REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département du Génie Mécanique

Projet de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème

Les effets de corrosion dans l'industrie « causes

Et remèdes » Application :

Protection cathodique des Ouvrages enterrés

Proposé et rédigé par :

M. MADANI Mohammed

Présenté par :

KESSAB Ahmed

Promotion: 2010

الملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة يهدف إلى دراسة ظاهرة التآكل في مجال نقل الغاز الطبيعي عبر الأنابيب. أسبابها, أشكالها, العوامل المؤثرة فيها و تقنيات الحماية منها النشطة والخاملة أو على الأقل تخفيف مفعولها على أنابيب النقل تحت سطح الأرض.

وفي الأخير قمنا بدراسة نظرية لنظام حماية باستعمال تقنية الأقطاب الموجبة الموصولة بتيار كهربائي مستمر لمشروع نقل الغاز الطبيعي "تقرت-الوادي".

الكلمات المفتاحية :

التآكل, حماية موجبة, قطب مضحى به, مصرف, منحل بالكهرباء.

Résumé :

Ce travail consiste à étudier le phénomène de corrosion dans le domaine de transport du gaz naturel par canalisation. Nous avons présenté ses causes, ses types, les facteurs influençant et les techniques de protection utilisable à savoir active ou passive.

Nous avons dimensionné un système de protection cathodique par courant imposées du projet de transport de gaz naturel TOUGOURT-EL OUED.

Mots clés :

Corrosion, protection cathodique, déversoir, anode sacrificiel, électrolyte.

Abstract :

This work consists in studying the phenomenon of corrosion in the field of transport of natural gas by drain. We presented its causes, its types, the factors influencing and the techniques of protection usable to knowing active or passive.

At the end of the report, we dimensioned a cathodic protection system per current imposed of the project of transport of natural gas TOUGOURT-EL OUED.

Key words :

Corrosion, cathodic protection, sacrificial outfall, anode, electrolyte

Remerciements

Je dois remercier en premier celui qui ma donné la vie, et me prend en soin à chaque instant, **ELLAH**, le Clément de m'avoir donné la foi et le courage pour terminer ce travail.

Un grand merci à Monsieur MADANI pour m'avoir conseillé et orienté tout au long de l'élaboration de mon étude.

Mes remerciements vont aussi aux messieurs les membres du jury d'avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants qui ont participé à notre formation et l'aide qu'ils nous ont fournie pendant la période d'étude.

Je réserve mes remerciements les plus chaleureux à ma famille. Rien n'aurait été possible sans le soutien de mes parents, mes sœurs et mon frère, leurs appui ma aidé beaucoup à tenir jusqu'au bout ce travail. Merci infiniment ma famille.

Dédicaces

A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et

de me soutenir, à ceux qui leur amour m'a donné

la volonté d'aller toujours de l'avant,

A mes très chers parents, que Dieu les protège

A mes très chères sœurs, A mon très cher frère,

A toute ma famille,

A tous mes amis

Et A tous mes collègues

Je dédie ce travail

Sommaire

Liste des figures……viii

Liste des tableaux……ix

Introduction……01

Chapitre I : phénomène de corrosion

I.1 Définition de la corrosion…… 03
I.2 Processus de corrosion …… 03
I.2.1 Corrosion chimique ……. 03
I.2.2 Corrosion électrochimique …….. 03
I.2.2.1 Hétérogénéité de la conduite……. 04
I.2.2.2 Hétérogénéité de la matière …….. 04
I.2.2.1 Hétérogénéité de la conduite ……. 05
I.2.2.2 Hétérogénéité de la matière …….. 05
I.2.3 Corrosion bactérienne …….. 06
I.2.4 Corrosion par courant vagabonds …… 07
I.3 Morphologie de la corrosion …….. 08
I.3.1 Corrosion uniforme …….. 08
I.3.2Corrosion par piqûres……. 09
I.3.3 Corrosion inter-granulaire ……... 09
I.4 Résistivité Du Sol (ou de l'électrolyte) …….. 10

Chapitre II : **Aspects électrochimique de la corrosion**

II.1 Aspects électrochimique de la corrosion…… 12
II.2 L'électrolyse …….. 14
II.3 Echelle de NERNST ……. 14
II.4 Aspects thermodynamiques de la corrosion ……. 16
II.4.1 Fonctionnement de la pile de corrosion ……. 16
II.5 Diagramme de pourbaix …… 22

Chapitre III : Protection des ouvrages enterre

III.1.2 Caractéristiques des revêtements …….. 25
III.1. Protection passive …… 25
III1.3 Différente types de revêtement …….. 25
III.1.4 Mise en œuvre ……... 26
III.1.5 Revêtement à liant hydrocarbonés …… 26
III.1.6 Revêtement par bande adhésive …… 27

III.1.7 Revêtement en P.E extrudé ……... 27
III.1.8 Revêtement par gaine thermo rétractable …….. 27
III.1.9 Utilisation des joins isolants ……. 28
III.1.10 Le décapage …… 28
III.1.10.1 Décapage mécanique …… 28
III.1.10.2 Décapage chimique …….. 29
III.2. Contrôle par méthode électrique des défauts des revêtements …… 29
III.2.1 Principe ……. 29
III.2.2 Contrôle à haute tension électrique : méthode du « balai électrique »…….. 29
III.3. Contrôle des joints isolants ……. 31
III.4. Lutte contre la corrosion par courant vagabond ……. 32
III.5. Protections cathodiques …….. 33
III.5.1 Principe de la protection cathodique ……. 33
III.5.2 Protection Cathodique par anode sacrificiel ……. 34
III.5.2.1 Différents types d'anodes sacrificielles ……. 34
III.5.2.2 Milieu entourant l'anode (Backfill) ……... 35
III.5.2.3 Installation des anodes ……... 35
III.5.3 Protection cathodique par courant imposé …… 37
III.5.3.1 Principe …….. 37
III.5.3.2 Le déversoir …… 38
III.5.3.2.1 Milieu entourant le déversoir (régulateur) …….. 39
III.5.3.2.2 Installation du déversoir ……. 40
III.5.3.3 Poste de protection cathodique (ou de soutirage)……... 40
III.5.3.4 Câbles de connexion ……. 42
III.5.3.4 Câbles de connexion ……. 42
III.5.3.5 Contrôle du potentiel conduite /sol …… 43
III.5.3.5.1 Mesure de potentiel ……. 44
III.5.3.5.2 Électrode de référence …… 44
III.5.3.6 Exploitation et entretien ……. 45
III.5.3.6.1 Mesure et Contrôle …….. 45
III.5.3.6.2 Exploitation et entretien des protections installées ……. 46
III.5.3.6.3 Méthode de recherche de défaut d'enrobage …….. 47

Chapitre IV : Dimensionnement du système de protection cathodique

IV.1. Théorie et méthode de calcul……... 48
IV.1.1 Modèle mathématique du phénomène d'atténuation……. 48
IV.1.1.1 Résistivité du sol : ρsm……... 48
IV.1.1.2 Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur : Rc……... 48
IV.1.1.3 Resistance transitoire « conduite-sol » : Rt…… 49

IV.1.1.4 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite : Rr…….. 49
IV.1.1.5 Constante de distribution du potentiel le long de la conduite :α……. 50
IV.1.2 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes…… 50
IV.1.2.1 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue : Z…….. 50
IV.1.2.2 Valeurs des potentiels …… 50
IV.1.2.3 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K……... 52
IV.1.2.4 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage : Lp…….. 52
IV.1.2.5 Calcul du nombre de poste de protection cathodique : Nppc……. 53
IV.1.2.6 Calcul de l'intensité du courant de drainage : I_{dr} ……... 53
IV.1.2.7 Calcul du nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : Na…… 53
IV.1.3 Calcul de la résistance de terre du déversoir : R…… 54
IV.1.3.1 Calcul de la résistance de polarisation : R_{pol}..... 54
IV.1.3.2 Calcul de la résistance du matériau de l'anode : R_{ma}……. 54
IV.1.3.3 Calcul de la résistance des câbles : R_{cable}…… 54
IV.1.3.4 Calcul de la résistance du lit d'anodes : Rt……. 54
IV.1.3.4.1 Calcul pour un lit d'anodes horizontal …… 55
IV.1.3.4.2 Calcul pour un lit d'anode vertical ……. 55
IV.1.4 Calcul de la puissance du poste de soutirage …… 56
IV.1.4.1 Détermination de la tension du poste de soutirage : U…….. 56
IV.1.4.2 Détermination de la puissance du poste de protection cathodique : P…… 57
IV.2. Etude du projet de dimensionnement du système de protection cathodique du gazoduc « TOUGOURT-EL OUED » …… 58
IV.2.1 Caractéristique des composants du système de protection…… 58
IV.2.1.1 Caractéristique du gazoduc……. 58
IV.2.1.2 Caractéristique de l'électrolyte : résistivité du sol……. 58
IV.2.1.3 Caractéristique des anodes……. 60
IV.2.2 Dimensionnement du système de protection…… 61
IV.2.2.1 Calcul de la résistivité moyenne du sol……. 61
IV.2.2.2 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur…….. 61
IV.2.2.3 Résistance transitoire moyenne, « conduite-sol »…….. 61
IV.2.2.4 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation……... 61
IV.2.2.5 Calcul du coefficient d'atténuation……. 61
IV.2.2.6 Calcul de la résistance d'entrée de la conduite……... 62
IV.2.2.7 Calcul des gains de potentiel…….. 62
IV.2.2.8 Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins……. 62
IV.2.2.9 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage…….. 62
IV.2.2.10 Calcul du nombre de postes de protection cathodique……. 62
IV.2.2.11 Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation…. 63
IV.2.2.12 Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection……. 63
IV.2.2.13 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées horizontalement et verticalement ……. 64
IV.2.2.13.1 Calcul de la résistance de polarisation…….. 64

IV.2.2.13.1 Calcul de la résistance du matériau des anodes……. 64
IV.2.2.13.3 Calcul de la résistance totale des anodes……... 64
IV.2.2.14 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage……. 65
IV.2.2.15 Calcul de la puissance requise par le poste…….. 66
IV.3. Etude de sensibilité…….. 66
IV.3.1 Influence de la résistivité du sol……. 67
IV.3.2 Influence de la distance entre le lit d'anodes et le pipeline……... 69
Conclusion……. 72
Bibliographie……. 73
Annexe……. 74

Liste des figures

Figure 1.1 : Branchement en cuivre sur canalisation acier…….. 4
Figure 1.2 : Corrosion par aération différentielle…… 5
Figure 1.3: Pile géologique……. 6
Figure 1.4 : Courant vagabonds…….. 8
Figure 1.5 : Corrosion uniforme…….. 8
Figure 1.6 : Corrosion par piqures……... 9
Figure 1.7 : Corrosion inter-granulaire d'un acier inoxydable…… 10
Figure 1.8 : Schéma dispositif WENNER…….. 11
Figure 2.1 : Réaction anodique…… 12
Figure 2.2 : Réaction cathodique …… 13
Figure 2.3 : Formation de double couche …….. 16
Figure 2.4 : Variation de potentiel de corrosion …… 17
Figure 2.5 : Variation de potentiel de corrosion…….. 18
Figure 2.6 : Formation de pile galvanique ……. 19
Figure 2.7 : Pile galvanique Cu-Zn……. 20
Figure 2.8 : diagramme de pourbaix…… 22
Figure 3.1 : Principe du contrôle au "balai électrique"……... 30
Figure 3.2 : Contrôle sur chantier …….. 31
Figure 3.3 : Schéma simplifié d'un système de drainage à diode……... 33
Figure 3.4 : Anode galvanique en position verticale……... 36
Figure 3.5 : Anode galvanique en position horizontale……... 37
Figure 3.6 : Principe de la protection cathodique par soutirage de courant…… 38
Figure 3.7 : schéma simplifie d'un poste de soutirage, alimenté par source électrique classique……. 41
Figure 3.8 : Prise de vue de l'armoire de soutirage d'un poste…… 41
Figure 3.9 : différente câble de connexion …….. 43
Figure 3.10 : Electrode de référence …….. 45
Figure 3.11 : Mesure de potentiel…… 45
Figure 4.1 : Variation du potentiel de protection le long d'une conduite……... 52
Figure 4.2 : Mise en évidence, disposition horizontale des anodes……. 56
Figure 4.3 : Mise en évidence, disposition verticale des anodes……. 56
Figure 4.4 : Circuit électrique du système de protection…… 57
Figure 4.5 : Diagramme de résistivité du sol ……. 60
Figure 4.6 : courbe de variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol……..... 68
Figure 4.7 : courbe de variation de l'intensité du courant du poste en fonction de la résistivité du sol…….. 68
Figure 4.8 : Courbe de variation de la puissance des postes en fonction de "y"……. 70
Figure 4.9 : Courbe de variation du nombre de postes en fonction de "y"…….. 70

Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Potentiel normal d'électrode E_0 rapporté à l'électrode normale à hydrogène pour quelques métaux à 25°C…… 15
Tableau 3.1 comparaison entre ces différents revêtements …… 26
Tableau 4.1 : Caractéristique du gazoduc…… 58
Tableau 4.2 : Relevé de résistivité des sols …… 59
Tableau 4.3 : Caractéristique des anodes…… 60
Tableau 4.4 : Influence de la résistivité du sol…… 67
Tableau 4.5 : Influence de « y » sur le système de protection……. 69

Introduction

Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour, acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz, sur de longues distances.

Ces conduites de transport, constituent des constructions couteuses, dues à la quantité et à la qualité de l'acier des tubes qu'ils nécessitent. Généralement enterrés, quelquefois, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production et de transport, se faisant même parfois oublier, les gazoducs et oléoducs baignent dans un milieu particulièrement agressif, du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient.

En effet, cette agression se manifeste par le phénomène de corrosion ; qui est un processus chimique ou électrochimique conduisant, les éléments naturels à défaire ce que l'homme a élaboré par son travail et à grands frais d'énergie, à partir des matériaux que la terre lui offre. La corrosion métallique ramène, ainsi métaux et alliages à leur état naturel d'oxydes ou de minerais. Ce nouvel état, qui se traduit par une perte de quantité et de qualité du métal, que l'on estime annuellement à environ 10% de la production mondiale d'acier, engendre pour l'économie mondiale des coûts supplémentaires importants, de plus peut avoir des conséquences désastreuses surtout lorsqu'il entraîne l'arrêt de l'exploitation d'ouvrages de transport.

Pour remédier à ce problème, des Chercheurs multiplient les recherches permettant de mieux saisir le mécanisme de la corrosion pendant que des Ingénieurs s'attellent au perfectionnement des techniques destinées à prémunir les ouvrages métalliques des effets de cette dégradation. En effet, la protection des conduites contre la corrosion par le sol ou l'eau pourrait simplement être réalisée par isolation de celles-ci. Cependant, les revêtements utilisés dans ce but n'assurent pratiquement pas la conservation entière et durable des tubes d'aciers, il faut dès lors faire appelle à une autre méthode de protection, dite active.

La protection cathodique par soutirage de courant, est une méthode incontournable de protection active contre la corrosion qui est très souvent utilisé comme complément à la protection passive des ouvrages longilignes de grandes envergures.

Dans notre travail, nous allons traiter la méthode de la protection cathodique dans le domaine de distribution et de transport des gaz naturels.

Le premier chapitre est consacré pour étudier le phénomène de corrosion, tandis que le deuxième chapitre, nous expliquons l'aspect électrochimique de la corrosion.

Dans un troisième chapitre, nous présentons les différentes méthodes utilisées pour protéger les ouvrager enterrés dans un électrolyte telle que le sol.

Dans le dernier chapitre, nous présentons un calcul de dimensionnement d'un projet de transport du gaz naturel TOUGOUDT-EL OUED, suivi dune analyse de sensibilité sur le principaux paramètres.

CHAPITRE I

PHÉNOMÈNE DE CORROSION

I.1 Définition de la corrosion [1] :

La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques Sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides.

Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.

La corrosion peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons à l'interface *métal / environnement*. C'est un phénomène naturel qui tend à faire retourner les métaux à leur état d'oxyde par une attaque plus ou moins rapide du milieu corrosif.

I.2 Processus de corrosion [2] :

I.2.1 Corrosion chimique :

C'est l'attaque directe du métal par le milieu ambiant en fonction de :

- Sa composition chimique ;
- Son aération ;
- Son humidité ;
- Et la présence de produits agressifs.

Elle est caractérisée par le passage des ions du métal dans la solution. Des ions négatifs viennent se fixer sur les ions métalliques en constituant des oxydes ou des sels qui peuvent rester sur place ou en solution.

Exemple :

- L'attaque du fer par l'acide chlorhydrique ;
- L'attaque du cuivre par l'ammoniaque formé en présence du fumier.

I.2.2 Corrosion électrochimique :

Elle est caractérisée par la circulation d'un courant électrique engendré par le système conduite-sol.

Cette corrosion est susceptible à l'hétérogénéité soit du métal soit du sol (électrolyte).

I.2.2.1 Hétérogénéité de la conduite :

Couple galvanique :

Lorsque deux métaux de nature différentes, sont reliés électriquement et plongé dans le même électrolyte, il y'a formation d'une pile dite **galvanique**, et l'un des deux métaux est obligatoirement attaqué. En effet le métal dont le potentiel est le plus négatif devient l'anode de la pile et il se corrode (se dissout) ; l'autre métal devient cathode et il est protégé.

Ce phénomène est utilisé pour la protection des canalisations en acier, par anodes sacrificielles.

L'existence des couples galvaniques peut se rencontrer dans les métaux de Distribution de gaz en acier dont les branchements d'abonnés dans les réseaux en cuivre (cas des joints isolant fuyards ou non posés). Le cuivre étant le métal le plus noble représente la cathode du système, l'acier en est l'anode et se corrode.

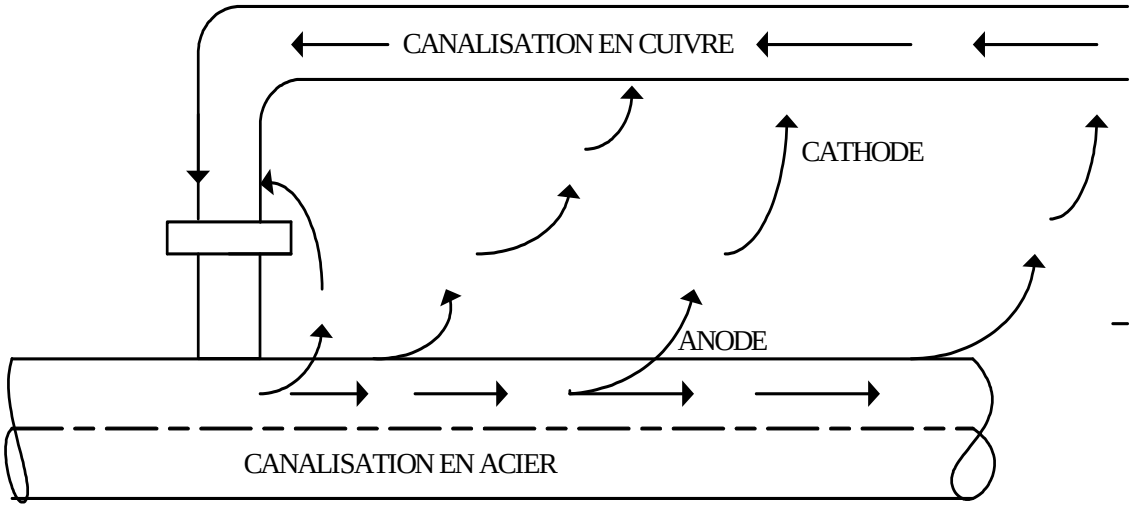


Figure (1.1) : Branchement en cuivre sur canalisation acier.

I.2.2.2 Hétérogénéité de la matière :

Il peut également se produire une corrosion de même type que précédemment par formation de piles locales dans le cas où le métal lui-même est hétérogène. On peut citer comme exemple la corrosion de l'acier contenant des inclusions de sulfures ou de carbures, l'association d'une conduite neuve à un réseau ancien du même métal.

I.2.2.3 Hétérogénéité de l'électrolyte :

A. Aération différentielle :

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

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$$

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

$$Fe \longrightarrow Fe^{++} + 2e^-$$

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

Exemples :

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

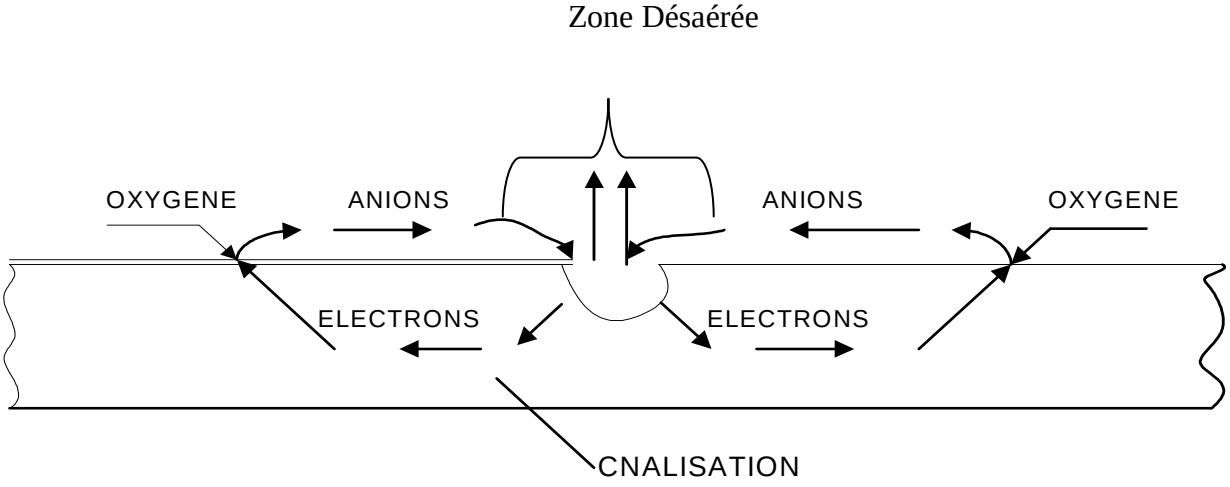


Figure (1.2) Corrosion par aération différentielle

B. Piles géologiques :

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

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

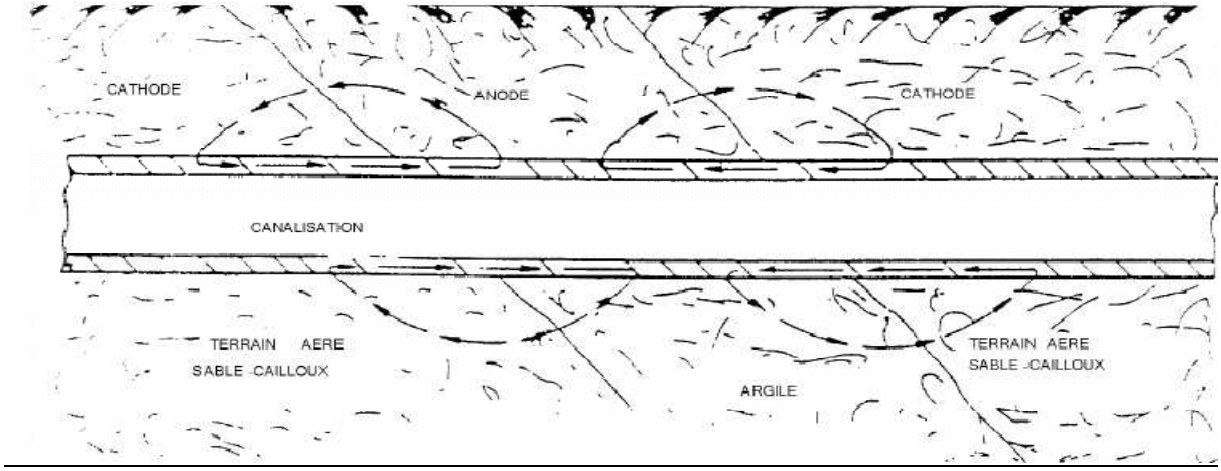


Figure (1.3) Pile géologique

I.2.3 Corrosion bactérienne :

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

- ✓ Des bactéries sulfatoréductrices responsable de la corrosion en milieu anaérobie. Elles réduisent les sulfates en sulfures ;

- ✓ Des sulfobactéries dont le rôle est d'oxyder le soufre (formé par d'autres bactéries) en sulfates ;
- ✓ Des ferrobactéries qui transforment les ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+}, ces dernières sont aérobies, par contre les sulfatoréductrices sont anaérobies et se rencontrent dans les milieux riches en sulfate, pauvres en oxygène comme certains terrains argileux ou vase compactes ou des sols noyés par une nappe stagnante anaérobie. En plus elles profilèrent dans des conditions de PH = 5,5 à 8,5 (au delà de ces limites elles sont quasiment inactives), et température T=30°C à 50°C.

I.2.4 Corrosion par courant vagabonds :

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

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

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

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

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

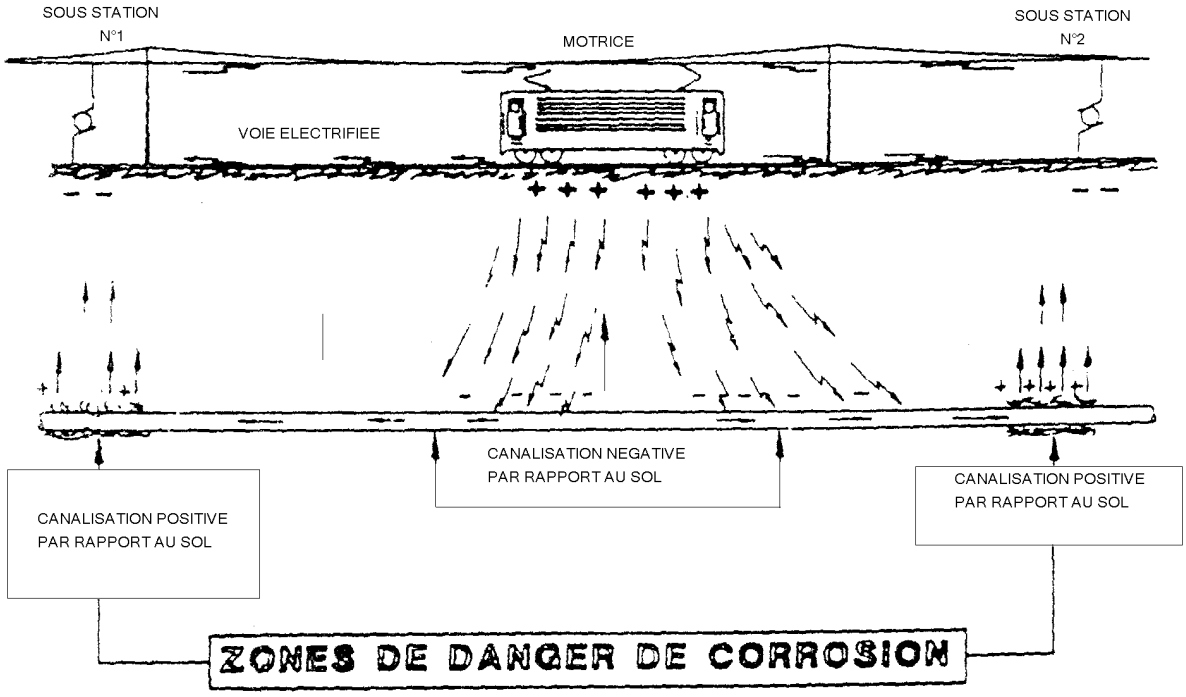


Figure (1.4) Courant vagabonds

I.3 Morphologie de la corrosion [3]

De façon générale on distingue trois formes sous les quelles la corrosion peut se développer.

I.3.1 Corrosion uniforme :

C'est la forme de corrosion la plus banale, elle se traduit par une perte d'épaisseur régulière. Le phénomène se caractérise par la vitesse d'attaque, qui se mesure soit en millimètres par an, soit en milligrammes par décimètre carré et par jour.

Figure (1.5) Corrosion uniforme.

Cette attaque n'est pas forcément proportionnelle au temps : elle peut obéir à des lois variées. Souvent, la valeur donnée dans les tables de corrosion n'est qu'une valeur moyenne et, pour extrapoler, il est nécessaire de connaître la durée de l'essai correspondant. Citons comme exemple de telles tables le Guide de la résistance à la corrosion édité par la « Climax Molybdenum », et qui concerne les aciers inoxydables des type 304, 316 et 317.

I.3.2Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqures désigne une attaque locale d'une surface passive. Elle nécessite la présence d'anions agressifs, notamment les ions Cl^-, Br^- et I^-, et d'un oxydant. Elle se manifeste par la formation de petites cavités (piqures), alors que la surface passive reste intacte. Le nombre et la forme des piqures de corrosion varient selon les conditions expérimentales, on trouve des piqures :

a. Profondes montrant une attaque cristalline.
b. Occluses.
c. Hémisphériques brillantes.

Cette dernière morphologie apparait souvent lors d'essais potentiostatiques. La dimension des piqures varie de quelques micromètres à quelques millimètres.

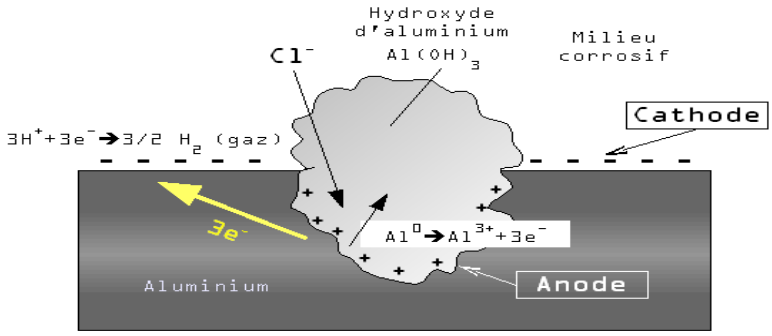


Figure (1.6) Corrosion par piqures

I.3.3 Corrosion inter-granulaire :

C'est également une attaque localisée, par contre plus sélective, causée généralement par les traitements thermiques subits par le métal, qui se développe aux points de jonctions des grains de métal.

Elle est invisible à l'œil nu, par contre, affecte considérablement la résistance mécaniques du métal.

En effet, les points de jonctions constituent, des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique plus régulier des grains. Ils admettent de ce fait de nombreux défauts de structures (lacunes, dislocation), favorables à la précipitation de phases intermétallique ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impureté en solution solide.

Sous prétexte, qu'ils sont chimiquement plus actifs, ils constituent une cible vulnérable lorsqu'ils sont exposés dans un milieu corrosif.
A titre d'exemple ; on rencontre cette forme de corrosion dans les aciers inoxydables.

Figure (1.7) Corrosion inter-granulaire d'un acier inoxydable

I.4 Résistivité Du Sol (ou de l'électrolyte)[2] :

La résistivité du sol est la capacité de celui-ci à s'imposer au passage du courant électrique. Elle est noté (ρ) et s'exprime en (Ω.m). Pour la mesure de ce paramètre important plusieurs méthodes existent, mais la plus usitée est la méthode dite des ***quatre piquets*** qu'on retrouve également sous le nom de *méthode de* ***Wenner***.

Ce paramètre est le critère d'appréciation le plus fréquemment utilisé pour évaluer l'agressivité des sols pour les métaux.

- ***Principe de mesure de la résistivité du sol par la méthode des quatre piquets***

Selon le modèle de la figure, on plante quatre piquets dans le sol. On s'assure à se que les piquets soient équidistants ; d'une distance a. Les deux piquets externes sont reliés à un milli-ampèremètre (A) qui est en série avec le générateur (G). Quant aux deux autres piquets internes, ils sont reliés à un millivoltmètre (V).

Le branchement étant réalisé, on règle le générateur à une tension, puis on lit l'intensité du courant I, qui passe dans le sol sur (A), et on relève la tension ΔU, dans le sol sur (V). On fait varier la tension aux bornes du générateur de sorte à effectuer plusieurs mesures.

Une fois les mesures effectuées, la valeur numérique de la résistivité du sol est déterminée par la relation suivante :

$$\rho = 2.\pi.a\left(\frac{\Delta U}{I}\right)$$

ρ : Résistivité de sol en Ω.m

a : Distance entre deux piquet consécutives, a = 0.2

ΔU: Tension en Volt

I : Intensité du courant en Ampère

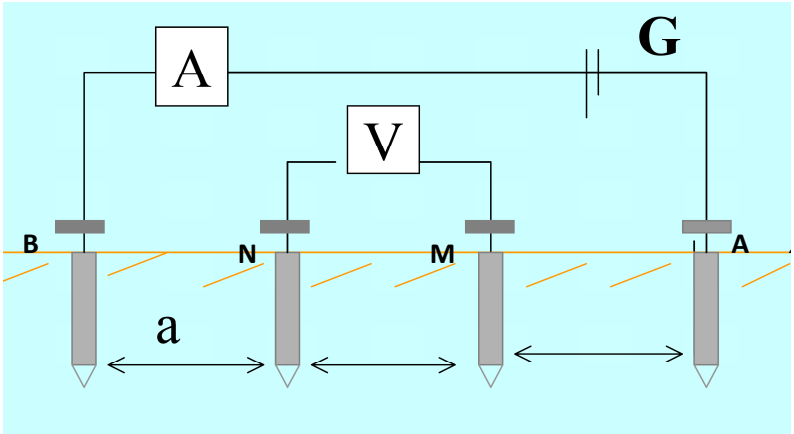


Figure (1.8) Schéma dispositif WENNER

CHAPITRE II

ASPECTS ÉLECTROCHIMIQUE DE LA CORROSION

II.1Nature électrochimique de la corrosion [4] :

La nature électrochimique de la corrosion est liée par essence à la structure atomique et électrique de la matière. On sait en effet que cette dernière est constituée de particules élémentaires porteuses de charges électriques, les ions et électrons, et de particules électriquement neutres, les atomes et les molécules.

Des ions métalliques M^{n+} disposés suivant un empilement compact rigide : c'est le réseau cristallin.

Des électrons de conduction e-, libres de se déplacer n'importe où dans le volume du métal. Ces électrons libres se comportent comme un gaz baignant les ions immobiles du réseau cristallin. Ce sont eux qui confèrent à la phase métallique les propriétés d'emploi usuelles des métaux, et en premier lieu leur très grande conductibilité électrique.

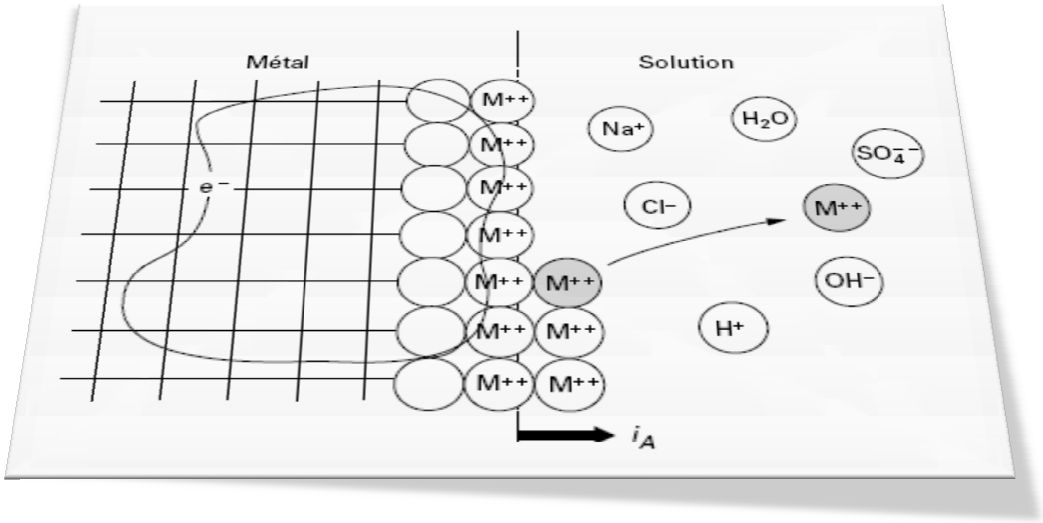


Figure (2.1) Réaction anodique

La phase aqueuse est un liquide, c'est-à-dire un empilement compact fluide qui comprend :

- des molécules neutres, eau et composés divers non dissociés ;
- des ions positifs (cations) ou négatifs (anions) ; c'est la mobilité.

De ces ions qui confère à l'eau sa conductibilité électrique. Les ions métalliques M^{n+} sont des constituants à la fois de la phase métallique et de la phase aqueuse. À l'interface entre les deux phases, ils peuvent donc passer indifféremment d'une phase à l'autre. Ce transfert

correspond à un transport de charges électriques, et donc à un courant électrique passant d'une phase à l'autre (figure 2.1).

Les électrons libres ne sont pas, par contre, des constituants de la phase aqueuse. Un électron libre ne peut donc pas passer directement dans cette phase. Il ne peut le faire que s'il est fixé sur une des particules élémentaires de la phase aqueuse. Cette particule verra alors sa charge électrique diminuée d'une charge élémentaire. En termes de chimie, cette opération correspond à une réduction de l'espèce chimique correspondante. Là encore, ce transfert de charges électriques correspond à un courant électrique circulant d'une phase à l'autre (figure2.2).

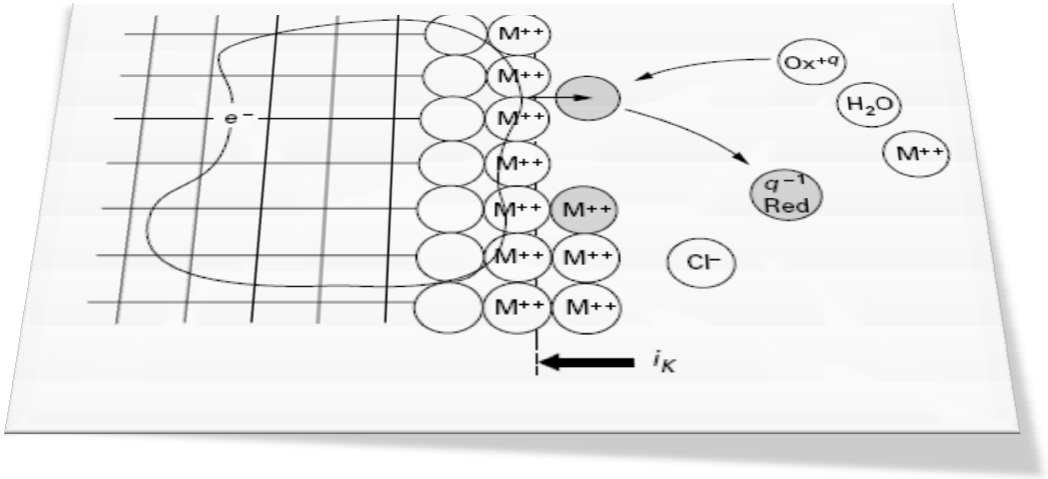


Figure (2.2) Réaction cathodique

En électrochimie, on appelle par définition **courant anodique** un courant circulant dans le sens métal → solution et **courant cathodique** un courant circulant en sens inverse. Les réactions sont dites anodiques ou cathodiques selon qu'elles correspondent à un courant respectivement anodique ou cathodique. Les réactions anodiques correspondent en termes de chimie à des oxydations, et les réactions cathodiques à des réductions.

La corrosion d'une phase métallique nécessite quant à elle le passage en solution de tous les constituants du métal, les ions et les électrons. Elle fait intervenir au minimum deux réactions distinctes et indépendantes, une réaction anodique, l'oxydation du métal, et une réaction cathodique, le transfert d'électrons avec réduction simultanée d'un constituant de la solution.

Au passage, on notera que tout ce qui vient d'être dit s'applique également à tout électrolyte autre que l'eau. Inversement, l'absence d'électrons libres dans la phase liquide s'applique aussi à tout liquide autre qu'un métal fondu. La corrosion d'un métal dans un liquide non métallique nécessite donc que ce liquide puisse comporter des composants porteurs de charges électriques, c'est-à-dire des ions. Ceci signifie que seuls des électrolytes peuvent s'avérer des liquides corrosifs pour les métaux. Parmi tous les électrolytes, l'eau et les solutions aqueuses sont naturellement les plus ubiquistes.

II.2 L'électrolyse [2] :

L'électrolyse est la décomposition d'un corps par le courant électrique. Les corps qui peuvent subir l'électrolyse sont les acides, les bases ou les sels en solution.

A la cathode les électrons émis par la source de courant sont captés par les cations de la solution qui deviennent ainsi neutre. S'il ne se provoque pas de réaction secondaire avec l'électrolyse, on obtient une cathode, soit un dépôt de métal soit un dégagement d'hydrogène, mais dans aucun cas, il y'a diminution de la masse de cette cathode.

A l'anode, les anions attirés par l'anode deviennent neutres à cause des électrons perdus et qui retournent dans la pile. L'anion attaque toujours l'anode lorsque celle-ci baigne dans une solution d'un de ses sels. C'est aux dépend de l'anode que l'électrolyte se reconstitue. Dans les autre cas, l'anode est attaquée par des produits qui s'y forment en donnant naissance à des composés étrangers à l'électrolyte.

II.3 Echelle de NERNST [5] :

Lorsqu'un métal est plongé dans une solution de l'un de ses sels, et qu'il s'établit un équilibre entre le métal et les ions métalliques, le potentiel à une température bien déterminée est défini par la formule de **NERNST :**

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln C$$

Où : **E** : potentiel d'équilibre en volt ;

E_0 : potentiel normal correspondant au métal plongé dans une solution normal d'un de ses sels (1 mole/litre) et mesuré par rapport à l'électrode normal à hydrogène ;

R : constante de gaz parfait = 8.314 joule/K.mole ;

T : température en ^oK ;

n : valence de l'ion ;

F : 96500 Coulombs ;

C : concentration en ion du métal dans l'électrolyte.

NERNST a donné la liste des potentiels normaux d'oxydoréduction des métaux usuels à 25^{o}C.

Tableau 2.1 – Potentiel normal d'électrode
E_0 rapporté à l'électrode normale à hydrogène pour quelques métaux à 25^{o}C

Métal	Réaction	E_0(v)
Or	$Au \rightleftharpoons Au^{3+} + 3e^-$	+ 1.50
Platine	$Pt \rightleftharpoons Pt^{2+} + 2e^-$	+ 1.19
Argent	$Ag \rightleftharpoons Ag^+ + e^-$	+ 0.78
Mercure	$2Hg \rightleftharpoons Hg_2^{2+} + 2e^-$	+ 0.79
Cuivre	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2e^-$	+ 0.34
Hydrogène	$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$	0
Plomb	$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2e^-$	- 0.13
Etain	$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2e^-$	- 0.14
Nickel	$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2e^-$	- 0.25
Cadmium	$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2e^-$	- 0.40
Fer	$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e^-$	- 0.44
Chrome	$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3e^-$	- 0.74
Zinc	$Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2e^-$	- 0.76
Titane	$Ti \rightleftharpoons Ti^{2+} + 2e^-$	- 1.63
Aluminium	$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3e^-$	- 1.66
Magnésium	$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2e^-$	-2.37

II.4 Aspects thermodynamiques de la corrosion [6] :

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu environnant (ou les deux). Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal et si ce matériau se trouve dans un milieu où une électrolyse peut se produire, alors il y aura formation de piles qui vont débiter dans la masse métallique, car elles sont en court-circuit. Le processus de dissolution des zones anodiques est entamé.

II.4.1 Fonctionnement de la pile de corrosion [6] :

a) Potentiel d'un métal par rapport à un électrolyte :

Si un métal M de valence N plonge dans un électrolyte, il y a des ions M^{n+} qui passent dans la solution et des charges négatives apparaissent.

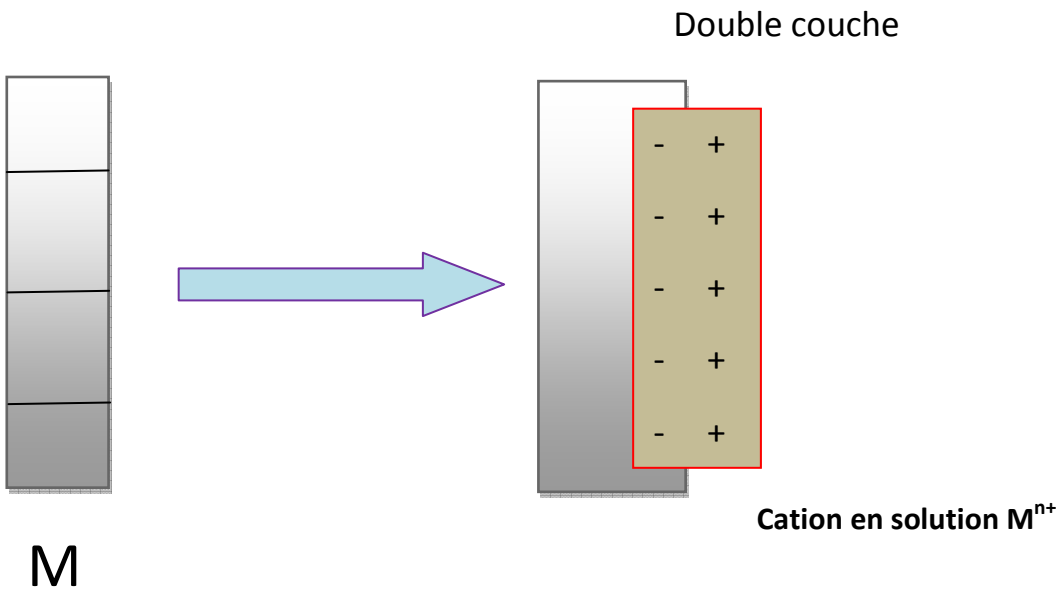


Figure (2.3) Formation de double couche

Pour quitter le métal, les ions M^{n+} doivent vaincre une double force : s'arracher à la couche (-) à la surface du métal et d'autre part franchir la barrière des charges (+), il s'établie un équilibre qui sera caractérisé par une d.d.p entre la couche métallique (+) et la couche (-), c'est le potentiel d'électrode qui dépend du métal et de la nature d'électrolyte. Il y a deux types de potentiel :

- **Potentiel d'équilibre**

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln C$$

L'électrode ainsi constituée est réversible, c'est à dire : $M \rightleftharpoons M^{n+} + e^-$

- **Potentiel de dissolution ou potentiel de corrosion :**

C'est le potentiel que prend un métal par rapport à un électrolyte quelconque. Le potentiel n'est plus caractéristique du métal, il dépend des conditions expérimentales : nature, concentration et température de l'électrolyte et aussi de l'état de solide du métal M. Il y' a modification progressive de la couche externe donc le potentiel de corrosion est un système irréversible. La d.d.p varie avec le temps et tend vers une valeur stationnaire.

On propose différents exemples de la variation temporelle du potentiel de corrosion libre d'une électrode métallique en contact avec un milieu corrosif.

Exemple 1 : Fer dans HNO_3

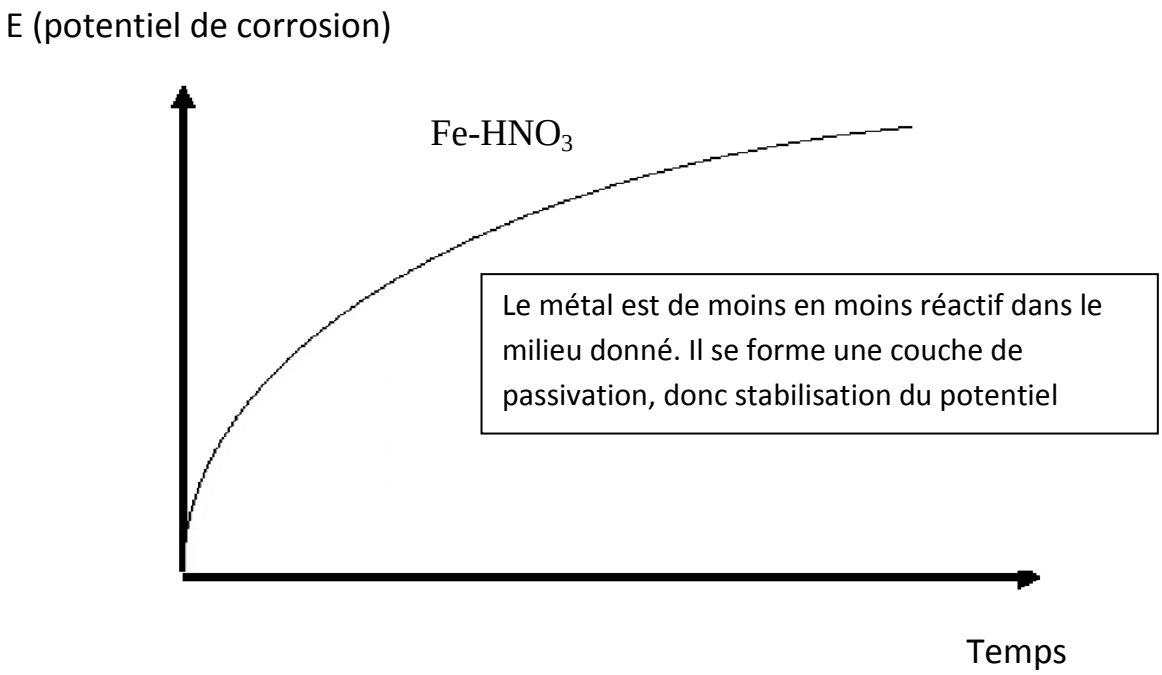


Figure (2.4) Variation de potentiel de corrosion de fer dans HNO_3

Exemple 2 : L'aluminium dans NaOH

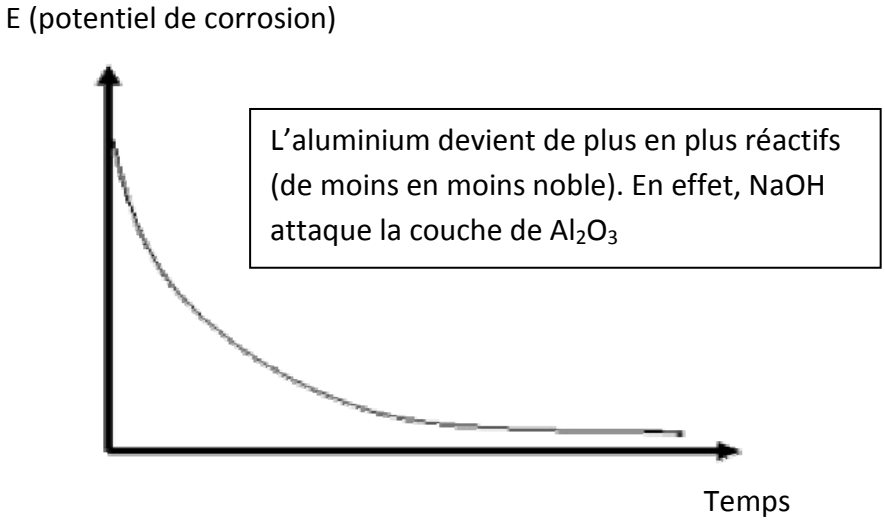


Figure (2.5) Variation de potentiel de corrosion de Al dans NaOH

b) Fonctionnement d'une pile de corrosion dite aussi pile galvanique :

C'est par définition une pile formée de deux matériaux métalliques de potentiels différents immergés dans un milieu corrosif donné.

Considérons par exemple une plaque de cuivre (Cu) et une plaque de zinc (Zn) qui plongent dans une solution formée d'eau ionisée dans laquelle du dioxygène est dissous O_{2d}. Le dispositif expérimental pourrait être une tuyauterie en acier galvanisé (assimilé à Zn) et une robinetterie en laiton (assimilée à Cu). Les deux pièces étant n'étant pas ou mal isolées électriquement. Une eau contenant des ions et du dioxygène dissous circule dans le dispositif.

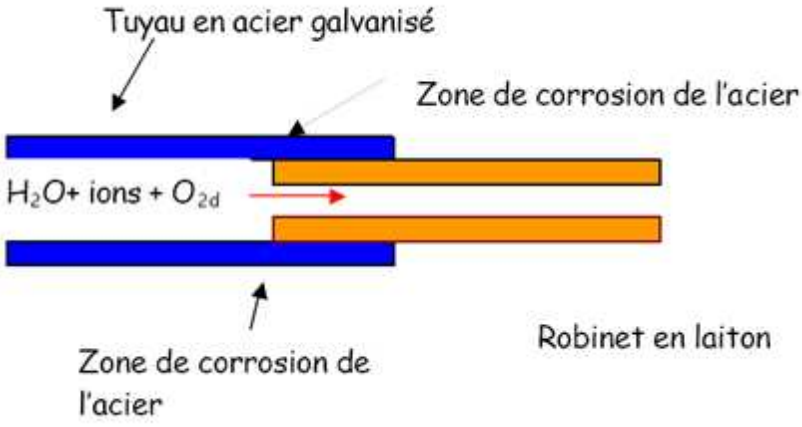


Figure (2.6) Formation de pile galvanique

- **Situation a :**

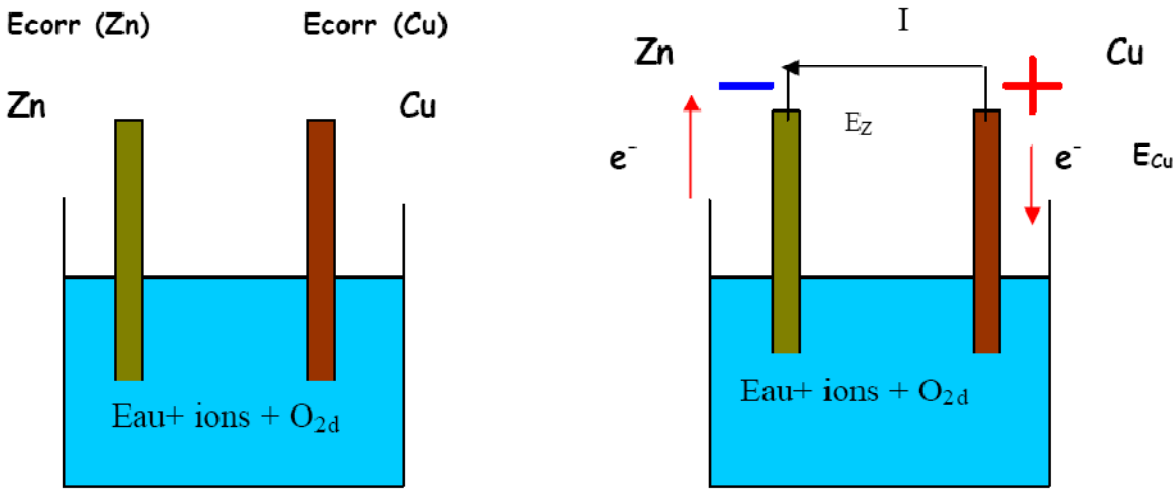
Cu et Zn isolés électriquement : le système est en circuit ouvert (Cu-eau-Zn) ; alors Cu et Zn prendraient chacun son potentiel de corrosion libre et donc subira un phénomène de corrosion à sa propre vitesse.

Pour Cu on aura :
- Réaction anodique : $Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2e^-$
- Réaction cathodique : $\frac{1}{2} O_{2d} + 2e^- + H_2O \longrightarrow 2OH^-$ sur Cu

Pour Zn :
- Réaction anodique : $Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
- Réaction cathodique : $\frac{1}{2} O_{2d} + 2e^- + H_2O \longrightarrow 2OH^-$ sur Zn

- **Situation b :**

Les deux métaux viennent en contact ; autrement dit on établit un court-circuit, la corrosion du zinc est nettement accélérée tandis que le processus de corrosion sur le cuivre s'arrête.



Circuit ouvert Circuit fermé : contact Cu-Zn

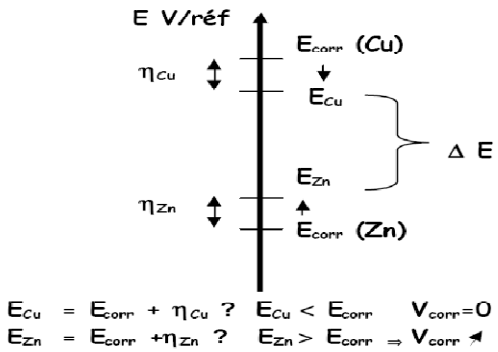
Figure (2.7) Pile galvanique Cu-Zn

c) Etablissement de la réaction globale de corrosion :

En circuit ouvert prend un potentiel de corrosion Ecorr (Cu) et le zinc son potentiel de corrosion Ecorr (Zn) avec : **Ecorr (Cu) > Ecorr (Zn).**

Lorsque les deux métaux sont reliés par un fil conducteur, les électrons peuvent circuler du métal de potentiel le plus bas vers le métal de potentiel le plus élevé : dans notre cas du Zn vers Cu. Autrement dit le Zn est l'anode, c'est le siège de la réaction d'oxydation ; Cu la cathode, c'est le siège de la réaction de réduction de du dioxygène dissous.

Chaque métal prend alors un potentiel différent de son potentiel de corrosion



La réaction globale de corrosion du zinc au contact du cuivre dans une eau aérée est :

$$Zn + ½\ O_{2d} + H_2O \longrightarrow Zn^{2+} + 2OH^-$$

d) Evolution des courants anodique et cathodique : le courant de corrosion

- *avant le contact électrique entre les 2 matériaux*

Sur Zn : le zinc se corrode seul dans le milieu ; il y a un courant d'oxydation Ia (Zn) et un courant de réduction Ic (Zn) de l'oxygène dissous qui se réduit sur le zinc.

Sur Cu : le cuivre se corrodant seul dans le milieu ; il y a un courant d'oxydation Ia (Cu) et un courant de réduction Ic (Cu) de l'oxygène dissous qui se réduit sur Cu.

- Après contacte :

Ia (Zn) ↗ et Ic (Zn) = 0

Ia (Cu) = 0 et Ic (Cu) ↗

Pour la réaction globale il reste donc :

- un courant anodique Ia (Zn) ;
- un courant cathodique de réduction Ic de l'oxygène dissous qui se réduit sur le cuivre.

L'intensité du courant I dans le circuit extérieur est

$$I_{corr} = I_a = -I_c$$

e) Evolution de la tension entre les 2 métaux :

Une fois le contact établi, on a :

Cette DDP est :

Où R est la résistance entre les deux matériaux et Icorr l'intensité du courant de corrosion.

Si R =0 les 2 potentiels évoluent jusqu'à $\Delta E = 0$, $E_{Cu} = E_{Zn} = E_{corr}$ et là le courant de corrosion est maximum (aucune résistance ne s'oppose à son passage).

II.5 Diagramme de pourbaix [2] :

Pour la plupart des métaux, le professeur Marcel pourbaix a établi des diagrammes pH / potentiel d'équilibre des réactions. Ces diagrammes décrivent les différentes réactions théoriques possibles entre le métal et ses ions en présence d'eau.

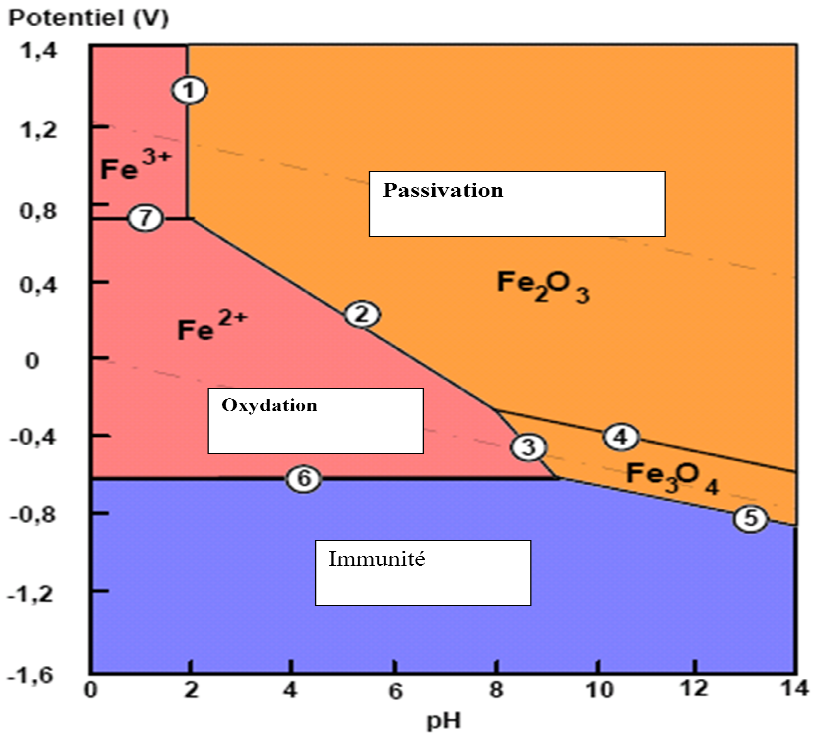


Figure (2.8) diagramme de pourbaix Pour le fer

A. Un domaine de corrosion où les atomes de fer passent sous forme d'ions dans la solution, et forment des sels et des hydroxydes solubles.

B. Un domaine de passivation où la corrosion est empêchés par formation d'une couche protectrice d'oxyde où hydroxyde de fer à la surface du métal. Cette couche se présente sous forme d'un filme d'un superficiel qui l'isole du milieu ambiant.

C. 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.

Le diagramme précèdent montre qu'il est possible de protéger le fer par les trois méthodes suivants :

1) Elever le potentiel pour se trouver dans la zone de passivation. Ce procédé est connu sous le non de protection anodique, c'est-à-dire que le métal est protégé par son propre oxyde. Cette protection ne l'est pas pour le fer du fait de l'instabilité de ses oxydes protecteurs et par crainte d'éventuelles variations de pH.

2) Rendre le milieu alcalin (basique) de manière à dépasser le pH 10.

3) Abaisser le potentiel pour se trouver dans la zone d'immunité. Ce procédé, beaucoup plus utilisé est connu sous le nom de protection ***cathodique***.

CHAPITRE III

PROTECTION DES OUVRAGES ENTERRÉS

Généralité :

Nous avons vu que la protection contre la corrosion d'un ouvrage enterré pouvait être réalisée par application de la protection cathodique. Cette protection dite active parce qu'elle agit directement sur le processus de corrosion. Une autre méthode dite de protection passive peut être utilisée. Elle consiste à soustraire l'ouvrage à protéger du milieu agressif dans lequel il baigne, par utilisation d'isolements ou de revêtements adéquats. Elle nécessite aussi d'isoler cet ouvrage des autres métaux qui pourraient amener des couplages galvaniques.

Malheureusement, toute solution de protection, quelle qu'elle soit, n'est jamais complètement efficace, soit parce que la définition des principes et leur application ne sont pas techniquement idéales, soit parce que, avec le temps, les caractéristiques des ouvrages se modifient, et que certains paramètres évoluent. Ainsi pour être efficace, la protection cathodique nécessite de porter l'ouvrage à protéger en dessous d'un certain seuil de potentiel. Ce seuil doit être effectivement atteint en tous les points de l'ouvrage.

Cette condition est d'autant plus difficile à vérifier que les ouvrages sont enterrés, donc peu accessibles aux mesures de potentiel du métal, et qu'il est impossible de s'assurer de cette condition en tous les points du métal. Seule l'étude des projets de protection cathodique et l'analyse des mesures sur le terrain pourront apporter la certitude de l'efficacité de cette protection.

De même, la protection passive ne constitue un remède totalement idéal et définitif. Aucun revêtement ne confère à un ouvrage un isolement infini. Malgré les contrôles effectués lors de la pose de l'ouvrage, il reste toujours des micropores qui mettent le métal en contact avec le sol. Quels que soient les soins apportés au remblaiement de l'ouvrage, des blessures sont provoquées par les éléments constitutifs du terrain qui endommagent cette protection. Et enfin le temps, en vieillissant les matériaux. Contribue lui aussi à détériorer petit les qualités initiales de barrière à la corrosion que constitue le revêtement.

Une politique réaliste en matière de protection contre la corrosion des ouvrages de transport, consiste donc à mettre en œuvre complémentairement les deux types de protection décrits ci-dessus.

III.1. Protection passive [2]

La protection passive consiste à isoler les structures métalliques par rapport au sol par l'utilisation de revêtements appropriés.

Cette isolation permet d'augmenter la durée de vie des installations et de réduire les besoins en courant de protection par coupure de circuit ionique entre le métal et le sol. La protection passive agit aussi en coupant le circuit électronique par l'interposition de joints isolants entre les différentes structures métalliques. Cette protection est réalisée au moment de l'exécution des travaux de réseaux.

III.1.2 Caractéristiques des revêtements[2] :

Un bon revêtement doit répondre aux impératifs suivants :

- Une bonne résistance électrique ;
- Une bonne étanchéité à l'eau ;
- Une bonne inertie chimique ;
- Une bonne adhérence à la surface du métal ;
- Une bonne résistance mécanique ;
- Une bonne résistance aux chocs ;
- Une bonne résistance thermique.

III1.3 Différente types de revêtement[2] :

Les conduites en acier destinées à être enterrées doivent être protégées au moyen d'un revêtement appliqué à chaud ou à froid ces revêtements sont :

- Revêtement à liant hydrocarboné type C (brai de bouille) ;
- Revêtement par bonde adhésive ;
- Revêtement en P.E extrudé ;
- Revêtement par gaine thermo rétractable.

Le tableau ci-dessous donne la comparaison entre ces différents revêtements :

Tableau 3.1 comparaison entre ces différents revêtements

Caractéristiques	Brai de houille	Bandes adhésives	P.E extrudé	Gaine thermo rétractable
Résistance d'isolement	M	B	TB	B
Adhérence	B	B	TB	B
Etanchéité à l'eau	M	B	TB	TB
Comportement à haut température	F	B	B	B
Tenue au choc	F	M	B	M

III.1.4 Mise en œuvre :

L'application des revêtements devra se faire sur une surface parfaitement sèche et débarrassée de toute traces de poussières par brossage afin d'assurer un contact parfait entre le revêtement et son support.

III.1.5 Revêtement à liant hydrocarbonés :

Ce type de revêtement appelé revêtement type C s'applique à chaud sur la surface métallique. Il est constitué par :

- Une couche appelée primaire d'accrochage ;
- Une ou plusieurs couches de produit à base de brai de houille ;
- Une ou plusieurs couches de voile de verre (armature) noyée dans le brai de houille.

La mise en œuvre de ce revêtement s'effectue de la manière suivante :

La couche primaire qui est un vernis liquide est appliquée à l'aide d'un pinceau souple cette couche doit être mince et d'épaisseur uniforme. Le temps de séchage doit être conforme aux indications du fabricant. La couche de brai sera coulée sur le primaire puis égalisée à la sangle. La température de fusion du brai de houille doit être contrôlée pour ne pas provoquer son altération ($T<150^{o}C$).

La couche de voile de verre (armature) doit être enroulée immédiatement sur le produit à chaud avec un recouvrement des spires de 2 à 2.5 cm. Une seconde couche de brai sera aussitôt coulée sur le voile de verre puis égalisée à la sangle.

L'épaisseur d'un revêtement normal se situe entre 3 et 4 mm. En terrain agressif, et aux points spéciaux il sera renforcé par l'application d'une seconde couche.

III.1.6 Revêtement par bande adhésive :

Ce revêtement est constitué par :

- Une couche primaire appelée couche d'accrochage ;
- Une bande de revêtement adhésive ;
- Une bande de protection mécanique en matière plastique.

La mise en œuvre de ce revêtement s'effectue de la manière suivante :

- La couche primaire ou couche d'accrochage s'applique suivant le même procédé que pour les revêtements à chaud.
- La couche de protection anticorrosion par bande adhésive est appliquée manuellement ou à l'aide d'une machine. La tension exercée sur les spires avec un recouvrement de 50% doit assurer une bonne adhérence de la bande et éviter tous les plis et boursouflures.
- Une bande complémentaire constituée d'une matière synthétique peut s'ajouter pour assurer une protection mécanique.

III.1.7 Revêtement en P.E extrudé :

Ce revêtement est appliqué en usine au moyen d'un procédé par extrusion il est constitué par une couche de polyéthylène qui se présente sous forme de gaine adhérente à la surface du tube grâce à une couche primaire appropriée.

III.1.8 Revêtement par gaine thermo rétractable :

Elles sont utilisées pour la protection des joints de soudure et des dérivations. Ces gaines sont composées de :

- Une couche intérieure constituée par un adhésif ;
- Une couche extérieure constituée par du PE réticulé ;

- Une glissière qui sert éventuellement comme pièce de fermeture.

III.1.9 Utilisation des joins isolants[2] :

Dans un couplage galvanique, on distingue une zone anodique (faible potentiel) et une zone cathodique, par conséquent une circulation de courant électrique conduisant à la dégradation d'une pièce. Pour protéger cette pièce il est nécessaire d'intercaler à la jonction bimétallique (entre les deux pièces) un raccord isolant, organe dont le rôle est de couper le circuit électrique et d'empêcher toute circulation de courant.

On distingue dans l'industrie deux types de raccord isolant à savoir :

- Joint isolant à bride ;
- Joint isolant monobloc.

Ses raccords isolants sont aussi utiliser dans l'industrie du transport du gaz pour isoler les postes de livraison au reste du réseau et pour isoler les conduites principales des conduites secondaires lors des soutirages ou injection de gaz.

III.1.10 Le décapage[5] :

Avant d'effectuer toute procédure de revêtement il est important d'effectuer une préparation de surface du métal à protéger de façon à ce que le revêtement soit adhérent.

Dans le domaine du transport de gaz par canalisation, en général les tronçons de conduite utilisés sont recouverts de corps gras destinés à éviter toute forme de corrosion durant leurs stockages.

Le décapage est donc un moyen permettant de débarrasser le métal de cette couche. Ainsi on peut réaliser un décapage par voie mécanique ou chimique.

III.1.10.1 Décapage mécanique :

Pour effectue un décapage mécanique, on utilise les procédés suivant :

- Le sablage ;
- Le brossage.

III.1.10.2 Décapage chimique :

L'élimination des corps gras se fait par des solvants chlorés et des détergents alcalins (basiques).

Quant à l'élimination de la rouille, elle est effectuée par les acides ; on parle de décapage acide.

Ce procédé présente un grand inconvénient qui réside dans la formation de l'hydrogène qui à tendance à pénétrer dans le métal et à le fragiliser.

Pour y remédier, on utilise lors cette opération des inhibiteurs de décapage (certains aldéhyde et alcools) qui empêche par adsorption la pénétration de l'hydrogène dans le métal.

III.2. Contrôle par méthode électrique des défauts des revêtements [5]

III.2.1 Principe :

Le principe de la méthode est basé sur l'application d'une tension électrique entre le support métallique et une électrode mobile située à la surface du revêtement contrôlé. Le revêtement, de par ses propriétés diélectriques, joue le rôle d'isolant.

Un défaut présent dans le revêtement permet le passage du courant entre l'électrode et le support métallique au travers de l'air. Ce passage de courant est matérialisé par un signal sonore ou lumineux.

La limite est la tension de claquage du diélectrique constitué par le revêtement.

III.2.2 Contrôle à haute tension électrique : méthode du « balai électrique ».

La méthode de contrôle à haute tension dite du balai électrique, est recommandée pour des films d'épaisseur supérieure à 300 μm.

L'utilisation du contrôle au balai électrique pour des épaisseurs inférieures à 300 μm est envisageable mais risque de détériorer le film. L'appareil pour le contrôle haute tension comprend :

- une source électrique ;
- une électrode exploratrice (brosse, balai, anneau en caoutchouc conducteur, ressort à boudin dont l'écartement des spires doit être inférieur à l'épaisseur du revêtement) ;

- un système de mise à la masse relié à l'appareil (mises à la terre d'un des pôles du générateur et de l'extrémité du tube).

L'appareil de contrôle à haute tension peut être un système à décharge électrique pulsée ou à décharge électrique continue.

La tension d'inspection doit être réglée de manière à permettre la détection d'une porosité dont la taille correspond à l'épaisseur des revêtements.
Une façon pratique pour déterminer cette tension consiste à placer sur une plaque d'acier une cale de contrôle en matériau isolant dont l'épaisseur correspond à l'épaisseur maximale du revêtement. En se servant de la cale comme repère, on cherche la tension minimale pour réaliser une étincelle dans l'air entre la plaque et l'électrode exploratrice.

Pour le contrôle sur chantier de pose, la valeur de la tension doit prendre en compte l'épaisseur maximale des revêtements ainsi que les caractéristiques de claquage du revêtement le moins isolant (généralement celui des joints soudés).

La partie métallique de la pièce à examiner doit être reliée à la masse de l'appareil.

L'électrode exploratrice en contact avec la surface du revêtement doit se déplacer à une vitesse de 0,3 m/s maximum.

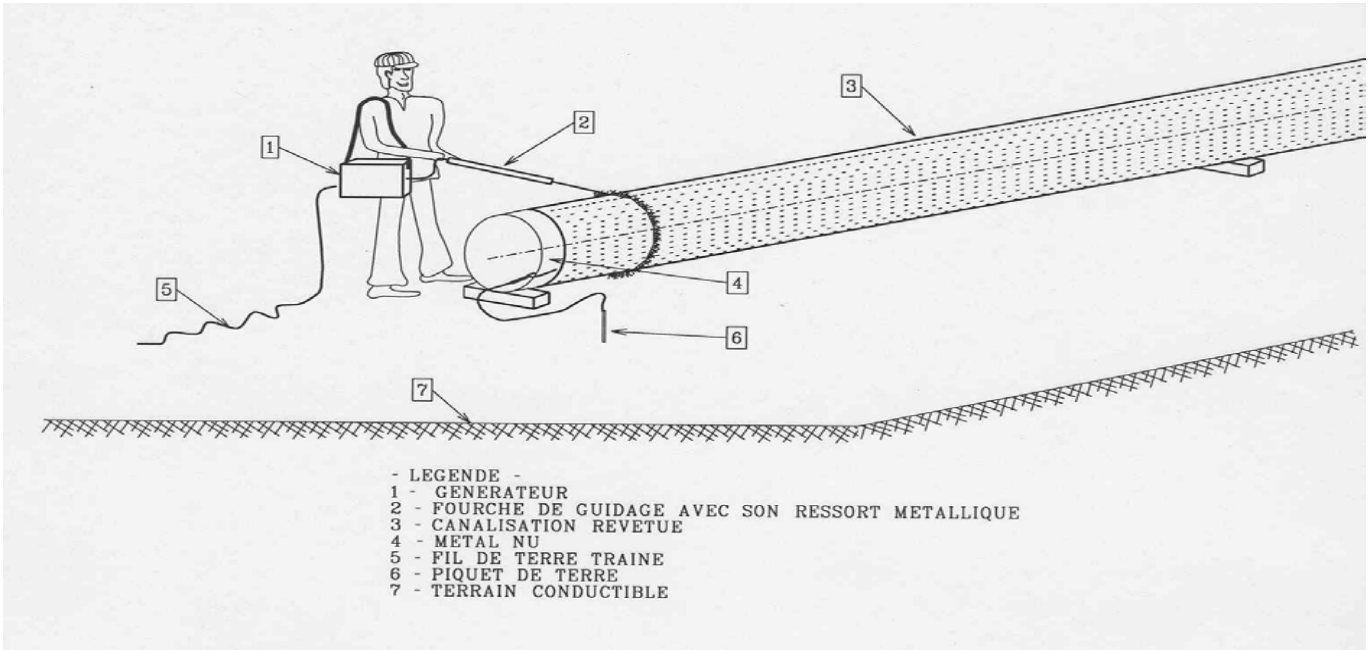


Figure (3.1) Principe du contrôle au "balai électrique"

III.3. Contrôle des joints isolants [2]

Les joints isolants doivent être vérifiés périodiquement leur bon état est primordial sur le bon fonctionnement de la protection cathodique. En effet toutes les défectuosités d'un joint se répercutent par un affaiblissement de la protection des ouvrages.

Le contrôle des joints s'effectue par les manières suivantes :

a) *Contrôle avant la pose* :

Ce contrôle se fait à l'atelier d'une lampe de poche dont l'interrupteur est remplacé par deux conducteurs avec point de touche. En mettant ces points de touche de part et d'autre du joint isolant. On applique aux bornes du joint une D.D.P par l'intermédiaire d'une pile.

- Si la lampe ne s'allume pas, le joint isolant et bon ;
- Si la lampe s'allume, le joint est fuyard (défectueux).

b) *Contrôle sur chantier* :

- On mesure le potentiel conduite /sol par rapport à Cu/CuSO4 en amont du joint isolant soit U1 ;
- On mesure ensuite le potentiel conduite /sol par rapport à Cu/CuSO4 en aval du joint isolant soit U2.

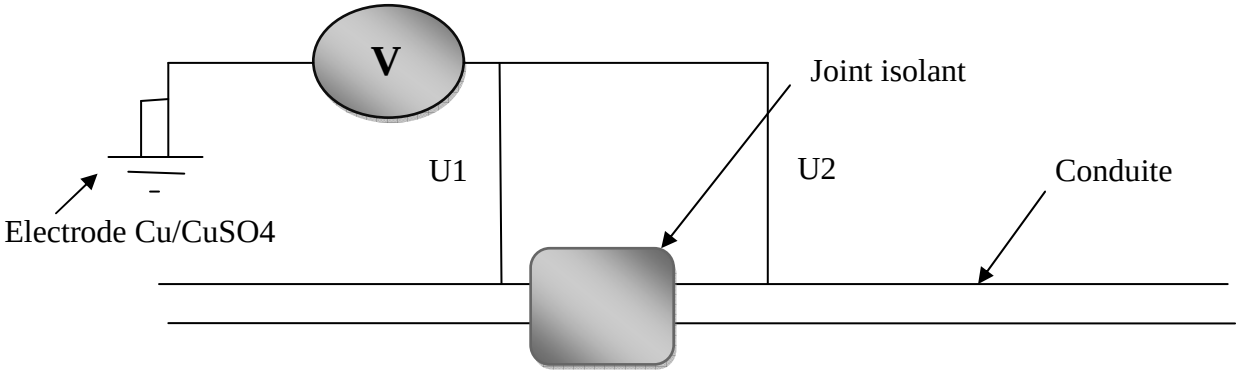


Figure (3.2) Contrôle sur chantier

On conclura que :

- Le joint est bon état si la valeur du potentiel U2 avoisine celle de l'acier dans le sol ;
- Le joint est douteux si U2 varie de quelques dizaines de mV dans le même sens que U1 ;

- Le joint est mauvais si U1 égale à U2.

Dans le cas où le joint est installé dans un réseau acier-cuivre le contrôle s'effectue comme suit :

On installe un contacteur au niveau du poste de soutirage puis on prend les mesures du potentiel du cuivre au niveau du branchement en marche et à l'arrêt.

- Si on deux valeurs différentes le joint isolant est défectueux ;
- Si les deux valeurs sont les mêmes le joint isolant est bon.

III.4. Lutte contre la corrosion par courant vagabond :

Nous avons expliqué ce mode de corrosion au chapitre précédent. Ici il est question de trouver un moyen d'éradiquer l'allo corrosion dont sont victimes les canalisations enterrées, prés de voix ferrées en particulier.

En général il est rarement possible d'intervenir sur les zones d'entrées des courants vagabonds dans une structure. C'est donc au niveau de la sortie de ce courant que l'on agit.

Le montage consiste à imposer le passage du courant dans un circuit préférentiel contrôlé et non plus à travers le terrain. Pour cela on établit une liaison polarisée entre la conduite et le chemin de fer (rail). Un système de régulation est ajouté au montage afin de limiter le courant.

On distingue deux types de drainages :

i. *Drainage à diode au silicium* : c'est le plus utilisé actuellement, suite à sa simplicité. La structure métallique est reliée à la liaison de retour par l'intermédiaire d'une diode ; le courant ne peut passer que dans le sens structure-liaison de retour.

ii. *Drainage à contacteur* : un boitier électronique mesure la différence de potentiel entre le rail et la structure métallique ; lorsque le potentiel du rail est négatif, le contacteur ferme la liaison et le courant peut circuler de la structure vers le rail. Lorsqu'il y a inversion du courant, le boitier électronique commande le contacteur à l'ouverture et le rail est alors isolé de la structure.

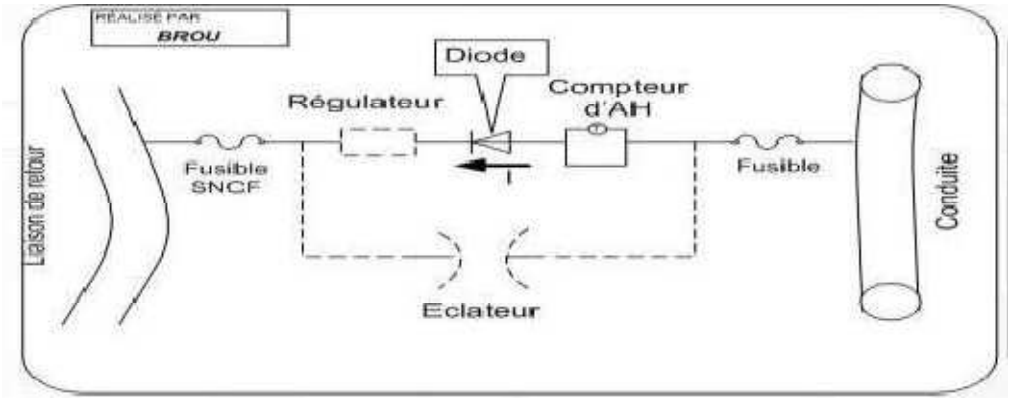


Figure (3.3) Schéma simplifié d'un système de drainage à diode

III.5. Protections cathodiques [2,5]

Elle consiste à amener par des moyens extérieurs et artificiels l'ensemble de la surface extérieure du métal à un potentiel suffisamment négatif pour rendre le métal entièrement cathodique et supprimer ainsi touts risque de corrosion.

On distingue deux types de protection cathodique :

1. La protection cathodique par anode sacrificielle ou réactive ;
2. La protection cathodique par courant imposé.

III.5.1 Principe de la protection cathodique :

La protection cathodique a pour objet d'abaisser le potentiel de l'ensemble de la surface du métal en contact avec le milieu électrolytique extérieur au dessous d'un seuil de potentiel à partir duquel l'oxydation du métal devient négligeable.

Son principe est d'amener la surface totale de la structure à protéger, à être cathode par rapport à un électrolyte, une anode servira de pièce de consommation. Dans le diagramme de Pourbaix apparait un domaine d'immunité ou le fer reste à l'état métallique, donc le potentiel du métal doit être abaissé pour se trouver dans ce domaine.

En règle générale on admet que toute structure en acier enterrée dont le potentiel aura été rendu plus négatif que -850mV à courant coupé par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre ($Cu/CuSO_4$).

La protection cathodique est caractérisée par certains paramètre dont :

- La nature des structures mis en jeux ;
- Le potentiel pris par la structure protégée ;
- L'intensité du courant injecté pour la protection ;
- La résistance électrique des éléments du circuit.

III.5.2 Protection Cathodique par anode sacrificiel :

Ce mode de protection est basé sur la création d'une pile galvanique dont la pièce à protéger sera la cathode de la pile et pièce à consommer sera l'anode dans notre cas l'anode à mettre en place sera un métal dont le potentiel normal apparent sera plus électronégative par rapport à la conduite à protéger qui elle joue le rôle de la cathode.

Cette méthode de lutte contre la corrosion des métaux est utilisée couramment pour la protection des équipements en contact de l'eau, mais également l'on l'utilise pour la protection des ouvrages enterrés de faible distance et surtout pour une protection provisoire des canalisations en cours de réalisation.

A titre d'exemple on rencontre ce mode de protection sur les navires, les plates-formes, et gazoducs…

III.5.2.1 Différents 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.

- Consommation massique pratique : environ 11.9 kg/A.an ;
- Potentiel dans le sol : -1100 mV (électrode Cu/Cu SO4) ;
- Ecart de potentiel par rapport au critère de protection : 250mV.

Les anodes en zinc présentent une très grande fiabilité de fonctionnement, et ont de ce fait une très grande durée de vie, avec 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.

b) Anodes en magnésium :

Le types d'anodes utilisé correspond à un alliage à 90% de magnésium contenant 6% d'aluminium, et environ 3% de zinc.

- Consommation massique pratique : environ 7 kg/A.an ;
- Potentiel dans le sol : -1600 mV (électrode Cu/Cu SO4) ;
- Ecart de potentiel par rapport au critère de protection : 750mV.

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 par l'alumine, de rendre plus électronégatif le potentiel de l'anode et 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 %.

III.5.2.2 Milieu entourant l'anode (Backfill) :

C'est un milieu qui assure une corrosion uniforme de l'anode, et maintien autour d'elle une humidité constante ainsi la résistance de contact anode-sol. Généralement ces anodes sont livrées dans un sac contenant le régulateur (Backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau, avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement. Une anode de 20 kg livrée sans Backfill nécessite :

- 50 kg de bentonite ;
- 12.5 kg de gypse (sulfate de calcium) ;
- Une grade quantité d'eau.

III.5.2.3 Installation des anodes :

La protection par anode réactive ne s'applique qu'aux réseaux de petites longueurs (2 à 3 km) et bien isolés, dont la résistance d'isolement des conduites par rapport au sol est bonne (au moins 5000 Ohm.m^2).

L'efficacité d'une anode sacrificielle dépend de sa position par rapport à l'ouvrage et son environnement. Son rendement sera meilleur si elle est posée dans les conditions suivantes :

- Au milieu de l'ouvrage à protéger, de manière à ce que sa portée englobe l'ensemble de l'ouvrage ;
- A une distance supérieure à 3 mètre de la conduite à protéger et de tout autre ouvrage métallique enterré ;
- Dans des terrains les plus humides possibles et de faible résistivité électrique de valeur inférieure à 30 Ohm m pour l'anode en Zinc et 50 Ohm m pour l'anode en magnésium.

La partie supérieure de l'anode doit être située sous le niveau de la génératrice de la canalisation.

Avant de remblayer la fouille l'ensemble anode régulateur doit être imbibé d'eau pour que le milieu entourant l'anode devienne une boue épaisse.

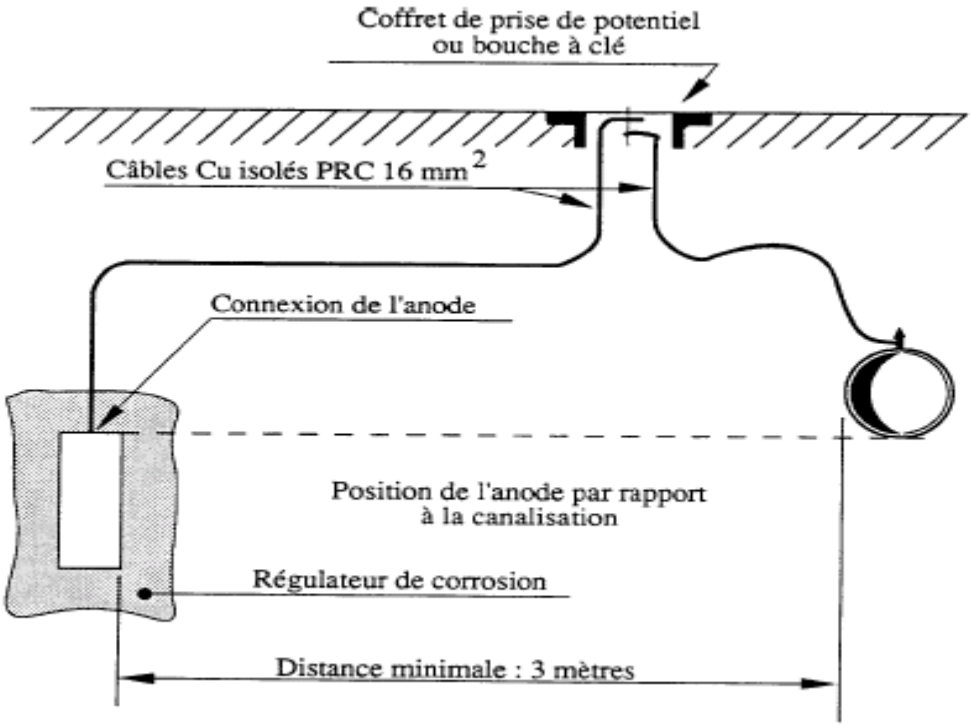


Figure (3.4) Anode galvanique en position verticale

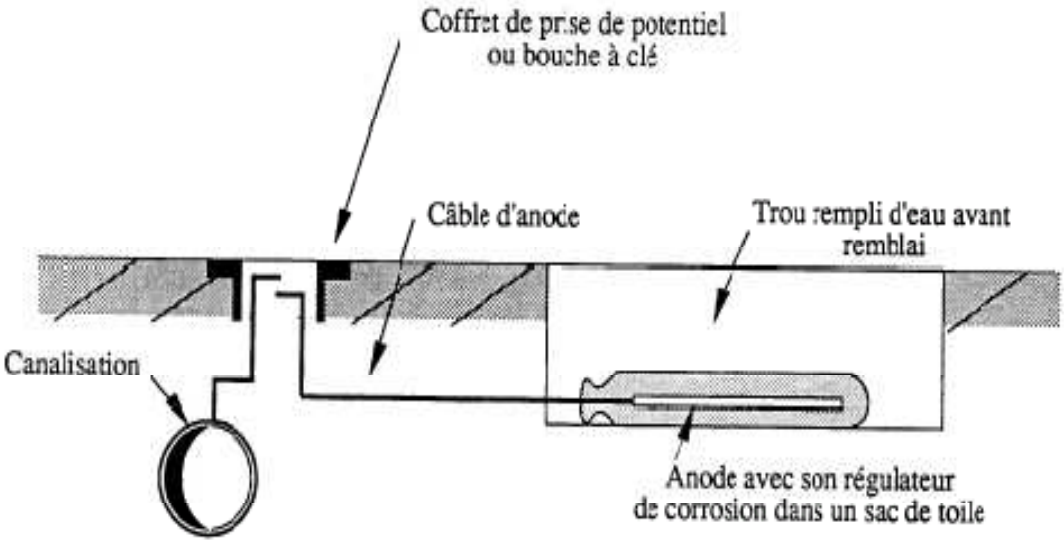


Figure (3.5) Anode galvanique en position horizontale

III.5.3 Protection cathodique par courant imposé :

III.5.3.1 Principe :

La protection par courant imposé, appelée également protection par soutirage de courant utilise une source de courant continu qui débit dans un circuit comprenant :

- Un déversoir (ou masse anodique) en métal ou graphite ;
- L'électrolyte (le sol ou l'eau) ;
- La structure métallique à protéger.

Comme le montre la figure, la borne positive de la source électrique est reliée au déversoir par l'intermédiaire d'un câble conducteur et la borne négative reliée de la même façon à la structure à protéger.

Ainsi le courant circule dans le sens déversoir-électrolyte-structure à protéger puis retourne à la source ; c'est l'entrée du courant dans la structure qui provoque l'abaissement de potentiel par rapport à celui du sol. Si ce potentiel est assez faible (-1V pour le fer) en tout point de la structure ; on dit alors qu'elle est protéger cathodiquement.

Pour améliorer son efficacité cette méthode comme la première, nécessite une isolation électrique complète de la structure à protéger.

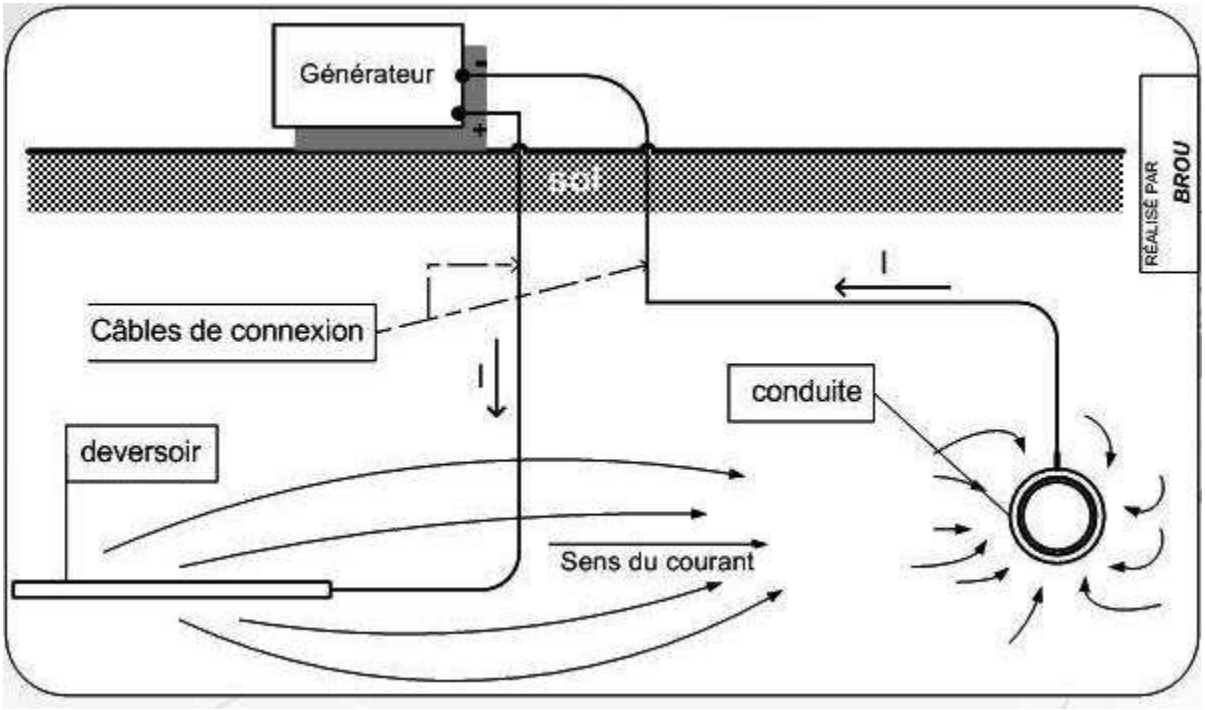


Figure (3.6) Principe de la protection cathodique par soutirage de courant

III.5.3.2 Le déversoir :

Le déversoir est un matériau conducteur d'électricité, il est soumis à la corrosion du système électrochimique conduite-sol-déversoir. Son rôle est d'injecter le courant de protection dans l'électrolyte.

Il est relié à la borne positive de la source électrique, et la valeur mesurée de son potentiel dans le sol, est souvent positive.

Il est important de noter que dans le cas des anodes sacrificielles, la pièce anodique du système électrochimique est l'anode galvanique, dont le potentiel est négatif par rapport au sol.

Par contre, dans les deux cas (déversoir ou anode sacrificielle), l'électrode dont le potentiel est rendu plus positif (car libération d'électrons), soit à la mise en service du générateur, soit lorsque la liaison électrique des deus métaux est réalisée (dans le cas d'une protection par anode sacrificielle), doit être considérée comme l'anode du système.

Ces considérations montrent qu'il faut éviter de désigner l'anode d'un système à partir du signe de potentiel.

On utilise très souvent des rails comme déversoir, ou des alliages de fer-silicium.

Ce dernier type d'anode est caractérisé par les propriétés suivantes :

- ✓ 14.5% de silicium ;
- ✓ 0.75% de manganèse ;
- ✓ 0.95% de carbone ;
- ✓ 4.5 de chrome ;
- ✓ Densité de courant admissible : 40 mA/m^2 ;
- ✓ Consommation massique moyenne : 0.3 kg/A.an (assez faible par rapport à celui de rail qui est de l'ordre de 10 kg/A.an).

En pratique il est conseillé de poser le lit d'anode au moins à une distance de 100 mètre de la conduite, afin d'augmenter la portée du poste de protection. Il est également recommander d'utiliser un nombre d'anode avoisine les 24 anodes, permettant ainsi de réduire considérablement la résistance de terre du déversoir.

III.5.3.2.1 Milieu entourant le déversoir (régulateur) :

A. <u>Cas du rail</u> :

Si la résistivité est supérieure à 90Ωm la résistance électrique sol-déversoir peut s'améliorer en ajoutant une boue liquide à base de bentonite. Qui est constituée pour 1 mètre de rail de 25 kg de bentonite, 2 kg de sel et 150 litre d'eau. Si la résistivité du sol reste élevée on ajoute 10 kg de gypse en poudre.

Par contre les régions très sèches. Un système d'arrosage permanent peut être installé sur chaque déversoir pour humidifier en période d'été le régulateur de corrosion par un apport d'eau extérieur. Ce système est constitué de longueur de tubes en PVC de diamètre 80 mm, raccordés des uns aux autres et perforés dans la partie inférieure. Il doit être posé au dessus du rail. Parallèlement à celui-ci et sur un lit de gravier (10 cm), ce dernier permet lors de l'arrosage une infiltration lente et homogène de l'eau vers le backfill.

Le gravier mis entre la plaque en PVC (perforée) et la tête de la tige sert à éviter la pénétration des corps étrangers qui pourront boucher le passage de l'eau lors de l'arrosage et facilite le nettoyage de la plaque.

B. **Cas des anodes en ferrosilicium ou en graphite :**

Pour ces deux types de déversoirs. Il est conseillé d'utiliser comme régulateur, un mélange à base de graphite, le régulateur à base de bentonite est utilisé juste pour les anodes en ferrosilicium seulement.

III.5.3.2.2 Installation du déversoir :

Le déversoir doit être implanté à une distance de 50m environ de la conduit à protéger et perpendiculaire à celle-ci, écart d'au mois 50m des ouvrage métalliques des autres occupants du sous sol afin d'éviter toute influence sur ces structures, ceci est dans le cas où le courant de protection est élevé. Par contre si le courant de protection est de l'ordre de 20ou 3A, la distance entre le déversoir et les canalisations est ramenée à 10 m, en plus les précautions d'isolement doivent être prises aux points de croisement.

III.5.3.3 Poste de protection cathodique (ou de soutirage)

Pour assurer la protection par cette méthode, l'on besoin d'installer un poste de protection cathodique. Le rôle du poste est de délivrer le courant nécessaire à la protection de la structure. De façon général un poste est constitué de :

- Un branchement en tension : provenant d'une source électrique ;
- Coffret de soutirage : il comprend un disjoncteur (qui permet de protéger les équipements électrique avals), un compteur, un transfo-redresseur. Ce dernier élément , effectue à chaque fois une régulation permettant de livrer le courant nécessaire pour la protection, il est donc un élément très important dans cette méthode de protection. ;
- Conducteur de liaison au déversoir et à la structure à protéger.

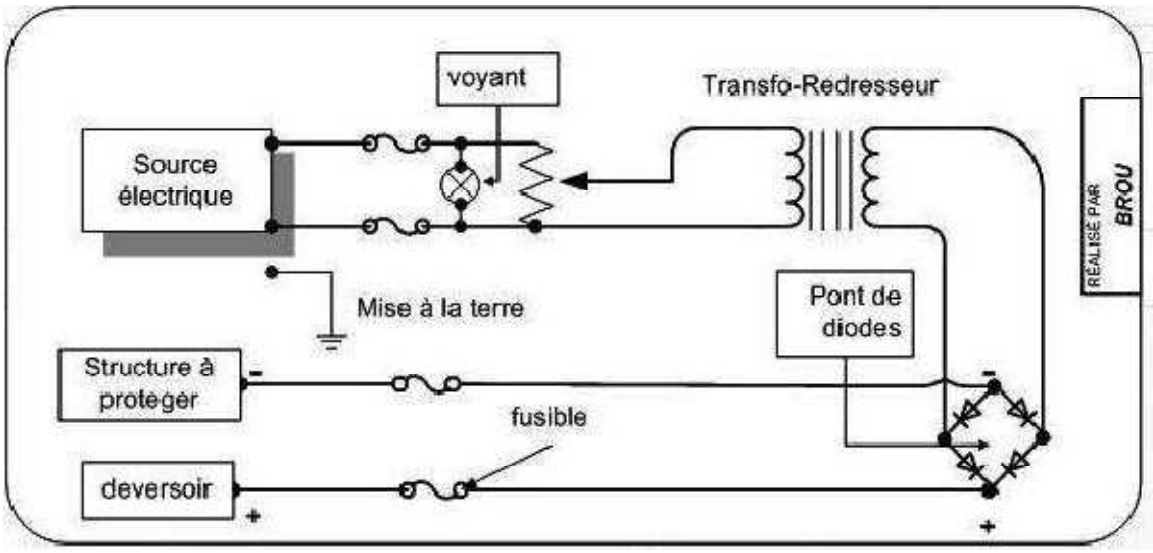


Figure (3.7) Schéma simplifié d'un poste de soutirage, alimenté par une source électrique classique

Figure (3.8) Prise de vue de l'armoire de soutirage d'un poste

- **Chois de l'implantation d'un poste de soutirage :**

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer une protection la plus efficace sur la plus grande portée avec une puissance minimale. Ce mode de protection est appliqué en fonction des paramètres suivants :

- Dimensions et géométrie des structures à protéger ;
- Le point le plus favorable pour l'installation de déversoir ;
- L'encombrement du sous sol en structures métalliques diverses ;
- A proximité d'une source électrique BT.

En plus l'emplacement devra être choisi au centre de réseau afin d'obtenir une bonne répartition des potentiels et en un point du réseau ou le diamètre des conduites est important pour avoir la conductibilité longitudinale la plus favorable afin de diminuer autant que possible le nombre de redresseur à poser.

Il est donc nécessaire d'examiner tout d'abord le plan d'ensemble du réseau pour déduire les emplacements les plus indiqués.

III.5.3.4 Câbles de connexion :

Les conducteurs et les câbles assurent la transmission de l'énergie électrique et sa distribution. Il en existe une très grande variété pour satisfaire à toutes les utilisations de l'électricité.

Ainsi on en distingue trois types à savoir :

- Le conducteur isolé : qui est un ensemble formé par une âme conductrice entourée d'une enveloppe isolante ;
- Le câble unipolaire : c'est un conducteur isolé qui comporte, en plus, une ou plusieurs gaines de protection ;
- Le câble multiconducteurs : c'est un ensemble de conducteurs distincts, mais comportant une ou plusieurs gaines de protection commune.

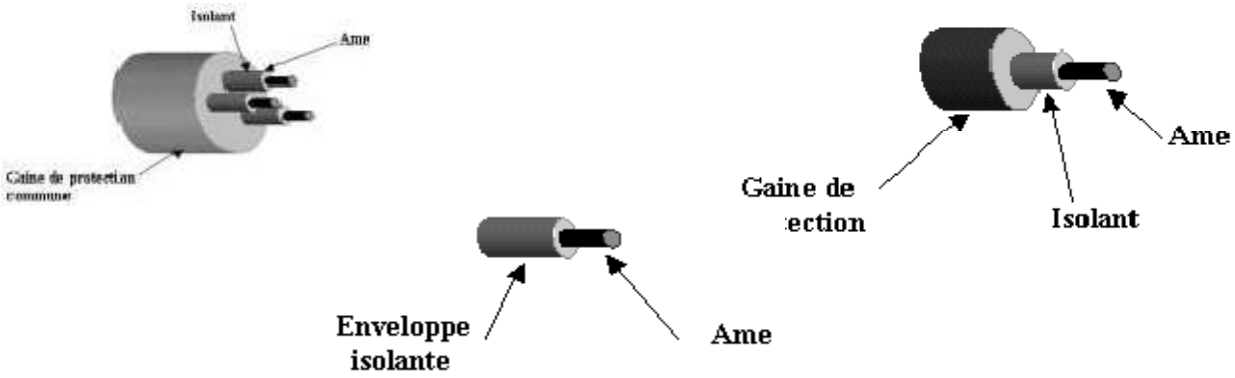


Figure (3.9) différente câble de connexion

L'âme doit être très bonne conductrice d'électricité pour limiter au maximum les pertes par effet joule, lors du transport de l'énergie, d'où l'utilisation du cuivre, ou de l'aluminium qui ont une résistivité très faible.

Les isolants doivent protéger les conducteurs contre la présence d'eau, de poussières, les chics mécaniques et la chaleur. Elles doivent avoir une résistivité très grande (isolant), on emploie parfois le PVC (polychlorure de vinyl) ou le polyéthylène.

Les caractéristiques mécaniques de l'enveloppe isolante ne sont pas toujours suffisantes pour protéger le câble des influences externes. On est conduit à recouvrir l'enveloppe isolante par une gaine de protection qui doit présenter de bonnes caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, flexion, choc…), physiques (résistance à la chaleur, l'humidité…), et chimiques (résistance à la corrosion et au vieillissement).

Le chois de la section d'un câble est fonction du courant maximal devant y transiter et du matériau du conducteur, ainsi la surface en mm^2 des câbles est donnée par :

$$S_{cable} = \frac{\rho . L}{R_{max}}$$

Où ρ : la résistivité des matériaux du câble ;

L : la longueur du câble ;

R_{max} : la résistance.

III.5.3.5 Contrôle du potentiel conduite /sol :

Le but de mesure du potentiel est de vérifier le bon fonctionnement da la protection cathodique de la conduite à protéger.

III.5.3.5.1 Mesure de potentiel :

La mesure du potentiel s'effectue à l'aide d'un voltmètre dont la résistance interne est de l'ordre de 20 000 ohms par volt pour les revêtements type C.

- Utiliser de préférence des voltmètres à aiguille et à zéro centrale ;
- Eviter les appareils à affichage digital, à proscrire dans le cas de mesure en présence de courants vagabonds ;
- L'électrode de référence doit être positionnée le plus prés possible de la conduite ;
- On relie la borne positive du voltmètre ou la borne « commun » à l'électrode de référence ;
- On relie la borne négative ou la borne « V continu » à la canalisation dont on veut connaître le potentiel par rapport au sol.

Pour les appareils à aiguille à zéro central, si l'aiguille dévie à droite, les valeurs lues sont affectées du signe moins. Pour assurer que la mesure est correcte, la faire sur plusieurs calibres du voltmètre ;ce qui donner la même valeur.

- Il faut soigner particulièrement le contact électrode sol (ne pas poser l'électrode sur des cailloux, graviers, sable,…; humidifier le sol au droit de la mesure si besoin est) ;
- Utiliser une électrode de référence en bon état ;
- Electrode correctement remplie de sulfate de cuivre saturé ;
- Barreau de cuivre non oxydé (à nettoyer à chaque campagne de mesure).

III.5.3.5.2 Électrode de référence :

L'électrode de référence généralement utilisée en exploitation est l'électrode au (cuivre /sulfate de cuivre) Cu\CuSo4. Elle se compose d'un tube en plastique où plonge un barreau de cuivre dans une solution de sulfate de cuivre saturée avec un poreux (en bois) pour le contact avec le sol. On emploi une telle électrode afin que le contact avec le sol soit toujours fait, avec la même matière, Elle ne se polarise pas et est stable dans le temps.

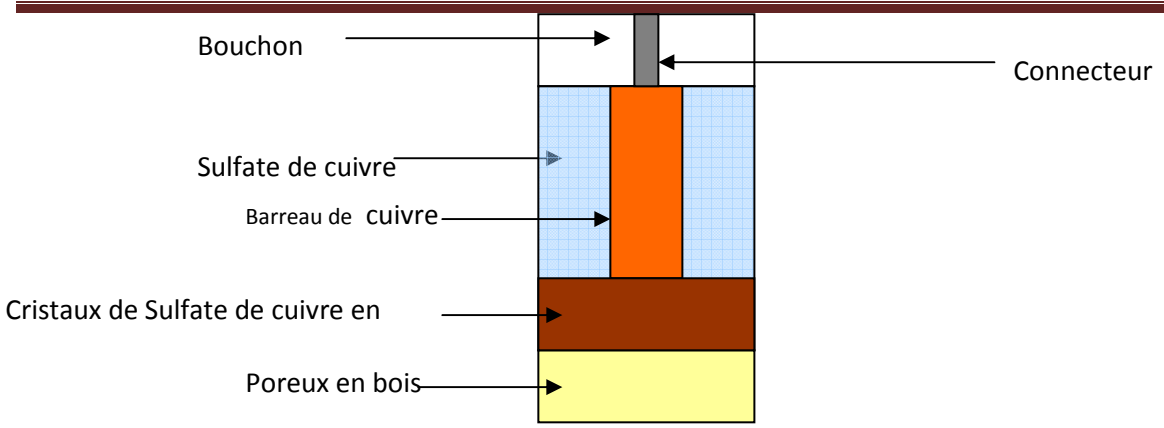


Figure (3.10) Electrode de référence

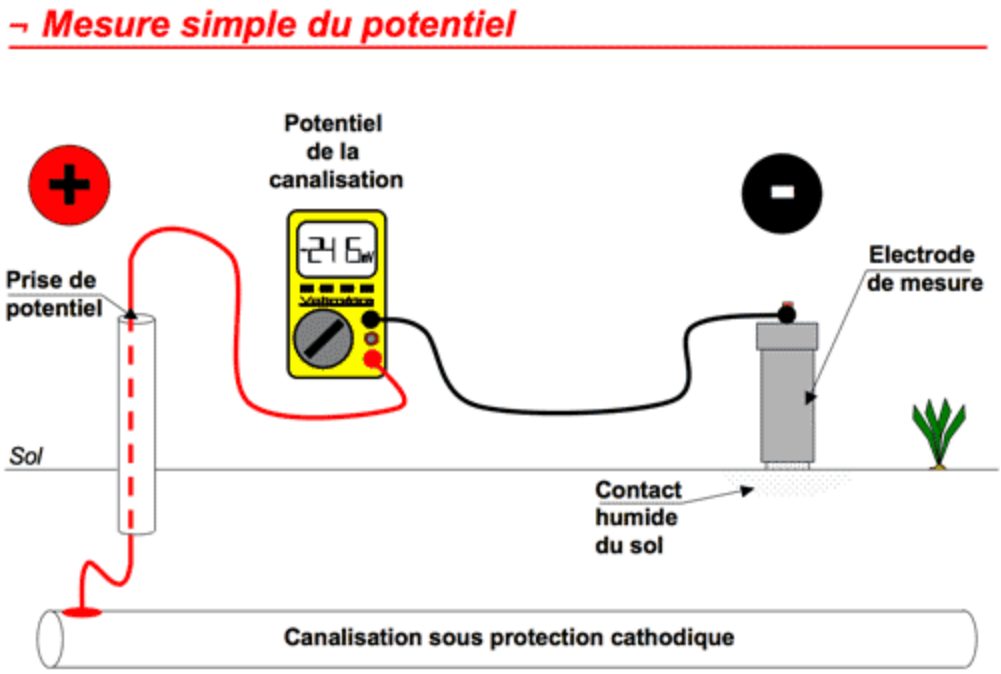


Figure (3.11) Mesure de potentiel

III.5.3.6 Exploitation et entretien :

III.5.3.6.1 Mesure et Contrôle :

Afin de permettre des vérifications de protection (efficacité des joints, mesures de débit, mesures de potentiel) il est jugé nécessaires d'installer des prises de potentiel dont le nombre et les emplacements de ces prises sont définis lors des études pour contrôler :

- Les potentiels des conduites par rapport au sol ;

- Les potentiels de part et d'autre d'un raccord isolant ;
- L'isolement entre une conduite et son fourreau métallique ou d'autres structures métalliques.

La mesure de potentiel entre l'électrode de référence et la conduite à protéger se fait à l'aide d'un voltmètre en raccordant le pôle positif du voltmètre à l'électrode de référence et le pôle négatif à la conduite.

III.5.3.6.2 Exploitation et entretien des protections installées :

La protection cathodique n'est efficace que si elle fonctionne en permanence. Son fonctionnement épisodique est néfaste car le métal se trouve alternativement oxydé et réduit.

Cette situation peut provoquer une perte de métal supérieur à celle entraînée par une corrosion normale pour cela il faut vérifier périodiquement le fonctionnement des installations de protection cathodique par un ensemble d'actes programmés à caractère obligatoire ou délibéré pour s'assurer que les ouvrages sont bien protégés.

Pour cela il y a lieu d'effectuer de façon périodique tous les mois :

- Des mesures de potentielle conduite par rapport au sol ;
- De l'ouvrage seul (hors protection) ;
- De l'anode seule ;
- De l'ouvrage et l'anode raccordés (sous protection) ;
- La mesure de débit de l'anode ;
- La mesure de la tension et l'intensité débitée au niveau du redresseur ;
- Consommation d'énergie électrique ;
- Des visites hebdomadaire des postes de soutirage et des visites systématiques après chaque orage et des coupure de courant MT/BT pour vérifier le bon fonctionnement des appareils (Disjoncteur, fusible, diode etc…) .

Ainsi des compagnes de mesures programmées qui permettent de procéder au réglage et à la remise en état des installations de protection cathodique.

Toutes les mesures effectuées serons portées sur des fiches et conservées pour exploitation.

III.5.3.6.3 Méthode de recherche de défaut d'enrobage :

C'est la méthode à courant coupé (ON/OFF). Consiste à calculer le gradient de potentiel (Emarche – Earrêt) on utilisons un interrupteur séquentiel (12 sec/3 sec) . On mesure la différence de potentiel en marche et en arrêt de la protection ; la valeur de cette dernière est divisée par l'intensité de courant consommé par le tronçon, sur laquelle on jugera la qualité du revêtement sur ce tronçon.

On estime, qu'un tronçon est considéré comme correctement protégé s'il puise une densité de courant inférieure à 1 mA/m2.

Dans Le cas ou cette valeur est dépassée, on procède par la méthode de détection des défauts d'enrobage, à la localisation du point ou il y a insuffisance de protection.

CHAPITRE IV

DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

IV.1. Théorie et méthode de calcul [6]

IV.1.1 Modèle mathématique du phénomène d'atténuation

IV.1.1.1 Résistivité du sol : ρsm

Comme il est précisé dans le premier chapitre, ce paramètre très important est déterminé par la méthode des quatre piquets. De façon générale elle est mesurée le long de la structure avec un intervalle de 500 à 2000m pour un ouvrage en projet et à chaque 500 à 1000m pour un ouvrage existant.

Ceci étant pour une longue structure, tels que les pipelines, plusieurs mesures sont effectuées, la résistivité du sol doit être estimée à une valeur moyenne, qui est donnée par l'équation suivant :

$$\rho_{sm} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\rho_i . l_i}{L} \qquad 4.1$$

$$L = \sum_{i=1}^{n} l_i$$

Avec : ρsm : résistivité moyenne du sol en [Ω.m] ;

l_i, ρ_i : longueur du tronçon i correspondant à la résistivité ρ_i ;

L : longueur totale de la structure ;

n : nombre de tronçon.

Parfois les données dont nous disposons ne nous permettent pas d'utiliser l'équation précédente, alors on déterminera la résistivité moyenne du sol comme suit :

$$\rho_{sm} = \rho_{moy} = \frac{1}{N} \sum \rho_i \qquad 4.2$$

Où N : est le nombre de tronçon.

IV.1.1.2 Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur : Rc

Autrement appelé résistance transversale, par unité de longueur elle s'exprime en [Ω/m] et est donnée par :

$$Rc = \frac{\rho c}{\pi.(\phi ext - \delta).\delta} \qquad 4.3$$

Avec : ρc : résistivité électrique du matériau de la structure [Ω.mm^2/m]

ρ_c de l'acier peut être accepté pour 0.245 Ω.mm^2/m ;

ϕ_{ext} : diamètre extérieur de la structure [mm] ;

δ : épaisseur moyen de la conduite [mm].

IV.1.1.3 Resistance transitoire « conduite-sol » : Rt

La variation de la résistance transitoire « conduite-sol » Rt(t) et exprimée en [Ω.m^2], peut être évaluée, pour des pipelines en projet ou en exploitation par la relation suivante :

$$R_t(t) = R_{ti}.e^{-\beta.t} \qquad 4.4$$

Néanmoins, en général pour les calculs en protection cathodique on utilise plutôt la valeur moyenne de la résistance transitoire conduite-sol qu'on note Rtm pour une durée de protection « t » connue. Exprimée en [Ω.m^2], elle est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta.t)}\left[1 - e^{(-\beta.t)}\right] \qquad 4.5$$

Avec : β : Coefficient de vieillissement du matériau de la conduite [1/an]

β_{acier} peut etre égal à 0.124 1/an

t : durée d'exploitation du système de protection [ans]

R_{ti} : résistance initiale d'isolement du revêtement ; à t=0 [Ω.m^2]

IV.1.1.4 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite : Rr

Elle s'exprime en [Ω.m] et est notée Rr(t) pour une durée d'exploitation t.

$$Rr(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi.\phi ext)} \qquad 4.6$$

En outre, au début de l'installation du système de protection la résistance d'isolement du revêtement est plus importante. Notée Rr(0), elle est donnée par :

$$Rr(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi.\phi ext)} \qquad 4.7$$

IV.1.1.5 Constante de distribution du potentiel le long de la conduite :*α*

Autrement appelé coefficient d'atténuation, ce paramètre s'exprimant en [1/m], il traduit l'abaissement du potentiel le long de bras de protection.

$$\alpha = \sqrt{\frac{Rc}{Rr(t)}} \qquad 4.8$$

IV.1.2 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes

Selon les caractéristiques du pipeline, un certains nombre de postes de soutirage est nécessaire pour abaisser suffisamment le potentiel de la conduite afin de satisfaire au critère de protection.

IV.1.2.1 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue : Z

Dans le domaine du transport des hydrocarbures par canalisation, les pipelines sont toujours revêtus, et ce revêtement constitue le siège d'une résistance ; dite résistance d'entrée.

Comme toutes résistances, elle s'exprime en ohm et est donnée par :

$$Z = \frac{\sqrt{Rc.Rr(t)}}{2} \qquad 4.9$$

IV.1.2.2 Valeurs des potentiels :

Généralement on distingue pour les structures métalliques immergées ou enterrées trois types de potentiels pris en compte dans les calculs de protection cathodique. Ces potentiels sont donnés par rapport à une électrode de référence, qui sera tout au long de ce travail, l'électrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu-CuSO4).

A. Le potentiel naturel : c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol ; on le notera Enat. L'expérience montre que pour l'acier cette valeur est dans l'intervalle de -.045 à -0.617 volts, en revanche, si elle n'est pas connue on peut supposer que :
   Enat = -0.55 V.
B. Les potentiels de protection Emax et Emin : ils constituent un intervalle à l'intérieur duquel le métal ne s'oxyde point, ils sont choisis d'après le diagramme de Pourbaix. Pour l'acier la plus petite valeur en valeur absolue est de 850 mV. Quant à Emax ; il

est choisie en fonction du type de revêtement, c'est-à-dire que pour une valeur donnée, le gain de potentiel correspondant ; Epmax ne doit pas excéder -1200 mV pour un revêtement en PE tri-couche.

C. Gain de potentiel : c'est la différence de potentiel que prend le métal par rapport au potentiel naturel lorsqu'il est relié au poste de soutirage. On distingue un gain de potentiel de protection maximum et minimum, notés respectivement Epmax et Epmin.

$$Epmax = Emax - Enat \qquad 4.10$$

$$Epmin = Emin - Enat \qquad 4.11$$

Comme le courant qui est déversé dans l'électrolyte pour ensuite pénétrer dans la conduite, afin de baisser son potentiel, le potentiel que prend le métal une fois connecté au système de protection cathodique n'est pas constant, il varie suivant l'allure d'une loi exponentielle.

Afin d'établir l'expression de cette variation du potentiel et du courant j'émets les hypothèses suivantes :

- L'électrolyte (sol) est homogène le long du pipeline ;
- Le diamètre, l'épaisseur de la paroi et la résistance électrique des tubes soudés sont constants ;
- Le revêtement de la conduite est uniforme le long de la canalisation.

Les expressions de variation du potentiel et du courant à un point « x » quelconque de la conduite sont :

$$E(x) = E_{max}\left[\frac{2.\pi.z}{2.\pi.z+\rho_{ms}}e^{-\alpha.x} + \frac{\rho_{ms}.y}{2.\pi.y.z.\sqrt{y^2+x^2}}\right] \qquad 4.12$$

$$I(x) = \frac{E_{max}}{\alpha.R_r+\frac{\rho_{ms}}{\pi.y}}\left[e^{-\alpha x} - \frac{\rho_{ms}}{\pi.R_r}.\mathrm{Arsh}\frac{x}{y}\right] \qquad 4.13$$

Où y(m) désigne la distance entre le lit d'anode et la conduite.

X est la distance entre le poste de soutirage et le point de mesure

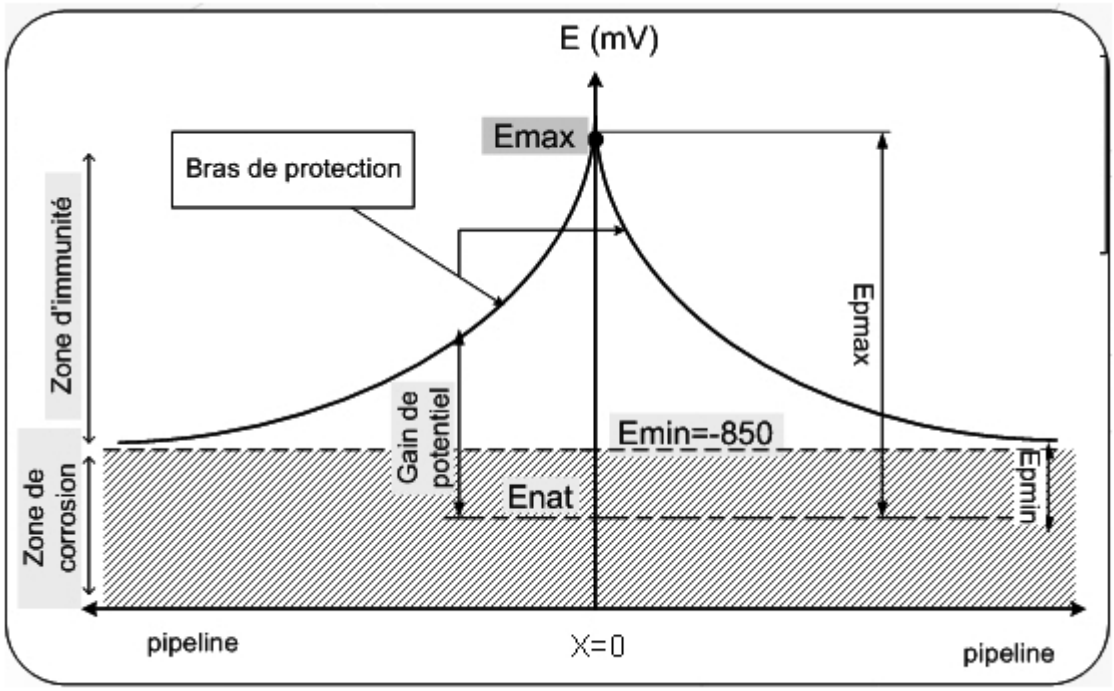


Figure 4.1 : Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

IV.1.2.3 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K

La plupart du temps les canalisations de transport d'hydrocarbures sont assez longues, par conséquent, un seul poste de soutirage ne suffirait pas à livrer le courant nécessaire pour la protection. C'est pourquoi l'on tient compte d'un facteur (de valeur approximative 0.5) dans les calculs de la longueur de protection d'un poste donné. Ce coefficient est obtenu par l'expression ci dessous:

$$K = \frac{1}{1+\sqrt{1-\left(\frac{Epmin}{Epmax}\right)^2 \frac{2.\pi.y.z+\rho_{sm}}{2.\pi.z.y}}} \qquad 4.14$$

IV.1.2.4 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage : Lp

On appelle longueur de protection Lp [m], d'un poste de protection cathodique, la longueur maximale de conduite qui peut être protégée à l'aide du courant fourni par ce poste. En d'autre terme, c'est la portée du poste de soutirage.

Quant au bras de protection, c'est la moitié de la longueur de protection. Ainsi, un poste de soutirage à deux bras de protection.

Lp s'exprime en mètre (m) et est déterminer suivant la relation :

$$Lp = \frac{2}{\alpha} \, Ln\left[\frac{2.\pi.y.z}{k.\frac{Epmin}{Epmax}(2.\pi.y.z+\rho_{sm})}\right] \qquad 4.15$$

IV.1.2.5 Calcul du nombre de poste de protection cathodique : Nppc

Connaissant la longueur totale (L) exprimée en mètre, du pipeline à protéger et ayant déterminé la portée d'un poste de soutirage, nous pouvons établir l'expression donnant le nombre de postes de soutirage.

$$\mathrm{Nppc} = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{Lp}+1} \qquad 4.16$$

IV.1.2.6 Calcul de l'intensité du courant de drainage : I_{dr}

Quant au courant de drainage, c'est le courant nécessaire que doit fournir le poste de protection afin de satisfaire au critère de protection en tout point de la conduite. Elle est exprimée en Ampère, et donnée par la relation ci-dessous :

$$\mathrm{I}_{dr} = \frac{|\mathrm{Epmax}|}{\mathrm{z}.[1+2.\mathrm{Exp}(-\alpha.\mathrm{Lp})]+\frac{\rho \mathrm{sm}}{2.\pi.\mathrm{y}}} \qquad 4.17$$

Il est important de noter que le courant délivré par le poste de soutirage au début de l'installation est relativement plus faible que le courant nécessaire, à la fin de la durée d'exploitation. Cela est particulièrement lié à la résistance d'isolement du revêtement qui est assez élevé en début d'exploitation. Le courant en début d'exploitation est déterminé par la relation suivante tout en négligeant les variations de k :

$$\mathrm{I}_{\mathrm{dr}}(0) = \frac{|\mathrm{Epmax}|}{\mathrm{z}(0).[1+2.\mathrm{Exp}(-\alpha.\mathrm{Lp})]+\frac{\rho \mathrm{sm}}{2.\pi.\mathrm{y}}} \qquad 4.18$$

IV.1.2.7 Calcul du nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : Na

Connaissant la durée de vie de la protection et les caractéristiques de l'anode choisie, nous pouvons estimer le nombre d'anodes nécessaire à la protection contre la corrosion d'une structure par la relation suivante :

$$\mathrm{Na} = 10\frac{\mathrm{I}_{\mathrm{dr}}.\mathrm{t.m}}{\mu.\mathrm{Ma}} \qquad 4.19$$

Où : I_{dr} : courant de protection (ou de drainage) [A]

t : durée de l'exploitation [ans]

m : consommation massique de l'anode [Kg/(A.ans)]

Ma : la masse d'une anode [Kg]

μ : coefficient d'utilisation de l'anode

IV.1.3 Calcul de la résistance de terre du déversoir : R

La résistance du déversoir est donnée par :

$$R = R_{ma} + R_t + R_{pol} \qquad 4.20$$

Où : R_t : résistance du lit d'anode [Ω]

R_{ma} : résistance du matériau de l'anode [Ω]

R_{pol} : résistance de la polarisation

IV.1.3.1 Calcul de la résistance de polarisation : R_{pol}

Elle est exprimée en ohm et donnée par l'expression :

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I_{da}} \qquad 4.21$$

U_a : composante de polarisation de la chute de tension des anodes

I_{da} : moyenne arithmétique entre $I_{dr(0)}$ et I_{dr}

IV.1.3.2 Calcul de la résistance du matériau de l'anode : R_{ma}

Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{ma} = \rho_a \frac{l_a}{S_a} \qquad 4.22$$

IV.1.3.3 Calcul de la résistance des câbles : R_{cable}

Comme toute résistance elle est exprimée en Ohm. Pour l'obtenir j'applique la formule suivante :

$$R_{cable} = \rho_{cable} \frac{L_{cable}}{S_{cable}} \qquad 4.23$$

IV.1.3.4 Calcul de la résistance du lit d'anodes : Rt

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul ce paramètre. Mais nous utiliserons celles données par NACE

La résistance totale des anodes dépend de plusieurs facteurs :

- Position des anodes, verticalement ou horizontalement ;
- La profondeur de pose des anodes ;
- L'espacement entre les anodes ;
- La résistance du backfill.

IV.1.3.4.1 Calcul pour un lit d'anodes horizontal :

Soit R_H, la résistance d'une anode placée horizontalement, elle est donnée par l'équation de Dwight pour des anodes multiples :

$$R_H = \frac{0.00159\ \rho_{sm}}{l_a}\left[\mathrm{Ln}\frac{4l_a^2+4l_a\sqrt{S^2+l_a^2}}{d_a.S}+\frac{S}{l_a}-\frac{\sqrt{S^2+l_a^2}}{l_a}-1\right] \qquad 4.24$$

Soit F, le facteur tenant compte de l'influence des autres anodes ; on l'obtient par la relation :

$$F = 1 + \frac{\rho_b}{\pi.(E_a+l_a).R_H}\ \mathrm{Ln}(0.66\ N_a) \qquad 4.25$$

Ensuite, on détermine la résistance totale pour un lit d'anodes placé horizontalement par la relation suivante :

$$Rt = \frac{R_H}{N_a}\ F \qquad 4.26$$

IV.1.3.4.2 Calcul pour un lit d'anode vertical :

Pour le cas des anodes placés verticalement, la résistance totale est donnée par la relation ci-dessous.

$$R_t = R_V = \frac{0.00159\rho_{sm}}{N_a l_a}\left[\mathrm{Ln}\frac{8l_a^2}{d_a}-1+\frac{2l_a}{E_a}\ \mathrm{Ln}(0.656\ N_a)\right] \qquad 4.27$$

Où : ρ_{sm} : résistance du backfill en [Ω.m]

l_a : longueur de l'anode en [m]

d_a : diamètre de l'anode en [m]

S : la profondeur de l'anode en [m]

N_a : nombre d'anodes composant le lit d'anodes

E_a : espace en deux anodes consécutives [m]

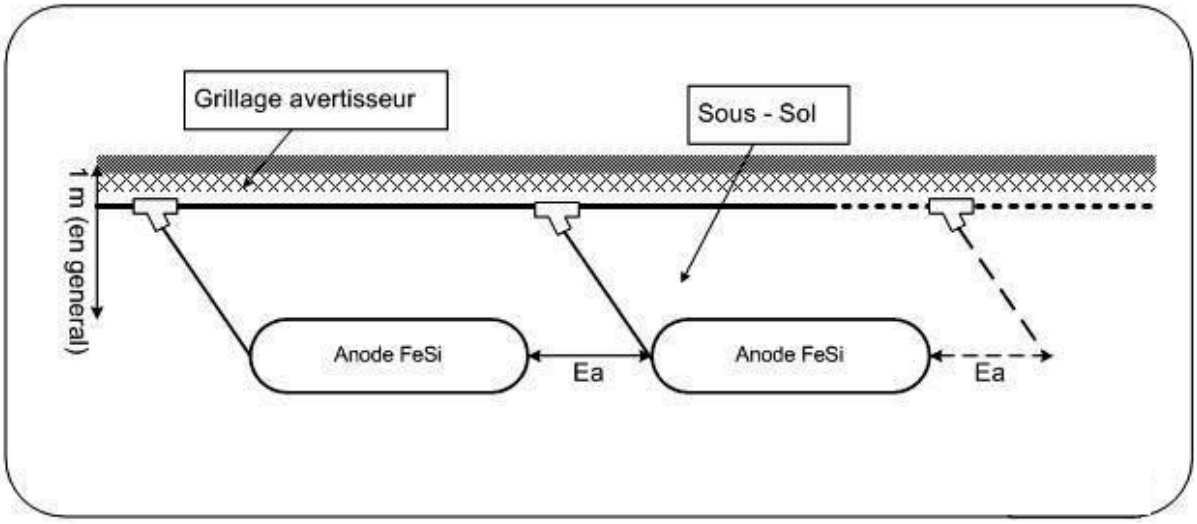


Figure 4.2 : Mise en évidence, disposition horizontale des anodes

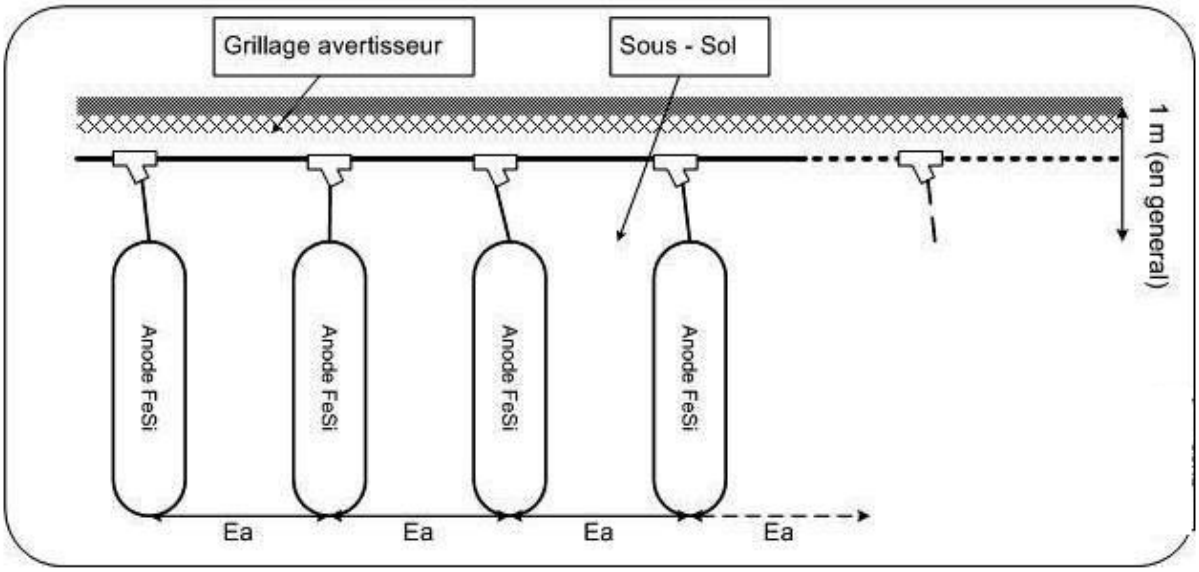


Figure 4.3 : Mise en évidence, disposition verticale des anodes

Selon les experts en protection cathodique, une valeur de Rt inferieure ou égale à 2 Ω serait acceptable, à titre d'exemple, la GRTG.Spa, utilise pour la protection de ses ouvrages métalliques une résistance du lit d'anodes toujours inferieur ou égale à l'unité.

En général l'on choisie plutôt le cas horizontal, car on constatera dans la partie suivante (partie pratique) que, pour une même résistance du lit d'anodes, le nombre d'anodes nécessaire pour un lit horizontal est inferieur au nombre d'anodes nécessaire pour un lit vertical et que cette solution est facile lors de la réalisation, néanmoins, il est important de souligner que du point de vue rendement, il serait préférable de choisir la position verticales.

IV.1.4 Calcul de la puissance du poste de soutirage :

IV.1.4.1 Détermination de la tension du poste de soutirage : U

La tension du poste U[V], est obtenue en appliquant la loi d'Ohm.

Mais pour une régulation et disponibilité du courant de protection lors de l'exploitation du système, le poste de protection cathodique doit avoir une réserve en tension, ce qui nous conduit à une correction de la tension en tenant compte du rendement du poste noté η.

$$U = \frac{[R_{tot} I_{dr}]}{\eta} \qquad 4.28$$

Par ailleurs, l'application de cette relation nécessite la connaissance de la résistance totale Rtot. .En effet du point de vu électrique le système protection cathodique par courant imposé peut être schématisé comme le circuit suivant.

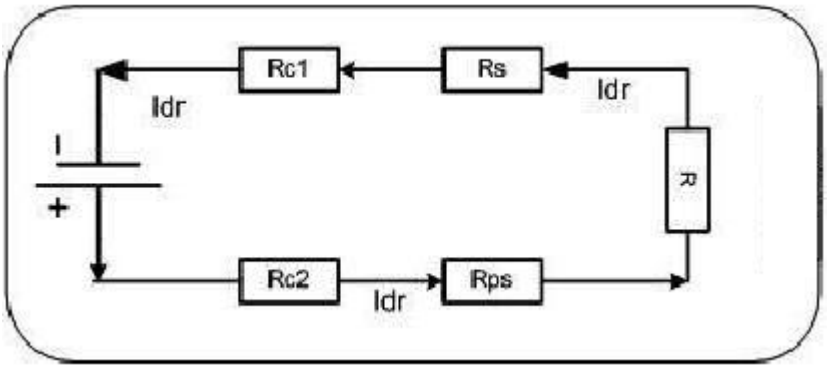


Figure 4.4 : Circuit électrique du système de protection

Toutes ces résistances étant en série on peut déterminer la résistance équivalente Rtot, qui est la résistance totale du système tout en négligeant Rs pour sa valeur assez faible devant les autres.

$$R_{tot} = R_c + R + R_{ps} \qquad 4.29$$

Où : $R_c = R_{c1} + R_{c2}$: résistance du câble [Ω]

R_{ps} : résistance due à la protection passive = z [Ω]

R : résistance de terre du déversoir [Ω]

R_s : résistance du sol entre la canalisation et le déversoir [Ω]

IV.1.4.2 Détermination de la puissance du poste de protection cathodique : P

D'après les lois de l'électricité connaissant le courant délivré par le poste et sa tension, sa puissance peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = U\, I_{dr} \qquad 4.30$$

IV.2. Etude du projet de dimensionnement du système de protection cathodique du gazoduc « TOUGOURT-EL OUED »

IV.2.1 Caractéristique des composants du système de protection

IV.2.1.1 Caractéristique du gazoduc

Tableau 4.1 : Caractéristique du gazoduc

Longueur de la conduite	**95 602 m**
Diamètre	16 Pouce (406.4 mm)
Epaisseur moyenne	7.9 mm
Nuance acier	X52
Résistivité électrique du matériau	0.18 $\Omega.mm^2/m$
Type de revêtement	PE
Coefficient de vieillissement du revêtement	0.124 an^{-1}
Résistance d'isolement initial du revêtement	20000 $\Omega.m^2$
Potentiel naturel du tube	550 (-) mV
Potentiel de protection Min	850 (-) mV
Potentiel de protection Max	1700 (-) mV

IV.2.1.2 Caractéristique de l'électrolyte : résistivité du sol

Les résistivités mesurées le long du tracé du gazoduc nous permettent de classer la nature des sols traversés en zones moyennement agressives et principalement des zones peu agressives.

Tableau 4.2 : Relevé de résistivité des sols (*)

Pk (km)	ρ (Ωm)	Pk (km)	ρ (Ωm)	Pk (km)	ρ (Ωm)
0,000	70	30,650	400	68,000	340
0,400	40	32,750	350	70,100	450
2,000	45	33,900	300	72,300	402
4,000	45	35,000	505	74,500	795
6,000	86	37,200	600	76,400	546
8,000	90	39,000	620	78,200	706
10,200	120	41,000	635	80,100	630
11,800	160	43,000	700	82,000	645
12,000	200	45,000	650	84,000	705
13,000	300	48,000	560	86,000	785
14,800	105	50,000	590	88,140	570
15,500	65	52,000	647	90,230	620
16,300	60	54,500	354	92,000	530
18,900	45	56,000	495	93,100	601
20,350	86	58,000	360	94,000	610
22,700	210	60,000	480	95,600	702
24,300	250	62,000	470		
25,800	300	64,000	250		
29,500	450	66,000	270		

(*) : A partir de guide technique du projet « gazoduc TOUGOURT- EL OUED »,Dimmensionnement de protection catodique , GRTG.

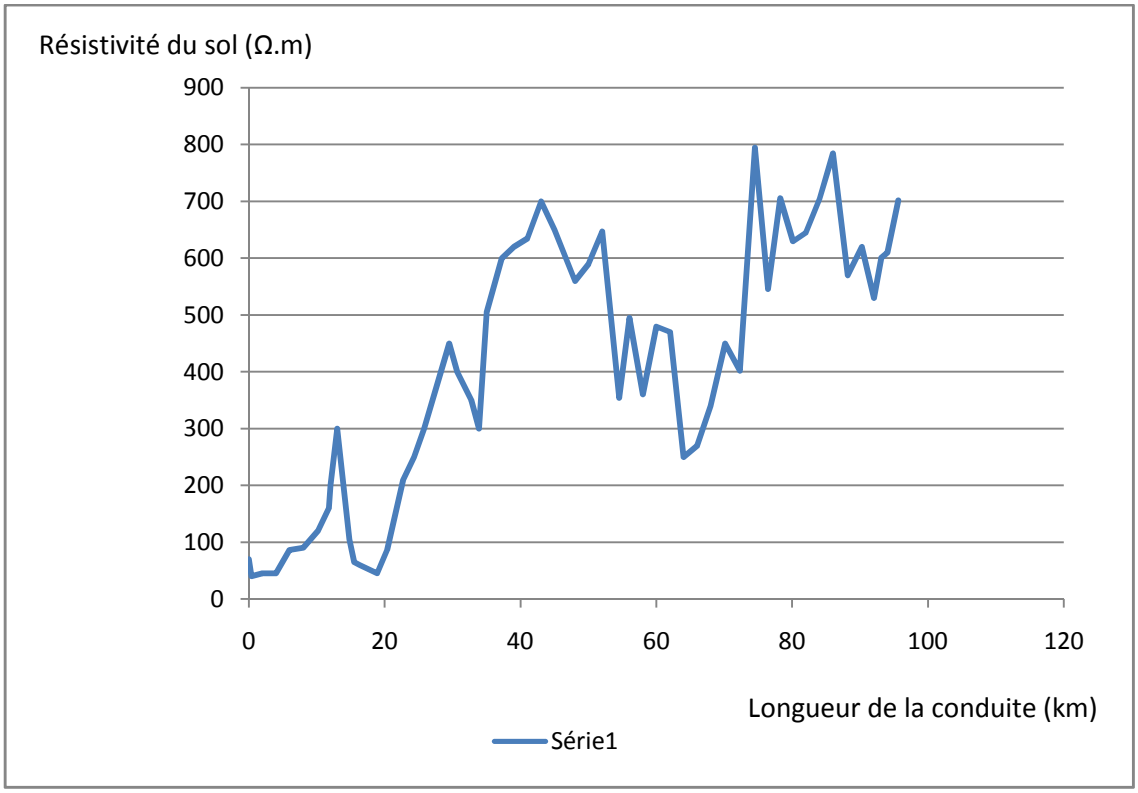


Figure 4.5 : Diagramme de résistivité du sol

IV.2.1.3 Caractéristique des anodes

Pour cette étude nous utiliserons des anodes de fer au silicium FeSi.

Tableau 4.3 : Caractéristique des anodes

Composition chimique	14.2-14.7% Silicium, 0.6-0.7% Manganèse, 0.4-0.8% Carbone et le reste c'est de Fer
Longueur de l'anode sans backfill	1520 mm
Diamètre de l'anode sans backfill	50 mm – 76 mm
Longueur de l'anode avec backfill	2000 mm
Diamètre de l'anode avec backfill	200 mm
Consommation massique	0.5 kg/(A.an)
Masse unitaire	22.7 kg
Résistivité de l'anode (backfill)	0.229 Ω.m (0.5)
Profondeur de pose	1.5 m
Espace entre anode	6 m
Coefficient d'utilisation	0.5

IV.2.2 Dimensionnement du système de protection

En utilisant la note de calcul exposée dans la première partie de ce chapitre et les données concernant la structure à protéger et les éléments de protection, j'effectue les calculs ci-après afin de dimensionner le système de protection.

IV.2.2.1 Calcul de la résistivité moyenne du sol

En utilisant la relation 4.2 j'obtiens :

$$\rho_{sm} = \rho_{my} = \frac{1}{N}\sum \rho_i \qquad \rho_{sm} = 400\ \Omega.\mathrm{m}$$

IV.2.2.2 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur

L'application de la relation 4.3 nous donne :

$$Rc = \frac{\rho c}{\pi.(\phi ext - \delta).\delta} = \frac{0{,}18}{3{,}14(406{,}4-7{,}9)7{,}9} \qquad Rc = 1{,}82\ 10^{-5}\ \Omega/m$$

IV.2.2.3 Résistance transitoire moyenne, « conduite-sol »

Par application de la relation 4.5 ; j'effectue le calcul suivant :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta.t)}\left[1 - e^{(-\beta.t)}\right] = \frac{20000}{0{,}125\ 25}\left[1 - e^{-(0{,}124\ 25)}\right] \qquad R_{tm} = 6{,}16\ 10^{3}\Omega.\mathrm{m}^2$$

IV.2.2.4 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation

Elles s'obtiennent par application des formules 4.6 et 4.7 respectivement.

$$Rr(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi.\phi ext)} = \frac{6{,}16\ 10^{3}}{3{,}14\ 0{,}4064} \qquad Rr(t) = 4{,}82\ 10^{3}\ \Omega.\mathrm{m}$$

$$Rr(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi.\phi ext)} = \frac{20000}{3{,}14\ 0{,}4064} \qquad Rr(0) = 15{,}66\ 10^{3}\ \Omega.\mathrm{m}$$

IV.2.2.5 Calcul du coefficient d'atténuation

Il est déterminé par application de la relation 4.8

$$\alpha = \sqrt{\frac{Rc}{Rr(t)}} = \sqrt{\frac{1{,}82\ 10^{-5}}{4{,}82\ 10^{3}}} \qquad \alpha = 6{,}14\ 10^{-5}\ 1/\mathrm{m}$$

IV.2.2.6 Calcul de la résistance d'entrée de la conduite

En appliquant la relation 4.9 ; j'obtiens

$$Z = \frac{\sqrt{\text{Rc Rr(t)}}}{2} = \frac{\sqrt{1{,}82\ 10^{-5}\ 4{,}82\ 10^{3}}}{2} \qquad \text{Z} = 0{,}148\ \Omega$$

$$Z(0) = \frac{\sqrt{\text{Rc Rr(0)}}}{2} = \frac{\sqrt{1{,}82\ 10^{-5}\ 15{,}66\ 10^{3}}}{2} \qquad \text{Z}(0) = 0{,}266\ \Omega$$

IV.2.2.7 Calcul des gains de potentiel

Elles s'obtiennent en appliquant les relations 4.10 et 4.11

$$\text{Epmax} = \text{Emax} - \text{Enat} = -1{,}7 + 0{,}55 \qquad \text{Epmax} = -1{,}15\ \text{V}$$

$$\text{Epmin} = \text{Emin} - \text{Enat} = -0{,}85 + 0{,}55 \qquad \text{Epmin} = -0{,}3\ \text{V}$$

IV.2.2.8 Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins

D'après l'équation 4.14, en optant pour y = 170 m, j'ai

$$\text{K} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\text{Epmin}}{\text{Epmax}}\right)^2 \frac{2.\pi.\text{y}.\text{z} + \rho_{\text{sm}}}{2.\pi.\text{z}.\text{y}}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{-0.3}{-1.15}\right)^2 \frac{(2\ 3.14\ 170\ 0.148) + 400}{(2\ 3.14\ 170\ 0.148)}}}$$

K = 0,534

IV.2.2.9 Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage

$$\text{Lp} = \frac{2}{\alpha}\ \text{Ln}\left[\frac{2.\pi.\text{y}.\text{z}}{\text{k}.\frac{\text{Epmin}}{\text{Epmax}}\ (2.\pi.\text{y}.\text{z} + \rho_{\text{sm}})}\right] = \frac{2}{6{,}14\ 10^{-5}}\ \text{Ln}\left[\frac{2\ 3{,}14\ 170\ 0{,}148}{0{,}557\ \frac{-0.3}{-1.15}\ (2\ 3{,}14\ 170\ 0{,}148 + 400)}\right]$$

Lp = 23,11 km

IV.2.2.10 Calcul du nombre de postes de protection cathodique

Le nombre de postes de soutirage doit etre un entier, par conséquent au cas où le calcul nous donne un nombre décimal, j'arrondirai cette valeur à l'entier immédiatement supérieur. La formule 4.16 donne :

$$\text{Nppc} = \frac{\text{L}}{\text{Lp} + 1} = \frac{95{,}602}{23{,}11 + 1} = 3{,}96 \qquad \text{Nppc} = 4 \text{ postes}$$

Sachant le nombre de postes à prévoir pour la protection de ce gazoduc ; la question qui se pose immédiatement est d'évaluer le courant débiter par chaque poste.

IV.2.2.11 Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation

En appliquant respectivement les relations 4.17 et 4.18, j'obtiens :

$$\text{I}_{dr} = \frac{|\text{Epmax}|}{\text{z}.[1 + 2.\text{Exp}(-\alpha.\text{Lp})] + \frac{\rho_{\text{sm}}}{2.\pi.\text{y}}}$$

$$= \frac{1{,}15}{0{,}148[1 + 2.\text{Exp}(-6{,}14\ 10^{-5}\ 23110)] + \frac{400}{2\ 3{,}14\ 170}} \qquad \text{I}_{\text{dr}} = 1{,}93 \text{ A}$$

$$\text{I}_{dr}(0) = \frac{|\text{Epmax}|}{\text{z}(0).[1 + 2.\text{Exp}(-\alpha.\text{Lp})] + \frac{\rho_{\text{sm}}}{2.\pi.\text{y}}}$$

$$= \frac{1{,}15}{0{,}266[1 + 2.\text{Exp}(-6{,}14\ 10^{-5}\ 23110)] + \frac{400}{2\ 3{,}14\ 170}} \qquad \text{I}_{dr}(0) = 1{,}49 \text{ A}$$

On remarque que le courant en fin d'exploitation est relativement élevé par rapport à celui nécessaire en début d'exploitation ; cela est directement lié au revêtement. En effet en début d'exploitation le revêtement à toutes ces caractéristiques, donc il participe fortement à la protection, ce qui réduit l'impact de la protection active, mais au fil du temps le revêtement (la protection passive) perd de ses qualités, et donc il faut plus de courant pour assurer la protection de la structure.

IV.2.2.12 Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit etre un nombre entier. Il est donné par l'équation 4.19

$$\text{Na} = 10\frac{\text{I}_{\text{dr}}.\text{t}.\text{m}}{\mu.\text{Ma}} = 10\frac{1{,}93\ 25\ 0{,}5}{0{,}3\ 22{,}7} = 35{,}42$$

On prendra au minimum Na= 36 anodes

IV.2.2.13 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées horizontalement et verticalement

IV.2.2.13.1 Calcul de la résistance de polarisation

L'application de la relation 4.21 nous donne

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I_{da}} = \frac{2}{1,71} \qquad R_{pol} = 1,17\ \Omega$$

IV.2.2.13.1 Calcul de la résistance du matériau des anodes

D'après l'équation 4.22 on a :

$$R_{ma} = \rho_a \frac{l_a}{S_a} = 0,229\ 10^{-6}\ \frac{1,52}{2,03\ 10^{-3}} \qquad R_{ma} = 1.69\ 10^{-4}\Omega$$

IV.2.2.13.3 Calcul de la résistance totale des anodes

- *Cas d'un lit d'anode composé d'anodes posées horizontalement :*

La résistance d'une seule anode est donnée par la relation 4.24

$$R_H = \frac{0.00159\ \rho_{sm}}{l_a}\left[\mathrm{Ln}\frac{4l_a^2 + 4l_a\sqrt{S^2 + l_a^2}}{d_a.S} + \frac{S}{l_a} - \frac{\sqrt{S^2 + l_a^2}}{l_a} - 1\right] = R_H$$

$$= \frac{0.00159\ 40000}{1,52}\left[\mathrm{Ln}\frac{4\ 1,52^2 + 4\ 1,52\sqrt{3^2 + 1,52^2}}{3\ 0,05} + \frac{3}{1,52} - \frac{\sqrt{3^2 + 1,52^2}}{1,52} - 1\right]$$

$R_H = 169,46\ \Omega$

Le facteur F, est donné par 4.26

$$F = 1 + \frac{\rho_{sm}}{\pi.(E_a + l_a).R_H}\ \mathrm{Ln}(0.66\ N_a) = 1 + \frac{400}{3,14\ 7.52\ 169,46}\ \mathrm{Ln}(0,66\ 36)$$

F = 1,316

On déduit donc la résistance du lit d'anode par 4.26

$$R_{th} = \frac{R_H}{N_a}\ F = \frac{169,46}{36}\ 1,316 \qquad R_{th} = 6,195\Omega$$

Pour des anodes placées horizontalement, la résistance du déversoir est d'après l'équation 4.20

$$R = R_{ma} + R_{th} + R_{pol} = 1,69\ 10^{-4} + 6,195 + 1,17 \qquad R = 7,365\ \Omega$$

- *Cas d'un lit d'anodes composé d'anodes posées verticalement*

Contrairement au premier cas, R_t est plus facile à déterminer ici ; elle s'obtient par l'application de la formule 4.24

$$R_{tV} = \frac{0.00159\rho_{sm}}{N_a l_a}\left[\mathrm{Ln}\frac{8l_a^2}{d_a} - 1 + \frac{2l_a}{E_a}\,\mathrm{Ln}(0.656\,N_a)\right]$$

$$= \frac{0{,}00159\ 40000}{36\ 1.52}\left[\mathrm{Ln}\frac{8\ 1{,}52^2}{0{,}050} - 1 + \frac{2\ 1{,}52}{6}\,\mathrm{Ln}(0.656\ 36)\right]$$

$R_{tV} = 7{,}571\ \Omega$

La résistance du déversoir correspondant est donc :

$$R = R_{ma} + R_{tV} + R_{pol} = 1{,}69\ 10^{-4} + 7{,}571 + 1{,}17 \qquad R = 8{,}741\ \Omega$$

En pratique, l'une des contrainte à la quelle doit satisfaire un dimensionnement de protection cathodique est que, la résistance de terre du déversoir soit la plus faible possible, réduisant ainsi la tension aux bornes du générateur ce qui implique une réduction du coût de l'installation du système de protection.

IV.2.2.14 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage

Selon la relation 4.28 la tension est donnée par :

$$U = \frac{R_{tot}.I_{dr}}{\eta}$$

- Pour des anodes posées horizontalement

$$R_{tot} = R + R_c + R_{ps} \quad \text{Avec } R_{ps} = Z.I_{dr} = 0{,}28 \quad \text{et } R_c = \rho_c\,\frac{L_c = y}{S_c} = 0{,}038$$

$$R_{tot} = 7{,}365 + 0{,}28 + 0{,}038 \qquad R_{tot} = 7{,}683\Omega$$

$$U_H = \frac{7{,}683\ 1{,}93}{0{,}85} \qquad U_H = 17{,}44\ V$$

- Pour des anodes posées verticalement

$$R_{tot} = 8{,}741 + 0{,}28 + 0{,}038 \qquad R_{tot} = 9{,}059\ \Omega$$

$$U_V = \frac{9{,}059\ 1{,}93}{0{,}85} \qquad U_V = 20{,}57\ V$$

IV.2.2.15 Calcul de la puissance requise par le poste

D'après l'équation 4.30 j'ai :

$P = U.I_{dr}$ D'où on obtient après calcul :

$P_H = 33{,}66\ W$ $P_V = 39{,}70\ W$

On remarque que la puissance exigée au générateur est relativement plus grande en utilisant un lit d'anodes composé d'anodes placées verticalement qu'un lit d'anodes avec des anodes placées horizontalement. Sachant qu'une augmentation de la puissance entraine inévitablement un surcoût, nous opterons dans le cadre de notre étude pour un lit d'anodes composé d'anodes placées horizontalement ; ce qui est le cas en pratique, car pour la protection de leurs pipelines ; SONATRACH et la GRTG utilisent généralement, des anodes en fer-silicium posées horizontalement.

Conclusion :

Le résultat du dimensionnement d'un système de protection cathodique doit permettre de répondre à une série de question dont :

1. Combien de poste de protection seraient nécessaire pour une protection certaine de la structure.
2. Quelle est l'intensité du courant maximal à délivrer par chaque poste en fin d'exploitation.
3. Quelle est le nombre minimal d'anodes par station de protection faut-il pour assurer la protection.
4. Existe-t-il des conditions spéciales, à certain endroits qui exigent des modifications dans le plan général de protection établis.

A ce stade du travail, sur la base d'une résistivité moyenne de 400 Ω.m et pour un lit d'anode posé à 170 m du pipeline, la protection contre la corrosion du gazoduc TOUGOURT-EL OUED par la méthode de soutirage du courant nécessite 4 postes de soutirage.

Chaque poste de protection, ayant une portée de 23,11 Km, débitant un courant en fin d'exploitation (25 ans) de 1,93 A et d'un lit de 36 anodes en fer-silicium posées horizontalement, sous une puissance de 33.66 W.

IV.3. Etude de sensibilité

Une analyse des équations établis précédemment permet de conclure que la puissance requise par un poste de soutirage est fonction de l'intensité du courant en fin d'exploitation et surtout de la résistance total du système qui lui dépend entièrement de la résistance du lit d'anodes.

Cette dernière dépend également des paramètres d'installation mais en particulier du nombre d'anodes composant le déversoir.

A travers des tableaux et des courbes nous essayerons de mettre en évidence ces dépendances, puis nous chercherons à optimiser le système de protection en jouant sur certains de ces paramètres.

IV.3.1 Influence de la résistivité du sol

En se servant des équations établis dans la première partie, et pour une distance entre le lit d'anodes et la conduite maintenue à 170 m, avec le s caractéristiques du gazoduc, on effectue une simulation en utilisant Microsoft Office Excel et on consigne les résultats dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.4 : Influence de la résistivité du sol

ρ_{sol} (Ω.m)	N_p (Poste)	Idr (A)	Na (anode)	Rtot (Ω)	P (W)
100	2	4,495	83	1,957	46,533
150	2	3,723	68	2,508	40,881
200	2	3,166	58	3,232	38,108
250	3	2,745	50	4,123	36,551
300	3	2,416	44	5,176	35,554
350	4	2,152	40	6,392	34,830
400	4	1,935	36	7,771	34,243
450	5	1,754	32	9,318	33,726
500	6	1,600	29	11,035	33,243
550	7	1,468	27	12,927	32,776
600	8	1,353	25	14,999	32,314
650	10	1,253	23	17,257	31,852
700	12	1,164	21	19,707	31,387

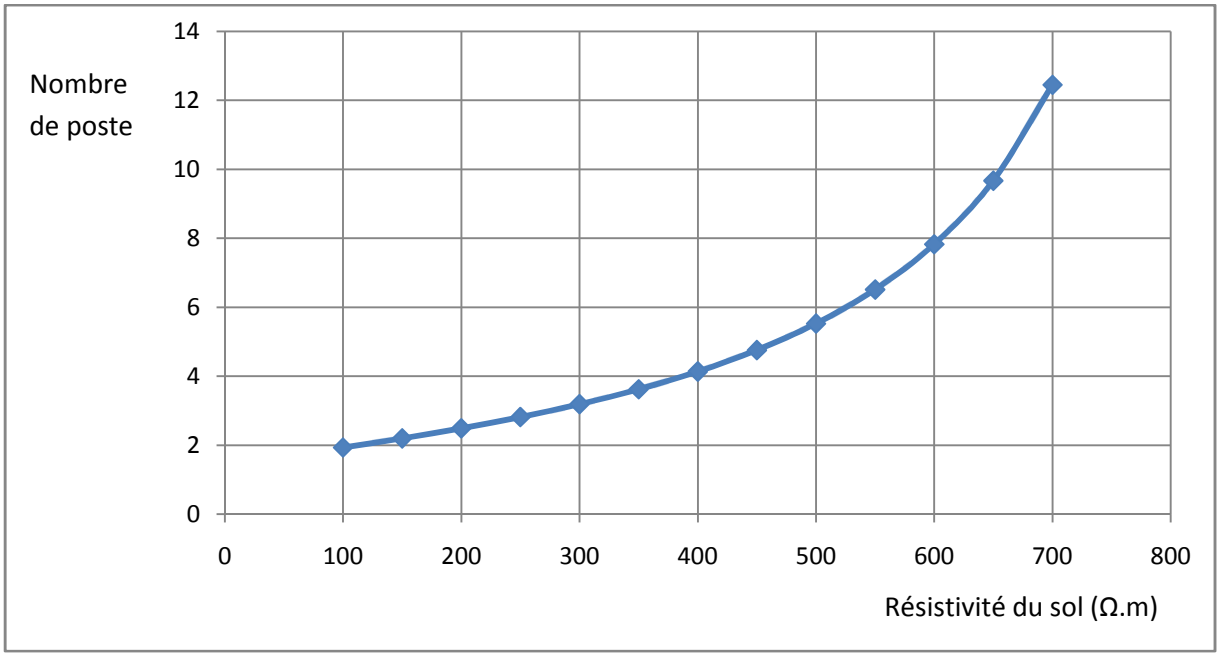


Figure 4.6 : courbe de variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol

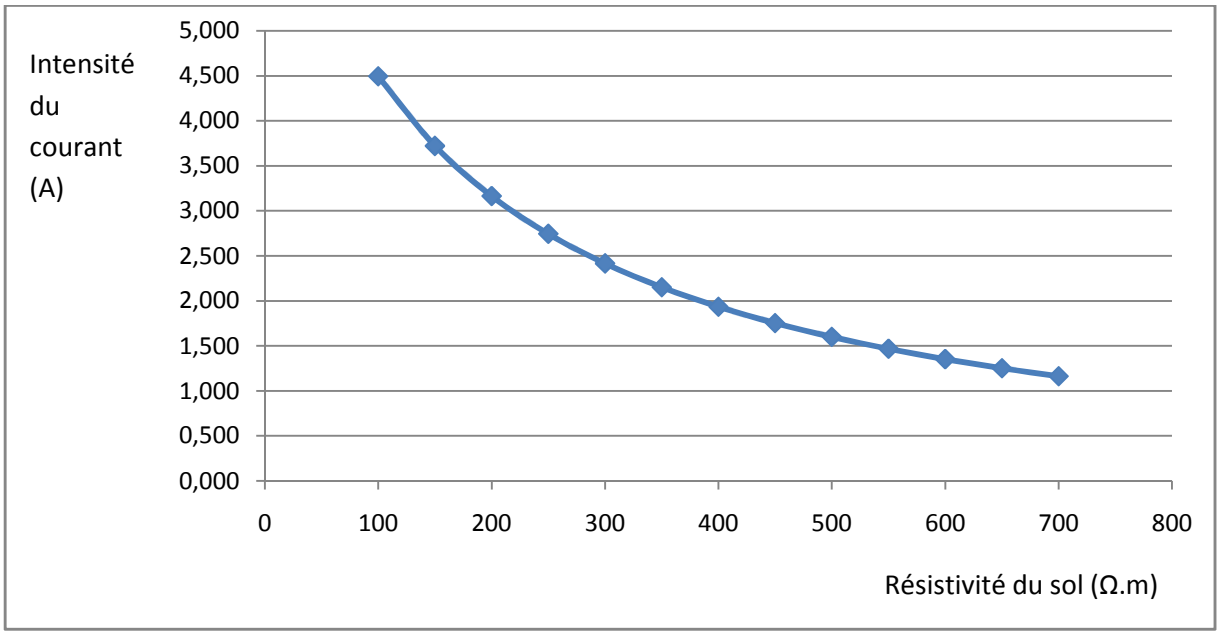


Figure 4.7 : courbe de variation de l'intensité du courant du poste en fonction de la résistivité du sol

***Analyse et interprétations* :** Au terme de cette étude j'ai pu faire les constatations suivantes, qu'on résume en trois points :

- Graphe Np = F(ρ_{sol}) :

Cette courbe à allure croissante nous permet de conclure que le nombre de poste de protection cathodique croit avec la résistivité du sol.

Ainsi, pour des terrains agressifs (faible résistivité) le nombre de postes est moins important que pour des terrains moins agressifs (forte résistivité).

En effet pour des sols de résistivités assez élevées, la propagation du courant reste faible, car la résistivité sol est la capacité de celui ci à s'opposer au passage du courant. C'est pourquoi il est nécessaire d'augmenter le nombre de postes de soutirage pour couvrir toute la longueur de la structure.

- Graphe I_{dr} = F(ρ_{sol}) :

Ici on constate que le courant est inversement proportionnel à la résistivité du sol. Ainsi, pour des résistivités élevées on a des courant assez faibles.

Cela se justifie par le fait que pour de faibles résistivités, le terrain est plus agressif, donc il est nécessaire de prévoir un courant plus grand pour contenir cette agression, et inversement pour des résistivités plus grandes le sol est moins agressif c'est ce que justifie d'un faible courant.

IV.3.2 Influence de la distance entre le lit d'anodes et le pipeline

Ici l'objectif est de faire varier « y » et de voir son influence sur le système de protection cathodique.

Tableau 4.5 : Influence de « y » sur le système de protection

Y (m)	Np	Idr (A)	Na	Rtot (Ω)	P (W)
40	-4	0,376	7	34,51	5,741
60	-12	0,680	12	19,86	10,819
90	17	1,078	20	13,02	17,799
120	7	1,430	26	10,10	24,295
150	5	1,744	32	8,49	30,385
170	4	1,937	36	7,76	34,244
180	4	2,028	37	7,47	36,118
210	3	2,285	42	6,76	41,533
240	3	2,519	46	6,25	46,663
270	3	2,732	50	5,87	51,534
300	3	2,929	54	5,57	56,169

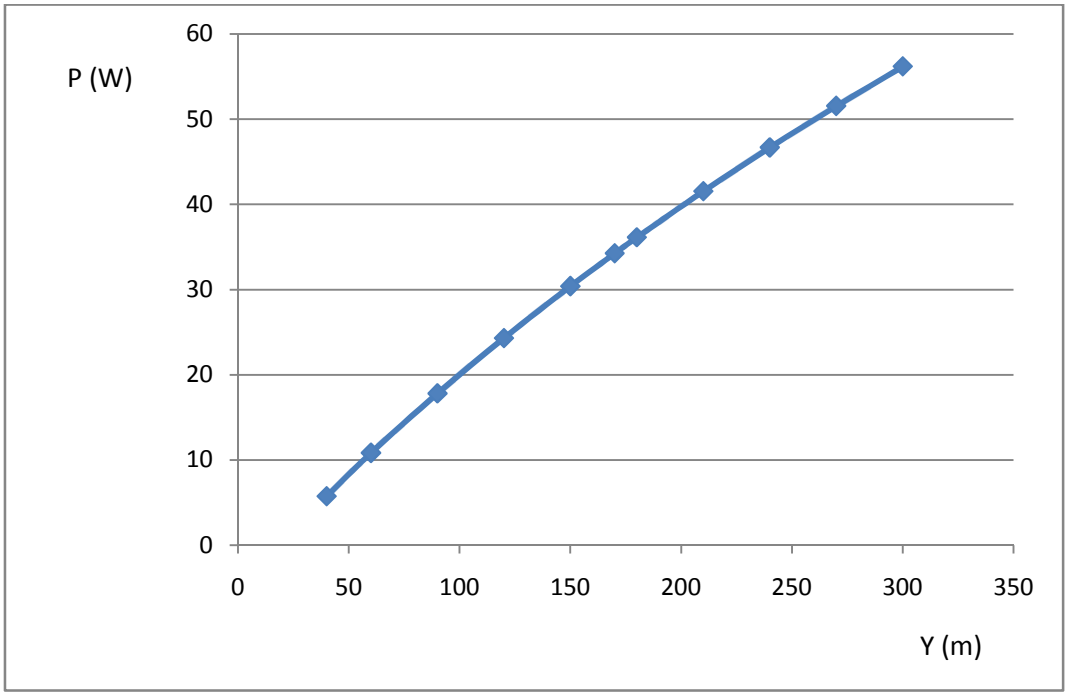


Figure 4.8 : Courbe de variation de la puissance des postes en fonction de "y"

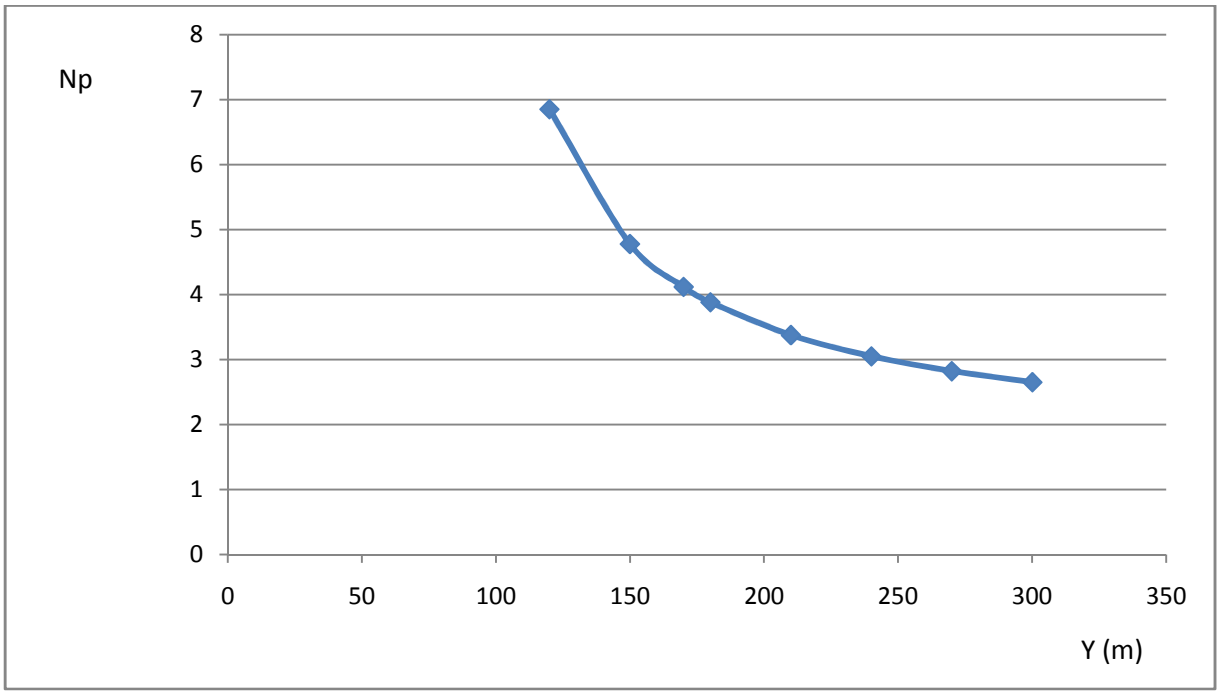


Figure 4.9 : Courbe de variation du nombre de postes en fonction de "y"

Analyses et interprétations :

D'après les résultats consignés dans le tableau, certaines valeurs de « y » sont à rejeter immédiatement car il serait absurde d'avoir par exemple du nombre de postes de protection négatif et encore 17 postes pour un gazoduc de 16 pouce et 95.602 Km de long.

- Graphe P = F(y)

La puissance requis au poste croit avec la distance entre le lit d'anodes et la conduite.

Cela dit, il serait plus économiques d'opter pour des valeurs de « y » assez faible ; mais une de valeur de « y » assez faible nécessite un nombre de postes important.

- Graphe Np = F(y)

Il nous permet savoir que même si plus la valeur de y est assez grande plus la porter du poste est grand et moins est le nombre de poste à prévoir, cependant le graphe met en évidence une asymptote car de 210 à 300 m nous avons toujours le même nombre de poste.

Cette analyse nous permet de borner « y » entre les valeurs 150m à 210 m car c'est dans cette intervalle que on remarque une variation du nombre de postes. Egalement il faut ajouter que les valeurs de « y » choisies en pratique la plus part du temps se trouve dans cette intervalle.

Conclusion

Le transport du gaz par canalisation en acier reste le moyen le plus efficace en terme de quantité et de coût, mais le phénomène de corrosion présent un grand problème.

La corrosion est capable de provoquer des incendies qui peuvent influencer sur l'environnement et l'être humain, et créer des pertes économiques.

Dans ce travail, nous avons traité les différentes méthodes qui permettent de protéger les ouvrages enterrés dans le sol.

Les différents types des revêtements permettent d'éviter les contactes directe entre la canalisation et l'électrolyte. Leur choix dépend de leurs caractéristiques mécaniques et électroniques.

La protection cathodique par courant imposé afait l'objet de notre travail. Sa mise en place et l'assurance de sa fonctionnalité nécessite la connaissance détaillée de la structure à protéger et les conditions de construction.

Les éléments les plus importants à considérer dans le design sont :

- Les surfaces à protéger et la géométrie de l'installation ;
- Le type d'électrolyte et les modifications de la composition chimique dans le temps ;
- Les besoins en courant et leurs éventuelles évolutions.

Bibliographie

[1]. http:// www.wikipedia.org/wiki/corrosion_aqueuse

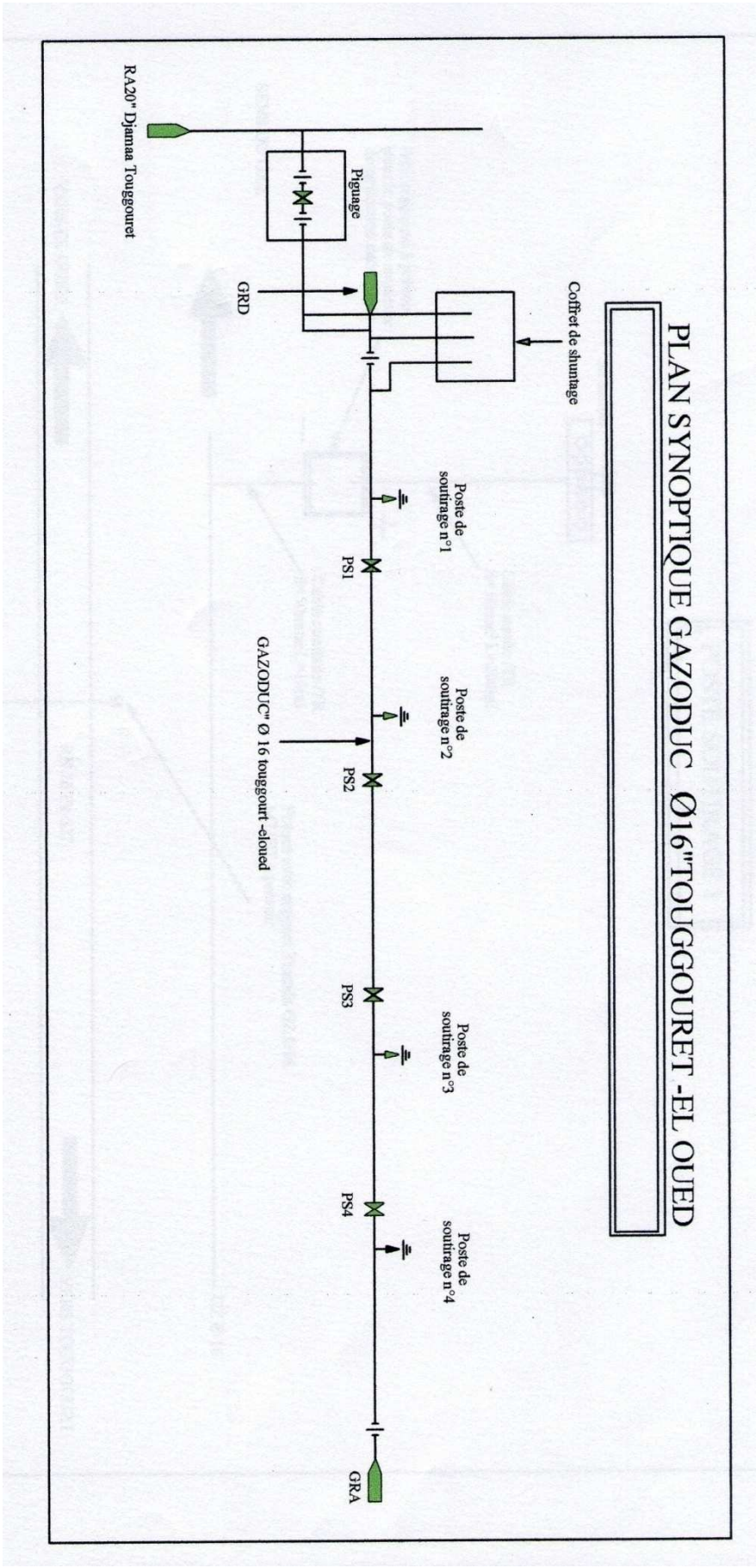
[2] M. KHERCHOUCHE « Technologie du gaz » ; Rapport interne ; direction des ressources humaines ; centre de formation AIN M'LILA.

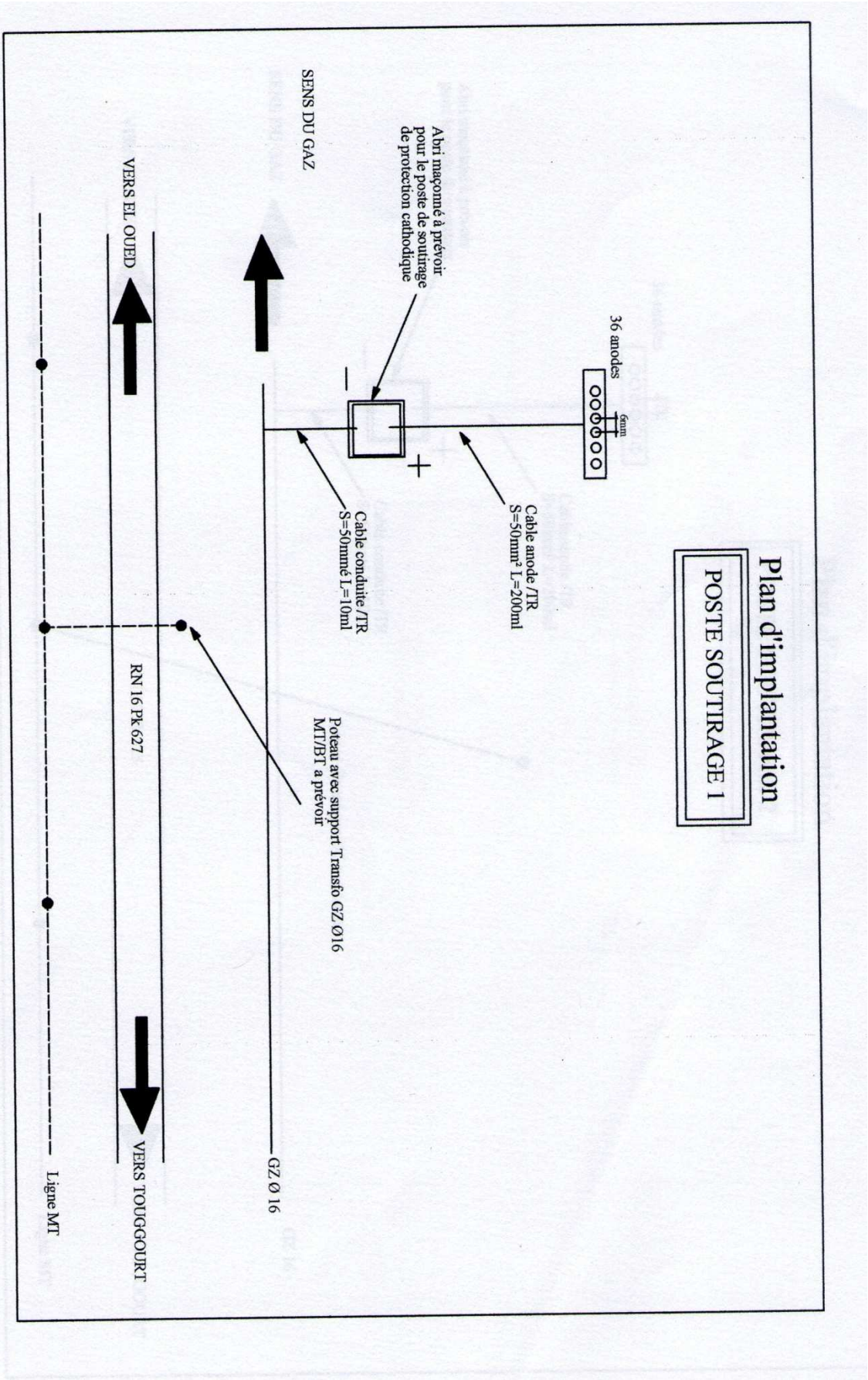
[3] J.LECONTE A830 « Tuyauteries : Protection contre la corrosion », techniques de l'ingénieur.

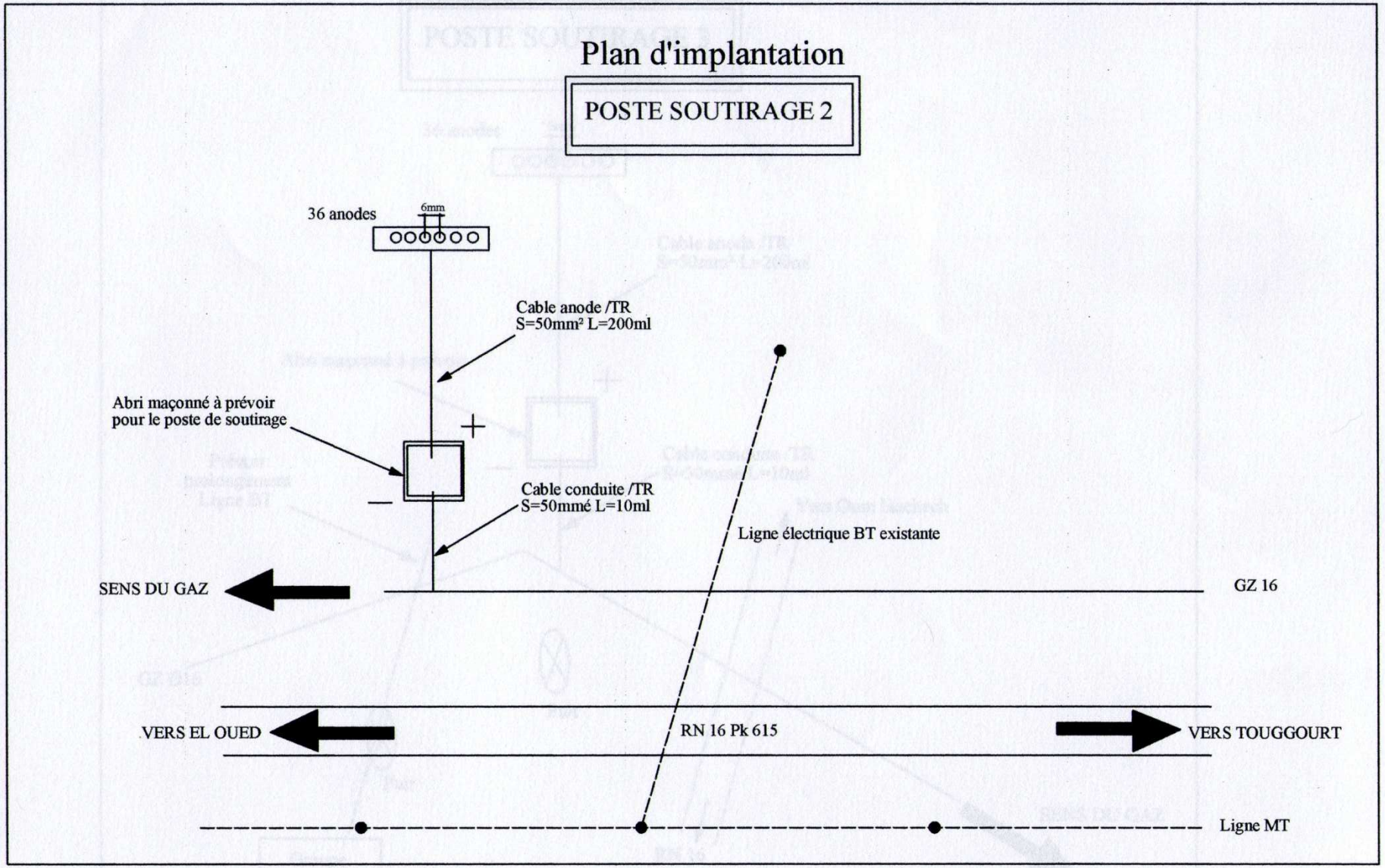
[4] M150 « Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages », Techniques de l'Ingénieur.

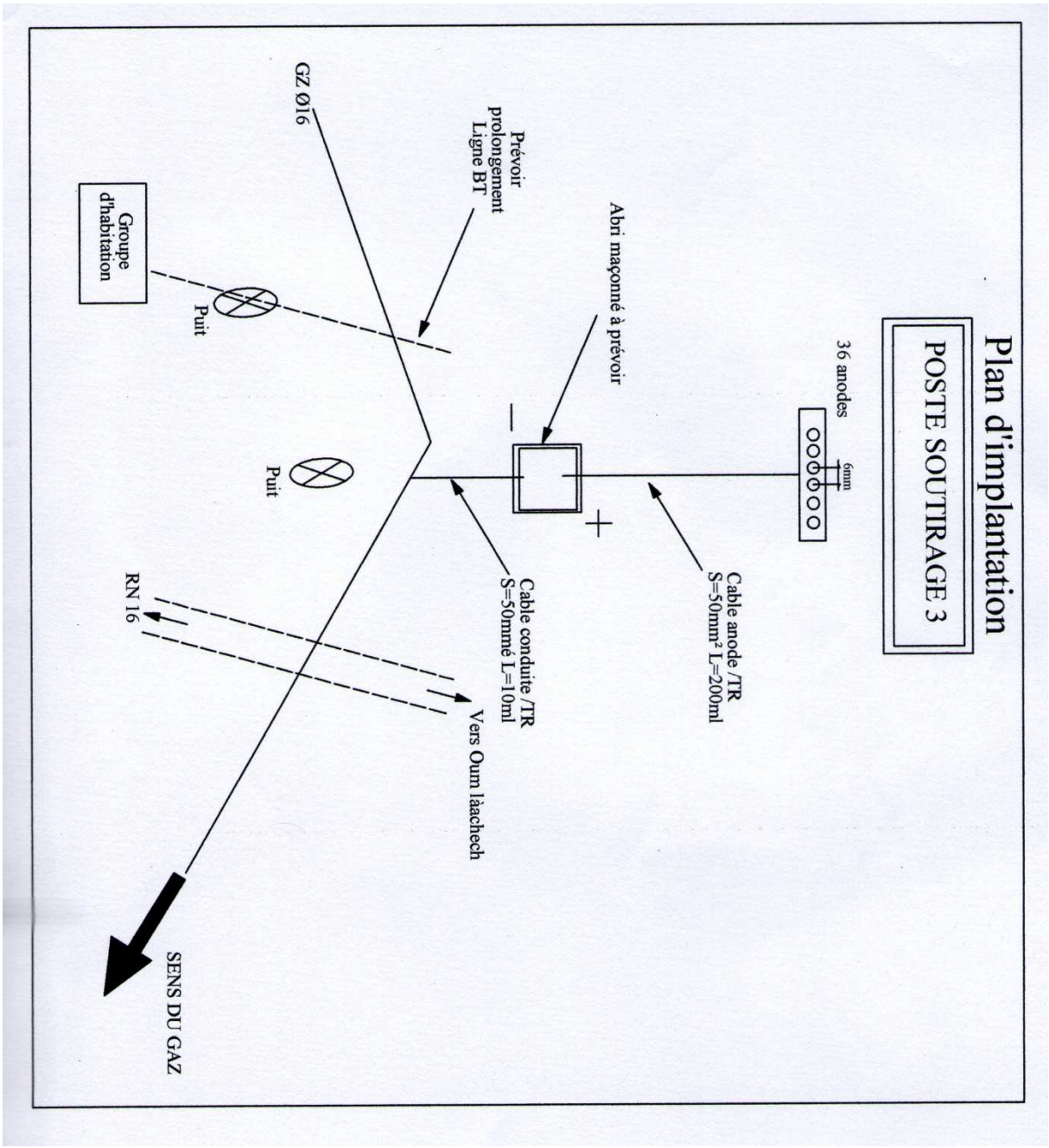
[5] M. « Protection cathodique » ; direction des ressources humaines ; centre de formation AIN M'LILA ; séminaire *20/06/2010 AU 24/06/2010 ;* Direction De Distribution Sétif.

[6] SONELGAZ-GRTG Méthodologie d'étude de protection cathodique des réseaux en acier ; 2008.


PLAN SYNOPTIQUE GAZODUC Ø16"TOUGGOURET -EL OUED
RA20" Djamaa Touggouret
Piguage
GRD
Coffret de shuntage
Poste de soutirage n°1
Poste de soutirage n°2
Poste de soutirage n°3
Poste de soutirage n°4
PS1
PS2
PS3
PS4
GAZODUC" Ø 16 touggourt -eloued
GRA


Plan d'implantation
POSTE SOUTIRAGE 1
36 anodes
6mm
Abri maçonné à prévoir pour le poste de soutirage de protection cathodique
Cable anode /TR S=50mm² L=200ml
Cable conduite /TR S=50mm² L=10ml
Poteau avec support Transfo GZ Ø16 MT/BT a prévoir
SENS DU GAZ
VERS EL OUED
RN 16 Pk 627
VERS TOUGGOURT
GZ Ø 16
Ligne MT


Plan d'implantation
POSTE SOUTIRAGE 2
36 anodes
6mm
Cable anode /TR
S=50mm² L=200ml
Abri maçonné à prévoir
pour le poste de soutirage
Cable conduite /TR
S=50mmé L=10ml
Ligne électrique BT existante
SENS DU GAZ
GZ 16
VERS EL OUED
RN 16 Pk 615
VERS TOUGGOURT
Ligne MT


Plan d'implantation
POSTE SOUTIRAGE 3
36 anodes
6mm
Cable anode /TR
S=50mm² L=200ml
Abri maçonné à prévoir
Prévoir
prolongement
Ligne BT
GZ Ø16
Groupe
d'habitation
Puit
Puit
Cable conduite /TR
S=50mmé L=10ml
Vers Oum laachech
RN 16
SENS DU GAZ