



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
Laboratoire LAEPO N°37



Mémoire
Pour l'Obtention du Diplôme du Master
Génie Mécanique
Option : Maintenance Industrielle

Thème

**Etude sur le système de protection
Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation
Multiproduit ASR/ NAFTAL**

Présenté par :

Mourad GHELLAI

Soutenu le : 04 /06/2013

Devant le jury :

Président :	BOURDIM Abdelghafour	MCA, Université Tlemcen
Examineurs :	HDJOUI Abdelhamid	Pr, Université Tlemcen
	ZINAI Abdelhadi	MAA, Université Tlemcen
Encadreur :	BENMOUSSAT Abderrahim	MCA, Université Tlemcen
Co-Encadreur :	BENNACER Djamel	Cadre Unité Canalisations NAFTAL

Année Universitaire : 2012-2013

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 mes encadrateurs :

***Monsieur BENMOUSSAT Abderrahim.** Maître de conférences à l'université de Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Laboratoire des Electrolytes et polyelectrolytes "LAEPO", équipe de recherche en corrosion pour avoir dirigé ce travail. Je le remercie particulièrement de l'attention qu'il m'a témoignée, pour son soutien et ses nombreux conseils tout au long de ces mois.*

***Monsieur BENNACER Djamel** Magister (Responsable du Terminal Arrivée du Pipeline MP/ ASR) pour avoir accepté de Co-encadrer mon mémoire et pour ses encouragements pour l'aboutissement de ce travail.*

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

***Monsieur BOURDIM Abdelghafour** président de jury*

***Messieurs BENKHENAFOU Fethi et ZINAI Abdelhadi,** de l'Université de Tlemcen, pour l'examen du mémoire.*

Je tiens à remercier tout le personnel de :

*De la salle de contrôle du Terminal Arrivée NAFTAL/ Remchi (Tlemcen) pour leur accueil et leur soutien pendant toute la période de mon stage. Je remercie particulièrement Mr **BENBOUZIANE M^{ed} Abdelbaki** (Ingénieur), **BENDIAB Mohamed** (Chef de service Inspection), **BERROUBA TANI M^{ed} El Amine** (Ingénieur), et tout le personnel exerçant au niveau du Terminal Arrivée Remchi pour nous avoir facilité l'organisation du stage.*

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 mes très chers sœurs, mon frère Sidi Mohammed Ibrahim.

A toute La famille, GHELLAI ET la famille BEHLOUL.

A tous mes amis (es) : si Othman, Mohammed Ibrahim, Youssouf, Imade Ahmed Choukri, Boucif, Milod, Ismail, Soufiane, Abdelhakime.

Mes collègues de master en génie mécanique option Maintenance Industrielle.

Promotion 2012-2013

GHELLAI MOURA

Sommaire

Liste des figures et des tableaux

Liste des abréviations et symboles

المخلص

Résumé

Abstract

Introduction générale

Introduction générale.....01

Chapitre 01 : Corrosion des conduites souterraines

Introduction.....	03
1. Phénomènes de corrosion.....	03
1.1.1 Rappels : Métaux et électrolytes	03
1.1.2 L'électrode métallique.....	04
2. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique.....	04
2.2 Couche double à l'interface métal-solution.....	04
2.3 Potentiel du métal dans la solution.....	05
2.4 Electrode de référence.....	06
3. Processus de corrosion.....	08
3.1 Destruction de l'équilibre par réaction du milieu.....	09
3.2 Destruction de l'équilibre par couplage d'électrodes métalliques	11
3.3 Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH – tension).....	12
4. Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés	14
4.1 Le sol comme électrolyte.....	14
4.2 Agressivité du sol.....	14
4.2.1 Paramètres déterminant l'agressivité du sol.....	15
4.2.2 Méthode de mesure de la résistivité du sol.....	16
4.2.3 Principe de mesure de la résistivité du sol.....	16
4.3 Piles dues à l'électrolyte.....	17
5. Les différents types de corrosion.....	19
5.1 Corrosion uniforme.....	19
5.2 Corrosion galvanique.....	19
5.3 Fissuration par corrosion sous contrainte (fcc).....	20
5.4 Corrosion-érosion.....	20
5.5 Corrosion par crevasses.....	21
5.6 Corrosion par les courants vagabonds.....	22
Conclusion	23

Chapitre 02 : Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion

Introduction.....	24
1. Prévention de la corrosion des conduites souterraines.....	24
2. Protection passive par revêtements.....	25
2.1 Revêtements externes.....	25
2.1.1 Procédés de protection.....	25
2.1.2 Choix du revêtement.....	26
2.2 Les différents types de revêtements.....	26
2.2.1 Revêtements à base de produits hydrocarbonés.....	26
2.2.2 Revêtements thermoplastiques : 26.....	26
3.1 Protection cathodique (Protection Active).....	27
3.1.1 Origines.....	27
3.1.2 Principe de la protection cathodique.....	27
3.1.3 Critères de la protection cathodique.....	27
3.2 Type de protection cathodique.....	29
3.2.1 Protection par anodes sacrificielles.....	29
3.2.1.1 Choix des anodes sacrificielles.....	30
3.2.2 Protection par courant imposé.....	32
3.2.2.1 Principes.....	32
3.3 Avantages et inconvénients des systèmes protection cathodique.....	33
4. Protection par inhibiteur de corrosion.....	34
5. Facteurs affectant la protection cathodique.....	34
5.1 Insuffisance de continuité électrique.....	34
5.2 Influence des courants vagabonds.....	35
5.3 Influence des structures adjacentes.....	35
6. Synthèse sur la protection cathodique.....	35
CONCLUSION.....	40

Chapitre 03 : Matériels et méthodes

Introduction.....	41
1. Présentation de la société NAFTAL.....	43
1.1 Historique et statut.....	43

1.2 Les missions de NAFTAL.....	44
2. Présentation de la canalisation multiproduit ASR.....	45
2.1 Pipeline multiproduit ASR.....	45
2.2 Pipeline GPL AST.....	48
2.3 Aciers de ligne SAR /MP (Norme API- 5L)	48
2.3.1 Caractéristique mécanique.....	48
2.3.2 Caractéristique chimique.....	49
3. Protection de la Canalisation MP ASR.....	50
3.1 Caractéristiques du tube.....	50
3.2 Protection passive.....	50
3.3 Protection active.....	51
4. Description de l'équipement PC de la ligne ASR/MP.....	51
4.1 Transformateur – Redresseur.....	51
4.2 Masse anodique ou (un déversoir).....	53
4.3 Backfill de coke.....	53
4.4 Différents types de coffret.....	54
4.4.1 Coffret de jonction anodique (ca).....	54
4.4.2 Coffret de liaison (cl).....	54
4.4.3 Coffret joint isolant (CJ).....	55
4.5 Prise de mesure ampérométrique (PMA).....	56
4.6 Différents types de prises de potentiel (PPS, PPCT, PPTG).....	56
4.6.1 Prise de potentiel simple (PPS).....	56
4.6.2 Prise de potentiel croisement de tiers (PPCT).....	57
4.6.3 Prise de potentiel (tube / gaine) (PPTG).....	58
5. Évaluation de l'efficacité de systèmes de protection cathodique.....	59
5.1 Méthode de relevés de potentiel à espaces rapprochées.....	59
5.2 Méthode de relevé par dépolarisation.....	63
5.3 Méthode d'évaluation de l'influence des redresseurs de courant.....	64
5.4 Méthode de relevés aux prises de potentiel.....	64
5.4.1 Préparation de l'intervention.....	65
5.4.2 Les équipements de mesure.....	65
5.4.3 Précautions préalables.....	67

5.4.4	Prise de mesures au point de vérification.....	67
5.4.5	Post-intervention.....	68
	Conclusion.....	68

Chapitre 04 : Dimensionnement du système PC

	Introduction.....	70
1.	Dimensionnement de la protection cathodique.....	70
1.1	Critère de la protection cathodique.....	70
1.2	Calcul de dimensionnement du système de protection cathodique.....	70
1.2.1	Protection cathodique par courant imposé.....	70
1.2.2	Délimitation de l'ouvrage à protéger cathodiquement.....	70
1.2.3	Calcul du nombre de postes de soutirage.....	70
1.2.4	Courant de la protection.....	73
1.2.5	Calcul du nombre d'anodes (Lit d'anodes).....	73
1.2.6	Puissance du poste redresseur.....	73
1.2.7	Tension aux bornes de redresseur.....	79
	Conclusion.....	80

Chapitre 05 : Résultats et discussions

	Introduction	81
1.	Potentiels de canalisation.....	81
2.	Relevés de potentiels « ON » pour les canalisations ASR et AST.....	82
3.	Interprétation des résultats.....	86
3.1	Campagne de mesure de potentiel position ON du mois de décembre 2012.....	86
3.2	Campagne de mesure de la potentielle position «ON» du mois d'avril 2013.....	87
4.	Dimensionnement du système de protection cathodique.....	88
5.	La résistivité du sol.....	88
6.2	Les inspections de poste de soutirage.....	89
6.	Système de maintenance de la ligne ASR/MP.....	89
6.1	Surveillance et contrôle des dispositifs de protection cathodique.....	89
6.1.1	Objectifs	89
6.2.1	La Surveillance de poste de soutirage.....	89

6.3 Contrôle les installations de la protection cathodique.....	94
6.3.1 Contrôle systématique.....	94
6.3.1.1 Prise de potentiel.....	94
6.3.1.2 Raccord isolant.....	95
6.3.1.3 Gaines.....	95
6.3.2 Contrôle non systématique.....	96
6.3.1 Contrôle systématique.....	96
Conclusion.....	97

Conclusion générale

Conclusion générale.....	98
--------------------------	----

Références bibliographique

Références bibliographique.....	99
---------------------------------	----

Annexes

Annexes.....	102
--------------	-----

Liste des figures :

- Figure 1.1** : Equilibre de deux métaux différents dans une solution.
- Figure 1.2** : Equilibre d'un métal dans une solution.
- Figure 1.3** : Mesure du potentiel d'un métal dans une solution avec une électrode de référence.
- Figure 1.4** : Electrode de référence.
- Figure 1.5** : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion.
- Figure 1.6 (A B C)**:destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par action du milieu.
- Figure 1.7(123)** : destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par couplage électrique.
- Figure 1.8** : Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 250 C.
- Figure 1.9** : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.
- Figure 1.10** : Différentes piles galvanique.
- Figure 1.11** : Corrosion par piqûres.
- Figure 1.12** : Echelle galvanique des métaux.
- Figure 1.13** : Différents types de corrosion.
- Figure 1.14** : Corrosion bactérienne.
- Figure 1.15** : La corrosion par courant vagabond.
- Figure 2.1** : La protection par l'anode galvanique et courante imposé.
- Figure 2.2** : Principes de la protection par anodes sacrificielles.
- Figure 2.3** : Anodes sacrificielles.
- Figure 2.4** : Principe de la protection par courant imposé.
- Figure 2.5** : Le principe de PC par le courant impose et anode sacrificielle.
- Figure 2.6** : Le principe de PC et application de l'énergie solaire.
- Figure 3.1** : Ligne de tracé de Pipeline.
- Figure 3.2** : Réseau de transport canalisations.
- Figure 3.3** : Organigramme de la société NAFTAL.

- Figure 3.4** : Réseau de pipelines d'hydrocarbures en Algérie et localisation des dépôts en carburants.
- Figure 3.5** : Schéma de procédé.
- Figure 3.6** : Tracé du pipeline MP/ ASR sur la carte géographique
- Figure 3.7** : Tubes du pipeline MP/ ASR alignés pour soudure.
- Figure 3.8** : Transformateur – Redresseur.
- Figure 3.9** : Les anodes de type (fer-silicium-chrome).
- Figure 3.10** : Backfill de coke.
- Figure 3.11** : coffret de jonction anodique.
- Figure 3.12** : coffret de liaison.
- Figure 3.13** : installation du coffret joint isolant (CJ).
- Figure 3.14** : Installation de la prise de mesure ampérométrique.
- Figure 3.15** : Prise de potentiel croisement de tiers.
- Figure 3.16** : Prise de potentiel (tube / gaine) traversée une route.
- Figure 3.17** : Prise de potentiel (tube / gai) traversée voie ferrée.
- Figure 3.18** : Prises de potentiel.
- Figure 3.19** : Montage nécessaire à un relevé à espace rapproché.
- Figure 3.20** : Le point de mesure.
- Figure 3.21** : Voltmètre.
- Figure 3.22** : Différents types d'électrodes de référence.
- Figure 4.1** : Présentation des potentiels, E_S , E_x et E .
- Figure 4.2** : Lit d'anodes horizontales avec mélange Régulateur.
- Figure 4.3** : Résistivité du sol ASR sur le tronçon Ø8" Résistivité moyenne : $61.09 \Omega.m$.
- Figure 5.1** : Principe de la chaîne de mesure d'un capteur
- Figure 5.2** : Le schéma de (tube / gaine) et le prise de potentiel (PPTG) amont et aval.
- Figure 5.3** : Compagne de mesure ON (Mois de Décembre 2012).
- Figure 5.4** : Compagne de mesure ON (Mois d'Avril 2013).

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Potentiels respectifs des différentes électrodes.

Tableau 1.2 : Corrosivité du sol selon la résistivité.

Tableau 2.1 : Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles.

Tableau 2.2 : Comparaison des éléments de systèmes PC.

Tableau 3.1 : Caractéristiques géométriques du pipeline ASR.

Tableau 3.2 : Caractéristiques géométriques du pipeline GPL/ AST.

Tableau 3.3 : Spécification de quelques aciers API et leurs caractéristiques mécaniques.

Tableau 3.4 : Composition chimique des aciers étudiés (% en masse).

Tableau 4.1 : Caractéristiques dimensionnelles de l'anode.

Tableau 4.2 : Relevé de mesures de la résistivité du sol ASR.

Tableau 4.3 : Câbles de liaison.

Tableau 5.1 : La maintenance de poste soutirage.

Tableau 5.2 : Planning récapitulatif d'inspection périodique des canalisations et ouvrages concentrés.

Tableau 5.3 : Planning d'inspection de la protection cathodique ligne et postes de soutirage.

Liste des abréviations

ASR : Arzew - Sidi Bel Abbès - Remchi.

PC : Protection Cathodique.

/Cu/CuSO₄ : Par rapport à l'électrolyte de cuivre-sulfate de cuivre saturé

Fe²⁺ : Ion Ferreux

Fe³⁺ : Ion Ferrique

Fe₂O₃ : Oxyde de fer (Magnétite)

Fe₃O₄ : Oxyde de fer magnétique

H₂O : Molécule d'eau

O₂ : Atome d'Oxygène (gaz)

Zn²⁺ : Ion de zinc

H₂ : Atome d'hydrogène (gaz)

PH : Pression d'hydrogène.

Fcc : Fissuration par corrosion sous contrainte.

API : American Petroleum Institute.

AST : La ligne Arzew, Sidi Bel Abbès, Tlemcen.

GPL : Gaz Pétroliers liquéfiés

MP : Multiproduit

Liste des symboles.

Symbole	signification	unité
P	Masse de métal	g
M	Masse molaire	(g/mol)
n	Nombre d'électrons mis	jeu
F	Nombre de Faraday	(96500 C/mol)
t	Temps de consommation	s
ρ	Résistivité moyenne du sol	Ω cm
R	Résistance moyenne du sol	Ω
d	Espacement entre deux piquets	cm
L	Longueur de la surface du pipe à protéger,	m
L_p	Laporte du poste de protection,	m
a	Coefficient d'atténuation de la structure	m^{-1}
E_s	Potentiel d'injection au point de soutirage	mV
E	Potentiel du métal sans soutirage	mV
r	Résistance longitudinale de la conduite,	Ω/m
R	Résistance transversale de la conduite,	$\Omega \cdot m$
δ_a	Résistivité de l'acier	$\Omega \cdot m$
D_{ext}	Le diamètre extérieur du pipeline	m
e	L'épaisseur du pipeline	m
R_{is}	Résistance d'isolement donnée par le revêtement	($\Omega \cdot m^2$)
d	Densité de courant maximale	(A/m^2)
S_p	Surface à protéger,	(m^2)
I_{tot}	Ampères total	A

Liste des symboles.

Symbole	Signification	Unité
N	Nombre d'anodes.	-
M_a	Masse totale	kg
m_a	Masse unitaire d'anode	kg
C_a	Consommation de l'anode	kg/A. an
T	Durée de vie en année	ans
I	Courant	A
R_T	Résistance de la conduite	Ω/m
R_A	Résistance du déversoir	Ω/m
R_C	Résistance du câble	Ω/m
R_A	Résistance du contact au sol	en Ω
ρ	Résistivité du sol en	Ω. m
L	Longueur de l'anode	m
D_a	Diamètre de l'anode	m
ρ_c	Résistivité du câble	Ω. m
U	Tension aux bornes de redresseur	Volt

المخلص

ركزت هذه الدراسة على نظام الحماية الكاثودية لخط أنبوب الفولاذي متعددة المنتجات ASR و قناة نقل المواد البترولية السائلة GPL. في أغلب الأحيان، فإنه رغم الحماية المزدوجة للأنايب الفولاذية الصلبة من طلاء والحماية الكاثودية إلا أن خطر التآكل يصعب تفاديه و نخص بالذكر بعض المناطق التي تكون فيها مقاومة التربة منخفضة.

المنهجية التي اعتمدها في هذا الدراسة تمثلت في قياسات الكمون على خط قناة ASR و كذا القياسات المتعلقة بمقاومية التربة بعد التصميم الحسائي لنظام الحماية الكاثودية.

وأظهرت النتائج أن القيم المقاسة لثوثر الحماية تتغير من 900 mV - إلى 2300 mV - مع العلم بأن عتبة الحماية مقدرة ب 850 mV - بالنسبة إلى الإلكترود المرجعي المشبع Cu/CuSO_4 .

وقد أظهرت قيم المقاومة التربة قرر أن التربة هي خط ASR معتدلة التآكل وأظهرت حسابات تصميم نظام الحماية الكاثودية ان الخط يتطلب ستة محطات وخمسة عشر أنودا للحماية من نوع FeSiCr.

الكلمات الرئيسية : التآكل - مقاومة التربة - الفولاذ - الحماية الكاثودية - الكمون.

Abstract:

The study is related to cathodic protection system (PC) of the GPL and Multiproduct pipelines. usually, in spite of the double protection of the pipeline's steel : passive protection by bituminous coatings and cathodic protection by imposed current, this last can present some failures by corrosion, particularly by pits (pitting corrosion) in certain areas where the soil resistivity is low.

The methodology that we have adopted in this work consists in taking measurements of potentials, the soil resistivity measurements after calculation and the design of cathodic protection.

Results showed that the measured values of the protection potential vary from -900 mV to -2300 mV and the protection threshold is $-850\text{ mV /Cu/CuSO}_4$ giving a state of the protected structure. The soil resistivity values determined showed that the soil is moderately corrosive.

Dimensioning calculation and design of the cathodic protection system showed that the ASR and AST pipelines require six rectifying stations and fifteen sacrificial anodes of *FeSiCr*.

Keywords : corrosion – soil resistivity- API steel - cathodic protection - potential.

Résumé

L'étude a porté sur le système de la protection cathodique PC des canalisations : celle du GPL/ AST et du Multiproduit ASR. 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, 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 que nous avons adoptée dans ce travail 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 montrés que les valeurs mesurées du potentiel de protection varient de -900 mV à -2300 mV et dont le seuil de protection est de $-850\text{ mV}/\text{Cu}/\text{CuSO}_4$. Les valeurs de résistivité du sol déterminées ont montrés que les sols de la ligne ASR sont moyennement corrosifs.

Le calcul de dimensionnement du système de protection cathodique tenant compte le milieu d'enfouissement de la canalisation (Sol) a montré que la ligne stipule six postes redresseurs et quinze anodes sacrificielles de type Fe-Si-Cr par déversoir.

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

CHAPITRE 01

Corrosion des conduites souterraines

CHAPITRE 02

**Protection des ouvrages métalliques
contre la corrosion**

CHAPITRE 03

Matériels et méthodes

CHAPITRE 04

Dimensionnement PC

CHAPITRE 05

Résultats et discussions

INTRODUCTION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Introduction Générale

Les produits pétroliers sont acheminés par canalisation depuis les gisements jusqu'à leurs zones de raffinage, stockage et distribution. En Algérie, l'activité Transport par Canalisation exploité par la société SONATRACH assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat, gaz naturel & GPL) sur un réseau estimé à 18512 Kms [16].

NAFTAL, filiale à 100% de SONATRACH, dispose de 2720 Kms de pipelines en développement pour le transport des carburants multi produits (Essence normale, Essence super, Gasoil et JET-A1), dont 700 Kms sont opérationnels [1]. Ces pipelines en nombre de six (06) alimentent les dépôts de stockage primaires afin d'assurer le ravitaillement des différentes régions du pays. La ligne ASR/MP du réseau de pipeline exploitée par l'entreprise NAFTAL, relie le complexe de raffinage d'Arzew aux centres de stockage des carburants de Sidi Bel Abbès et Remchi (Tlemcen) sur une distance de 168 Kms. Elle est destinée pour le transport séquentiel (Pompage successif) du multiproduit pétrolier (Carburants, à savoir : les essences, le gasoil et le JET-A1). Les canalisations sont en acier de grade *API 5L X52* selon la norme *API* (American Petroleum Institute) et sont protégées contre la corrosion externe par des liants hydrocarbonés (brai de houille ou de bitume de pétrole) et polyéthylènes extrudés (PE) complété par la protection cathodique dont le potentiel a été maintenu à $-850\text{ mV} / \text{Cu}/\text{CuSO}_4$. Ce type de protection offre l'avantage pratique du contrôle en de nombreux points de l'ouvrage protégé par de simples mesures. Les installations fonctionnent en permanence et le potentiel de l'acier dans l'ouvrage à protéger est maintenu en tout point et dans le temps par rapport à l'électrolyte en dessous du seuil de protection. Les défauts éventuels y compris ceux du revêtement sont éliminés du système. Il est nécessaire de procéder à la vérification périodique du bon fonctionnement de toutes les installations de protection cathodique. Il existe plusieurs critères d'évaluation de la protection cathodique, le plus couramment utilisé est le critère de mesure du potentiel. Des études théoriques, vérifiées expérimentalement ont permis de définir pour chaque métal un potentiel d'immunité ou potentiel minimum de protection. Le potentiel minimum de protection de l'acier est de -850 mV par rapport à l'électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre *Cu/CuSO₄*. Les moyens de protection cathodique peuvent être par anodes réactives généralement, le zinc, ou par soutirage de courant.

Nous sommes intéressés dans ce travail à étudier la maintenance du système de protection cathodique (PC) de la ligne Multiproduit (MP)/ ASR. Il est à noter que cette ligne est associée

à une autre ligne de transport du gaz liquéfié « GPL » (ligne AST : Arzew – Sidi Bel Abbès – Tlemcen) toujours pour le compte de NAFTAL, ayant la protection cathodique commune.

Malgré la double protection de l'acier des canalisations, à savoir : la protection passive par revêtements et la protection cathodique par courant imposé, le risque de corrosion est inévitable et les défaillances par corrosion, notamment par pics de corrosion (Pitting corrosion) peuvent surgir. Ce qui a motivé notre recherche dans cet axe.

La méthodologie que nous développerons dans ce travail consiste à relever les mesures de potentiel de la ligne ASR, les mesures de résistivité du sol sur le tronçon de diamètre 8 " ensuite à effectuer un traitement des données et un calcul de dimensionnement des canalisations.

Nous présenterons dans le chapitre 1, une étude théorique sur la corrosion des conduites souterraines et dans le chapitre 2, une étude théorique sur la protection des ouvrages métalliques anticorrosion. Le chapitre 3 sera consacré à la présentation de la canalisation ASR, le matériel utilisé pour les mesures de potentiels de protection et la résistivité du sol, et les méthodes de mesures. Nous effectuons dans le chapitre 4 un calcul de dimensionnement du système de protection cathodique. Dans le chapitre 5 nous présenterons une discussion sur les résultats obtenus et les méthodes de maintenance. Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Introduction :

La corrosion des aciers est la plus répandue et apparaît comme un mal mystérieux, associant un milieu, ou l'un de ses composants, un métal, et diverses formes de dommages.

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

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

1. Phénomènes de corrosion :**1.1.1 Rappels : Métaux et électrolytes :**

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

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

1.1.2 L'électrode métallique :

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

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

Le métal conduit le courant par ses électrons. Le métal est un conducteur électronique. La tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant qui le traverse, c'est un conducteur ohmique auquel s'applique la loi d'Ohm

$$U = R.I. \quad (1.1)$$

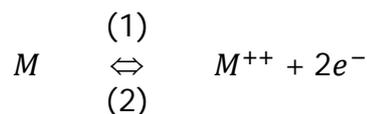
L'électrolyte conduit le courant par ses particules ionisées, il s'agit d'une conduction ionique. L'application d'une tension minimale d'électrolyse est nécessaire ici pour assurer la circulation d'un courant dans l'électrolyte. Il y a existence d'une force contre-électromotrice, dépendant de l'électrolyte mais aussi des conditions d'expérience, qui retarde l'apparition du courant. L'électrolyte est un conducteur ionique auquel s'applique la loi d'Ohm généralisée :

$$U = E + R.I. \quad (1.2)$$

2. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique :

2.2 Couche double à l'interface métal-solution :

Plongeons un métal dans un électrolyte ionisant inerte. Les ions du réseau métallique tendent à passer en solution et laissent le métal chargé négativement par ses électrons (voir les figures 1.1, 1.2, 1.3). Ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs. Il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons. Les réactions 1 et 2 ont lieu simultanément.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte.

2.3 Potentiel du métal dans la solution:

Dans le cas où le métal est plongé dans une solution normale d'un de ses ions, on peut, en utilisant les lois de la thermodynamique, calculer ce potentiel. Ce potentiel a une valeur déterminée pour un métal donné et permet le classement des métaux suivant leur aptitude à s'ioniser. L'échelle de Nernst (Tableau 01) voir annexes 1 permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse.

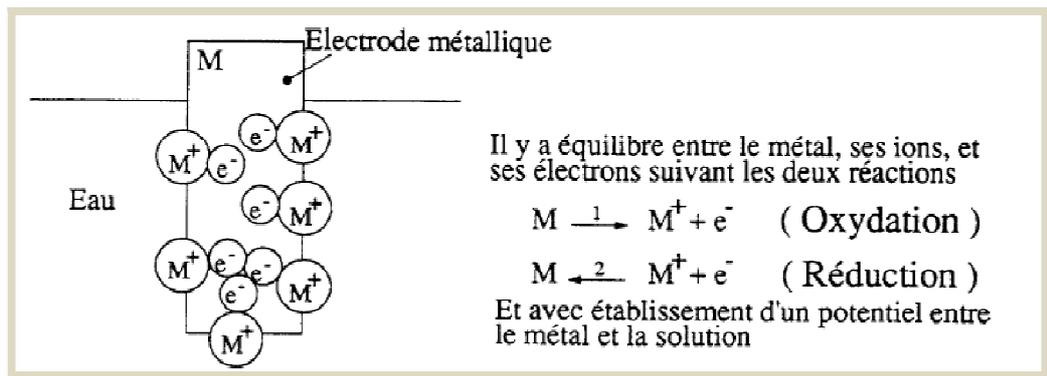


Figure 1.1 : Equilibre de deux métaux différents dans une solution (1)

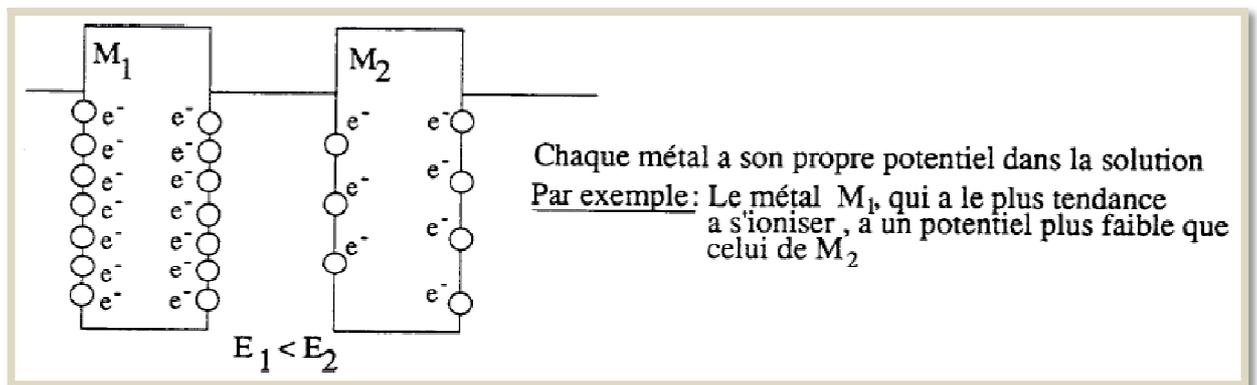


Figure 1.2 : Equilibre d'un métal dans une solution (1)

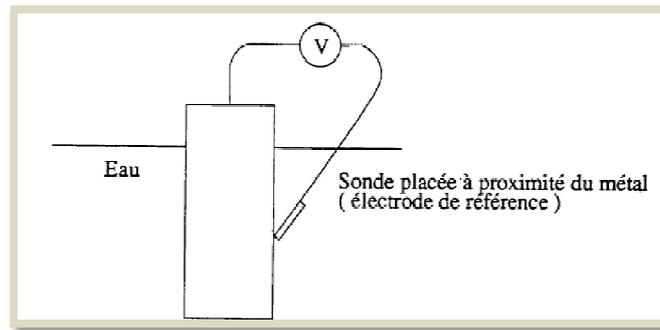


Figure 1.3 : Mesure du potentiel d'un métal dans une solution avec une électrode de référence(1)

2.4 Electrode de référence :

Une électrode métallique plongée dans un électrolyte est assimilable à une demi-pile. Son potentiel ne peut se mesurer physiquement. En effet on ne peut mesurer que la différence de potentiel d'une pile. Dans notre cas, cette pile sera constituée par la chaîne électrochimique constituée de l'électrode métallique à étudier, plongée dans l'électrolyte, et d'une électrode de référence également au contact de l'électrolyte.

L'électrode de référence est constituée elle aussi par une demi-pile soumise à un processus réversible d'oxydoréduction c'est à dire métal/solution normale d'un sel du métal. Elle possède son propre potentiel normal.

L'électrode standard à hydrogène a été choisie arbitrairement comme zéro de l'échelle des potentiels, mais dans la pratique on utilise des électrodes de référence plus simples, telles l'électrode $Cu/CuSO_4$, $Ag/AgCl$, au calomel ($Hg - Hg_2Cl_2 - KCl$), dont on connaît les potentiels respectifs (voir tableau 1.1 et figure 1.4).

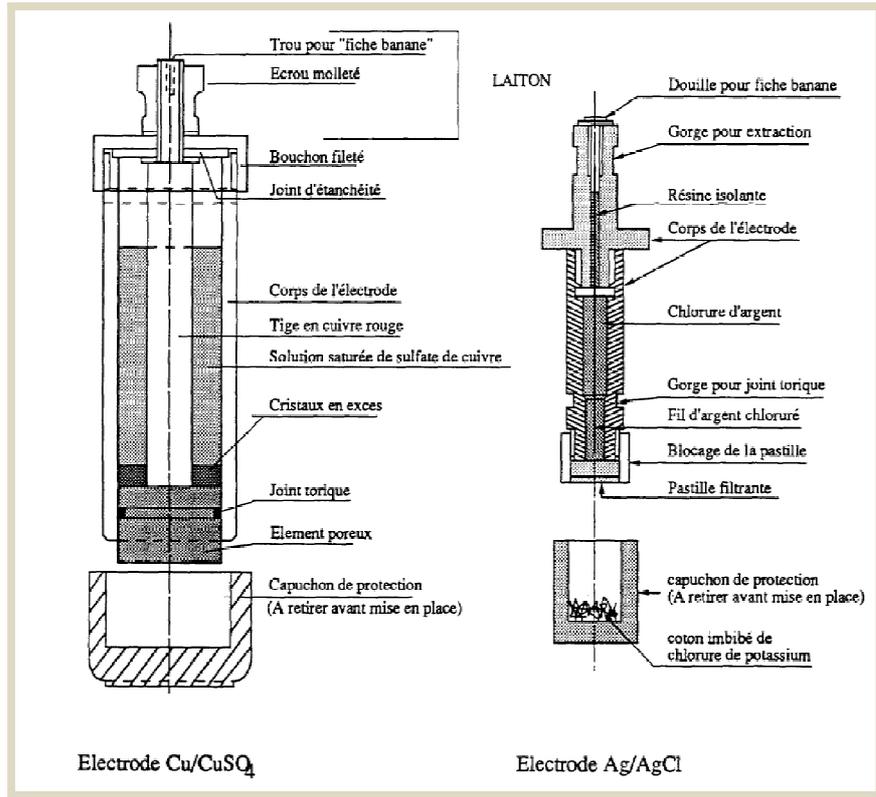


Figure 1.4 : Electrode de référence

Tableau 1.1 : Potentiels respectifs des différentes électrodes

Zinc en eau de mer	Hydrogène	Calomel saturé	Chlorure d'argent	Electrode Cu/Cu SO ₄
+ 1100	+ 316	+75	+ 30	0
		-0	0	
	-0			
+ 250	- 534	- 775	- 820	- 850
				Seuil de protection de l'acier
0				- 1100
			- U + 30	- U
		- U + 45		
- U + 1070				

3. Processus de corrosion :

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par action chimique ou électrochimique. La surface métallique est attaquée par son milieu et se transforme en composé d'oxyde, en sel ou en autre composé. Il s'agit d'une circulation de courant électrique produite sous l'échange d'électrons à l'interface de métal/ électrolyte par l'intermédiaire des réactions chimiques. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des piles galvaniques (Figure 1.5) [2].

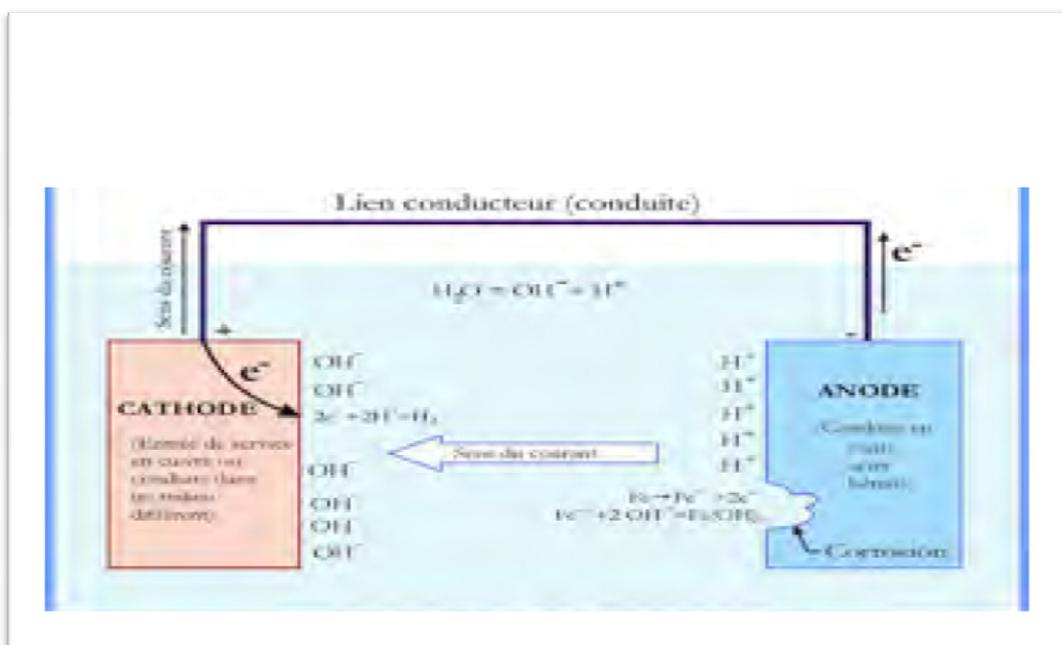
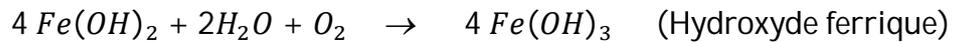
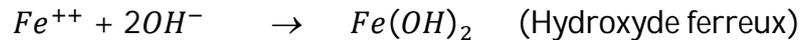


Figure 1.5 : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion.

D'après Bennis (2007) [2]

Par ailleurs, le phénomène de dissolution ne se produit que lorsque les quatre éléments ci après sont présents (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).

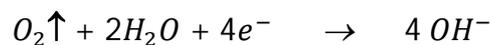
- **La zone anodique :** Elle est le siège de la réaction d'oxydation. À cet endroit, le métal s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique aux endroits appelés zones anodiques. Le mécanisme réactionnel de cette réaction chimique est décrit par les réactions suivantes [2].



- **La zone cathodique :** Il s'agit du siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions d'hydrogène présents dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant le gaz d'hydrogène selon le processus chimique suivant.



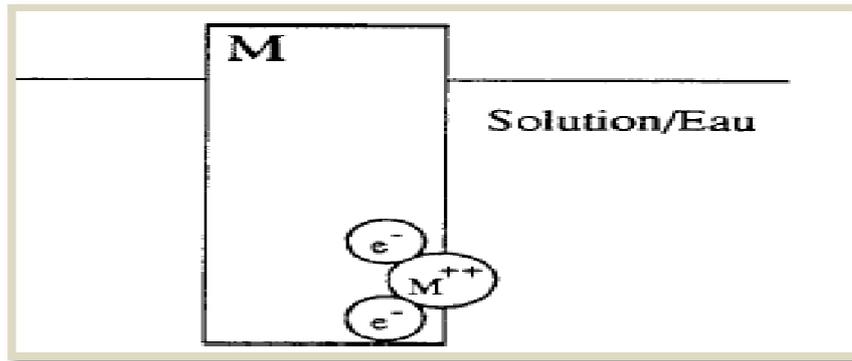
En présence de sols aérés, une autre possibilité de réaction chimique peut avoir lieu à la cathode. C'est la réduction des atomes d'oxygène dissous dans l'électrolyte qui se produit selon la réaction suivante [4].



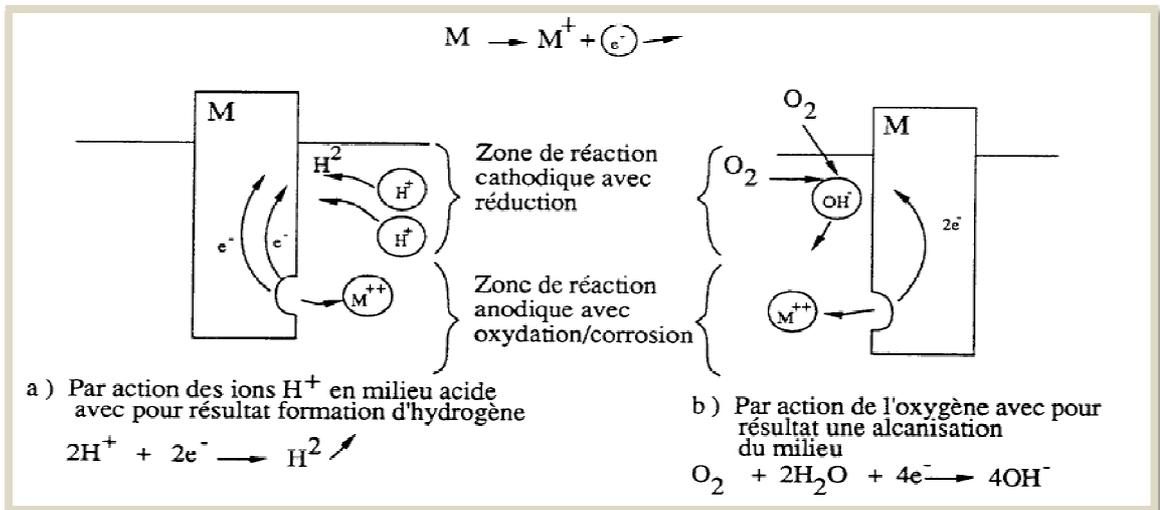
3.1 Destruction de l'équilibre par réaction du milieu :

Tout système chimique, contenu dans l'électrolyte, capable de fixer au contact de l'électrode métallique les électrons du métal (ce qui est le cas des oxydants de la solution) provoquera une oxydation du métal. Les oxydants de la solution sont réduits (gain d'électrons). Le métal, qui est dit réducteur, est, lui, oxydé (perte d'électrons)

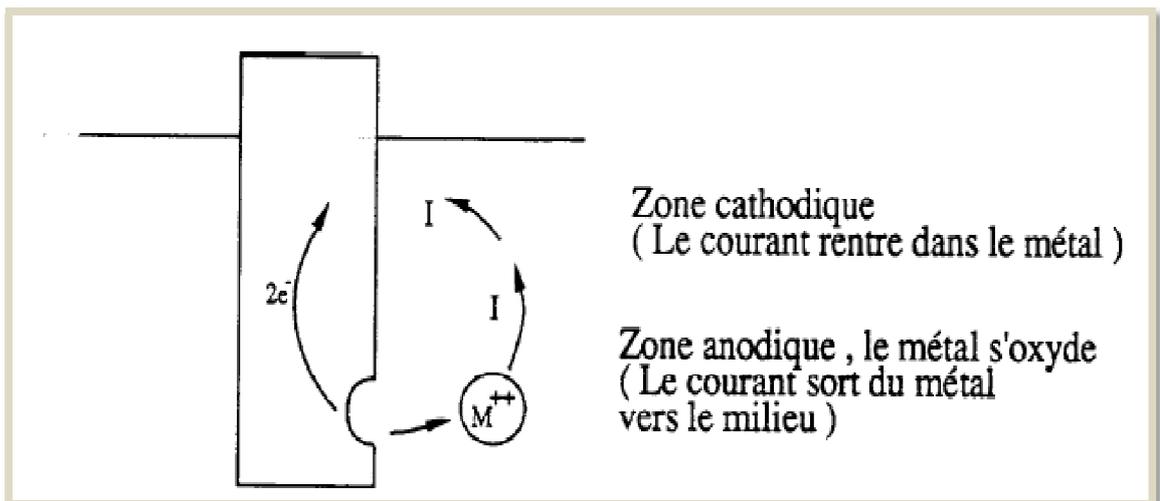
- Les sites anodiques et cathodiques se formant au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisé. Avec le temps, l'électrode voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement (Figure 1.6 A B C).



A - Equilibre du métal dans la solution



B - Exemples de destruction de l'équilibre

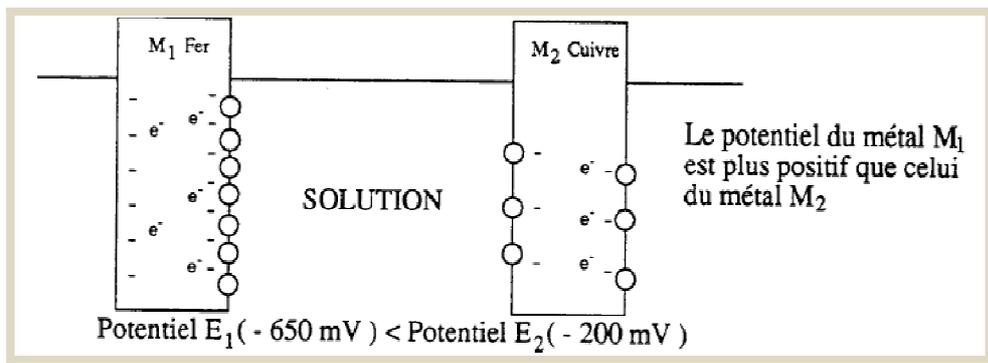


C - Identification du courant

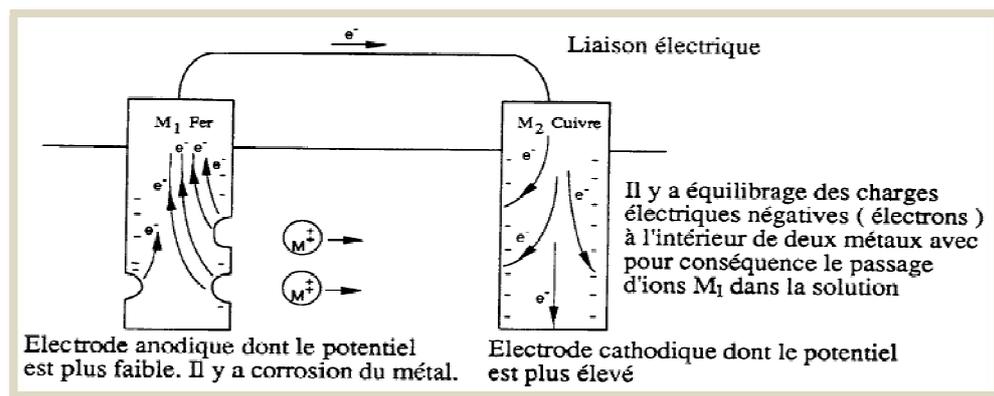
Fuguer 1.6 (A B C) : Destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par action du milieu(1)

3.2 Destruction de l'équilibre par couplage d'électrodes métalliques :

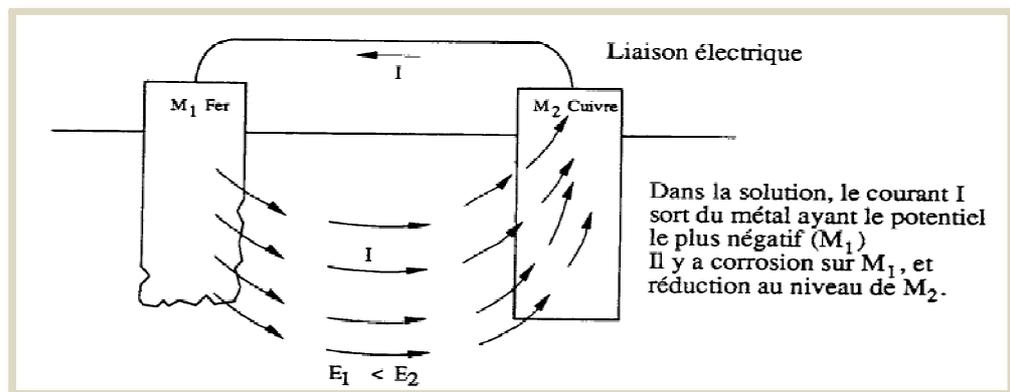
Soit deux électrodes métalliques M1 et M2 en équilibre dans un même électrolyte. Ces deux électrodes ont établi chacune leur couche double électrochimique et présentent des potentiels E1 et E2 dans la solution (Figure 1.7 1 2 3).



1 - Métaux en équilibre dans la solution



2 – Destruction de l'équilibre par couplage galvanique



3 – Identification du courant

Figure 1.7 (1 2 3) : Destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par couplage électrique(1)

- Les réactions d'oxydoréduction suivent les lois quantitatives de l'électrolyse. La masse de métal déposé sur une cathode, ou la masse de métal consommé à l'anode est proportionnelle à la quantité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique M du métal, et inversement proportionnelle à sa valence n (Loi de Faraday (1.3)).

$$P = (M/nF) \cdot (I_{corr} \cdot t) \quad (1.3)$$

Où :

- P : Masse de métal dissous.
- M : Masse molaire.
- n : Nombre d'électrons en jeux.
- F : Nombre de Faraday.
- I_{corr} : Courant de corrosion.
- t : Temps de consommation.

3.3 Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH – tension):

Les diagrammes de Pourbaix potentiel- pH (E-pH) sont utilisés principalement pour aider à prévoir les états les plus stables d'un métal, de ses produits de corrosion et de ses ions associés (forme complexe) dans une solution aqueuse sous différentes conditions de potentiel et de pH (Silverman et al, 2007). Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe-H₂O à 25°C (Figure 1.8), 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 Fe²⁺ et Fe³⁺, ont tendance à se stabiliser sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de corrosion et en présence des conditions thermodynamiques favorables.
- Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le Fe₂O₃ ou le Fe₃O₄ a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du Fer en formant une couche protectrice [2].

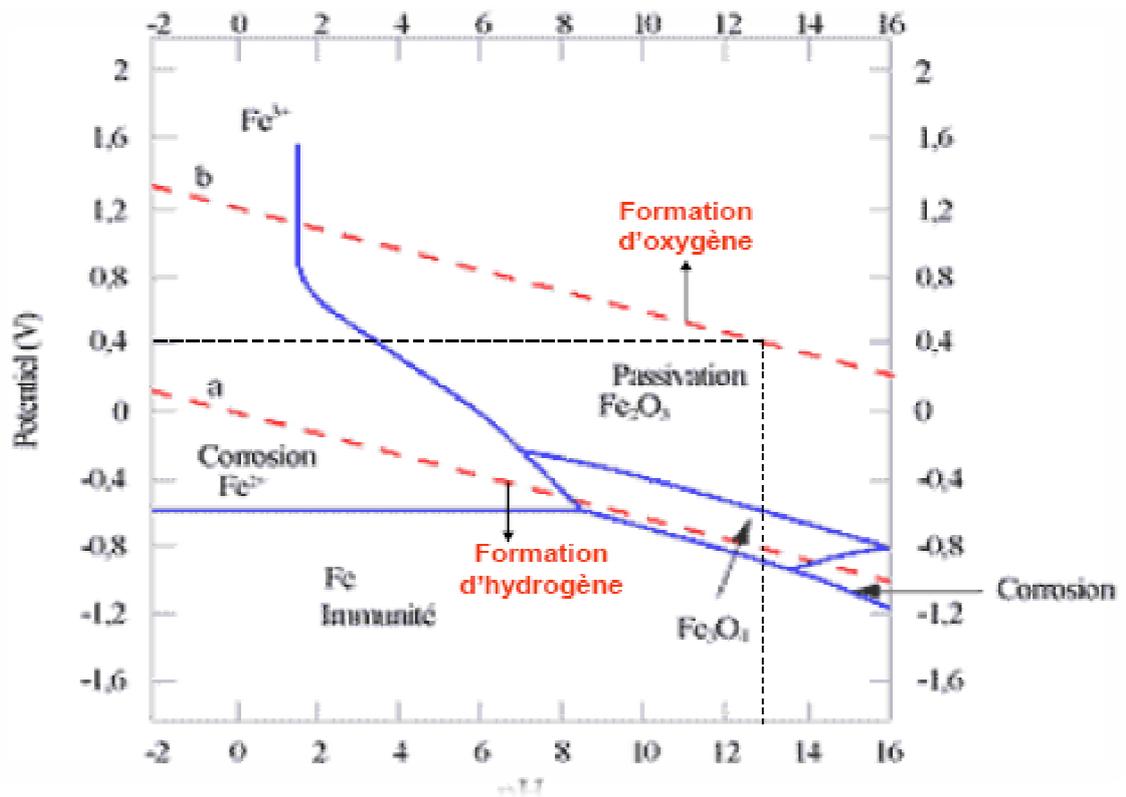
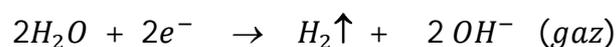


Figure 1.8 : Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C.

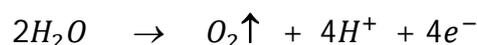
Tirée de Pourbaix (1974) [2].

- La région limitée par les lignes (a) et (b) de la figure (1.8) présente la zone de stabilité thermodynamique des molécules d'eau. Dans cette région, le potentiel et le pH sont considérablement stables. Par ailleurs, le rapprochement de ces limites provoque une dissolution de l'eau (NACE, 2007) [4].

La ligne (a) présente la ligne d'évolution d'hydrogène qui est présentée par le mécanisme réactionnel suivant :



La ligne (b) présente la ligne d'évolution d'oxygène dont la réaction est représentée par :



Pour le cas du fer, le diagramme potentiel-pH du système Fer- H₂O à 25°C fait apparaître trois phases distinguées (Pourbaix, 1974), à savoir :

- **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).
- **Phase 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. En solution neutre ou acide, le diagramme prévoit la dissolution du fer avec la formation d'ions ferreux Fe^{2+} et d'ions ferriques Fe^{3+} tandis qu'en solution alcaline, le fer est sous forme d'ions ferrate $HFeO_2$.
- **Phase 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. Le métal a donc été oxydé en surface mais ce film le protège d'une agression en profondeur. La couche passive recouvrant la surface métallique est généralement très stable, compacte et fortement liée au métal.

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

4.1 Le sol comme électrolyte :

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

4.2 Agressivité du sol :

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies (Rim-rukeh et Awatefe, 2006). Un sol résistif a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau (Paul, 1990). La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés (Agostinis, 2008). À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités [2].

- Pour ces raisons, on s'est basé sur ces normes existantes afin de définir des limites de résistivité sur le terrain concernant les conduites d'aqueduc en fonte. Les limites de résistivité considérées sont présentées au (Tableau 1-2) où cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles.

Tableau 1.2 : Corrosivité du sol selon la résistivité [2]

Plage de résistivité du sol (Ω cm)	Catégorie du sol
0 – 1500	Très corrosif
1500 – 3000	Corrosif
3000 – 5000	Moyennement corrosif
5000 – 10000	Faiblement corrosif
> 10000	Peu corrosif

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

4.2.1 Paramètres déterminant l'agressivité du sol :

L'analyse du taux d'agressivité du sol consiste en la détermination des paramètres suivants (Agostinis, 2008) :

- **Résistivité du sol :** La résistivité du sol est inversement proportionnelle à la capacité du courant de corrosion et donc à l'activité de la corrosion. Un sol avec une résistivité de 1500 Ohm cm ou moins se fait attribuer 10 points et est considéré comme potentiellement corrosif.
- **pH :** Le pH exprime la teneur en ions acidifiants dissous dans l'électrolyte (le sol) et indique l'aptitude d'un sol à être le siège de certaines réactions particulières influençant la corrosion. Un sol à faible pH indique un sol aux propriétés acides et un sol avec un pH élevé indique la présence de sels alcalins dans le sol.
- **Sulfures :** La présence des sulfures indique l'existence de bactéries sulfato-réductrices. L'analyse considère les degrés de la réaction du catalyseur de l'échantillon du sol étudié (positif, trace ou aucune).

- **Potentiel d'oxydoréduction (Redox) :** Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.
- **Humidité :** Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion.

4.2.2 Méthode de mesure de la résistivité du sol :

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner (Scott et O'Connor, 2003). Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables [2].

4.2.3 Principe de mesure de la résistivité du sol :

Tel qu'illustré sur la figure 1.9, on fait circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et on mesure la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs. Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE permettent de calculer la résistivité du sol selon l'équation 1.2 (Laver et Griffiths, 2001).

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

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

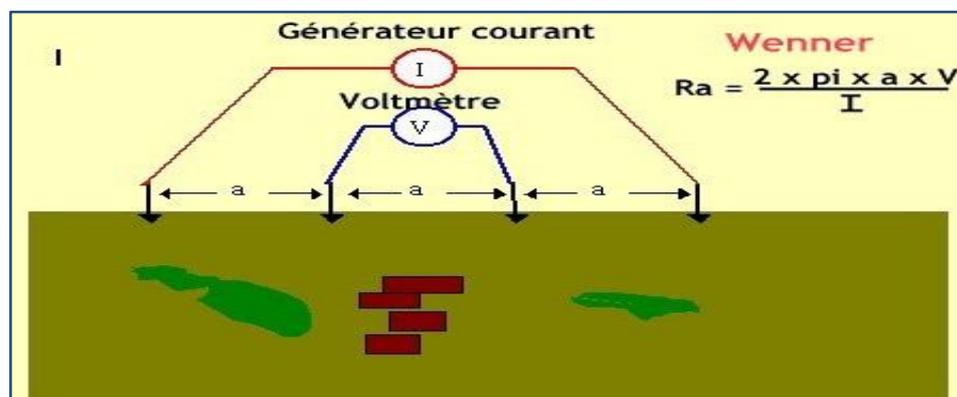


Figure 1.9 : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.(2)

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule 1.2 (Nigel et Booth, 2006) :

$$\rho = 2 \pi R d \quad (1.4)$$

Où :

- ρ : Résistivité moyenne du sol ($\Omega \text{ cm}$) ;
- R : Résistance moyenne du sol (Ω) ;
- d : Espacement entre deux piquets(cm).

4.3 Piles dues à l'électrolyte :

Ce sont les piles créées par les hétérogénéités du sol qui engendrent sur un ouvrage métallique pourtant parfaitement homogène, des différences de potentiel locales, donnant naissance à un courant qui conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal (Figure 1.10).

Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement.

C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts. Ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins, ainsi que des corrosions qui apparaissent au niveau des sols dont l'aération n'est pas la même en tous points (sable ou cailloux et argile par exemple).

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage de grande longueur, traversant des sols de compositions très différentes, lui conférant des potentiels locaux différents.

En général, les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent des zones anodiques vis à vis des autres terrains

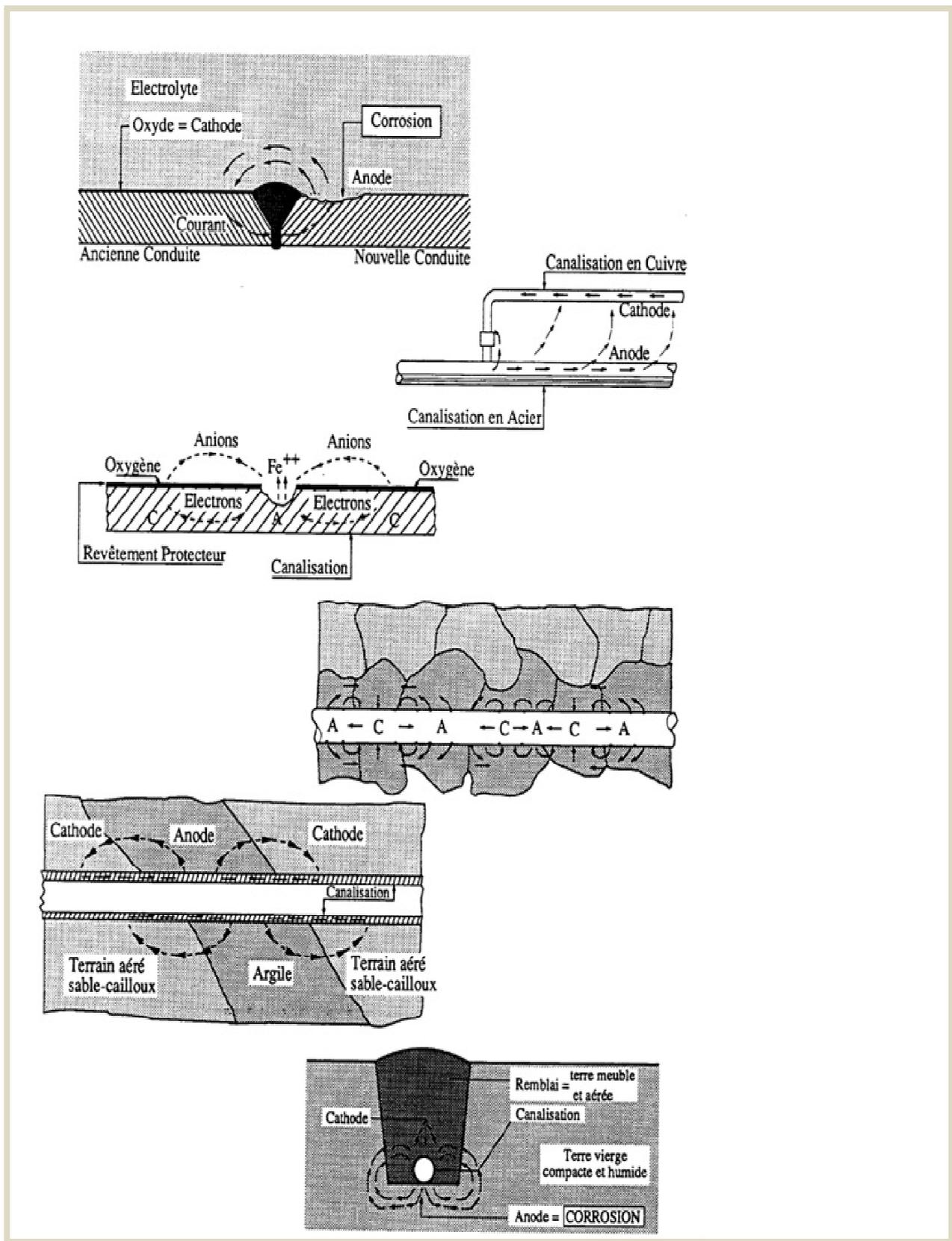


Figure 1.10 : Différentes piles galvanique

5. Les différents types de corrosion :

5.1 Corrosion uniforme :

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'éléments structuraux qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 . [22]

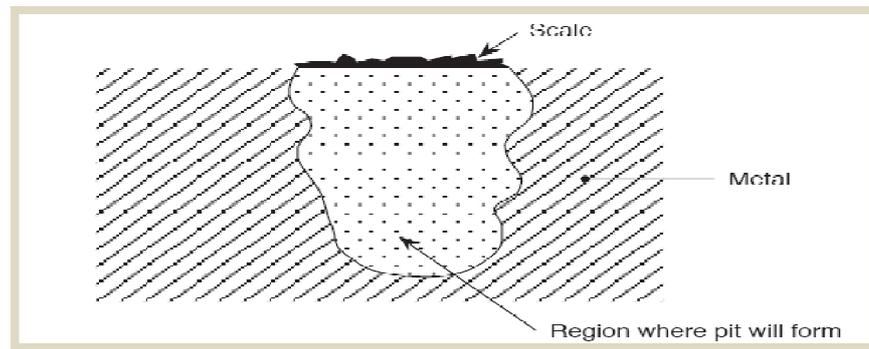


Figure 1.11 : Corrosion par piqûres [22]

5.2 Corrosion galvanique :

Corrosion connue aussi sous le nom de **corrosion de contact**. La notion de couple galvanique correspond à un type particulier de corrosion qui trouve son origine dans la corrosion électrochimique résultant de la **formation d'une pile** par mise en contact de deux matériaux conducteurs différents (voir figure 1-12) dans un environnement assurant un **milieu électrolytique**. Dans ces conditions, il y a formation d'un couple galvanique. La corrosion galvanique apparaîtra donc principalement dans les zones d'assemblage entre une structure métallique et une structure composite carbone/résine, et dans les zones de liaison de deux structures composites carbone/résine à l'aide d'éléments métalliques (vis, rivets,...) [3].

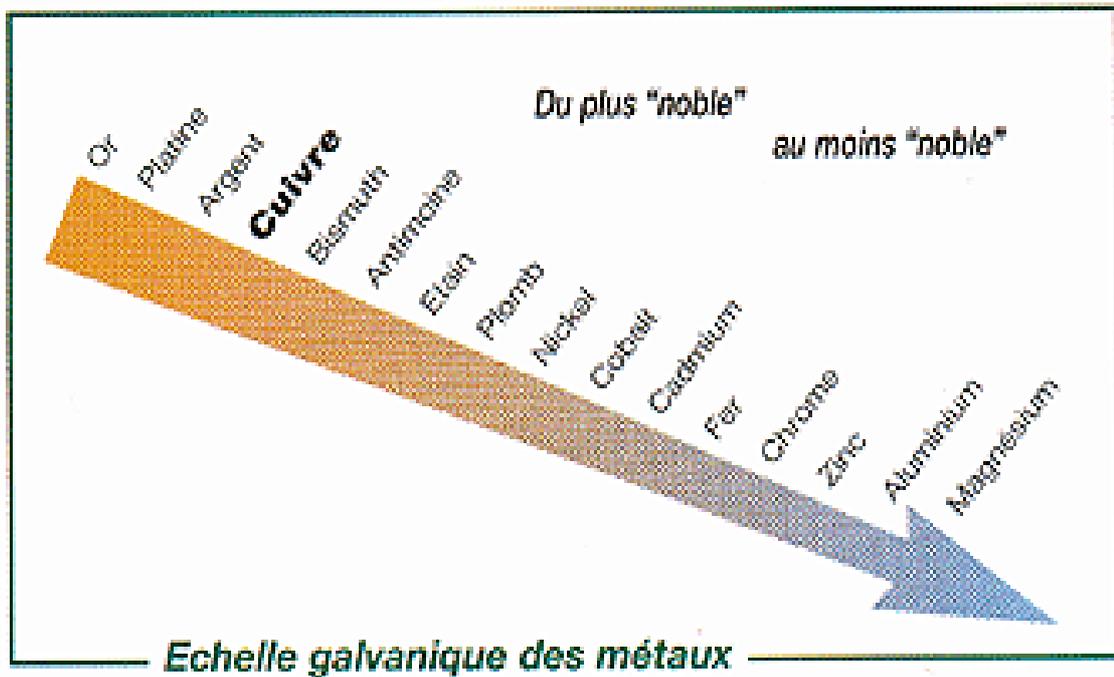


Figure 1.12 : Echelle galvanique des métaux [22]

5.3 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 inoxydable, et le phénomène est exacerbé par la sans phénomène précurseur.

5.4 Corrosion-érosion :

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la forced'en traînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice. Cet effet est l'une des principales causes de perte de métal dans les tubes des condensateurs de vapeur en alliage de cuivre. Les particules fines et d'autres particules issues des produits de corrosion comme le sable et le limon dans le fluide de refroidissement peuvent également accroître la vitesse de corrosion.

5.5 Corrosion par crevasses :

Cette forme de corrosion porte parfois le nom de corrosion cavernueuse ou interstitielle. Elle apparaît dans toutes les zones de confinement, les recoins de structure, les contacts entre pièces mal ajustées, sous les joints. C'est une attaque électrochimique par « Aération différentielle ». Elle se caractérise par la dissolution très rapide de la zone confinée, précédée d'un temps d'incubation plus ou moins long pendant lequel le métal ne subit aucun dommage [22].

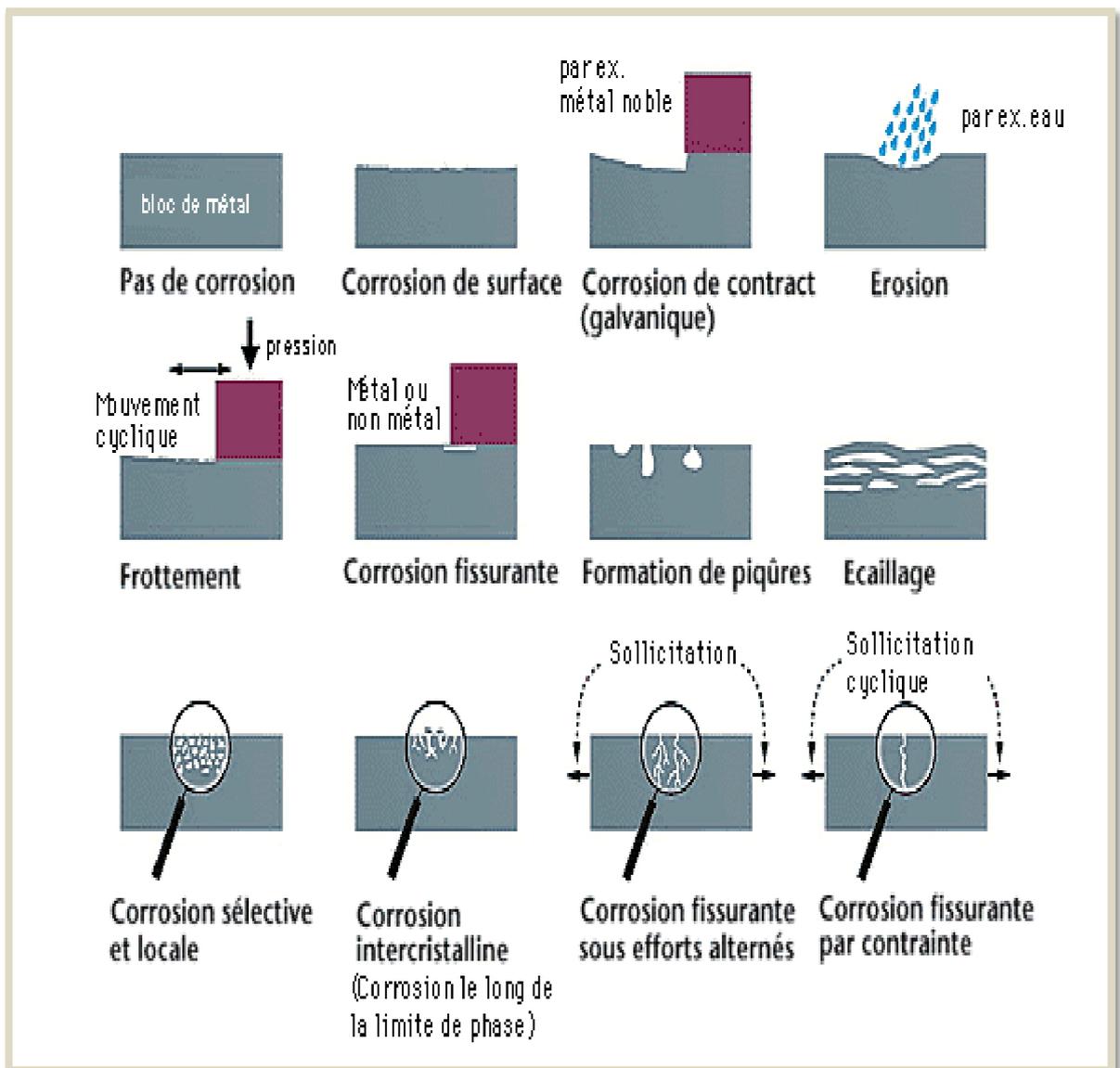


Figure 1.13 : Différents types de corrosion [3]

5.6 Corrosion par les courants vagabonds :

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (S.N.C.F. – tramways, métro), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds (Figure 1.15). En effet, le courant amené par la caténaire, qui peut pour certains trains être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à la sous-station émettrice par le rail de roulement. Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur des parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station[1] .

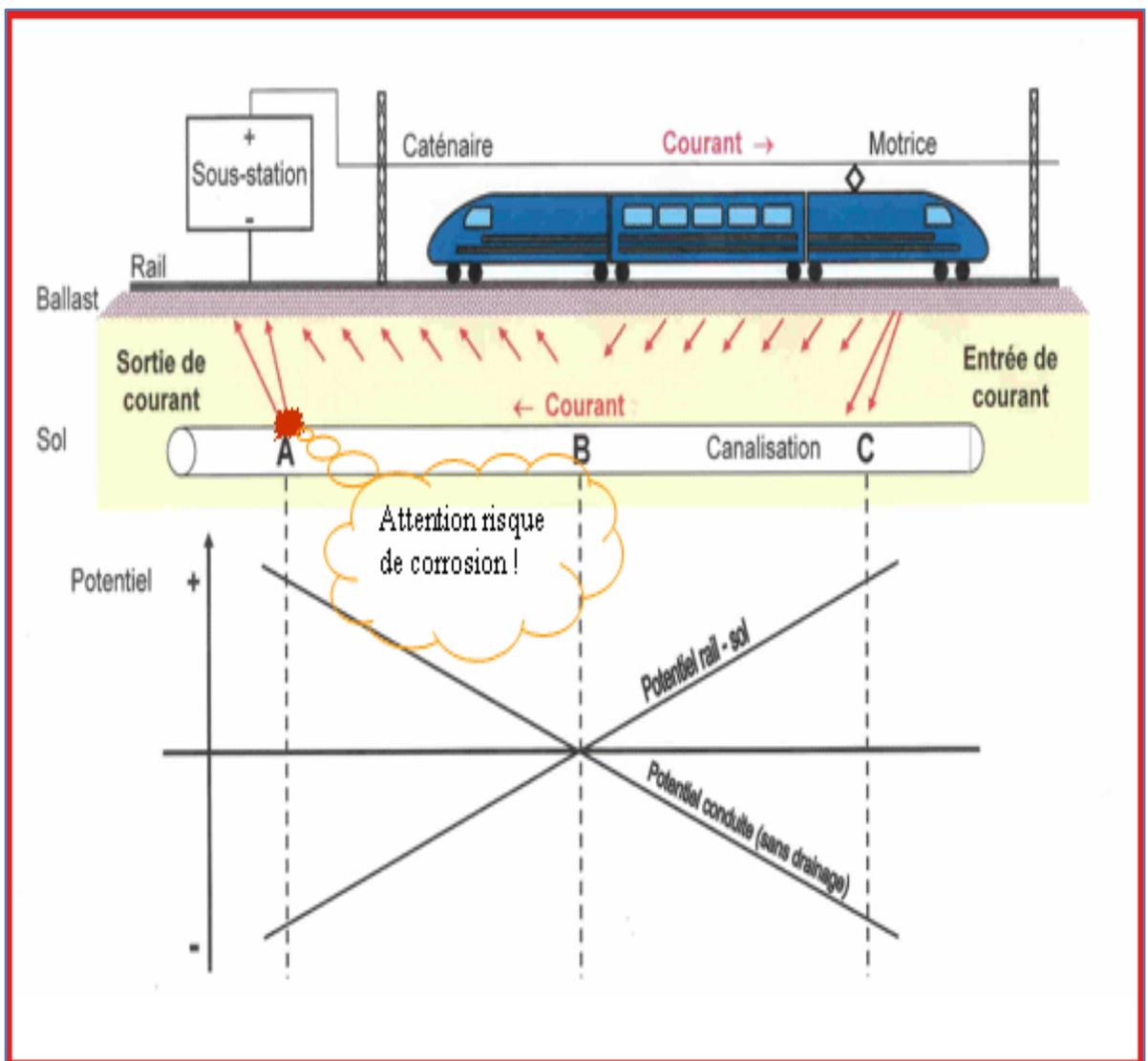


Figure 1.15 : La corrosion par courant vagabond [1]

Conclusion :

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

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

Introduction :

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

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. En termes de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

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

La protection 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 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.

L'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 avant d'empêcher la production des cellules de corrosion.

1. Prévention de la corrosion des conduites souterraines :

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. En termes de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

- **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 avant d'empêcher la production des cellules de corrosion.

2. 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 (Shiwei, 2001) [2].

2.1 Revêtements externes :

2.1.1 Procédés de protection :

La protection par revêtement extérieurs vise à isoler le plus parfaitement possible, le métal du milieu ambiant pour prévenir le mécanisme de la corrosion. Deux principes permettent d'assurer la protection par revêtement :

- **Le 1^{er} 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 conserve 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.

- **Le 2^{ème} principe** consiste à créer au niveau du métal une couche protectrice en utilisant soit le pouvoir passivant de certains sels métalliques (chromates, phosphates), soit le caractère anodique relativement à l'acier de certains métaux (zinc, aluminium). Afin d'en 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 .

2.1.2 Choix du revêtement :

La sélection d'un revêtement anticorrosion doit répondre aux exigences suivantes :

- Résistance d'isolement élevée,
- Imperméabilité à la vapeur d'eau, à l'air,
- Faible transmission d'espèces ioniques,
- Inertie chimique et bactériologique,
- Adhérence et de mouillabilité à la surface métallique
- Résistance mécanique, afin que les propriétés d'anticorrosion puissent être maintenues de façon durable [4].

2.2 Les différents types de revêtements :

2.2.1 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 [4].

2.2.2 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 [4].

2.2.3 Revêtements à base de produits thermodurcissables :

Ce sont des revêtements constitués par des résines époxydes, en épaisseur de 500 μ m environ, ou par des polyuréthanes ou des produits composites tels les brais polyuréthanes et les brais époxydes [4].

2.2.4 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 [4].

3. Protection cathodique :

3.1 Protection cathodique (Protection Active) :

3.1.1 Origines :

La première utilisation de la protection cathodique remonte à 1824, lorsque Sir Humphrey Davy, de la British Navy, fixa des morceaux de fer à l'extérieur au dessous de la ligne de flottaison sur le revêtement de cuivre de la coque d'un navire. Le fer se corrode plus facilement sous forme de rouille que le cuivre lorsqu'il est en contact avec la coque si bien que la vitesse de corrosion du cuivre s'en trouve considérablement réduite [3].

3.1.2 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 -850mV, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée.

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

Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure [4]:

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive (fig.1)
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé (fig.2)

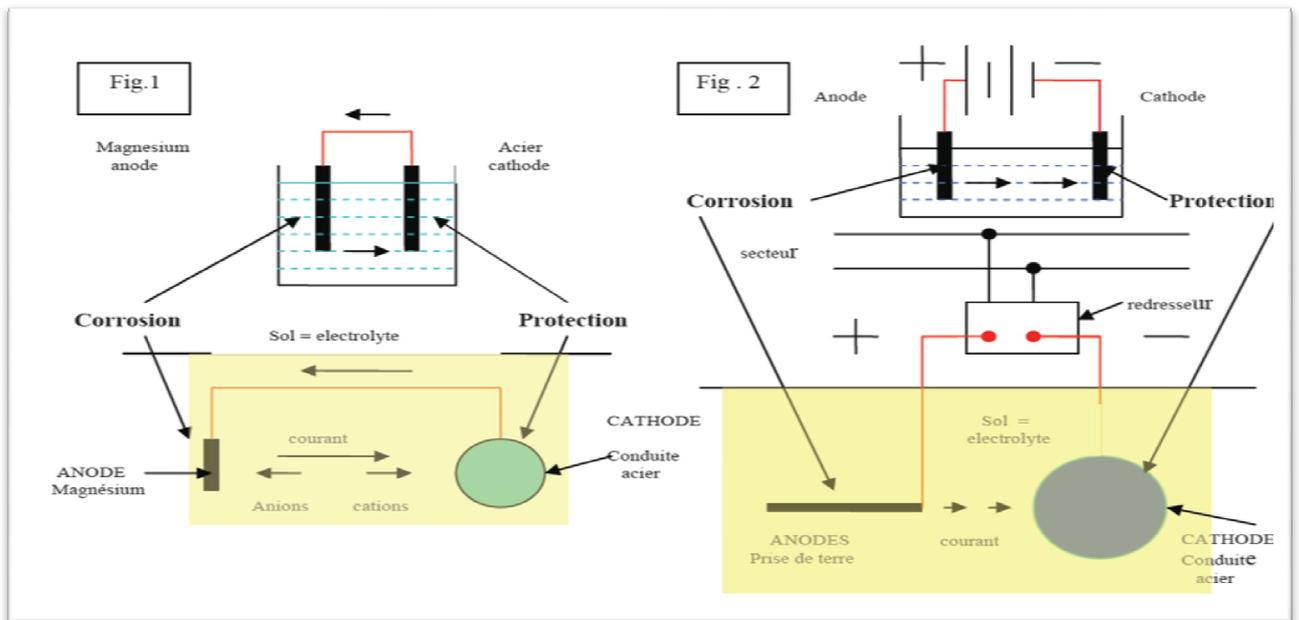


Figure 2.1 La protection par anode galvanique et courant imposé [22]

3.1.3 Critères de la protection cathodique :

- Le seuil de potentiel de protection cathodique relevé sur la structure d'acier par l'intermédiaire d'une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre doit atteindre la valeur de -850 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 [2].

3.2 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 :

- Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
- Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

3.2.1 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 2.2. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure que 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 (C.S.R.P.P.G., 1986). La loi de Faraday (1.1) [1].

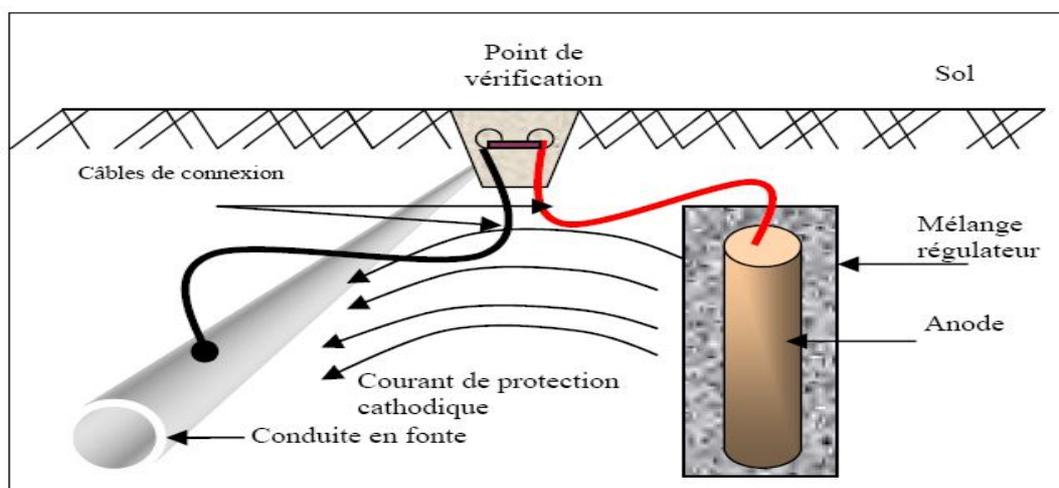


Figure 2.2 : Principes de la protection par anodes sacrificielles [2]



Figure 2.3 Anodes sacrificielles [10]

3.2.1.1 Choix des anodes sacrificielles :

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes. Le Tableau 2.1 résume les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées, avec les avantages et inconvénients de chacune [Protection cathodique: guide pratique - Editions TECHNIP]. 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 [21].

Tableau 2.1 : Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles [21]

	Anode à base de Zinc	Système à courant imposé	Anode à base de magnésium
Potentiel en charge (V)	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10V à terre	-1,05	-1,4 à -1,5 (type standard) -1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
Capacité pratique (Ah/kg)	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)
Consommation pratique (kg/A. an)	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6.5 à 8
Rendement électrochimique (%)	95 en eau de mer 90 à terre	87	55
Application	<ul style="list-style-type: none"> • Conduites enterrées de faible longueur • Ouvrages immergés • Capacités métalliques (intérieur ou extérieur) • Réservoirs sous talus 	<ul style="list-style-type: none"> • Plates-formes offshore • Conduite offshore chaude • Capacité métalliques (intérieur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Conduites enterrées sur de faibles longueurs • Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes • Prépolarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le relais • Réservoirs sous talus
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer • Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés) • Excellent rendement • Peu sensibles aux salissures marines 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de PA/an le plus faible (forte capacité pratique) • Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer • Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute) • Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement 	<ul style="list-style-type: none"> • Portée élevée (fort potentiel) • Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer) • Faible poids spécifique
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Portée limitée (faible potentiel) • Température d'utilisation limitée à 60 °C • Coût A/an • Poids spécifique élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu) • Vulnérable aux salissures marines • Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture) • Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires) • Rendement médiocre en eau de mer • Coût de PA/an le plus élevé

3.2.2 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 [2].

3.2.2.1 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 (ddp) entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850$ V en tous points de la structure. En général, la valeur limite inférieure que l'on cherche à atteindre est d'environ -1 V [21].

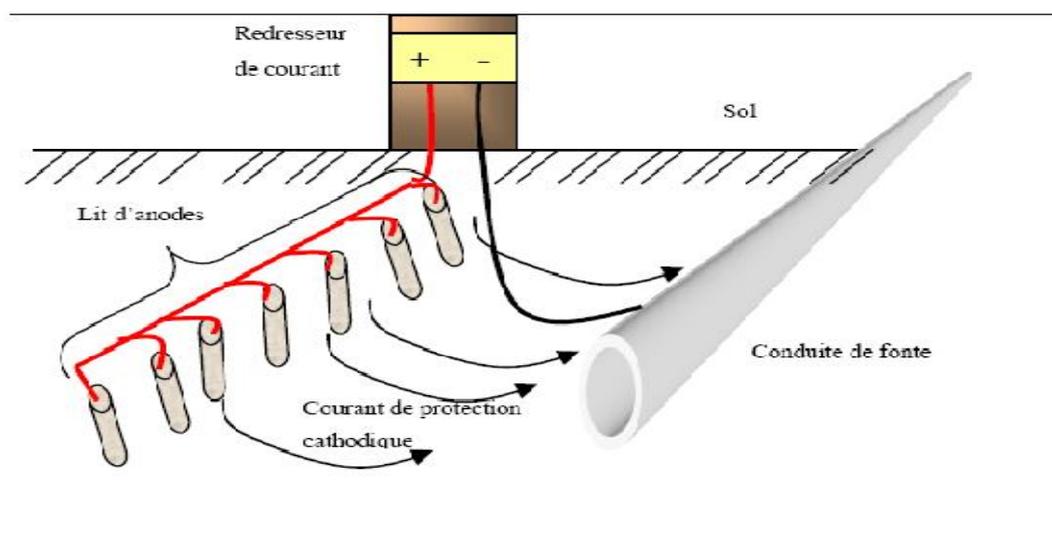


Figure 2.4 : Principe de la protection par courant imposé [2]

3.3 Avantages et inconvénients des systèmes protection cathodique :

Quoique l'utilisation d'un système de protection cathodique est toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujéti à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. À cet égard, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le Tableau 2.2 donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

Tableau 2.2 : Comparaison des éléments de systèmes P.C

Tiré de Nguyen-Thuy (2008) [1]

	Anode galvanique ou sacrificiel	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 les 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	Elevé
Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistance	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

4. Protection par inhibiteur de corrosion :

L'inhibiteur de corrosion est une forme de substance rajoutée avec une faible concentration au liquide transporté 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 (Bofardi, 1987). 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 [2].

5. Facteurs affectant la protection cathodique:

Atténuée par L'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur une conduite donnée peut être certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui se manifestent sous différentes formes (Peabody, 1976) :

- 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) .

5.1 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).

5.2 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 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.

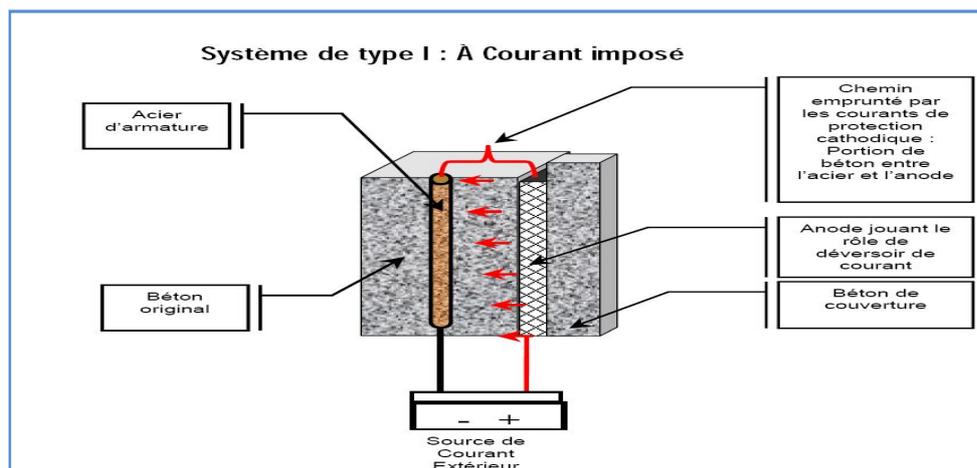
6. Synthèse sur la protection cathodique :

Plusieurs travaux ont été effectués sur la protection cathodique :

, A N Kadoum [6] en étudiant la protection cathodique pour la lutte contre la corrosion des aciers d'armature, le phénomène de corrosion des aciers d'armature est aujourd'hui reconnu comme l'élément majeur contribuant à la détérioration des structures en béton. Face à la rapide destruction des structures en béton armé, telles que les ponts, viaduc, etc... qu'à l'origine on croyait virtuellement qu'elles pouvaient exister sans maintenance, et aux restrictions financières que l'on connaît de nos jours, il est impérativement plus que nécessaire de se pencher sur cette question cruciale et de mettre l'emphase sur les différents moyens permettant de réduire considérablement l'impact de ce fléau.

La protection cathodique est une technique électrochimique de réhabilitation qui enrave la corrosion des armatures dans les ouvrages contaminés par les sels. Cette méthode consiste en la polarisation négative de l'armature par un procédé électrochimique au moyen d'une anode auxiliaire appliquée à la surface du béton que l'on veut protéger. En plus de mitiger la corrosion des armatures, l'emploi de la protection cathodique a l'avantage de chasser les ions chlorures de la proximité des barres d'armature vers l'extérieur, au moyen de champs électriques produits par la polarisation.

La protection cathodique peut être utilisée selon deux méthodes qui sont la protection cathodique à courant imposé ou la protection cathodique par anode sacrificielle.



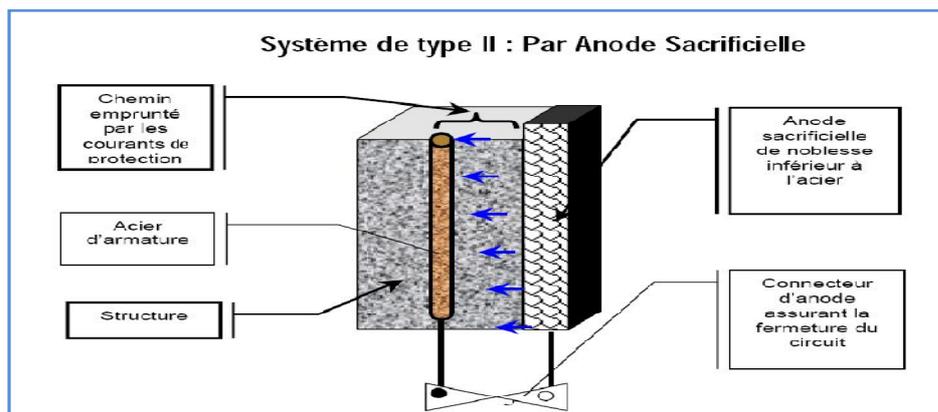


Figure 2.5 : Le principe de PC par le courant impose et anode sacrificielle

Les critères de protection cathodique sont résumés dans le standard NACE, l'association des ingénieurs en corrosion No. RP0290-90, lequel nous ne détaillerons pas dans cet article. Cependant, il est important de préciser que la protection cathodique consiste en un simple apport énergétique par le biais d'une source de courant qu'elle soit extérieure ou provenant d'une anode sacrificielle. Le niveau de protection cathodique est alors maintenu tant et aussi longtemps que l'énergie apportée par la protection cathodique est supérieure à celle déployée par l'acier lors de sa dissolution dans le processus de la corrosion.

La protection cathodique est aujourd'hui considérée comme une méthode de réhabilitation des structures en béton armé pouvant jouer un rôle considérable dans le maintien en état de nos infrastructures, bien entendu, cette dernière, comme tout autre moyen de réhabilitation, doit se compléter aux méthodes ayant fait leurs preuves aujourd'hui et ainsi aboutir à un programme de maintien en état des infrastructures urbaines des plus complet faisant intervenir les technologies les plus adaptées sur le plan technique et économique.

B.Brahim Laoun [7] en étudiant la Corrosion et Protection Cathodique des Canalisations Enterrées par Application de l'Energie Solaire.

La protection cathodique est employée intensivement sur les canalisations en acier dans les industries de pétrole et de gaz. C'est une technique de prévention contre la corrosion qui transforme la canalisation entière en cathode d'une cellule de corrosion, Deux types de systèmes de protection cathodiques sont couramment appliqués : Les systèmes de protection galvaniques utilisent les anodes galvaniques, également appelées les anodes sacrificielles, qui sont électrochimiquement plus électronégatives que la structure à protéger et les systèmes à courant imposé,

par le biais d'un générateur de courant qui débitera un courant continu de l'anode vers la structure à protéger.

L'objet de cette étude est de dimensionner un système de protection cathodique d'un pipeline par courant imposé avec appoint électrique d'énergie solaire.

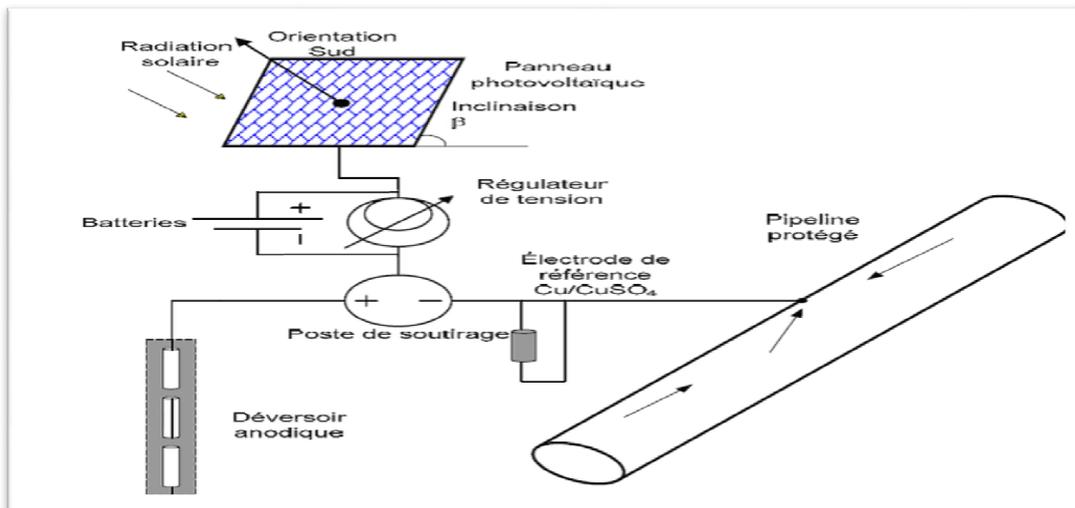


Figure 2.6 : Le principe de PC et application de l'énergie solaire

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, le critère de protection cathodique est atteint. Le système peut être implémenté avec efficacité, puisque le nombre de modules est acceptable ; 10 modules avec 14 batteries. Pour la même configuration du système de soutirage avec appoint d'énergie solaire les points suivants sont intéressants :

- La gamme de potentiel de protection est large et le système s'adapte bien pour des canalisations de matériaux de différents.
- Possibilité de contrôle et de variation du courant de sortie.
- Courant de sortie assez élevée pour protéger d'autres structures, avec des faibles coûts.
- La Méthode est applicable pour différents types de sols.

Dans une autre étude [2], B. Bouzidi, en étudiant la corrosion et la protection cathodique des conduites souterraines au Canada a montré que les facteurs d'agressivité, taux d'agressivité, la concentration en ions chlorures, pH, résistivité, vitesse de corrosion, après analyse de six (06) échantillons du sol prélevés à pleine profondeur aux endroits excavés sur une longueur de 1000 m, l'étude a montré que la résistivité du sol est le paramètre le plus pertinent ayant un effet important sur la vitesse de corrosion externe. Ce paramètre de rupture a été à son tour relié à un ensemble de facteurs dont la concentration en ions chlorure et le pH. Le modèle du diagnostic permet ainsi de classer la corrosivité du sol entourant la conduite selon la valeur des différentes variables indépendantes retenues. D'autre part, il a été trouvé que pour le même sol, le premier critère explicatif du bris des conduites d'aqueduc est l'année de pose de celles-ci. Cependant, les inspections réalisées ont démontré que dans un sol de très faible résistivité, la corrosivité du sol semble avoir un impact crucial sur la corrosion de la conduite, et ce indépendamment de l'année de son installation. Concernant les systèmes de protection cathodique installés, il a été retenu que ces derniers sont majoritairement fonctionnels mais avec des degrés de performance variables. Néanmoins, une protection cathodique installée adéquatement demeure une solution efficace pour la réduction des bris.

La défaillance des aqueducs est liée aux différents facteurs physiques, mécaniques et environnementaux. Toutefois, le facteur de corrosion est considéré comme le principal élément responsable du vieillissement et de la détérioration des conduites métalliques souterraines.

Il est difficile de quantifier les dégâts produits par ce processus destructif.

Néanmoins, les coûts budgétaires destinés chaque année aux services publics pour le maintien du fonctionnement de ces infrastructures souterraines endommagées reflètent nettement l'ordre du dommage causé par la corrosion sur l'économie et la sécurité de n'importe quel pays.

Il est admis que le taux de corrosion par piqûres externes sur les matériaux ferreux non protégés est régi principalement par la corrosivité de l'environnement. Cette corrosion par piqûration est considérée comme étant le mode de défaillance principal des tuyaux en fonte.

Dans le processus de corrosion, il est évident que la corrosion est stimulée dans les électrolytes à faible résistivité. Ce postulat est bien validé par la corrélation établie entre les valeurs de la vitesse de corrosion calculée et celles de la résistivité des sols mesurées en laboratoire. De plus, les résultats d'analyse révèlent que de la vitesse de corrosion décroît à mesure que la résistivité du sol augmente.

CONCLUSION :

La protection cathodique (active) permet de protéger un métal contre la corrosion. Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, une anode installée dans le même électrolyte est utilisée. Les anodes peuvent être de deux types : soit des anodes ayant un potentiel plus électro-négatif que le métal à protéger (anode sacrificielle), soit des anodes couplées à un générateur de tension continue imposant une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à courant imposé). Mais il faut faire une deuxième protection (passive) les revêtements externes à base de polyéthylène appliqués en usine par extrusion sur un primaire adhésif sur des tubes en acier destinés à constituer des canalisations de transport de gaz et leurs conditions d'application.

La protection active et passive est utilisée pour protéger les structures métalliques de la corrosion, notamment l'acier, les canalisations d'eau, les oléoducs, les réservoirs, les piliers métalliques des jetées, les navires, les plateformes pétrolières ou encore les structures en béton armé.

Introduction :

Le transport des hydrocarbures par canalisation a connu ces dernières années le moyen le plus efficace et par ses avantages économiques que cela représente. La consommation du gaz naturel augmente de plus en plus dans notre époque. Le transport des hydrocarbures par canalisation a connu ces dernières années et pour satisfaire cette demande les pays producteurs (Mer du nord, Russie, Algérie,...) ont construit des réseaux de gazoducs pour acheminer le gaz naturel des sites de production aux raffineries ensuite vers le stockage et la consommation sur des milliers de kilomètres. En Algérie, le réseau de pipelines exploité par la société sonatrach est estimé à plus de 18 000 kms de gazoducs et oléoducs.



Figure 3.1 Ligne de tracé de Pipeline

Les tubes pour le transport des hydrocarbures sont en aciers produits selon la norme API 5L (American Petroleum Institute). Cette spécification couvre d'autres grades avec une composition chimique indiquée et des caractéristiques mécaniques comprenant: les contraintes, la résistance à la traction et la dureté auxquelles le pipe doit être conforme. La composition chimique est indiquée en tant que limite maximum de quatre éléments, carbone, manganèse, phosphore et le soufre. L'amélioration de la taille du grain de ferrite a été obtenue par différents mécanismes de durcissement et de précipitation basés sur le mouvement de dislocation qui augmente la limite d'élasticité et la ténacité de l'acier. (process TMCP – Thermo mechanical process). Ils permettent de satisfaire à des exigences particulières, comme la résistance à la corrosion et la fissuration.

Les aciers sont protégés des agressions extérieures par un revêtement bitumineux ou à base de polymères (polyuréthane, polyéthylène).

Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau potable et d'irrigation existent depuis les temps historiques les plus anciens. Certains de ces réseaux utilisaient déjà sur certains tronçons des canalisations maçonnées en bois ou en métal ductile (plomb, ...).

Au XIXe siècle, la civilisation industrielle a vu se développer des installations complexes (haut fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.) qui comprenaient des systèmes de transport locaux par canalisations en fonte, bois, acier, céramique, d'ampleur modeste.

Le premier concept industriel de transport par canalisation aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863. Il suggéra une solution technique utilisant des tubes pour transporter du pétrole. Un autre Russe, Vladimir Choukhov, avec la société Branobel (acronyme de Brothers Nobel) passent pour avoir construit l'un des premiers oléoducs à la fin du XIXe siècle, en 1878-1880 près de Bakou. Peu de temps auparavant, un oléoduc reliant un champ de production de Pennsylvanie à une gare de chemin de fer à Oil Creek aurait été construit vers 1860 par la *Oil Transport Association* [8].

Composants des réseaux de transport par canalisation sont les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position Les réseaux de transport par canalisation sont composés de tronçons de conduites et d'ouvrages connexes remplissant des fonctions précises :

Les stations d'injection ou de départ constituent géographiquement ce peuvent être des stations d'atterrage, des terminaux, des stations d'entrée.

Les stations de compression (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations.

Les postes de livraison permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.

Les postes de sectionnement permettent d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces postes sont parfois équipés de coupure pour introduire et recevoir des pistons (*Pig* en anglais), destinés à contrôler les différents paramètres d'intégrité de la canalisation : géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, etc. La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure (ou de demi-coupure) consécutifs varie d'une dizaine de kilomètres pour de

courtes antennes ou points spéciaux, à quelques centaines de kilomètres pour de grandes canalisations de transit.

Les postes de détente ou poste de régulation permettent de diminuer la pression de fluide à l'aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.

Les stations d'arrivée marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Ce peut être un réservoir de stockage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution.

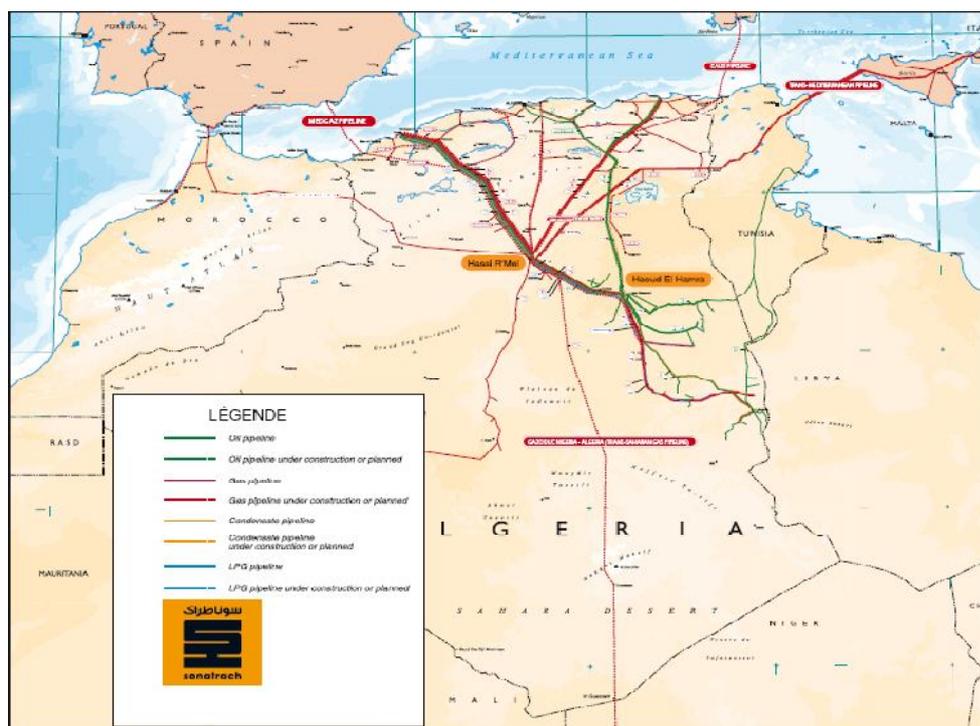


Figure 3.2 Réseau de transport par canalisations [19]

1. Présentation de la société NAFTAL:

1.1 Historique et statut :

En 1981, l'entreprise nationale de raffinage et de distribution de produits pétroliers (ERDP), issue de SONATRACH, a été créée par le décret N° 80/101. Cette entreprise était chargée, comme son nom l'indique, du raffinage et de la distribution des produits pétroliers. Le 5 Février 1983, L'état remplace la dénomination ERDP par « NAFTAL ». Quatre ans plus tard, L'état décide, par le biais du décret N°87-189 de 1987, de séparer l'activité du raffinage, attribuée à NAFTEC, à celle de la distribution des produits pétroliers. Cette dernière qui est devenue l'activité principale de NAFTAL.

En 1998, NAFTAL change de statut et devient une société par actions SPA, filiale 100% SONATRACH, avec un capital de 6,650 milliards DA. Le 29/07/2002, NAFTAL a connue une augmentation du capital à 15,650 milliards de DA [19].

Située à la Route des dunes Chéragea BP 73 Alger, NAFTAL possède aujourd'hui une solide expérience ainsi qu'une expertise reconnue dans le domaine de la distribution des produits pétroliers. Elle occupe une position stratégique au sein de l'économie nationale.

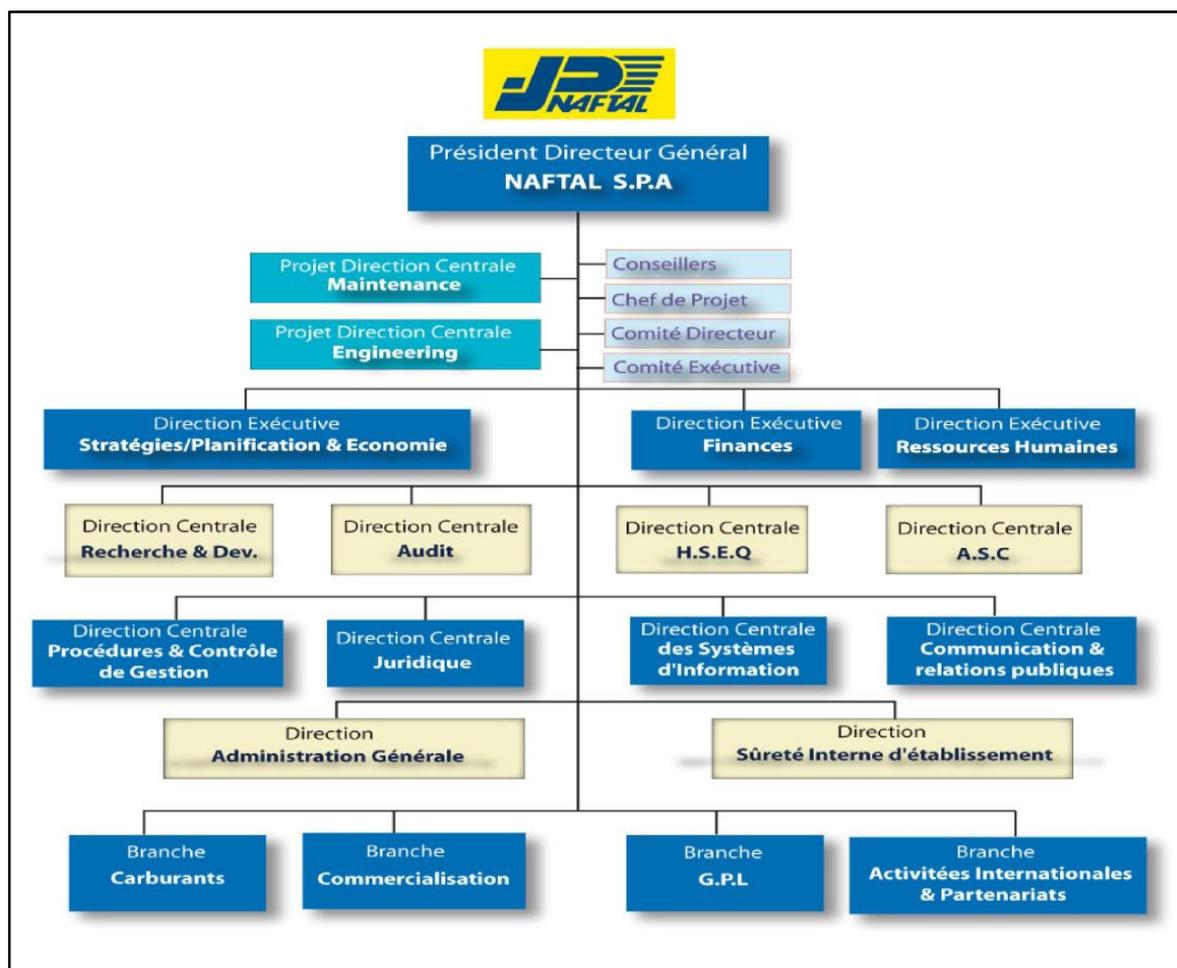


Figure 3.3 Organigramme de la société NAFTAL [19].

1.2 Les missions de NAFTAL :

NAFTAL a pour mission principale, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national.

Elle intervient dans les domaines :

- de l'enfûtage des GPL.
- de la formulation de bitumes.

- de la distribution, stockage et commercialisation des carburants, GPL, lubrifiants, bitumes pneumatiques, GPL/carburant, produits spéciaux.
- du transport des produits pétroliers.

NAFTA spa, filiale à 100% de Sonatrach est organisé en quatre (04) Branches.

Elle a pour mission principale, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national [19].

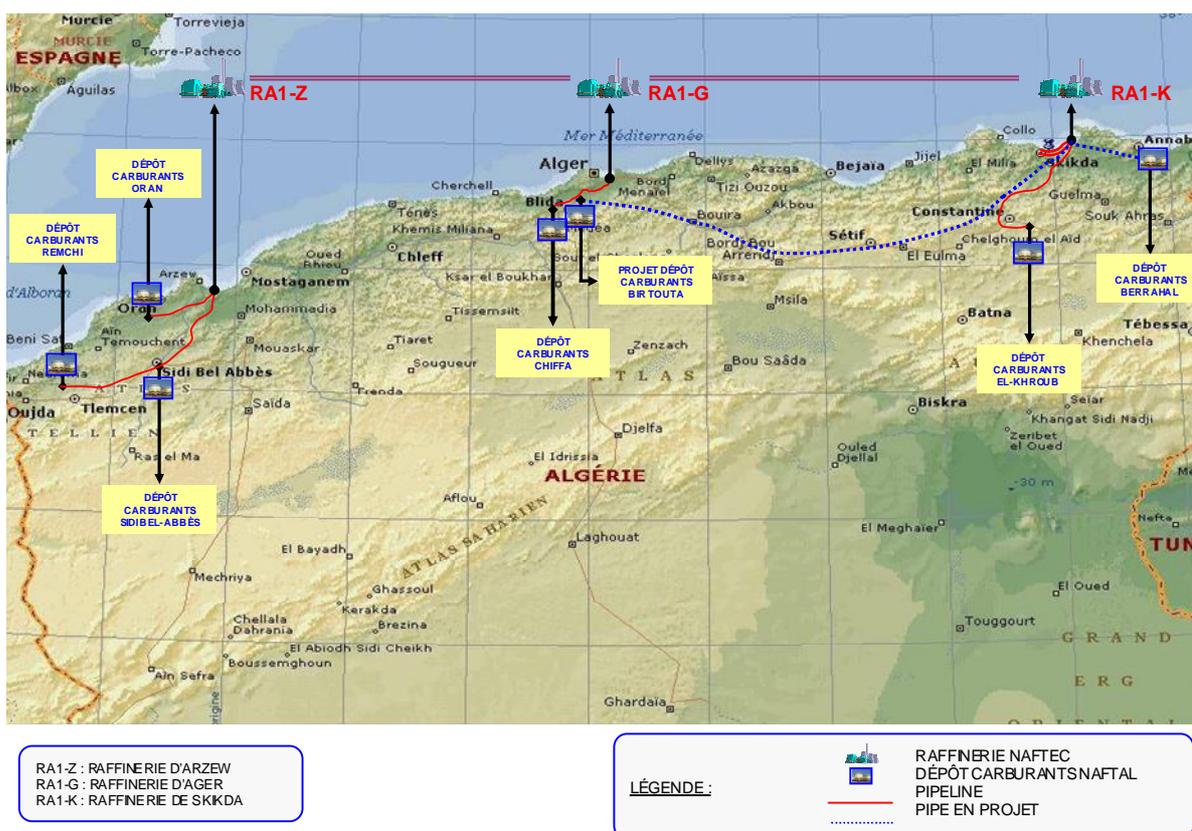


Figure 3.4 : Réseau de pipelines d’hydrocarbures en Algérie et localisation des dépôts en carburants [9].

2. Présentation de la canalisation multiproduit ASR :

2.1 Pipeline multiproduit ASR :

Le pipeline multiproduit (MP) ASR (Arzew Sidi Bel Abbès – Remchi) se situe à l’ouest de l’Algérie. Son profil s’étend de la raffinerie d’Arzew passant par Sidi Bel Abbès et Sidi Abdelli arrivant à la station finale de Remchi (Figures 3.5 & 3.6). Cette dernière réceptionne les produits pétroliers liquides (Carburants) en provenance de la raffinerie d’Arzew et ravitaille les centres de stockage de Sidi Bel Abbès et Remchi.

Après la production des différents carburants par la raffinerie d'Arzew, un stock est réservé pour le compte de NAFTAL afin d'assurer son transport successif par le biais de la canalisation multiproduit ASR vers les centres de stockage et de distribution de Sidi Bel Abbès et Remchi. Deux stations sont conçues pour le pompage des carburants vers le Terminal Arrivée de Remchi (TA Remchi) passant par le poste de coupure de Sidi Abdelli, dont la première est située à Arzew (Terminal Départ Arzew « TDA »), dotée de deux pompes multicellulaires à neuf étages, montées en parallèle fonctionnant en stand-by. Au niveau de Sidi Bel Abbès (Poste de Coupure et de Reprise « PCR SBA »), se trouve la station intermédiaire, dotée ainsi de deux pompes multicellulaires à six étages, montées en parallèle fonctionnant par intermittence [10].

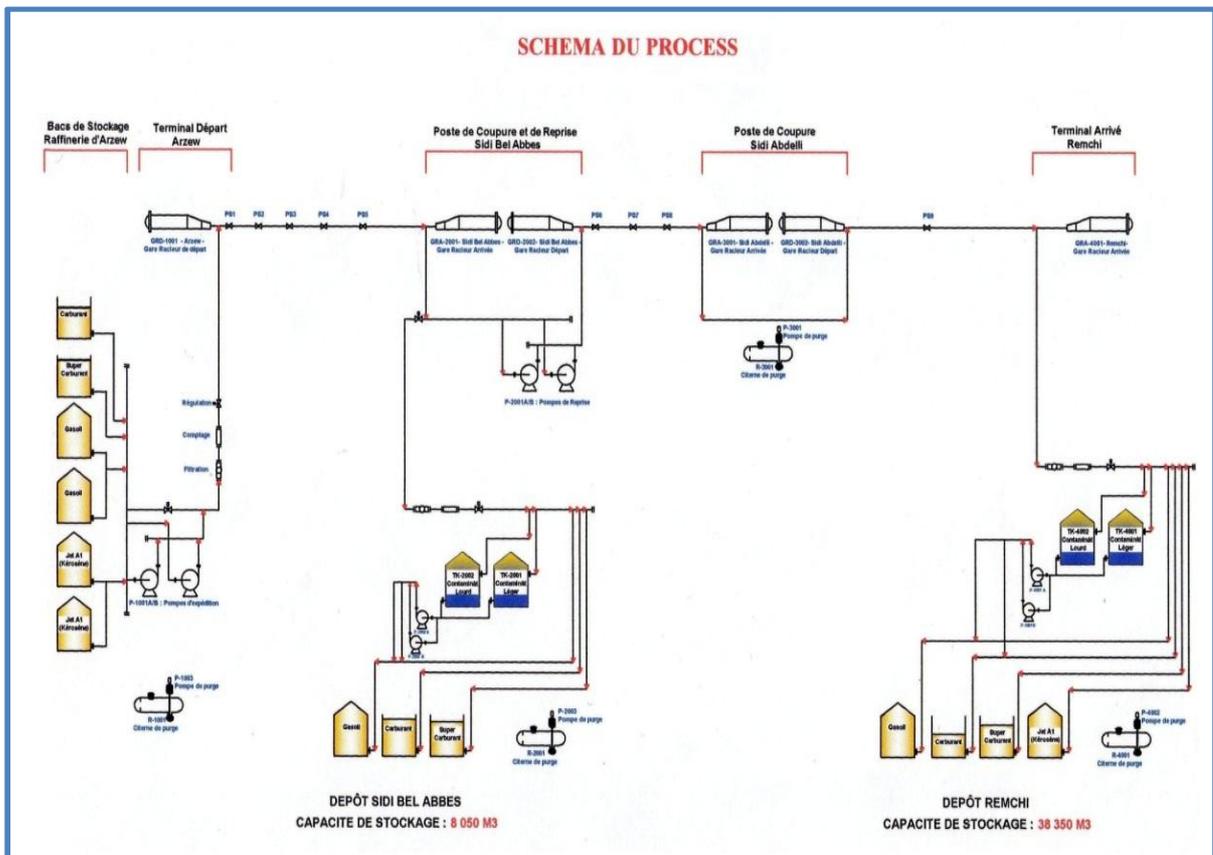


Figure 3.5 Schéma de procédé [10].

Le pipeline multiproduit ASR est constitué de trois tronçons de différents diamètres et longueurs (Figure 3.6).

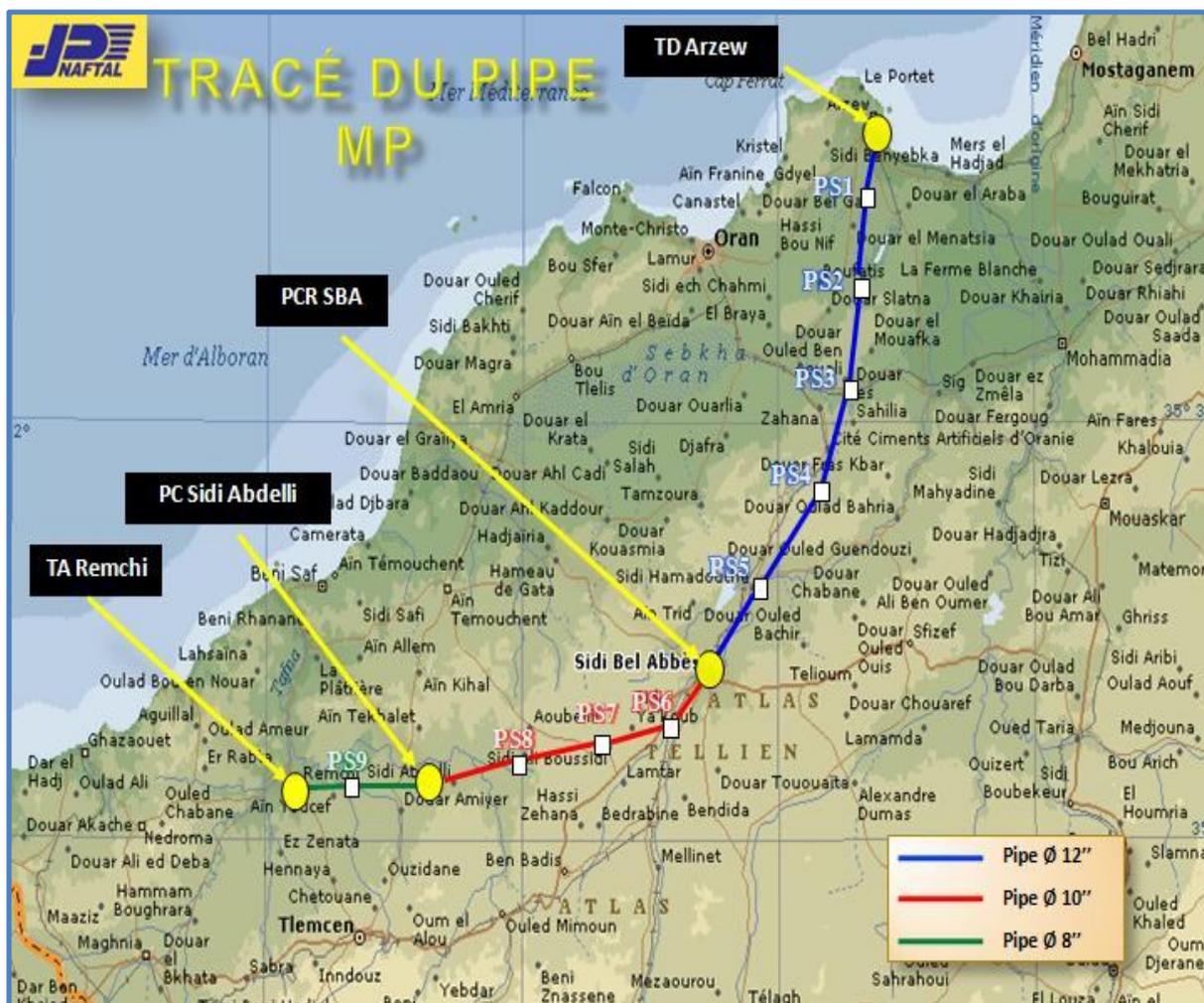


Figure 3.6 : Tracé du pipeline MP/ ASR sur la carte géographique [10]

Le tableau ci-après récapitule les caractéristiques géométriques de la canalisation MP.

Tableau 3.1 Caractéristiques géométriques du pipeline ASR

Tronçon du pipe	Nuance	Diamètre	Epaisseur [mm]	Longueur [ml]	Surface à protéger [m ²]
TD Arzew – PCR SBA	X52	12" (0.3048 m)	9.05	84 880	81236.27
PCR SBA – PC SA		10" (0.254 m)	6.40	56 305	44906.62
PC SA – TA Remchi		8" (0.2032 m)	7.40	26 895	17160.30
Longueur totale de la canalisation : $L_{ASR} = 168\ 135\ ml$					
Surface totale du pipeline à protéger : $(S_{P_{ASR}} = \pi \cdot (D_1 \cdot L_1 + D_2 \cdot L_2 + D_3 \cdot L_3) = 143303.19\ m^2$					

2.2 Pipeline GPL AST :

Pour les raisons de calcul dans le chapitre suivant, nous introduisons ci-après les caractéristiques géométriques du pipeline AST (Arzew – Sidi Bel Abbès – Tlemcen) destiné pour le transport des Gaz Pétroliers liquéfiés (Propane et Butane) à partir du complexe GP1Z de la Sonatrach Arzew vers les centres enfûteurs de Sidi Bel Abbès et Tlemcen. Le pipeline AST, à son tour est réparti sur deux tronçons de diamètres et de longueurs différents (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Caractéristiques géométriques du pipeline GPL/ AST

Tronçon du pipe	Nuance	Diamètre	Epaisseur [mm]	Longueur [ml]	Surface à protéger [m ²]
GP1Z Arzew – Sidi Bel Abbès	X52	10" (0.254 m)	8.74	6 872	67154.55
			7.80	77 328	
Sidi Bel Abbès - Tlemcen		8" (0.2032 m)	7.01	81 200	51809.5
Longueur totale de la canalisation : $L_{AST} = 165\,400\text{ ml}$					
Surface totale du pipeline à protéger : $(S_{P_{AST}} = \pi \cdot (D_1 \cdot L_1 + D_2 \cdot L_2) = 118964.05\text{ m}^2$					

2.3 Aciers de ligne SAR /MP (Norme API- 5L) :

Les tubes de la ligne sont en acier API 5L de nuance X52 conformément à la norme API (American Petroleum Institute) en matière de caractéristique mécanique et chimiques.

2.3.1 Caractéristique mécanique :

Les aciers pour oléoducs sont aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et, vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage d'autre part. Ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des oléoducs.

Tableau 3.3 : Spécification de quelques aciers API et leurs caractéristiques mécaniques [11]

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité (Kg/mm ²)	Résistance à la rupture (Kg/mm ²)
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56

2.3.2 Caractéristique chimique :

La composition chimique des aciers est présentée dans le tableau 5. Les aciers au carbone sont appelés «micro alliés » en rapport avec son contenu en éléments d'alliage : niobium (0,03-0,08 % en masse), vanadium (max. 0,05 %) et titane (< 0,11 %). Selon une définition, la somme de contenu (Nb+V+Ti) ne doit pas dépasser 0,22 % en masse [11]

Tableau 3.4 Composition chimique des aciers étudiés (% en masse) [11].

Acier	C (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Nb	V	Ti
X52	0,22	1,40	0,025	0,015	$\Sigma = 0,15$		
(StX52.0)	(0,22)	(1,60)	(0,040)	(0,035)			
X60	0,26	1,40	0,025	0,015	$\Sigma = 0,15$		

3. Protection de la Canalisation MP ASR :

3.1 Caractéristiques du tube :

Le tube est étiré sans soudure, de longueur nominale de 12 mètres (Figure 3.3), dont :

- Longueur minimale : 12 mètres
- Longueur maximale : 07 mètres (moyenne = 11 mètres)
- Longueur maximale : 12.30 mètres

Le tube est d'une extrémité lisse avec chanfreins.



Figure 3.7 Tubes du pipeline MP/ ASR alignés pour soudure(10)

3.2 Protection passive :

Elle est constituée par le revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant. La structure métallique des pipelines ASR et AST est assurée par un revêtement tri couche par extrusion, dont les matériaux de base :

- Couche 01 – Résine époxy dure.
- Couche 02 – Copolymère d'adhésion entre les couches 1 et 3.
- Couche 03 – Revêtement polyéthylène.

Le revêtement présente les caractéristiques suivantes :

- Adhérence : Vitesse d'arrachement <10mm/min
- Pénétration :
 - 0.3 mm à 20°C
 - 10 mm à 70°C

3.3 Protection active :

Le revêtement ne constitue cependant pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. C'est pourquoi on maîtrise ces risques potentiels par installation d'une protection cathodique.

La protection cathodique des pipelines ASR et AST en contact avec l'électrolyte consiste à les placer 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 -850mV, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée.

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

La méthode utilisée pour rendre l'ouvrage de pipelines ASR et AST cathodique par rapport à une anode extérieure est celle de soutirage du courant ou dispositif à courant imposé.

4. Description de l'équipement PC de la ligne ASR/MP :

4.1 Transformateur – Redresseur :

Le dispositif de protection cathodique il propose six (06) postes de soutirage il et de même type sont répartis sur le long de la canalisation.

Les postes transformateurs redresseurs sont de type 60 volts ,30 ampères en sortie continue, alimenté en courant alternatif 230 volts monophasé 50 Hz.

Les postes sont à fixation murale. Les dimensions des coffrets sont : 800 x 600 x 300mm.

En complément de chaque poste transformateur - redresseur, 1 lot de pièces de rechange pour 2 ans est composé de [19] :

- 10 fusibles secondaires
- 2 parasurtenseurs secondaires
- 1 ampèremètre
- 1 voltmètre
- 1 voyant jaune signalant l'état de défaut



Figure 3.8 Transformateur – Redresseur (10)

4.2 Masse anodique ou (un déversoir):

- Les anodes utilisées sont de type fer-silicium-chrome

✓ Dimensions des anodes :

- Longueur : 60''
- Diamètre : 2''
- Poids net approximatif : 22,7 kg
- Simple tête avec 3 mètres de câble cuivre 1x16 mm² XLPE/PVC rigide.



Figure 3.9 Les anodes de type (fer-silicium-chrome) (12).

4.3 Backfill de coke :

Le backfill de coke (gypse, bentonite et sulfate de soude) est utilisé comme régulateur de corrosion pour tous types d'anodes, installées dans tous types de sol.

Il est obtenu à partir du coke de pétrole calciné.



Figure 3.10 :Backfill de coke (12).

4.4 Différents types de coffret :

4.4.1 Coffret de jonction anodique (ca) :

Le coffret de jonction anodique 6D est utilisé pour raccorder les câbles de liaison des anodes au positif du transformateur redresseur. Ce coffret permet de réaliser des mesures de courants.

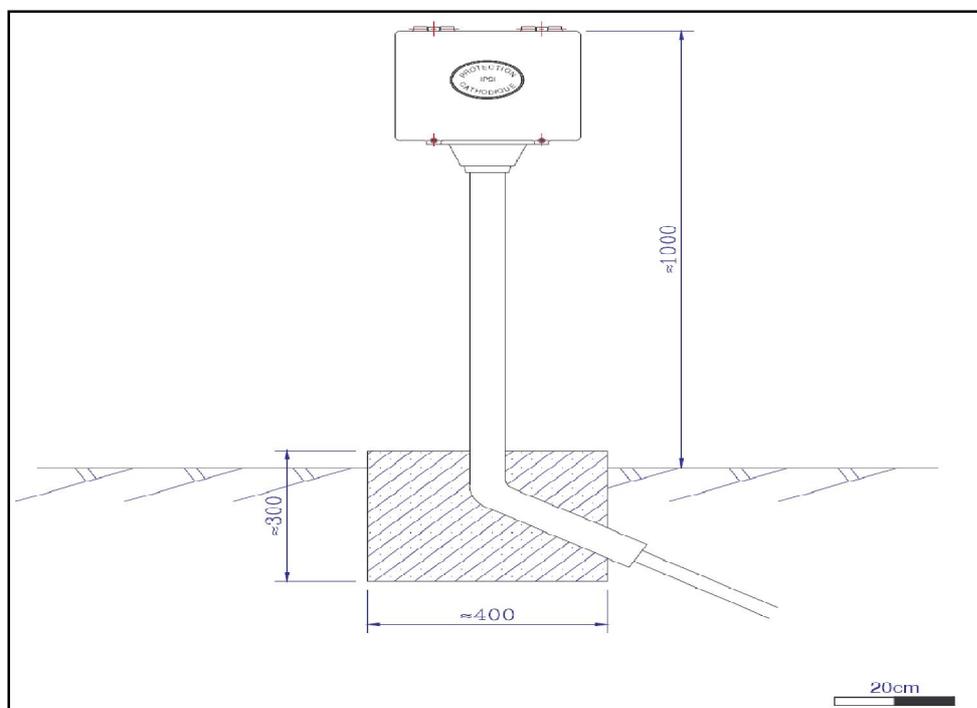


Figure 3.11 : coffret de jonction anodique (12)

4.4.2 Coffret de liaison (cl) :

Est qu'un simple coffret de continuité électrique avec les structures sous protection cathodique, le coffret de liaison équipotentielle noté CL est utilisé pour raccorder deux (02) canalisations parallèles. La jonction des deux canalisations est séparée par une résistance variable installée dans le coffret. Le raccordement d'une électrode permanente de type Cu/CuSO₄ enterrée au droit du coffret à proximité des canalisations permet de réaliser des mesures de potentiel [12].

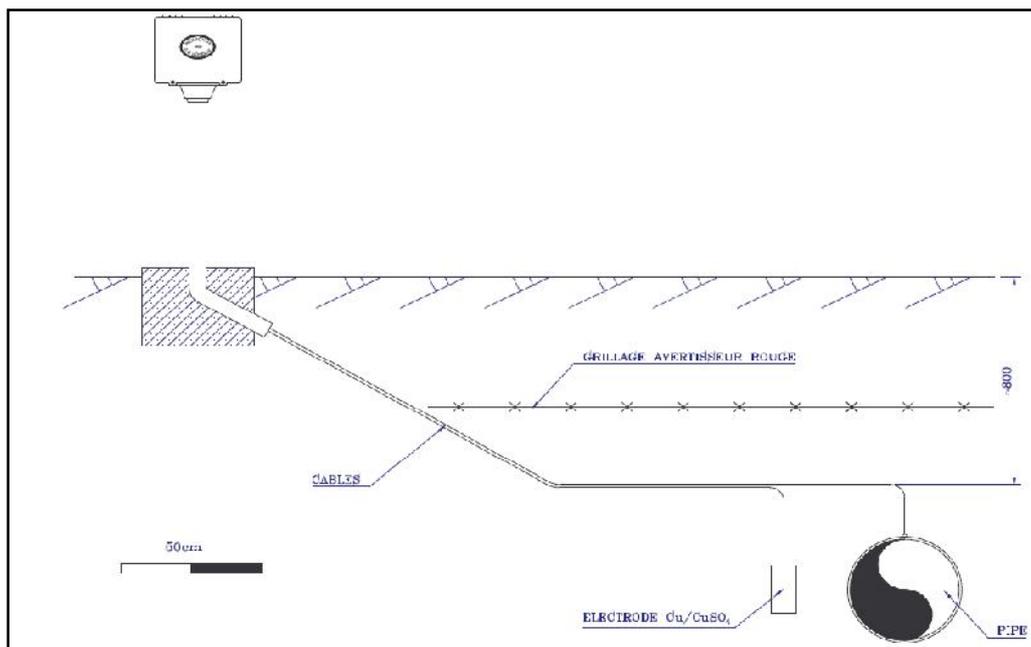


Figure 3.12 : coffret de liaison (12).

4.4.3 Coffret joint isolant (CJ) :

Est qu'un simple coffret de continuité électrique avec les structures sous protection cathodique, «le coffret de joint isolant » noté CJ est utilisé à proximité de isolant de canalisation pour raccorder l'amont puis l'aval du joint isolant.

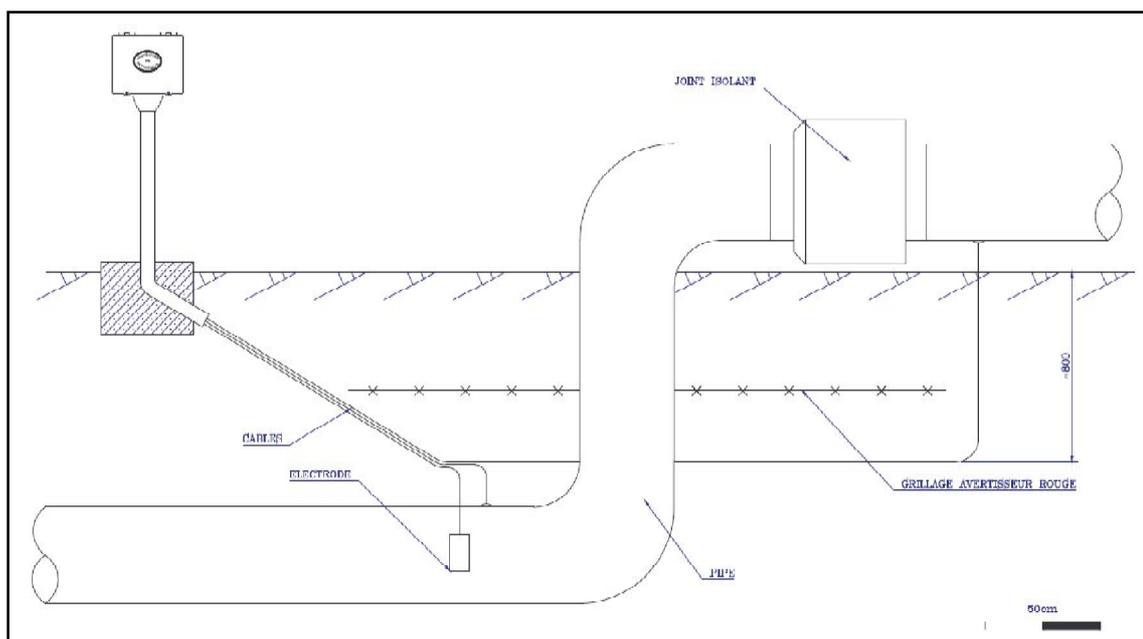


Figure 3.13 installation du coffret joint isolant (CJ) (12).

4.5 Prise de mesure ampérométrique (PMA) :

Plus qu'un simple coffret de continuité électrique avec les structures sous protection cathodique, la prise de mesure ampérométrique est utilisée pour déterminer le courant circulant au travers la section d'une canalisation. Le courant est calculé de façon indirecte à partir de la loi d'Ohm, en mesurant la chute de tension sur un tronçon de canalisation de résistance connue considéré comme shunt.

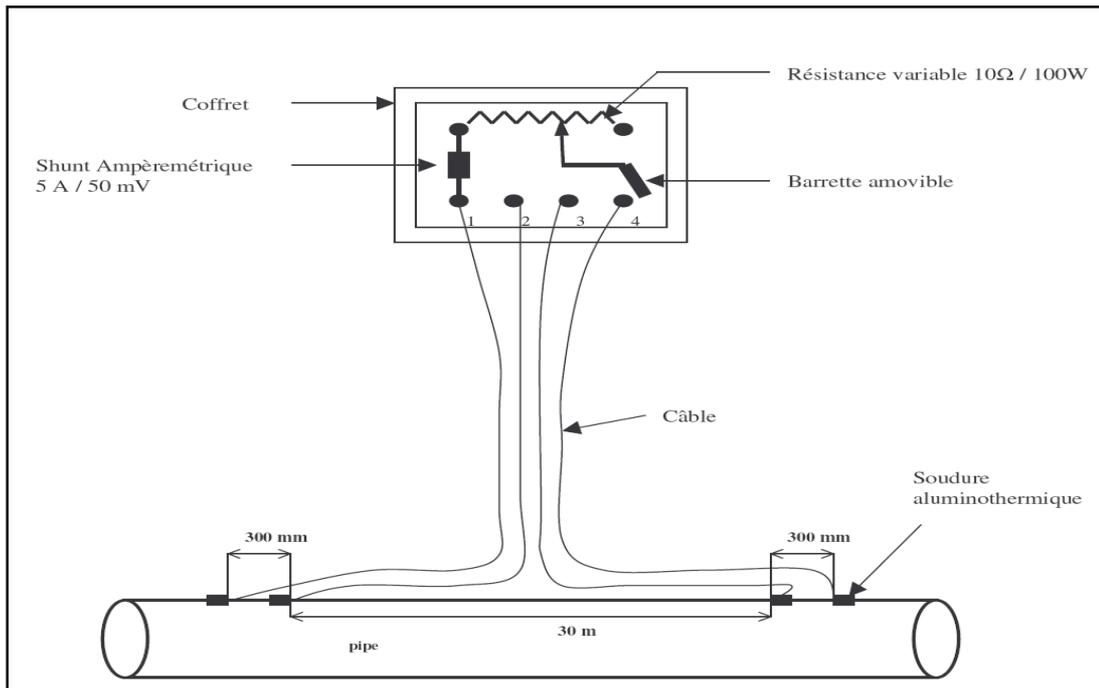


Figure 3.14 Installation de la prise de mesure ampérométrique (12).

4.6 Différents types de prises de potentiel (PPS, PPCT, PPTG) :

4.6.1 Prise de potentiel simple (PPS) :

PPS permet d'établir en différents points du tracé, des points de continuité électrique sur chaque canalisation.

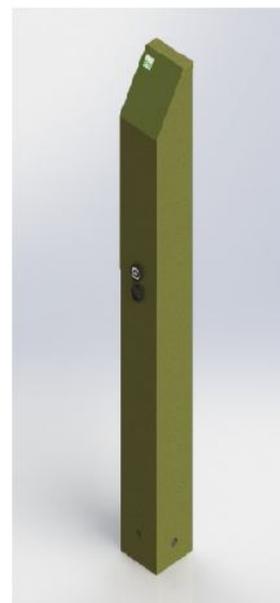
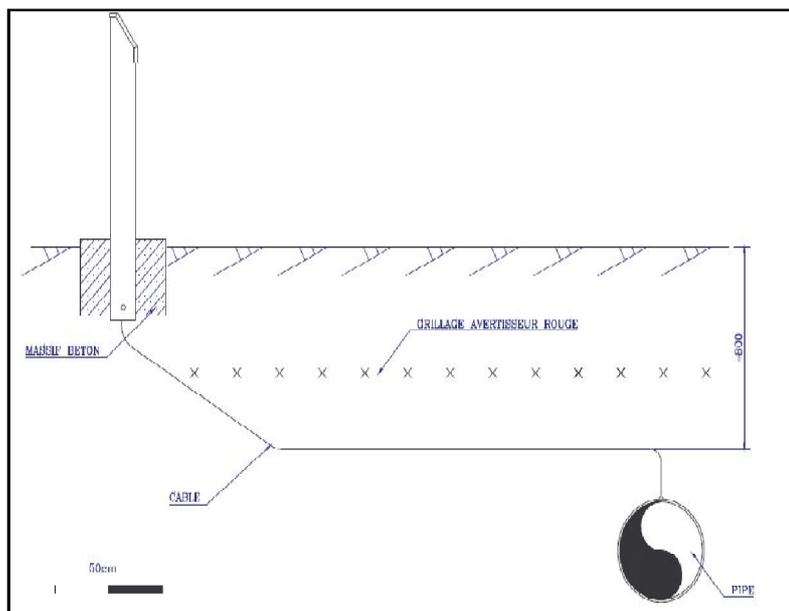


Figure 3.15 : Prises de potentiel (12).

4.6.2 Prise de potentiel croisement de tiers (PPCT) :

PPCT permet d'établir au droit de croisements entre canalisation (MP ou GPL) et ouvrages tiers (canalisation, câble armé) des points de continuité électrique sur la canalisation et l'ouvrage tiers.

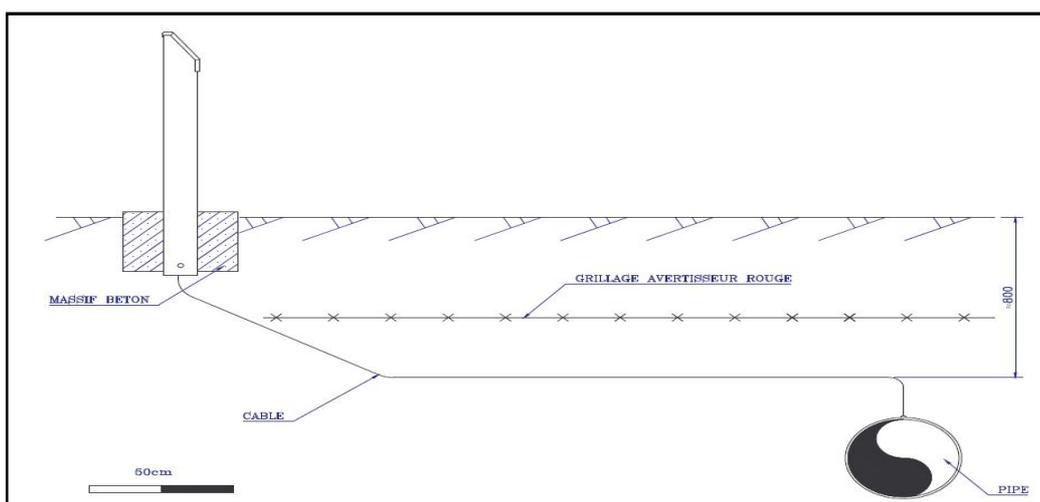


Figure 3.16 : Prise de potentiel croisement de tiers

4.6.3 Prise de potentiel (tube / gaine) (PPTG) :

PPTG permet d'établir en amont ou aval de passages sous gaine de canalisation (MP ou GPL) pour traversée de voie ferrées et routes, des points de continuité électrique sur la canalisation et la gaine.

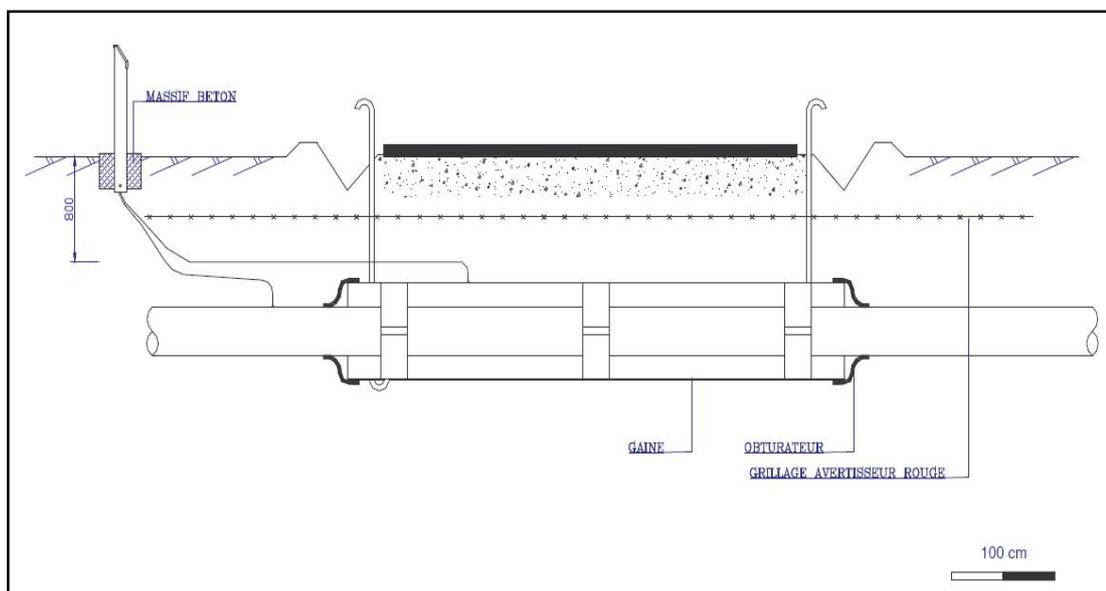


Figure 3.17 Prise de potentiel (tube / gaine) traversée de route

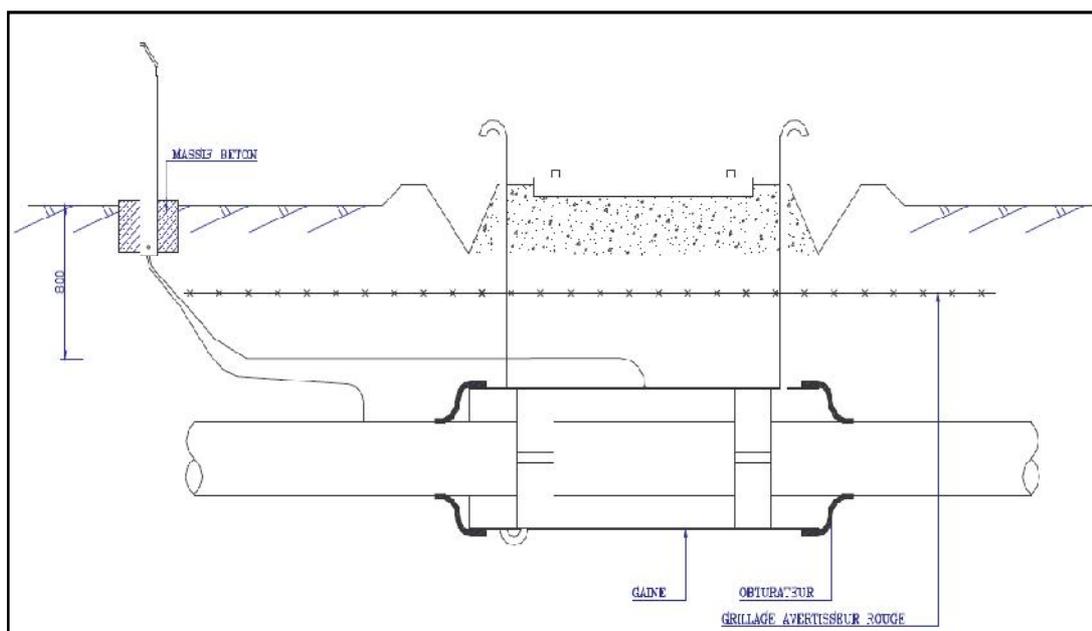


Figure 3.18 Prise de potentiel (tube / gaine) traversée voie ferrée

5.Évaluation de l'efficacité de systèmes de protection cathodique :

L'évaluation de l'efficacité d'un système de protection cathodique installé le long d'une conduite, tel qu'un pipeline, se fait généralement selon l'essai suivant :

- Relevés de potentiel à espaces rapprochés avec les redresseurs en cycle d'interruption (allumés-éteints).
- Relevés de potentiel à espaces rapprochés avec les redresseurs de courant éteints (dépolariation).
- Étude de l'influence des redresseurs de courants.
- Relevés de potentiel aux prises de potentiel.

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

La mesure du potentiel des canalisations dans le sol est indispensable pour contrôler l'efficacité de la protection cathodique. Or, celles-ci étant assimilables à des éprouvettes plongées dans un électrolyte, on mesure le potentiel par l'intermédiaire d'électrodes de référence. La conduite dans le sol constitue une demi-pile que l'on associe à l'autre demi-pile, l'électrode [13].

5.1 Méthode de relevés de potentiel à espaces rapprochées :

Le relevé de potentiel à espaces rapprochées 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 à espace rapproché 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 de graphique permettant d'évaluer le profil de la protection cathodique le long du pipeline et d'évaluer les points chauds nécessitant une protection supplémentaire [13].

- **Réalisation des mesures :**

Les mesures de potentiel à espace rapproché sont réalisées à l'aide d'un interrupteur de courant, d'un voltmètre (préférentiellement à mémoire), d'une électrode de référence et de câblage permettant de parcourir de longues distances.

Afin de réaliser le relevé de potentiel à espace rapproché, un contact électrique doit continuellement être maintenu avec le pipeline étudié. La figure suivante schématise le montage nécessaire à la réalisation d'un relevé de potentiel à espaces rapproché.

- Mesure simple du potentiel

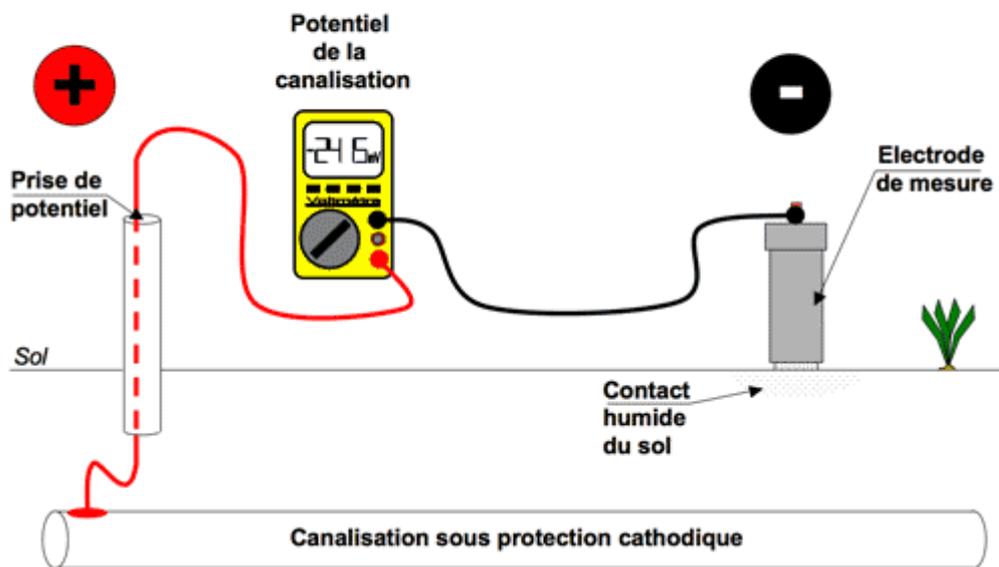


Figure 3.19 Montage nécessaire à un relevé à espace rapproché [17].

Il est important de noter que l'électrode de référence doit être en contact avec le sol. En effet, si un enrobé bitumineux est présent, ce dernier devra être percé puis mouillé avant la prise de toute lecture. De plus, dans le cas de la présence de béton, ce dernier devra être mouillé à fond au point de lecture afin d'éviter une erreur de mesure.

L'intervention consiste en fait à la réalisation de mesures de potentiel en mode d'interruption cyclique (« on »/ « off »), dont les étapes suivantes doivent être réalisées :

- **Préparation de l'intervention :**

Avant la réalisation de l'intervention, s'assurer d'avoir l'information suivante:

1. Identification et longueur des sections de pipeline à évaluer
2. Type de protection cathodique
3. Nombre de redresseur de courant
4. Nombre de point de vérification
5. Espacement des mesures (généralement aux 10 mètres)

- **Mise en place des équipements :**

Afin de réaliser le relevé de potentiel à espace rapproché, il est nécessaire d'interrompre le ou les redresseurs de courant. Pour ce faire, les étapes suivantes doivent être réalisées :

1. Identifier le redresseur de courant à interrompre
2. Prendre en note ses paramètres actuels d'opération (voltage et courant)
3. Éteindre le redresseur de courant
4. Vérifier que le courant n'excède pas celui des limites de l'interrupteur de courant. Ne jamais installer un interrupteur de courant ayant une limite en courant inférieure au courant du redresseur.
5. Installer l'interrupteur de courant en série avec la borne positive ou négative du redresseur de courant
6. Ajuster l'interrupteur de courant au mode cyclique désiré ON/OFF (usuellement, le mode considéré est de 8 secondes ON et 2 secondes OFF, ou 800 millisecondes ON et 200 millisecondes OFF)
7. Énergiser le redresseur de courant en le remettant en fonction
8. Démarrer l'interrupteur de courant ajusté au mode d'interruption désirée et passer à l'étape de mesure de potentiels

Dans la mesure où plusieurs redresseurs de courant sont présents, la mise en place d'interrupteur de courant selon les étapes précédentes est nécessaire à chacun d'eux. De plus, les interruptions devront être synchronisées afin de s'assurer d'avoir le même cycle d'interruption partout. Pour ce faire, des interrupteurs de courant possédant un mode d'interruption GPS devront être utilisés.

- **Mesures de potentiels :**

Suite à la mise en fonction des interrupteurs de courant, les mesures de potentiel peuvent être réalisées selon les étapes suivantes :

1. Identifier la boîte de jonction ou le point de vérification le plus près de la position de mesure à réaliser.
2. Connecter une électrode de référence de cuivre/sulfate de cuivre à la borne négative du voltmètre
3. Connecter la borne positive (généralement rouge) du voltmètre au contact négatif de la structure à vérifier. (Le câble du contact négatif est normalement disponible à l'intérieur des points de vérification ou de la boîte de jonction.)
4. Mettre en place l'électrode de référence sur le sol au premier point de mesure le plus près possible de la position de la mesure. (Il est préférable, dans la mesure du possible, que les positions des lectures soient proches de la conduite et de conserver une uniformité dans la qualité de l'interface séparant l'électrode de référence de la surface du sol ainsi que dans la distance séparant les positions de chacun des points de lectures relativement à la position de la conduite.)
5. Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre et s'assurer de sa stabilité
6. Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur. S'assurer d'enregistrer les deux valeurs de potentiel, ON et Instant OFF.
7. Poursuivre les mesures de potentiels sur les autres points de lecture selon le pas de mesure préalablement défini (généralement aux dix mètres)
8. Au croisement d'un nouveau point de vérification, le contact négatif peut être repris à partir de ce point, afin d'éviter de trop longues distances de câbles.

- **Retrait de l'équipement :**

Suite à la réalisation de la campagne de mesure des relevés de potentiel à espace rapproché en mode cyclique, les interrupteurs de courant doivent être retirés des redresseurs de courant selon les étapes suivantes :

1. Éteindre l'interrupteur de courant
2. Éteindre le redresseur de courant

3. Retirer l'interrupteur de courant branché en série avec le redresseur de courant
4. Énergiser le redresseur de courant en le remettant en fonction
5. S'assurer de la fonctionnalité du redresseur de courant selon les paramètres d'opération initiaux.

Ces étapes doivent être réalisées à chacun des redresseurs de courant ayant fait l'objet de la mise en place d'un interrupteur de courant pour la campagne de mesures de potentiels à espace rapproché en mode cyclique [13].

- **Post-intervention :**

Les données récupérées doivent être transférées dans un fichier électronique. Ce dernier devra se présenter sous forme de tableau contenant quatre colonnes. La première présentera l'identification des points de mesures (souvent sous forme d'un chaînage en m ou en Km). À chacun de ces points de mesures devra correspondre une mesure de potentiel ON (seconde colonne) et une valeur de potentiel « instant OFF » (troisième colonne). Finalement une dernière colonne servira à introduire des commentaires relatifs à certains points particuliers.

L'analyse des mesures ainsi relevées permettra d'évaluer l'efficacité du système de protection cathodique selon les deux premiers critères de protection cathodique présentés plus tôt.

5.2 Méthode de relevé par dépolarisation :

La méthode de relevés par dépolarisation permet d'obtenir le potentiel dit « statique » de la conduite, c'est-à-dire sans l'influence du système de protection cathodique.

De même que lors des relevés de potentiel en cycle d'interruption, les mesures de potentiel sont effectuées à intervalle régulier, (souvent de l'ordre d'une mesure à tous les 10 mètres), le long du pipeline. La position des mesures réalisées en mode de dépolarisation doit correspondre exactement aux positions de mesures en mode cyclique afin de permettre un comparable appréciable.

L'intervention consiste donc à la réalisation de mesures de potentiel à espace rapproché en mode de dépolarisation, dont les étapes suivantes doivent être réalisées :

- Préparation de l'intervention
- Préparation de la dépolarisation
- Mesures de potentiels
- Remise en fonction des redresseurs de courant

- Post-Intervention [13]

5.3 Méthode d'évaluation de l'influence des redresseurs de courant :

Cette méthode d'évaluation permet d'identifier le rayonnement de chacun des redresseurs de courant d'un système de protection cathodique. Cette information est capitale car, dans le cas d'un relevé de potentiel à espace rapproché en cycle d'interruption, les redresseurs à interrompre sont ciblés.

L'intervention consiste en fait à la réalisation de mesures de potentiel en mode d'interruption cyclique (« on »/ «off ») uniquement au redresseur évaluer afin d'identifier quelle est son impact en terme de distance le long du pipeline. Pour ce, les étapes suivantes doivent être réalisées

- Préparation de l'intervention
- Préparation de la dépolarisation
- Mesures de potentiels
- Remise en fonction des redresseurs de courant
- Post-Intervention [13]

5.4 Méthode de relevés aux prises de potentiel :

La méthode de relevés aux points de vérification permet de définir d'une manière globale l'état du système et le niveau de protection cathodique. Pour ce, les mesures aux points de vérification permettent l'obtention des informations suivantes :

- Potentiels « ON » et « OFF »
- Potentiel des blindages (s'il y a lieu)

Les mesures ainsi relevées peuvent être comparées aux mesures ayant été effectuées les années antérieures. De cette manière, il est possible de vérifier l'évolution du potentiel à travers les années, donnant la tendance évolutive du système.

De plus, ces visites permettent de définir l'état des points de vérifications et, le cas échéant, d'apporter les modifications qui s'imposent.

L'intervention consiste donc à la réalisation de mesures à chacun des points de vérification, dont les étapes suivantes doivent être réalisées [13]:

5.4.1 Préparation de l'intervention :

Avant la réalisation de l'intervention, s'assurer d'avoir l'information suivante:

- Identification et longueur des sections de pipeline à évaluer
- Type de protection cathodique
- Nombre de point de vérification
- Information sur les éléments particuliers connectés via les points de vérification
- Information sur l'historique des mesures réalisées aux points de vérification



Figure 3.20 Le point de mesure[17].

5.4.2 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. La résistance interne de ces appareils est de l'ordre de $R > 10 \text{ M}\Omega$.

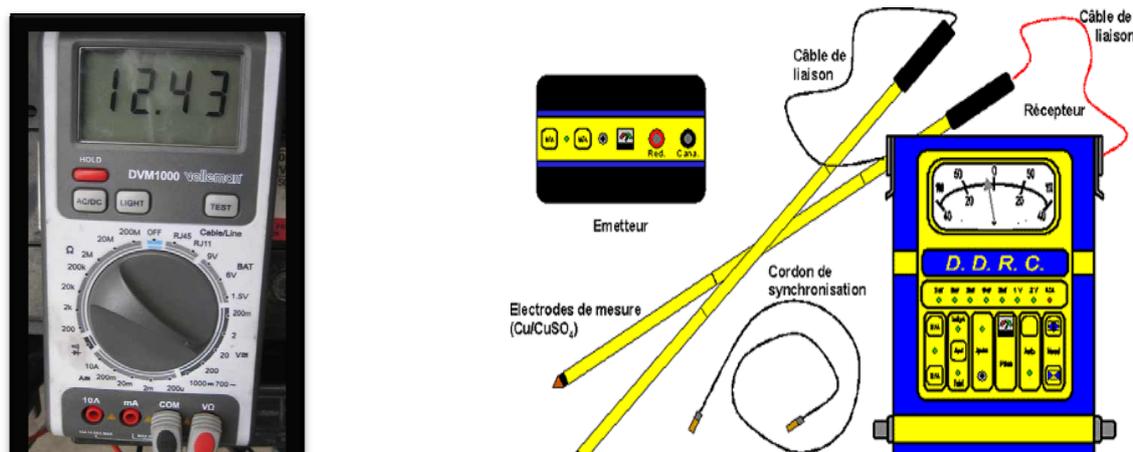


Figure 3.21 Voltmètre [17].

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.

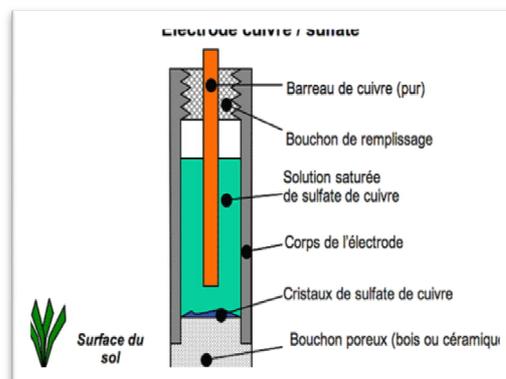


Figure 3.22 Différents types d'électrodes de référence [17].

5.4.3 Précautions préalables :

Avant la réalisation des essais, certaines précautions doivent être prises, à savoir :

- S'assurer du calibrage de l'électrode de référence.
- Mettre en place l'électrode de référence sur un sol humide en s'assurant de la protéger contre le soleil.
- Dans la mesure où il y a possibilité de gel, un antigel doit être mis en place à l'intérieur de l'électrode de référence.
- S'assurer que les connexions à l'intérieur des points de vérification soit propres et ajustées.
- S'assurer de la qualité du câblage utilisé [13].

5.4.4 Prise de mesures au point de vérification :

Les mesures aux points de vérification doivent être réalisées selon les étapes suivantes :

- Identifier le point de vérification à évaluer.
- Schématiser les câbles présents ainsi que les connexions qui s'y trouvent.
- Connecter une électrode de référence de cuivre/sulfate de cuivre à la borne négative du voltmètre.
- Connecter la borne positive (généralement rouge) du voltmètre à un câble du contact négatif de la structure à vérifier.
- Mettre en place l'électrode de référence sur le sol à proximité de la prise de potentiel et s'assurer d'un contact direct avec le sol et non avec d'autres matériaux tel que du béton, de la pierre ou de la végétation.
- Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre et s'assurer de sa stabilité.
- Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur.
- Dans le cas où un second câble négatif serait présent au point de vérification, connecter la borne positive du voltmètre à ce câble.
- Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, s'assurer de sa stabilité et qu'elle correspond bien à la première valeur relevé permettant de s'assurer d'un contact négatif adéquat.
- Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur.

- Dans le cas où un câble provenant d'un blindage serait présent au point de vérification, connecter la borne positive du voltmètre à ce câble.
- Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre et s'assurer de sa stabilité.
- Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur.
- Répéter ces mesures à chacun des points de vérification [13].

5.4.5 Post-intervention :

Les données récupérées doivent être transférées dans un fichier électronique. Donnant chacune des informations relevées pour chacun des points de vérification permettant une évaluation comparative des résultats avec les mesures antérieures [13].

Conclusion :

L'étude a porté sur la protection cathodique de la ligne ASR/MP en acier API 5L X-52 de transport multi fluide par canalisation de produits raffinés (essence, kérosène, gasoil). Cette ligne est exploitée par la société NAFTAL/ SONATRACH et relie la raffinerie d'Arzew (RAIZ1) au centre de distribution et de stockage (CDS) de Remchi en passant par sidi Bel Abbas sur une longueur de 168 Kms.

La ligne est constituée de tubes en acier de diamètre diminuant de la raffinerie au centre CSD respectivement 12 ", 10 " et 8 ". Ils sont protégés extérieurement par un revêtement bitumineux dont l'action est complétée par une protection cathodique active par anode sacrificiel à base de silicium – fer - chrome et par courant imposé dont le potentiel imposé est – 850 mV/ Cu/CuSO₄.

La ligne renferme des points de mesure de potentiel par rapport au sol. Le nombre de points de mesure dépend de la configuration de l'ouvrage.

Pour l'évaluation de l'efficacité du système de protection cathodique installé le long de la conduite, tel que le pipeline, se fait généralement selon les essais suivants les mesure le potentiel et les relevés des potentiels à espaces rapprochés.

La mesure du potentiel des canalisations dans le sol est effectuée pour contrôler l'efficacité de la protection cathodique. Or, celles-ci étant assimilables à des éprouvettes plongées dans un électrolyte, on mesure le potentiel par l'intermédiaire d'électrodes de référence.

Des mesures ont été effectuées sur la ligne pendant notre stage pratique et les résultats seront portés dans le chapitre 5. Le chapitre suivant sera consacré à une étude sur le dimensionnement de la protection cathodique de la ligne ASR et de la ligne AST.

Introduction :

Nous considérons dans ce chapitre une étude sur le dimensionnement du système de la protection cathodique comprenant les calculs et le dispositif du système (nombre de postes de soutirage, le courant à débiter par postes, calcul du nombre d'anodes). Il est à noter que la protection cathodique est commune à deux lignes de transport par canalisation : ligne ASR pour les produits multi fluide et la ligne AST pour le gaz GPL.

1. Dimensionnement de la protection cathodique :**1.1 Critère de la protection cathodique :**

Il est considéré qu'une canalisation en acier est parfaitement protégée cathodiquement lorsque son potentiel par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄ en tous points est en dessous du seuil de -850mV (Domaine d'immunité de l'acier).

1.2 Calcul de dimensionnement du système de protection cathodique :**1.2.1 Protection cathodique par courant imposé :**

Ce mode de protection est appelé, plus communément, protection par soutirage. Le principe de cette protection, consiste à relier au pôle négatif d'une source à courant continu, l'ouvrage à protéger, tandis que le pôle positif est relié à une pièce conductrice (en métal ou en graphite) enterrée à une certaine distance.

Le courant partant de cette pièce appelée déversoir, traverse le sol, est capté par la canalisation et retourne au générateur par circulation dans le métal de la conduite. La canalisation est alors rendue négative par rapport au sol. Si le critère de potentiel est atteint en tous points, la conduite est protégée cathodiquement.

1.2.2 Délimitation de l'ouvrage à protéger cathodiquement :

La protection cathodique est étudiée pour assurer la protection d'un ouvrage précis, et ne peut prendre en compte des structures annexes qui pour des raisons mécaniques, se trouveraient reliées électriquement à l'ouvrage. Là encore, ce rôle de délimitation "électrique" du réseau sera réalisé par le raccord ou joint isolant.

1.2.3 Calcul du nombre de postes de soutirage :

Le poste de soutirage est un générateur de courant continu. Habituellement il est constitué par un transformateur-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension 220V.

Les postes transformateurs redresseurs sont de type 60 volts – 30 ampères en sortie continue, alimenté en courant alternatif 230 volts monophasé 50 Hz.

Les postes sont à fixation murale. Les dimensions des coffrets sont : 800 x 600 x 300 mm.

Concernant le nombre de postes N_p à installer, nous utilisons l'équation suivante :

$$N_p = \frac{L}{L_p} \quad (3.1)$$

L : Longueur de la surface du pipe à protéger, (m)

L_p : La portée du poste de protection, (m)

L'évaluer la portée des postes de protection L_p est faite à partir de la formule suivante [22]:

$$L_p = \frac{1}{a} \cdot \ln \left(\left(\frac{E_S}{E} \right) + \sqrt{\left(\left(\frac{E_S}{E} \right)^2 - 1 \right)} \right) \quad (3.2)$$

a : Coefficient d'atténuation de la structure, (m^{-1})

E_S : Potentiel d'injection au point de soutirage

E : Potentiel du métal sans soutirage (Le potentiel spontané de la conduite sans protection cathodique).

$$a = \sqrt{\frac{r}{R}} \quad (3.3)$$

r : Résistance longitudinale de la conduite, (Ω/m)

$$r = \frac{\delta_a}{\pi \cdot e \cdot (D_{ext} - e)} \quad (3.4)$$

R : Résistance transversale de la conduite, ($\Omega \cdot m$).

$$R = \frac{R_{is}}{\pi \cdot D_{ext}} \quad (3.5)$$

$\delta_a = 21 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$: Résistivité de l'acier

D_{ext} : Le diamètre extérieur du pipeline

e : L'épaisseur du pipeline

$R_{is} = 18360 \Omega \cdot m^2$: Résistance d'isolement donnée par le revêtement

Pour le calcul des résistances r et R , on prendra le grand diamètre et l'épaisseur appropriée des deux pipelines qui est le Ø12". On aura :

$$r = 0,25 \cdot 10^{-4} \Omega/m$$

$$\text{et } R = 1,92 \cdot 10^{-4} \Omega m.$$

Et puis, en substituant les valeurs de r et R dans l'équation (3.3), on obtient :

$$a = 0,36 \cdot 10^{-4} m^{-1}$$

Le potentiel du métal dans le sol est la somme du potentiel de corrosion du métal sans soutirage et du gain apporté par la mise en service du soutirage. Ainsi, sans protection cathodique le potentiel spontané de la conduite est de $-380mV$.

Comme indique la figure (4.1), avec la protection cathodique et un gain $E(x)$ de $-1420mV$, le potentiel de la conduite dans le sol sera de $-1800mV$ au point d'abscisse x .

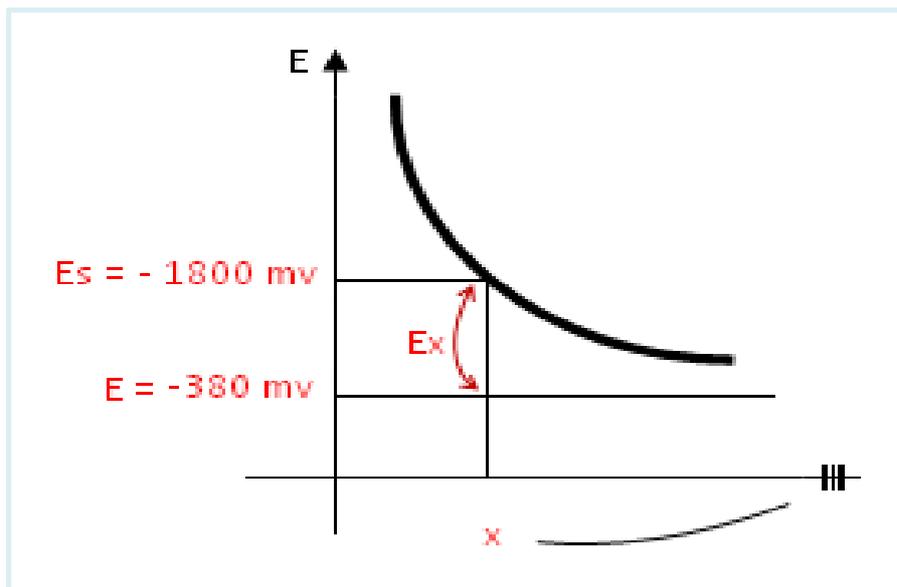


Figure 4.1 : Présentation des potentiels, E_S , E_x et E

Plus la valeur d'isolement est importante, plus le facteur d'atténuation est faible, et plus la portée du soutirage est grande. Inversement avec un facteur d'atténuation important, la portée du soutirage est réduite.

A partir de l'équation (3.2), la portée des postes de protection L_p aura :

$$L_p = 62,16 \text{ km}$$

Selon l'équation (3.1), le nombre de postes de soutirage sera :

$$N_p = \frac{(L_{ASR} + L_{AST})}{L_p} = \frac{168.135 + 165.400}{62.16}$$

$$N_p = 5.37 \approx 6 \text{ postes}$$

1.2.4 Courant de la protection :

L'intensité du courant de protection I_s émis dans le sol par le déversoir, se répartit dans le sol et retourne à la conduite. Le passage du courant détermine dans la conduite un abaissement de potentiel. Par hypothèse, la protection cathodique est dimensionnée pour une densité de courant de 0.5 mA/m^2 . [15].

Le calcul requis pour protéger la surface externe globale de la canalisation est déterminé comme suit :

$$I_{tot} = d \times S_p = I \times (S_{p_{ASR}} + S_{p_{AST}}) \quad (3.6)$$

d : Densité de courant maximale (A/m^2)

S_p : Surface à protéger, (m^2)

$$I_{tot} = 0,0005 \times 262267.24$$

$$I_{tot} = 131.13 \text{ Ampères.}$$

Ce courant total I_{tot} requis sur la canalisation est distribué sur les six (06) postes de soutirage. Chaque poste transformateur redresseur devra être en mesure de débiter $I_{tot}/6$, soit un courant de $I = 21.86 \text{ Ampères}$ par poste de soutirage.

1.2.5 Calcul du nombre d'anodes (Lit d'anodes) :

Le déversoir (lit d'anodique) est destiné à diffuser dans le sol le courant de protection provenant du pôle positif d'un poste transformateur-redresseur. Cette diffusion de courant s'effectue à partir des anodes qui seront installées horizontalement en fond de tranchée et raccordées à un câble de liaison. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminée pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 30 ans.

Les lits d'anode (Figure 4.2) sont généralement constitués de :

- Anodes.
- Un câble de liaison des anodes.

- Trousses de dérivation.
- Mélange régulateur : backfill.

Les anodes seront enfouies dans du backfil de coke de faible résistivité.

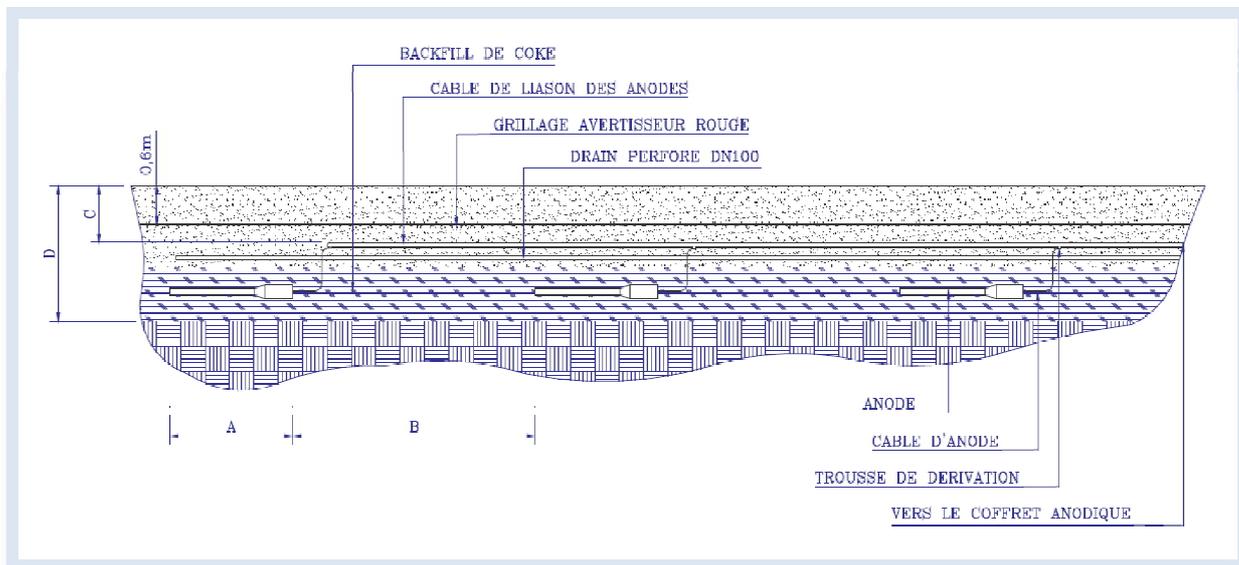


Figure 4.2 : Lit d'anodes horizontales avec mélange Régulateur [12]

L'implantation du lit anodique sera réalisée de préférence dans une zone de basse résistivité. Les anodes utilisées seront en alliage Ferro-Silicium additionné de Chrome (Anode Fe/Si/Cr).

Tableau 4.1 : Caractéristiques dimensionnelles de l'anode

Type d'anode	Corps d'anode		
	Ø (mm)	L (mm)	Poids Net (kg)
2" x 60"	50.8	1524	22.7

Le nombre d'anodes est obtenu à partir de la formule suivante :

$$N = \frac{M_a}{m_a} \quad (3.7)$$

Avec :

N : Nombre d'anodes.

M_a : Masse totale en *kg*.

m_a : Masse unitaire d'anode en *kg*.

Pour répondre à un besoin en courant de 21.86 Ampères , la masse anodique sera de :

$$M_a = C_a \cdot T \cdot I \quad (3.8)$$

Avec :

C_a : Consommation de l'anode en $kg/A \cdot an$ ($0.5 \text{ kg}/A \cdot an$ pour des anodes en $Fe/Si/Cr$)

T : Durée de vie en année (30 ans).

I : Courant en ampère.

$$M_a = 0,5 \cdot 30 \cdot 21,86 = 327.9 \text{ kg}$$

Donc à partir de la formule (3.7), le nombre d'anodes sera de :

$$N = 14.44 \quad , \text{ Soit : } 15 \text{ anodes par déversoir.}$$

1.2.6 Puissance du poste redresseur :

La puissance de redresseur est calculée à partir de la formule suivante :

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot R \cdot I^2 = \frac{1}{\eta} \cdot (R_T + R_A + R_C) \cdot I^2 \quad (\text{Watt}) \quad (3.9)$$

R_T : Résistance de la conduite, (Ω/m)

R_A : Résistance du déversoir, (Ω/m)

R_C : Résistance du câble, (Ω/m)

- **Résistance du tube, R_T**

Négligeable

- **Résistance du déversoir, R_A**

La résistance théorique du lit d'anodes permet de fournir le courant requis de 21.86 ampères sous une tension inférieure à la tension maximale de redresseur de 60 volts .

La résistance de contact au sol du lit anodique est donnée par la formule de Dwight [15] :

$$R_A = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D_a} - 1 \right) \quad (3.10)$$

R_A : Résistance du contact au sol en Ω ;

ρ : Résistivité du sol en $\Omega.m$;

L : Longueur de l'anode (A vérifier ou du lit anodique) en m ;

D_a : Diamètre de l'anode en m .

Le sol a une influence particulière sur l'acier (Risque de corrosion), la résistivité dépend de l'agressivité du sol, les facteurs qui influent sur la nature du sol sont :

- Nature (Composition) chimique
- Taux d'humidité
- PH du sol
- Granulométrie
- Aération

La mesure de résistivité du sol c'est la résultante totale de tous ces facteurs.

La méthode utilisée pour les mesures des résistivités pour le sol où les canalisations ASR et AST sont enfouies, est celle des quatre piquets appelés méthode de WENNER (Figure 1.9 du chapitre 01). Les valeurs mesurées pour le tronçon de Ø8" sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.2 Relevé de mesures de la résistivité du sol ASR

PK (Km)	ρ ($\Omega.m$)	PK (Km)	ρ ($\Omega.m$)	PK (Km)	ρ ($\Omega.m$)
0+000	17.58	9+000	247.43	17+900	4.89
0+300	7.53	9+300	108.01	18+200	7.66
0+600	61.54	9+600	92.94	18+500	4.52
0+900	10.92	9+900	14.69	18+800	24.11
1+200	10.04	10+200	96.71	19+100	60.28
1+500	10.04	10+500	91.68	19+400	14.19
1+800	13.81	10+700	139.41	19+700	6.53
2+100	15.32	11+000	119.32	20+000	48.98
2+400	23.86	11+300	203.47	20+300	15.07
2+700	28.88	11+600	158.25	20+600	18.84
3+000	48.98	11+900	222.31	20+900	54.00
3+300	106.76	12+200	193.42	21+200	33.91
3+600	203.47	12+500	182.12	21+500	76.61
3+900	67.82	12+800	45.21	21+800	92.94
4+200	65.31	13+100	99.22	22+100	95.45
4+500	70.33	13+400	97.84	22+400	99.22
4+800	9.04	13+700	6.28	22+700	87.92
5+100	21.35	14+000	13.81	23+000	18.84
5+400	15.07	14+300	38.93	23+300	125.6
5+700	62.80	14+600	62.8	23+600	76.61
6+000	7.53	14+900	129.24	23+900	48.98
6+300	8.66	15+200	56.52	24+200	50.24
6+600	17.58	15+500	21.60	24+500	56.52
6+900	228.59	15+800	10.80	24+800	121.83
7+200	44.08	16+100	3.14	25+100	22.60
7+500	36.54	16+400	9.04	25+400	17.58
7+800	30.14	16+700	7.91	25+700	13.81
8+100	23.86	17+000	19.46	26+000	130.62
8+400	13.43	17+300	12.56	26+500	180.06
8+700	51.49	17+600	10.04		

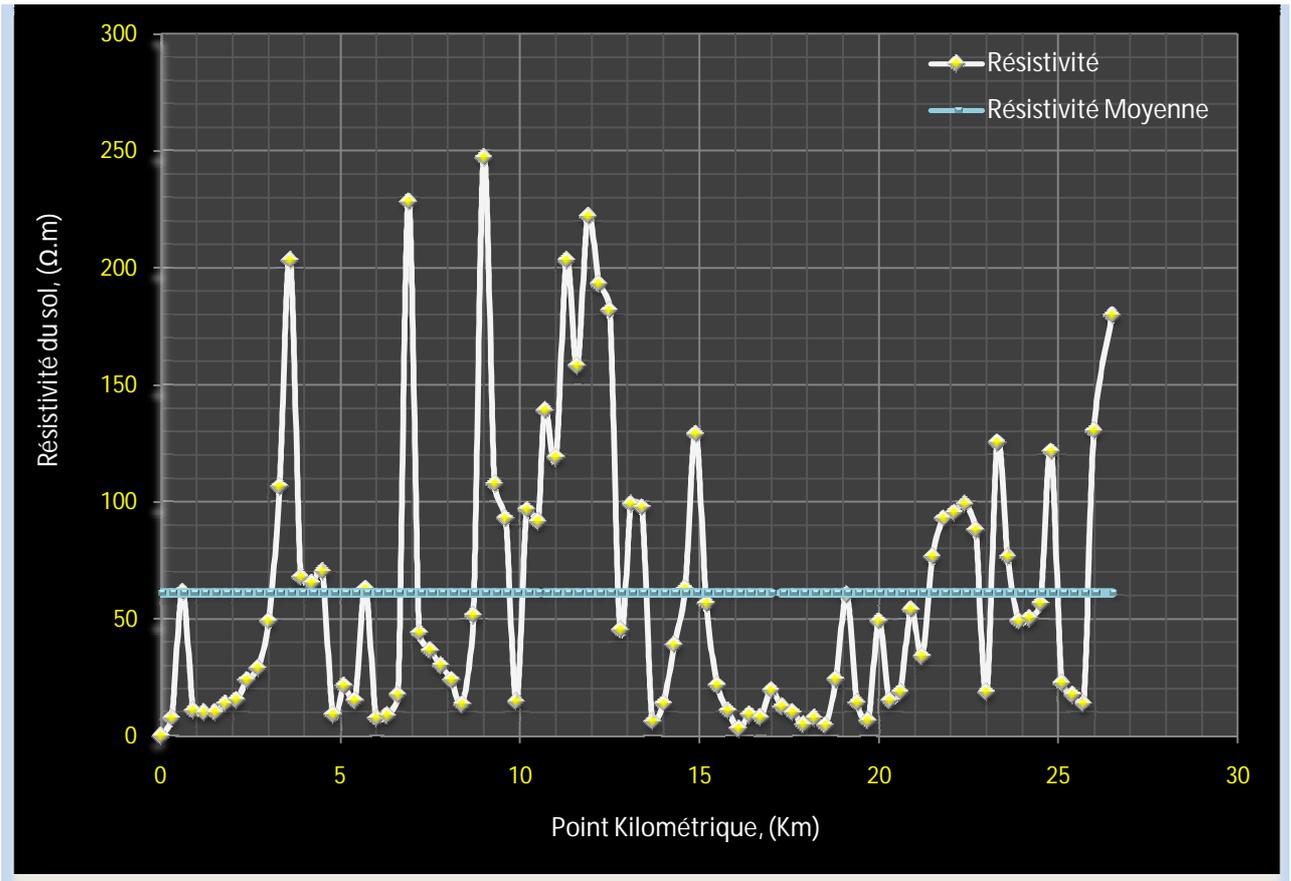


Figure 4.3 : Résistivité du sol ASR sur le tronçon Ø8"
 Résistivité moyenne : $61.09 \Omega.m$

La figure (4.3) présente les mesures réelles de la résistivité du sol sur le tronçon Ø8" des canalisations ASR et AST. Tenant compte la résistivité moyenne du sol qui est de $61.09 \Omega.m$ (Figure 4.3), ce dernier est considéré comme environnement de faible agressivité (voir tableau 1.2 du Chapitre 01).

Pour un calcul propice et un bon dimensionnement du système de protection cathodique, nous arrondirons cette résistivité à une valeur de $50 \Omega.m$ soit un environnement de moyenne agressivité.

$$R_A = \frac{50}{2\pi \times 80} \left(\ln \frac{4 \times 80}{0.0508} - 1 \right) = 0.711 \Omega$$

- **Résistance du câble :**

Le câble utilisé est de type U1000R02V, constitué de conducteur en cuivre. Comme illustre plus haut la figure (4.2), les différentes liaisons existantes sont résumées dans le tableau (4.3).

Tableau 4.3 Câbles de liaison

Type de prise	Section (mm ²)	Longueur (m)	Observation
Câble d'anodes	$S_{c1} = 1 \times 16$	$L_{c1} = 45m$	3m par anode
Câble de liaison des anodes	$S_{c2} = 1 \times 25$	$L_{c2} = 80m$	
Câble de liaison à la borne (+) du transformateur redresseur	$S_{c3} = 1 \times 50$	$L_{c3} = 200m$	

$$R_c = \rho_c \cdot \frac{L_c}{S_c} = \rho_c \cdot \left(\frac{L_{c1}}{S_{c1}} + \frac{L_{c2}}{S_{c2}} + \frac{L_{c3}}{S_{c3}} \right) \quad (3.11)$$

ρ_c : Résistivité du câble en $\Omega \cdot m$;

$$R_c = 1,72 \cdot 10^{-2} \left(\frac{45}{16} + \frac{80}{25} + \frac{200}{50} \right) = 0,172 \Omega$$

Donc : $R = 0,883 \Omega$, valeur qui conduit à une puissance de : $P = 398,06 \text{ Watt}$

1.2.7 Tension aux bornes de redresseur :

De même la résistance $R = 0,883 \Omega$ conduit à une chute de tension (Poste redresseur) de :

$$U = R \cdot I \text{ (Volt)} \quad (3.12)$$

$$U = 18,21 \text{ Volt}$$

Conclusion :

Les résultats obtenus d'après notre calcul sur le dimensionnement de la protection cathodique des canalisations (ASR, AST) sont concordant avec le système de protection cathodique que dispose les ouvrages ASR et AST.

Les postes de soutirage sont des générateurs de courant continu. Ils sont constitués par des transformateurs - redresseurs alimentés à partir du réseau électrique basse tension 220V. Les postes transformateurs redresseurs sont de type 60 volts – 30 ampères en sortie continue, alimentés en courant alternatif 230 volts monophasé 50 Hz. Les postes sont à fixation murale.

Le nombre de postes calculés est égal à 6, et le nombre d'anodes est égal à 15 anodes par déversoir.

Nous présenterons dans le chapitre suivant une discussion sur le système de la protection cathodique et la maintenance des équipements de la protection cathodique.

Introduction :

Le présent chapitre est consacré à l'interprétation des différents résultats, à savoir : ceux relatifs au dimensionnement du système de protection cathodique dédié aux pipelines ASR et AST, la classification du milieu environnant (Electrolytique) des canalisations selon les résistivités mesurées par la méthode de Wenner sur le tronçon Ø8" du pipeline ASR, et puis les potentiels relevés lors des campagnes de mesure des potentiels en position « ON » sur le mois de Décembre 2012 (Figure 5.2) et le mois d'Avril 2013 (Tableau 5.3).

Dans le but de maintien du bon fonctionnement du système de protection cathodique, un plan de surveillance et d'inspection est établi (tableau 5.2 et 5.3).

1. Potentiels de canalisation :

Les conditions d'immunité des matériaux de la ligne sont généralement le potentiel mesuré dont la valeur par rapport à l'électrode de référence est -850mV Cu/CuSO_4 pour l'acier. Les dispositifs couramment utilisés pour abaisser en dessous de ces valeurs limites le potentiel des structures comme les rhéostats sont utilisés dans la maintenance du système de protection.

Le contrôle de la protection cathodique porte essentiellement sur les points suivants :

- Le fonctionnement correct et permanent des dispositifs produisant ces potentiels ;
- La mesure du potentiel du métal de la structure ;
- La vérification du maintien de ce potentiel à des valeurs acceptables, sur toute la surface à protéger des canalisations.

Pour effectuer les mesures sur les canalisations ASR et AST, des prises de potentiel sont réalisés sur des intervalles de un à trois kilomètres, ainsi qu'à chaque point particulier (croisement d'autres structures, passages sous gaines,...) pouvant devenir un point critique.

On admet que, sauf cas exceptionnel, les mesures réalisées à chaque prise de potentiel reflètent le potentiel général de la structure entre les points de mesure.

Une fois polarisé, le potentiel du métal est stable et n'évolue pas s'il n'y a pas d'action de courants vagabonds, et si la structure est bien isolée ; les mesures instantanées des potentiels sont donc, dans ce cas, suffisantes.

Les conditions de corrosion peuvent évoluer suivant les modifications suivantes :

- Variation de la résistivité du sol
- Présence des voies ferrées électrifiées en courant continu.
- Pose dans le voisinage d'autres structures, protégées ou non.

Toutes ces causes font varier le potentiel structure-Sol et c'est le cas notamment des courants vagabonds qui provoquent des variations parfois très rapides et importantes ; dans ce cas, les mesures instantanées du potentiel ne sont plus représentatives de la bonne protection cathodique. Il est nécessaire de procéder alors à des enregistrements de ce potentiel, sur des durées d'au moins 24 heures.

2. Relevés de potentiels « ON » pour les canalisations ASR et AST:

Les mesures sont faites en dynamique. Il s'agit de mesures de potentiel, effectuées à chaque point de mesure.

Il est vraiment primordial de contrôler l'isolement qui s'applique essentiellement aux raccords (Joints) isolants, gaines, structures voisines, etc. il se pratique par comparaison de potentiel.

Dans cette campagne de mesure sont reportés les potentiels « en service » des canalisations ASR et AST de tracé parallèle et de longueurs respectives : 168.35 Km et 165.4 Km.

Les figures (5.2) et (5.3) représentent respectivement les courbes relatives aux relevés des potentiels tube (potentiel de pipe) et potentiels gaine (on mesure le potentiel gaine lorsque le pipe traversée une route ou une voie ferrée) voir figure (5.1) et relevés des mois de Décembre 2012 et d'Avril 2013.

➤ Caractéristique d'une chaîne de mesure:

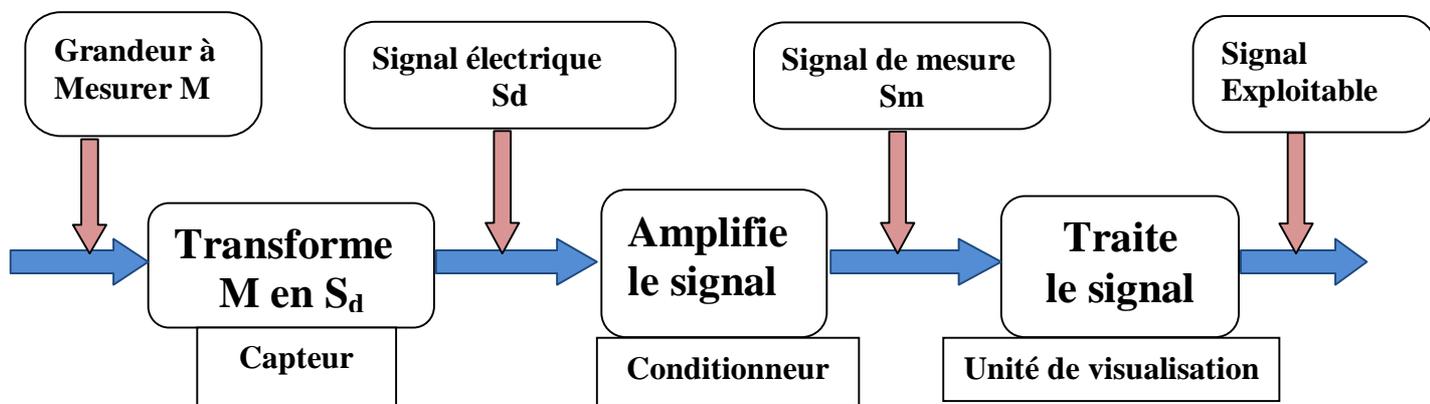


Figure5.1 : Principe de la chaîne de mesure d'un capteur

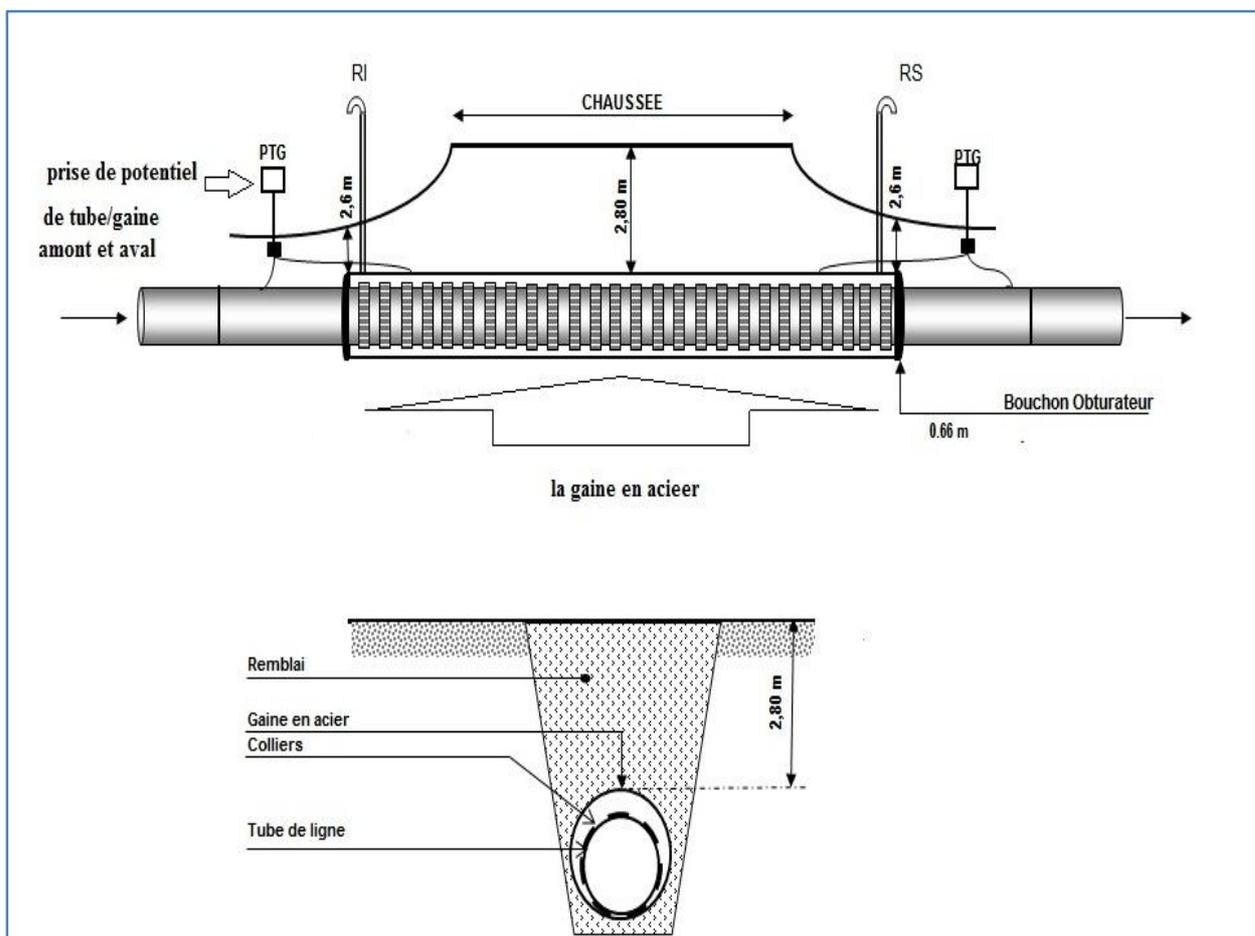


Figure 5.2 : le schéma de (tube / gaine) et le prise de potentiel (PPTG) amont et aval.

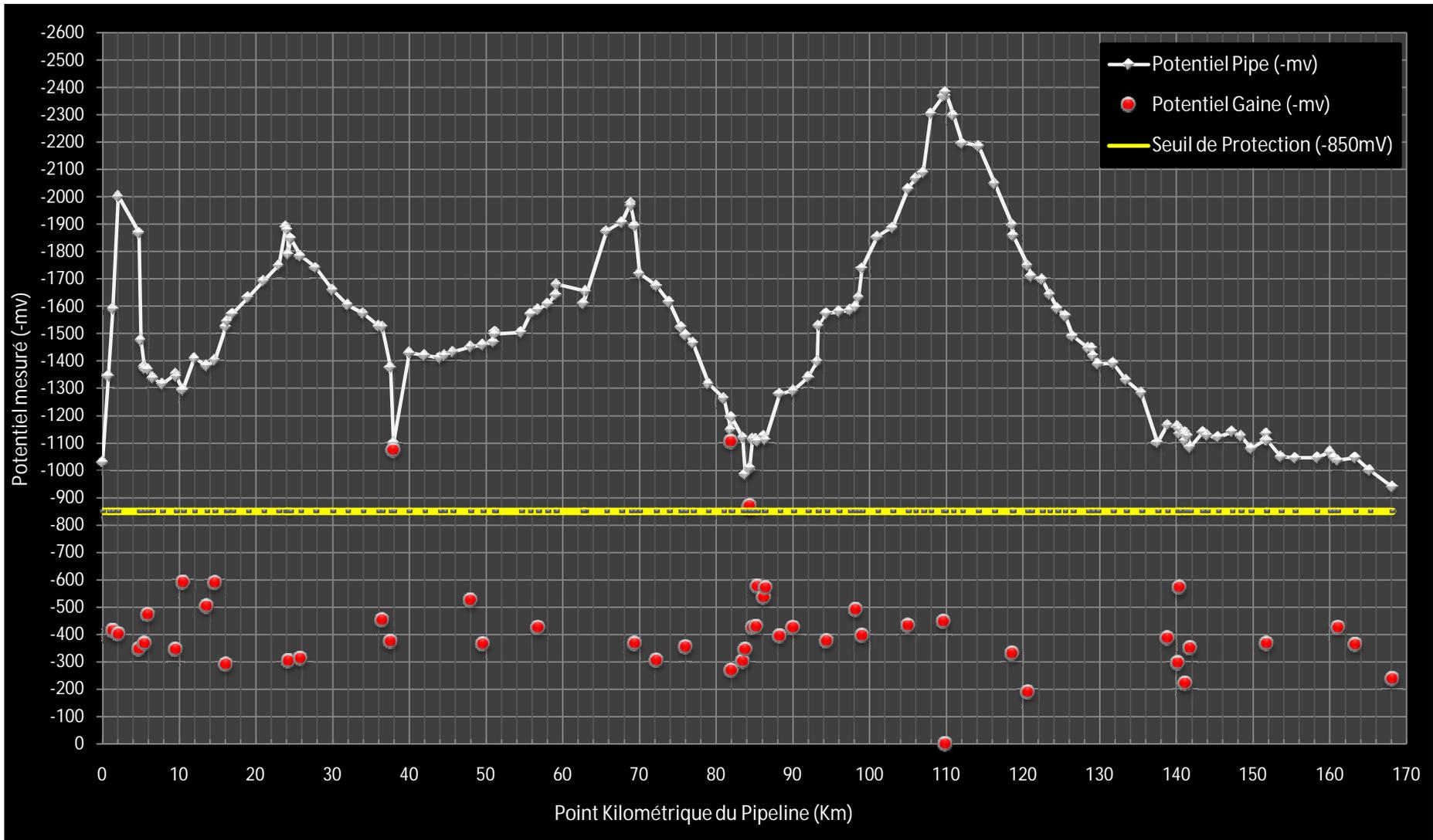


Figure 5.3 : Campagne de mesure de potentiel position ON (Mois de Décembre 2012)

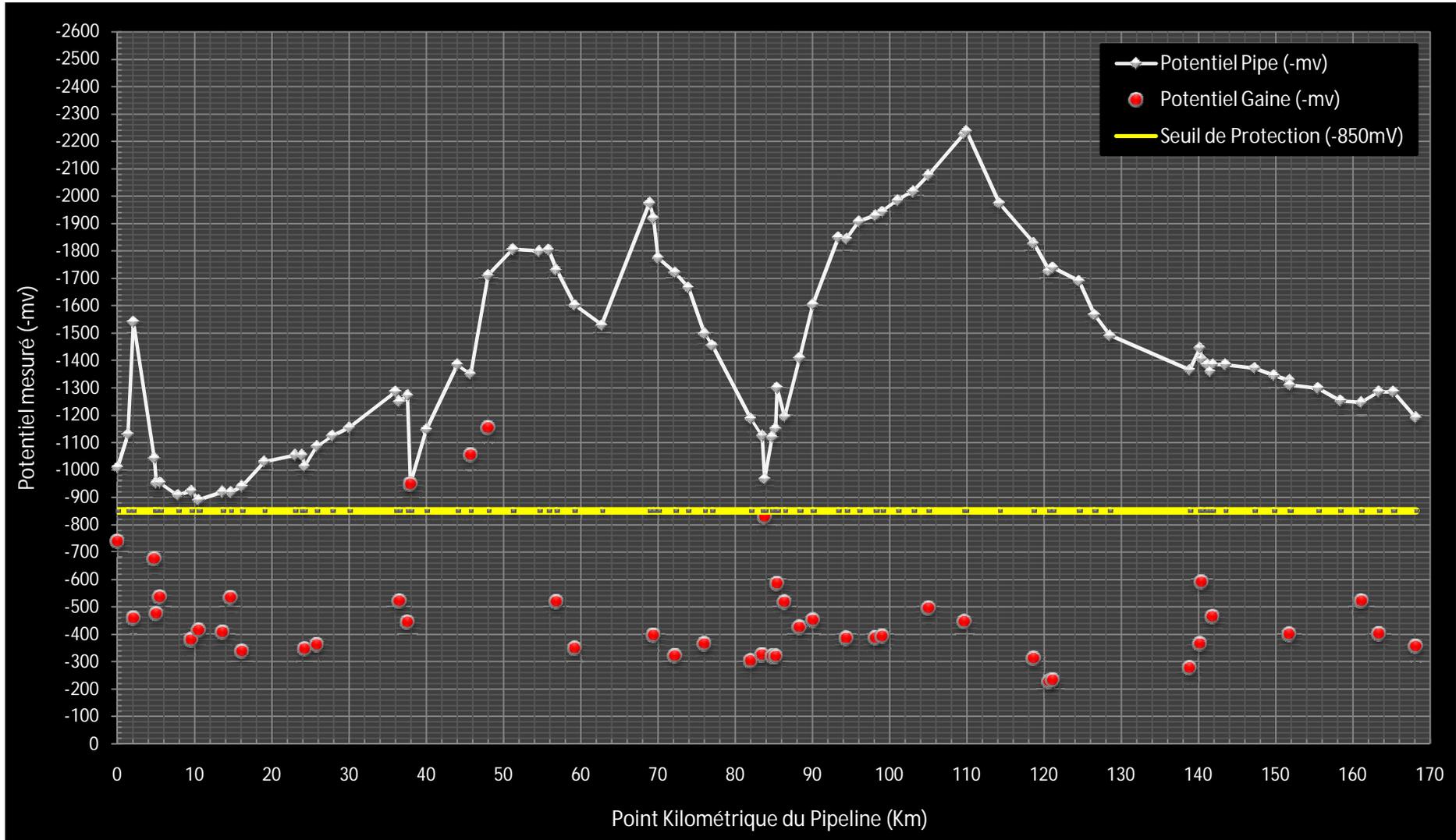


Figure 5.4 : Campagne de mesure de potentiel position ON (Mois d'Avril 2013)

3. Interprétation des résultats :

3.1 Campagne de mesure de potentiel position ON du mois de décembre 2012 :

Les potentiels « ON » relevés tout au long de la canalisation MP, montrent ce qui suit :

PK (point kilométrique)	Interprétation des résultats et les observations
2.040	Le potentiel relevé est élevé par rapport à ceux enregistrés en amont et en aval, et cela est dû aux interférences des canalisations voisines.
37.940	Ce point kilométrique correspond à un passage de route. Nous remarquons une chute vive du potentiel du pipe causée par un contact franc tube/ gaine, confirmée par la valeur du potentiel de la gaine qui est de -1075mV .
82.300 et 82.350	Ces points kilométriques correspondent ainsi à des passages de routes. Nous constatons un potentiel élevé des gaines de protection provoqué par un contact à résistance faible tube/ gaine.
86.400	Ce point coïncide avec un passage de route sur la route nationale. Il a été enregistré une chute légère du potentiel de la conduite, causée par un contact résistif tube/ gaine.

- **Remarque :**

A la fin de la campagne, le potentiel au niveau du poste soutirage N°5 a été réduit à **-1900mV**, et une vérification des points à bas potentiel a été effectuée par la suite. Le potentiel relevé au niveau du Terminal Arrivée Remchi auprès du joint isolant a donné une valeur de **-945mV**.

3.2 Campagne de mesure du potentiel position «ON» du mois d'avril 2013 :

Les potentiels en « ON » relevés tout au long de la canalisation MP, révèle ce qui suit :

PK (point kilométrique)	Interprétation des résultats et les observations
1.350 et 2.040	Ces points sont en mitoyenneté des canalisations tierces. Les valeurs des potentiels relevées sont élevées par rapport à celles enregistrées en amont et en aval, ces hausses valeurs sont dues aux courants vagabonds provenant de ces canalisations voisines.
4.780	Le potentiel relevé sur reniflard, par absence de prise de potentiel tube/ gaine (PPTG) montre un contact résistif tube/ gaine.
37.940	Ce point correspond à un passage de route. Nous remarquons une chute vive du potentiel du pipe causée par un contact franc tube/ gaine, confirmée par la valeur du potentiel de la gaine qui est de $-940mV$.
45.700	Ce point est relatif à une voie ferrée. Les valeurs de potentiel relevées sur les reniflards, par absence de prise de potentiel tube/ gaine (PPTG). Elles montrent l'existence de contact franc tube/gaine.
83.800	Ce point kilométrique correspond ainsi à une voie ferrée. Nous enregistrons une chute remarquable du potentiel du pipe, provoquée par un contact à résistance faible tube/ gaine et visible sur le potentiel de la gaine ($-830mV$).
86.400	Ce point est relatif à un passage de route. Nous relevons une chute légère du potentiel de la conduite, causée par un contact résistif tube/gaine.

4. Dimensionnement du système de 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 obtenu est de six (06) postes pour une surface totale de la structure à protéger, de 262267.69 m^2 .
- Le courant total I_{tot} requis sur la canalisation est distribué sur les six (06) postes de soutirage. Chaque poste transformateur redresseur devra être en mesure de débiter $I_{tot}/6$, soit un courant de $I = 21.86 \text{ Ampères}$ par poste de soutirage.
- Le nombre d'anodes est de 15 anodes par déversoir. La durée de vie de chaque anode est estimée à 30 ans.

Les résultats obtenus sont en concordance avec le système de protection cathodique que dispose les canalisations ASR et AST.

5. La résistivité du sol :

D'après le tableau 4.2 (Relevé de mesures de la résistivité du sol ASR) et le graphe illustré dans la figure 4.3, présentant les mesures réelles de la résistivité du sol sur le tronçon Ø8" de canalisations ASR, nous récapitulons ci-après le nombre des points par catégorie du sol, selon son agressivité :

Plage de résistivité du sol ($\Omega \cdot m$)	Catégorie du sol	Les nombre point kilométrique
0 – 15	Très corrosif	21
15 – 30	Corrosif	20
30 – 50	Moyennement corrosif	9
50 – 100	Faiblement corrosif	22
> 100	Peu corrosif	17

En outre, nous prenons la résistivité moyenne qui est de $61.09 \Omega \cdot m$, valeur avec laquelle le milieu électrolytique est considéré comme environnement de faible corrosivité.

Nonobstant, pour un calcul propice et le bon dimensionnement du système de protection cathodique, nous arrondirons cette résistivité à une valeur de $50\Omega.m$, soit un environnement de moyenne agressivité.

6. Système de maintenance de la ligne ASR/MP :

6.1 Surveillance et contrôle des dispositifs de protection cathodique:

6.1.1 Objectifs :

Les installations de la protection cathodique doivent fonctionner sans interruption. Etant soumises à des risques d'arrêt fortuits provenant soit de défauts, soit de l'appareil lui-même, soit des pannes de secteur, soit de ruptures de câbles de liaison, elles nécessitent une bonne surveillance.

Le contrôle des installations de protection cathodique est effectué à fréquence variable suivant la nature du système de protection.

6.2 Les inspections de poste de soutirage :

Les installations de soutirage de courant doivent être soumises à des inspections 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 $Cu/CuSO_4$
- Vérification de ces valeurs 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 consommation électrique (Kw/h)

6.2.1 La Surveillance de poste de soutirage :

- **Si $I = 0$ & $V \neq 0$, il faut vérifier**
 - L'enclenchement du disjoncteur et le réenclencher s'il y a lieu
 - Les fusibles 220V et les remplacer s'il y a lieu
 - La tension de sortie du redresseur et les fusibles de sortie
 - Le secondaire du transfo-redresseur et les remplacer s'il y a lieu.

Si l'appareil ne fonctionne toujours pas, effectuer alors des recherches sur le transfo-redresseur en atelier.

Tableau 5.1 : la maintenance de poste soutirage.

N°	Défauts Constatés	Causes probables	Remèdes
01	Installation hors service	Déclenchement du disjoncteur	<ul style="list-style-type: none"> • Réenclencher le disjoncteur
02	Pas de tension de secteur au redresseur	Fusible défectueux	<ul style="list-style-type: none"> • Remplacer les fusibles
03	Absence du courant de protection ou courant de protection trop faible	Rupture de câble de liaison ou de contacts	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer la résistance conduite/anodes. • Localiser le défaut de câbles • Vérifier les bornes de connexions
		Résistance d'anodes très élevées	<ul style="list-style-type: none"> • 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)	<ul style="list-style-type: none"> • Modifier légèrement le réglage du redresseur de manière à débiter le courant nécessaire de protection
		Contact avec d'autres canalisations étrangères non protégées	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer la résistance des câbles de liaison (anodes conduites etc.)
		Résistance élevée des anodes	<ul style="list-style-type: none"> • Réajuster la tension du redresseur et vérifier l'installation d'anode
		Augmentation en courant protecteur due aux contacts métalliques avec structures étrangères	<ul style="list-style-type: none"> • Localiser le défaut et éliminer les contacts métalliques avec les structures étrangères
06	Pas de réglage de potentiel	Redresseur défaillant	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier le réglage des instruments de mesure • Vérifier la présence de la tension alternative aux bornes du redresseur et le remplacer

Tableau 5.2 : Planning récapitulatif d’inspection périodique des canalisations et ouvrages concentrés.

Désignation	Périodicité	Objectifs
Inspection de la ligne à pied	Deux fois par mois	<ul style="list-style-type: none"> Etat de l’emprise (Affaissement, glissement ou érosion) Etat des installations annexes (poste de sectionnement) Etat des traversées points singuliers (Traversée d’oueds, traversée de route, piste carrossable) Etat des installations à proximité de l’ouvrage (Installation des poteaux électriques, drainage d’eau, route, construction illicite, plantation d’arbre) Etat des traversées des routes ou des autoroutes (reniflard prise de potentiel)
Inspection motorisée	Mensuelle	<ul style="list-style-type: none"> Etat des gabions dans les berges (affaissement de terrains, ou non consolider) Etat des fosses à vanne (non étanche, état de la trappe d’ouverture) Etat des points de lestage des conduites.
Inspection d’oueds	Quatre fois par an et après chaque pluviométrique importante	<ul style="list-style-type: none"> Constat de l’état des renforcements des berges et des gabions, affaissements du terrain ; instabilité des berges d’oueds manque de recouvrement des les rigoles ou des oueds ; manque de lestage continu ou par cavaliers.
Inspection des postes de sectionnement	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> Vérification de l’état général du poste (accès, la clôture, les portails et portillons, présence des plantes à l’intérieur du poste, les supportages des vannes) Etat des brides (brides fuyardes, manque de serrage joints défectueux) Graissage des parties des vannes par les tubulures Manœuvre des vannes ouverture et fermeture Vérification de l’état de la protection passive peintre de la tuyauterie, présence de corrosion.

Tableau 5.3 : Planning d'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"> Mesure du potentiels conduite /sol ; mesure des courants de protection
Relevés résistivité du sol	Deux fois par an	<ul style="list-style-type: none"> L'opération se fera le printemps et automne ; cette Opération sera renouvelée chaque cinq an
Mesure du potentiel ON/OFF	chaque six mois	<ul style="list-style-type: none"> Mesure du potentiels conduite /sol ; mesure des courants de protection
Mesure du potentiel et le courant pour anodes réactives Protection provisoire	Tous les trois mois	<ul style="list-style-type: none"> L'opération se fera le printemps et automne Mesure du potentiel de l'anode seule Mesure du potentiel de la conduite seul Mesure du potentiel de la conduite et 'anode reliée Mesure du débit de l'anode
Mesure de la résistance d'isolement du joint isolant	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> Mesure du potentiel à l'amont du joint isolant Mesure du potentiel à l'a aval du joint isolant
Mesure du potentiel tube gaine	Chaque trois mois	<ul style="list-style-type: none"> Mesure du potentiel de l'anode seule (protection de la gaine) Mesure du potentiel de la gaine seule Mesure du potentiel de l'anode et la gaine shunté Mesure du potentiel de la gaine et de la conduite Dans le cas ou la gaine dispose de deux prises des potentiels, faire les mêmes relevés de chaque cotés (pour déterminer éventuellement dans quelle partie se trouve les contacts)

Mesure au niveau des postes de soutirage	Chaque quatre mois et à chaque orage	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure le courant de sortie du poste • Mesuré le tension de sortie du poste • Relevé de la consommation d'énergie du poste • Contrôle de serrage des prises
Mesure des résistances des prises de terre, déversoirs et poste de soutirage du courant	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mise à la terre du poste de transformation • Mise à la terre du poste de soutirage • Mise à la terre du poste des ouvrages concentrés (vanne) • Mesure de résistance des déversoirs et des prises de terre • Vérification de la connexion des câbles
Mesure des piles ou batterie Protection provisoire	Chaque mois	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de l'intensité • Mesure de la tension de sortie • Mesure du potentiel conduite sol pile connecter et déconnecter
Arrosage du li anodique	Période estivale Une à deux fois	<ul style="list-style-type: none"> • Préserver des anodes et augmenter la résistivité du sol
Prise des mesures ampermétrique (PMA ou PPA)	Chaque 06 mois	<ul style="list-style-type: none"> • S'assurer de la bonne protection cathodique du pipe • Vérification de la consommation du courant • Détection d'éventuelles fuites de courant

- **Si $I = 0$ & $V = 0$, il faut vérifier :**
 - Les fusibles situés sur les pôles positif et négatif du redresseur
 - L'état des deux câbles Plus (+) et moins (-) et rechercher une coupure éventuelle
 - Le fonctionnement de l'ampèremètre

❖ **Recommandations**

- Une visite (inspection) hebdomadaire est souhaitable pour le contrôle visuel des installations du poste de soutirage
- Pour maintenir un débit constant du tranfo-redresseur et veiller à ne pas l'utiliser à plus de 80% de sa capacité en raison de sa marche continu, il est nécessaire de procéder au réglage hiver-été
- Un carnet de visite, doit être laissé à demeure à l'intérieur du poste de soutirage, permettant de consigner les indications des appareils au cours des visites effectuées et les anomalies constatées.

6.3 Contrôle les installations de la protection cathodique :

6.3.1 Contrôle systématique :

En vue de s'assurer de l'efficacité de la protection cathodique tout le long de la canalisation, il est nécessaire d'effectuer régulièrement des mesures électriques de potentiel, de courant et de résistance aux différents points de mesures.

6.3.1.1 Prise de potentiel :

C'est un moyen qui nous permet d'accéder à la conduite pour relever le potentiel de celle-ci à ce point. La mesure du potentiel se fera à l'aide d'une électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre $Cu/CuSO_4$ et d'un voltmètre à forte résistance interne.

En pratique lors des mesures, l'électrode de référence sera placée au niveau du sol au droit de la conduite après avoir humidifier l'endroit de pose de 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

- Le maintien du numéro et du PK de la prise du potentiel lisible.

6.3.1.2 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.

❖ Recommandations

- Ne pas oublier de remettre les câbles à leur état initial après l'opération
- S'assurer de l'isolement des câbles de shuntage par rapport au corps du coffret
- Le raccordement des câbles de shuntage se fait dans un coffret électrique équipé de barrettes amovibles
- Vérifier le bon serrage des connexions
- Pour éviter tout endommagement ou claquage des raccords isolants, il est nécessaire de les protéger par des éclateurs séparateurs
- La vérification de l'éclateur se fera lors des relevés trimestriels
- Eviter toute peinture conductrice de courant sur le raccord isolant.

6.3.1.3 Gaines :

La vérification de l'isolement canalisation/gaine métallique se fera au niveau des prises de potentiel installées sur la canalisation, et la gaine par la mesure du potentiel conduite/sol, et du potentiel gaine/sol par rapport à l'électrode de référence au sulfate de cuivre Cu/CuSO₄.

Les résultats de ces mesures doivent être de préférence reportés sur des graphes pour une meilleure évaluation de la protection cathodique.

Pour assurer une bonne protection cathodique le long de la canalisation, des mesures électriques de potentiel, d'intensité et de résistance sont nécessaires à faire, car ils sont la base du suivi de la protection.

6.3.2 Contrôle non systématique :

Les opérations des contrôles non systématiques interviennent à la suite d'anomalies constatées pour compléter éventuellement à la vérification périodique.

Ce contrôle peut comprendre :

➤ **La recherche des défauts d'isolement de la canalisation :**

- Défauts des joints isolants
- Défauts de revêtement
- Contact avec d'autres structures métalliques enterrées

➤ **Vérification de la résistance d'isolement**

- La vérification de la résistance d'anode
- Les mesures d'influence mutuelle entre ouvrages métalliques voisins
- Les mesures d'influence électrique haute tension
- Les mesures concernant l'agressivité du sol, présence de courants vagabonds (mesures de résistivité, analyse chimique)

❖ **Recommandations générales :**

Dans un poste de soutirage alimenté en 220V – 380V, sur ou à proximité des pièces sous tension, ou lorsqu'il y a des risques de contacts directs de l'opérateur avec des parties nues sous tension, il est nécessaire de mettre hors tension le poste de soutirage par ouverture du disjoncteur ou retrait de l'alimentation du socle de la prise de courant et de vérifier l'absence de tension.

Dans un poste de drainage, il est nécessaire de séparer le poste de toute autre source de courant possible par l'ouverture de l'interrupteur prévu à cet effet et de vérifier l'absence de tension.

Il est recommandé à ce qu'aucun travail d'intervention ne soit effectué sur les ouvrages durant les mauvaises conditions atmosphériques (pluies, orages).

Conclusion :

L'évaluation de l'efficacité du système de protection cathodique installé le long de la canalisation, se fait généralement selon les valeurs des relevés de potentiels « ON » pour les canalisations. Les graphes ont montrés des résultats du potentiel de -850 mV max et -2300 mV min et le potentiel tube/ gaine entre -200 mV max et -600 mV min.

Nous avons considérés un environnement de moyenne agressivité (une résistivité de $50\ \Omega.m$).

Les valeurs des potentiels relevés le long du pipeline MP/ ASR nous amènent à conclure que la canalisation est protégée cathodiquement.

La surveillance et le contrôle des dispositifs de protection cathodique tel que : les inspections, les contrôles systématiques et non systématiques pour les poste de soutirage, gaine, prise de potentiel ...etc., permettent de maintenir le potentiel de protection à ses valeurs optimales et/ ou requises, soit $Max - 850\text{ mV} / Cu/CuSO_4$, et pour atteindre ce potentiel, un Rhéostat permet de diminuer ou d'augmenter les courants débités, tension du poste....etc.

Conclusion générale :

L'étude a porté sur la protection cathodique de la ligne ASR/MP comportant une étude sur le dimensionnement du système de protection, et des relevés de potentiels le long de la canalisation ASR ainsi que la résistivité du sol.

Le calcul de dimensionnement de la ligne a montré que les dispositifs de la protection cathodique, à savoir : le nombre des postes de soutirages, le nombre des anodes, la tension des postes, le courant débité par poste, ...etc., ont été considérés.

L'évaluation de l'efficacité du système de protection cathodique de la canalisation, se fait généralement selon les valeurs des relevés de potentiels « ON ». Les potentiels relevés par rapport à l'électrode de référence $Cu/CuSO_4$ lors des campagnes de mesures des mois de Décembre et d'Avril révèlent clairement, que la canalisation ASR est bien protégée vu que les potentiels sont inclus dans la zone d'immunité de l'acier (Diagramme de Pourbaix).

Les potentiels tube et tube/ gaines sont appliquées pour des situations de terrain différentes tels que les passages des voies ferrées et routes.

L'influence du haut potentiel sur le revêtement qui engendre son décollement, le dégagement de l'hydrogène n'ont pas été considéré dans ce travail.

Dans un travail future, nous étudions la possibilité de remplacement des anodes sacrificielles actuelles à base de $FeSiCr$ par des anodes en zinc disponible en Algérie.

Dans un calcul d'optimisation du système de protection cathodique, à travers une étude technico économique, le choix des anodes et la proposition de panneaux solaires sont à considérer dans une nouvelle étude.

Une simulation numérique sur l'optimisation des paramètres de la protection cathodique : potentiel de protection, la résistivité du sol, pH, composition de l'acier, courants vagabonds, les croisements de canalisation, ligne haute tension...peuvent être considérés en utilisant des outils de simulation comme COMSOL ou ANSYS...

- [1] **Marec**, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.
- [2] **D. Bouzidi**, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [3] **M^{me} H. ZENDAOUI**, IAP Boumerdes, partie 1 corrosion et protection des canalisations, SH, IAP.CU, UFR : Gas Refining & Petrochemistry 2011.
- [4] Document technique sonelgaz “ Procédures relatives au revêtement appliqué sur les tubes transport de gaz : généralités sur les fonctions des revêtements et leurs applications” **PR : N° 004.GRTG - R 1** (2008).
- [5] **M^{me} H. ZENDAOUI**, IAP Boumerdes, partie 2 corrosion et protection des canalisations, SH, IAP.CU,UFR : Gas Refining & Petrochemistry 2011.
- [6] **N. Kadoum, S. Dontigny**, utilisation de la protection cathodique pour la lutte contre la corrosion des aciers d'armature, 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada, 5-8 juin 2002 / June 5-8, 2002.
- [7] **Brahim Laoun, Karima Niboucha, Lazhar Serir**, Corrosion et Protection Cathodique des Canalisations Enterrées : Etude, Simulation et Application de l'Energie Solaire. MATERIAUX 2006 13-17 Novembre 2006.
- [8] **O. Boutchiche**, Etude du comportement des aciers X60 pour gazoducs dans un milieu agressif” mémoire d'ingénieurs, Faculté des sciences de l'ingénieur, université de Tlemcen(2000).
- [9] **A. Bendjebbour**, Corrosion localisée des aciers API sollicité en sol algérien ligne ASR/MP, mémoire magister, Faculté technologie, Université de Tlemcen, 2012.
- [10] **D. Bennacer**, Etude des phénomènes d'interface verticale des écoulements diphasiques dans un pipeline. Cas des carburants, mémoire magister, Faculté technologie, Université de Tlemcen 2011.
- [11] **A. Si Chaib**, Influence des paramètres d'écoulement multifluide des hydrocarbures Sur L'acier X52, mémoire Ingénieur, Faculté de technologie université de Tlemcen, 2010.

- [12] Document technique NAFTAL, Ouvrages annexes de la canalisation GPL 10''- 8'' Arzew – Sidi Bel Abbas – Tlemcen, 2004.
- [13] **Nouredine Kadoum**, Réalisation des prestations de diagnostic et réajustement du système de protection cathodique, SONATRACH-BHP BILITON, (2011).
- [14] La Protection Cathodique - Guide Pratique - Éditions Technip - Paris 1986.
- [15] R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig. « Corrosion and corrosion protection. An introduction to corrosion Science and Engineering ». 4th Edition, 2008, John Wiley & Sons (Livre).
- [16] <http://www2.naftal.dz/fr/>.
- [17] <http://www.ccta.fr/ccta.php?page=principe>
- [18] <http://www.sonatrach.com/transport-par-canalisation.html>
- [19] <http://www.institut-numerique.org/chapitre-i-presentation-dnaftalspa50b75032bb39d>.
- [20] <http://cetra.pagesperso-orange.fr/techprot.htm>
- [21] http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_protection_cathodique_V1_1.pdf
- [22] <http://www.nuceng.ca/canteachmirror/library/20070700.pdf>.

ANNEXES 1

Tableau 01 : Echelle de classification des métaux (Echelle de NERNST)

Electrode	Couple redox	Potentiel en volt par rapport à l'électrode d'hydrogène
Or	Au/Au ³⁺	+ 1,42
Platine	Pt/Pt ²⁺	+ 1,20
Mercure	Ag/Ag ⁺	+ 0,80
Argent	Hg/Hg ²⁺	+ 0,79
Oxygène		+ 0,40
Cuivre	Cu/Cu ²⁺	+ 0,34
Hydrogène		0,00
Plomb	Pb/Pb ²⁺	- 0,13
Etain	Sn/Sn ⁺⁺	- 0,14
Nickel	Ni/Ni ²⁺	- 0,23
Cobalt	Co/Co ²⁺	- 0,30
Cadmium	Cd/Cd ²⁺	- 0,40
Fer	Fe/Fe ²⁺	- 0,44
Chrome	Cr/Cr ³⁺	- 0,60
Zinc	Zn/Zn ²⁺	- 0,76
Aluminium	Al/Al ²⁺	- 1,66
Magnésium	Mg/Mg ²⁺	- 2,34