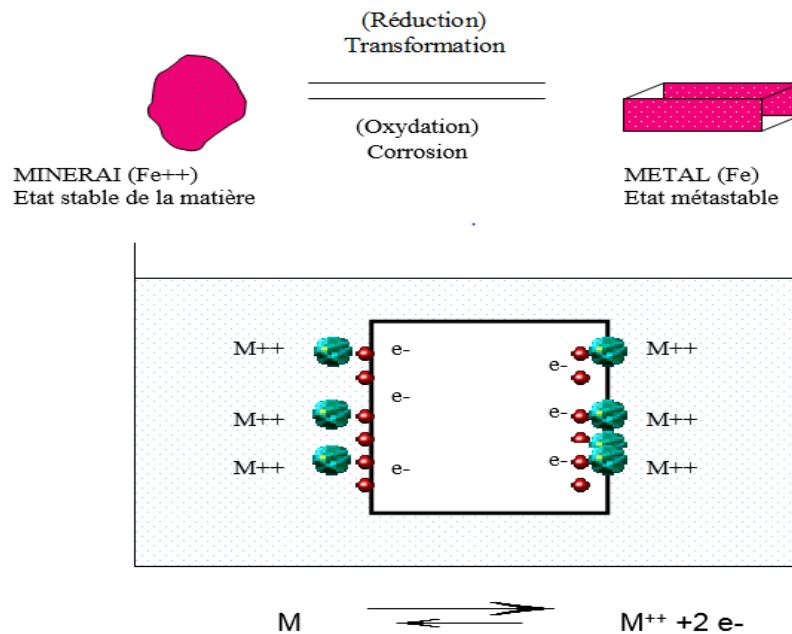


Figure 1.1 : L'équilibre d'un métal dans une solution [3].

## 2. Types de corrosion :

Il existe plusieurs formes de corrosion, la figure (1.2) montre la répartition des différentes formes de corrosion pour les aciers inoxydables.

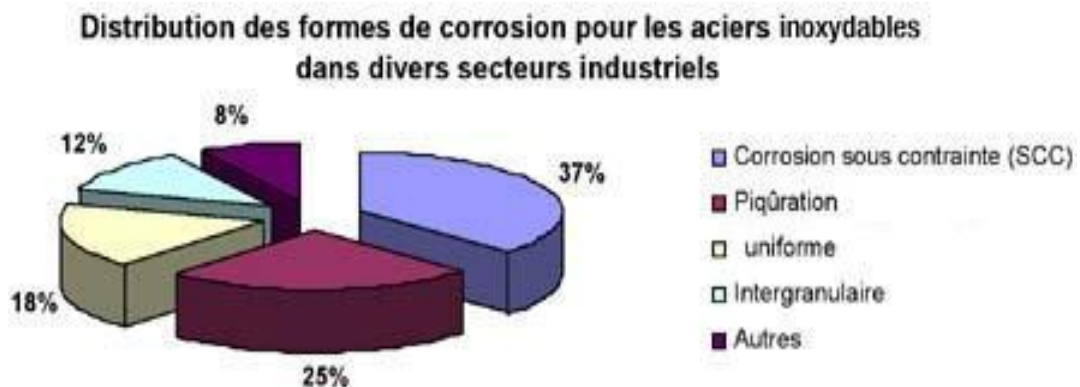


Figure1.2 : Bilan des différentes formes de corrosion.[2]

### 2.1 Corrosion électrochimique

Le mécanisme du processus de corrosion électrochimique est étroitement lié d'une part à la structure de métal et d'autre part à la structure de la solution (la solution est caractérisée par le pH, il s'agit du milieu acide, basique ou neutre).

La solution est caractérisée par la circulation (formation) de courant électrique, c'est-à-dire par le déplacement d'électrons au sein de la masse métallique et par le déplacement des ions positifs et négatifs au sein de l'électrolyte. [1]

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

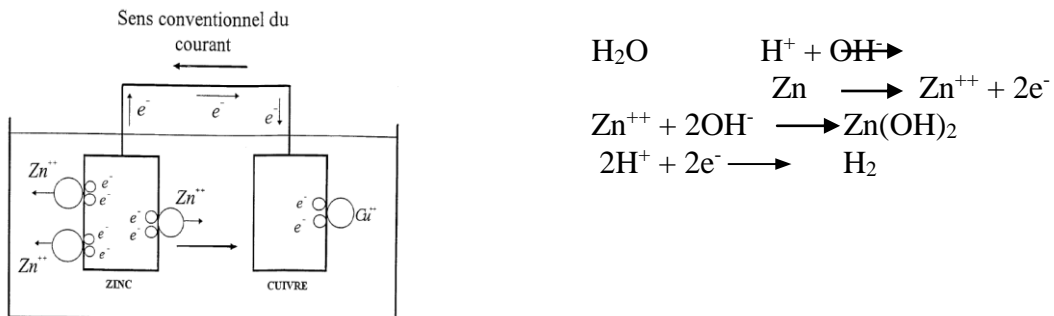


Figure 1.3 : Corrosion électrochimique par couple galvanique [1].

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

### 2.2 Corrosion par piqûres

la corrosion par piqûre se développe localement en formant une pile galvanique de corrosion entre la surface extérieure, passive et cathodique, et l'intérieur de la piqûre, actif et anodique (voir figure (1.2)) entraînant une Cavite qui peut rapidement devenir profonde bien qu'une petite quantité de métal se dissolve globalement.

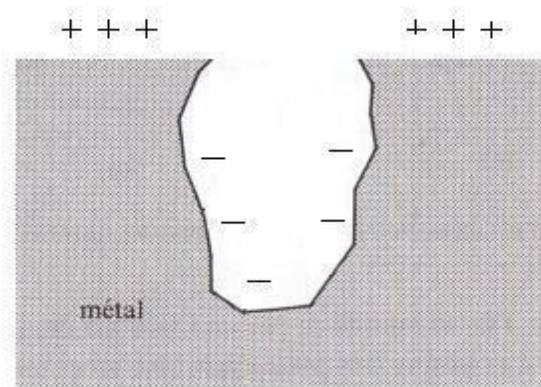


Fig. 1.4 : Pile galvanique de corrosion : + Cathode, - Anode [2].

La morphologie des piqûres de corrosion peut prendre plusieurs aspects selon les conditions expérimentales. La figure (1.4) illustre des exemples de formes de corrosion ([Bar04]) [2].

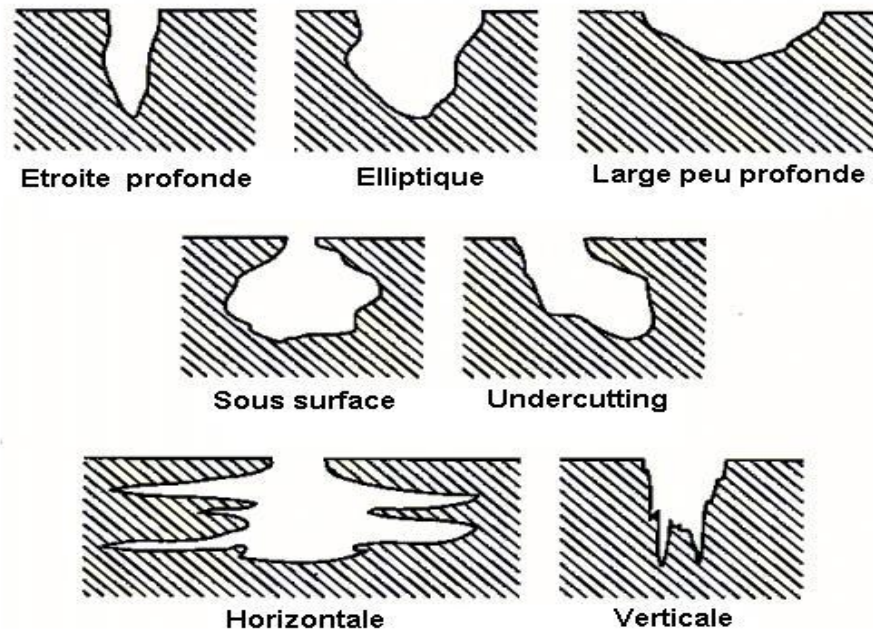


Figure 1.5 : Exemples de morphologie des piqûres de corrosion [2].

### 2.3 Corrosion par aération différentielle

Elle est de nature électrochimique est due à une différence importante de concentration d'oxygène locale du milieu d'où formation de pile dite pile D'EVANS, cas de gouttes d'eau salie a la surface d'une tôle de fer parfaitement propre.

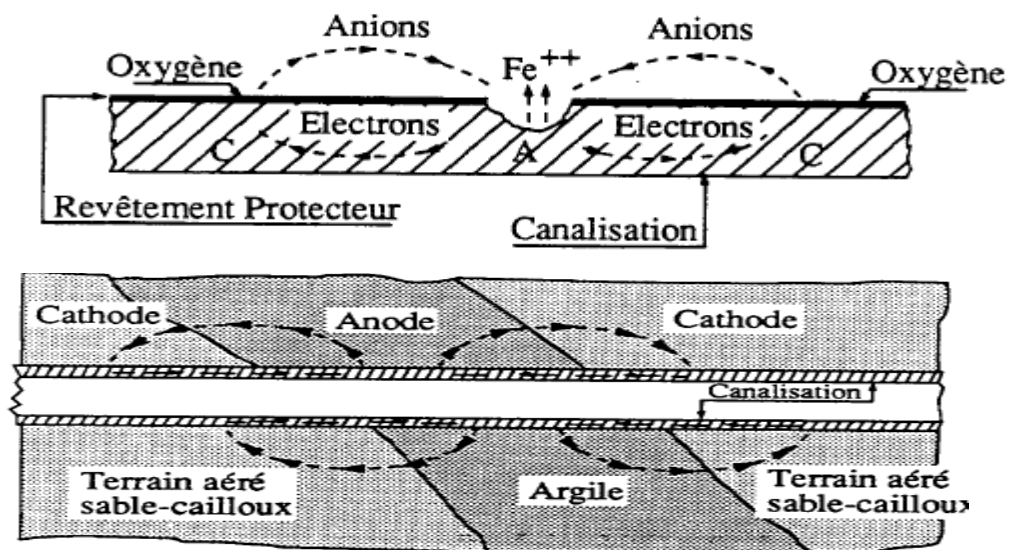


Figure 1.6 : Corrosion par aération différentiel [3].

## 2.4 Corrosion galvanique

C'est, en générale, lorsque deux métaux différents sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux. La corrosion s'établit sur le métal le moins noble et s'arrête sur le métal le plus noble. Les sites anodiques et cathodiques sont distincts. Mais elle se manifeste aussi lorsque les deux parties d'un objet métallique d'un même métal ne sont plus au même potentiel à cause d'une hétérogénéité ou à cause d'un âge différent.

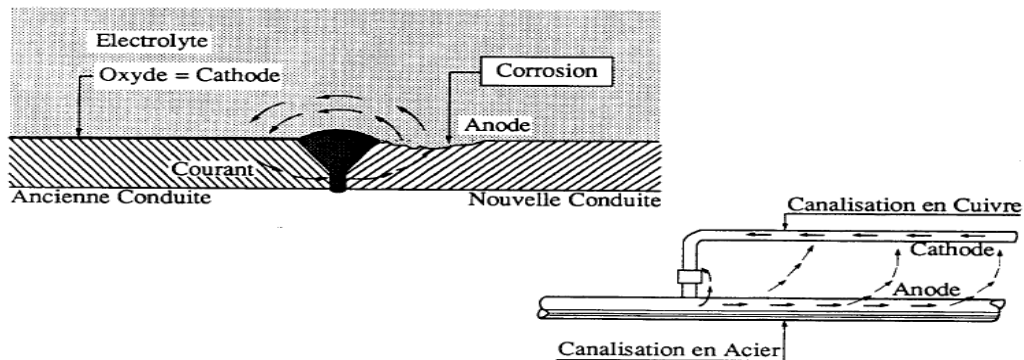


Figure 1.7 : corrosion galvanique [3]

## 2.5 Corrosion sélective

C'est elle dont l'attaque se produit préférentiellement sur un des éléments de l'alliage, la signification des alliages cuivre-zinc et le cas le plus typique. Cette corrosion peut être éliminée par la protection cathodique.

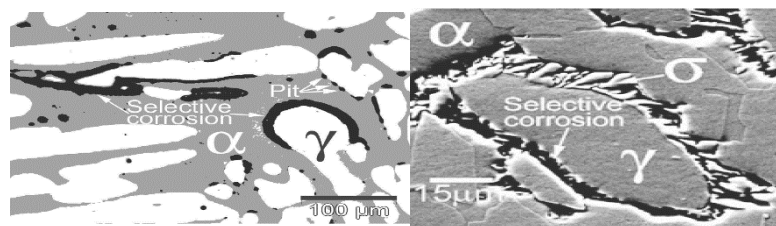


Figure 1.8 : corrosion sélective [3].

## 2.6 Fissuration par corrosion sous contrainte (FCC)

La fissuration par corrosion sous contrainte peut se produire là où des contraintes de traction soutenues s'ajoutent à la corrosion et entraînent la formation de fissures localisées. On observe habituellement la FCC dans les systèmes en acier oxydable [4].

## 2.7 Corrosion inter granulaire

C'est un type d'attaque localisée aux joints de grains d'un métal ou alliage, elle engendre une perte de résistance mécanique. On rencontre ce type de corrosion, notamment dans les soudures d'aciers inox.

## 2.8 Corrosion par frottement, usures et cavitation

Elle est due à une action conjuguée, lorsque deux surfaces métalliques sont très peu distantes l'une de l'autre, les mouvements renouvelés de ce matériel entraînent des vibrations et des frottements répétés des deux surfaces métalliques.

Les brides de fixation de tubes peuvent soumise à la corrosion par frottement par suite de vibrations répétées.

Les moyens pour l'éviter ou tout au moins de la diminuer sont : on peut soit effectuer une lubrification des surfaces avec une huile neutre, soit encore d'effectuer un revêtement jouant le rôle d'amortisseur de vibrations.

La corrosion par cavitation est créée dans un fluide en circulation sous forte agitation localisée. Elle est produite par de hautes et basses pressions. Il se forme des bulles à l'interface métal-liquide en éclatant, provoquent une rupture du film protecteur ou une cavité que s'accroît sous l'action électrochimique ou chimique de la corrosion elle-même. La cavitation – érosion se produit sur les faces exposées des hélices, les pôles des turbines hydrauliques, les canalisations de distribution.

## 2.9 Corrosion biologique

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

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

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



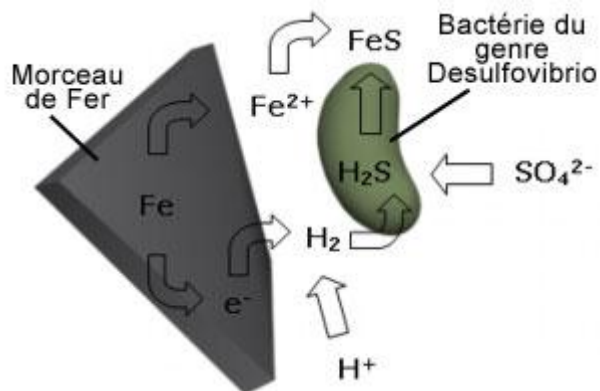


Figure 1.9 : corrosion biologique [3].

### 2.10 Corrosion par courants vagabonds

Le courant vagabond comme son nom l'indique, circule en dehors des circuits normaux. Il cherche à suivre les circuits de moindre résistance, tel que les canalisations métalliques, l'endroit où il quitte celle a subit une attaque anodique quelque fois rapide et locale.

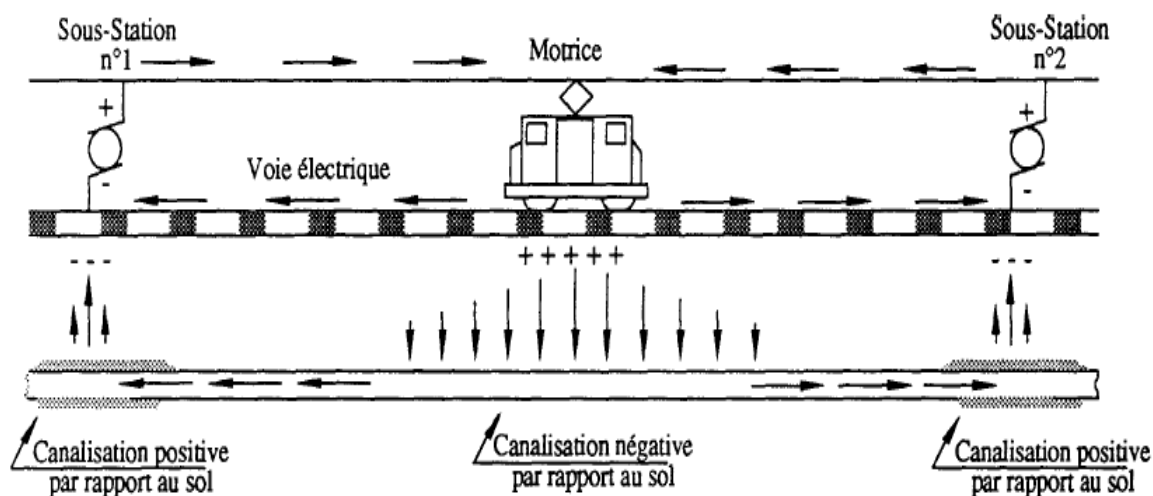


Figure 1.10 Corrosion par courant vagabond [3].

### 2.11 Corrosion généralisée

Elle affecte toute l'interface métal - milieu corrosif par suite d'une délocalisation des zones anodiques et cathodiques. Elle peut être uniforme ou non. C'est le cas de l'enroulement de l'acier dans les environnements naturels [4].

### 3. Moyens de lutte contre la corrosion

Les moyens de luttés contre la corrosion peuvent être classés en quatre directions d'actions possibles :

#### \*Choix du matériel de fabrication des conduites

Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales.

#### \*Application de revêtements

Ce type de protection a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.

#### \* Application de la protection cathodique

La technique de protection repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu' à la zone d'immunité.

#### \*Utilisation des inhibiteurs de corrosion

Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche passive sur la paroi interne qui empêche la production des cellules de corrosion.

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

Le professeur, Marcel POURBAIX a établi pour la plupart des métaux des diagrammes pH - potentiel d'équilibre des réactions, qui décrivent les différentes réactions théoriques possibles entre un métal et ses ions en présence d'eau. Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe-H<sub>2</sub>O à 25°C (Figure 3.3), plusieurs points thermodynamiques critiques peuvent être soulevés (Benjamin et Fergusson, 1996) :

- Il est possible de ramener le potentiel de Fer à la région d'immunité en appliquant un moyen de protection cathodique adéquat.
- Il n'existe aucun pH pour lequel le fer métallique et le fer bivalent (ions ferreux) sont stables en présence de l'oxygène.
- Lorsque l'acier atteint des potentiels plus électropositifs en présence d'un milieu acide (pH faibles) ou intermédiaires, les ions Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup>, ont tendance à se stabiliser

sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de corrosion et en présence des conditions thermodynamiques favorables.

- Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le  $Fe_2O_3$  ou le  $Fe_3O_4$  a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du Fer en formant une couche protectrice.

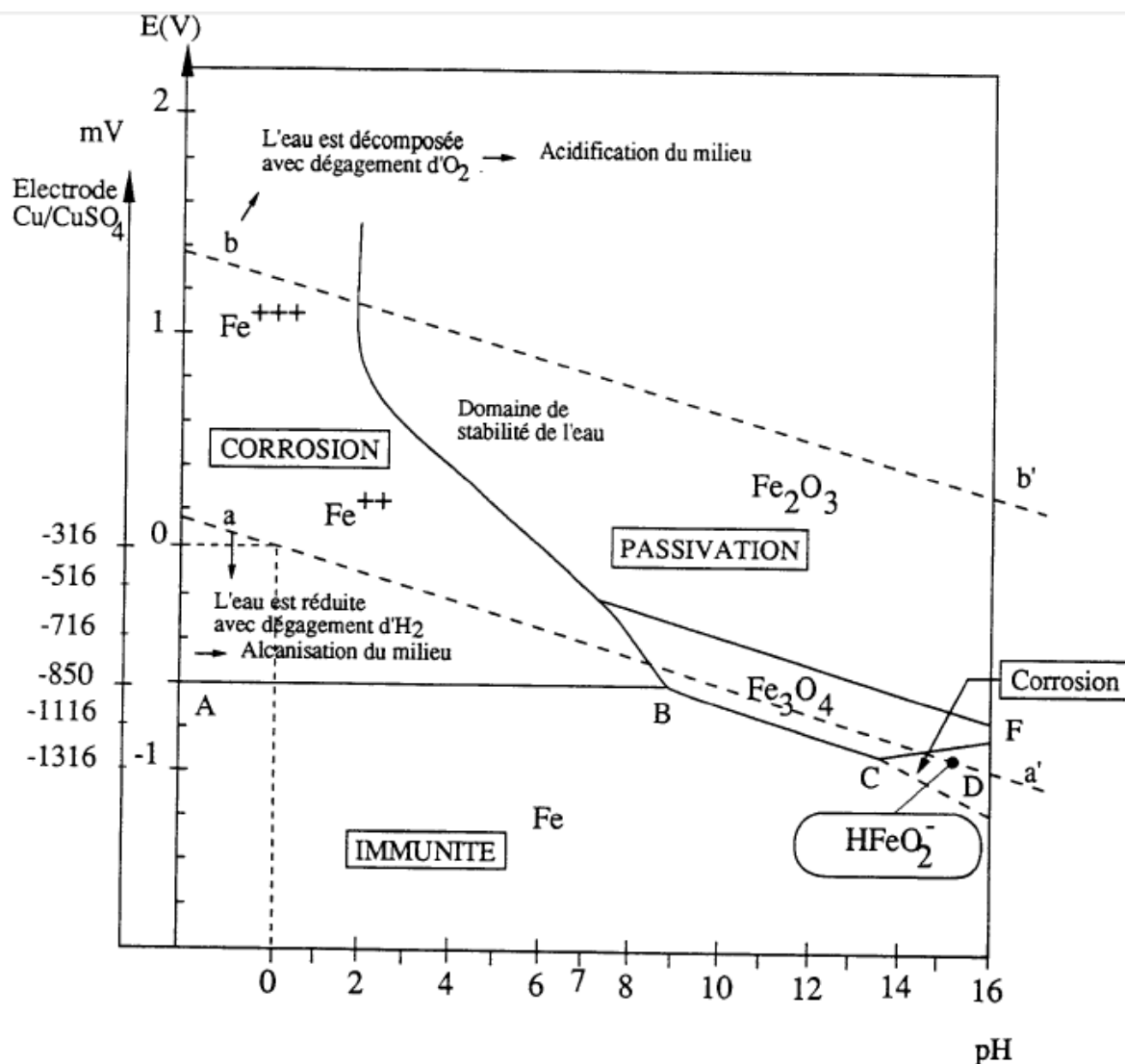


Figure 1.11 : diagramme de Pourbais E-Ph de fer\_eau à 25°C[5].

D'après le diagramme en déduire trois domaines théoriques de situation du métal, tel que :  
**Domaine de passivité** : C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion.

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

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

## 5. Prévention de la corrosion des conduites enterrées

Les conduites métalliques (que ce soit celle de l'eau, du gaz ou autre) enterrées dans le sol sont toutes exposées au danger de la corrosion.

Pour remédier à ce problème et pour assurer la protection des structures enterrées, il est souvent nécessaire d'associer plusieurs procédés et qui sont la protection passive (revêtement et enrobage) et active (protection cathodique); ainsi, les conduites seront protégées par un revêtement externe qui a pour but d'isoler au maximum le métal du milieu corrosif, cependant un tel revêtement n'est jamais parfait et la protection cathodique permet de palier les défauts en plaçant le métal exposé dans des conditions d'immunité par rapport à la corrosion.

### 5.1 Protection passive par revêtements

La protection de la surface extérieure de la conduite métallique par un type de revêtement approprié a pour but de former une barrière qui l'isole de son milieu environnant. Ce type de revêtement ne fournit pas de protection absolue et définitive en raison des défauts susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. Afin d'être performant, le revêtement appliqué doit répondre à certaines spécifications dont, entre autres, l'adhérence, la bonne résistance à l'impact, le bon isolement électrique et aussi une stabilité durable de sa composition chimique. [6]

Deux principes permettent d'assurer la protection par revêtement :

1er principe : repose sur l'imperméabilité élevée du revêtement. Celui-ci doit adhérer parfaitement à la surface métallique, et être étanche à l'eau et à l'air. En outre, il doit constituer une barrière vis-à-vis d'espèces ioniques, avoir une résistivité et une rigidité diélectrique suffisantes et conserver toutes ces propriétés dans le temps. Ce système est généralement employé sur les structures enterrées. Il est complété d'une façon

systématique par la protection cathodique pour pallier les risques de corrosion là où le revêtement est dégradé.

2ème principe : consiste à créer au niveau du métal une couche protectrice en utilisant soit le pouvoir passivant de certains sels métallique (chromates, phosphates), soit le caractère anodique relativement à l'acier de certains métaux (zinc, aluminium). Afin d'augmenter la durabilité, ces systèmes sont le plus souvent revêtus d'une couche de peinture limitant ainsi les échanges avec l'environnement. L'utilisation de ce procédé est destinée en particulier aux ouvrages aériens. Suivant la catégorie de l'ouvrage à protéger, la sélection, la mise en œuvre et le contrôle du revêtement protecteur doivent répondre à un ensemble de critères.

Dans tous les cas, il est toujours souhaitable que le revêtement utilisé possède les qualités suivantes :

✦ Une excellente adhérence avec le métal support pour éviter l'infiltration du milieu électrolyte et les risques de corrosion qui y sont associés malgré la présence d'un système de protection cathodique fonctionnant correctement.

✦ Une bonne rigidité diélectrique (caractérise l'aptitude du revêtement à résister à des champs électriques intenses).

✦ Une résistance d'isolement élevée vis-à-vis du milieu électrolytique afin de limiter la consommation de courant de protection. Cette résistance d'isolement est la résultante de nombreux paramètres liés soit aux caractéristiques du milieu électrolytique environnant, soit aux différentes propriétés du revêtement et en particulier :

- Une résistivité élevée ;
  - Une perméabilité minimale à l'eau, aux ions et au gaz ;
  - Une grande inertie aux agents chimiques et biologiques contenus dans le milieu environnant,
  - Une bonne résistance aux contraintes mécaniques et thermiques lors des opérations de construction ;
- ✦ Une bonne conservation dans le temps des propriétés énumérées ci-dessus [4].

❖ **Catégories de revêtements :**

On distingue trois catégories de revêtements pour les conduites enterrées :

### Revêtements à base de produits hydrocarbonés :

Le revêtement est constitué d'un primaire synthétique ou hydrocarboné et d'une armature en toile de verre imprégnée d'un liant hydrocarboné. Les brais de houille et les bitumes de pétrole, ainsi appliqués, présentent des épaisseurs d'environ 3 mm [7].

### Revêtements thermoplastiques :

Revêtement en polyéthylène extrudé, avec primaire d'accrochage à base de caoutchouc butyle d'épaisseur 3 mm environ.

Bandes adhésives minces, à support PVC, ou polyéthylène, appliquées sur primaire, et recouvertes d'une bande de protection mécanique supplémentaire [7].

### Revêtements à base de produits thermodurcissables :

Ce sont des revêtements constitués par des résines époxydes, en épaisseur de 500µm environ, ou par des polyuréthanes ou des produits composites tels les brais polyuréthanes et les brais époxydes [7].

## **5.2 Protection par inhibiteur de corrosion**

L'inhibiteur de corrosion est une forme de substance rajoutée avec une faible concentration aqueuse transportée pour réduire le taux de corrosion sur les conduites du réseau (Nguyen-Thuy,2008). Les interactions chimiques s'établissant entre l'inhibiteur et la surface du métal permettent de former un écran passif sur la paroi de la conduite qui sert à empêcher le processus de corrosion de se produire. Les inhibiteurs de corrosion sont de deux types, soit anodique ou cathodique. Les inhibiteurs anodiques sont conçus pour interférer avec la réaction de corrosion sur les sites anodiques. Quant aux inhibiteurs cathodiques, ces produits sont destinés à réduire le flux par l'effet de la réaction cathodique. Par ailleurs, les inhibiteurs de corrosion peuvent fonctionner autrement comme agent d'inhibition. Ils peuvent être injectés dans le liquide transporté pour ajuster son pH, récupérer la quantité d'oxygène dissout et neutraliser les espèces acides en solution. Ainsi, ces formes d'utilisation sont très pratiques et en même temps efficaces dans la lutte contre la corrosion [6].

## **5.3 La protection active (Protection cathodique) :**

Lorsqu'un métal entre en contact avec un électrolyte conducteur (eau ou sol), il s'établit spontanément un système d'échange ionique à l'interface métal/électrolyte sous l'effet du potentiel développé. Cet événement électrochimique continu produit simultanément deux phénomènes : une dissolution métallique aux sites anodiques produite par les réactions

d'oxydation d'une part, et une formation d'un dépôt métallique créée par les réactions de réduction aux sites cathodiques d'une autre part. L'utilisation de la protection cathodique est basée sur l'injection d'un courant continu qui permet d'abaisser le potentiel naturel du métal de la zone active vers la zone d'immunité. Le système de protection cathodique a vu un développement rapide et une application beaucoup plus large dans l'industrie pétrolière et gazière. [6]

### 5.3.1 Principe de la protection cathodique

La Protection Cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. Comme valeur de potentiel, au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9, on admet le critère de  $-850\text{mV}$ , mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée [4].

Le principe de la Protection Cathodique trouve son application dans la pile élémentaire où l'une des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas.

Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure :

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive (figure 1.11 (a)) ;
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé (figure 1.11 (b)).

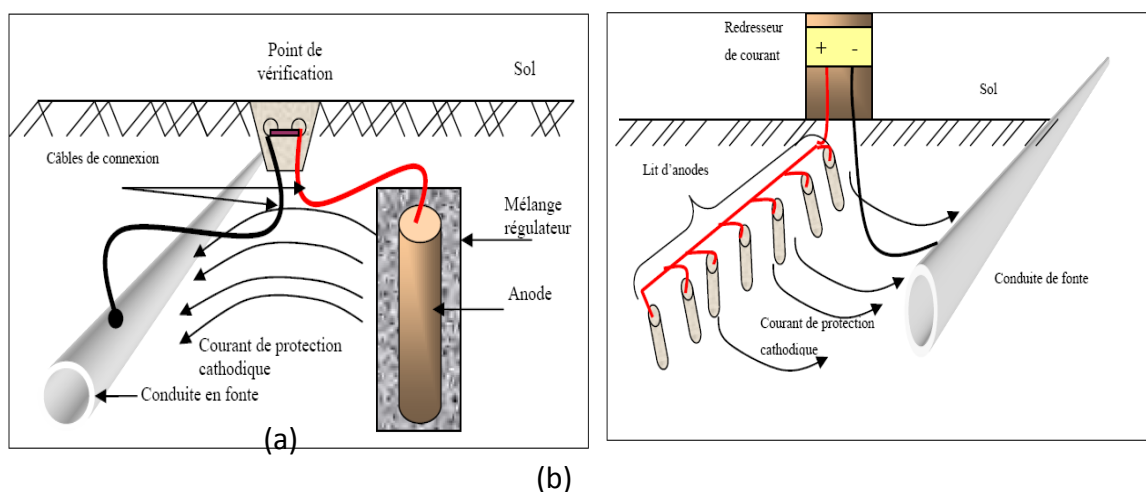


Figure 1.12 : principe de protection cathodique (anode sacrificielle et courant imposé) [6].

### 5.3.2 Critères de la protection cathodique

Les critères de la protection cathodique pour une structure d'acier enterrée dans le sol ou submergée sont déterminés par le standard de la « NACE ». Cette norme énonce ce qui suit:

\* Le seuil de potentiel de protection cathodique relevé sur la structure d'acier par l'intermédiaire d'une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre doit atteindre la valeur de -850 mV. Cette valeur est le critère le plus souvent utilisé pour accepter le niveau de protection cathodique.

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

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

### 5.3.3 Facteurs affectant la validité des critères

Les critères de la protection cathodique peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que la température, la bactérie, l'influence du courant alternatif et la qualité du métal de la structure [6].

#### ❖ Température

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

#### ❖ Bactérie Sulfato-réductrice

En présence de la bactérie Sulfato-réductrice à la température ambiante, le critère du potentiel de protection recommandé pour une structure d'acier enterrée passe à -950 mV (Cu/CuSO<sub>4</sub>) au lieu de -850 mV et le shift de polarisation doit atteindre le seuil de 200 mV. Cependant, lorsque la température atteint les 60 °C en présence de bactéries, le shift de polarisation doit être ajusté encore une fois de 200 à 300 mV.



### ❖ Courant alternatif

Les investigations réalisées pour l'évaluation du niveau d'interférence des sources de courant alternatif indésirables ont révélé que l'effet d'interférence est proportionnel à la densité du courant présent à l'interface du métal/ électrolyte. Éventuellement, une densité de courant ( $\partial$ ) de 20 A/m<sup>2</sup> n'affecte pas les critères de protection alors que pour une densité supérieure de 100A/m<sup>2</sup>, le dommage de corrosion est considérable.

### ❖ Type de métal

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

### ❖ Métaux dissimilaires

Lorsque deux structures métalliques dissemblables sont connectées entre elles par un moyen approprié, l'effet de la corrosion galvanique développe un potentiel mixte différent du potentiel individuel de chacun d'elles. Pour cette raison, les critères de protection appliqués précédemment pour l'acier ou la fonte doivent aussi être ajustés.

### ❖ Décollement de revêtement

Lorsque le potentiel de la protection cathodique atteint le niveau de -1,12 V (Cu/CuSO<sub>4</sub>) à l'instant «OFF», l'évolution de l'hydrogène gazeux commence à se produire. Le gaz généré est généralement pris en otage à l'interface métal/revêtement ce qui provoque le décollement du revêtement (décollement cathodique). Il en résulte que ce phénomène va empêcher le courant de protection d'atteindre la zone de la structure affectée. De même, l'électrolyte entourant la structure métallique peut venir combler le vide créé à l'interface métal/revêtement/métal et ce qui permet d'activer les cellules de corrosion. En conséquence, les critères de protection à ces endroits du décollement deviennent difficiles à obtenir.

#### 5.3.4 Type de protection cathodique

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée cathodiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continu dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

1. Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électro-négatif que le métal à protéger.

## 2. Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

➤ **Protection par anodes sacrificielles**

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la figure 3.6. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique.

Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A. Ans) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement[6].

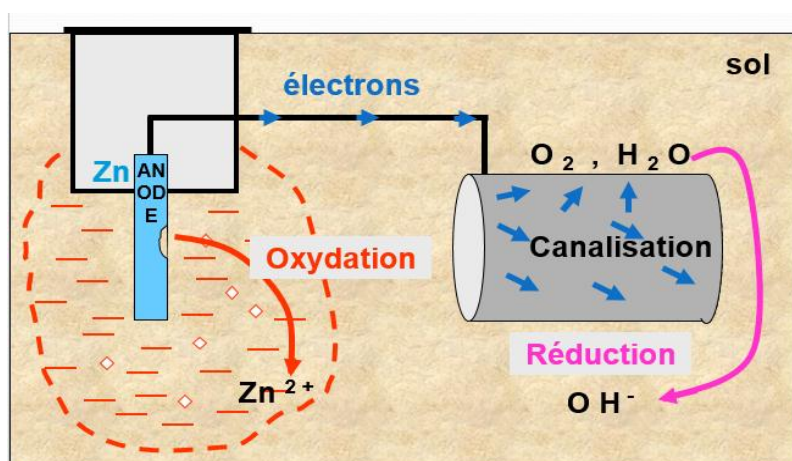


Figure 1.13 : Principes de la protection par anodes sacrificielles [9].

➤ **Choix des anodes sacrificielles**

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

### ➤ Protection par courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et de conduites présentant un problème d'isolation. De même, certaines conditions environnementales peuvent parfois être à l'origine de ce genre de problèmes. Devant des circonstances pareilles, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé [6].

### ➤ Principes

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant.

Masse anodique ou (un déversoir).

L'électrolyte (sol ou eau).

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. Comme le montre la figure 2.4 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. Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à  $-0,850$  V en tous points de la structure[4].

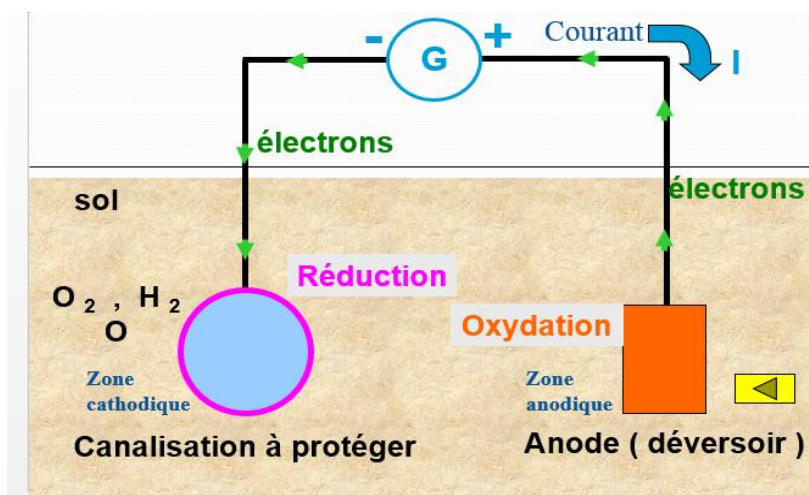


Figure 1.14 : Principe de la protection par courant imposé [9].

### 5.3.5 Avantages et inconvénients des systèmes de la protection cathodique

L'utilisation d'un système de protection cathodique soit toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujettie à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. Pour cela, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le tableau 3.5 donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

Tableau 1.1 Comparaison des éléments de systèmes P.C

	Anode galvanique ou sacrificielle	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du Milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Élevé
Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation Facile
Risque de surprotection	Pratiquement 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

### 5.3.6 Facteurs affectant la protection cathodique

L'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur une conduite donnée peut être atténuée par certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui se manifestent sous différentes formes [6] :

- Insuffisance de continuité électrique ;
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger ;
- Influence des structures adjacentes ;

- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif).
- ✓ **Insuffisance de continuité électrique**

L'insuffisance de la continuité électrique dans le système de protection cathodique se manifeste suite à une faible conductibilité électrique de l'électrolyte, soit par la présence d'un revêtement qui inhibe le passage du courant de protection. Ce manque de flux de courant se traduit par une insuffisance au niveau de la polarisation de la structure. Il s'ensuit alors que les critères de protection cathodique ne peuvent pas plus être conclus. Pour éviter que cela ne se produise, il est donc nécessaire d'assurer la continuité électrique en tous points de la structure. Il est à noter que, pour le cas des réseaux d'aqueduc, la présence des joints de raccordement non continus électriquement entre les différents éléments de l'ouvrage forme un blocage de circulation de courant. Ce fait oblige le courant de s'échapper de la conduite pour aller suivre d'autres chemins moins résistants ce qui crée des zones chaudes au niveau la structure (points de corrosion).

- ✓ **Perte d'adhérence des revêtements**

L'apparition du phénomène de décollement des revêtements provoqué par un excès de protection cathodique exige aux utilisateurs de ce système de respecter le seuil de potentiel d'évolution du gaz d'hydrogène une fois que le système est opérationnel. L'application d'une telle spécification permet d'éviter le décollement du revêtement et la dépolarisation rapide de la structure.

- ✓ **Influence des structures adjacentes**

La présence voisine des structures métalliques dans un électrolyte conducteur peut induire des interférences électriques défavorables sur la structure. Le courant électrique délivré par les anodes de protection a tendance à s'échapper de la source pour embarquer sur une structure adjacente non protégée et ce avant de rejoindre la structure à protéger. De ce fait, les critères de protection cathodique peuvent être affectés et les points de sortie du courant de protection créés sur la structure voisine sont exposés à la corrosion.

- ✓ **Influence des courants vagabonds**

Les courants vagabonds se définissent comme étant des courants qui abandonnent leurs sources d'origine pour aller circuler dans le sol et chercher par la suite le parcours qui leur offre le minimum de résistance. Ces courants électriques qui empruntent le chemin métallique le plus proche à rencontrer. Le comportement de ce type de courant est

généralement variable en termes d'intensité, de direction et de trajet. Ils affectent souvent le système de protection cathodique de la structure et conduisent à la formation des cellules de corrosion aux points de sorties.

Les courants vagabonds proviennent souvent des installations nourries aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif. En courant continu, ces courants s'émanent d'installations mal isolées par rapport au sol comme les voies ferrées électrifiées. En courant alternatif, les structures métalliques sont susceptibles de recevoir des interférences au voisinage des lignes de haute tension où l'excès de courant injecté dans les structures produit sous l'effet inductif et capacitif perturbe les critères de la protection cathodique. Ainsi, l'emplacement des lignes de transmission de courant alternatif devrait être souligné lors de la conception des systèmes de protection cathodique.

### 5.3.7 Effets de la protection cathodique

De nombreux auteurs démontrent que la réaction cathodique conduit à l'alcalinisation locale du milieu électrolytique au contact du métal en cas de défaut de revêtement [Stratmann et coll. (1996), Beavers et Thompson (1997), Korzhenko et coll. (1999), Amouroux et coll. (2000) et (2001)]. Cette alcalinisation peut avoir deux types de conséquences relativement antagonistes. Tout d'abord, elle peut contribuer à faciliter la dégradation de la liaison adhésive revêtement/métal par attaque chimique de type hydrolyse alcaline des liens chimiques engagés dans l'adhésion (c'est le cas des revêtements avec sous couche époxy). D'autre part, elle peut modifier le milieu aqueux local et contribuer à faciliter la passivation du métal en favorisant localement une croissance d'un film passivant protecteur du métal mis à nu. De prime abord, il convient de distinguer les revêtements minces tels que les peintures, des revêtements épais de type polyoléfines.

Pour ce qui concerne les revêtements minces, Walter explique que la perte d'adhésion se déroule suivant plusieurs processus. Le transport d'eau, d'oxygène et d'ions au travers des revêtements jusqu'à l'interface polymère/métal est la première étape de dégradation. L'utilisation de revêtements protecteurs épais et très imperméables comme le polyéthylène ou les polyoléfines ralentit considérablement ce processus. En pratique, de tels décollements sur des revêtements sans défauts de surface ne peuvent se produire qu'au bout d'un temps relativement long. De plus, la relative imperméabilité aux espèces

corrosives de ces revêtements implique qu'en l'absence de défauts et même après décollement total de la liaison adhésive, l'endommagement par corrosion reste négligeable. De ce fait, pour ce type de revêtement, ce n'est qu'en présence de défauts macroscopiques que la dégradation de la liaison adhésive par l'eau, éventuellement amplifiée par la polarisation cathodique, est susceptible de conduire à des risques de corrosion locale du métal.

Dans de nombreux cas, l'association de plusieurs revêtements est utilisée pour protéger au mieux le métal [Brousseau et Qian (1994), Cherry et coll. (2000)].

Ce n'est donc que lorsqu'il existe un défaut macroscopique du revêtement que le processus de décollement est susceptible d'être endommageant pour le métal (Figure 1.11). La réaction cathodique produit des ions  $\text{OH}^-$  et du dihydrogène  $\text{H}_2$  qui contribue le plus souvent à accélérer le décollement progressif du revêtement au voisinage du défaut. [8]

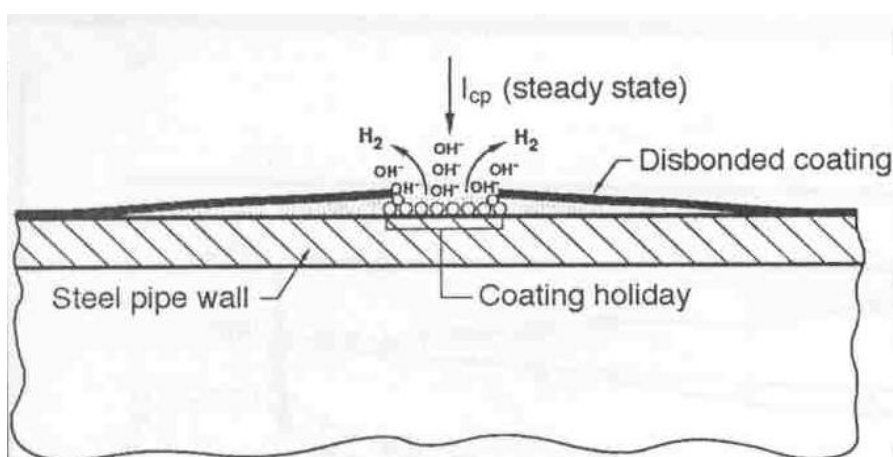


Figure 1.15 : Effet d'un courant cathodique sur le décollement du revêtement [8].

Pour certains auteurs, le phénomène de décollement est le résultat d'un processus électrochimique qui intervient à l'interface polymère/métal [Koehler (1984)]. Le substrat métallique est polarisé le long du défaut dans une zone spécifique nommée MPEI (métal/polymère/électrolyte interface) (Figure 1.15).

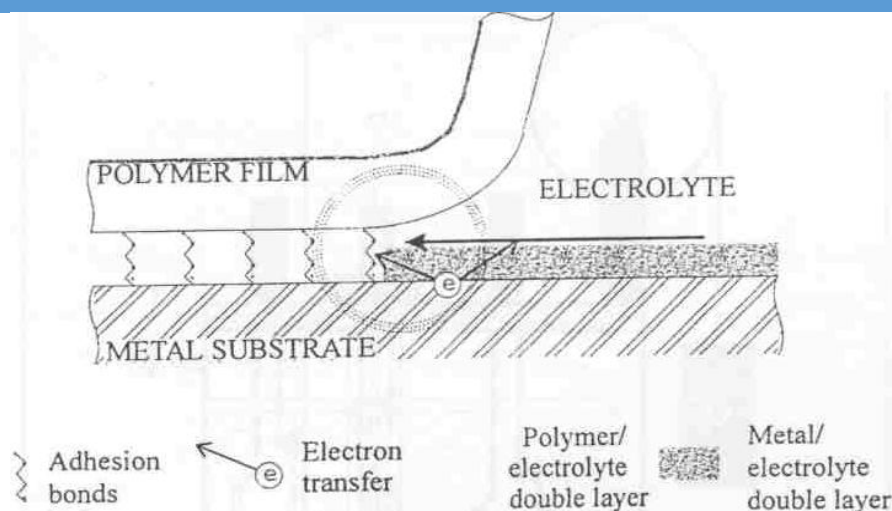


Figure 1.16 : Schéma de la zone MPEI (Métal/Polymère/Electrolyte/Interface) [8].

## 6. Synthèse bibliographique

Djamel BOUZIDI [6] a établi un modèle de diagnostic basé sur l'évaluation des paramètres du sol entourant la conduite, l'analyse chronologique des séries de bris et l'évaluation du système de protection cathodique lorsqu'elle est appliquée. Les corrélations établies entre les paramètres composant ce modèle ont permis de réaliser une inspection directe sur les conduites aux sites jugés à risque afin d'évaluer l'activité de la corrosion développée sur les surfaces externes des conduites. En outre, l'ensemble des données recueillies permettent de calculer la vitesse de corrosion et de la relier aux paramètres tels que la corrosivité du sol, le pH et la teneur en ions chlorure.

Les résultats obtenus par cette étude confirment que la résistivité du sol est le paramètre le plus pertinent ayant un effet important sur la vitesse de corrosion externe.

MAREC [5] a étudié la corrosion et la protection cathodique. La corrosion sévit dans tous les domaines d'activité, mais c'est peut-être dans les industries gazière et pétrolière qu'elle montre le plus son caractère pernicieux : généralement enterrés, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production, de transport et de distribution, se faisant même oublier. Les ouvrages gaziers baignent dans un milieu particulièrement agressif du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient. Il a étudié les systèmes et dispositifs de protection à mettre en place sur les ouvrages, et de l'établissement de spécifications et modes opératoires concernant la surveillance et la maintenance de ces systèmes.

L'étude de Mr Mourad Ghellai [4] a porté sur le système de la protection cathodique PC des canalisations Multi produit MP/ ASR. Malgré la double protection de l'acier des canalisations



par la protection passive assurée par des revêtements et la protection cathodique par courant imposé, ce dernier peut enregistrer des défaillances par corrosion, notamment par pics de corrosion (Pitting corrosion) et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible. La méthodologie consiste à relever les mesures de potentiel de la ligne ASR, les mesures de résistivité du sol après un calcul de dimensionnement du système de protection cathodique. Les résultats ont montré que les valeurs mesurées du potentiel de protection varient de  $-900$  mV à  $-2300$  mV et dont le seuil de protection est de  $-850$  mV/Cu /CuSO<sub>4</sub>. Les valeurs de résistivité du sol déterminées ont montré que les sols de la ligne ASR sont moyennement corrosifs.

B. Brahim Laoun, [10] en étudiant la Corrosion et Protection Cathodique des Canalisations enterrées par Application de l'Énergie Solaire. L'étude contribue au dimensionnement d'un système de protection cathodique par soutirage de courant avec comme source d'énergie électrique des panneaux photovoltaïques. Les résultats montrent que la configuration étudiée du système solaire assure la protection de la canalisation enterrée.

Frédérique COEUILLE, [8] le travail s'est consacré à l'étude de l'adhésion et du comportement en vieillissement d'un revêtement polymère tri-couche assurant la protection externe des canalisations en acier. Le revêtement externe compose de trois couches polymères successivement déposées sur l'acier de type Epoxy (Ep) / Ethylène Butyl Acrylate (EBA) / Polyéthylène haute densité (PEHD).

L'étude des échantillons neufs permis de constater que l'adhésion dépendait directement de la qualité du processus de fabrication.

La durée de vie des canalisations en service étant relativement longue, le travail se fait aux conditions sévères de vieillissement accéléré sur des échantillons « sans défauts de surface », puis sur des échantillons « avec défauts de surface ».

Les résultats de vieillissement ont montré la faiblesse de l'époxy par rapport aux couches externes d'EBA et de PEHD, bien plus perméables à l'eau.

La mise en évidence des vieillissements différents suivant le type d'échantillons testés, et observé que seuls ceux comportant des « défauts de surface » vieillissait prématurément.

La diffusion de l'eau au sein de ces derniers a donné lieu à la mise au point d'un modèle prédictif de durée de vie qui nous a permis d'estimer un coefficient de diffusion, ainsi qu'un temps de décollement total du revêtement en fonction des paramètres de vieillissement.

Parallèlement, des essais de vieillissement sous protection cathodique (PC) en milieu salin NaCl 1 g/l, ont montré à court terme que l'effet d'une température supérieure à 35°C est prédominant, et masque les effets de la PC.

En revanche, à plus faible température et à plus long terme, il semble que cet effet s'atténue et la P.C. puisse localement limiter le décollement du revêtement.

#### **CONCLUSION :**

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

La protection passive par revêtements a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.

La technique de protection active (protection cathodique) repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu'à la zone d'immunité.

Nous présenterons dans le chapitre suivant le contexte industriel de la ligne GZ1 de transport du gaz naturel. Nous aborderons les questions relatives aux matériaux des pipes et leur système de protection passive et active.

# **Chapitre 02**

Contexte industriel

## Introduction

La localisation géographique éloignée des ressources en énergies fossiles pétrole et gaz naturel des centres de consommation, l'acheminement de ces ressources sur des distances transi continentales s'opère par navigation maritime et par pipelines. D'importants réseaux de pipelines ont été construits depuis les années 60 et se développent toujours.

La société algérienne SONATRACH (SH) possède et exploite un réseau de canalisations évalués à plus de 16 000 Km destinés au transport du gaz naturel et produits pétroliers des installations des gisements de Hassi'R'mel (HR) et Hassi Messaoud (HM) au sud de l'Algérie vers les ports pétroliers et zones industrielles d'Arzew (AR) et Skikda (SK) au nord.

La branche transport par canalisations « TRC » gère actuellement un réseau de pipelines d'une longueur supérieure à 18000 Km.

La construction de ces ouvrages a engendré des investissements lourds, ce qui nécessite en matière d'exploitation d'augmenter au maximum la durée de vie de ces ouvrages, et ce pour éviter les arrêts imprévus qui entraînent l'arrêt de la production.

### 1. Présentation de l'entreprise

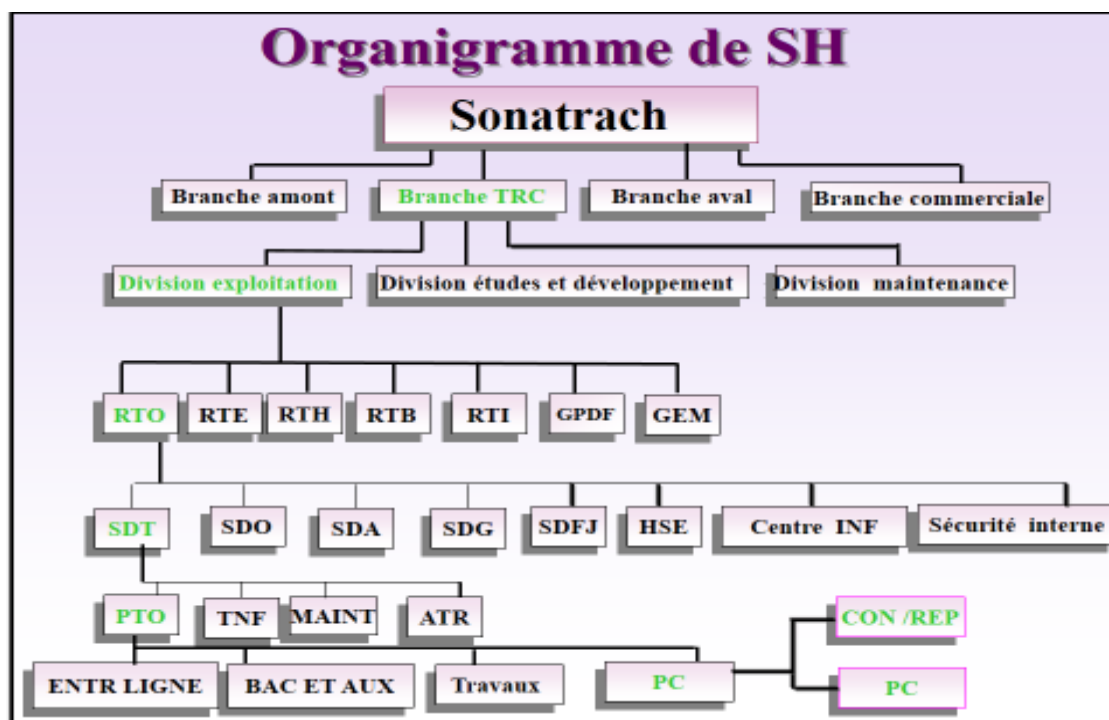


Figure 2.1 : organigramme de sonatrach [13].

## 2. Missions de RTO

La Région Transport Ouest (RTO) a pour missions essentielles :

- Le transport , le stockage et la livraison des hydrocarbures liquides et gazeux .
- L'exploitation, la maintenance et la protection du patrimoine de la région
- Le suivi de la réalisation des projets d'extension , de renouvellement et de valorisation du potentiel existant confiés à la région .

Les hydrocarbures transportés à travers des canalisations sont gérés et exploités par RTO sont [13]:

- Le gaz naturel
- Le pétrole brut
- Le Condensât
- Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Pour assurer le transport, entre Hassi R'mel et le port d'Arzew de quatre (04) produits , la RTO gère un patrimoine de :

- Onze (11) canalisations de 16" à 48" de diamètre, totalisant une longueur de 5500 km.
- Trente trois (33) stations de pompage et de compression.
- Trois (03) stations de détente.
- Un (01) Terminal de Départ (Parc de stockage du condensât situé à CP4 / Hassi R'mel).
- Cinq (05) Terminaux d'Arrivées situés à Arzew (Parc de stockage du Condensât NZ1, parc de stockage du pétrole brut OZ1/OZ2, terminal GZ1, terminal GZ2/GZ3/GZ4 et LZ1/LZ2).

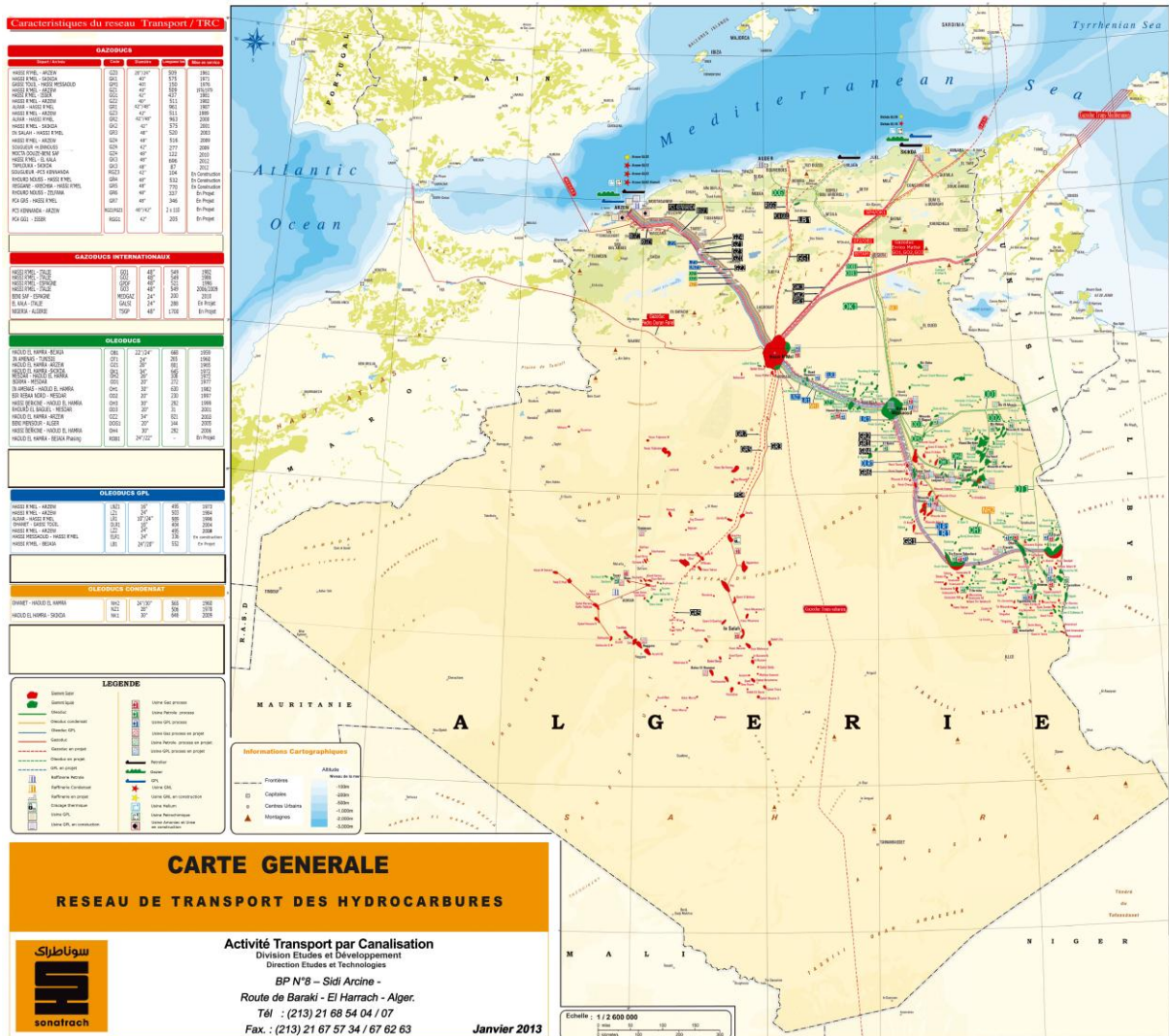


Figure 2.2 : réseau national de transport des hydrocarbures [14]

### 3. Présentation de ligne GZ1 40''

Les terminaux Sud sont tous les points du réseau qui se trouvent à la racine de chaque canalisation Sud. Leur nombre a augmenté au fur et à mesure que les gisements ont été découverts.

Actuellement, ils sont au nombre de onze, répartis entre terminaux de champs de pétrole et terminaux de champs de gaz naturel, et ce nombre est appelé à augmenter dans les années à venir.

La situation géographique des gisements amène à investir dans la construction de ce réseau de canalisations. Elle entraîne aussi la mise en œuvre d'un arsenal d'installations, de matériels et la mobilisation de plus de 10000 employés pour maintenir une production

permanente en assurant le bon fonctionnement de ces régions devenues ainsi des terminaux [11].

Ce tableau liste toutes les canalisations des hydrocarbures du sud Algérien

Tableau 2.1 : liste des caractéristiques des canalisations du sud algérienne  
(TRC/SONATRACH)

Départ / Arrivée	Code	Diamètre	Longueur (Km)	Date de réalisation	Produit transporté	
Haoud El Hamra - Arzew	OZ1	28"	801	1965	Pétrole brut	
Haoud El Hamra - Skikda	OK1	34"	637	1972		
Haoud El Hamra - Béjaïa	OB1	24"/22"	660	1959		
Beni Manssour - Alger	OG1	16"	131	1971		
Hassi R'Mel - Arzew	NZ1	28"	506	1978	Condensat	
Hassi R'Mel - Haoud El Hamra	NH1	8"	306	1960		
Hassi R'Mel - Arzew	GZ0	24"/20"	509	1961	Gaz	
Hassi R'Mel - Arzew	GZ1	40"	507	1976/79		
Hassi R'Mel - Arzew	GZ2	40"	507	1982		
Hassi R'Mel - Arzew	GZ3	42"	507	1989		
Hassi R'Mel - O. Safsaf	GO1	48"	549	1982		
Hassi R'Mel - O. Safsaf	GO2	48"	549	1986		
Hassi R'Mel - Skikda	GK1	40"	573	1971/78		
Hassi R'Mel - Isser	GG1	42"	436	1981		
Alrar - Hassi R'Mel	GR1	42"/48"	956	1987		
Gassi Touil - Hassi Messaoud	GM1	40"	150	1976		
Hassi R'Mel - Skikda	GK2	42"	573	1996		
Hassi R'Mel - EUROPE	GME	48"	521	1996		
Haoud El Hamra - Arzew	LNZ1	12"/16"	801	1973		LPG
Hassi R'Mel - Arzew	LZ1	24"	504	1983		

Source TRC.

La ligne de transport du gaz naturel GZ est constituée de tubes en aciers (type roulés soudés), sur une distance de 507 km pour relier le gisement de gaz naturel de HassiR'mel et le terminal de raffinerie à Arzew [11].

Les aciers sont protégés des agressions extérieures (corrosion, courants vagabonds...) par un revêtement épais en bitume de pétrole (3 à 6 mm) appliqué sur chantier et renforcé d'un feutre de fibre de verre, et par un système de protection cathodique (CP) Ils sont protégés des agressions extérieures (corrosion, courant vagabond...) par un revêtement bitumineux et par un système de protection cathodique.

La ligne dispose cinq stations de compression (SC), réparties sur la ligne assurent la mise sous pression du fluide gazeux nécessaire à son écoulement.

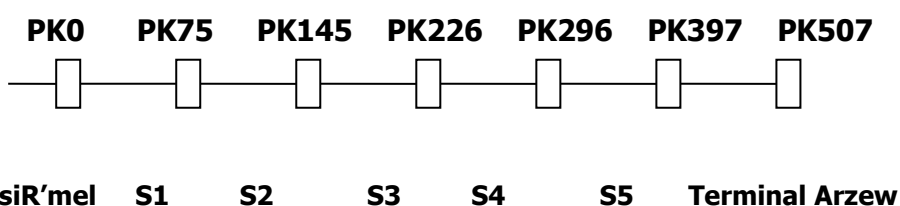


Figure 2.3 : la ligne GZ1 montrant les sets station de compression du gaz naturel

Tableau 2.2 implantation des stations de compression, ligne GZ1 [14].

Désignation	PK (Km)	Altitude (m)	T (°C) ambiante
HassiR'mel	0	747	40
SC <sub>1</sub> Timzet	75	840	40
SC <sub>2</sub> M' seka	146	4025	40
SC <sub>3</sub> Medarreg	226	970	40
SC <sub>4</sub> Nador	295	1255	35
SC <sub>5</sub> Kenenda	397	525	35
ARZEW	507	20	35

La spécification technique de la ligne du gaz GZ1, et qui relie HassiR'mel à Arzew, est donnée dans le tableau suivant :



Tableau 2.3 Spécification technique de l'implantation de ligne GZ1 40" [14].

Ligne	Longueur [km]	Diamètre [pouce]	Catégorie	Nuance	épaisseur [mm]	Masse nominale [kg/m]	Pk
GZ1	507	40"	III	X60	12.7	275.65	0-288
		40"	II	X52A	12.7	314.18	288-507
		40"	I	X52a	19.05	465.2	Entrée et sortie

## 4. Méthodes de détection CND (ultrasons et flux magnétique)

### 4.1 Inspection en ligne et diagnostic

L'inspection en ligne par outil intelligent peut fournir presque toutes les informations requises pour l'évaluation de l'état technique d'un pipeline. Cependant, le soin est laissé à l'opérateur de décider des choix à faire pour réhabiliter l'ouvrage et les moyens à mettre en œuvre pour le maintenir en bonne condition.

Un grand nombre de pipelines à travers le monde ont dépassé la limite d'âge prévue de leur utilisation. Ils continuent pourtant à être parfaitement fonctionnels. Ceci moyennant un suivi régulier de leur état technique et une politique de maintenance appropriée. La question fondamentale qui se pose dans ces cas-là est la suivante : Réparation ou réhabilitation ? La première étape pour répondre à cette question est un programme détaillé d'inspection pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation de l'état de la ligne [12].

### 4.2 Action de pré-inspection

Le but de ces travaux est la confirmation de l'accessibilité de la conduite à l'outil intelligent.

La planification d'une inspection passe en général par trois étapes :

- Nettoyage de la conduite par outil conventionnel ;
- Envoi de l'outil géométrique en vue de détecter les risques de blocage ;
- Envoi de l'outil intelligent pour la localisation des pertes de métal et l'évaluation de leur importance.

### 4.3 Outils d'inspection en ligne

Le premier outil d'inspection en ligne a été mis à la disposition des opérations il y a une trentaine d'années. Depuis, ces techniques ont connues de nombreux progrès

principalement concernant la précision de la détection et la fiabilité des instruments. Les outils d'inspection modernes, équipés de capteurs, doivent pouvoir :

- > Parcourir plusieurs centaines de kilomètres ;
- > Détecter les anomalies présentées sur la conduite ;
- > Traverser les coudes à faible rayon de courbure ;
- > Surmonter les conduites verticales ;
- > Dépasser les vannes incomplètement ouvertes... .etc.

#### **4.3.1 Les outils de configuration**

Leur objectif est de détecter les déformations géométriques de la conduite (bosses, ovalisation, ...etc.). Une série de doigts (fingers) sont rattachés radialement au centre de l'outil. Le mouvement de ces doigts,

#### **4.3.2 Outil de détection de pertes de métal**

La détection de pertes de métal et de fissurations est le domaine où l'utilisation d'outils intelligents a connu le plus d'intérêt. Deux techniques sont émergées concernant la détection des pertes de métal :

- > Détection par flux magnétique MFL (magnétique flux leakage) ;
- > Détection par ultrasons U/T (ultrasonique technique).

##### **❖ Les techniques MFL**

Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée. Les premiers outils MFL ont particulièrement souffert de cet inconvénient surtout pour les grands diamètres. La firme TUBOSCOPE, qui commercialisé le premier outil intelligent, a choisi d'utiliser des électroaimants permanents. BRITISH GAZ a ainsi réussi à multiplier par dix la puissance des aimants permanents en développant de nouveaux matériaux magnétiques tels que le N.I.B (Neodinium-Iron-Bore). Un autre axe ayant favorisé le développement des technologies MFL concerne les progrès réalisés dans la technologie des capteurs. Les premiers capteurs étaient très larges et donnaient lieu à des pertes de contact avec la paroi à chaque changement de direction de la conduite (au niveau des zones de courbure particulièrement). Les capteurs actuels se sont considérablement améliorés au point où la détection des pertes de métal et même possible au niveau des cordons de soudure et sur la face interne et externe de la paroi. Ils peuvent même être adaptés pour mesurer l'épaisseur absolue de la conduite. La quantité de données enregistrées s'est considérablement accrue

à tel point que BRITISH GAZ, dans un document publicitaire et pour donner un ordre de grandeur, affirme que l'équivalent de la bible était enregistré toute la six secondes

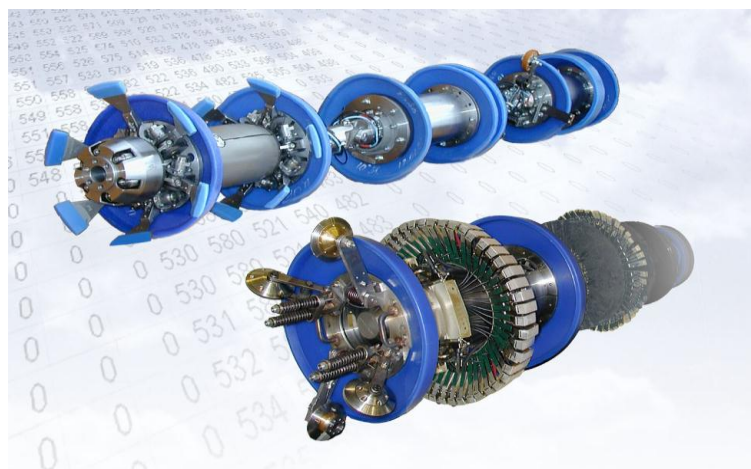


Figure 2.4 : les outils intelligents [21].

#### ❖ Les outils ultrasoniques

Leur principe de fonctionnement est assez simple. Un transducteur émet des pulsations ultrasoniques. En rencontrant la surface intérieure un premier écho se produit. Un deuxième écho se produit lorsque la pulsation atteint la face extérieure de la conduite. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonique étant connue, le temps séparant la perception des deux échos donne l'épaisseur exacte de la conduite.

Cependant cette technique ne peut être utilisée qu'en présence d'un couplant liquide. De plus, le transducteur (l'émetteur d'ultrasons) doit être placé à une distance constante de la paroi avec une inclinaison bien définie. Ce qui pose un problème au niveau des courbures de conduite. Le non-respect de ces exigences peut entraîner des erreurs de lecture et donc d'interprétation. La technique UT a été étendue à la détection des pertes de métal dans les gazoducs moyennant l'utilisation d'un couplant (un gel) compris entre deux outils conventionnels. La technique ultrasonique représente les avantages suivants dans un environnement de pipeline :

- > Mesures directes de l'épaisseur de la profondeur des anomalies ;
- > Grande exactitude des mesures de l'épaisseur de la paroi et de la profondeur des anomalies (mesures quantitatives) ;
- > Taux élevé de répétition des résultats sur des passages répétés ;
- > Une anomalie dans la paroi peut être détectée à partir d'un diamètre de 10 mm, la profondeur exacte d'une anomalie peut être mesurée à partir de 20 mm ;
- > Distinction précise entre les anomalies intérieures et les anomalies extérieures (à

- l'exception des défauts avoisinants des soudures) ;
- > L'identité d'enfoncements, d'ondulations (fait pendant le cintrage du tuyau) et d'autres ondulations ainsi que des secteurs réparés peuvent être facilement établie ;
  - > L'équipement ultrasonique peut être ajusté en une fois, même si l'épaisseur de la paroi change ;
  - > L'interprétation des résultats est facilement compréhensible, les diagrammes colorés sont éloquentes ;

**Notation :**

- Les techniques MFL ne sont pas influencées par la vitesse de l'outil et ne sont pas affectées par les changements d'épaisseur mais leur utilisation reste réduite pour des conduites de fortes épaisseurs.
- Les techniques ultrasoniques sont sensibles à la vitesse qu'il faudrait maintenir le plus stable possible et sont peu adaptés aux faibles épaisseurs.

**4.4 Evaluation des défauts détectés durant L'inspection**

La haute résolution des techniques actuelles d'inspection en ligne, flux magnétique ou ultrason, permet à l'opérateur une évaluation précise de l'intégrité du pipeline. Les équipements basés sur ces techniques peuvent localiser tous les types de défauts le long de la ligne laissant à l'opérateur le soin de décider de la nécessité de procéder à des réparations.

Les inspections périodiques par outil intelligent révèlent la présence de nombreux défauts. Ces inspections permettent non seulement la localisation des défauts de corrosion mais également leurs dimensions (qui révèlent leur nature et la sévérité du danger). Le degré de nuisance de certains défauts peut être évalué sur la base de méthodes analytiques relativement simples. Certaines compagnies gazières et pétrolières ont propres codes mais dans une grande proportion tous les opérateurs utilisent la fameuse norme ANSI/ASME B31G. Pour un contrôle efficace, surtout en présence de corrosion active, une inspection supplémentaire est souvent recommandée. Une inspection répétée permet de préciser le diagnostic mais surtout l'évolution dans le temps des dégradations et donc la possibilité d'une évacuation à long terme de l'état de la conduite.

Dans un pipeline corrodé, chaque élément de conduite peut contenir plusieurs centaines de piqûres de différentes dimensions et formes. L'évaluation de l'état de corrosion doit alors se faire sur la base d'un traitement statique. Ce traitement peut être formulé par les

uns ou toutes les caractéristiques statiques suivantes :

- > Moyenne des pertes de métal ;
- > Valeur maximale des pertes de métal ;
- > Distribution statique des pertes de métal.

## 5. Méthodes de prévention les pipelines enterrées

En dehors de la prévention de la corrosion par un choix judicieux du matériau deux principales méthodes de protections sont en général considérées :

Isolation de la structure par rapport au milieu environnant (protection passive) ;

Annuler le processus électrochimique de corrosion (protection active) ;

Pour la plus part des ouvrages importants les deux méthodes sont appliquées simultanément.

### 5.1 Protection Passive

#### 5.1.1 Sélection des revêtements

Sélection en fonction de :

- ✓ Résistivité électrique du revêtement
- ✓ La pénétration d'humidité et son évolution avec la température
- ✓ L'adhérence sur l'acier
- ✓ La sensibilité au décollement cathodique
- ✓ La résistance au vieillissement
- ✓ La résistance à l'endommagement (abrasion, poinçonnage ....) [7].
- ✓ Le prix

**5.1.2 Facteur d'efficacité (coating break-down)** : facteur représentatif du vieillissement du revêtement. Il est défini par le ratio : densité de courant appliquée sur 1 m<sup>2</sup> de métal revêtu / courant appliqué sur 1 m<sup>2</sup> de métal nu pour atteindre le potentiel minimal de protection (-850mV). Pourcentage de défaut (coating damages) : c'est le % de surface de métal mise à nu par rapport à la surface totale.

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

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

Tableau 2.4 : caractéristique de revêtement pour structure enterrée [7]

Revêtement	Durée de vie (Ans)	Epaisseur (mm)	% défaut	Facteur d'efficacité
Brais de houille de pétrole	5 à 10	4 à 6	1.5	8
	> 10	4 à 6	2.5	10
	> 25	4 à 6	3	12
Coal-tarepoxy (appl. Afroid)	5 à 10	< 0.6	0.5	5
	> 10	< 0.6	1.5	8
Epoxy poudre (appl. A chaud)	≤ 20	0.35 à 0.45	0.3	0.5
Epoxy liquide	≤ 20	0.3 à 0.4	0.5	0.5
Renforcé polyester	≤ 20	1.5 à 2	0.2	0.5
Couches PE ou PP	≤ 20	2 à 3	0.2	0.3
	> 20	2 à 3	0.3	0.4
Bandes bitumineuses (appl. A chaud)	≤ 20	5 à 6	0.3	3
	> 20	5 à 6	0.5	5
Bandes adhésives (appl. A froid)	≤ 20	1 à 2	0.3	3
	> 20	1 à 2	0.4	5

### 5.1.3 Revêtement des tubes corrodés :

#### Transport des tubes qu'on traite :

Le transport ce fait par des camions lourds et par des appareils de relèvement des tubes comme nous montre la figure (2.5)[12].



Figure 2.5 : les machines de transports des pipelines (STT)

#### Décapage :

Cette opération consiste à enlever l'ancien revêtement et la mise à nu de l'acier elle est effectuée manuellement par des ouvriers, ou le revêtement est plus facile après cette opération. (Figure 5.3)



Figure 2.6 : décapage manuel (STT)

### Pré sablage et Sablage :

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

Cette opération s'effectue par deux types de machines :

1. machine manuel ou pré sablage
2. après cette opération on coupe les tubes avec des machines de coupe et chanfrein.



Figure 2.7 : coupe et chanfrein des pipes (STT)

Sablage avec une machine automatique modèle AOB 32636, donc c'est une période de préparation de surface pour le revêtement final des tubes. Cette opération est très importante pour la qualité de revêtement, afin de nettoyer la surface de toutes les imperfections pouvant exister. (Figure 5.5).



Figure 2.8 : Machine de sablage automatique(STT).

### Application du Revêtement :

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

Les matériaux bitumineux, dérivés de goudron de pétrole ou de houille peuvent répondent aux caractéristiques exigées d'un revêtement en sol. Les aciers X60 sont revêtus de bitume de pétrole appliqué sur chantier et renforcé d'un feutre de fibre de verre. Il est constitué d'une couche de peinture d'adhérence, dite "primer", appliquée à froid après sablage ou grenailage du tube, une ou plusieurs couches d'émail appliquées à chaud, d'épaisseur de 3 à 6 mm, un enroulement de voile ou tissu de verre noyé dans l'émail chaud afin d'augmenter la tenue et la résistance de la couche [12].

Ce revêtement doit assurer une protection efficace et de longue durée en constituant une barrière étanche et isolante avec le milieu agressif environnant. Les caractéristiques de ce revêtement est d'avoir une résistance d'isolement électrique élevée (hautement diélectrique) en vue de s'opposer aux phénomènes électrochimiques tel que les potentiels provenant des courants vagabonds et permettre de maintenir des potentiels négatifs à coûts réduits de la protection cathodique (CP) (figure 5.6)



Figure 2.9 : revêtement d'un tube de type thermodurcissable (STT)

Parmi les autres revêtements employés autres que les émaux à base de brai de houille ou de pétrole, les matériaux plastiques en rubans tels que le polyéthylène collés par des enduits sur les canalisations, ou extrudés en usine et les matériaux thermodurcissables.

#### **5.1.4 Nature et conséquences des défauts de revêtements**

- Défauts de fabrication /application
- Dommages pendant les transports et les manutentions



- Dommages pendant et après la pose et l'enfouissement (qualité du remblai, soin apporté par l'entrepreneur ...)
- Dommages en cours d'exploitation (pénétration de racines, poinçonnage par des cailloux, dommages causés par des tiers au cours de travaux d'excavation ou autres).
- Action de bactéries
- Pollutions par déversements de solvants ou autres produits chimiques.

## 5.2 Protection active (Protection Cathodique)

La vitesse de corrosion d'un métal dans le sol ou dans l'eau est fonction du potentiel  $E$  de ce matériau dans son milieu environnant. De manière générale, plus on porte le potentiel du métal vers des valeurs négatives, plus la vitesse de corrosion diminue. Cet abaissement du potentiel vers des valeurs plus négatives est obtenu en faisant circuler dans le sol ou l'eau un courant continu partant d'anodes et se refermant par la surface métallique de la structure à protéger. Dans le cas de structures revêtues, le courant atteint la surface métallique principalement par les porosités et les défauts du revêtement. Le courant de protection peut être fourni soit à partir de systèmes à courant imposé, soit à partir d'anodes galvaniques.

### 5.2.1 Conditions préalables à l'application de la protection cathodique

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

Aucune des recommandations de la présente norme ne doit nuire à la sûreté de fonctionnement de la structure en question [24].

Pour assurer la protection cathodique, les conditions suivantes doivent être réunies.

#### ❖ Continuité électrique

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

### ❖ Isolation électrique

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

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

### ❖ Revêtement externe

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

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

## **5.2.3 Equipements de protection cathodique**

### Transformateur-redresseur

Le poste de soutirage est habituellement constitué par un transformateur redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension (220 - 380 V). Dans certaines situations où l'énergie électrique basse tension n'est pas disponible, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres sources d'énergie autonome telles que l'énergie solaire, accumulateurs et piles, groupes électrogènes, générateurs et thermo-générateurs.

Le meilleur emplacement d'un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée pour une puissance minimale [7].

Les paramètres qui interviennent sont :

- la forme générale du réseau et sa longueur ;
- les diamètres des conduites ;
- le degré d'agressivité des sols où les conduites sont posées ;
- les points les plus favorables pour l'installation des déversoirs ;
- disponibilité et coût de l'alimentation en énergie électrique ;
- encombrement du sous-sol en structures diverses.

Il est donc nécessaire d'examiner, tout d'abord, le plan d'ensemble du réseau afin de pouvoir dimensionner le système de protection cathodique à installer et d'en déduire les

emplacements les plus indiqués, quant à la disposition des canalisations et des lignes électriques.

Tableau2.5 : Anodes pour système de protection à anodes solubles (anodes sacrificielles)

Alliage	Milieux d'utilisation	Potentiel (en circuit ouvert)	Capacité (Ah/Kg)	Consommation (Kg/A/an)	Limite d'utilisation
Mg standard	Sol	- 1550(mV/ SO <sub>4</sub> Cu)	1100	8	ρ ≤ 20Ω.m ρ ≤ 50Ω.m Non utilisé en eau de mer
	Eau douce		1230	7.2	
Mg haute pureté	Sol	-1700(mV/ SO <sub>4</sub> Cu)	1230	7.2	ρ ≤ 20Ω.m (Non utilisé en eau de mer)
	Eau douce				
	Eau potable				
Zn haute pureté	Sol	- 1150 ( mV/ SO <sub>4</sub> Cu)	550 à675	16 à 13	ρ ≤ 20Ω.m (sol ) Non utilisé pour l'eau potable et au-dessus de 50°C
	Eau de mer et autres	- 1100 ( mV/ Ag/Cl)	780	11.3	
	Boue	- 1100 ( mV/ Ag/Cl)	780	11.3	

Tableau2.6 : Anodes pour système de protection à courant imposé

Alliage	Milieux d'utilisation	Densité de courant maxi (A/m <sup>2</sup> )	Consommation (Kg/A/an)	Remarques
Fer	Sol	Pas de limite	9.1	Ferraille de réemploi)
Fe/Si	Sol	<30	0.3 à 0.5	
Fe/Si/Cr	Sol/ eau de mer	<30	0.3	Milieux chlorurés
Oxyde métalliques/Ti (MMO)	Sol, sable	100	0.5 à 5mg/A/an	Indiqué la nature du milieu lors de l'achat.
	Boue, eau douce	150		
	Eau de mer	600		

Backfill de coke

Pour les déversoirs anodiques à terre, il est recommandé de toujours entourer les anodes d'un backfill dont le rôle est de permettre une consommation uniformément répartie et une meilleure résistance déversoir / milieu.

Tableau 2.7 : type de bakfill [7].

Type de backfill	Densité (kg/dm <sup>3</sup> )	Résistivité (Ω.m)	Remarques
Poussière de coke	0.6 à 0.8	<0.5	Ne pas utilisé dans un sol sujet à des variations de niveau d'eau
Grenaille de fer	3.5	<0.01	A utiliser pour des prises de terre profondes
Poussière de coke avec une haute teneur en chaux (>10%)	1.1	<0.1	A utilisé dans un sol sujet à des variations de niveau d'eau
Boue (20% bentonite, 75% gypse, 5%chlorure de sodium)	1.2	<2.00	Amélioration du sol quand la résistivité dépasse 100Ω.m. "Pré- backfilling" d'anodes sacrificielles

Câbles de connexion (déversoir anodique - générateur et générateur- structure à protéger)

Les liaisons électriques doivent répondre à 2 critères :

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

Tableau2.8 : les sections de câble normalisées à utiliser en fonction de l'intensité [7].

Intensité (A)	5	10	15	20	35	45	60
Section du câble (mm <sup>2</sup> )	10	16	25	35	50	70	95
Résistance pour 100 m (mΩ)	174	112	71	51	36	26	19

On n'utilise pas de câble de faible section pour des raisons de résistance mécanique.

Les câbles recommandés pour les liaisons anodiques et cathodiques sont non armés est du type : PVC/PVC ou XLPE/PVC pour les installations à terre.

Les soudures de câble sur la structure à protéger doit être faite par un procédé agréé par l'ingénieur soudeur en raison des risques de fissuration des aciers, en particulier les aciers à haute résistance mécanique (grade X 52 et au-dessus).

Les raccordements câble à câble doivent être clampés et isolés par des kits de raccordements (boite de jonction à résines époxy sous moule plastique).

#### Les joints isolants

- Kit isolants
- Joints monoblocs
- Manchettes isolantes (utilisée en cas de fluides à très basse résistivité) <10

Les joints isolants ne doivent pas être court-circuités par des mises à la terre d'équipements électriques situés de part et autre et des dispositions particulières de mises à la terre doivent être prises pour satisfaire la réglementation de protection des travailleurs contre les incidents électriques (les dispositions dérogatoires nécessaires sont à prendre avec les spécialistes électricien et sécurité en fonction de la réglementation locale).

Les joints isolants doivent être protégés contre les surtensions par des dispositifs spéciaux (foudre, ligne HT)

#### Points fixes de mesures (Coffrets ou prises de potentiel)

Des points fixes de mesures sont nécessaires :

- Aux joints isolants (de part et d'autre du joint)
- Aux traversées sous gaines métalliques (de part et d'autre de la traversée)
- Aux traversées de voies ferrées électrifiées
- Au croisement de canalisation métallique enterrée.
- A intervalles raisonnables tout au long du pipeline (1.5 à 3 Km.).

Les points de mesures sont constitués d'un câble soudé ou brasé sur le pipeline et ramené dans une prise de potentiel (coffret, bouche à clé, ...). Les points fixes de mesure peuvent être associés à des électrodes de référence à poste fixe [27].



Figure 2.10 : Le point de mesure [4].

### 5.2.3 Mise en service

a) procéder à la mise en marche et à la vérification du fonctionnement correct du poste à courant imposé ;

b) régler le poste de façon à obtenir le niveau de potentiel prescrit dans l'étude. Si des écarts importants apparaissent, il convient d'en préciser la raison à l'aide de mesures ;

c) si nécessaire, dans le but de limiter le courant débité, la liaison des anodes galvaniques à la structure protégée peut s'effectuer par l'intermédiaire d'une résistance variable ;

d) effectuer ensuite les mesures suivantes :

- tension de sortie du redresseur au poste à courant imposé ;

- intensité du courant de protection ;

- potentiel à courant établi au point de soutirage (l'électrode doit être positionnée en dehors du cône de tension anodique) ;

- potentiel à courant établi relié aux extrémités de chacune des parties de la structure protégée par un redresseur ;

- potentiels à courant établi et besoins en courant des électrodes étrangères ;

- influences possibles du courant alternatif ou du courant continu ;

e) en présence de courants vagabonds, effectuer des mesures pour déterminer le niveau des influences et assurer l'efficacité de la protection cathodique. Ces mesures doivent être effectuées avec les postes de protection cathodique alternativement hors et en service [26].

### 5.2.4 Protection contre les surtensions, la foudre et les courants vagabonds

On a vu plus haut que la foudre et les lignes électriques HT pouvaient engendrer des surtensions très dangereuses par conduction et induction.

Les dispositifs considérés pour faire face à ces phénomènes sont les suivants :

- Cellules de découplage (polarisées) ;

- Intervalles de décharge ;
- Cellules de mise à la terre.

Autres dispositions pour la protection du personnel s'exploitation (isolation, mise à la terre).

Les structures protégées cathodiquement ne doivent être connectées à un système de protection anti-foudre ou à une structure en liaison avec un tel système que par l'intermédiaire d'un dispositif approprié (par exemple un éclateur).

Lorsqu'on ne peut pas agir sur les sources de courants vagabonds il convient d'en contrôler les effets. Poste de drainage (limitation des potentiels, création d'un circuit préférentiel pour l'échange de courant entre les structures protégée et la source de courants vagabonds).

### 5.2.5 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique

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

Tableau 2.9 : Fréquence des contrôles de fonctionnement.

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

**Mesure des potentiels**

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinets de branchement d'abonné et parties aériennes) par les postes de détente et de comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite.

Le nombre et les emplacements de ces points de mesures sont définis lors des études.

On prévoit en général au moins un point de mesure tous les 500 mètres en zone urbaine et tous les 2 km ou 2.5km.

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

c) A la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel à courant coupé, ou potentiel "OFF". Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques secondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans le sol.

**Mesure des courants**

Les mesures de courant sont effectuées avec des appareils de mesure extérieurs appropriés. Elles sont nécessaires pour les anodes galvaniques, les postes à courant imposé, les liaisons équipotentiels, les postes de drainage et les courants circulant dans les canalisations. Elles permettent d'établir si des changements significatifs sont intervenus ou non.



## Conclusion

La ligne GZ1 de transport du gaz naturel exploité par la société SONATRACH, malgré la double protection est exposée à des phénomènes de dégradation par corrosion ou par fissuration.

La protection contre la corrosion d'un pipeline gazoduc enterré tel que GZ1 40" pouvait être réalisée par application de protection passive (revêtement) associé avec une protection cathodique soit par anode sacrificielle soit par courant imposé qui dont un potentiel de  $-850\text{mv Cu/CuSo}_4$ , Cette dernière protection est dite active parce qu'elle agit directement sur le processus de corrosion.

Pour l'évaluation de l'efficacité du système de la protection installé le long de la conduite, tel que le pipeline, se fait généralement par une inspection en ligne (contrôle CND par flux magnétique ou par la technique ultrasonique) avec des mesures de potentiel et de courant et les relevés des potentiels à espaces rapprochés.

Nous présenterons dans le chapitre suivant quelques investigations que nous avons obtenues du contexte industriel tel que les mesures de résistivité, les mesures de potentiel de la protection cathodique et les mesures de courants et nous terminerons par un calcul de dimensionnement de la structure.

# **Chapitre 03**

Matériels et méthodes

## Introduction

Après avoir donné une étude sur les défaillances par corrosion par les sols et la synthèse bibliographique et une description du contexte industriel, nous développerons dans ce chapitre les méthodes d'étude de la maintenance de la protection cathodique et les matériels de mesures utilisés. La méthodologie qui sera développée dans ce projet est qu'à partir de l'acquisition des données du contexte industriel géré par DRC (Direction de réparation des canalisations) et RTO (région de transport ouest) - SONATRACH Bethioua – Oran comprendra des mesures du potentiel de la protection cathodique en position ON et des mesures de résistivité de sol sur toute la ligne d'étude soit 505 Kms. Ces études sont réalisées dans le but de prédire les défaillances particulièrement les défaillances par corrosion afin d'éviter l'apparition des pics de corrosion (Pitting corrosion) et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible comme les sols argileux et de maintenir le potentiel de la ligne par rapport au potentiel standard de protection soit  $-850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$  par courant imposé. Ces études seront terminées par des études de dimensionnement de la protection cathodique par courant imposé de l'ouvrage métallique GZ1 comprenant les calculs du nombre de postes de soutirage, le courant à débiter par postes et le calcul du nombre d'anodes.

On donnera auparavant des mesures de caractérisation du matériau d'étude l'acier API 5L X60 et les caractérisations du sol.

### 1. Caractérisation de l'acier X60 API 5L

#### 1.1 Évolution

L'évolution des conditions de transport par gazoducs depuis 90 ans est présentée dans le tableau 3.1. Le diamètre des pipelines et l'épaisseur ont été multipliés par 4 et la pression de transport par 60.

Tableau 3-1 : Evolution des conditions de transport des gazoducs [11].

Année	Pression (bar)	Diamètres (mm)	Capacité annuelle ( $10^6 \text{ N m}^3$ )	Perte de charge après 6000 m (%)
1910	2	400	80	49
1930	20	500	650	31
1965	66	900	830	14
1980	80	1420	2600	11
2000	120	1620	52000	8

Ces augmentations de performances ont été possibles grâce à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des aciers dans la fabrication des tubes.

Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectué pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat.

## 1.2 Caractéristiques des aciers API

Les principales caractéristiques des aciers API sont leur très haute résistance à la rupture et leur excellente ténacité à très basse température pour les aciers à forte épaisseur. De plus, ces qualités présentent une bonne aptitude au soudage, obtenu grâce à une composition chimique adaptée (valeur particulièrement basse de leur carbone équivalent). La régularité des caractéristiques mécaniques des aciers API destinés à la fabrication de gros tubes soudés facilite les opérations de formage et de soudage.

Le tableau 1.2 rassemble les propriétés mécaniques minimales requises pour les pipelines en acier.

Tableau 3-2 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API [11].

	Direction	Epaisseur (mm)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>50</sub> (%)	KV 0°C (J)
Grade B AFCS	T	5 - 20	241 - 448	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27
X42 AFCS	T	5 - 20	290 - 496	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27
X46 AFCS	T	5 - 20	317 - 524	434 - 758	≥ 27,5	≥ 27
X52 AFCS	T	5 - 20	359 - 531	455 - 758	≥ 26,4	≥ 40
X56 AFCS	T	5 - 20	386 - 544	490 - 758	≥ 24,7	≥ 40
X60 AFCS	T	5 - 20	414 - 565	517 - 758	≥ 23,5	≥ 40
X65 AFCS	T	5 - 20	448 - 600	531 - 758	≥ 23	≥ 40
X70 AFCS	T	5 - 20	483 - 621	565 - 758	≥ 21,7	≥ 40
X80 AFCS	L	5 - 14	-	-	-	≥ 40
	T	5 - 14	552 - 690	621 - 827	≥ 20	-

Pour la composition chimique des différents aciers API est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 3-3 : composition chimiques en % de l'acier grade X60 et X100 [2]

grade	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Mo	Ti	v
X60	0.19	1.15	0.20	≤	≤	0.02	≤	≤	0.03	0.11
	A	A	A	0.025	0.025	A	0.02	0.05	A	A
	0.24	1.35	0.40			0.04			0.04	0.15
X100	0.29	1.15	0.15	≤	≤	≤	0.5	≤	≤	0.03
	A	A	A	0.025	0.025	0.04	A	0.05	0.04	A
	0.34	0.34	0.30				0.65			0.070

## 2. Résistivité du sol

### 2.1 généralité

Le sol entourant la conduite est un élément indispensable à la réalisation de la réaction de corrosion. Celui-ci est non seulement le chemin emprunté par les électrons et le courant de corrosion, mais de part sa nature, il influence la formation de zones anodiques et la vitesse de corrosion à ces endroits de la conduite. Plus les électrons peuvent circuler facilement dans le sol, plus la vitesse de corrosion sera grande et donc plus la conduite sera détruite rapidement.

L'hétérogénéité du sol, de part sa composition, son humidité, sa perméabilité, sa porosité, sa teneur en sel ou autres contaminants et par la présence de gaz dissous, favorise l'apparition des phénomènes de corrosion. De même, les fluctuations se produisant dans le sol tel que, les changements saisonniers et climatiques, les variations de l'activité biologique et le niveau de la nappe phréatique, favorise ce phénomène.

La corrosivité des sols peuvent être estimée en mesurant sa résistivité. En effet, la corrosion des structures enfouies est d'autant plus importante que l'échange d'électrons (quantité de courant) entre zones anodiques et cathodiques ainsi que la dissolution du fer est facilitée par la faible résistivité de l'électrolyte, et donc par la faculté du sol à conduire le courant et à permettre la corrosion. Par conséquent, la résistivité est un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion. Un sol résistif (faiblement agressif) aura pour caractéristique une faible contribution au processus de corrosion tandis qu'un sol très peu résistif (agressif) permettra l'initiation et la propagation rapide de la corrosion et par conséquent une apparition précoce et importante des bris. De ce fait, la connaissance de la résistivité du sol environnant les conduites en acier peut s'avérer un bon indicateur pour estimer la corrosivité du sol et

déterminer les zones propices à la corrosion et établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des propriétés. De plus, la connaissance de la résistivité du sol permettra les calculs détaillés de la conception du système de protection cathodique et d'établir les positions stratégiques d'implantation de lits d'anodes permettant d'assurer une fonctionnalité optimisée du système de protection cathodique mise en place [14].

## 2.2 Degré de résistivité ( $\rho$ )

Tableau 3.4. L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité [7].

Résistivité ( $\Omega.m$ )	classification
Inférieure à 5	sévèrement corrosif
De 5 à 10	Très corrosif
De 10 à 30	Corrosif
De 30 à 50	Modérément corrosif
De 50 à 100	Faiblement corrosif
De 100 à 500	Très peu corrosif
Supérieure à 500	Non corrosif

## 2.3 Méthodes de mesure de la résistivité du sol – ligne GZ1

Les mesures de résistivités du sol sont réalisées selon la méthode de "Schlumberger" ou la méthode "Wenner", dite aussi « méthode des quatre piquets ». Cette méthode est techniquement utilisée en terrain.

### Principe de la mesure de Wenner

La mesure s'effectue à partir de la surface du sol en disposant de quatre (04) piquets métalliques distant entre eux d'un intervalle égal à « a ». Ces piquets sont raccordés par des fils conducteurs aux bornes de l'appareil (GEHOM-METRE).

Le principe de la mesure consiste à injecter un faible courant alternatif entre les deux piquets externes et mesurer la chute de tension entre les deux piquets internes.

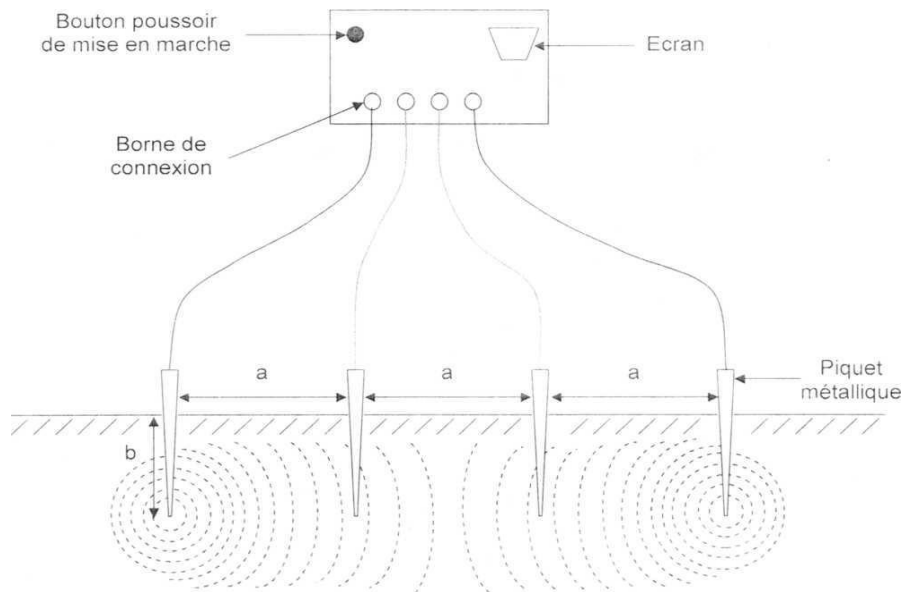


Figure 3.1 principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode de Wenner  
(a- distance entre deux piquets, b- profondeur d'enfoncement des piquets)

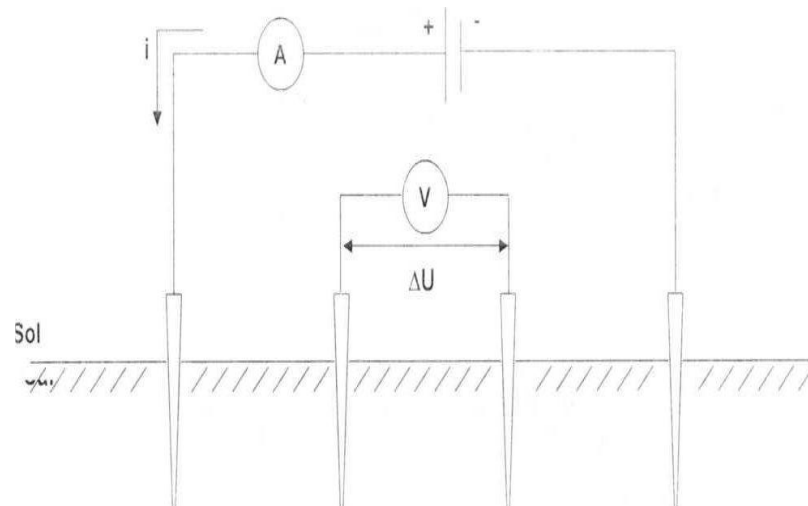


Figure3.2 : méthode de mesure la résistivité [14].

## 2.4 Calcul de la résistivité

La résistivité est donnée par la formule suivante :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (3.2)$$

Où :

$\rho$  : Résistivité moyenne du sol en  $\Omega \cdot m$

R : Résistance moyenne du sol en  $\Omega$

a : Espacement entre les piquets

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta U}{I} a \quad (3.3)$$

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

La valeur de  $R$  en général égal à  $10^6 \Omega$

### Conductivité

la résistivité du sol pour connaître la conductivité (courant de corrosion)

$$C = \frac{1}{\rho} \quad \text{Haute résistivité} \rightarrow \text{conductivité petite}$$

### Etablissement de la résistivité

La méthode de mesure appliquée sur le site permet d'obtenir la résistance moyenne du sol sous-jacent les piquets et sur une profondeur équivalente à l'écartement entre deux piquets. Toutefois, afin d'interpréter les résultats de résistance, il est nécessaire de calculer la résistivité moyenne du sol ( $\rho$ ) en utilisant les formules suivantes :

#### Formule de "Wenner" :

$$* \text{ Pour } b < 1/20.a \Rightarrow \rho = 2.\pi.a.R$$

#### Formule de Schlumberger :

$$* \text{ Pour } b > 1/20.a \Rightarrow \rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.4)$$



Tableau3.5 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk0-pk170 pour l'Ouvrage GZ1

Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )
<b>000 (CNDG)</b>	552,64	<b>058</b>	429,55	<b>118</b>	166,42
<b>000+250</b>	1256,00	<b>060</b>	217,28	<b>120</b>	60,91
<b>002</b>	804,83	<b>062</b>	67,44	<b>122</b>	79,50
<b>004</b>	439,60	<b>064</b>	380,56	<b>124</b>	69,58
<b>006</b>	3742,88	<b>066</b>	259,36	<b>126</b>	72,34
<b>008</b>	1193,20	<b>068</b>	473,88	<b>128</b>	78,87
<b>010</b>	314,00	<b>070</b>	412,21	<b>130</b>	185,38
<b>012</b>	145,69	<b>072</b>	190,53	<b>132</b>	337,86
<b>014</b>	188,40	<b>074 (CC1)</b>	126,98	<b>134</b>	394,38
<b>016</b>	175,84	<b>076</b>	236,12	<b>136</b>	163,65
<b>018</b>	427,04	<b>078</b>	514,96	<b>138</b>	173,07
<b>020</b>	188,40	<b>080</b>	124,59	<b>140</b>	351,68
<b>022</b>	339,12	<b>082</b>	384,33	<b>142</b>	46,09
<b>024</b>	766,16	<b>084</b>	101,48	<b>144 (CC2)</b>	26,87
<b>026</b>	1343,92	<b>086</b>	660,78	<b>146</b>	37,68
<b>028</b>	5652,00	<b>088</b>	306,46	<b>148</b>	8917,63
<b>030</b>	188,40	<b>090</b>	519,85	<b>150</b>	46,22
<b>032</b>	351,68	<b>092</b>	521,24	<b>152</b>	51,11
<b>034</b>	615,44	<b>094</b>	339,12	<b>154</b>	33,53
<b>036</b>	1130,40	<b>096</b>	199,20	<b>156</b>	34,41
<b>038</b>	1921,68	<b>098</b>	288,88	<b>158</b>	35,67
<b>040</b>	401,92	<b>100</b>	267,52	<b>160</b>	54,76
<b>042</b>	601,62	<b>102</b>	113,04	<b>162</b>	84,65
<b>044</b>	213,52	<b>104</b>	200,96	<b>164</b>	32,90
<b>046</b>	414,48	<b>106</b>	314,00	<b>166</b>	56,39
<b>048</b>	477,28	<b>108</b>	138,53	<b>168</b>	48,10
<b>050</b>	1180,64	<b>110</b>	326,56	<b>170</b>	45,46
<b>052</b>	71,59	<b>112</b>	238,64		
<b>054</b>	221,68	<b>114</b>	41,42		
<b>056</b>	319,02	<b>116</b>	72,84		

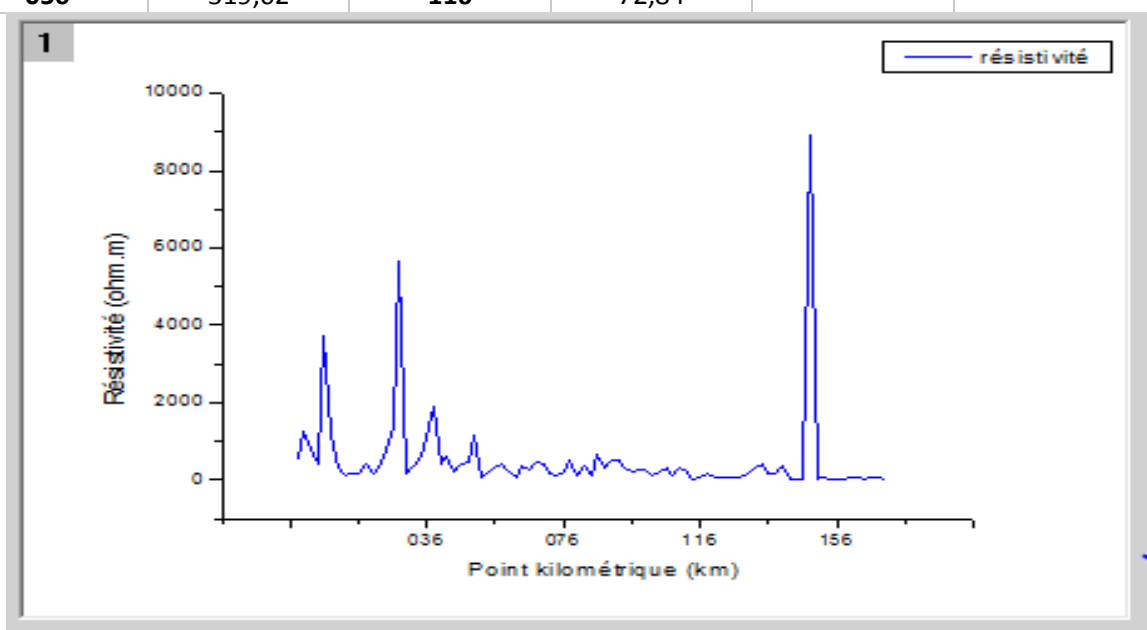


Figure3.2 : courbe de la résistivité de sol en fonction du pk(pk0-pk170)

Tableau3.6 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk170-pk340 pour l'ouvrage GZ1

Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega.m$ )
172	83,90	232	24,36	292	14,19
174	62,54	234	53,50	294	24,74
176	20,22	236	47,47	296 (CC4)	30,77
178	46,97	238	61,41	298	64,93
180	12,81	240	25,62	300	48,23
182	28,63	242	147,32	302	37,55
184	226,08	244	76,36	304	21,35
186	62,29	246	204,72	306	90,80
188	75,23	248	47,35	308	35,29
190	70,21	250	15,50	310	81,64
192	117,68	252	56,01	312	84,27
194	57,65	254	47,85	314	57,77
196	75,36	256	65,18	316	25,37
198	27,75	258	159,38	318	74,85
200	51,37	260	78,75	320	375,54
202	20,47	262	86,66	322	90,05
204	50,61	264	1104,02	324	18,58
206	48,10	266	68,95	326	66,94
208	165,54	268	123,21	328	110,02
210	42,32	270	15,70	330	14,06
212	35,29	272	166,42	332	46,72
214	71,08	274	229,84	334	82,26
216	135,14	276	73,97	336	59,53
218	79,88	278	140,79	338	110,52
220	22,73	280	94,32	340	34,28
222	103,87	282	13,81		
224	76,99	284	159,13		
226 (CC3)	108,39	286	165,28		
228	85,65	288	93,69		
230	440,85	290	94,57		

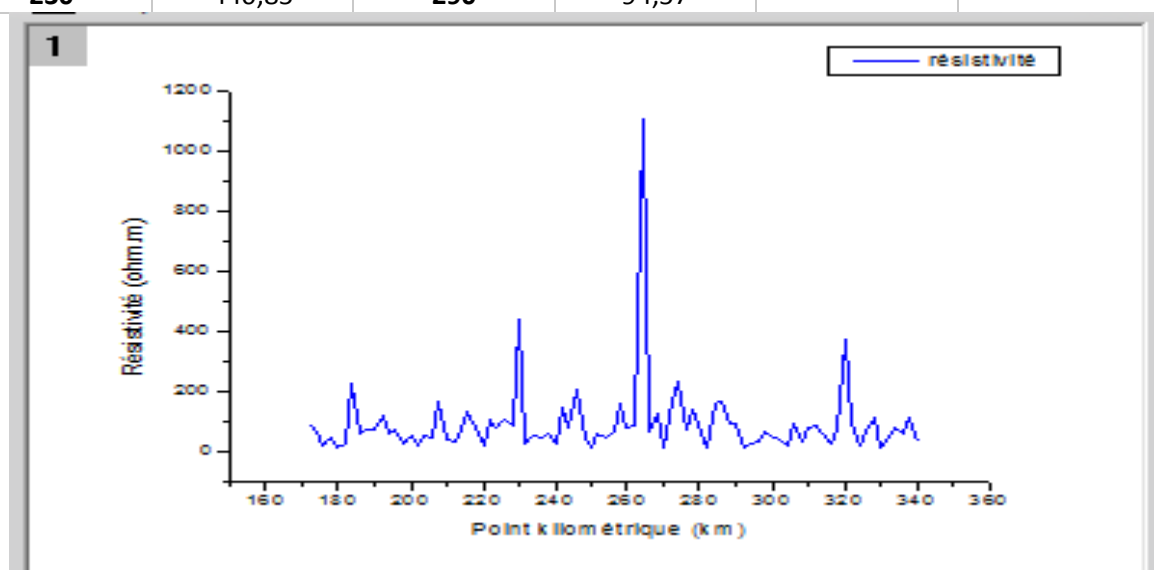


Figure3.3 : résistivité de sol de pk170-pk340

Tableau3.7 : relevée de mesures de la résistivité de sol de pk342-pk505.5 pour l'ouvrage GZ1

Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	Pk (km)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)
342	06,15	398	08,66	454	34,16
344	12,81	400 (CC5)	48,98	456	19,46
346	06,02	402	150,46	458	38,68
348	00,25	404	21,85	460	35,92
350	27,00	406	111,15	462	44,08
352	26,25	408	13,69	466	19,46
354	15,82	410	10,17	468	146,07
356	13,94	412	88,79	470	08,91
358	10,80	414	23,86	472	145,69
360	05,02	416	23,61	474	55,26
362	08,41	418	10,67	476	548,87
364	09,29	420	19,09	478	465,97
366	07,53	422	140,92	480	149,46
368	08,41	424	13,56	482	408,20
370	05,14	426	14,94	484	120,57
372	07,41	428	14,19	486	01,13
374	39,18	430	64,05	488	479,79
376	11,17	432	54,76	490	33,03
378	32,90	434	56,14	492	83,14
380	33,03	436	35,79	494	09,16
382	15,07	438	22,23	496	99,22
384	18,46	440	06,02	498	17,58
386	10,67	442	44,83	500	126,85
388	13,81	444	42,82	502	64,30
390	21,35	446	133,26	504	42,70
392	125,22	448	33,03	505+500 (TA)	17,45
394	12,81	450	29,76		
396	127,73	452	69,20		

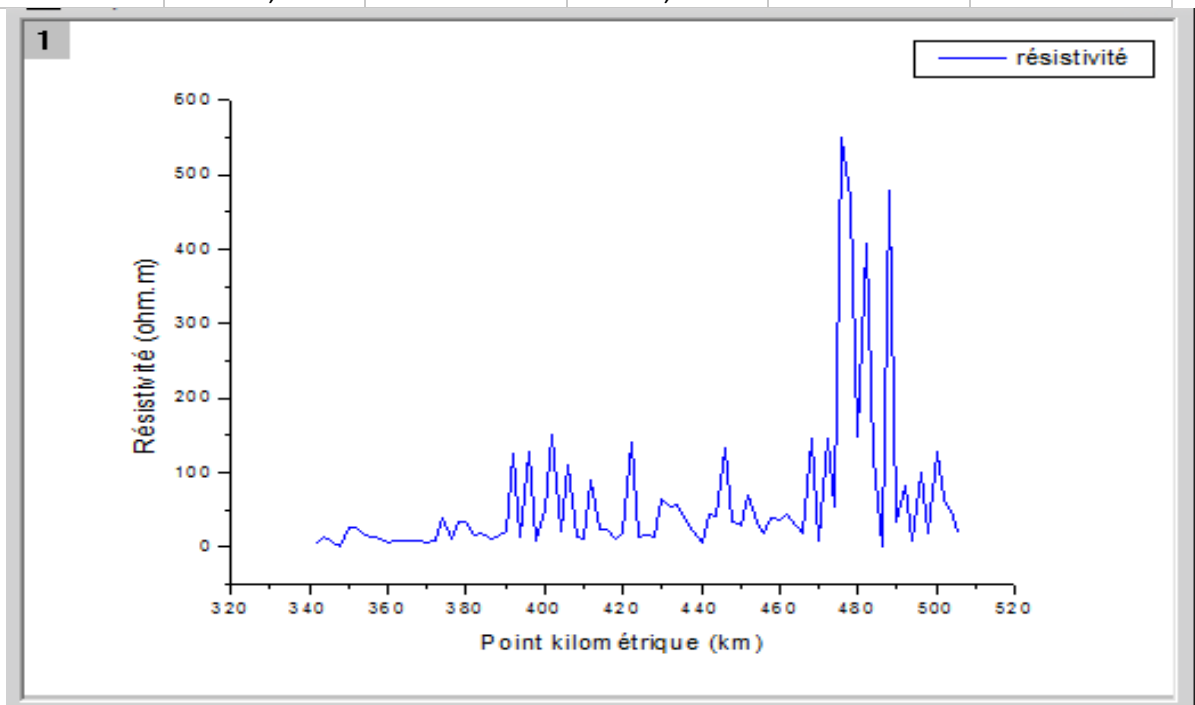


Figure3.4 : résistivité de sol de pk342-pk505+500

### 3 pH du sol

Les sols peuvent avoir une réaction acide ou alcaline ; d'autres peuvent être neutres. On mesure la réaction chimique du sol d'après la valeur de son pH. Des valeurs inférieures à 7 indiquent que le sol est acide ; des valeurs supérieures à 7 indiquent que le sol est alcalin. Plus le pH s'éloigne de la neutralité, plus fortes sont l'acidité ou l'alcalinité.

Mesure de pH:

La méthode la plus exacte pour mesurer le pH du sol consiste à utiliser un pH mètre électrique qui donne directement la valeur du pH quand on plonge des électrodes en verre dans une solution obtenue en mélangeant une part d'échantillon de sol avec deux parts d'eau distillée.

Pour obtenir une idée générale du pH du sol, on peut utiliser sur le terrain du papier de tournesol et des révélateurs de couleur. Le papier de tournesol, qui vire au rouge dans une solution acide et au bleu dans une solution alcaline.

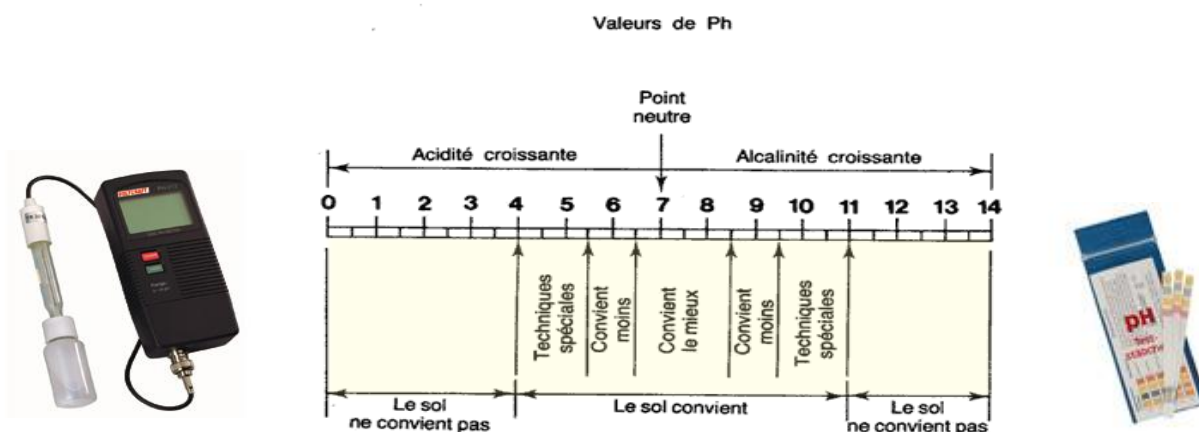


Figure3.5 : Matériels pour la mesure du pH [15].

### 4 L'humidité du sol

L'humidité du sol peut être déterminée de plusieurs façons soit par méthode directe (mesures gravimétriques), soit par des méthodes indirectes [15]. Parmi ces dernières on peut citer :

Tableau3.8 : Méthodes de mesures indirectes de l'humidité [15].

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sonde à neutrons :</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- méthode reposant sur les propriétés de réflexion que possèdent les molécules d'eau à l'égard d'un flux de neutrons.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Technique TDR :</b> (Time Domain Reflectometry)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- méthode déterminant le constant diélectrique du sol, fonction de son état d'humidité.</li> </ul>

## 5 Dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé de pipeline gazoduc (GZ1 40'')

### 5.1 Calcul du nombre de postes, courants, tension et potentiel de pipeline

Dimensionnement de la protection cathodique pour une durée de vie de 25 ans sur le pipeline ayant une résistance d'isolement initiale  $R_0=10000 \Omega\text{m}^2$

Données de base :

$$R_0 = 10000 \Omega\text{m}^2$$

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

$$\beta = 0,124$$

$$D = 40 \text{ pouce (101.6cm)}$$

$$\rho_{\text{acier}} = 18.10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$S = 4,86.10^{-2} \text{ m}^2$$

$$L = 505.5 \text{ km}$$

$$E_{\text{extrémités}} \text{ proposé} = -950 \text{ mV}$$

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

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

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

- Calcul de la variation de la résistance d'isolement du revêtement  $R_t$  pour la durée de vie « t » :

$$R_t = R_0(1 - e^{-\beta t}) / \beta t$$

$R_t$  : résistance d'isolement du revêtement en fonction du temps ;

$R_0$  : résistance d'isolement initiale du revêtement ;

$\beta$  : coefficient de dégradation du revêtement.

$$R_t = R_0(1 - e^{-\beta t}) / \beta \cdot t = \frac{10000(1 - e^{-0.124 \times 25})}{0.124 \times 25} = 3080.48 \Omega\text{m}^2$$

- calcul de la résistance transversale du revêtement  $R_T$  à l'aide de la formule suivante :

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

Où :

D : représente le diamètre extérieur de pipe.

$$R_T = R_t / (\pi \cdot D^2) = \frac{3080.48}{3.14 \times (1,016)^2} = 965.59 \Omega$$

- Détermination de la résistance linéaire de l'acier de la pipe pour une longueur de 1 mètre :

$$r = \rho L/S$$

$\rho$  : Résistivité de l'acier de conduite ;  $\rho = 18.10^{-8}\Omega.m$

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

S : Section de la conduite en  $m^2$

$$r = \rho L/S = \frac{18.10^{-8} \times 1}{4.86.10^{-2}} = 3.7.10^{-6}\Omega m^{-1}$$

- Détermination des coefficients  $\alpha$  (coefficient d'atténuation) et  $\gamma$  (résistance caractéristique de revêtement) :

$$\alpha = \sqrt{r/R_T} \quad \text{et} \quad \gamma = \sqrt{r \cdot R_T}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R_T}} = \sqrt{\frac{3.7 \times 10^{-6}}{965.59}} = 6.19 \cdot 10^{-5}$$

$$\gamma = \sqrt{r \times R_T} = \sqrt{3.7.10^{-6} \times 965.59} = 5.97.10^{-2}\Omega$$

- Calcul de la longueur du bras  $L_B$  (portée d'un poste de soutirage)

$$L_B = [\ln((E_s/E_0) + \sqrt{(E_s/E_0)^2 - 1})] / \alpha$$

$E_s$  : la chute de potentiel au point de soutirage.

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

$$L_B = \ln[(E_s/E_0) + \sqrt{(E_s/E_0)^2 - 1}] / \alpha = \frac{\ln\left(\frac{-700}{-450} + \sqrt{\left(\frac{-700}{-450}\right)^2 - 1}\right)}{6.19 \cdot 10^{-5}} = 1.63 \cdot 10^4 m$$

- Portée totale ( $L_P$ ) d'un poste de soutirage :

$$L_P = 2.L_B$$

$$L_P = 2 \times 1.63.10^4 = 3.26 \cdot 10^4 m$$

- Détermination du nombre de postes  $N_P$  :

$$N_P = (L/L_P) + 1$$

Avec :

L : longueur pipeline à protéger.

$$N_P = \frac{505.5 \cdot 10^3}{3.26 \cdot 10^4} + 1 = 15.5 \approx 16 \text{ postes}$$

- Evaluation de la nouvelle portée ( $L_p'$ ) d'un poste :

$$L_p' = L/N_p$$

$$L_p' = \frac{505.5 \cdot 10^3}{16} = 3.159 \cdot 10^4 \text{ m}$$

- Calcul de la nouvelle chute de potentiel aux extrémités ( $E_0'$ ) selon la relation :

$$E_0' = E_s \cosh(\alpha L_p'/2)$$

$$E_0' = \frac{-700}{\cosh\left(\frac{6,19 \cdot 10^{-5} \times 3.159 \cdot 10^4}{2}\right)} = 461.35 \text{ mV}$$

- Détermination l'intensité de courant soutiré par poste :

$$I = 2 E_0' \sinh(\alpha L_p'/2) / \gamma$$

$$I = 2 \cdot 461,35 \frac{\sinh\left(\frac{6,19 \cdot 10^{-5} \times 3.159 \cdot 10^4}{2}\right)}{5,97 \cdot 10^{-2}} = 17.63 \cdot 10^3 \text{ mA} = 17.63 \text{ A}$$

## 5.2 Dimensionnement des anodes (déversoirs)

### Hypothèse de calcul

- La durée de vie prévue est de 25 ans
- Caractéristique du transformateur redresseur 50 V / 50 A.
- Les anodes utilisées sont en Ferro-silicium :
- La résistivité du sol :  $\rho = 114,08 \Omega \text{ m}$

Consommation : 0.3 Kg/A.an

Densité de courant admissible : 0.2 A/dm<sup>2</sup>.

La masse de l'anode : 22.7 Kg

La longueur de l'anode : 1.524 m

Le diamètre de l'anode : 10.16 cm.

D : diamètre déversoir « anode + backfill » = 0,4 m

- Le potentiel au point de soutirage :  $E_{\text{sout}} = -1.35 \text{ V}$
- La résistance caractéristique  $\gamma = 0.122 \Omega$ .

### Calcul du déversoir

- Calcul de  $R_d$  (résistance du déversoir)

- Courant débité par le poste à  $t = 25$  ans :

$$I_{\text{tot}} = 17,63\text{A}$$

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

$$U_{\text{tot}} = R_{\text{tot}} \cdot I_{\text{tot}} + E_{\text{sout}}$$

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

Donc:

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

$$R_{\text{tot}} = (35 - (-1.35)) / 17.63 = 2.22$$

$$R_{\text{tot}} = 2.02\Omega$$

Tel que :

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{câble}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{déversoir}}$$

Rcâble : résistance du câble qui liee l'anode avec le poste de soutirage

$$R_{\text{câble}} = \rho (L / S)$$

Où :

$\rho$  : la résistivité du cuivre =  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$  ;

L : longueur du câble positif + négatif= 300 m ;

S : section du câble =  $50 \text{ mm}^2$

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

$$R_{\text{câble}} = 0.102\Omega$$

$R_{\text{pipe}}$  : la résistance caractéristique de pipe :  $\gamma = 0.122 \Omega$

Donc :

$$R_{\text{déversoir}} = R_{\text{tot}} - R_{\text{câble}} - R_{\text{pipe}}$$

$$R_{\text{déversoir}} = 2.02 - 0.102 - 0.122 = 1.79\Omega$$

Donc la valeur de la résistance du déversoir doit être limitée à  $1.79\Omega$

#### Calcul de la masse anodique du déversoir.

Masse de Ferro-silicium minimal pour assurer la durée de vie :



$Mt = \text{la consommation du métal (Kg/A ans)} \times t \times I_{\text{tot}}$

$Mt$  : La masse totale de Ferro-silicium nécessaire pour les 25 ans.

$I_{\text{tot}}$  : Intensité du courant nécessaire pour les 25 ans

$$Mt = 0.3 \text{ (Kg/A ans). } 25\text{ans. } 17.63\text{A}$$

$$Mt = 132.22 \text{ Kg}$$

Ce qui correspond à un nombre minimal d'anodes égale à :

$$Na = Mt / Ma$$

$$Na = 132.22 / 22.7$$

$$Na = 5.82 \text{ donc } Na \approx 6 \text{ anodes}$$

Les résultats de dimensionnement sont donnés sous forme de tableau :

Tableau3.9 : résultats de dimensionnement.

La variation de la résistance d'isolement du revêtement $R_t$	$R_t=3080,48 \Omega.m^2$
Le nombre de postes $N_p$	$N_p=16$ poste
La portée ( $L_p'$ ) d'un poste	$L_p'=3,159\text{m}$
La chute de potentiel aux extrémités ( $E_0'$ )	$E_0=461,35\text{mv}$
l'intensité de courant soutiré par poste	$I=17,63 \text{ A}$
Le nombre d'anodes $N_a$	$N_a=6$ anodes

## 6. Méthode de relevés de potentiel

Le relevé de potentiel se fait en général tous les deux (02) Km et il permet d'évaluer les conditions de protection d'une structure enfouie à savoir :

- \*Vérification de l'efficacité de la protection cathodique par rapport aux critères de protection.
- \*Vérification des emplacements où le revêtement peut s'être affaibli.
- \*Vérification de l'influence de systèmes extérieurs.
- \*Vérification de continuité électrique ou contact avec d'autres structures métalliques.

Les mesures de potentiel relevées le long du pipeline permettent d'évaluer les variations de la protection cathodique présentes le long de ce dernier. Suite à la campagne de mesures, les résultats sont présentés sous forme graphique permettant d'évaluer le profil de la protection cathodique le long du pipeline et d'évaluer les points non protégés nécessitant une protection supplémentaire [16].

Les mesures de potentiels sont réalisées à l'aide d'un voltmètre (préférentiellement à mémoire), d'une électrode de référence.

La figure suivante schématise le montage nécessaire à la réalisation d'un relevé de potentiel simple.

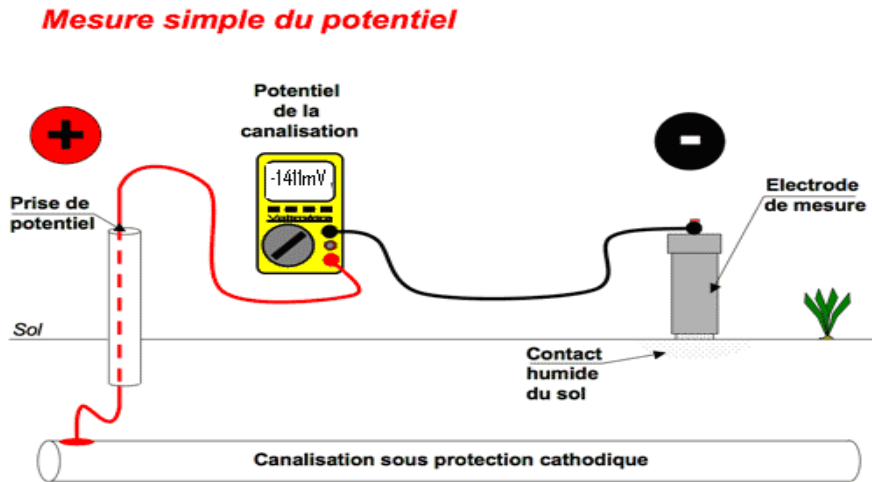


Figure3.6: Methode de mesures de potentiels de la protection cathodique [14].

### Les équipements de mesure :

Pour la réalisation des mesures aux points de vérification, les équipements suivants sont nécessaires :

#### a) Voltmètre :

Ce sont des appareils qui permettent à la fois des mesures de tension, d'intensité de courant alternatif et continu, et des mesures de résistance électrique.

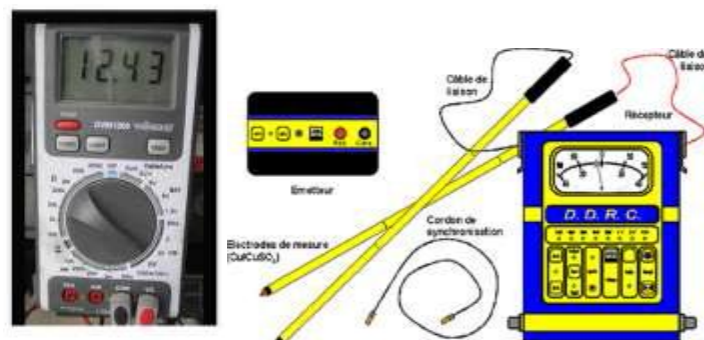


Figure3.7 : Voltmètre [4].

### b) L'électrode au sulfate de cuivre

C'est un réservoir cylindrique en matière plastique obturé à sa base par un bouchon poreux et rempli d'une solution saturée de sulfate de cuivre dans laquelle plonge une tige en cuivre. Cette électrode sert de référence pour toute mesure de potentiel.

Pour la fiabilité de la mesure il faut prendre les précautions suivantes :

- La tige en cuivre soit propre et non oxydée
- La solution doit être saturée (Reste au fond des cristaux de sulfate de cuivre)
- Humidifier l'emplacement de l'électrode
- Eviter de placer l'électrode dans des endroits trop résistants
- L'électrode soit placée au droit de l'axe de la conduite.



Figure3.8 : Différents types d'électrodes de référence [4].

### 6.1 Campagne de mesures de potentiels en position ON- (1<sup>er</sup> semestre 2012)

Des mesures de potentiels ont été effectués sur la ligne GZ1 et on tracera les graphes pour les tronçons (CNDG/CC1); (CC1/CC2); (CC2/CC3); (CC3/CC4); (CC4/CC5); (CC5/TA).

Tableau3.10:Compagne de mesures de potentiels de l'ouvrageGZ1 (CNDG/ CC1)

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	-	491	PJI	850	25	7,640	1080	PCTE	850
2	0,080	947	PCTE	850	26	7,680	1024	PCTE	850
3	0,100	1064	PCTE	850	27	7,720	859	PCTE	850
4	0,120	1232	PCTE	850	28	7,740	699	PCTE	850
5	0,160	999	PCTE	850	29	7,760	636	PCTE	850
6	0,200	1324	PEP	850	30	7,782	665	PCTE	850
7	0,270	1122	PCTE	850	31	7,780	669	PCTE	850
8	0,315	876	PTG	850	32	7,830	473	PCTE	850
9	0,345	875	PTG	850	33	8,640	996	PPS	850
10	0,954	857	PEP	850	34	9,400	636	PMA	850
11	1,445	1107	PEP	850	35	9,650	960	PCTE	850
12	2,000	1001	PTG	850	36	9,680	929	PPS	850
13	2,980	752	PCTE	850	37	10,020	1005	PCTE	850
14	2,982	740	PCTE	850	38	10,300	2240	PCTE	850
15	3,000	733	PCTE	850	39	10,320	1843	PPA	850
16	3,040	817	PCTE	850	40	10,840	1090	PCTE	850
17	3,060	876	PCTE	850	41	11,280	338	PCTE	850
18	3,100	960	PCTE	850	42	11,320	231	PCTE	850
19	3,250	1001	PPS	850	43	11,340	138	PCTE	850
20	4,434	722	PCTE	850	44	11,360	311	PCTE	850
21	4,430	748	PCTE	850	45	11,390	391	PCTE	850
22	5,250	360	PPS	850	46	11,420	460	PCTE	850
23	7,250	1066	PMA	850	47	11,800	543	PMA	850
24	7,600	1105	PCTE	850	48	12,220	518	PMA	850

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
49	12,650	503	PPS	850	74	50,070	1313	PPS	850
50	14,640	1158	PPA	850	75	52,100	1238	PMA	850
51	16,100	1187	PPS	850	76	53,550	1231	PPS	850
52	17,511		PPS	850	77	55,601		PPS	850
53	18,140	905	PPS	850	78	55,670	1270	PPS	850
54	20,100	779	PPS	850	79	57,530	1276	PPS	850
55	20,500	1107	PCTE	850	80	59,500	1336	PMA	850
56	22,100	1132	PPA	850	81	59,770	1389	PMA	850
57	23,600	1095	PPS	850	82	61,052	1420	PPS	850
58	25,600	1100	PPS	850	83	62,970	1410	PPS	850
59	27,600	1087	PPS	850	84	64,900	1446	PPS	850
60	29,640	1027	PMA	850	85	66,900	1421	PMA	850
61	31,200	1149	PPS	850	86	68,375	1444	PPS	850
62	33,100	1145	PPS	850	87	70,300	1495	PPS	850
63	35,100	1133	PPS	850	88	72,300	1518	PPS	850
64	37,100	1327	PMA	850	89	72,700	1439	PCTE	850
65	37,335		PPS	850	90	74,600	1608	PCTE	850
66	38,570	1351	PPS	850	91	74,620	1682	PCTE	850
67	39,480	1293	PMA	850	92	74,640	1646	PCTE	850
68	39,900	1394	PMA	850	93	74,660	1489	PCTE	850
69	40,580	1391	PPS	850	94	74,680	1628	PCTE	850
70	42,580	1400	PPS	850	95	74,730	1613	PCTE	850
71	44,580	1411	PMA	850	96	74,735	1617	PCTE	850
72	46,100	1414	PPS	850	97	74,952	1029	PJI	850
73	48,100	1381	PPS	850					

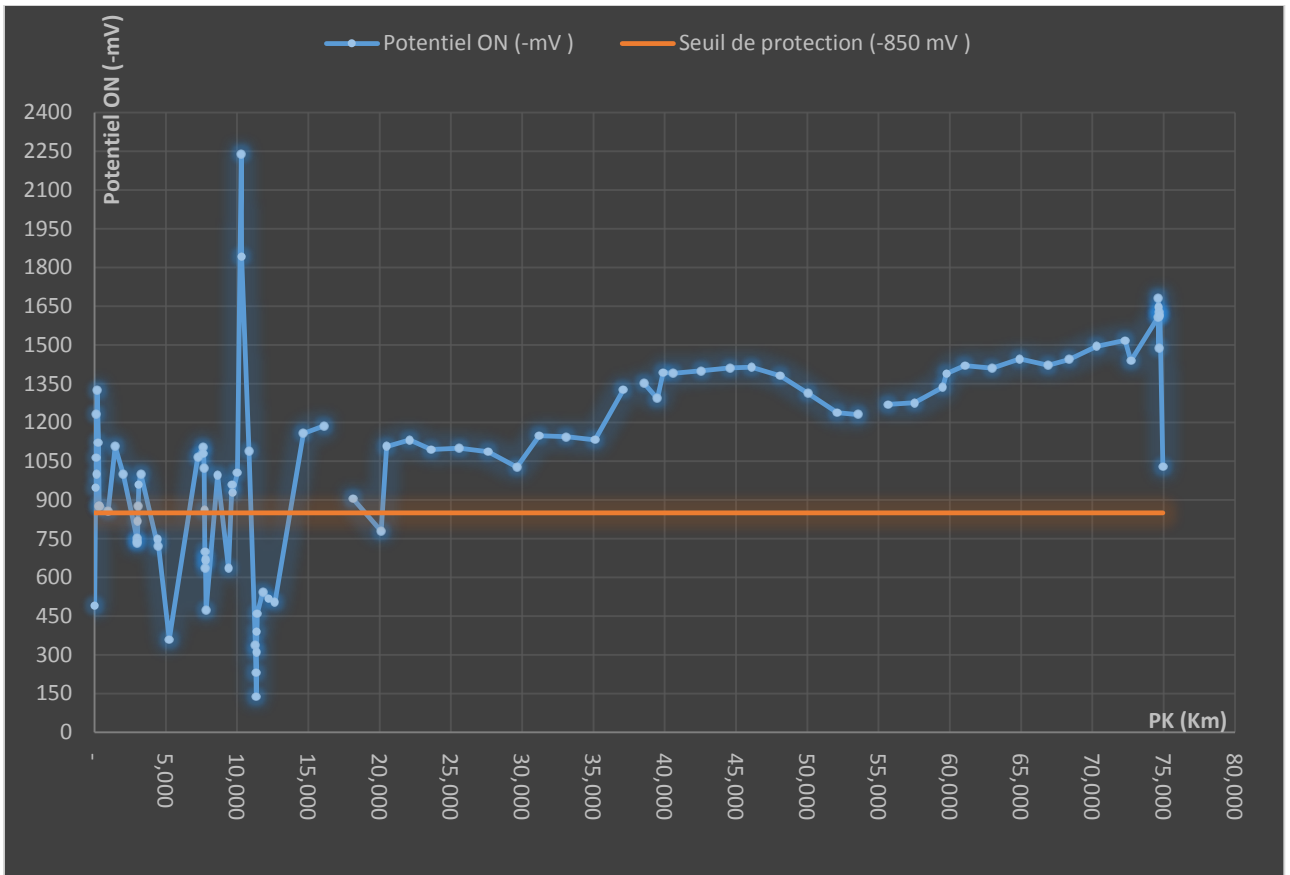


Figure3.9 : Potentiel de l'ouvrage GZ1 40" Tronçon (CNDG/ CC1)

Tableau3.11:Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage RGZ1(CC1/CC2).

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	75,060	1561	PJI	850	28	100,680	1318	PCTE	850
2	75,300	1512	PTG	850	29	101,200	1587	PPS	850
3	75,500	1501	PMA	850	30	103,180	1326	PEP	850
4	75,900	1420	PMA	850	31	105,240	1290	PPS	850
5	76,100	1659	PCTE	850	32	106,990		PPS	850
6	76,120	1520	PCTE	850	33	107,211	1372	PMA	850
7	76,140	1518	PCTE	850	34	108,360	1365	PEP	850
8	76,160	1568	PCTE	850	35	108,700	1413	PPS	850
9	76,180	1593	PCTE	850	36	109,750	1504	PPS	850
10	76,280	1678	PCTE	850	37	110,700	1488	PEP	850
11	77,400	1581	PPS	850	38	113,380	1933	PEP	850
12	79,440	1479	PPS	850	39	113,760	1778	PTG	850
13	81,400	1407	PPS	850	40	114,000	1838	PMA	850
14	83,400	1449	PMA	850	41	114,900	1253	PMA	850
15	84,800	1409	PPS	850	42	116,100	1255	PEP	850
16	86,800	1717	PPS	850	43	116,470	1420	PPS	850
17	88,800	1457	PPS	850	44	118,430	1520	PPS	850
18	90,800	1429	PMA	850	45	119,050	1117	PJI	850
19	92,500	1400	PPS	850	46	119,300	1303	PTG	850
20	94,800	1447	PPS	850	47	119,600	1445	PCTE	850
21	96,500	1504	PPS	850	48	119,849	1005	PCTE	850
22	97,800	1322	PMA	850	49	119,850	1004	PCTE	850
23	98,250	1578	PMA	850	50	119,853	1005	PJI	850
24	99,700	1487	PMA	850	51	119,860	979	PPS	850
25	100,000	1320	PCTE	850	52	119,900	961	PJI	850
26	100,005	1322	PCTE	850	53	120,000	1184	PTG	850
27	100,664		PPS	850	54	120,050	1284	PCTE	850

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
55	120,580	1109	PEP	850	72	129,000	1509	PPS	850
56	121,860	1044	PPS	850	73	129,100	1477	PEP	850
57	121,920	1059	PPS	850	74	129,250	1450	PMA	850
58	122,430	1126	PMA	850	75	130,015	1410	PEP	850
59	123,640	1262	PPS	850	76	130,016	1407	PMA	850
60	123,730	1206	PPS	850	77	132,650	1187	PPS	850
61	124,950	1273	PPS	850	78	134,860	1137	PPS	850
62	125,020	1286	PPS	850	79	136,610	1193	PPS	850
63	125,600	1288	PPS	850	80	138,600	1268	PMA	850
64	125,815	1304	PPS	850	81	140,100	1573	PPS	850
65	126,386		PS6	850	82	142,100	1799	PPS	850
66	126,400	1365	PPS	850	83	144,100	2369	PPS	850
67	126,450	1276	PPS	850	84	144,200	2602	PCTE	850
68	127,460	1208	PEP	850	85	144,220	2503	PCTE	850
69	128,300	1327	PPS	850	86	144,240	2416	PCTE	850
70	128,360	1340	PPS	850	87	144,260	2034	PCTE	850
71	128,900	1554	PPS	850	88	144,280	2276	PCTE	850

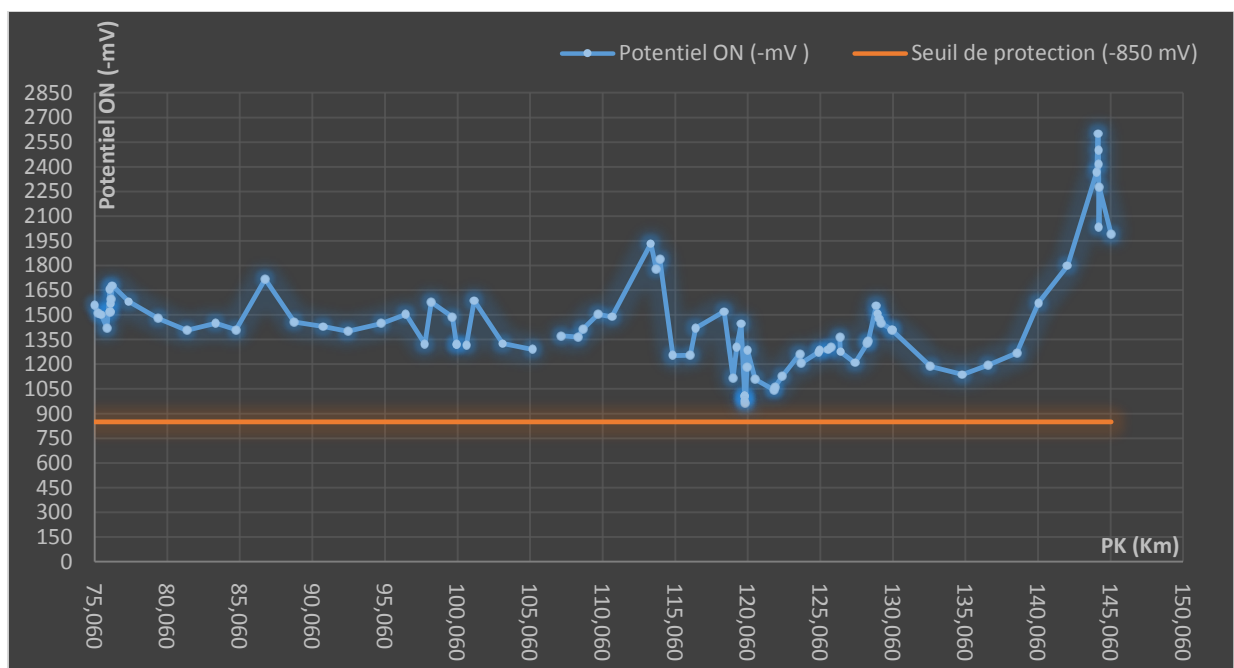


Figure3.10 : potentiel d'ouvrage GZ1 40'' Tronçon (CC1/ CC2)



Tableau3.12: Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC2/CC3).

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	145,194	1300	PJI	850	29	162,936	1055	PCTE	850
2	145,200	1004	PTG	850	30	163,200	1013	PPS	850
3	145,250	991	PTG	850	31	165,100	1057	PPS	850
4	145,610	1225	PCTE	850	32	165,189	1020	PPS	850
5	145,630	1230	PCTE	850	33	166,830	1153	PMA	850
6	145,632	1219	PCTE	850	34	167,100	1144	PMA	850
7	145,650	1250	PCTE	850	35	167,280	1146	PMA	850
8	145,651	1215	PCTE	850	36	169,100	1139	PPS	850
9	145,750	1238	PPS	850	37	171,100	1153	PPS	850
10	146,200	1128	PPS	850	38	173,100	1179	PPS	850
11	146,750	970	PPS	850	39	174,600	1207	PMA	850
12	147,300	921	PPS	850	40	176,120	1216	PPS	850
13	148,500	831	PPS	850	41	178,600	1229	PPS	850
14	148,700	869	PPS	850	42	179,100	1234	PMA	850
15	149,740	799	PMA	850	43	179,460	1206	PMA	850
16	150,640	713	PEP	850	44	180,600	1221	PPS	850
17	152,950	905	PPS	850	45	182,100	1251	PMA	850
18	155,050	913	PMA	850	46	183,600	1137	PPS	850
19	155,850	897	PPS	850	47	184,200	1238	PPS	850
20	156,060	887	PPS	850	48	184,350	1204	PPS	850
21	157,655	857	PPS	850	49	186,200	1234	PPS	850
22	159,960	1191	PPS	850	50	187,230	1267	PPS	850
23	159,985	1422	PPS	850	51	187,280	1182	PPS	850
24	160,200	1712	PEP	850	52	187,350		PJI	850
25	160,215	1677	PMA	850	53	187,355	1226	PCTE	850
26	160,500		PJI	850	54	188,230	1177	PPS	850
27	161,200	1077	PPS	850	55	189,700	1130	PMA	850
28	162,932	1001	PJI	850	56	191,750	1506	PPS	850

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
57	191,900	1658	PMA	850	74	210,700	1199	PPS	850
58	193,800	1085	PPS	850	75	212,200	1133	PMA	850
59	195,820	1125	PPS	850	76	214,230	1113	PPS	850
60	197,320	1182	PMA	850	77	216,306	1121	PPS	850
61	199,350	1163	PPS	850	78	218,300	1129	PPS	850
62	201,400	1190	PPS	850	79	219,900	1188	PMA	850
63	201,800	-	PJI	850	80	221,800	1231	PPS	850
64	203,264	-	PPS	850	81	223,800	1390	PPS	850
65	204,430	1108	PPS	850	82	225,200	1612	PMA	850
66	204,960	1134	PMA	850	83	225,300	1590	PCTE	850
67	206,950	1207	PPS	850	84	225,400	1417	PCTE	850
68	207,300	1122	PPS	850	85	225,460	1543	PCTE	850
69	207,430	1145	PMA	850	86	225,480	1624	PCTE	850
70	208,280	1148	PPS	850	87	225,481	1623	PCTE	850
71	208,320	1184	PPS	850	88	225,580	1535	PTG	850
72	208,940	1145	PPS	850	89	225,608	1424	PJI	850
73	210,400	1224	PPS	850					

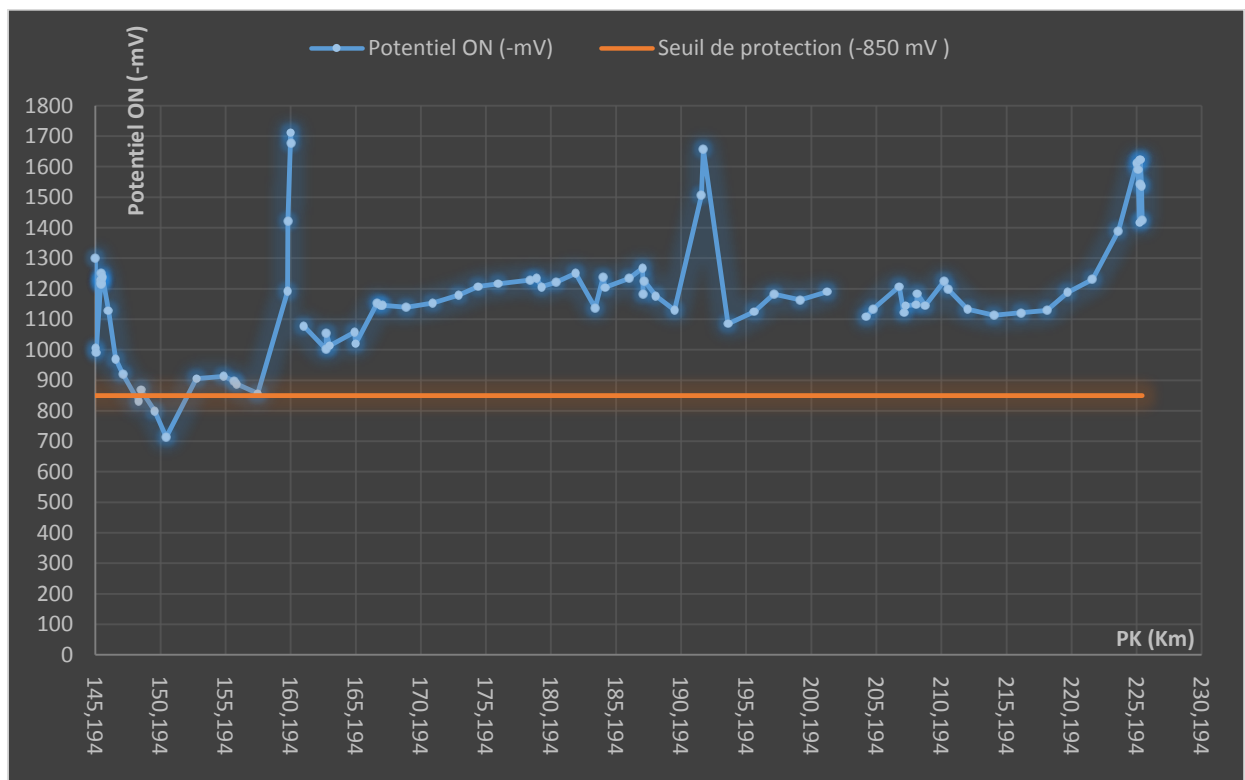


Figure3.11 : potentiel d'ouvrage RGZ1 40'' Tronçon (CC2/ CC3)

Tableau3.13:Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC3/CC4).

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	226,540		PJI	850	17	262,800	1148	PMA	850
2	227,000	1709	PMA	850	18	265,300	1144	PPS	850
3	229,500	1341	PPS	850	19	267,800	1229	PPS	850
4	232,000	1387	PPS	850	20	270,300	1077	PMA	850
5	234,500	1341	PMA	850	21	272,800	1062	PPS	850
6	237,000	1308	PPS	850	22	273,900	1260	PMA	850
7	239,000	1492	PMA	850	23	275,300	1197	PPS	850
8	240,000	2033	PMA	850	24	277,800	1095	PPS	850
9	241,800	1698	PPS	850	25	280,300	1104	PMA	850
10	244,300	1428	PPS	850	26	282,800	1081	PPS	850
11	246,800	1209	PMA	850	27	285,300	1120	PPS	850
12	249,300	1332	PPS	850	28	287,800	1087	PMA	850
13	252,800	1235	PPS	850	29	290,300	1111	PPS	850
14	255,300	1284	PMA	850	30	293,400	1148	PPS	850
15	257,800	1230	PPS	850	31	295,900	1480	PMA	850
16	260,300	1226	PPS	850	32	296,316	1591	PJI	850

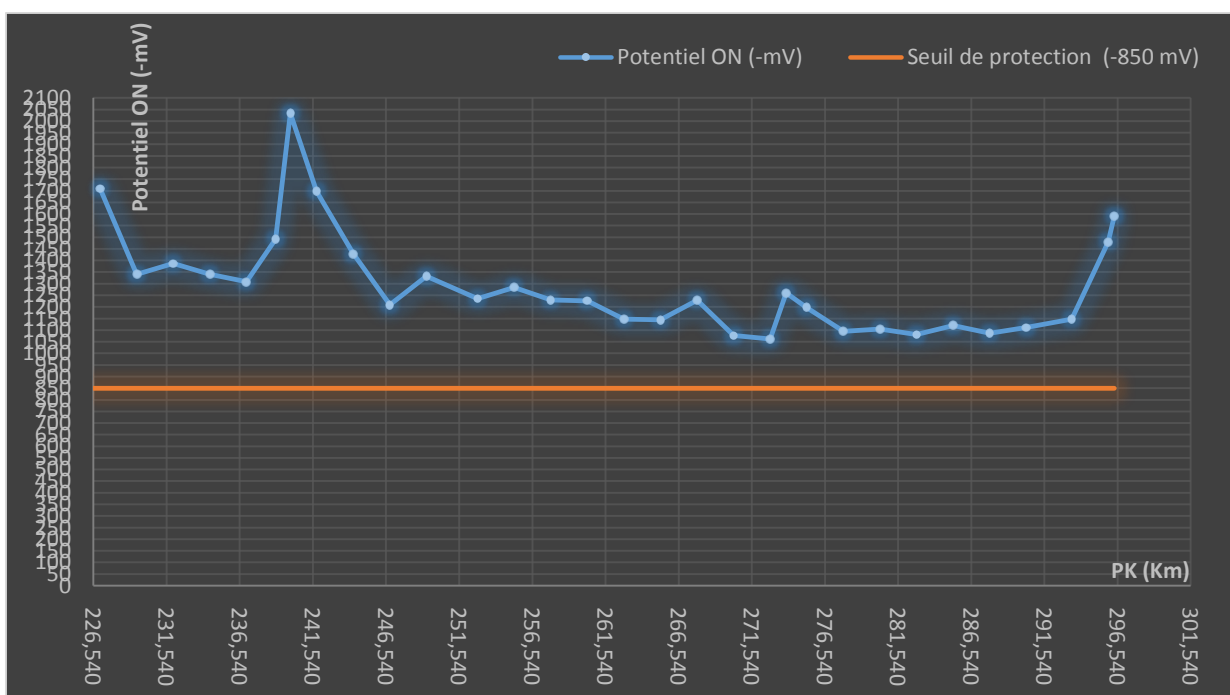


Figure3.12 : potentiel d'ouvrage GZ1 40'' Tronçon (CC3/ CC4)

Tableau3.14:Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC4/CC5).

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	296,406	998	PJI	850	23	352,200	1571	PPS	850
2	299,800	1009	PPS	850	24	354,700	1711	PMA	850
3	301,200	1571	PMA	850	25	357,200	1362	PPS	850
4	304,700	1486	PPS	850	26	359,700	1278	PPS	850
5	307,200	1282	PPS	850	27	362,200	1409	PMA	850
6	309,700	1354	PMA	850	28	364,700	1483	PMA	850
7	312,200	1366	PPS	850	29	367,200	1407	PPS	850
8	314,700	1394	PPS	850	30	369,700	1406	PPS	850
9	317,200	1421	PPS	850	31	372,200	1404	PMA	850
10	319,600	1646	PMA	850	32	374,700	1327	PPS	850
11	322,200	1175	PPS	850	33	377,200	1411	PPS	850
12	324,700	1171	PMA	850	34	379,700	1551	PMA	850
13	327,200	1132	PPS	850	35	382,200	1065	PPS	850
14	330,400	1746	PMA	850	36	384,700	1046	PPS	850
15	332,500	1151	PPS	850	37	387,200	1362	PMA	850
16	334,700	1148	PPS	850	38	389,700	1425	PPS	850
17	337,200	1558	PMA	850	39	392,200	1420	PPS	850
18	339,700	1481	PMA	850	40	394,700	1468	PMA	850
19	342,200	1549	PPS	850	41	397,200	1588	PPS	850
20	344,700	1098	PPS	850	42	399,700	1186	PMA	850
21	347,200	1504	PPS	850	43	400,245	666	PJI	850
22	349,700	1425	PMA	850					

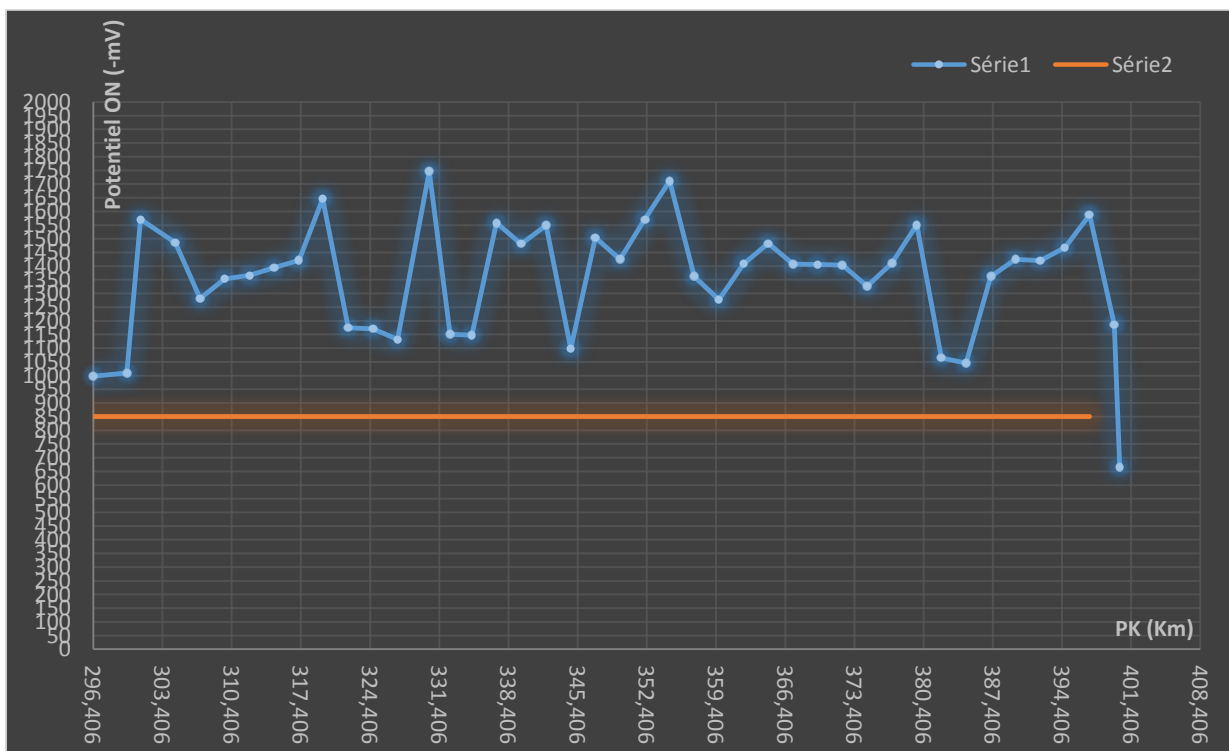


Figure3.13 : potentiel d'ouvrage GZ1 40'' Tronçon (CC4/ CC5)

Tableau3.15:Campagne de mesures de potentiels de l'ouvrage GZ1(CC5/TA).

Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)	Point Testé N°	PK(Km)	Potentiel ON (-mV)	Type de Prise	Seuil de Protection (-mV)
1	400,345	63	PJI	850	28	455,000	1503	PPS	850
2	402,500	1293	PPS	850	29	457,500	1253	PPS	850
3	405,000	1314	PPS	850	30	460,000	1295	PMA	850
4	406,900	1171	PMA	850	31	462,500	1435	PPS	850
5	407,000	1212	PPS	850	32	465,000	1434	PPS	850
6	408,500	1052	PMA	850	33	467,500	1486	PMA	850
7	411,300	1223	PPS	850	34	470,000	1393	PPS	850
8	414,500	1300	PMA	850	35	472,700	1360	PMA	850
9	416,500	1186	PPS	850	36	475,000	1231	PPS	850
10	419,000	1089	PPS	850	37	477,500	1362	PPS	850
11	422,000	939	PMA	850	38	479,100	1032	PPS	850
12	425,000	975	PPS	850	39	480,000	1355	PMA	850
13	428,100	1080	PMA	850	40	482,500	1304	PPS	850
14	429,500	991	PPS	850	41	484,450	1552	PCTE	850
15	431,300	989	PPS	850	42	484,700	1489	Coffret	850
16	432,500	1100	PPS	850	43	487,900	1783	Coffret	850
17	433,800	1240	PMA	850	44	490,200	1308	PPS	850
18	435,000	1117	PPS	850	45	492,500	1662	PPS	850
19	437,100	1264	PMA	850	46	494,950	1791	PPS	850
20	438,600	1098	PPS	850	47	495,200	1563	PMA	850
21	440,000	1124	PPS	850	48	497,500	1778	PPS	850
22	442,500	1733	PPS	850	49	500,000	1547	PPS	850
23	445,000	1441	PMA	850	50	501,000	1692	PPS	850
24	447,500	1420	PPS	850	51	502,500	1643	PMA	850
25	450,000	1531	PPS	850	52	504,500		PPS	850
26	452,500	1539	PPS	850	53	505,551	2100	PJI	850
27	453,400	1557	PMA	850					

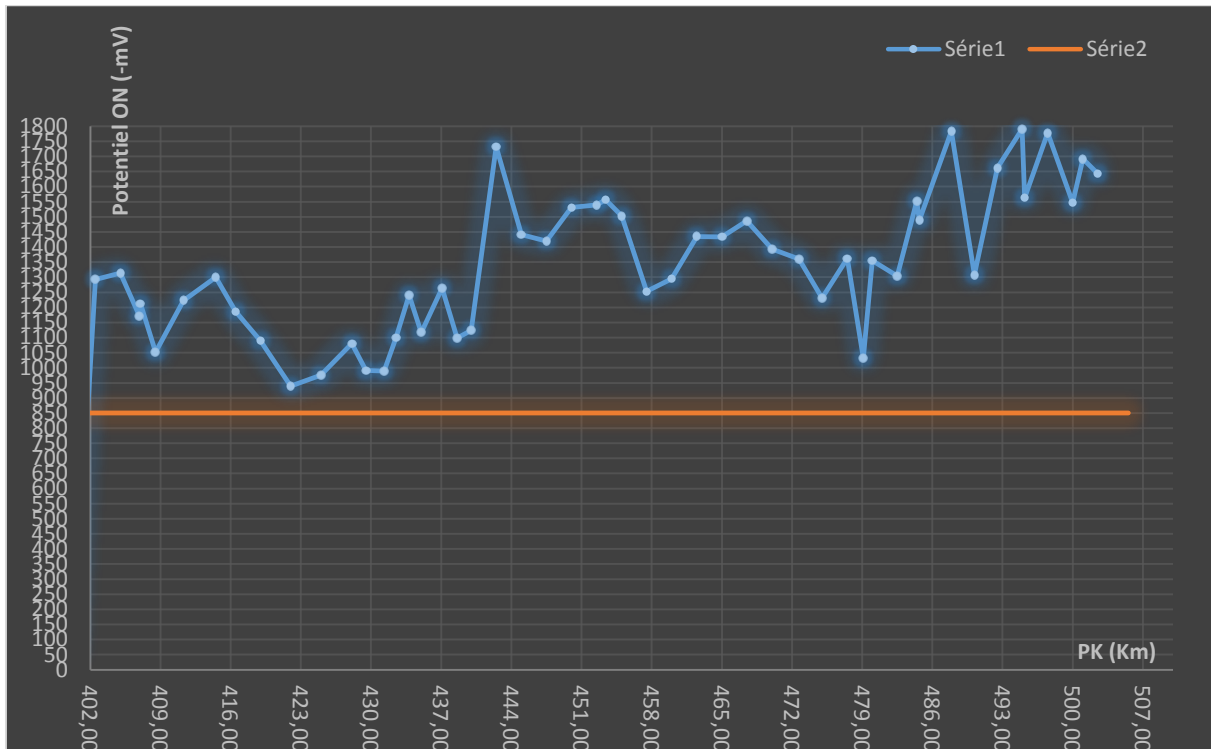


Figure 3.14 : potentiel d'ouvrage GZ1 40'' Tronçon (CC5/ TA)

Ces campagnes de mesures ont montrés que les valeurs de potentiels de la protection cathodique de l'ouvrage métallique considéré sont variables par rapport au potentiel standard de protection de l'acier  $-850\text{mV}/\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ce qui montre la nécessité de la maintenance de la ligne en faisant varier ces potentiels afin de palier aux conséquences de l'amorçage et la propagation des piqures de corrosion dans le cas de la sous protection ou l'apparition des phénomènes de décollement des revêtements par dégagement d'hydrogène et la formation des cloques. Les résultats obtenus dans ce chapitre seront discutés dans le chapitre suivant.

## Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre les mesures du potentiel de la protection cathodique en position ON et les mesures de résistivité de sol sur toute la ligne de l'ouvrage métallique GZ1. Ces études ont été réalisées dans le but de prédire les défaillances particulièrement les défaillances par corrosion afin d'éviter l'apparition des pics de corrosion (Pitting corrosion) et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible et de maintenir le potentiel de la ligne par rapport au potentiel standard de protection soit  $-850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$  par courant imposé.

La corrosivité des sols a été estimée par les mesures de la résistivité qui peuvent être obtenus par la méthode de Wenner ou la méthode des quatre piquets ou par la méthode de Schlumberger. Plus les valeurs de la résistivité sont faibles plus le sol est corrosif. Les résultats de la résistivité du sol de l'ouvrage métallique considéré ont montrés que le pipe traverse plusieurs types de sol dont certains sont très corrosifs.

Les campagnes de mesures du potentiel ont montrés que les valeurs sont variables par rapport au potentiel standard de protection de l'acier  $-850\text{mV/Cu/CuSO}_4$  ce qui montre la nécessité de la maintenance de la ligne en faisant varier ces potentiels.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique par courant imposé de l'ouvrage métallique GZ1 comprenant les calculs du nombre de postes de soutirage, le courant à débiter par postes et le calcul du nombre d'anodes ont donnés les résultats suivants : 16 postes de soutirage du type transformateur-redresseur (50V-50A) et 6 anodes en Ferro-silicium . On a estimé que la durée de vie de la protection cathodique est de 25 ans.

# **Chapitre 04**

Résultats et discussion



## Introduction

L'étude dans le cadre de ce projet a portée sur la maintenance du système de protection des structures métalliques enterrées comme la ligne GZ1 du réseau de pipelines exploité par la société SONATRACH – Algérie acheminant le gaz naturel depuis le gisement de Hassi R'mell à Arzew sur une distance de 505 Kms.

Les canalisations, dont le matériau constitutif est l'acier micro allié de nuance API 5L X60 selon la norme API (American Petroleum institute) sont protégées par un revêtement externe et interne (protection passive) aussi étanche que possible afin d'isoler l'acier des milieux corrosifs. Ces revêtements sont à base de liants hydrocarbonés (brai de houille ou de bitume de pétrole) ou encore constitués par un système multicouche associant un primaire époxy pour l'adhérence à l'acier, un adhésif intermédiaire et une couche de plusieurs millimètres en polymères PE polyéthylène, ou PP polypropylène. Cette protection est complétée par une protection cathodique active dont le potentiel est maintenu à  $-850$  mV /Cu/CuSO<sub>4</sub> par courant imposé ou par anode sacrificielle.

Les travaux d'inspection menés par SONATRACH sur cette ligne après une quarantaine d'années d'exploitation ont montrés que les aciers sont particulièrement exposés à des risques de défaillances du faite de leur environnement (tubes enterrées) et l'apparition des phénomènes de dégradation par corrosion et par fissuration sur les surfaces extérieures de la ligne aboutissant à la formation des piqûres de corrosion (pitting corrosion)

La méthodologie qui a été développée dans ce projet est qu'à partir de l'acquisition des données du contexte industriel géré par DRC (Direction de réparation des canalisations) et RTO (région de transport ouest) - SONATRACH Bethioua – Oran comprenant des mesures du potentiel de la protection cathodique en position ON et des mesures de résistivité de sol, des études ont été réalisées dans le but de prédire les défaillances particulièrement les défaillances par corrosion afin d'éviter l'apparition des pics de corrosion et plus particulièrement dans des régions où la résistivité du sol est faible et de maintenir le potentiel de la ligne par rapport au potentiel standard de protection. Ces études ont été terminées par des études de dimensionnement de l'ouvrage métallique GZ1.

Après avoir décrit la ligne de l'ouvrage métallique et présenté les méthodes et les matériels dans les chapitres précédents, nous consacrerons ce chapitre à la présentation des résultats de mesure de la résistivité du sol, la campagne de mesure de potentiel de la ligne le dimensionnement et leurs discussions.

## 1. Résistivité du sol

Les aciers API sont produits selon la norme standard API 5 L (American Petroleum Institute) afin de satisfaire aux cahiers de charges les plus sévères comme la résistance à la corrosion.

Parmi les paramètres qui influent sur les structures enterrées, c'est la corrosivité des sols qui peut être estimée par les mesures de la résistivité du sol à la conception de l'ouvrage métallique.

Les résultats ont montrés que les valeurs de la résistivité du sol sont différentes selon le tracé de la ligne en passant par des sols agressifs. D'après le Relevé de mesure de la résistivité du sol nous avons obtenus :

Dans le tronçon (CNDG/CC1) passant par la partie sud (SAHARA), la résistivité de sol moyenne est de  $722.996\Omega.m$ , on a 66% des points de mesures supérieur de  $500\Omega.m$ , donc le sol de cette partie est progressivement moins corrosif.

Dans le tronçon (CC1 / CC2) il y'a 57% de point de mesures de la résistivité de sol variant entre  $100\Omega.m$  et  $500\Omega.m$ , avec une résistivité moyenne de  $231.917\Omega.m$  ce qui donne un sol très peu corrosif.

Dans les tronçons CC2 / CC3) et (CC3 / CC4) la nature de sol varie entre corrosif et sévèrement corrosif.

Dans le tronçon (CC4 / CC5) 71% des mesures sont inférieures à  $50\Omega.m$ , avec une résistivité moyenne de  $44.61\Omega.m$ . C'est un sol sévèrement corrosif.

Dans le tronçon (CC5 / TA) La résistivité moyenne est de  $85.84\Omega.m$ , le sol est corrosif mais, il y'a des points (28 points) dont la résistivité est inférieure à  $50\Omega.m$  donnant 51%. C'est un sol sévèrement corrosif.

## 2. Dimensionnement de la protection cathodique

Les résultats obtenus à partir des calculs de dimensionnement du système de protection cathodique ont montrés ce qui suit :

- Le nombre de postes de soutirage, soit 16 postes de transformateur-redresseur est suffisant pour protéger l'ouvrage GZ1.
- L'intensité de courant de protection soutiré par poste est de 17.63 A. donc le besoin total de courant  $17.63A * 16 \text{ postes}$ , avec une longueur du bras de  $1.63 \cdot 10^4 m$ .

- Le nombre d'anodes est de 6 anodes par déversoir. La durée de vie de chaque anode est estimée à 25 ans
- la résistance du déversoir  $R_d=1.79\Omega$ .

### 3. Potentiels de protection

L'acier de pipeline est parfaitement protégée cathodiquement lorsque son potentiel par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub> en tous points est en dessous du seuil (Domaine d'immunité de l'acier).

Les résultats du potentiel (Figure 3.9 à figure3.14) ont montrés que les valeurs de potentiel varient entre -850mv et -2200mv. Dans les premiers 20 km nous remarquons qu'il y'a des chutes de potentiel (inferieur de -850mv) à raison du croisement des autres structures voisines soit protégées ou non. D'autres chutes de potentiel au niveau pk150 et pk 401 sont dues à la présence des lignes de haute tension et des chemins de fer.

Au pk144+200 y'a surprotection où le potentiel dépasse -2500mv pouvant engendrer un dégagement d'hydrogène et par conséquent un décollement de revêtement par formation des cloques.

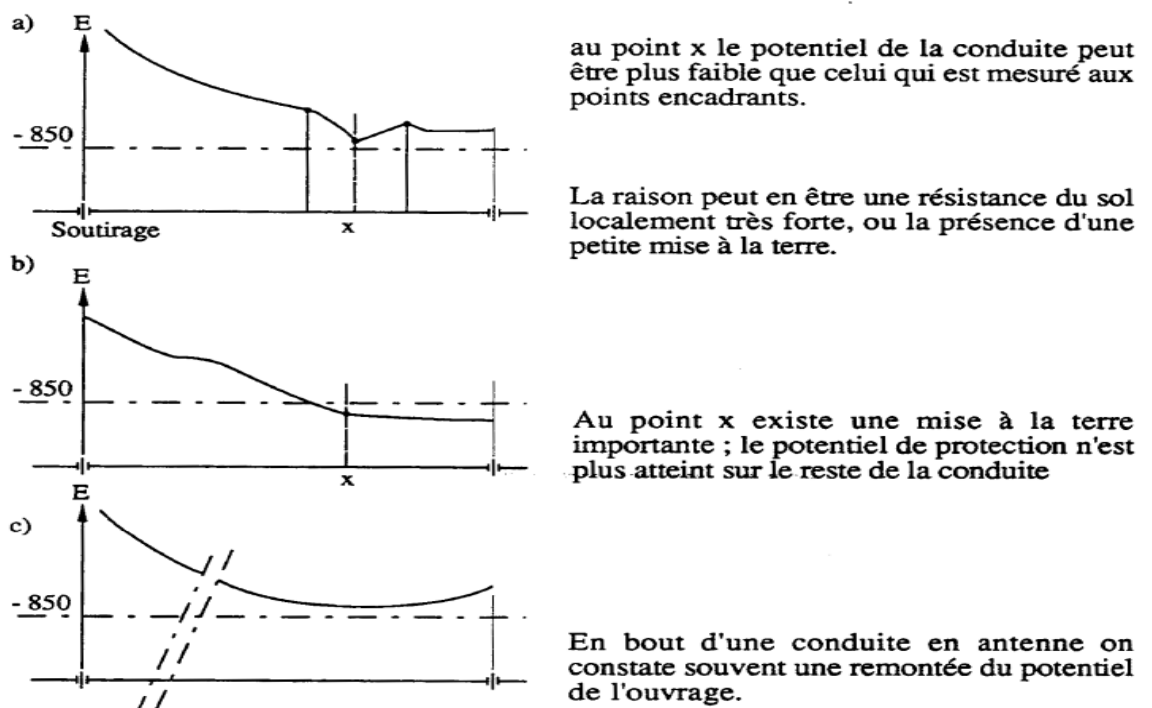


Figure 4.1 : Etat de protection de la canalisation sous protection cathodique

#### 4. maintenance de la ligne de pipeline

- **Les inspections de poste de soutirage :**

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

- Relevé de l'intensité du courant débité
- Relevé de la tension de sortie du redresseur
- Mesure du potentiel de la conduite par rapport au sol, à l'aide d'un millivoltmètre et l'électrode de référence de sulfate de cuivre Cu/CuSO<sub>4</sub>
- Vérification par la mesure à l'aide d'un multimètre (une fois par mois)
- Le bon serrage des connexions
- Le bon réglage du débit du poste (Hiver - été) ~ 80% (Rendement)
- Relevé de la consommation électrique (kw/h).

- **Prise de potentiel**

C'est un moyen qui nous permet d'accéder à la conduite pour relever le potentiel de celle-ci. La mesure du potentiel est faite à l'aide d'une électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre Cu/CuSO<sub>4</sub> et d'un voltmètre à forte résistance interne. En pratique lors des mesures, l'électrode de référence sera placée au niveau du sol à l'endroit de la pipe après avoir humidifié celle-ci.

Il est important de vérifier la connexion des câbles de mesure de l'appareil : le plus (+) de l'appareil doit être relié à l'électrode et le moins (-) doit être relié à la conduite.

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

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

- **Raccord isolant**

La vérification de l'efficacité du raccord isolant se fera par les mesures suivantes :

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

**Tableau 4.1** : la maintenance de poste soutirage.

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

Tableau 4.2 : L'inspection de la protection cathodique ligne et postes de soutirage

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

## Conclusion

Les résultats obtenus ont montrés la nécessité de la maintenance de la ligne de pipeline afin d'assurer une meilleure protection de l'ouvrage et de maintenir l'acier dans son domaine d'immunité en contrôlant systématiquement les paramètres influant tel que le potentiel de la ligne les courants, les caractéristiques du sol traversé par l'ouvrage (composition chimique résistivité, pH, humidité ...)

La corrosivité des sols peuvent être estimée en mesurant sa résistivité. Par conséquent, la résistivité est un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion. Un sol résistif (faiblement agressif) aura pour caractéristique une faible contribution au processus de corrosion tandis qu'un sol très peu résistif (agressif) permettra l'initiation et la propagation rapide de la corrosion et par conséquent une apparition précoce et importante des bris.

Les mesures de résistivité s'effectuent à partir de la surface du sol en disposant de quatre (04) piquets métalliques distant entre eux d'un intervalle égal (méthode de Wenner).

Les sols peuvent avoir une réaction acide ou alcaline ; d'autres peuvent être neutres. On mesure la réaction chimique du sol d'après la valeur de son pH.

Les campagnes de mesures du potentiel ont montrés que les valeurs sont variables par rapport au potentiel standard de protection de l'acier  $-850\text{mV}/\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ce qui montre la nécessité de la maintenance de la ligne en faisant varier ces potentiels afin de pallier aux conséquences de l'amorçage et la propagation des piqures de corrosion dans le cas de la sous protection ou l'apparition des phénomènes de décollement des revêtements par dégagement d'hydrogène et la formation des cloques.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de la ligne ont donnés des résultats satisfaisant qui permettent d'assurer une meilleure protection.

# **Conclusion générale**



## Conclusions et perspectives

L'étude dans le cadre de ce projet a portée sur la maintenance du système de protection des structures métalliques enterrées comme la ligne GZ1 du réseau de pipelines exploité par la société SONATRACH – Algérie acheminant le gaz naturel depuis le gisement de Hassi R'mell à Arzew sur une distance de 505 Kms. Les canalisations, dont le matériau constitutif est l'acier micro allié de nuance API 5L X60 selon la norme API (American Petroleum Institute) malgré le système de protection par un revêtement externe et interne (protection passive) à base de liants hydrocarbonés (brai de houille ou de bitume de pétrole) ou encore constitués par un système multicouche associant un primaire époxy pour l'adhérence à l'acier, un adhésif intermédiaire et une couche de plusieurs millimètres en polymères PE polyéthylène, ou PP polypropylène complétée par une protection cathodique active dont le potentiel est maintenu à  $-850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$  par courant imposé ou par anode sacrificielle sont exposés à des à des risques de défaillances du fait de leur environnement (tubes enterrées) et l'apparition des phénomènes de dégradation par corrosion sur les surfaces extérieures de la ligne aboutissant à la formation des piqures de corrosion (pitting corrosion).

Les résultats obtenus ont montrés la nécessité de la maintenance de la ligne de pipeline afin d'assurer une meilleure protection de l'ouvrage et de maintenir l'acier dans son domaine d'immunité en contrôlant systématiquement les paramètres influant tel que le potentiel de la ligne les courants, les caractéristiques du sol traversé par l'ouvrage (composition chimique résistivité, pH, humidité ...)

La corrosivité des sols est estimée par la mesure de la résistivité. Un sol résistif (faiblement agressif) a pour caractéristique une faible contribution au processus de corrosion tandis qu'un sol très peu résistif (agressif) permettra l'initiation et la propagation rapide de la corrosion. Les mesures de la résistivité effectuées à partir de la surface du sol (méthode de Wenner) ont montrés que la ligne traverse plusieurs nuances de sol dont certains sont très agressifs. Les sols peuvent avoir une réaction acide ou alcaline ; d'autres peuvent être neutres. On mesure la réaction chimique du sol d'après la valeur de son pH.

Les campagnes de mesures du potentiel ont montrés que les valeurs sont variables par rapport au potentiel standard de protection de l'acier  $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$  ce qui montre la nécessité de la maintenance de la ligne en faisant varier ces potentiels afin de palier aux conséquences de l'amorçage et la propagation des piqures de corrosion dans le cas de la sous protection ou l'apparition des phénomènes de décollement des revêtements par dégagement d'hydrogène et la formation des cloques.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de la ligne ont donné des résultats satisfaisants qui permettent d'assurer une meilleure protection.

En perspectives, il est nécessaire d'installer un système de maintenance de la ligne à rechercher de maintenir le potentiel de l'acier dans son domaine d'immunité et à orienter la production du courant électrique de soutirage par l'utilisation des énergies renouvelables comme le solaire photovoltaïque.

- [1] **Formation1** de protection cathodique, département de la protection cathodique/RTO 2011.
- [2] **Adil Jarrah** Développement de méthodes statistiques et Probabilistes en corrosion par piqures pour L'estimation de la profondeur maximale : application A l'aluminium a5. Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur décembre 2009.
- [3] **Formation2** de protection cathodique, département de protection cathodique/RTO 2011.
- [4] **M. Ghellai** Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL mémoire master, université de Tlemcen 2013.
- [5] **Marec**, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.
- [6] **D. Bouzidi**, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire Des ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [7] **Séminaire** de la protection cathodique, service protection cathodique/RTO, 2011.
- [8] **F. Coeuille** Revêtements polymères de canalisation de fluide : Caractérisation et évolution de l'adhésion En milieu agressif 2002.
- [9] **Séminaire** sur les défaillances et technique de réhabilitation des pipelines présenté par Mr Belabbaci, directeur SONATRACH/DRC 2014.
- [10] **Brahim Laoun** Corrosion et Protection Cathodique des Canalisations Enterrées : Etude, Simulation et Application de l'Energie Solaire. MATERIAUX 2006 13-17, université Tlemcen Novembre 2006.
- [11] **BELAID. S** Analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 Pour pipelines corrodés Modèle basé sur le critère B31G, mémoire de magister, université Tlemcen 2008.
- [12] Document de STT (établie par la station de traitement des tubes).
- [13] **Séminaire** protection cathodique des ouvrages de transporte d'hydrocarbures, service protection cathodique-RTO, 2013.
- [14] Documents établi par le département de protection cathodique/RTO.
- [15] **S. Ben soltane**, Etude électrochimique de la corrosion des aciers API –5L X-60 pour gazoduc en milieu environnant de sol et protection par inhibiteurs à base de Poly phosphates, mémoire de magister, université USTO Oran, Avril 2009.
- [16] **Conférence** sur les Défaillances et protection des ouvrages métalliques par Mr Abderrahim Benmoussat 2013.
- [17] **A. Benmoussat**, Thèse de doctorat, USTO –MB, 2006, collaboration USTL Lille.
- [18] **M<sup>me</sup> H. Zendaoui**, partie 2 corrosion et protection des canalisations, SH, IAP.CU, UFR : Gas Refining & Petrochemistry. IAP Boumerdes, 2011.
- [19] <http://www.sonatrach.com/transport-par-canalisation.html>

[20] **www. Cerist/ SNDL.**

[21] **Stage Z110**, Partie 2. Professionnalisation niveau2 en protection cathodique des ouvrages (conception des installations, analyses des mesures, suivie des activités de protection cathodique), service PC/RTO.

[22] **Cefracor-PCRA 002**, Recommandations pour la recherche après enfouissement et la réparation des défauts du revêtement des canalisations enterrées. Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés Octobre 2003.

[23] **Cefracor-PCRA 003**, Recommandations pour le contrôle par méthode électrique des défauts des revêtements organiques appliqués sur acier en usine ou sur site de pose. Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés Octobre 2003.

[24] **ISO 15589**, Petroleum and Natural gas industries — Cathodic protection of pipeline transportation system — Part 1 novembre 2003. Part 2 mai 2004.

[25] **NF EN 12954** Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées avril 2001.

[26] **NF EN 13509** Techniques de mesures applicables en protection cathodique octobre 2003.

[27] **NACE Standard TM0497** Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems-2002.

[28] **CLAUDE Baslo et GILBERT Batch**, les canalisations d'eau et de gaz ; corrosion et protection, Association général, par, technique et documentation LAVOISIER ,1987.

[29] **A. Benmoussat, et M. Hadjel** (21/22 Novembre 2004, Tlemcen, Algérie), Réhabilitation des tubes pour le transport du gaz naturel, par évaluation de la résistance résiduelle, Communication orale, qualima01, Symposium International sur la qualité et maintenance au service de l'entreprise.

[30] **A Benmoussat, M. Hadjel and M.Traisnel**, Corrosion Behavior of API 5L X –65 pipeline steel exposed to near neutral pH simulating solution, Materials and corrosion, (2006).