

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GENIE DES MATERIAUX

PAR :

RAMDANI KOUSSEILA

RAMDANI LOTFI

Thème

Protection cathodique des ouvrages pétroliers par courant imposé
Dimensionnement et réalisation d'un déversoir vertical.

Soutenu le 28/06/2018 devant le jury composé de:

Mr. Mouhend Amokrane Bradai

Président

Mr. Amari Djamel

Rapporteur

Mr. Younes Rassim

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

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

En second lieu, nous tenons à remercier Mr D. Amari, notre promoteur pour ces précieux conseils, ces critiques constructives et son aide durant toute la période de la réalisation de ce mémoire. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

On n'oublie pas de présenter notre gratitude à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Sans eux, nous ne serons jamais arrivés là.

Nous remercions également les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier tout les enseignants qui nous ont formés, et toute l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia.

On remercie l'entreprise Sonatrach notamment M^r S.CHIAA, L.Hamache, N.Tighilt, M^r Ben Amara et tout l'ensemble du département de protection cathodique. Que tous ceux qui ont contribués à la réussite de notre stage trouvent ici l'expression de nos sincères gratitudees,

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

A la mémoire de mon grand père qui n'a pas pu assister à ce jour,

*A mes très chers parents qui ont donné un sens à mon existence, on
m'offrant une éducation digne de confiance,*

*A mon père qui se donne toujours corps et âme pour notre
instruction, et veille depuis toujours pour notre bien,*

*A ma très chère mère, on quelques mots... la vie n'a aucun sens
sans toi,*

*Sachez, vous deux, que l'amour que vous m'offrez continue à
m'animer chaque jour,*

*A mes petites sœurs Sara et son mari Smail, Fatima et Zahra, mon
petit frère Aylane, je vous souhaite tout le bonheur du monde, il
suffit de vous voir alaise pour que je le sois,*

*A toute ma grande famille, mon oncle Farid, Said, mes cousins
Rassim, seddik, redoine, makhlouf et fahim,*

*A tout mes amis et spécialement Gallas et fouad, et tous ceux qui
ont quitté leurs familles pour chercher un avenir meilleur,*

*Je dédie ce travail à tout mes enseignants du cycle primaire jusqu'à
ma graduation.*

Pour tous ceux qui m'aime,

Pour tous ceux que j'admire.

RAMDANI Kousseila



DEDICACES

A mes très chers parents pour leurs soutiens et patience,

*A ma sœur Hamida et son mari et leurs petits anges Salim, Nouara
et Yasmine,*

A mon frère Salim, pour ta détermination et tes sacrifices,

A mon frère Fares, sa femme et leurs adorables Isaac et Louiz,

*A mon frère Daoud et sa femme, et les deux mignons Sif Eddine et
Nor El Houda,*

A ma sœur Siham et son mari,

A mon petit frère Djaafar,

A toute ma famille,

A tout mes amis.

A toutes personnes chères à mon cœur,

A toutes personnes qui m'aime,

A toutes personnes que j'aime.

RAMDANI Lotfi



Liste des figures

Figure I.1 : Echelle Nernst.....	5
Figure I.2 : Pile de corrosion électrochimique humide.....	7
Figure I.3 : Pile de corrosion électrochimique sèche.....	8
Figure I.4 : Corrosion électrochimique par couple galvanique.....	9
Figure I.5 : Schémas de différents couples galvaniques. a) couple Acier-Cuivre, b) .couple Acier-Aluminium, c) Couple Acier – Fonte.....	10
Figure I.6 : Effet d'Evans ou aération différentielle.....	11
Figure I.7 : Pile géologique	12
Figure I.8 : Corrosion par courant vagabond.....	13
Figure I.9 : Diagramme de Pourbaix E-pH de fer-eau à 25°C.....	15
Figure II.1 Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des deux barres.....	19
Figure II.2 : Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des 4 barres.....	20
Figure II.3 : Protection passive du pipe line.....	21
Figure II.4 : Principe de protection cathodique (a) Par anode sacrificiel (b) Par courant Imposé.....	24
Figure II.5 : Principes de la protection par anodes sacrificielles.....	27
Figure II.6 : Position et distance de l'anode par rapport à la conduite.....	31
Figure II.7 : Principe de la protection par courant imposé.....	33
Figure II.8 : Réalisation de déversoir horizontale/ verticale.....	35
Figure III.1 : Méthode de mesures de potentiels de la protection cathodique.....	39
Figure III.2 : Voltmètre.....	39
Figure III.3 : Différents types d'électrodes de référence.....	40
Figure III.4 : Courbe d'évolution du potentiel OBl.....	45
Figure III.5 : Courbe d'évolution du potentiel GG1	45
Figure III.6 : Courbe d'évolution du potentiel D'OG1.....	46
Figure III.7 : Racleur intelligent.....	47
Figure III.8 : Schéma représentant un déversoir vertical.....	48
Figure III.9 : La porté de la protection en fonction du potentiel.....	55
Figure III.10 : Le potentiel du pipeline distribué par anodes.....	58
Figure III.11 : Le potentiel du pipeline distribué par les anodes Ti-MMO.....	59
Figure III.12 : Tube en PVC du dégazage.....	62

Figure III.13 : Schéma de fixation des anodes.....	63
Figure III.14 : Schéma représentant un puis anodique.....	64
Figure III.15 : Schéma des chapelets d'anodes	65

Liste tableau

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API.	17
Tableau II.2 : composition chimiques en (% m) des aciers X60 et X100.....	18
Tableau II.3 : Valeurs de résistivité du sol dans différent milieux.....	26
Tableau II.4 : les avantages et inconvénients des anodes sacrificielles.....	30
Tableau II.5 : Type de bakfill.....	37
Tableau III.1 Les paramètres mensuels de la ligne OB1 24''.....	41
Tableau III.2 Paramètres mensuel des PPC de la ligne OG1 20''.....	42
Tableau III.3 Les paramètres mensuels des PPC de la ligne GG1 24''.....	42
Tableau III.4 Paramètres mensuel des PPC des ouvrages concentrés OB1.....	43
Tableau III.5 Paramètres mensuel des PPC du SC3.....	44
Tableau III.6 Paramètres mensuel des PPC, ouvrages concentrés d'OG1.....	44
Tableau III.7 : longueur de déversoir et la profondeur de pose des anodes.....	49
Tableau III.8 : Type de revêtement et leur densité de courant.....	51
Tableau III.9 : type d'anodes et leurs caractéristiques.....	55

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : bibliographie	
I.1 Définition de la corrosion.....	3
I.2 Composition de la matière.....	3
I.2.1 L'atome.....	3
I.2.2 L'ionisation	3
I.2.3 Equilibre ionique.....	4
I.2.4 Electrode métallique	5
I.2.5 L'électrolyte	5
I.2.6 La conduction.....	5
I.3 Processus de la corrosion	6
I.3.1 La corrosion humide	6
I.3.2 La corrosion sèche	7
I.4 Causes de corrosion	8
I.4.1 Piles constituées de métaux différents (couples galvaniques)	9
I.4.2 Piles de concentration	11
I.4.2.1 Aération différentielle [Effet D'Evans].....	11
I.4.2.2 Pile géologiques	11
I.4.3 Corrosion par courant vagabond.....	12
I.4.4 Diagrammes de Pourbaix (E – pH).....	13
Chapitre II : protection des ouvrages enterrés	
II.1 Généralités	17
II.2 Caractéristiques des aciers API	17
II.3 Facteur agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés	18
II.3.1 Le sol.....	18
II.3.2 Mesure de l'agressivité des sols.....	18
II.3.2.1 Méthode des deux barres	19
II.3.2.2 Méthode des quatre barres.....	19
II.4 Les différentes protections contre la corrosion	21
II.4.1 Protection passive	21
II.4.1.1 Contraintes mécaniques.....	22

II.4.1.2 Contraintes thermiques	22
II.4.1.3 Contraintes physico-chimiques	22
II.4.1.4 Résistivité du revêtement et densité de courant	22
II.4.1.5 Effet de courant protecteur sur le revêtement	23
II.4.1.6 Catégories de revêtements	23
II.4.2 protection active	24
II.4.2.1 Principe de la protection cathodique	24
II.4.2.2 Etude de l'environnement (évaluation du risque corrosion)	25
II.4.2.3 la protection par anodes sacrificielles	27
II.4.2.4 Protection cathodique par courant imposé	32
Chapitre III : calcul et dimensionnement	
III.1. Poste protection cathodique.....	38
III.2. Méthode de relevés des potentiels	38
III.3. Les équipements de mesure	39
III.4. L'état du potentiel.....	44
III.5. Dimensionnement d'un déversoir vertical.....	47
III.5.1. Déversoir vertical.....	47
III.5.2. Détermination de la profondeur	48
III.5.3. La portée et le courant de la protection cathodique	50
III.5.3.1. La formule de Von Baeckmann-Schwenk	52
III.5.3.2. La formule de Morgane.....	52
III.6. Détermination de la masse anodique	55
III.6.1. Etude du dimensionnement et réalisation du déversoir vertical d'Akbou	56
III.6.1.1. Calcul de la résistance linéique R'	56
III.6.1.2. Calcul de la densité du courant protecteur	57
III.6.1.3. Calcul de la portée de la protection cathodique	57
III.6.1.4. Le courant I_0 qu'il faudra pour assurer la protection de ce tronçon	58
III.6.1.5. La masse anodique de déversoir d'Akbou	58
III.6.1.6. La description d'anodes choisies	59
III.6.1.7. Calcul de la profondeur t et la longueur L du déversoir.....	59
III.6.1.8. Calcul de la durée de vie du déversoir	60
III.6.2. La réalisation du puis	60
III.6.2.1. Le tube en PVC du dégazage	62

III.6.2.2. Schéma de fixation des anodes sur le 2 ‘’	63
III.6.2.3. Schéma du puits anodique.....	64
III.6.2.4. Schéma des chapelets d’anodes	65
Conclusion générale.....	66
Références.....	67

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le temps où l'homme a découvert et su utiliser les métaux, il est toujours confronté à leur destruction, c'est-à-dire leur retour à l'état naturel minéral. Cette destruction s'appelle la corrosion.

La corrosion est le processus qui conduit les éléments naturels à défaire ce que l'homme a réalisé en élaborant des matériaux que la terre lui a offert. La corrosion métallique ramène ainsi, les métaux et alliages à leurs états naturels d'oxyde et de minerais.

On estime que, pour ce qui concerne l'acier, **10 à 20%** de la production mondiale seraient détruites chaque année par la corrosion si l'on n'y prenait pas garde. En France, le **CEFRACOR** (centre français de la corrosion) a évalué en 1977 les dégâts causés par la corrosion à **8 ou 10%** de la production d'acier [1].

Les évaluations des coûts directs et indirects de la corrosion et de l'anticorrosion varient entre **1,5 et 5%** du PNB (produit national brut) dans les pays industrialisés. Ceci comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection.

Aux Etats-Unis, ce coût a été évalué entre **5 à 8 milliards de dollars**, soit **1,5 à 2%** du PNB. En France, l'évaluation actuelle du **CEFRACOR** est de **4%** du PNB. Cette statistique spéculative peut paraître déconcentrante si l'on ne réalise pas à quelles conditions extrêmes peuvent être soumis les métaux et leurs alliages dans notre civilisation industrielle, il importe donc de développer notre connaissance de la lutte contre la corrosion au même rythme que celui du développement des industries « de pointe ». Selon certaines estimations, on pense qu'une économie de l'ordre de **15%** du coût de la corrosion pourrait être réalisée par une observation plus systématique des bonnes règles d'anticorrosion connues [1].

De nos jours, la protection cathodique est couramment appliquée à des structures aussi diverses que : les conduites enterrées ou immergées (gazoduc/oléoduc), les réservoirs, les bateaux, les installations pétrolières, les armatures métalliques, les câbles électriques ou téléphoniques, etc.

En Algérie, la région de transport centre (**RTC**) a environ 1200km de pipeline, des stations de pompage, une station de compression, des bacs de stockage...etc. qui sont tous exposés au phénomène de corrosion. Et l'entreprise nationale **SONATRACH** fait en sorte que ces structures soit protégés le plus longtemps possible de la corrosion.

Un système de protection cathodique, dépend essentiellement de la maîtrise et de l'optimisation des différents paramètres mis en jeu ; tel que le dimensionnement d'une protection cathodique, le dimensionnement d'un déversoir anodique, les distances entre le pipe-line et le déversoir et le calcul du potentiel à imposé.

Aussi, notre présente étude est structurée en trois chapitres.

Le premier chapitre est dédié aux différents rappels bibliographiques en relation avec le sujet à savoir des rappels sur le phénomène de la corrosion, structure de la matière, et les systèmes de protection cathodique.

Le deuxième chapitre traite la protection cathodique active, et la protection passive et les différents paramètres à tenir en compte dans ces domaines.

Et en fin, le dernier chapitre est dédié aux différents calculs et dimensionnement de la protection cathodique par courant imposé, et précisément le calcul pour le dimensionnement et la réalisation d'un déversoir vertical.

CHAPITRE I
Revue
bibliographique

Rappels élémentaires sur la corrosion

I.1 Définition de la corrosion

Selon la norme ISO 8044 (1999), la définition officielle de la corrosion, est la suivante :
 " interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs ".

La corrosion est donc, la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxydes, sulfates, carbonates...etc, plus stable et subir ainsi, une dégradation de leurs propriétés [2].

I.2 Composition de la matière

I.2.1 L'atome

Un atome est représenté par un noyau (protons et neutrons) chargé d'électricité positive autour duquel gravitent des électrons chargés négativement. L'ensemble noyau-électrons est électriquement neutre.

I.2.2 L'ionisation

Dans certaines conditions, l'atome peut prendre un ou plusieurs électrons parmi ceux de la couche extérieure, comme il peut capter des électrons qui s'ajoutent à cette même couche.

Lorsque l'atome perd des électrons on obtient des ions positifs. Les ions négatifs sont obtenus quand l'atome capte des électrons. La charge totale portée par une masse atomique gramme et porteurs d'une seule charge est de [3] :

$$F = N \cdot e^- \dots\dots\dots (1)$$

Où: F: constant de farady =9600 [C/mol]

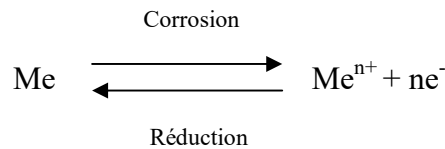
$$1 \text{ Faraday} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} = 96.500 \text{ coulombs}$$

e^- = Charge de l'électron

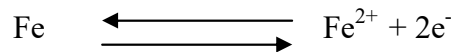
$$N = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ (mol)}^{-1} \text{ (nombre d'Avogadro).}$$

I.2.3 Equilibre ionique

Un métal (Me) plongé dans une solution à tendance à émettre des ions positifs passants en solution et laissant le métal chargé négativement par ces électrons, selon les équations suivantes [4] :



Pour l'acier on a :



Exemple :

La présence de la double couche électrons/ions à l'interface métal/solution crée un potentiel entre le métal et l'électrolyte, que l'on appelle "potentiel d'électrode" qui se calcule par la formule de Nernst [5],

$$\mathbf{E = E_0 + \frac{\mathfrak{R}T}{nF} \text{Log} [\text{Me}^{n+}] \dots\dots\dots (2)}$$

Où : E : potentiel d'équilibre en volts ou potentiel d'oxydation de l'électrode. [V/ENH],

E₀ : potentiel normal mesuré par rapport à l'électrode normal d'hydrogène dans les conditions standards P = 1 atm et T=25°C,

[Meⁿ⁺] : concentration des ions métalliques dans la solution,

n : nombre de charges ou électrons échangés,

℞ : Constante de gaz parfait. [J/mol.K], ℞ = 8,31 J/mol.k

T : température en Kelven. [K],

F : 96500 Coloumb, constant de faraday =96500 [C/mol].

L'échelle de Nernst donne les valeurs des potentiels normaux des métaux usuels mesurés par rapport à l'électrode d'hydrogène.

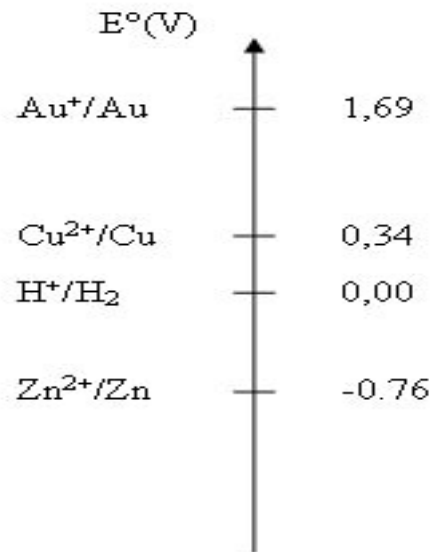


Figure I.1 : Echelle Nernst [5].

I.2.4 Electrode métallique

Un métal est constitué d'un édifice cristallin d'ions positifs (Me^{n+}) dans lequel circulent des électrons libres. Ce nuage électronique est responsable de la conductibilité des métaux.

La mise en mouvement des électrons sous l'effet d'un champ électrique crée une circulation de courant dans le métal sans qu'il subisse des modifications chimiques.

I.2.5 L'électrolyte

L'électrolyte est un système qui renferme des particules ionisées pouvant être des atomes ionisés ou des ions complexe constitués de plusieurs atomes.

I.2.6 La conduction

La conduction sous l'action de champ électrique est due, dans le cas de l'électrolyte, au déplacement des ions.

La distinction entre le métal et l'électrolyte, en ce qui concerne la conduction du courant, s'établit comme suit

- **Le métal :** le métal est un conducteur électronique. Il conduit le courant par ces électrons et la tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant qui le traverse. Ce fait se traduit par la loi d'Ohm classique suivante:

$$U = R.I \quad (v) \dots\dots\dots (3)$$

U : Tension en (v),

R : Résistivité en (Ω),

I : Courant en (A).

- **L'électrolyte** conduit le courant par ces particules ionisées. Il s'agit d'une conduction ionique. Pour assurer la circulation du courant, l'application d'une tension minimale est nécessaire [3].

I.3 Processus de la corrosion

La plupart des réactions de corrosion sont de nature électrochimique, en particulier les réactions de dissolution en milieu électrolyte ou d'oxydation à haute température. Suivant la nature du milieu environnant et de la température, la corrosion est dite **humide** ou **sèche** quoique toujours de nature électrochimique.

Dans le premier cas, le milieu est constitué par un liquide généralement électrolyte à une température modérée. Dans le second cas, il est constitué par des vapeurs et gaz au dessus de leurs point de rosée, la température est souvent élevée ($>200^\circ\text{C}$) [6, 7].

Un autre type de corrosion qui mérite d'être signaler qui est appelée **corrosion bactérienne** au cours de laquelle interviennent des organismes vivant de différentes espèces. Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés ainsi que les structures métalliques immergés dans l'eau de mer.

I.3.1 La corrosion humide

La corrosion humide est la plus rencontrée dans l'industrie du gaz et du pétrole ainsi que dans l'industrie pétrochimique. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau; milieu complexe contenant une quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi avec les gaz amenant des condensations d'eau [2, 8].

La corrosion humide fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher :

- **Une anode** c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux,

- **Une cathode** c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par réduction de l'oxygène en milieu basique, où le siège du dépôt d'un métal par réduction d'une de ses cations).
- **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même
- **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés à l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et fermer le circuit électrique. Ce rôle est joué par le milieu électrolytique lui-même.

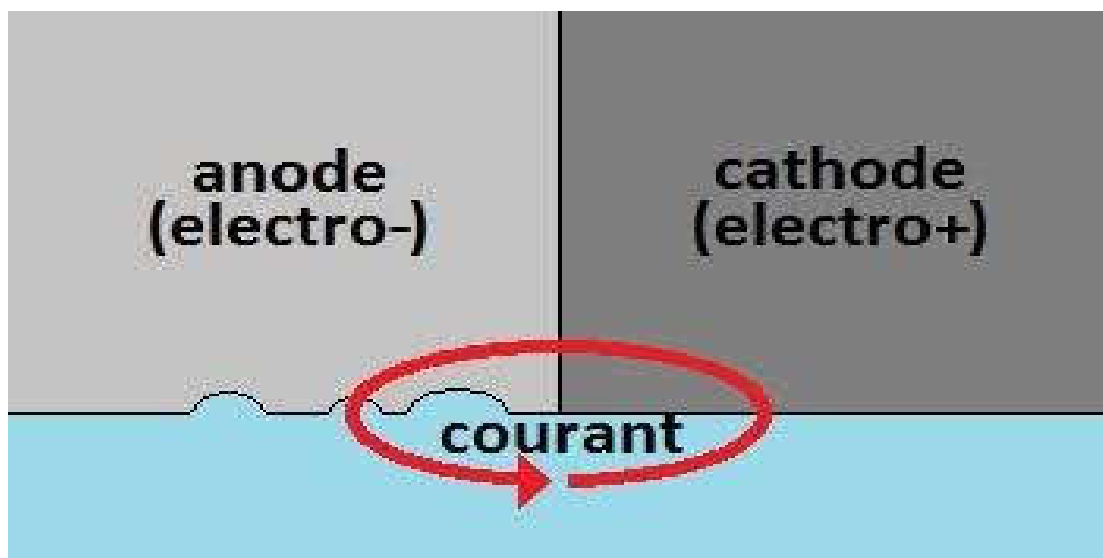


Figure I.2 : Pile de corrosion électrochimique humide.

I.3.2 La corrosion sèche

La corrosion sèche se rencontre surtout dans les fours, chaudières et turbines à gaz. Elle est aussi de caractère électrochimique et doit donc réunir les mêmes facteurs. La seule différence réside dans le fait que le conducteur électronique et le conducteur ionique sont remplacés par la couche d'oxyde formé à la surface du métal comme le montre la figure ci-dessous [6].

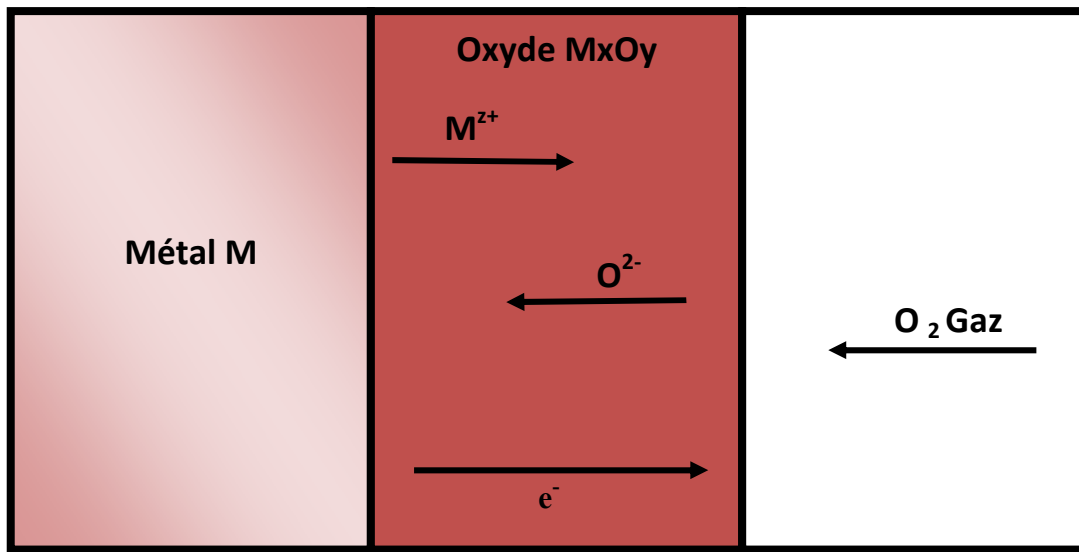
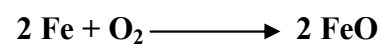
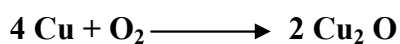


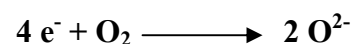
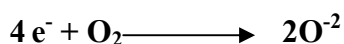
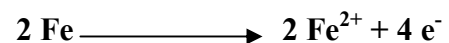
Figure I.3 : Pile de corrosion électrochimique sèche [6].

Le métal s’oxyde à l’interface métal-oxyde et les cations diffusent vers l’extérieur du film. A la surface extérieure l’oxygène se réduit en anions O^{2-} qui diffusent vers l’interface métal-oxyde les électrons libérés à cette interface doivent traverser la couche d’oxyde avant de réagir avec l’oxygène externe. La surface extérieure du film joue donc le rôle de cathode et l’interface métal-oxyde celui d’anode. L’oxyde est ici simultanément électrolyte et conducteur électronique. Il s’agit donc d’un phénomène d’oxydoréduction au cours duquel il y a transfert d’électrons. Le métal, réducteur, fournit les électrons qu’accepte l’oxydant (ici l’oxygène).

Exemples :



Ces deux réactions se décomposent de la manière suivante :



I.4 Causes de corrosion

La corrosion électrochimique se ramène à l’étude des piles immergées dans l’électrolyte qui comprend :

- Une partie métallique anodique qui est le siège d’une réaction d’oxydation. (corrosion).

- Une partie métallique cathodique qui est le siège d'une réaction de réduction (dégagement d'hydrogène).

Les piles sont divisées en deux grandes classes :

I.4.1 Piles constituées de métaux différents (couples galvaniques)

Les métaux galvaniques ont été classés suivant l'ordre de leurs potentiels normaux d'électrode (échelle de Nernst). Les métaux nobles dont la corrosion est difficile ont un potentiel positif par rapport à l'électrode à hydrogène, et ceux qui sont facilement corrodables ont un potentiel d'équilibre négatif par rapport à l'électrode à hydrogène.

La corrosion galvanique est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en contact entre eux, environnés d'un milieu conducteur. Une différence de potentiel se crée entre eux, ce qui provoque la corrosion du métal le moins résistant qui devient anodique et le plus résistant devient cathodique.

Cette forme de corrosion est appelée corrosion galvanique ou bimétallique. Le courant débité dans ce cas est appelé le courant galvanique.

Plus l'attaque du métal est forte plus l'intensité est plus élevée [3].

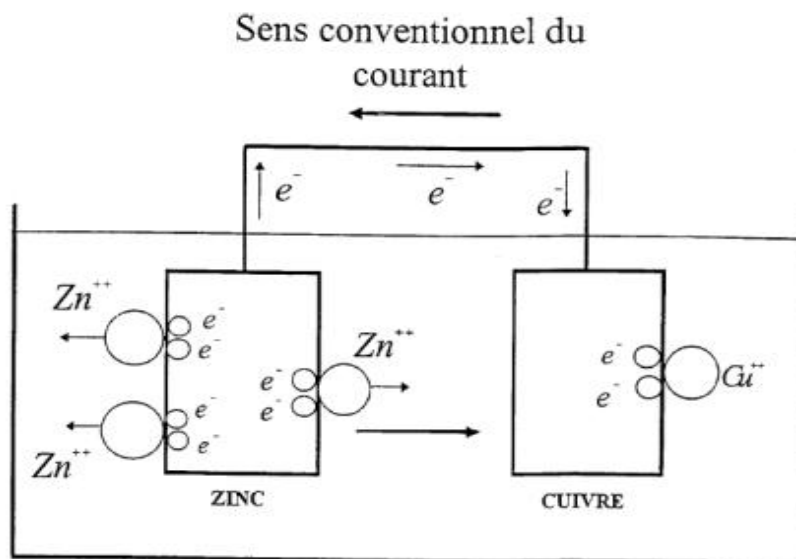
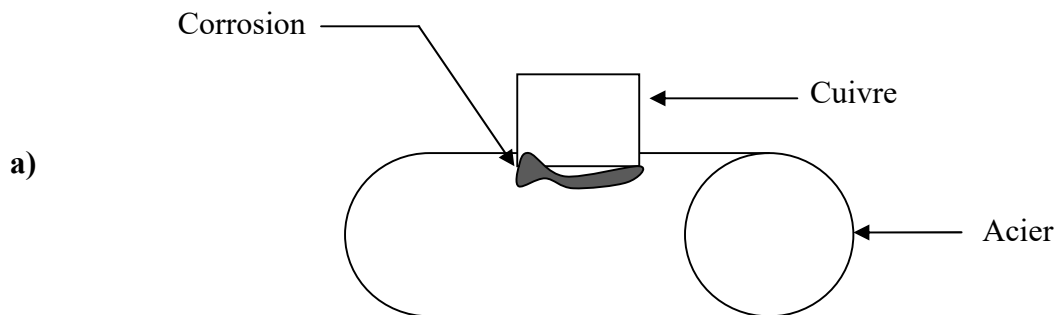


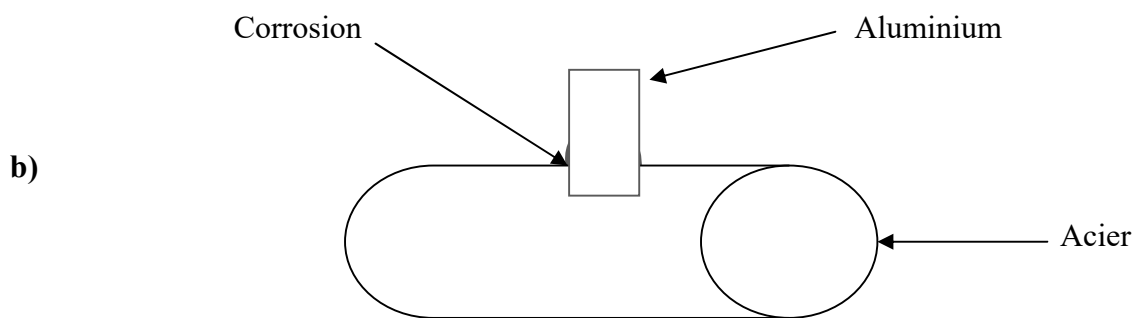
Figure I.4 : Corrosion électrochimique par couple galvanique [3].

Exemple :

- Système Cuivre – Acier, il y a corrosion de l'acier



- Système Acier – Aluminium, il y a attaque de l'aluminium



- Système Acier – fonte, il y a attaque de l'acier

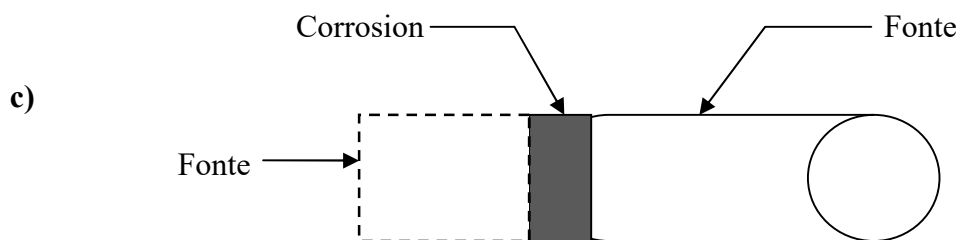


Figure I.5 : Schémas de différents couples galvaniques. a) couple Acier-Cuivre, b) couple Acier-Aluminium, c) Couple Acier – Fonte [4].

I.4.2 Piles de concentration

I.4.2.1 Aération différentielle [Effet D'Evans]

Ce genre de corrosion a été étudié par Evans. Il a démontré que les concentrations différentes d'oxygène sont responsables de la corrosion. Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc facilement.

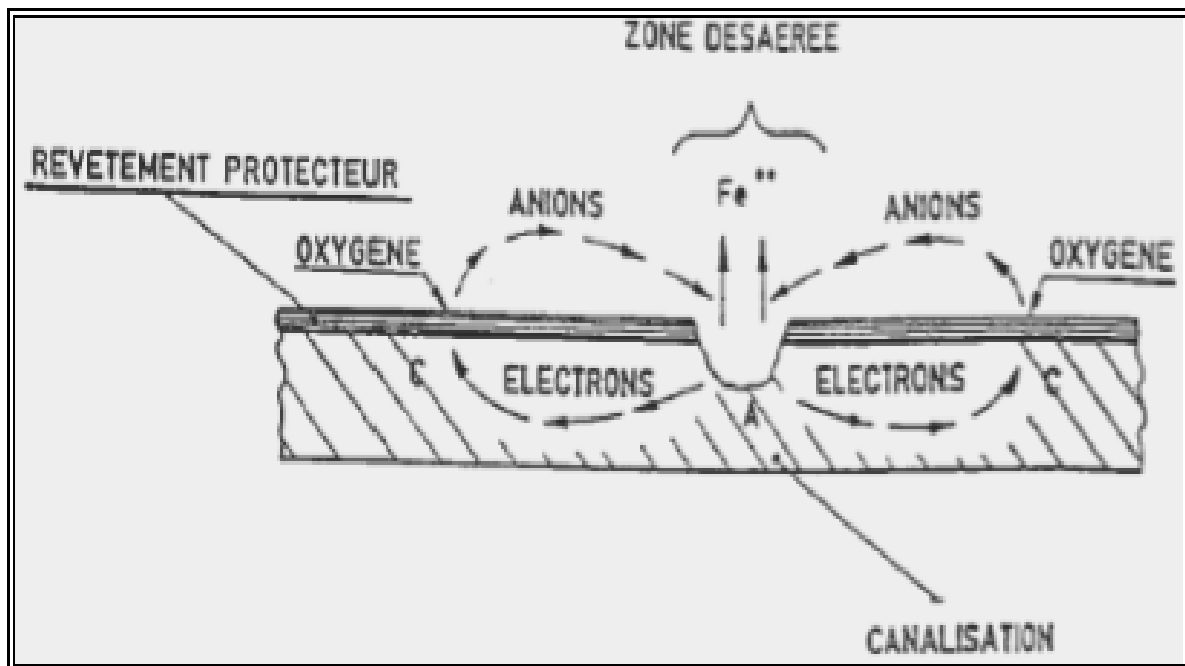


Figure I.6 : Effet d'Evans ou aération différentielle [4].

I.4.2.2 Pile géologiques

Cette forme de corrosion apparaît lorsque le métal est enterré dans deux terrains différents (cas de pipelines). En raison de cette différence de terrain, des piles géologiques se forment et conduiront à la corrosion des zones anodiques. Ces zones sont celles dont le potentiel est plus négatif par rapport aux zones cathodiques.

Si la surface cathodique est grande par rapport à la surface anodique, la corrosion de celle-ci sera d'autant plus importante et rapide.

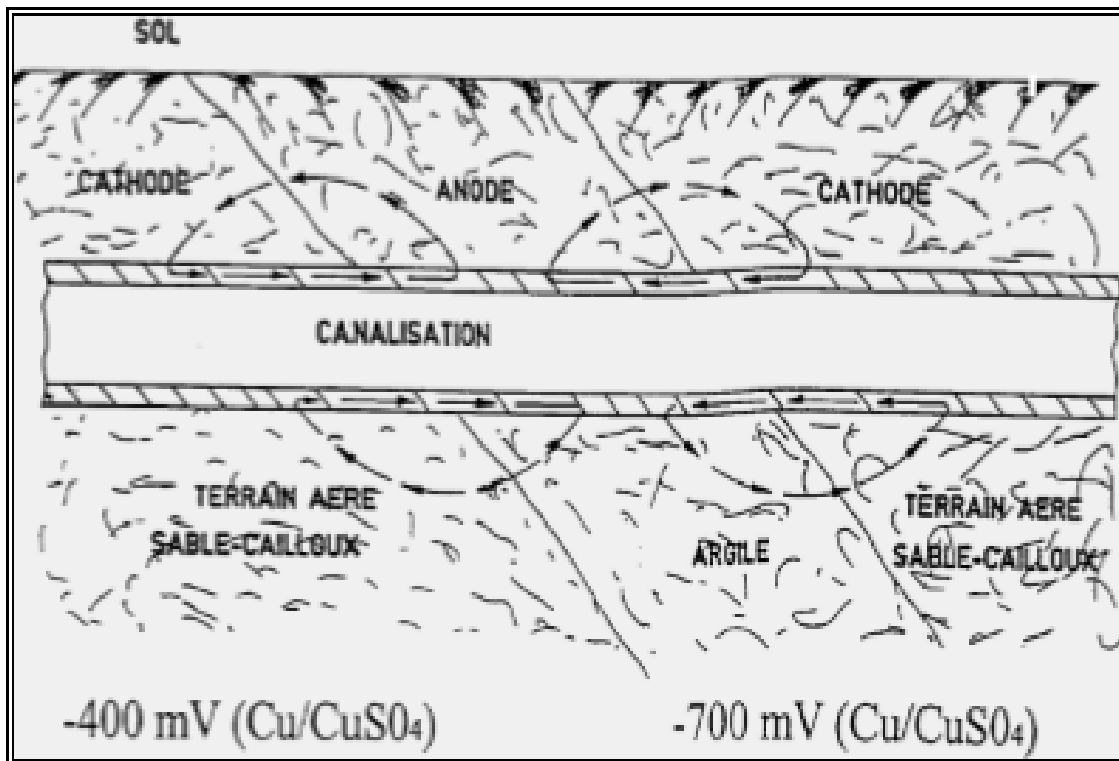


Figure I.7 : Pile géologique [3].

I.4.3 Corrosion par courant vagabond

Les installations électriques qui utilisent des conducteurs mal isolés sont à l'origine de courants électriques plus ou moins importants qui circulent dans le sol.

C'est le cas des lignes de traction électrique utilisant le rail comme conducteur de retour. Une partie de ces courants emprunte les canalisations enterrées, les rendant cathodiques ou anodiques selon qu'elles reçoivent les courants ou qu'elles les restituent à la source, c'est le phénomène d'électrolyse [4].

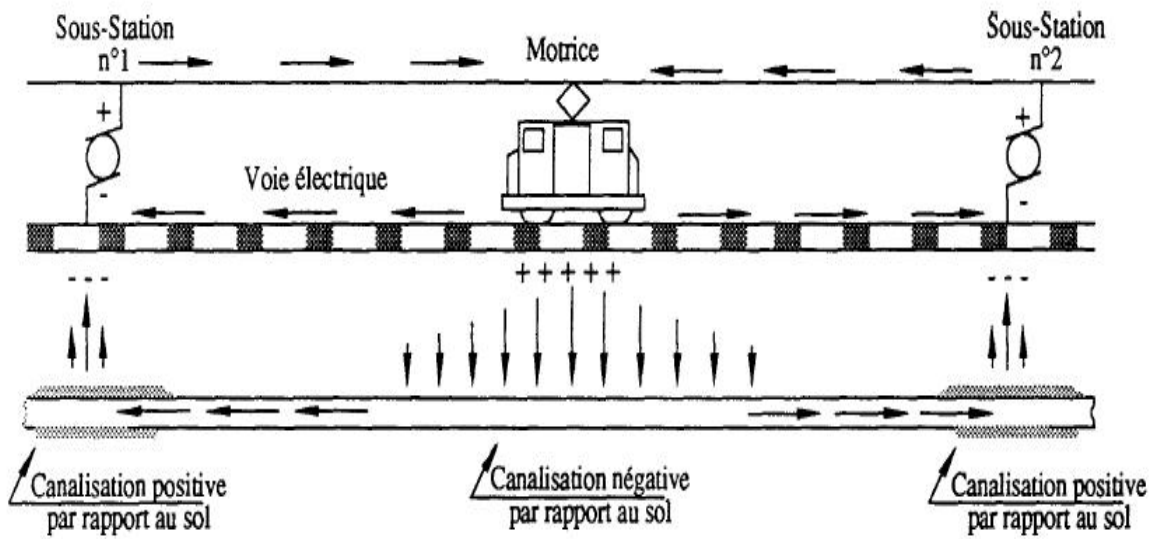


Figure I.8 Corrosion par courant vagabond [4].

I.4.4 Diagrammes de Pourbaix (E – pH)

L'équation de Nernst généralisée, donne le potentiel réversible d'une électrode siège d'une réaction d'oxydoréduction quelconque, de la manière suivante [9] :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{espèce oxydées}]^x}{[\text{espèces réduites}]^y} \dots\dots\dots (4)$$

Où (x) et (y) représentent les coefficients stœchiométriques des espèces et (n) le nombre d'électrons mis en jeux par la réaction.

De nombreuses réactions d'électrode, et notamment celles conduisant à la formation d'oxydes en milieu aqueux, font intervenir les ions H⁺. Le potentiel E d'une telle réaction va donc dépendre du pH de la solution. Ainsi, pour l'oxydation du Chrome en milieu aqueux :



L'équation de Nernst appliquée à la réaction ci-dessus devienne :

$$E_{(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} = E_{0(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} + \frac{RT}{6F} \ln \frac{[\text{Cr}_2\text{O}_3][\text{H}^+]^6}{[\text{H}_2\text{O}]^3[\text{Cr}]^2} \dots\dots\dots (6)$$

Avec $[H_2O] = [Cr_2O_3] = [Cr] = 1$, solide ou corps pur.

Aux conditions standards, $P = 1 \text{ atm}$ et $T = 25^\circ\text{C}$

$$E_{(Cr/Cr_2O_3)} = E_{0(Cr/Cr_2O_3)} - 0,059 \text{ pH}$$

Pour l'Hydrogène : $H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$

$$E_{(H_2/H^+)} = - 0,059 \text{ pH} ; (E_{0(H_2/H^+)} = 0 \text{ par convention})$$

Et pour l'Oxygène: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4OH^-$

$$E_{0(O_2/OH^-)} = 1,23 - 0,059 \text{ pH}$$

Il est donc possible de représenter les différents équilibres en fonction du pH. Un tel diagramme est appelé **diagramme potentiel-pH** ou **diagramme de Pourbaix**. La figure ci-dessous représente un diagramme de Pourbaix simplifié du fer. Par convention, ce diagramme a été établi pour une température de 25°C et une concentration des espèces dissout de 10^{-6} mol/l [9].

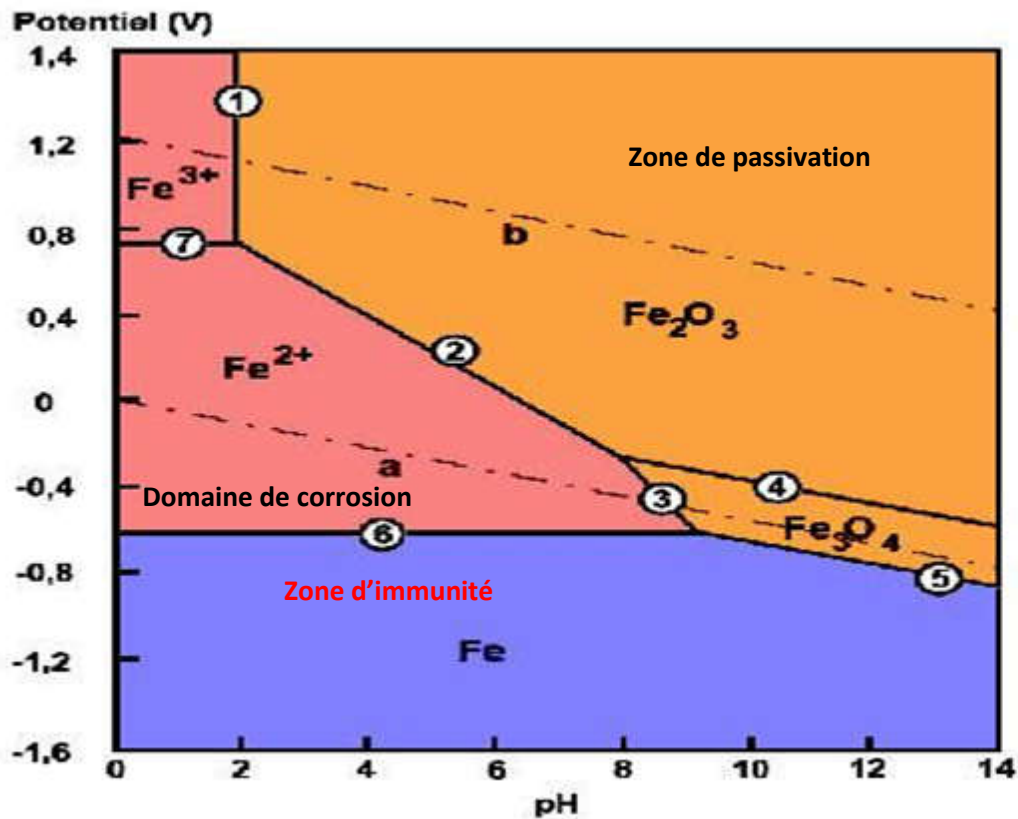
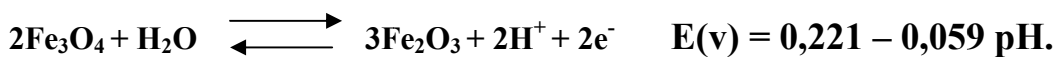


Figure I.9 Diagramme Pourbaix (E-pH) [9].

Deux oxydes solides ont été pris en compte pour la construction de ce diagramme très simplifié, l'hématite Fe_2O_3 et la magnétite Fe_3O_4 . Les différents équilibres existants entre le fer, ses cations, ses anions et ses oxydes et l'eau ainsi qu'entre eux quand ils ont des frontières communes.

Exemple : l'équilibre représenté par la droite 4 s'écrit :



On constate qu'en milieu acide et neutre le fer peut réagir avec les protons (H^+) avec un dégagement d'hydrogène, alors qu'en milieu alcalin il résiste mieux à la corrosion car les oxydes formés ne se dissolvent pas facilement par réaction avec les ions OH^- .

Cette constatation est en bonne accord avec l'expérience. En effet, en milieu neutre ou acide le fer se corrode facilement alors qu'il résiste mieux dans un milieu alcalin comme par exemple dans le béton.

Sur le diagramme de la figure précédente sont aussi représentées les deux droites en pointillés (droite a) et (droite b). Le domaine compris entre ces deux droites correspond au domaine de stabilité de l'eau.

D'une manière générale, ces deux droites délimitent trois régions importantes :

- 1) Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre pour une concentration en ions de 10^{-6} mol/l, est situé en dessous de la droite (a) sont attaqués par l'eau avec dégagement d'hydrogène,
- 2) Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre pour une concentration en ions de 10^{-6} mol/l, est situé entre les droites (a) et (b) ne sont attaqués qu'en présence d'oxygène,
- 3) Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre pour une concentration en ions de 10^{-6} mol/l, est situé au dessus de la droite (b) sont thermodynamiquement stables.

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, les oxydes superficiels formés lors de l'attaque d'un métal peuvent avoir un pouvoir protecteur sur le métal sous jacent. On dit alors dans ce cas que le métal est passivable, le film superficiel prenant le nom de **film passif**. Dans le cas de l'attaque d'un métal par l'eau à 25°C, les diagrammes de Pourbaix permettent donc de définir les domaines théoriques d'immunité, de passivation et de corrosion du métal considéré [9].

Ainsi pour le fer on trouve :

- **Un domaine de corrosion** où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.
- **Un domaine de passivation** où le fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant. C'est un domaine où le métal est protégé contre la solution.
- **Un domaine d'immunité** où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder, les réactions d'oxydations n'étant plus possible. C'est le domaine de la "*protection cathodique*".

CHAPITRE II
Protection des
canalisations enterrées

Protection des canalisations enterrées

II.1 Généralités

La protection contre la corrosion des ouvrages enterrés pourrait être réalisée par l'application de la protection cathodique dite active parce qu'elle agit directement sur le processus de corrosion.

Une autre méthode dite protection passive peut être utilisée. Elle consiste à protéger la canalisation en utilisant des revêtements adéquats (brai+voile de verre (papier kraft)).

II.2 Caractéristiques des aciers API

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

	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	KV 0°C (J)
Grade B AFCS	5 – 20	241 - 448	414-758	≥ 28,8	≥ 27
X42 AFCS	5 – 20	290 - 496	414-758	≥ 28,8	≥ 27
X46 AFCS	5 – 20	317 - 524	434-758	≥ 25,5	≥ 27
X52 AFCS	5 – 20	359 - 531	455-758	≥ 26,4	≥ 40
X56 AFCS	5 – 20	386 - 544	490-758	≥ 24,7	≥ 40
X60 AFCS	5 – 20	414 - 565	517-758	≥ 23,5	≥ 40
X65 AFCS	5 – 20	448 - 600	531-758	≥ 23	≥ 40
X70 AFCS	5 – 20	483 - 621	556-758	≥ 21,7	≥ 40
X80 AFCS	5 – 14	552 -690	621-827	≥ 20	≥ 40

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API [10].

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

Grade	C	Mn	Si	Trace				V	P	S
				Al	Cr	Mo	Ti			
X60	0.19-	1.5-	0.2-	0.02-	≤ 0.02	≤ 0.05	0.03-	0.11-	≤	≤
	0.24	1.35	0.4	0.04			0.04	0.15	0.025	0.025
X100	0.29-	0.15-	0.15-	≤ 0.04	0.5-	≤ 0.05	≤	0.03-	≤	≤
	0.34	0.34	0.30		0.65		0.04	0.07	0.025	0.025

Tableau II.2 : Composition chimiques en (% m) des aciers X60 et X100 [11].

II.3 Facteur agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés

II.3.1 Le sol

Le sol est un milieu complexe comportant des sels minéraux ou organiques, parfois des acides ou des bases libres, même des gaz comme l’oxygène qui font qu’il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qui dans certains cas parfaitement inerte.

II.3.2 Mesure de l’agressivité des sols

La mesure de l’agressivité des sols peut être déduite de la mesure de leur résistivité électrique ρ_s .

Pour l’acier dans le sol, et en fonction de la résistivité de ce dernier, il est admis que [3] :

- $\rho_s > 100 \Omega.m$, le sol est peu agressif, on mesure des résistivités de 200 à 500 $\Omega.m$ et plus dans les terrains pierreux, calcaires ou sable sec,
- $50 \leq \rho_s \leq 100 \Omega.m$, l’agressivité est moyenne,
- $\rho_s < 50 \Omega.m$, le terrain est agressif.

La résistivité du sol peut être mesurée par de nombreuses méthodes, les plus utilisées sont :

II.3.2.1 Méthode des deux barres [4]

Deux barres à mine (électrode) de 1m de longueur sont enfoncées dans le sol à une distance minimal de 10 m l'une de l'autre à l'aide d'un pont de Kohlrausch et on mesure la résistance entre ces deux barres (voir la figure)

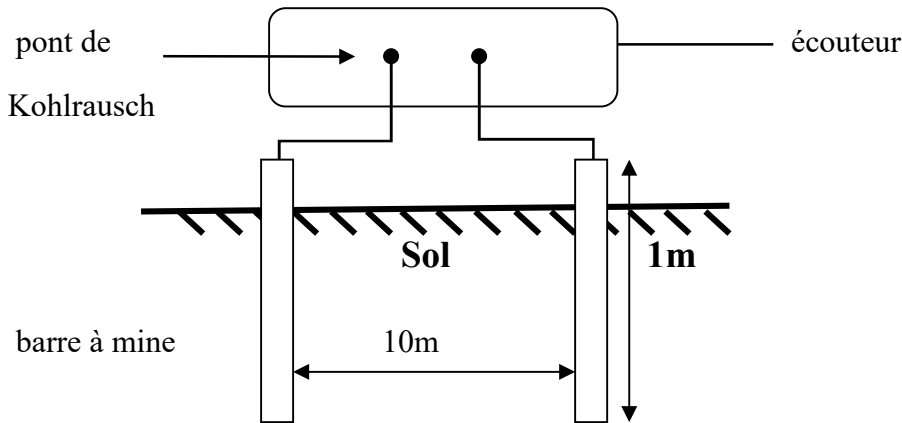


Figure II.1 Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des deux barres [4]

On a :

$$R = \frac{\rho_s}{4\pi c} \quad (\Omega) \dots\dots\dots (7)$$

Où **R** : résistance mesurée au pont en (Ω),

ρ_s : résistivité du sol en (Ωm),

C : capacité électrique constituée par les deux barres en (F).

II.3.2.2 Méthode des quatre barres

Cette méthode (figure II.2) est basée sur la théorie des images électriques. On place 4 électrodes matérialisées par des piquets d'acier de 30 cm de longueur environ en ligne et distante de 1m l'une de l'autre, on injecte un courant dans les piquets externes ce qui crée un champ électrique dans le sol dont on mesure un gradient de potentiel avec les deux piquets intermédiaires selon l'équation suivante :

$$U = \frac{\rho_s I}{2\pi a} \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho_s = 2\pi a \frac{U}{I} \dots\dots\dots (9)$$

Avec :

ρ_s : résistivité du sol ($\Omega.m$),

I : courant injecté en ampère (A),

U : tension entre les barres intermédiaire en volt (V).

La distance "a" d'écartement entre les piquets correspond approximativement à la profondeur jusqu'à laquelle on évalue la résistivité moyenne du terrain.

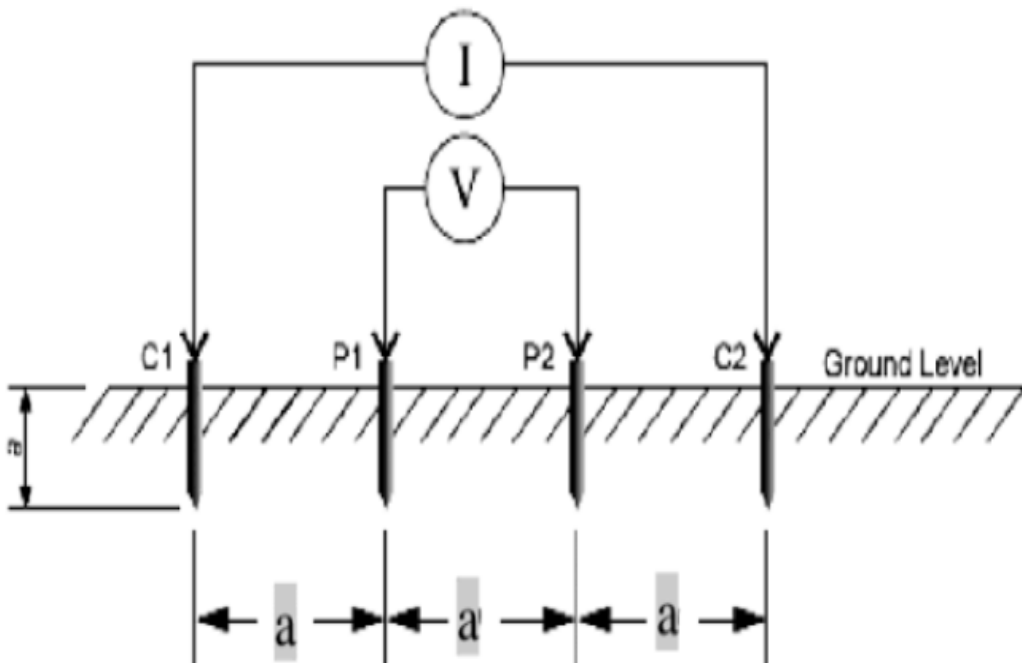


Figure II.2 : Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des 4 barres [4].

II.4 Les différentes protections contre la corrosion

II.4.1 Protection passive

Son rôle est de réaliser l'isolement du métal par rapport au milieu agressif, c'est le but du revêtement pour les conduites enterrées, ou des peintures pour certains ouvrages enterrés ou immergés. Toute imperfection, tout défaut de cet isolement; qu'ils soient d'origine, à la pose de l'ouvrage, ou qu'ils apparaissent au cours de la vie de l'ouvrage, mettent le métal en contact avec le milieu agressif (sol), d'où la nécessité de l'application de la protection active.

Les tensions électriques engendrées par la corrosion se situent entre quelques dixièmes de volts et quelques volts. Les tensions courantes en protections cathodiques et dans les zones à courants vagabonds atteignent quelques dizaines de volts. Celles-ci se situent nettement au dessous de la résistivité des revêtements organiques.

L'efficacité de la protection cathodique se traduit par la résistivité électrique du revêtement qui est fonction de la résistivité intérieure, de l'épaisseur ainsi que du nombre et l'importance des défauts présents.

Les contraintes que subissent les ouvrages lors de la pose et une fois en terre sont multiples :

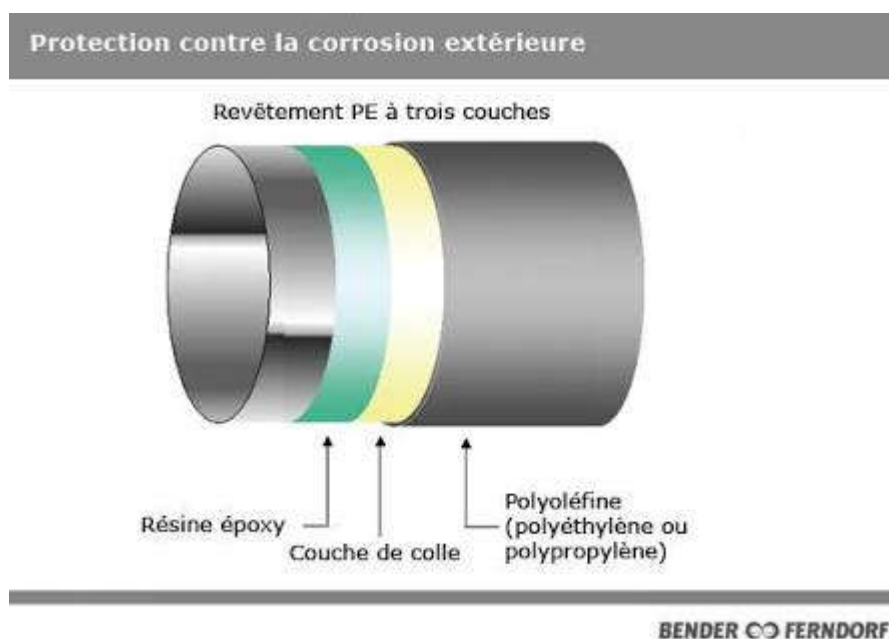


Figure II.3 : Protection passive du pipeline.

II.4.1.1 Contraintes mécaniques

Lors des manipulations et du transport des tubes, le revêtement subit des efforts de tension et de fluage (les vibrations et les chocs). On a aussi l'effort de cisaillement exercé sur les tubes lors du fonçage. Au remblai, il est poinçonné par les pierres et matériaux rejetés dans les fouilles.

II.4.1.2 Contraintes thermiques

Ces contraintes apparaissent au moment du stockage des tubes, et au cours de l'exploitation. Le revêtement doit supporter parfois des températures élevées de l'ordre 80°C aux sorties des stations de compression.

II.4.1.3 Contraintes physico-chimiques

Dans le sol, les matériaux constituant le revêtement absorbent l'eau et les gaz dissous tels l'oxygène et le gaz carbonique. L'absorption d'eau se fait d'abord rapidement dans les premiers mois de la pose à travers les fissures, capillaires et pores du revêtement. Au deuxième stade, beaucoup plus lentement, après dix ans pour les films plastiques à travers le matériau isolant lui-même.

Les exigences demandées pour les revêtements qui sont associés à une protection active sont surtout d'avoir une adhérence parfaite avec le métal pour éviter la migration et le renouvellement d'électrolyte sous l'isolation, ainsi qu'une résistance électrique suffisante dont la qualité ne s'affaiblit pas trop au cours des temps afin de minimiser la puissance des installations de protection cathodique.

II.4.1.4 Résistivité du revêtement et densité de courant [2]

Les spécialistes ont préconisé une méthode permettant de déterminer la résistivité du revêtement d'une canalisation enterrée d'après la formule suivante :

$$R_U = \frac{U_{cf} - U_{co}}{I} \quad (\Omega) \dots \dots \dots (10)$$

R_U : résistance électrique du revêtement,

U_{cf} : potentiel conduite/sol à courant passant (ON) en (V),

U_{co} : potentiel conduite/sol à courant coupé (OFF) en (V),

I : courant protecteur en (A).

A l'aide de cette méthode, on mesure en particulier la résistance du défaut.

Les valeurs mesurées sont légèrement fonction de la résistivité du sol qui, d'une part, n'est pas uniforme le long d'une canalisation et qui, d'autre part, dépend de la température et de l'humidité du sol susceptible de varier suivant les saisons. La moyenne annuelle de ces variations est de $\pm 50\%$ pour les sols incohérents.

Une relation entre R_u et le courant protecteur I résulte de la constatation empirique que R_u est presque proportionnel à la résistance de polarisation.

$$R_u = \frac{\Delta U}{I} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Où } \Delta U = U_{Cf} - U_{CO} = 0.3 \text{ V.} \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{Donc : } I = \frac{0.3}{R_u} \cdot \dots\dots\dots (13)$$

II.4.1.5 Effet de courant protecteur sur le revêtement

Le revêtement protecteur engendre à la surface métal/électrolyte des phénomènes de polarisation qui peuvent aboutir à la formation d'une couche protectrice. Ceci est dû en premier lieu au passage du pH à une valeur plus basique ($\text{pH} > 7$).

II.4.1.6 Catégories de revêtements [3]

On distingue trois grandes catégories de revêtements pour les conduites enterrées :

- **Revêtements à base de produits hydrocarbonés** : Le revêtement est constitué d'un primaire synthétique on hydrocarboné et d'une armature en toile de verre imprégnées d'un liant hydrocarboné, les brais de houille et les bitumes de pétrole, ainsi appliqués, présentent des épaisseurs d'environ 3 mm.
- **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 P.V.C. ou polyéthylène, appliquées sur primaire, et recouvertes d'une bande de protection mécanique supplémentaire.

- **Revêtements à base de produits thermodurcissables :** Ce sont des revêtements constitués par des résines époxydes, d'épaisseur de 500 μm environ, ou par des polyuréthanes ou des produits composites tels les brai-polyuréthanes et les brai-époxydes.

II.4.2 protection active

II.4.2.1 Principe de la protection cathodique

La Protection Cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. La valeur du potentiel, au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9 est -850mV , mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée (Cu/CuSO_4) [12].

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

Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure, figure II.4 :

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive,
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé.

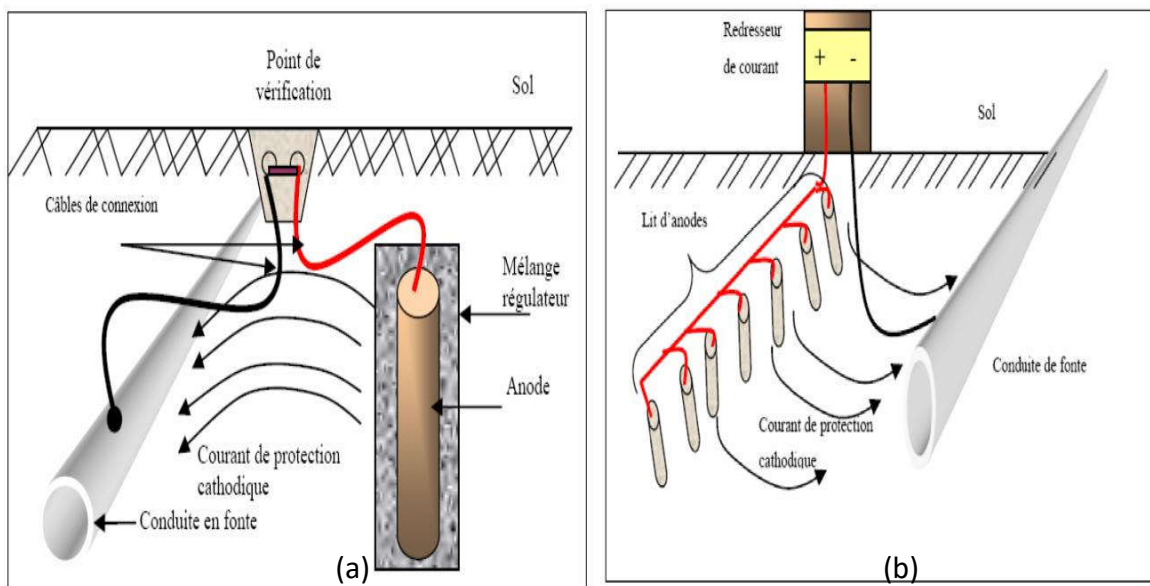


Figure II.4: Principe de protection cathodique (a) Par anode sacrificiel (b) Par courant imposé

[13].

La nécessité de réaliser la protection cathodique des ouvrages métallique enterrés ou immergés est une notion indispensable qui doit être présente à l'esprit de ceux qui étudie et conçoivent ces ouvrages. Donc pour aborder l'étude de la protection cathodique, il faut s'intéresser d'abord aux caractéristiques de l'ouvrage ainsi qu'à son environnement immédiat. Ce n'est qu'ensuite, lorsque toutes les données concernant ces points auront été réunies, que l'étude proprement dite soit réalisée. Cette étude devra être entreprise dès la conception du projet et se poursuivra en fin de travaux de pose de l'ouvrage.

II.4.2.2 Etude de l'environnement (évaluation du risque corrosion)

Au moment de la conception de l'ouvrage, une étude de tracé est préalablement nécessaire. Réalisée à partir de plans et des cartes géologiques, cette étude permettra d'évaluer le risque de corrosion de l'ouvrage en question dans le milieu encaissant, afin de prendre les décisions nécessaire pour diminuer ce risque due principalement à la corrosivité des sols.

La détermination des risques de corrosion de l'acier dans le sol consiste à évaluer l'agressivité du terrain encaissant. Cette agressivité du sol dépend principalement de :

- ✓ Sa nature chimique.
- ✓ Son taux d'humidité
- ✓ pH.
- ✓ La granulométrie.
- ✓ L'aération du milieu.

Ces différents facteurs sont pris globalement en compte dans la mesure de la résistivité du sol (ρ). Une détermination de la résistivité à l'aide de la méthode des quatre piquets (méthode de **Wenner**), en fonction de la distance qui sépare les électrodes (piquets) insérés dans le sol, donne approximativement la résistivité total du sol à une profondeur plus ou moins égale au trois quarts (3/4) par rapport à l'espacement des piquets, la description de la méthode est comme suit :

- Se munir d'un mesureur de terre (**Géohm**) muni de quatre (04) piquets de terre et de câble de raccordement,
- Planter les quatre piquets en respectant l'équidistance (distance "a") entre les piquets. La distance "a" doit être en fonction de la profondeur d'enfouissement requis,

- Accorder les quatre piquets au mesureur de terre, en respectant l'ordre de raccordement du plus près au plus éloigné,
- S'assurer que les quatre entrées du mesureur de terre sont dé-shuntées,
- Lire sur l'afficheur du mesureur de terre la valeur de la résistance,
- Calculer la valeur de la résistivité du sol à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = 2\pi a R_m \dots\dots\dots (14)$$

Avec :

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

a : distance entre les piquets en (**m**),

R_m : résistance, valeur lu sur le mesureur de terre en (**Ω**).

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples chiffrés de la résistivité du sol pour différents milieux

Electrolyte	Résistivité approximative ρ_s ($\Omega.m$)
Eau de mer	0,20 à 0,33
Eaux minéralisées	5 à 15
Eaux potables douces faiblement minéralisées	50 à 100
Marais	3 à 8
Argiles et marnes	5 à 20
Tourbières	50 à 200
Alluvions anciennes	10 à 20
Limons des plateaux	30 à 50
Terre sablonneuse	50 à 150
Sable sec/graves	200 à 2000

Tableau II.3 : Valeurs de résistivité du sol dans différents milieux [14].

A partir des constatations établies ci-avant, on peut imaginer la possibilité de créer la circulation d'un courant électrique entre un métal et la solution qui l'entoure. Le sens du courant passe de la solution vers le métal et de favoriser ainsi, la réaction cathodique au

niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion. La réaction d'oxydation est reportée sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation. C'est le principe de la protection cathodique. Il existe deux manières de réaliser la protection cathodique.

II.4.2.3 la protection par anodes sacrificielles

La protection cathodique d'une canalisation en acier peut être obtenue par liaison électrique à une masse métallique appelée anode sacrificielle ou anode soluble, faite d'un métal moins noble que l'acier, de façon à baisser le potentiel de la conduite en dessous du seuil de protection ($-850 \text{ mV/ Cu/Cu SO}_4$).

En examinant la série des potentiels de corrosion des métaux, on constate que trois métaux (le zinc, l'aluminium et le magnésium) ont des potentiels plus négatifs que celui de l'acier et peuvent, de ce fait, servir d'anodes.

En ce qui concerne les conduites enterrées, les anodes utilisées sont à base de zinc ou de magnésium. En milieu marin, on utilise les anodes à base d'aluminium [15].

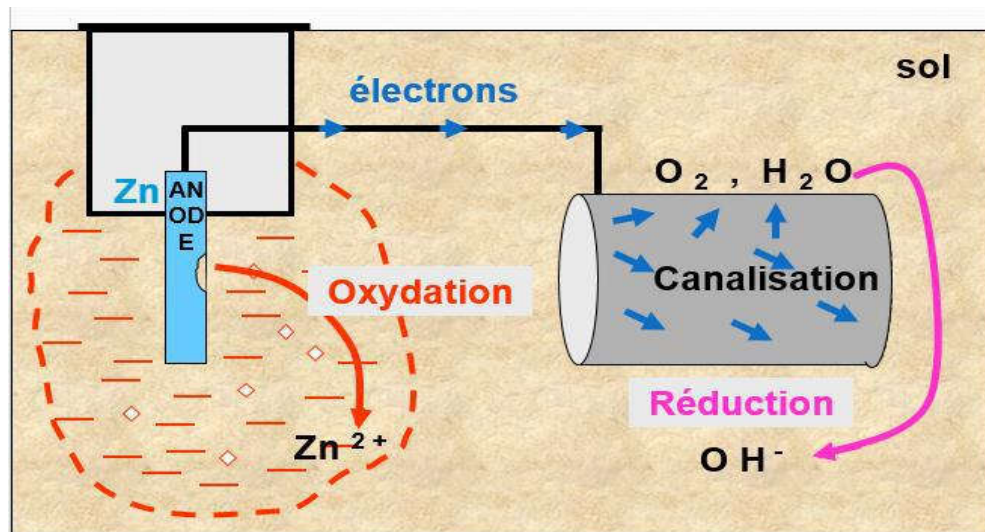


Figure II.5 : Principes de la protection par anodes sacrificielles [16].

Ci-dessous on site quelques types d'anodes sacrificielles :

a) Anodes à base de Zinc

Le zinc utilisé dans la fabrication des anodes est un zinc de haute pureté ($Zn=99,99\%$) additionné en faible quantité d'éléments comme l'aluminium et le cadmium, et dont le

pourcentage de fer ne dépasse pas 0,0014% afin d'éviter la passivation du matériau de base. Les caractéristiques physiques de ces anodes sont :

- Consommation massique pratique : environ 11,9 Kg/A.an
- Potentiel dans le sol : -1100 mV/ Cu/CuSO₄)
- Ecart de potentiel par rapport au critère de protection : 250 mV.

Les anodes en zinc présentent une très grande fiabilité de fonctionnement, et ont de ce fait une très grande durée de vie, avec une consommation presque totale du matériau. Leur domaine d'utilisation est très varié car elles peuvent être employées aussi bien en terrains acides qu'alcalins, en eau douce ou en eau de mer.

Cependant, avec la faible tension de travail qu'elles proposent, on ne les emploie que dans les électrolytes très peu résistants et pour de faibles débits de courant [16]

b) Anodes en Magnésium

Le type d'anodes le plus utilisé correspond à un alliage à 90% de magnésium contenant 6% d'aluminium, et environ 3% de zinc, dont les caractéristiques physiques sont :

- Consommation massique pratique environ 7 Kg/A.an,
- Potentiel dans le sol :-1600 mV/ Cu/CSO₄,
- Ecart de potentiel par rapport au critère de protection : 750 mV.

Les produits de corrosion qui se forment autour de l'anode modèrent leur efficacité après quelques années de service. Pour diminuer cet inconvénient, l'anode est toujours posée dans une boue, mélange de gypse et d'argile colloïdale (bentonite), dont le but est de constituer un milieu assurant une corrosion uniforme de l'anode tout en améliorant son rendement. L'anode en magnésium présente, par rapport à celle de zinc, l'avantage d'offrir une tension plus importante, et donc de permettre son utilisation sur des ouvrages plus importants, dans des terrains de forte résistivité ou en eau douce. Cet avantage général peut, dans certains cas, être un inconvénient, car il se traduit par une durée de vie plus faible, des débits de courant plus importants qui, en milieu marin, peuvent être incompatibles avec la tenue de certaines peintures [7].

c) Anodes en Aluminium

Les anodes en aluminium ne sont pas adaptées à la protection cathodique dans les sols, mais plutôt au milieu marin très conducteur et renouvelé. Les alliages utilisés nécessitent d'être activés par des éléments tel l'indium (0,02%) ou le mercure (0,04%) et contiennent de 1 à 5% de zinc.

Le rôle de ces éléments est de supprimer la couche de passivation formée par l'alumine (Al_2O_3) et rendre plus électronégatif le potentiel de l'anode afin d'en améliorer le rendement. La consommation massique pratique est d'environ 3,2 à 3,5 Kg/A.an. Pour un rendement électrochimique de 95%.

Le potentiel en eau de mer mesuré par rapport à l'électrode (Ag/AgCl) est de -1050 mV (sans activateur, ce potentiel serait de 775 mV et donc insuffisant pour assurer une protection cathodique) [2].

Anodes réactives (matériau)	Avantages	Inconvénients
Le zinc	<ul style="list-style-type: none"> -Prise de l'ampère /an avantageux. -Bon rendement. -Pas de surcharge. 	<ul style="list-style-type: none"> -Poids élevé. -Rayon d'influence limité. -Température d'utilisation limitée à 50°C. -Encrassement : le résidu de corrosion n'est pas conducteur.
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> -Très bon rendement. -Rayon d'influence plus grand que celui du Zinc. -Faible poids. -Prise de l'ampère /an plus bas que celui du Zinc. -Force électromotrice bien adaptée en eau de mer. 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque de polarisation par formation d'alumine à la surface de l'anode. -Encrassement facile.
Magnésium	<ul style="list-style-type: none"> -Rayon d'influence élevé. -Force électromotrice élevée. -Faible poids. 	<ul style="list-style-type: none"> -Force électromotrice surabondante pour la protection en eau salée. -Rendement moyen en eau de mer. -Surcharge locale cloquant la peinture autour de l'anode. -Cout élevé.

Tableau II.4 : Les avantages et inconvénients des anodes sacrificielles [2].

II.4.2.3.1 Précautions à prendre lors l'installation des anodes sacrificielles

Ces anodes sont généralement de forme parallélépipédique elles sont livrées dans un sac de jute contenant des produits pour réguler la corrosion du métal et diminuer la résistivité du sol autour de l'anode.

L'anode est implantée à une distance d'environ 3 m de la conduite à protéger au niveau de la génératrice inférieure de la conduite (voir figure ci-dessous) [2].

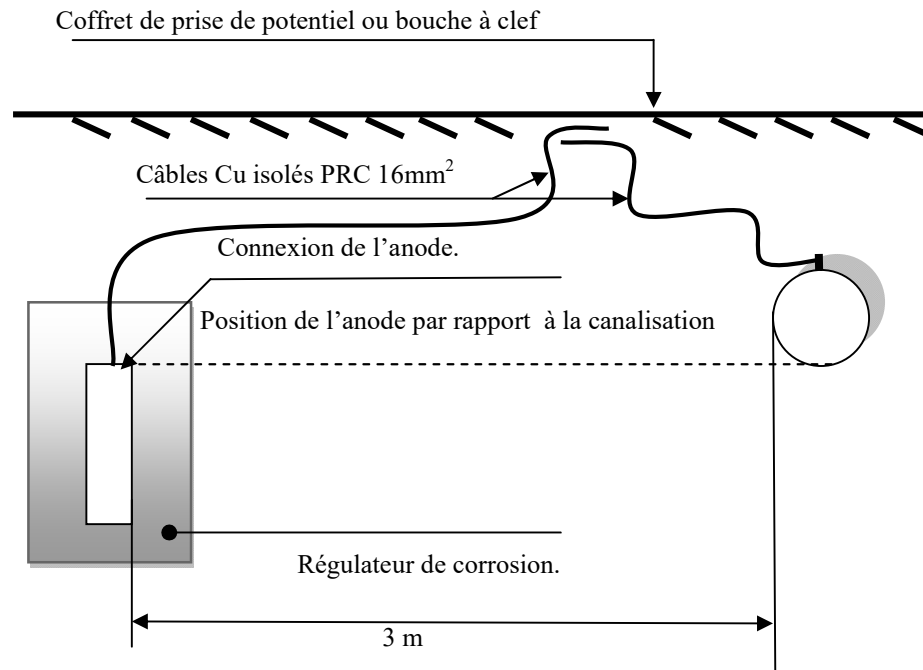


Figure II.6 : Position et distance de l'anode par rapport à la conduite [2].

L'anode est posée horizontalement dans la tranchée. Avant de la remblayer on remplit celle-ci d'eau, de façon à ce que le milieu entourant l'anode devienne une boue épaisse. On termine le remblaiement.

Les anodes doivent être posées dans des terrains à résistivité électrique, inférieure à $30 \Omega \cdot m$ pour l'anode de zinc, et inférieure à $50 \Omega \cdot m$ pour le magnésium. Le terrain doit être le plus humide possible.

II.4.2.3.2 Performances

Les précautions à prendre afin d'assurer des débits pour la protection d'ouvrages qui sont de l'ordre de 1 à 10 mA avec une anode en zinc et de 5 à 20 mA avec une anode en magnésium.

En réalité, le débit délivré par les anodes est fonction de la résistance électrique du circuit, principalement due aux résistances de terre de l'anode et la conduite.

- ✓ La résistance de terre de l'anode, fonction de ses dimensions, dépend de la résistivité du sol ρ_s .
- ✓ La résistance de terre d'une conduite, en fonction de ses caractéristiques en longueur, diamètre, dépend en grande partie de la valeur d'isolement du revêtement. Elle peut

varier de quelques Ohms pour des réseaux mal isolés à 1000 Ω pour des conduites de faibles longueurs bien isolées [18].

II.4.2.3.3 Domaine d'utilisation de la protection par anodes sacrificielles

Les anodes galvaniques ne sont utilisées que pour assurer la protection de réseaux dont l'isolement est correct, de petite envergure (1 à 2 Km de conduites) et pour lesquels, les extensions importantes ne seront pas réalisées dans les années à venir. Elles peuvent aussi être installées pour jouer un rôle de mise à la terre électrique d'un ouvrage, tout en assurant la protection cathodique de l'ouvrage, et en évitant de ce fait, les couples galvaniques acier/cuivre qui peuvent se développer lors de l'utilisation de terres en cuivre dans les terrains très conducteurs.

Dans les autres domaines, les anodes galvaniques sont utilisées avec succès sur des structures complexes, compactes ou longilignes, baignant en eau de mer. L'eau de mer, électrolyte peu résistant (0.3 Ω .m), permet alors des débits de l'ordre de l'ampère [19].

II.4.2.4 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 [19].

Le schéma de la figure (II.7) nous montre le montage d'une protection cathodique.

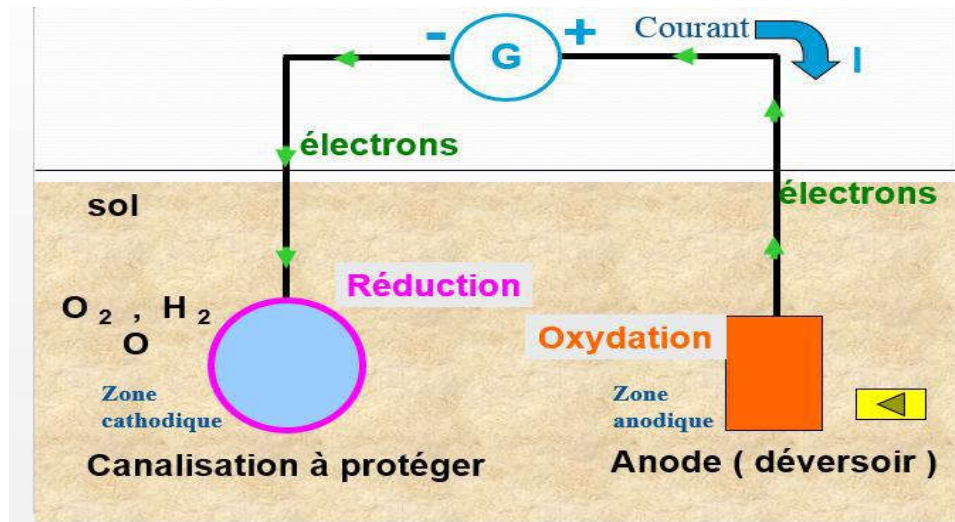


Figure II.7 : Principe de la protection par courant imposé [19].

II.4.2.4.1 Générateur de courant continu

Le poste de soutirage est un générateur de courant continu. Il fournit une intensité de 1A jusqu'à 30A sous une tension 24 à 48 V.

Habituellement il est constitué par un transformateur-redresseur (TR) alimenté à partir d'un rototransformateur. Tous les appareils sont munis d'indicateurs pour le contrôle de leurs fonctionnements et de systèmes de protection par fusibles.

Dans certaines situations, où l'énergie électrique basse tension n'est pas disponible, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres sources d'énergie autonomes. [19].

II.4.2.4.2 Le déversoir

Le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. La masse des matériaux constituant le déversoir devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans [17]. On peut citer comme matériaux de déversoirs :

1. L'acier sous forme de rail :

Type lourd (50 kg au mètre) ou sous la forme de tubes épais utilisés pour le forage. La consommation du déversoir est de 10 kg/A.an. Compte tenu des risques de coupure prématurée du déversoir par corrosion, il est préférable de prendre un coefficient de sécurité de 2 dans le calcul de la masse ou de la longueur du déversoir. Utiliser dans tous les types de sols, eau douce et eau de mer [18].

2. Le Graphite

Il se présente sous forme de rondins de 7 cm de diamètre et de 1,5 mètre de longueur, en poudre de graphite agglomérée par un liant.

La consommation de l'anode est de l'ordre de 1 kg par A.an à condition de ne pas dépasser des intensités supérieures à 2 A par rondin.

Le rondin proposé actuellement est conditionné dans un cylindre de tôle mince agrafé, contenant une poudre de graphite. Après corrosion du container dans le sol, le rondin est en contact avec le sol par l'intermédiaire de ce poussier. Ce mélange conducteur, poreux, favorise l'évacuation des gaz formés au niveau de l'anode, responsables en milieux trop étanches, de désagréments du matériau de base. Les rondins de graphite sont utilisables dans tous les sols mais sont à éviter en milieu liquide [18].

3. Le Ferrosilicium

Il se présente sous la forme de rondins de diamètre 7 cm, de longueur 1,5 mètre, en fonte à 16 % environ de silicium et 4,5 % de molybdène ou de Chrome.

La consommation du matériau est environ de 0,5 kg par A.an avec pour densité limite de 10 A/m². Les rondins de ferrosilicium à 4 % de chrome sont utilisables dans tout les types de sols et de milieux liquides chlorurés [18].

4. La Magnétite

Elle se présente sous forme d'un cylindre creux, en oxyde de fer Fe₃O₄ fondu, de 0,8 mètre de longueur. La connexion du câble d'alimentation à l'intérieur du cylindre est assurée par l'intermédiaire d'une couche de cuivre qui améliore la conductibilité du matériau.

La consommation du matériau de base varie de 1,5 g par A.an, en eau de mer et à 10g par A.an dans les sols. Les intensités maximales supportées par une telle anode sont de 4 A en utilisation dans les sols, à 10 A en utilisation dans l'eau de mer [18].

5. Le Titane platiné

Il se présente sous forme d'un support en titane, d'une forme appropriée recouvert d'une fine couche de platine. La consommation du platine est d'environ 10 mg par A.an avec des densités de courant de l'ordre de 500 à 1000 A au m². Ce matériau n'est utilisé que dans les électrolytes de très faible résistivité, en particulier l'eau de mer, à la condition toutefois d'éviter des montées en tension supérieures à 9 volts aux bornes du support pour ne pas corroder le titane par claquage du film d'oxyde TiO₂ protecteur.

❖ Réalisation de déversoir

La réalisation d'un déversoir se fait comme indiqué sur la figure ci-dessous :

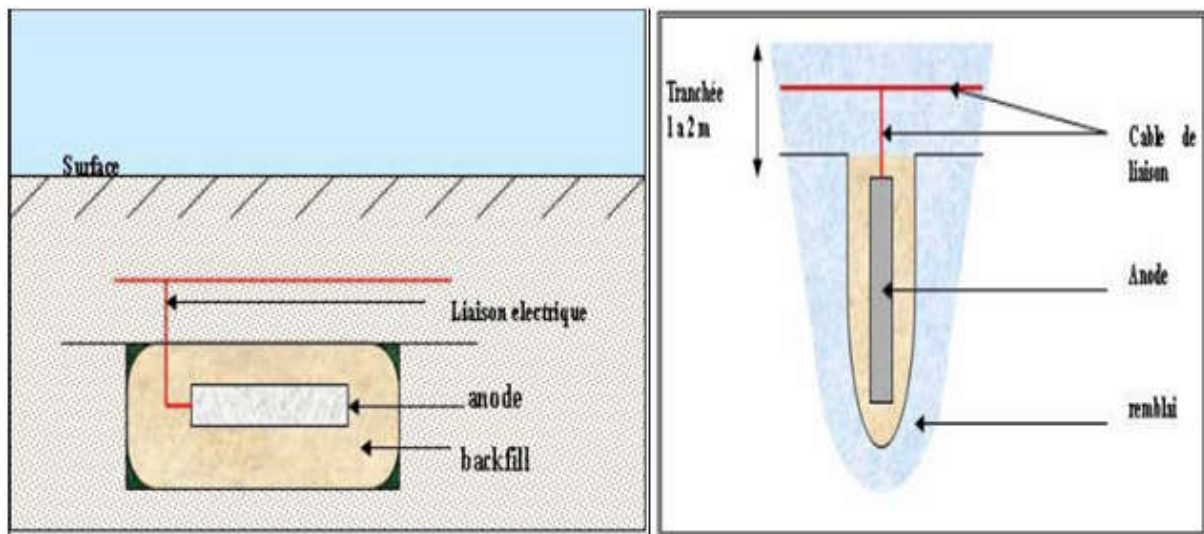


Figure II.8 : Réalisation de déversoir horizontale/ verticale [19].

Les points importants à contrôler lors de l'installation concernent, les soudures, (bout à bout et à cœur), Les éléments de rails et la liaison du câble électrique.

Ces soudures peuvent être réalisées par des procédés aluminothermiques. On veillera en particulier à créer un isolement parfait de ces points avec le sol, pour éviter des coupures prématurées du rail et la corrosion de la connexion du câble [2, 19].

❖ Résistance de terre des déversoirs

La résistance de terre d'un déversoir doit être estimée lors des études, pour être compatible avec les capacités du générateur, et fournir le courant nécessaire ou à prévoir, pour la protection du réseau, compte tenu des extensions prévisibles.

Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions, de la résistivité du sol et peut être calculée par une formule empirique. (Voir partie calcul).

❖ Implantation du déversoir

Le déversoir devra être installé à environ 50 mètres de la canalisation, de façon à favoriser son rayonnement et augmenter ainsi la portée du poste de protection. En règle générale, il faudra veiller impérativement à s'écarter d'au moins 50 mètres de tout l'ouvrage métallique enterré susceptible de capter les courants déversés [19].

II.4.2.4.3 L'anolyte

L'anolyte est le milieu encaissant le remplissage, qui entoure le déversoir. Le terme "**backfill**" est parfois employé.

Lorsque le sol entourant le déversoir n'est pas trop résistant, pour des résistivités supérieures à 90 $\Omega.m$ en ce qui concerne les rails, et 50 $\Omega.m$ pour les rondins. Il peut être nécessaire pour favoriser l'émission du courant, de créer un milieu conducteur autour de l'anode. Ce milieu homogène permettra, de plus, une corrosion plus uniforme du déversoir et prolongera ainsi sa durée de vie. Dans certains milieux très compacts, vases ou argiles, le rôle du backfill de granulométrie appropriée est aussi de favoriser l'émission du gaz, ainsi que d'éviter la formation d'une gangue qui bloque le déversoir.

Le phénomène d'électro-osmose (migration de l'eau sous l'effet d'un champ électrique de l'anode vers la cathode) est responsable de l'assèchement de l'anolyte qui conduit au blocage des déversoirs. La diminution de la résistivité du milieu, ainsi que l'utilisation de matériaux rétenteurs d'eau permettent d'éviter ce phénomène [19].

❖ Principaux backfill utilisés

➤ A base d'argile

Avec 150 litres d'eau on constitue une boue épaisse d'une argile colloïdale (30 Kg de bentonite), additionnée de 10 Kg de gypse en poudre (ou plâtre gâché) et de 2 Kg de sel dénaturé pour améliorer la conductibilité du mélange.

Ce backfill peut être employé avec les déversoirs du type "rail" et avec les rondins en ferrosilicium mais en aucun cas avec les rondins de graphite.

➤ A base de graphite

Il s'agit de poudre de graphite ou de poussier de coke ou de charbon de bois pillé, mélangé avec de la chaux. Ce "**backfill**" est utilisable avec tout type de déversoir, à la dose d'environ 40 Kg par mètre de longueur (30 Kg de poussier, 10 Kg de chaux).

Cette dose peut être augmentée si la résistivité du milieu est très importante, ou si les terrains sont très compacts.

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

Tableau II.5 : Type de bakfill [20].

Chapitre III

Calculs et dimensionnements

Etat de la protection cathodique du RTC

III.1. Poste protection cathodique

Pour bien définir l'état des postes et leurs déversoirs, on donne un extrait des relevés des paramètres mensuels du mois de décembre 2016 pour chaque ouvrage de RTC, où c'est mentionné la tension fournie par le **TR**, le courant continue qui traverse le déversoir, la résistance du déversoir et le potentiel d'injection [2].

III.2. Méthode de relevés des potentiels

Le relevé de potentiel 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 des systèmes extérieurs.
- *Vérification de la continuité électrique ou contact avec d'autres structures métalliques.

Les mesures de potentiel relevées le long du pipeline permettent d'évaluer les variations de la protection cathodique présentes le long de ce dernier. Suite à la campagne de mesures, les résultats sont présentés sous forme graphique permettant d'évaluer le profil de la protection cathodique le long du pipeline et d'évaluer les points non protégés nécessitant une protection supplémentaire [21].

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

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

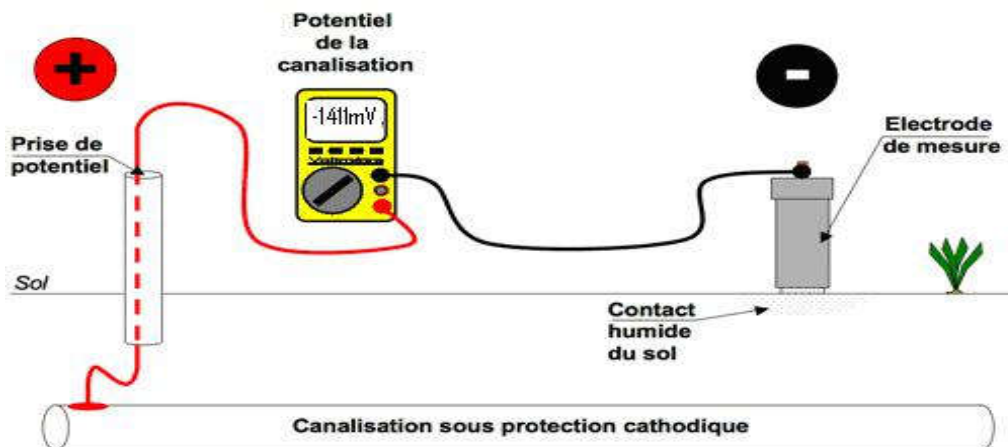
Mesure simple du potentiel

Figure III.1 : Méthode de mesures de potentiels de la protection cathodique [22].

III.3. 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.

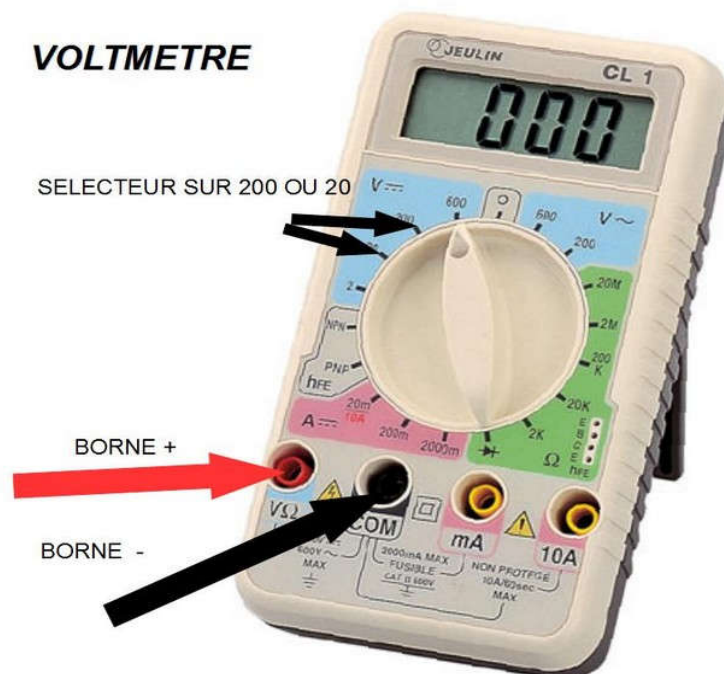


Figure III.2 : Voltmètre [23].

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.

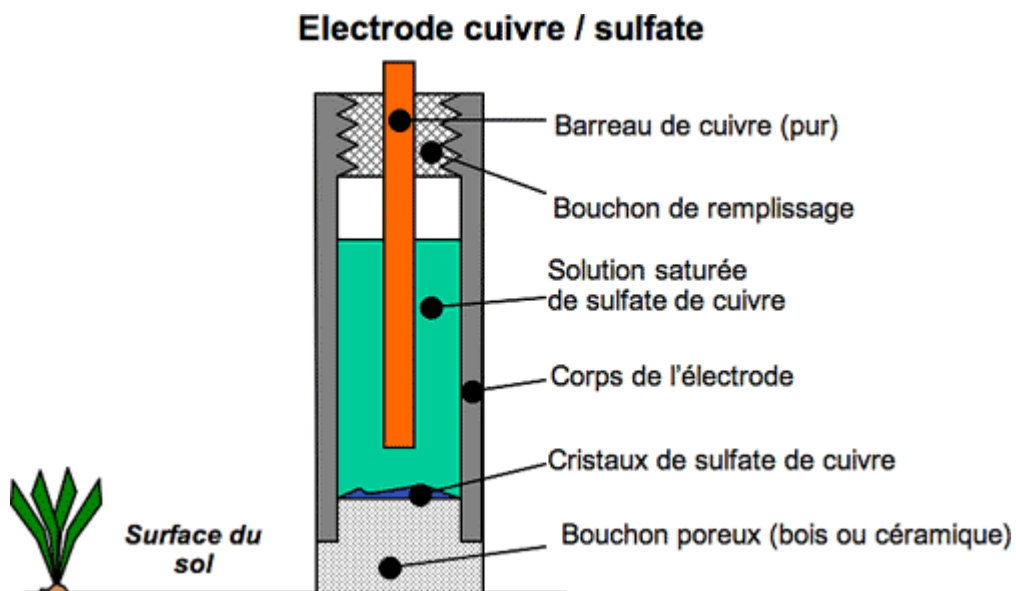


Figure III.3 : Différents types d'électrodes de référence [23].

N°	PK	Localisation	Redresseur				OB1/24''
			Tension U(V)	Courant OB1 I(A)	Courant total I _t (A)	Rés R(Ω)	Potentiel (mV)
1	0,000	TD HEH	9,00	14,20	14,20	0,63	-1152
2	19,150	Route HEH	24,00	23,50	23,70	1,01	-2107
3	38,700	Route HEH	26,02	28,60	38,66	1,82	-2148
4	79,015	H'djira	84,30	27,50	53,00	1,59	-2251
5	119,170	Tougourt	12,50	57,40	76,40	0,16	-1230
6	134,966	SPA Tougourt	2,70	54,40	61,70	0,34	-1495
							-1563
7	151,940	Ghamra	19,20	49,30	64,30	0,30	-1805
8	170,720	Merara	18,20	38,60	68,30	0,27	-1063
9	189,814	SP1 bis	35,50	28,80	41,30	0,86	-1245
				17,00			-1725
10	210,080	Djemaa	30,50	15,00	17,90	1,70	-2150
11	231,000	El Meghier	31,20	47,50	51,00	0,61	-1400
12	254,100	Oum Tiour	58,40	19,00	31,60	1,86	-1908
13	270,600	El Baadj	18,40	30,00	30,00	0,61	-2428
14	313,549	SPB Oumache	20,30	32,90	64,50	0,31	-1119
				33,40			-1168
15	330,470	El H. Biskra	60,00	15,00	15,00	4,00	-1735
16	350,832	SP2	32,60	30,00	65,50	0,50	-1244
				35,50			-780
17	373,431	FDG	19,00	11,60	27,30	0,70	-1530
18	393,328	DHAIA	49,00	41,80	50,20	0,98	-2510
19	420,881	Barika	82,00	29,50	29,50	2,78	-2100
20	449,599	SPC	37,40	22,70	41,30	0,91	-2370
				19,40			-2210
21	472,272	Souamaa	11,45	42,70	42,70	0,27	-2130
22	495,697	Déviation M'sila SP3N	38,20	7,30	7,30	5,23	-2001
							-1744
23	525,020	Dév. H.Delaa	6,44	7,00	7,00	0,92	-2315
24	535,948	H. Delaa	49,20	1,20	1,20	41,00	-537
25	560,858	Dév. Selatna	33,00	0,50	0,50	66,00	-736
26	581,256	SPD	79,00	40,00	40,00	1,98	-1885
27	606,408	Akbou	55,00	65,00	65,00	0,85	-2284
28	644,398	Amizour	68,00	54,00	54,00	1,26	-1200

Tableau III.1 Les paramètres mensuels de la ligne OB1 24''

OB1 24'' : Oléoduc Bejaia 1.

N°	PK	Localisation	Redresseur			OG1 20''
			Tension U(V)	Courant I(A)	Rés R(Ω)	Potentiel (mV)
1	30,00	Bechloul	3,20	1,00	3,20	-1630
2	75,00	Khebouzia	/	/	/	/

Tableau III.2 Paramètres mensuel des PPC de la ligne OG1 20''

PPC : Poste de protection cathodique.

OG1 20'' : Oléoduc Alger 1.

N°	PK	Localisation	Redresseur			Potentiel (mV)
			Tension U(V)	Courant I(A)	Rés R(Ω)	
1	31,880	PPC2 O.Bellil	17,40	5,16	3,37	-1778
2	93,110	PPC5 K. Hiran	66,40	6,20	10,71	-1735
3	141,450	PPC 7 Messaad	42,00	12,20	3,44	-2109
4	213,000	PPC 9 Mouileh	74,00	12,50	5,92	-2200
5	252,300	PPC 10 Medjdel	40,00	44,00	0,90	-2380
6	283,340	PPC 11 Sidi Aneur	82,00	8,00	10,25	-1400
7	311,316	PPC 13 Ain Lehdjel	89,00	28,00	3,17	-3160
8	326,650	PPC 14 Sidi Aissa	14,00	63,30	0,22	-1300
9	335,692	PPC 15 Sidi Aissa	22,70	59,00	0,38	-3480
10	351,010	PPC 16 Dirah	37,50	55,50	0,67	-1100
11	368,125	PPC 17 Bordj Kheris	79,50	24,00	3,31	-1650
12	389,300	PPC 18 Ain Bessam	55,00	50,00	1,10	-2100
13	409,489	PPC 19 Aomar Gare	21,00	69,20	0,30	-1510
14	428,116	PPC 20 Chabet El Aneur	18,50	60,00	3,00	/
15	438,846	PPC 21 B.ménaiel	14,00	21,00	0,66	-1950

Tableau III.3 Les paramètres mensuels des PPC de la ligne GG1 24''

PPC : poste de protection cathodique.

GG1 24'' : Gazoduc Alger 1.

N°	PK	Localisation		Redresseur			DDP station					
				Tension U(V)	Courant I(A)	Rési R(Ω)	Potentiel (mV)					
1	189	SP1 bis nouvelle		37,60	62,70	0,60	-1160	-880				
2	350	SP2	BY-pass	21,50	26,40	0,32	-1344	-1173				
									41,60			
3			Rés de purge	7,20	23,80	0,30	-1560	-900				
4			Bac 2A1	29,70	57,70	0,51	-1330	-1740	-1366			
			Bac 2A2							-924	-1232	-1137
			Bac 2Y1							-1300	-1183	-1166
5	495	SP3	Rés de purge	4,62	8,20	0,56	-1085	-1390				
6			Bac 3A1	2,91	8,00	0,36	-0,02	0,2	0,01			
							-0,03	0,12	-0,05			
							-0,11					
7			Bac 3A2	3,00	8,60	0,35	0,03	0,05	-0,11			
							-0,03	0,16	0,04			
							-0,01					
8			Bac 3Y1	2,91	2,00	1,46	0,09	0,08	-0,14			
9			Bac B302	1,60	7,50	0,21	0,09	0,13	0,13			
10			668	Terminal marin Béjaia	TM Sud	19,10	72,40	0,26				
11	TM Nord (TR1)	25,50			95,50	0,27						
12							TM Nord (TR2)	27,00	55,00	0,49		
13	SPM	47,50			10,00	4,75						

Tableau III.4 Paramètres mensuel des PPC des ouvrages concentrés OB1.

PPC : poste de protection cathodique,

OB1 : Oléoduc Bejaia 1,

DDP : Différence de Potentiel,

SP : Station de Pompage.

N°	PK	Localisation	Redresseur			DDP
			Tension R(V)	Courant I(A)	Rési. R(Ω)	Potentiel (mV)
1	181	SC3 Moudjbara	55,00	7,80	7,05	-1100
2			/	/	/	-1000
3			49,00	20,50	2,39	-1520
4			56,00	9,00	6,22	-690
5			51,80	15,50	3,34	-790

Tableau III.5 Paramètres mensuel des PPC du SC3.

SC3 : Station de compression.

N°	PK	Localisation	Redresseur			
			Tension U(V)	Courant I(A)	Rési. R(Ω)	Potentiel (mV)
1	0,00	TD SBM	11,70	61,10	0,19	-1240
2	144	TA Alger	9,82	5,73	1,71	-1152

Tableau III.6 Paramètres mensuel des PPC, ouvrages concentrés d'OG1.

III.4. L'état du potentiel : on va représenter l'état des potentiels de chaque ligne, à l'aide des courbes d'évolution du potentiel, qui sont établies par rapport aux résultats des campagnes de mesures ON.

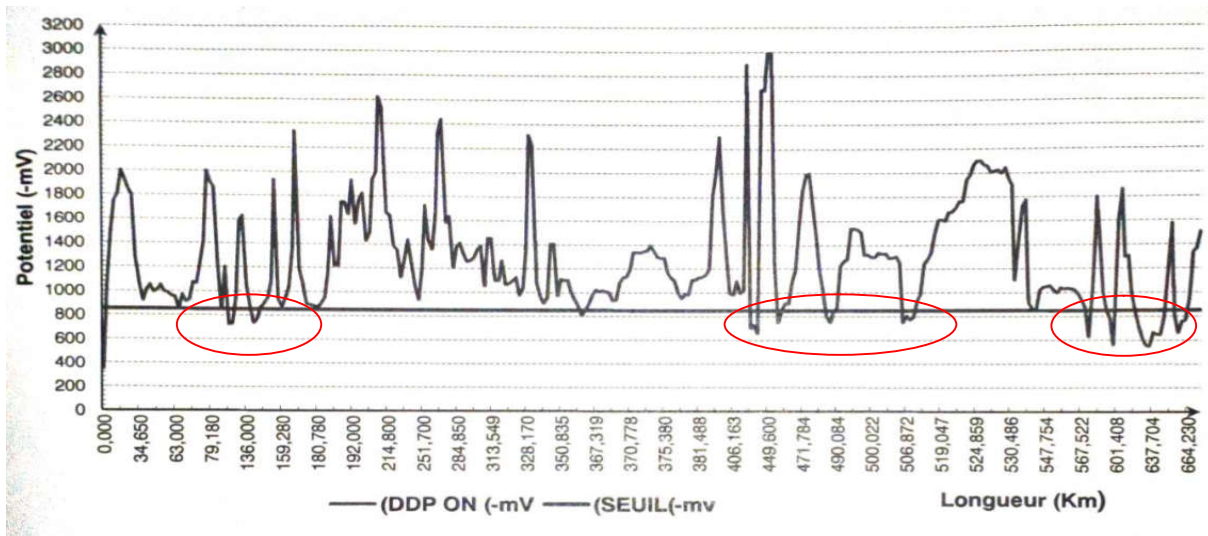


Figure III.4 : Courbe d'évolution du potentiel OB1.

OB1 : Oléoduc Bejaia 1.

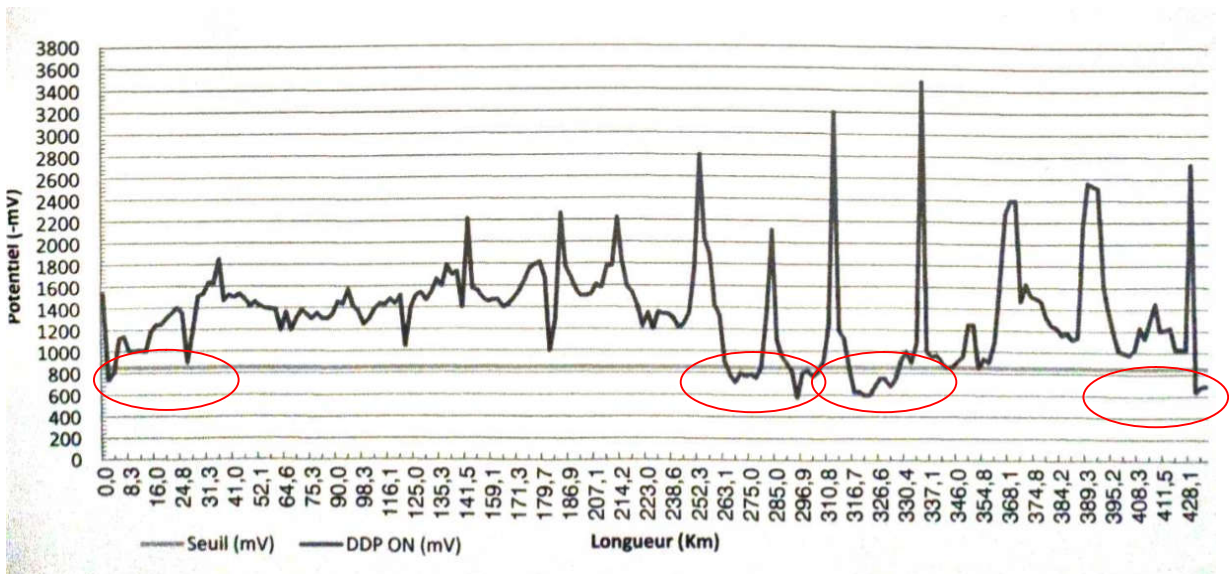


Figure III.5 : Courbe d'évolution du potentiel GG1.

GG1 : Gazoduc Alger 1.

Les zones entourées en rouge sont les endroits où l'ouvrage n'est pas protégé, leurs potentiels est en dessous du domaine de protection, ce qui nécessite une protection cathodique.

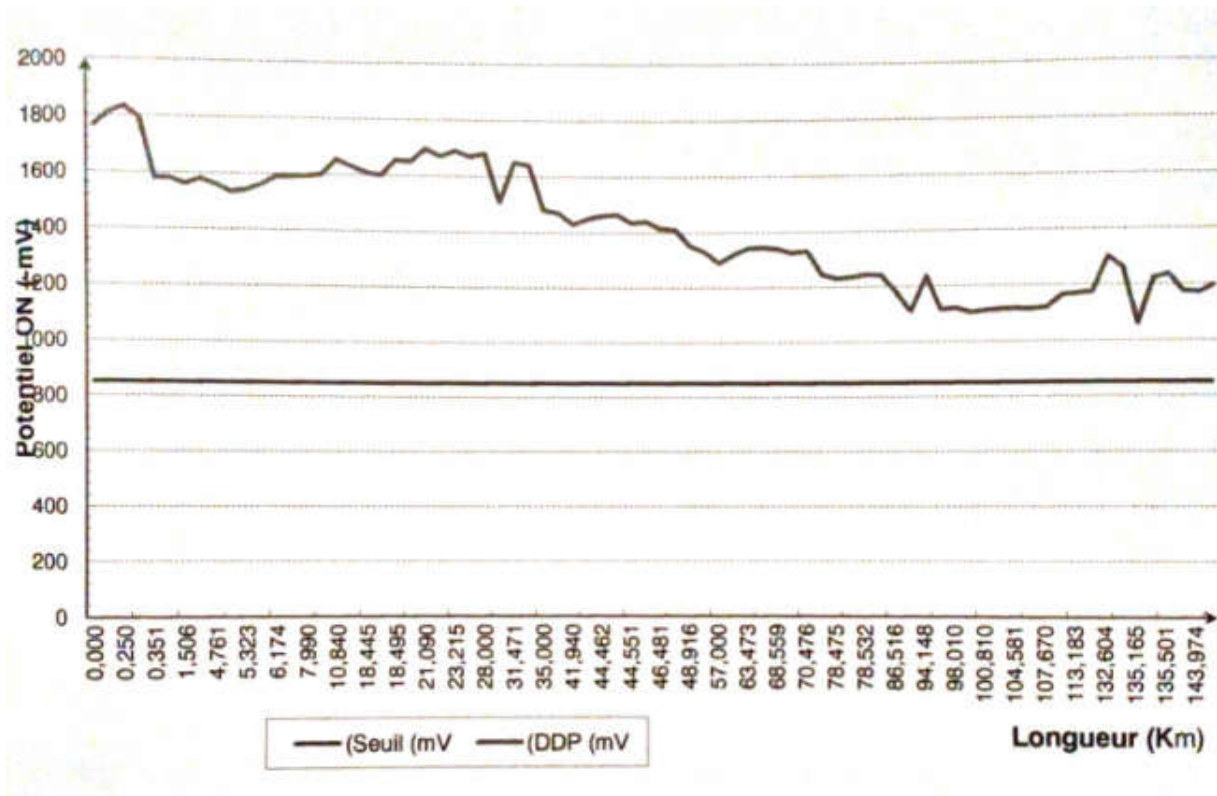


Figure III.6 : Courbe d'évolution du potentiel D'OG1.

OG1 : Oléoduc Alger 1.

Outil intelligent

Appelé également racleur intelligent, on le propulse dans les canalisations au moyen lanceur/récepteur, mais on peut également le tirer avec un câble. Les racleurs circulent avec le produit transporté dans le pipeline, ce qui évite d'arrêter ou de mettre hors service ce dernier pour l'inspecter. Ces outils sont équipés de commande intelligentes et de technologies de pointe telles que les capteurs et les émetteurs, le GPS, les champs magnétiques, les ultrasons...etc, afin de repérer les problèmes existants (corrosion, fissures, piqures..) et d'en identifier les causes. Donc grâce à cet outil, les anomalies sont détectées rapidement et avec une très grande précision et cela favorise une protection optimale pour les canalisations [2].



Figure III.7 : Racleur intelligent [2].

III.5. Dimensionnement d'un déversoir vertical

On construit un déversoir de profondeur lorsque la résistivité du sol est importante en surface, et que la résistivité diminue quand la profondeur augmente. On l'utilise aussi dans des zones habitées suite aux interférences sur les structures voisines.

III.5.1. Déversoir vertical

Il s'agit d'introduire les anodes dans un tube de casing qu'est posé dans un forage. Les anodes sont constituées de plusieurs chapelets. En générale un chapelet comporte 3 à 4 anodes et qu'est posé verticalement à l'intérieur du casing [2].

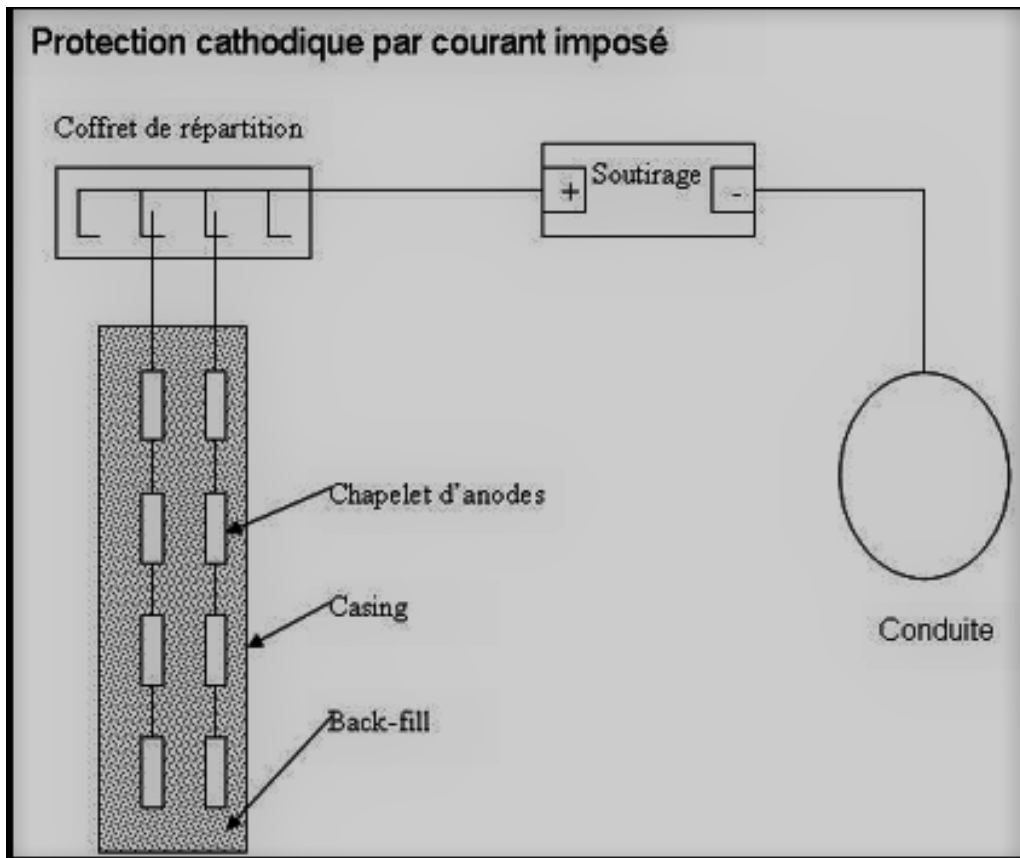


Figure III.8 : Schéma représentant un déversoir vertical [3].

III.5.2. Détermination de la profondeur

La profondeur d'un déversoir verticale dépend essentiellement de deux paramètres, la résistivité du sol de l'endroit choisi pour la réalisation du déversoir et la résistance de terre déversoir. Si on réuni ces deux paramètres, alors il suffit de déduire le facteur F où :

$$F = \frac{R_A}{\rho} \text{ m}^{-1} \dots\dots\dots (15)$$

Où : **F** : facteur

ρ : c'est la résistivité de sol

R_A : la résistance de terre du déversoir

Le tableau suivant nous donne la longueur de déversoir et la profondeur de pose des anodes

t(m) l(m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
5	0.1291	0.11700	0.11848	0.11392	0.11342	0.11309	0.11287
10	0.07558	0.07091	0.06952	0.06884	0.06844	0.06817	0.06798
15	0.04569	0.05215	0.05117	0.05065	0.05032	0.05009	0.04993
20	0.04331	0.04169	0.04097	0.04055	0.04028	0.04008	0.03994
25	0.03607	0.03945	0.03439	0.03404	0.03381	0.03364	0.03351
30	0.03102	0.03020	0.02975	0.02946	0.02926	0.02912	0.02900
35	0.02729	0.02666	0.02629	0.02605	0.02587	0.02547	0.02664
40	0.02414	0.02391	0.02361	0.02340	0.02324	0.02313	0.02303
45	0.02212	0.01217	0.02145	0.02127	0.02113	0.02103	0.02094
50	0.02024	0.09900	0.01968	0.01952	0.01940	0.01930	0.01923
55	0.01868	0.01839	0.01820	0.01806	0.01795	0.01786	0.01779
60	0.01735	0.01711	0.01694	0.01681	0.01671	0.01664	0.01657
65	0.01621	0.01600	0.01585	0.01574	0.01565	0.01558	0.01552
70	0.01522	0.01504	0.01491	0.01480	0.01472	0.01466	0.01460
75	0.01435	0.01419	0.01407	0.01398	0.01391	0.01384	0.01379
80	0.01358	0.01344	0.01333	0.01325	0.01318	0.01312	0.01308
85	0.01290	0.01270	0.01267	0.01260	0.01253	0.01284	0.01244
90	0.01282	0.01217	0.01208	0.01200	0.01195	0.01190	0.01186
95	0.01173	0.01162	0.01154	0.01148	0.01142	0.01138	0.01134
100	0.01122	0.01113	0.01105	0.01099	0.01094	0.01090	0.01086

Tableau III.7 : Longueur de déversoir et la profondeur de pose des anodes [2].

Il suffit de projeter la valeur de F calculé dans le tableau sur les colonnes t et L , nous aurons la profondeur de pose et la longueur de déversoir.

Par exemple si on a la résistance de terre du déversoir $R_A=0.3 \Omega$ par estimation au nombre d'anodes et leurs résistance, et la résistivité de sol $\rho=10\Omega \text{ m}$ à l'aide un ohmmètre, en

appliquant la formule précédente $F = \frac{R_A}{\rho} = \frac{0,3}{10}$ ce qui nous donne $F=0.030\text{m}^{-1}$

D'après le tableau on obtient un déversoir d'une longueur de 30m et d'une profondeur de recouvrement (profondeur de pose) d'environ 7m.

Après avoir déterminé la longueur L et la profondeur t, on peut calculer d'une manière plus exacte en utilisant la formule suivante :

$$R_A = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{D} \dots\dots\dots (16)$$

Où :

R_A : résistance de contact au sol d'une anode,

ρ : c'est la résistivité électrique de sol en (Ω m),

L : c'est la longueur des anodes,

D : c'est le diamètre des anodes,

On peut utiliser une autre formule plus simplifiée.

$R_A = F \cdot \rho$ ou le facteur F est donné par cette formule

$$F = \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{4L}{D} \dots\dots\dots (17)$$

III.5.3. La portée et le courant de la protection cathodique

La portée de la protection cathodique dépend de plusieurs paramètres qui sont donnés en fonction des caractéristiques techniques de la canalisation à protéger :

a) La densité de courant protecteur i_s

La densité de courant protecteur décrit le courant électrique qui circule dans 1 m² de la canalisation, qui assure la polarisation de cette dernière.

La densité du courant protecteur des structures en acier dépend de la qualité et l'état de leur revêtement, on donne quelques densités adoptées pour assurer la protection des aciers selon leurs revêtements.

Type de revêtement et état de la structure	Densité de courant approximative $i(\text{mA/m}^2)$
Acier un enterré avec activité bactérienne	300 à 500
Acier un en eau de mer très agitée	100 à 500
Acier un en eau de mer calme	50 à 80
Acier un enterré (hors activité bactérienne)	20 à 50
Acier un noyer dans du béton	0.5 à 2
Acier un noyer dans du béton poreux et dégradé	2 à 10
Conduite d'acier immergé avec revêtement à liant hydrocarboné	0.05 à 1
Conduite d'acier enterré avec revêtement à liant hydrocarboné	0.3 à 0.6
Conduite d'acier enterré avec revêtement à liant hydrocarboné en bon état ou de résine époxydique	0.01 à 0.15
Conduite revêtu en polyéthylène	0.005 à 0.1

Tableau III.8 : Type de revêtement et leur densité de courant [2].

b) La chute de potentiel ΔU_L

Pour déterminer la chute de potentiel il faut choisir le potentiel maximum au niveau de l'installation de protection. Tenir compte que le potentiel maximum à l'extrémité du tronçon protégé est de -850 mV par rapport à l'électrode de (Cu/Cu²⁺SO₄), la différence entre les deux potentiels nous donne la chute de potentiel ; par exemple si le potentiel de l'injection égale a -1500 mV donc :

$$\Delta U = -850 - (-1500) \text{ nous aurons alors une chute de potentiel de } \mathbf{650 \text{ mV}}$$

c) La résistance linéique de la conduite R'

La résistance linéique est donnée par cette formule :

$$R' = \frac{1}{f \times A} \dots\dots\dots (18)$$

Où f c'est la conductibilité du fer qui est égale a $\mathbf{5,6.10^6 \text{ S/m}}$

Et

$$A = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4} \dots\dots\dots (19)$$

Avec :

D : le diamètre extérieur du tube (en m)

d : le diamètre intérieur du tube (en m)

On peut écrire alors :

$$R' = \frac{1}{\rho \times \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}} \dots\dots\dots (20)$$

III.5.3.1. La formule de Von Baeckmann-Schwenk

La formule de Von Baeckmann-Schwenk nous donne la portée de la protection cathodique, qui est en fonction de la densité du courant protecteur, la chute du potentiel et le diamètre du tube, est donné par :

$$2L = \sqrt{\frac{8 \times \Delta U L}{\pi \times D \times i_s \times R'}} \dots\dots\dots (21)$$

Où :

2L est la portée de la protection cathodique en Km.

L'intensité de courant de protection : le courant protecteur délivré par un déversoir I_0 est donné comme suit :

$$2I_0 = 2L \cdot \pi \cdot D \cdot i_s \dots\dots\dots (22)$$

III.5.3.2. La formule de Morgane

En raison de vieillissement des canalisations et la dégradation de l'état de leurs revêtements, un courant très important est demandé pour assurer leurs protections, il n'est pas possible de réduire le potentiel d'injection au niveau de l'installation pour ne pas trop réduire la portée de la protection.

C'est la raison pour laquelle on tolère des potentiels plus élevés au point d'injection, donc on peut avoir le profil de potentiel à partir de la portée de la protection, à base des équations fournis par la théorie des lignes et la formule de Morgane. L'application de la formule de Morgane fait appel à des données et symboles suivants [3] :

- ❖ d : diamètre nominal (en m).
- ❖ D : diamètre extérieur (en m).
- ❖ e : épaisseur de la paroi des tubes (en m).
- ❖ A : section moyenne du tube (en m^2).
- ❖ O' : circonférence de la conduite (en m).
- ❖ i_s : densité de courant protecteur (en A/m^2).
- ❖ U_0 : potentiel conduite/sol maximal au point d'injection à courant passant (en V).
- ❖ U_x : potentiel conduite/sol aux extrémités du domaine de protection à courant passant (en V).
- ❖ U_{FE} : potentiel naturel du fer dans le sol ($U_{FE(Cu/CuSO_4)} = -0.55V$).
- ❖ f_{FE} : conductibilité du fer ($f_{FE} = 5,6 \cdot 10^6 S/m$).
- ❖ G' : perdiance linéique de la conduite (en S/m).
- ❖ R' : résistance linéique de la conduite (en Ω/m).
- ❖ α : affaiblissement linéique de la conduite (en m^{-1}).

Avec :

- $D = d + 2.e \dots\dots\dots (23)$
- $A = \frac{(D^2 - d^2). \pi}{4} \dots\dots\dots (19)$
- $R = \frac{L}{A.f} \dots\dots\dots (24)$
- $R' = \frac{1}{A.f} = \frac{4 \cdot 10^6}{(D^2 - d^2). \pi.f} \dots\dots\dots (25)$
- $O' = D.\pi.10^{-3} \dots\dots\dots (26)$
- $\Delta U_x = U_x - U_{FE} = 0.85 V - 0.55 V = 0.3V \dots\dots\dots (27)$
- $G' = \frac{O'.i_s}{\Delta U_x} = \frac{O'.i_s}{0.3 V} \dots\dots\dots (28)$
- $\alpha = \sqrt{R'.G'} \dots\dots\dots (29)$
- $\Delta U_0 = U_0 - U_{FE} = U_0 - 0.55 V \dots\dots\dots (30)$

$$\Delta U_0 = \Delta U_x \cdot \cosh \alpha \cdot L \Rightarrow \frac{\Delta U_0}{\Delta U_x} = \cosh \alpha \cdot L \Rightarrow L = \frac{\operatorname{arccosh} \frac{\Delta U_0}{\Delta U_x}}{\alpha} \dots\dots\dots (31)$$

- $\operatorname{arccosh} x = \ln (x + \sqrt{x^2 - 1}) \dots\dots\dots (32)$

D'où l'équation de la portée est :

$$L = \frac{\ln \left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U_x} + \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U_x}\right)^2 - 1} \right)}{\alpha} \dots\dots\dots (33)$$

Et le besoin de courant est donné comme suit :

$$2I_0 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \Delta U_x}{R'} \cdot \sinh \alpha \cdot L \dots\dots\dots (34)$$

Avec $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \dots\dots\dots (35)$

Alors

$$2 \cdot I_0 = \frac{\Delta U_x \cdot \alpha (e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})}{R'} \dots\dots\dots (36)$$

Par exemple pour une conduite ayant un diamètre de 1000 mm et une épaisseur de 12mm, si on impose une densité de courant protecteur de 0.1 mA et un potentiel d'injection de -2500 mV, l'application de la formule de Morgan nous donne :

Une portée de protection de $2L=72\text{Km}$ et une intensité du courant $2I_0=57\text{A}$.

On peut calculer une longueur X à l'intérieur de la portée à un potentiel donné, en fonction de l'abaissement de potentiel ΔU .

Où
$$\Delta U = \frac{\Delta U_0 \times \cosh \alpha (L - X)}{\cosh \alpha L} \dots\dots\dots (37)$$

Donc :

$$X = L - \frac{\ln \left\{ \frac{\Delta U (e^{-\alpha L} + e^{-\alpha L})}{2 \Delta U_0} + \sqrt{\left[\frac{\Delta U (e^{-\alpha L} + e^{-\alpha L})}{2 \Delta U_0} \right]^2 - 1} \right\}}{\alpha} \dots\dots\dots (38)$$

Comme le montre le schéma suivant :

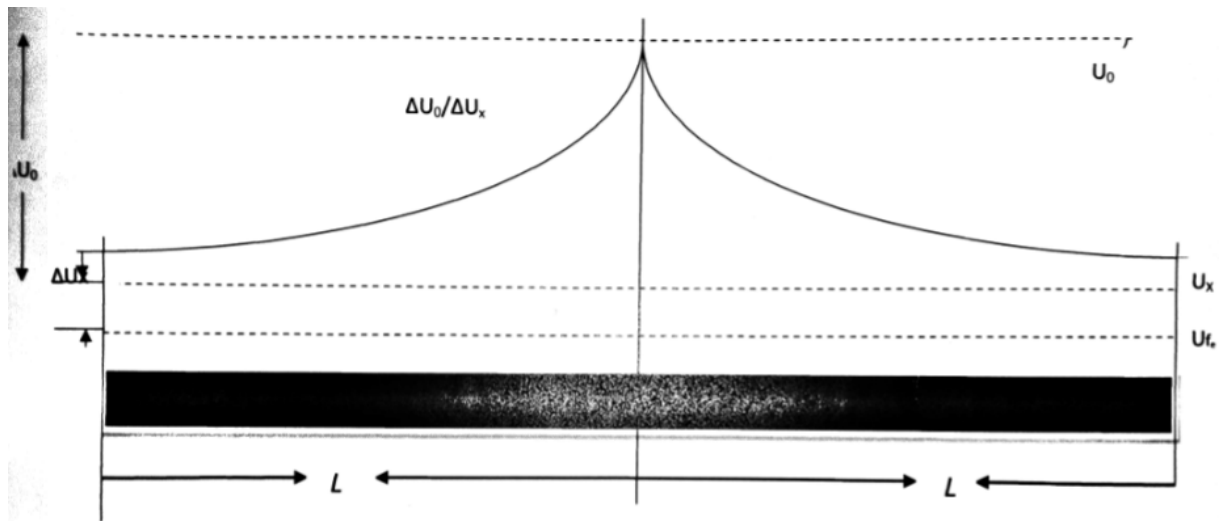


Figure III.9 : La portée de la protection en fonction du potentiel [2]

III.6. Détermination de la masse anodique

La masse anodique se détermine en fonction de courant demandé et le choix des anodes, vu que la densité du courant, la masse spécifique et sa forme géométrique des anodes vari selon des différents types anode.

On donne quelque type d'anodes et leurs caractéristiques

Type d'anode	Consommation .../A.an	Densité de courant A/dm ²	Masse spécifique g/cm ³
Ferrailles	9 kg	pas limitée	7.8
Ferro-silicium	0.3 kg	0.3	0.2
Magnétite	0.01 kg	1.2	/
Graphite	1 kg	0.08	1.6
Titane platine	9 mg	5 à 7	4.5
Niobium platine	9 mg	10	8.57
Tantale platine	9 mg	20	16.6

Tableau III.9 : type d'anodes et leurs caractéristiques [2]

Une fois les anodes sont choisi, on calcule la surface total a l'aide de la densité du courant du type d'anode choisi ; ensuite en devise sur la surface d'une anode pour avoir le nombre d'anode qui est effectivement la mase anodique.

La durée de vie du déversoir dépend du courant débité et sa consommation qui est donnée en Kg/A.an.

Exemple : pour un déversoir de 100 kg de ferrailles et qui débite 5A, et la consommation de la ferraille est de 9 kg/A.an donc :

$$t = \frac{m_d}{(I.m_c)} \dots \dots \dots (39)$$

avec : m_d : masse du déversoir en (Kg)

I : le courant

m_c : masse consommée de l'anode

$$t = \frac{100}{(5 \times 9)} = 2.2 \text{ années}$$

Vu que le déversoir se consomme pratiquement à 80% ; la durée de vie de ce déversoir est environ de 2 ans.

III.6.1. Etude du dimensionnement et réalisation du déversoir vertical d'Akbou

D'après la Figure III.4, on voit que le tronçon de 12 Km entre Akbou et O. Amizour de la ligne OB1 est infecté, ce qui nécessite une protection cathodique. On va étudier le cas de la réalisation du déversoir du tronçon entre le PK 620 et PK 632.

III.6.1.1. Calcul de la résistance linéique R'

Pour procéder au dimensionnement ; il faut avoir certains données techniques sur la canalisation

- Le diamètre de la canalisation: $22'' = 0,57\text{m}$, avec $1'' = 2,54\text{ cm}$,
- L'épaisseur de la paroi : $8\text{mm} = 0.008\text{m}$,
- R' : La résistance linéique de la conduite
- $2L$: la longueur du tronçon à protéger : 12 KM

$$R' = \frac{1}{f \times A}$$

Avec
$$A = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$$

Où $d = D - 2s = 0.554$

Et ρ c'est la conductibilité du fer égale à $5,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.

Donc :

$$R' = \frac{1}{\rho \times \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}} = \frac{1}{5,6 \cdot 10^6 \times \frac{((0,57)^2 - (0,554)^2) \cdot 3,14}{4}} = 12,64 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega/\text{m}.$$

III.6.1.2. Calcul de la densité du courant protecteur i_s , qu'il faut pour que la ligne soit polarisée :

Pour la déterminer on prend un cas réel, le poste de Ou.A, vu que les deux postes marchent dans des mêmes conditions.

Le poste marche avec un courant de 60A et protège une longueur de 10Km d'après les résultats et la campagne de mesure ON.

Pour avoir la densité il suffit de diviser le courant I sur la surface de la canalisation S

$$S = \pi \cdot D \cdot L \dots \dots \dots (40)$$

D est le diamètre de la canalisation, $D=22''=0,57\text{m}$.

Donc : $S = 3,14 \times 0,57 \times 12 \times 10^3$

Ce qui nous donne : $S=21477,6 \text{ m}^2$

$$i_s = \frac{I}{S} = 60/21477,6 = 2,8 \text{ mA/m}^2$$

III.6.1.3. Calcul de la portée de la protection cathodique.

1) calcul chute de potentiel

$$2L = \sqrt{\frac{8 \times \Delta U_L}{\pi \times D \times i_s \times R'}} \Rightarrow \Delta U_L = \frac{4L^2 \cdot \pi \cdot D \cdot i_s \cdot R'}{8}$$

$$\Delta U_L = (4 \times 6^2 \times 3,14 \times 0,57 \times 2,8 \times 12,64) / 8 = 1140,2 \text{ mV}.$$

2) Calcul du potentiel injecté

$$\Delta U = 1140,2 + 850 = 1990,2 \text{ mV}.$$

Donc la portée de la protection cathodique que nous aurons est de 6km de part et d'autre de l'endroit d'installation du puits anodique.

III.6.1.4. Le courant I_0 qu'il faudra pour assurer la protection de ce tronçon

$$2I_0 = 2L \cdot \pi \cdot D \cdot i_s = 12 \cdot 10^3 \times 3,14 \times 0,57 \times 2,8 \cdot 10^{-3} = 60,13 \text{ A}$$

Alors pour que les 12 km soient protégés il faut que le déversoir débite un courant de 60,13 A.

III.6.1.5. La masse anodique de déversoir d'Akbou

Pour avoir une masse anodique assez léger et une durée de vie du déversoir assez longue, Sonatrach a choisi le **Ti-MMO** (mixed metal-oxide) comme matériaux de déversoir vu ces caractéristiques suivantes :

- Une densité de courant suffisamment élevé,
- Une consommation qui est pratiquement nul,
- Anode souple, facilité de manipulation,
- Potentiel et courant distribués uniformément, donc protection plus efficace.

Les deux graphes suivants démontrent l'efficacité du Ti-MMO par rapport aux autres anodes :

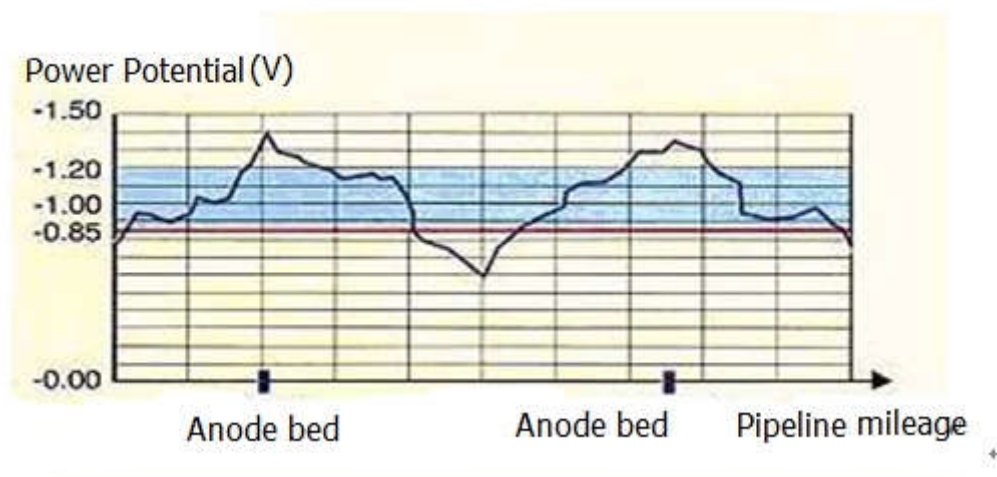


Figure III.10 : le potentiel du pipeline distribué par anodes.

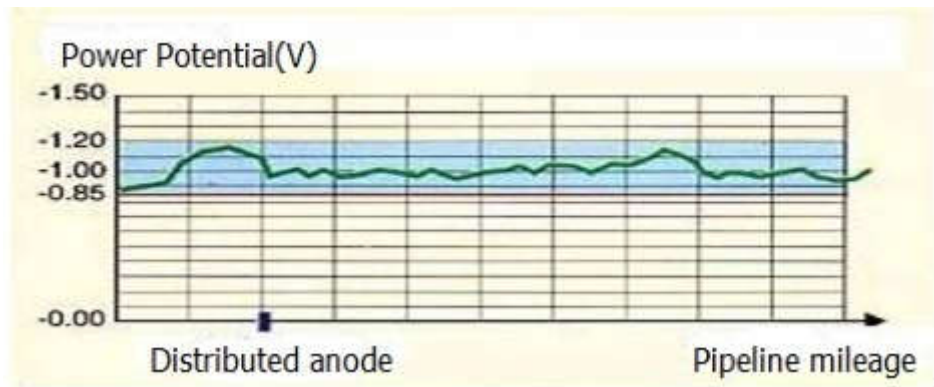


Figure III.11 : le potentiel du pipeline distribué par les anodes Ti-MMO.

III.6.1.6. La description d'anodes choisies

Matériau d'anode Ti-MMO,

Type d'anodes M103,

Diamètre d'une anode 25,4mm,

Longueur d'une anode 1006mm,

Poids d'une anode 0,35kg,

Le courant maximal par anode 11,1A.

Alors

$$\text{Nbr d'anodes} = \frac{\text{deux courant total}}{\text{courant max anode}} \dots (41)$$

$$\text{Donc : } \text{nbr d'anodes} = \frac{60.13}{11.1} = 5.4 \approx 6 \text{ anodes}$$

Il faut au minimum 6 anodes pour débiter un courant de 60.13 A.

L'entreprise chargée de la réalisation du puits installera 12 anodes de Ti-MMO pour augmenter la durée de vie et pour ne pas atteindre le courant maximal par anode.

III.6.1.7. Calcul de la profondeur t et la longueur L du déversoir

La résistance du déversoir $R_A = 0.6 \Omega$,

La résistivité du sol $\rho = 39 \Omega.m$

$$F = \frac{RA}{\rho} = \frac{0,6}{39} = 0,01538 \text{ m}^{-1}$$

D'après la lecture depuis le **Tableau III.7**, on obtient un déversoir d'une longueur de 65 mètre, et une profondeur de recouvrement (profondeur de pose) d'environ 33 mètres.

III.6.1.8. Calcul de la durée de vie du déversoir :

Consommation d'une anode Ti-MMO : 1mg/A/an.

Nombre d'anodes = 12.

Poids d'une anode Ti-MMO = 350 mg.

Poids total = $12 \times 0.35 = 4,2 \text{ Kg}$ $I = 60,13 \text{ A}$.

$$T = \frac{\text{Poids total des anodes}}{I \times \text{Consommation d'une anode.}} \dots\dots\dots(42)$$

Pour 6 anodes : $T = 2.1 / (60.13 \times 0.001) = 34.92 \text{ années}$.

Pour augmenter la durée de vie du déversoir, on a proposé d'augmenter le nombre d'anodes

Pour 12 anodes : $T = 4.2 / (60.13 \times 0.001) = 69.84 \text{ années}$.

III.6.2. La réalisation du puis :

1. Forage d'un puis vertical de 65 mètres.
2. Pose des anodes du 1^{er} chapelet :
 - Pose du 1^{er} tube, diamètre 2''
 - Pose du 1^{er} tube PVC pour dégazage.
 - Pose des 02 premières anodes sur le premier tube de 2''
 - Pose du 2^{ème} tube.
 - Soudage du 2^{ème} tube en acier sur le 1^{er} tube.
 - Raccordement du premier tube PVC au 2^{ème} tube PVC par un raccord
 - Raccordement de la 1^{ère} corde à la 2^{ème} corde.
 - Pose de la 3^{ème} anode.
 - Soudage du 3^{ème} tube sur le 2^{ème}.
 - Raccordement du 3^{ème} tube PVC.

- Raccordement de la corde du 2^{ème} tube au 3^{ème} tube
 - Pose de la 4^{ème} anode.
3. Pose des anodes du 2^{ème} chapelet : mêmes opérations que celles du 1^{er} chapelet.
 4. Pose des anodes du 3^{ème} chapelet : mêmes opérations que celles du 1^{er} chapelet
Et 2^{ème} chapelet.
 5. Soudage du dernier tube au casing.
 6. Remplissage du casing par du charbon.
 7. Ouverture d'une tranchée de 250m de long et 1m de profondeur, entre le poste et le puits anodique et pose de 02 câbles de 4*10mm² et 2*10mm²
 - Pose d'une couche fine de terre meuble.
 - Pose du grillage avertisseur.
 - Remblayage de la tranchée.
 - Raccordement des câbles aux chapelets.
 - Pose du coffret anodique dans l'abri du poste.
 - Raccordement des câbles au transfo redresseur.
 8. Raccordement des chapelets d'anodes aux câbles positifs à la tête du puits et isolation des connexions par du scotch fil et par-dessus une gaine thermo rétractable.
 9. Raccordement du coffret anodique au positif du transfo redresseur.

III.6.2.1. Le tube en PVC du dégazage

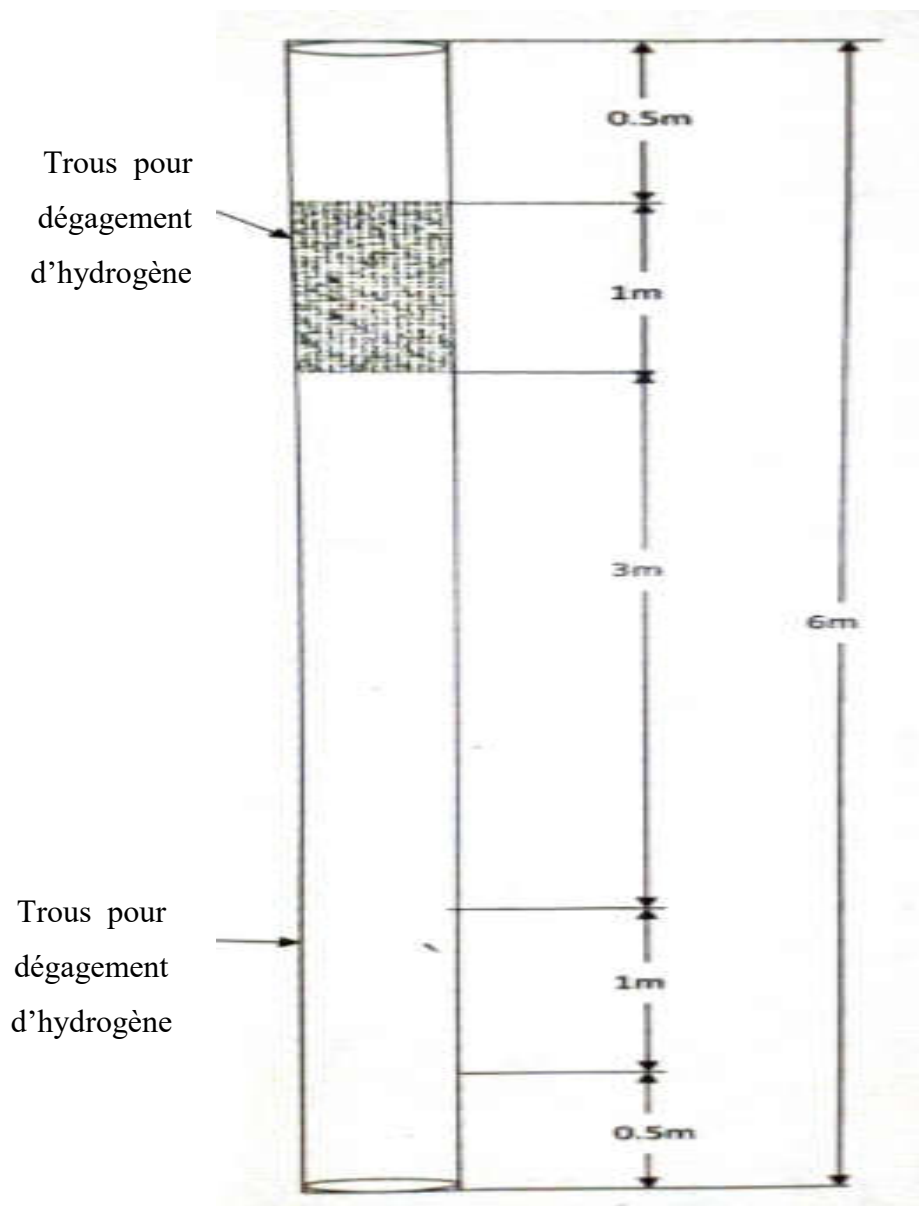


Figure III.12: Tube en PVC du dégazage

III.6.2.2. Schéma de fixation des anodes sur le 2^e

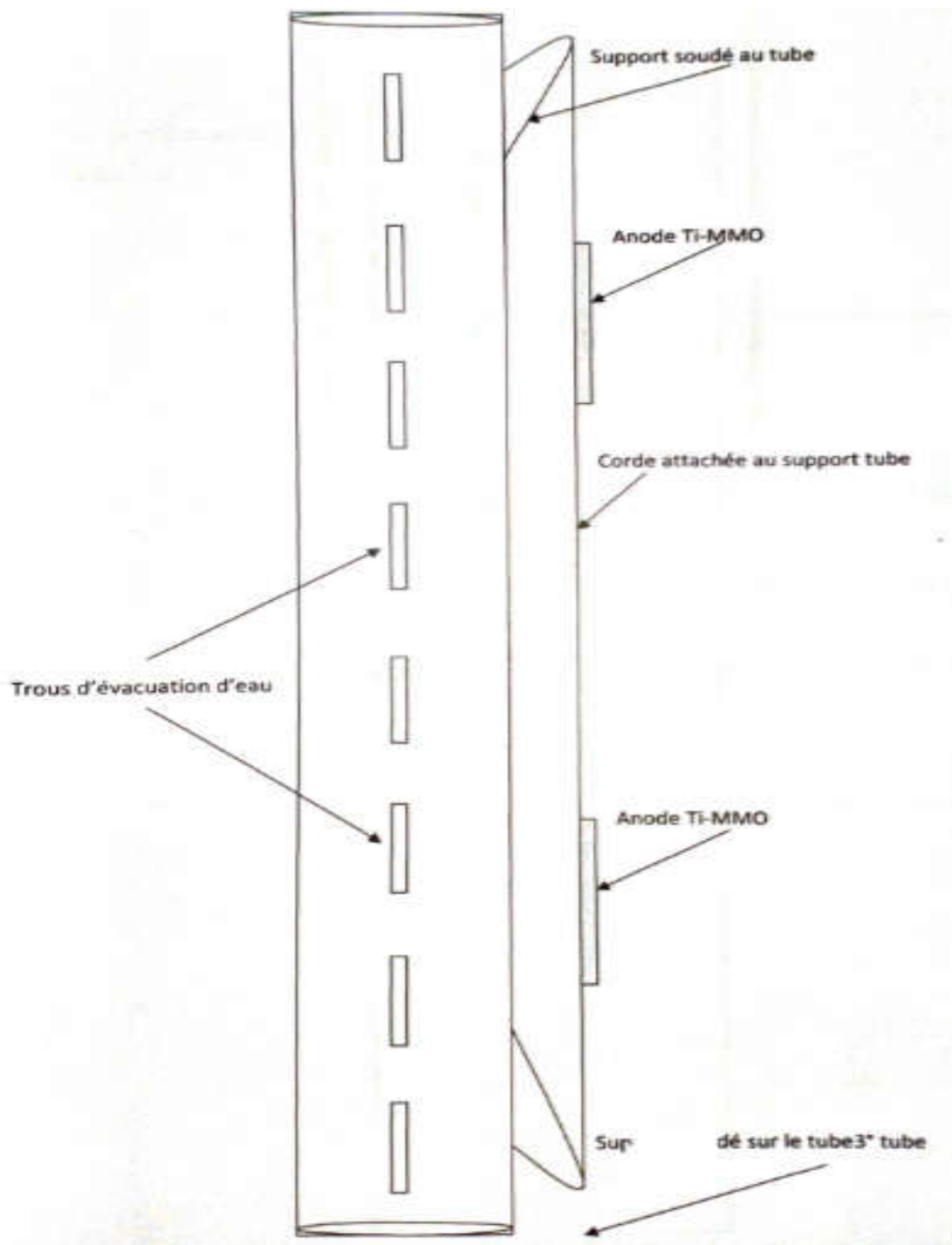


Figure III.13 : Schéma de fixation des anodes

III.6.2.3. Schéma du puits anodique

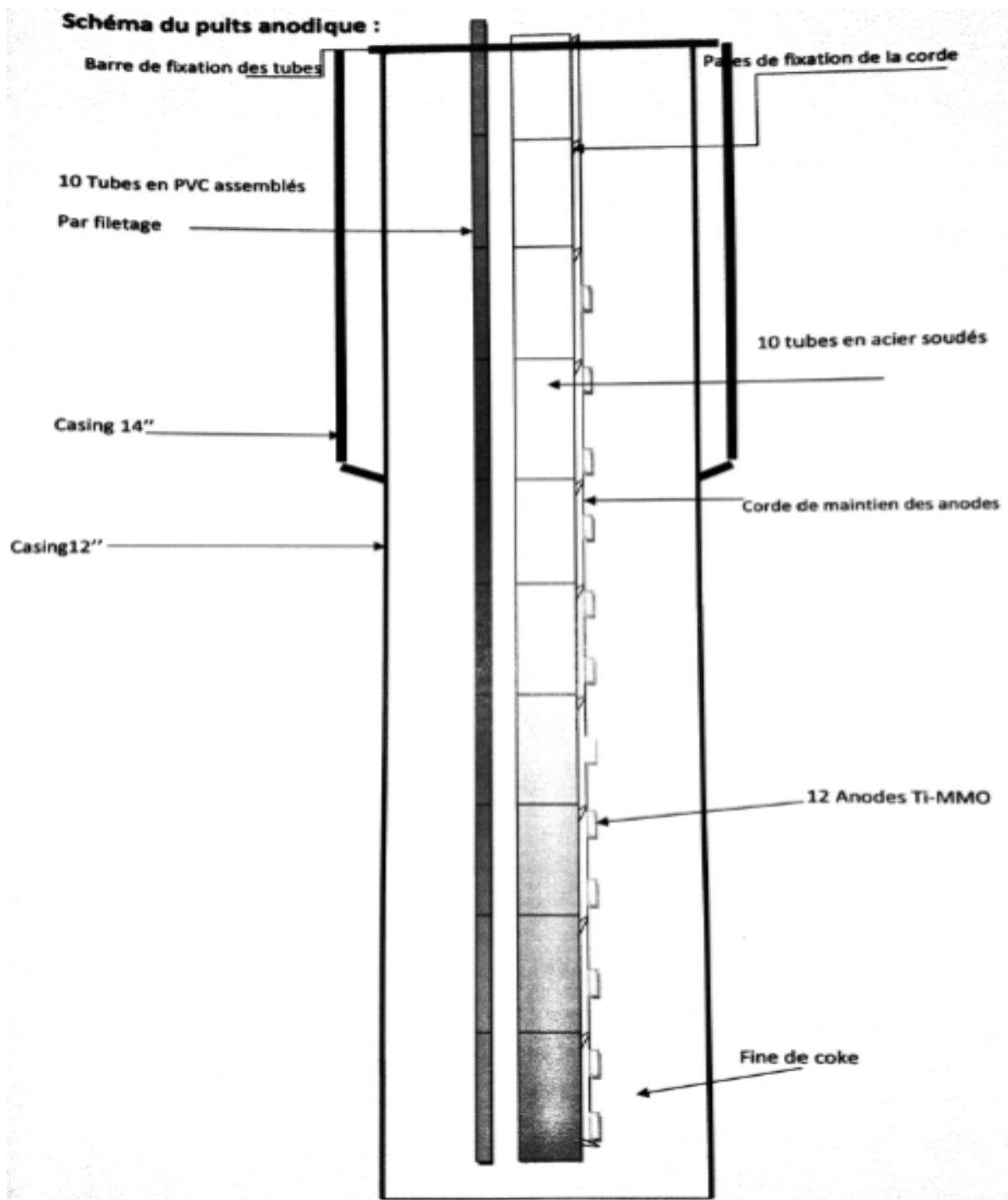


Figure III.14: Schéma représentant un puits anodique.

III.6.2.4. Schéma des chapelets d'anodes

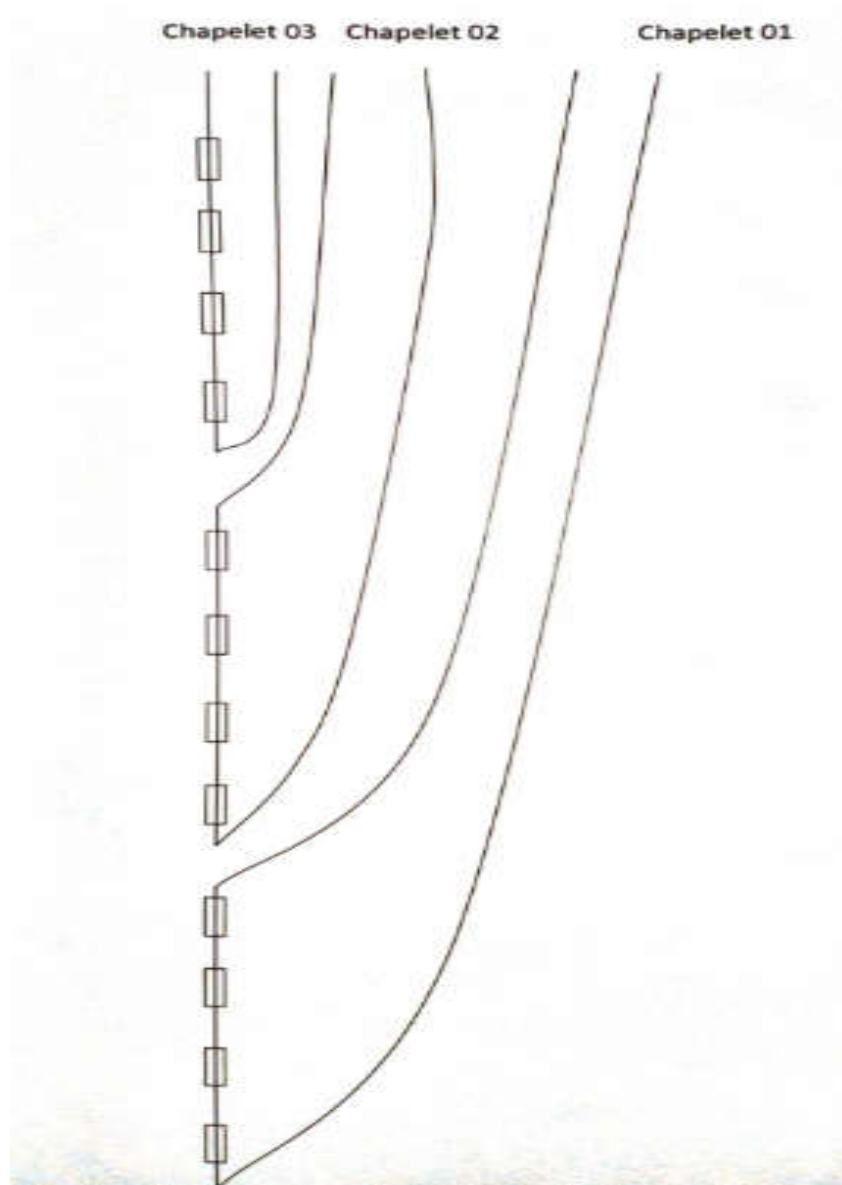


Figure III.15 : Schéma des chapelets d'anodes

Conclusion générale

CONCLUSION

La technique de protection cathodique par courant imposé couplé à une protection passive, a pour principe de faire circuler un courant électrique entre la structure métallique (pipeline) et le déversoir anodique favorisant ainsi, la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion.

Afin de réaliser une parfaite et efficace protection cathodique, plusieurs paramètres doivent être maîtrisés. Ce présent travail consiste à déterminer les différentes étapes à suivre et les multiples facteurs et paramètres à prendre en compte pour assurer une durée de vie maximal à notre structure. D'après les paramètres mensuels de la ligne OB1, nous avons constaté que dans certaines régions, le pipeline n'été pas protégé (le potentiel est en dessous de -850 mV). A cet effet, nous avons pris comme exemple le tronçon Akbou-Amizour entre les points Kilométriques PK 620 et PK 632.

Pour cela, nous avons commencé par prendre les différents paramètres du pipeline, on préleve sa longueur, son diamètre et son épaisseur. La résistivité du sol, la résistance de terre du déversoir, les caractéristiques de l'anode choisie ont été déterminés. Ensuite nous avons calculé la résistance linéaire de la conduite, la surface totale à protéger, la densité du courant, la chute du potentiel, le potentiel injecté, le courant nécessaire pour assurer la protection, le nombre d'anode, la profondeur du déversoir et la profondeur de pose des anodes et sa durée de vie.

Après avoir déterminé le nombre d'anodes suffisants à installer dans notre déversoir, nous avons proposé d'augmenter ce nombre afin d'assurer une durée de vie maximal à notre pipeline.

Il faut noter que la distribution uniforme du potentiel de protection et son maintien à un niveau minimum (< -850 mV) qui assure la bonne protection de la structure, passe nécessairement par le bon contrôle des paramètres caractéristiques à la fois de son milieu, de son environnement et les outils de protection utilisés.

Références

Références

- [1] Cefracor, Introduction à la métallurgie et à la corrosion. Cours protection et lutte contre la corrosion.
- [2] SONATRACH, Documents internes de l'entreprise.
- [3] Curty, La Protection Cathodique des Ouvrages Métalliques Enterrés. Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs – Paris, Novembre 1991.
- [4] SONEGAS, Manuel pour la protection des réseaux de distribution en acier - Direction de la distribution S.T.GXD.G D45, Septembre 1996.
- [5] Landolt, corrosion et chimie de surface des métaux, volume 51, Traité des matériaux EPFL – Lausanne, 1993.
- [6] M.Marec, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRANC 96.2, Gaz de France, 1996.
- [7] Guide pratique de protection cathodique. Edité par la Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du pétrole et du gaz naturel – Comité des Techniciens, Paris 1986.
- [8] G.Béranger, H.MAZILLE, la corrosion des métaux et alliages : mécanisme et phénomènes, ED. Hermès-Lavoisier, Collection Mécanique et Ingénierie de Matériaux, avril 2008.
- [9] Gaz de France, documentation relative aux revêtements – R.07 – Edition Janvier 1986.
- [10] S.Belaid. Analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 Pour pipelines corrodés Modèle basé sur le critère B31G, mémoire de magister, université Tlemcen, 2008.
- [11] A.Jarrah, Développement de méthodes statistiques et Probabilistes en corrosion par piqûres pour l'estimation de la profondeur maximale : application A l'aluminium a5. Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur décembre 2009.
- [12] M.Ghellai, Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL mémoire master, université de Tlemcen, 2013.
- [13] D.Bouzidi, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire Des ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec, 2011.

Références

- [14] Cefracor, protection contre la corrosion dans les sols-Généralités. Publication réalisée par le group de travail «corrosion dans les sols » du centre Français de l'anticorrosion, mars 2015.
- [15] H.H.Uhlig, R.W.Revie, corrosion and corrosion control, Wiley-Interscience, New York, 1985.
- [16] A.Mazouzi, Séminaire sur les défaillances et techniques de réhabilitation des pipelines, 2014.
- [17] Pallassa et Moinard, manuel de protection cathodique –Technip- paris, 1970.
- [18] Séminaire sur la corrosion; édition de C.P.E
- [19] Séminaire sur la protection cathodique édition I.A.P formation industrie ; avril 2007.
- [20] La protection cathodique guide pratique PARIS-TECHNIP 1986.
- [21] A.Benmoussat, cours sur les Défaillances et protection des ouvrages métalliques, université CUTAM Tamanrasset, 2013.
- [22] Documents établis par le département de protection cathodique/région de transport ouest.
- [23] M.Ghellai Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL mémoire master, université de Tlemcen 2013.

Annexes

Présentation de l'entreprise SONATRACH Bejaïa

Présentation de la DRGB

Historique

L'entreprise SONATRACH « Société National de Transport et Commercialisation des Hydrocarbures » a été créée le 31 décembre 1963 par le décret N ° 63 /49, la SONATRACH devait s'occuper uniquement du transport et de la commercialisation des hydrocarbures. Les statuts ont été modifiés par le décret N°66 / 292 de septembre 1966. Cette entreprise devient société nationale de la recherche, de la production, de transport et de la transformation dans le cadre d'un schéma directeur approuvé au début de l'année 1981 pour une meilleure efficacité organisationnelle économique. De ce principe SONATRACH a donné naissance à 17 entreprises (NAFTAL, ENIP, ENGTP, ENAG, ENAFOR... etc.).

Situations géographiques de la DRGB

Elle est située dans la zone industrielle à deux kilomètres sud-ouest de la ville de Bejaïa, d'une superficie de quatre (4) hectares environ, constituée d'une zone de stockage et d'un port pétrolier qui se trouve à cinq (5) kilomètres environ nord-est de l'entreprise et du parc de stockage.

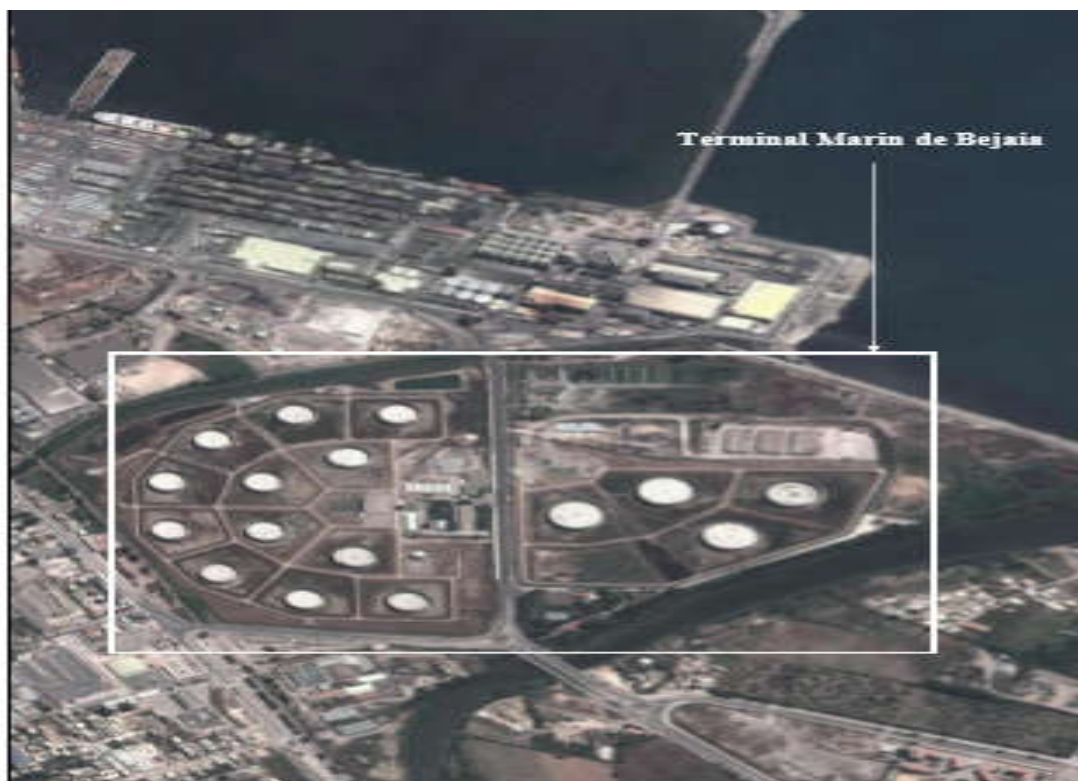


Figure 1 : Le site de la TMB vue du ciel

Le Terminal Marin de Béjaïa (TMB) :

Le Terminal Marin de Béjaïa (TMB) est la dernière unité de la chaîne de transport des hydrocarbures liquides avant l'expédition.

Le parc de stockage de la TMB est constitué des deux dépôts suivants :

- Le Terminal Marin Nord (TMN) dédié essentiellement au stockage du brut se compose principalement de :
 - Douze (12) bacs à toits flottants, désignés par l'appellation 4E1, 4E2, 4B12, 4B11, 4D3, 4D10, 4C4, 4C9, 4A8, 4A7, 4F5, 4F6 ;
 - Un bac atmosphérique de détente à toit fixe de forme conique, désigné par l'appellation "4Y1" ;
 - Une gare racleur arrivée ;
 - Un manifold arrivée/départ et une pomperie de chargement.
- Le Terminal Marin Sud (TMS) se compose principalement de :
 - Quatre (04) bacs désignés par l'appellation "R13, N14, M20 et P21" ;
 - Un manifold arrivée/départ et une pomperie de chargement ;
 - Un poste de chargement en mer et ses annexes ;

- Trois bourniers de slop (boues de pétrole) récupérés lors de la rénovation des bacs.
- Le terminal marin a un rôle principal dans la cadence de fonctionnement, il joue le rôle d'un élément régulateur entre les opérations de réception des produits et l'expédition, il assure un fonctionnement sans perturbation du système, il empêche le risque de rupture de stock et le risque de surstockage.

Activités de la DRGB

Ses principales fonctions sont :

- Stockage des produits pétroliers arrivant par le pipe-line vers les bacs ;
- Traitement de ses produits ;
- Assurer l'entretien des installations ;
- Chargement des pétroliers.

Stockage

Les réservoirs ou bacs utilisés pour le stockage du pétrole brut sont des réservoirs cylindriques verticaux aériens en acier.

Tous les bacs de stockage des hydrocarbures (hormis le bac de détente/purge) sont munis de toits flottants.

Le toit flottant est un disque mobile qui flotte sur le liquide en suivant les mouvements de descente et de montée du produit. Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit de coulisser sans entraves à l'intérieur de la robe.

La figure suivante présente la vue de face d'un bac de stockage à toit flottant :



Figure 2 : Vue du bac 4F5 du dépôt nord et sa cuvette de rétention.

Les caractéristiques dimensionnelles des bacs de stockages de la TMB sont données dans le tableau ci-dessous :

N Bac	Diamètre nominal (m)	Surface de la cuvette (m ²)	Hauteur du bac (m)	Volume nominal (m ³)	Type du toit	Type du joint	Hauteur d'exploitation minimale (m)	Hauteur d'exploitation maximale (m)
Parc de stockage Nord : Capacité totale : 420 000 m ³ , capacité utile : 324 000 m ³								
4Y2	16	3150	14.40	2900	Fixe	-	-	-
4F6	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4A7	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4A8	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4C9	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4D10	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4B11	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4B12	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4E1	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4F5	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4C4	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4D3	56	12500	14.40	35000	Flottant	Simple	2	13
4E2	56	12500	14.50	3500	Flottant	Simple	2	13
Parc de stockage Sud : Capacité totale : 200 000 m ³ , capacité utile : 162 000 m ³ .								
R13	68	18000	14.65	50000	Flottant	joint liquide avec écran de protection	2	13
N14	68	18000	14.65	50000	Flottant	joint liquide avec écran de protection	2	13
M20	68	18000	14.65	50000	Flottant	joint liquide avec écran de protection	2	13
P21	68	18000	14.65	50000	Flottant	joint liquide avec écran de protection	2	13

Tableau 1 : Caractéristiques dimensionnelles des différents bacs de stockage.

Différents organes constituant la DRGB

L'organigramme suivant donne une vue générale sur les différents organes constituant la DRGB.

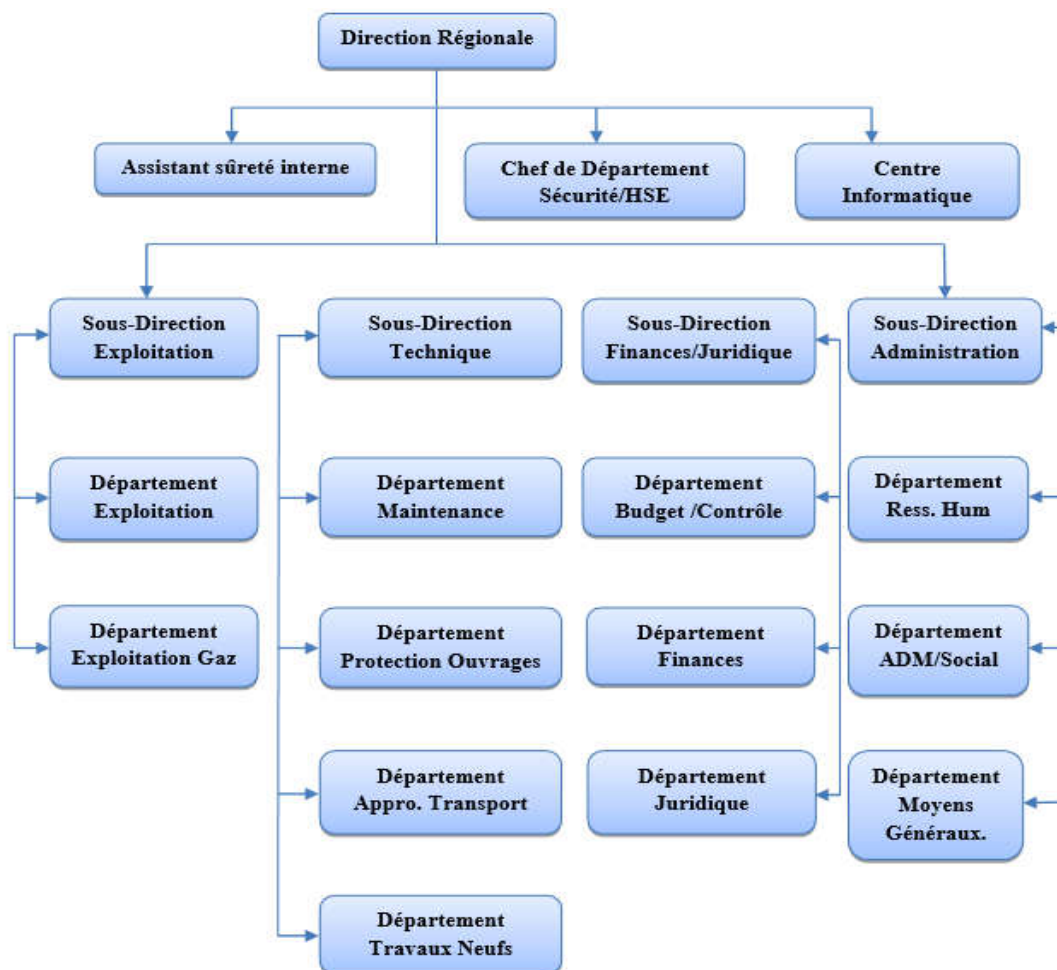


Figure 3 : Organigramme de la Direction régionale -Bejaïa.

Région de transport centre

La région transport centre (RTC), l'ex direction régional Bejaïa (DRGB), dont son siège est à Bejaïa. Elle assure le transport et la distribution des hydrocarbures dans le centre d'Algérie. Elle exploite deux oléoducs et un gazoduc et veille aussi à leurs bons fonctionnements, leurs maintenances et leurs protections.

Nous allons décrire brièvement les ouvrages de RTC

OB1 (oléoduc Bejaia1) c'est le premier pipe-line réalisé en Algérie, il est de diamètre 22/24 " il véhicule de pétrole brut à une distance de 668Km, de son départ Haoud el Hamra à son arrivé le terminal marin de Bejaia, pour l'exporter à l'étranger en passant par le port pétrolier.

La ligne **OB1** a effectivement quatre stations de pompage réparties le long de la ligne pour assurer le débit voulu.

- **SP1** station de pompage N°1 qui est le départ de ligne au PK00 à Haoud El hamra
- **SP1 Bis** station pompage N°1 bis installée au PK190 de la ligne à DJAMAA wilaya d'EL-OUAD
- **SP2** station pompage N°2 située au PK350 à ELOUTAYA wilaya de BISKRA
- **SP3** station pompage N°3 bis située au PK495 de la ligne à M'SILA

D4OG1 l'ex **OG1** oléoduc Alger 1 de diamètre 20 " qui relie de son départ la station de pompage BENI-MENSOUR à son arrive le terminal de la raffinerie d'Alger, d'une distance de 130 Km.

GG1 gazoduc Alger 1 de diamètre 42" et d'une longueur de 439 Km, il alimente le centre d'Algérie en gaz naturel. Le GG1 relie le centre national dispatching gaz de HASSI R'MEL à son arrivé BORDJ MENAIL.

Une station de compression (SC3) a été installée par la suite au pk 181 de la ligne à Moudjebara wilaya de Djelfa pour, augmenter la pression d'exploitation vue l'augmentation de la demande en gaz naturel.

Département protection cathodique

Effectivement parmi les départements de la région transport centre figure le département protection cathodique, qu'est récemment créé en fin 2016.

Les principales missions de l'ensemble du personnel du département protection cathodique s'organisent en deux parties majeures :

❖ Inspection et contrôle de la protection cathodique

1. Visite mensuelle des postes de protection cathodique des trois lignes (OB1, GG1, DOG1), et les différents ouvrages concentrés de la région.
2. L'assurance du bon fonctionnement de la protection cathodique des canalisations et ouvrages concentrés.

3. Effectué chaque année des campagnes de mesure de potentiel ON, des trois lignes (OB1, GG1, DOG1), et tout les ouvrages concentrés.
4. Effectué chaque 5 ans des campagnes de mesure de potentiel ON/OFF, des trois lignes (OB1, GG1, DOG1), et ouvrage concentrés une fois tout les cinq ans.
5. Etude et diagnostique des anomalies de la protection cathodique.

❖ Construction et réparation

1. Création et mise en service des nouveaux PPC dans les zones sous protégées.
2. Réalisation et réfection des déversoirs de la protection cathodique qui sont à terme.
3. Maintenance des équipements de la protection cathodique tels que :
4. Installation des défèrent types de prises de mesures de potentiel.
 - ✓ **PCTE** : Prise de Croisement Tube Externe.
 - ✓ **PJI** : Prise Joint Isolant
 - ✓ **PMA** : Prise de Mesure Ampère-métrique
 - ✓ **PPS** : Prise de
 - ✓ Potentiel Simple
 - ✓ **PTG** : Prise de Traversé Gaine.
5. Installation des joints isolants pour protéger la structure métallique des autres structures ; par exemple :
 - Au Niveau des ouvrages concentrés.
 - A l'amont et à l'aval des nouveaux tronçons installés.
 - Raccordement à un ouvrage tiers.

La ligne OB1 est dotée de 30 postes de protection cathodique répartie le long de la ligne selon le besoin de protection.

Nous allons citer l'emplacement et la localisation de ces postes de protection dans le tableau suivant :

PPCN°	PK	LOCALISATION
1	0	HAOUD EL HAMRA
2	20	HAOUD EL HAMRA
3	39	ROUTE HAOUD EL HAMRA
4	80	HJIRA
5	120	
6	135	SPA TOUGGOURT
7	153	TOUGGOURT OUARGLA
8	172	DJAMAA EL OUED
9	190	SP1 bis
10	211	DJAMAA EL OUED
11	232	EL MAGHAIER EL OUED
12	255	EL MAGHAIER EL OUED
13	271	STILL ELBAADJ EL OUED
14	313	SPB OUMACHE BISKRA
15	329	EL HADJEB
16	350	SP2 EL OUTAYA
17	373	FDG
18	393	BITAM
19	421	BARIKA
20	449	AIN EL KHADRA
21	472	SOUAMAA
22	495	SP3 M'SILA
23	525	DEVIATION HAMMAM DALAA
24	534	HAMMAM DALAA
25	560	REGBET MAIZ
26	581	SPD BENI MANSOUR
26 bis		AKBOU
27	606	AKBOU
28	644	AMIZOUR
29	668	TM BEJAIA

Tableau 2 : l'emplacement et la localisation des postes de protection cathodique.

03 postes installés pour protéger le D'OG1, mais actuellement le seul poste qui marche c'est le PPC N°1. Les trois postes sont répartis comme suit :

PPC N°	PK	LOCALISATION
1	21	BECHLOUL BOUIRA
2	75	KHABOUZIA BOUIRA
3	133	LARBAA SIDI MOUSSA

Tableau 3 : les postes de PPC en marche sur le D'OG1.

La ligne GG1 est protégée à l'aide de 15 postes de protection cathodique, implantés le long du tronçon comme suit :

PPC N°	PK	LOCALISATION
2	32	BELLIL
5	93	KSAR EL HIRANE (LAGHOUAT)
7	141	MESSAAD (DJELFA)
9	213	MOULEH (DJELFA)
10	252	MEDJEDEL
11	283	SIDI AMEUR
13	331	AIN LEHDJEL (M'SILA)
14	326	SIDI AISSA (M'SILA)
15	335	SIDI AISSA (M'SILA)
16	350	DIRAH (BOUIRA)
17	368	BORDJ OUKHRISS (BOUIRA)
18	389	AIN EL HADJAR (BOUIRA)
19	409	OMAR GARE (BOUIRA)
20	429	CHAABET EL AMEUR
21	439	ISSER

Tableau 4 : postes de protection cathodique sur le tronçon GG1.

Résumé

Notre présent travail consiste à mettre en oeuvre un système de protection cathodique et maîtriser les différents paramètres de protection, notamment ceux du déversoir anodique et ses étapes de réalisation.

La société SONATRACH effectue des contrôles à l'aide du racleur intelligent pour détecter les anomalies. Il a été remarqué que dans certaines régions, entre les points Kilométriques PK 620 et PK 632 d'une surface totale de 21477.6 m², le pipeline n'a été pas protégé.

La solution envisagée est d'implanter un système de protection cathodique à courant imposé muni d'un déversoir anodique. Pour cela, des paramètres techniques tels que la longueur du tronçon, le diamètre et l'épaisseur du pipeline, la résistivité du sol, la résistance de terre du déversoir, les caractéristiques de l'anode choisie ont été prélevés. Ensuite nous avons calculé les différents paramètres techniques tels que la résistance linéaire de la conduite, la surface à protéger, la densité du courant, la chute du potentiel, le potentiel injecté, le courant nécessaire pour assurer cette protection, le nombre d'anode et en dernier lieu, la profondeur du déversoir et sa durée de vie. Et enfin, nous avons proposé d'augmenter le nombre d'anodes pour prolonger la durée de vie de ce déversoir et par conséquent le pipeline.

Abstract

Our present work is to enforce a cathodic protection system and to master the various protection parameters, notably those of the anodic spillway and its stages of implementation.

The company SONATRACH performs checks using the smart scraper to detect anomalies. It was noted that in some regions, between PK 620 and PK 632 with a total surface area of 21477.6 m², the pipeline was not protect.

The proposed solution is to set up a cathodic protection system with an anodic weir. For this, technical parameters such as the length of the trançon, the diameter and the thickness of the pipeline, the ground resistivity, the ground resistance of the spillway, the characteristics of the chosen anode were prélevés. Then we calculate the different technical parameters such as the lineaire resistance of the pipe, the surface to be protected, the density of the current, the fall of the potential, the potential injected, the current necessary to ensure this protection, the Number of anodes and last, the defender of the spillway and its life span. And finally, we proposed to increase the number of anodes to prolong the life of this weir and consequently the pipeline.