

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des hydrocarbures et de la chimie ex INH
Département de Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire en master

Présenté par :

Blouhi Abdelkader

Briki Faouzi

Spécialité : Génie mécanique

Option : Transport et distribution des hydrocarbures

Thème :

**Etude optimale du système de protection
cathodique du réseau de collecte du CPF
Rhourde Nouss et de la distribution de
courant et du potentiel le long d'un
collecteur**

Devant le jury :

BOUALI Elahmoune	Professeur	UMBB	Président de jury
TIKOBAINI Mourad	MA/A	UMBB	Encadreur
YOUNSI Karim	MC/B	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2015/2016

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre créateur pour nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur consultant **Mr TIKOBAINI MOURAD** pour sa disponibilité, pour ses éclaircissements scientifiques, ainsi que ses précieux conseils.*

Nous tenons à remercier également, le président de jury et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.

*Nous présentons nos chaleureux remerciements à tout le corps enseignant de la faculté des hydrocarbures et de la chimie particulièrement à **Mr Younsi.K** pour sa précieuse aide.*

*Ainsi qu'à tous le personnel du service corrosion de la région Rhourde
Nous : Mr Bellani Abdelmalek, Larfi Kamel, Mammeri Yacine,
Sari, Maamar, ALI, Youcef qui nous ont accueilli et orienté sur le
lieu de stage.*



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père (الله یرحمه) et ma mère.

*Je leur dis merci et mille fois merci **mère KHEIRA** pour ta patience, ton sacrifice pour moi.*

*Je te dis merci **père TAYEB** (الله یرحمه) du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur.*

A mes frères yahia et houari

A mes sœurs Wassila, Hafida, Mamia, Aicha

A toute la famille « BLOUHI »

A mes très chers amis Tarik, Jamel, Tayeb, Zakaria, Mahmoud, Lahcen, Amine, Ismail, Yakoub, Walid et Faouzi que je remercie pour son soutien

A tout ma promotion de l'université et surtout MATH/02



DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,
elle qui a toujours veillé sur moi
et à mon père qui m'a toujours soutenu.*

A tous les membres des familles BRIKI et FELLAH,

A mon frère Fouad et à mes sœurs Hayet et Nawel

A tous mes amis, à toute la promo MATH11

*Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à l'achèvement de ce travail.*



Sommaire

Introduction

CHAPITRE I : LA CORROSION

I.1) Définition de la corrosion	1
I.1.1) Corrosion endogène	1
I.1.2) Corrosion exogène	1
I.2) Morphologies de la corrosion	2
I.2.1) Corrosion uniforme (généralisée)	2
I.2.2) Corrosion localisée	2
I.3) La corrosion dans les pipelines	3
I.4) La corrosion externe	4
I.4.1) Modèle de la double couche	4
I.4.2) Les types de corrosions externes dans les pipelines	5
I.4.2.1) Corrosion électrochimique	5
I.4.2.2) Corrosion par érosion (par cavitation)	8
I.4.2.3) Corrosion sous contrainte	8
I.4.2.4) La corrosion bactérienne	9
I.4.2.5) Corrosion par courant vagabond	9
I.4.3) Enumération des défauts de revêtement	10
I.4.4) Principe fondamentaux de l'électricité.....	11

CHAPITRE II : MOYENS LUTTE CONTRE LA CORROSION

II.1) Introduction	12
II.2) Critères et notions de base de la protection cathodique	12
II.2.1) Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - Tension)	12
II.2.2) Notions de chute ohmique (IR Drop)	13

II.2.3) Potentiel de protection	14
II.2.4) Densité de courant de protection	15
II.2.5) L'agressivité du sol	15
II.2.6) Résistivité du sol	15
II.3) Prévention par choix des matériaux adéquats	17
II.4) La prévention par une forme adaptée de la pièce	18
II.5) Protection par injection d'inhibiteur de corrosion	23
II.5.1) Types d'inhibiteurs	23
II.5.2) Autres fonctions des inhibiteurs	23
II.6) Protection contre la corrosion par revêtement	23
II.6.1) Caractéristiques de base du revêtement	24
II.6.2) Autres fonctions des revêtements	25
II.6.3) Différents types de revêtements	25
II.6.4) Différentes techniques de pose des revêtements métalliques	26
II.6.5) Vieillessement et dégradation du revêtement	27
II.6.6) Revêtement des soudures sur chantier	27
II.6.7) Contrôles du revêtement	28
II.7) Protection contre les courants vagabonds	28
II.7.1) Danger des courants vagabonds	28
II.7.2) Lutte contre les courants vagabonds	29
II.8) La protection cathodique	31
II.8.1) Principe de la protection cathodique	31
II.8.2) Facteurs affectant la protection cathodique	34
II.8.3) Champs d'application de la protection cathodique	34
II.8.3.1) Ouvrages au contact du sol	34
II.8.3.2) Ouvrages immergés	35

II.8.4) Les critères de protection cathodique	35
II.8.5) les facteurs affectant les critères de la protection cathodique	40
II.8.6) Outils de mesure de protection cathodique	40
II.8.7) les types de protection cathodique	41
II.8.7.1) Protection par anodes sacrificielles	42
II.8.7.2) la protection cathodique par courant impose	44
II.8.7.2.1) le principe	45
II.8.7.2.2) le domaine d'application	45
II.8.7.2.3) le poste de soutirage	46
II.8.7.2.4) Facteurs qui influencent le niveau de la protection par courant imposé	48
II.8.7.2.5) l'erreur de chute ohmique lors des mesures de potentiel.....	49
II.8.7.2.6) les différentes sources d'alimentation des postes de soutirages.....	49
II.8.7.2.7) Effets de la protection cathodique sur les revêtements	50

CHAPITRE III : DEROULEMENT ET PROCESSUS D'INSTALLATION D'UN SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSE

III.1) Importance de l'installation d'un système de protection cathodique par courant imposé.....	52
III.2) Collecte des données	52
III.2.1) Introduction	52
III.2.2) Détails de la structure	52
III.2.3) Revêtement	53
III.2.4) Environnement	53
III.2.5) Données spécifiques du pipeline	53
III.3) Conception et conditions préalables	54
III.3.1) Isolation électrique	54
III.3.2) Boites de mesure	55

III.3.3) Gaine de pipelines enterrés	55
III.3.4) Enclage, traversé d'obstacle et gaine pour pipelines	56
III.3.5) Equipement en fonctionnement électrique	56
III.3.6) Eclateur (protection anti-foudre)	57
III.3.7) Equipement de réduction d'interférences de courant alternatif	57
III.3.8) Système de protection cathodique	57
III.3.9) Conception	60
III.3.10) Protection cathodique temporaire	60
III.4) installation d'un système de PC par courant imposé	60
III.4.1) Introduction	60
III.4.2) Installation des sources de courant	61
III.4.3) Installation de puits anodique (le déversoir)	61
III.4.4) Installation des postes	64
III.4.5) installation des câbles	65
III.4.6) les accessoires de protection et de montage	66
III.4.6.1) les joints isolants entre la conduite et le puits	66
III.4.6.2) Résistance variable en croisement	66
III.4.6.3) les éclateurs	66
III.4.6.4) Mise à la terre	67
III.5) la vérification finale, inspection et maintenance	67
III.5.1) La vérification finale	67
III.5.2) Inspection	68
III.5.3) Maintenance	68

CHAPITRE IV : THEORIE ET MODELE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT D'UN POSTE DE PROTECTION CATHODIQUE

IV.1) spécification de dimensionnement d'un système de protection cathodique dans le cas d'un réseau de pipelines.....	69
IV.2) Modélisation mathématique du phénomène d'atténuation	73
IV.2.1) Résistivité du sol : ρ_{sm}	73
IV.2.2) Résistance longitudinale (ou transversale) : R_c	74
IV.2.3) Résistance transitoire (conduite/sol) : R_t	75
IV.2.4) Résistance d'isolement du revêtement moyenne : $R_{r\ m}$	76
IV.2.5) Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur au début de l'exploitation : $R_r(0)$	78
IV.2.6) Coefficient d'atténuation : α	80
IV.3) Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes	80
IV.3.1) Résistance d'entrée moyenne d'une conduite revêtue : Z_m	80
IV.3.2) Résistance d'entrée d'une conduite revêtue au début de délai de l'exploitation : $z(0)$	80
IV.3.3) Valeurs des potentiels	81
IV.3.4) Distribution du potentiel et du courant	82
IV.3.5) Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K	83
IV.3.6) Longueur de protection d'un poste de soutirage : L_p	83
IV.3.7) Nombre de postes de protection cathodique : N_{ppc}	83
IV.3.8) L'intensité du courant de protection : I_p	84
IV.3.9) L'intensité du courant de protection au début de l'exploitation : $I_p(0)$	84
IV.3.10) Nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : N_a	84
IV.4) Calcul de la puissance du poste de soutirage	85
IV.4.1) Détermination de la tension du poste de soutirage : U	85
IV.4.2) Résistance Du Déversoir : $R_{dév}$	86
IV.4.3) Résistance des câbles : R_{cable}	88
IV.4.4) Détermination de la puissance du poste de soutirage : P	89

CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE DU RESEAU COLLECTES DE L'USINE DE CPF DE REGION DE RHOUREDE NOUSS

V.1) Description et caractéristique du réseau collectes d'usine de CPF de région de Rhourde Nouss	90
V.2) Caractéristiques du système de protection cathodique par courant imposé	90
V.2.1) Caractéristiques de réseau de l'usine de CPF	90
V.2.2) Résistivité du sol le long de réseau	92
V.2.3) caractéristiques des anodes et les câbles	95
V.3) Dimensionnement du Système de Protection du réseau collectes	95
V.3.1) Calcul de la résistivité moyenne du sol : ρ_{sm}	95
V.3.2) Calcul de la Résistance longitudinale des 3 réseaux	96
V.3.2.1) Le réseau 1	96
V.3.2.2) le réseau 2	97
V.3.2.3) le réseau 3	98
V.3.2.4) Calcul de la résistance longitudinale équivalent du réseau complet : $R_{c eq}$	99
V.3.3) Calcul de la résistance transitoire moyenne (conduite/sol) : $R_{t m}$	99
V.3.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement moyenne des 3 réseaux.....	99
V.3.4.1) le réseau 1	99
V.3.4.2) le réseau 2	101
V.3.4.3) le réseau 3	102
V.3.4.4) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalent du revêtement par unité de longueur du réseau complet : $R_{r m eq}$	103
V.3.5) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur au début de l'exploitation des 3 réseaux : $R_r (0)$	103
V.3.5.1) le réseau 1	103
V.3.5.2) le réseau 2	105
V.3.5.3) le réseau 3	106

V.3.5.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalent par unité de longueur du réseau complet	107
V.3.6) Calcul du Coefficient d'atténuation : α	107
V.3.7) Calcul de la Résistance d'entrée moyenne d'une conduite revêtue : Z_m	108
V.3.8) Calcul de la Résistance d'entrée d'une conduite revêtue au début de délai de l'exploitation : $z(0)$	108
V.3.9) Calcul des Valeurs des potentiels	108
V.3.10) Calcul du Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K	108
V.3.11) Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage : L_p	109
V.3.12) Calcul du nombre de postes de protection cathodique : N_{ppc}	109
V.3.13) Calcul de l'intensité du courant de protection : I_p	109
V.3.14) l'intensité du courant de protection au début de l'exploitation : $I_p(0)$	109
V.3.15) Calcul des nombres d'anodes minimal, nécessaire à la protection : N_a	110
V.3.16) Calcul de la Résistance de polarisation : R_p	110
V.3.17) Calcul de la Résistance de masse anodique : R_{ma}	110
V.3.18) Calcul de la Résistance (anode/backfill) : $R_{anode/backfill}$	111
V.3.19) Calcul de la Résistance (backfill/anode): $R_{backfill/sol}$	111
V.3.20) Calcul de la Résistance de puits anodique : $R_{puit\ anodique}$	111
V.3.21) Calcul de la Résistance Du Déversoir : $R_{dév}$	111
V.3.22) Calcul de la Résistance des câbles : R_{cable}	112
V.3.23) Calcul de la résistance total : R_{tot}	112
V.3.24) Calcul de la tension du poste de soutirage : U	112
V.3.25) Calcul de la puissance du poste de protection cathodique : p	113
V.4) Conclusion.....	113

CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DU SYSTEME DE PROTECTION

CATHODIQUE

VI.1) Analyse de l'influence de certains paramètres sur le système de PC	114
--------------------------------------------------------------------------------	-----

VI.1.1) Influence de la résistivité du sol.....	115
VI.1.2) Influence du nombre d'anodes.....	117
VI.1.3) influence de la distance entre la structure à protéger et le déversoir « Y ».....	119
VI.1.4) Conclusion.....	121
VI.2) Dimensionnement optimal du système de protection cathodique.....	121
VI.2.1) Modélisation du problème de dimensionnement de notre système.....	122
VI.2.1.1) la fonction objective.....	122
VI.2.1.2) les variables d'état.....	122
VI.2.1.3) Les contraintes.....	123
VI.2.2) Optimisation et résolution du problème	124
VI.2.2.1) Ajustement de la résistivité du sol.....	124
VI.2.2.2) Résolution du problème d'optimisation.....	125
VI.3) Conclusion.....	126

CHAPITRE VII : ETUDE ET MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DU POTENTIEL ET DU COURANT SUR LA SURFACE DU COLLECTEUR TL₂

VII. 1) Etude et modélisation de la distribution du potentiel et du courant sur la surface du collecteur TL ₂	127
VII.1.1) Introduction	127
VII.1.2) Traitement mathématique	127
VII.1.3) Etude de la variation du potentiel et de courant sur la surface du collecteur TL ₂ a l'aide de l'outil de programmation « MATLAB 7.9.0 (R2009b) »	137
VII.1.3.1) la variation du potentiel E _x le long du collecteur TL ₂	137
VII.1.3.1.1) Algorithme de la variation du potentiel E _x en fonction de la distance x.....	137
VII.1.3.1.2) Le graphe de la variation du potentiel E _x le long du collecteur TL ₂	138
V.1.3.2) la variation du courant de protection I _x le long du collecteur TL ₂	139

V.1.3.2.1) Algorithme de la variation du courant I_x en fonction de la distance x	139
V.1.3.2.2) Le graphe de la variation du courant I_x le long du collecteur TL_2	140
V.1.4) l'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation de potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement	141
V.1.4.1) l'algorithme l'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation de potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement	141
V.1.4.2) le graphe de l'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation de potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement	142
Conclusion.....	143
Annexe.....	144
Bibliographie.....	153

INTRODUCTION

Dans un monde constamment en évolution, particulièrement en industrie, la consommation des énergies ne peut être qu'en augmentation ; et puisque les hydrocarbures sont les plus utilisés, leur production doit absolument suivre ce changement et assurer les quantités, de produit, demandés. Sachant que la particularité des hydrocarbures est les localisations des gisements généralement éloignées des zones de raffinage, de traitement et, par conséquent, des points de consommation ; il est nécessaire de faire parvenir ces produits aux consommateurs.

Etant devant plusieurs solutions d'acheminement des hydrocarbures, on ne peut qu'opter pour la plus sûre et la plus économique des solutions pour un transport massif et sur de longues distances, on parle bien des pipelines ; dont on retrouve de vastes réseaux de transport par canalisation à travers le monde. L'Algérie, ne faisant pas exception, dispose d'un réseau de plus de 18 000 Km de transport par canalisations (tout diamètres confondus), prenant en charge tous les types de produits disponibles.

Le plus souvent, les pipelines doivent être enterrés ou immergés dans l'eau ; et cela par mesure de sécurité ou juste pour mettre la construction à l'abri. Les tubes constituant le pipeline, étant en acier, sont constamment exposés à des interactions avec le milieu ambiant engendrant le phénomène de corrosion, et plus l'interaction est intense (sol corrosif, eau agressive) plus ce phénomène a de chance de se produire.

La corrosion désigne le phénomène par lequel, les métaux tendent à revenir à l'état sous lequel ils se trouvent dans la nature ; ce qui cause la détérioration des ouvrages métalliques pour en fin les détruire complètement. La perte de 25% de la production annuelle mondiale d'acier reflète en chiffre la gravité de ce phénomène.

Au niveau des pipelines, les dépenses engendrées par la détérioration du métal et donc la nécessité de son entretien, sa réparation et son remplacement, viennent s'ajouter aux pertes causées par l'instabilité de la production et le mécontentement des clients. Sans parler des accidents résultants de l'état des conduites corrodées. D'où la nécessité d'assurer une protection fiable et permanente aux conduites.

La première méthode utilisée dans ce but est passive, elle consiste en un revêtement (isolant électrique) créant un effet de barrière entre l'acier des canalisations et le milieu environnant. Malheureusement, la présence d'imperfections ou de blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou de l'application, rend l'efficacité de l'isolation limitée, d'où la nécessité d'une protection complémentaire.

Une méthode dite active est utilisée par la suite, il s'agit d'une protection cathodique. Deux procédés se présentent à nous dans cette catégorie, le premier est l'utilisation d'une anode sacrificielle faisant de la conduite la cathode de l'installation. Le deuxième consiste en l'utilisation d'un courant imposé permettant d'amener la conduite à un potentiel suffisamment électro-négatif à l'aide d'un générateurs de courant débitant entre elle et une électrode à proximité, faisant de la conduite la cathode du système.

Dans ce travail, nous allons tout d'abord nous pencher sur le phénomène de corrosion et les moyens de lutte appropriés, particulièrement la protection par courant imposé. Par la suite on va exposer les étapes principales de l'installation d'un système du genre sur le réseau de collecte du CPF (Central Processing Facility / Installations Centrales de Traitement) de la région Rhourde Nouss, établir les schémas électrique représentatifs à l'aide du logiciel « EDISON4 » et procédé à son dimensionnement et à l'optimisation de ses paramètres sur « Solver d'EXCEL ».

Et pour finir, nous allons exposer un modèle mathématique permettant d'étudier la distribution du courant et du potentiel le long d'un tronçon de conduite et simuler l'influence d'un défaut du revêtement sur la variation du potentiel grâce à « MATLAB2009 ».

Chapitre I :
LA
CORROSION

I.1) Définition de la corrosion :

La corrosion est l'un des phénomènes les plus répandus et les plus redoutés en industrie, vu le nombre de défaillances dont elle est la cause. Elle est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie.

Elle correspond au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer, par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde, c'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydraté).

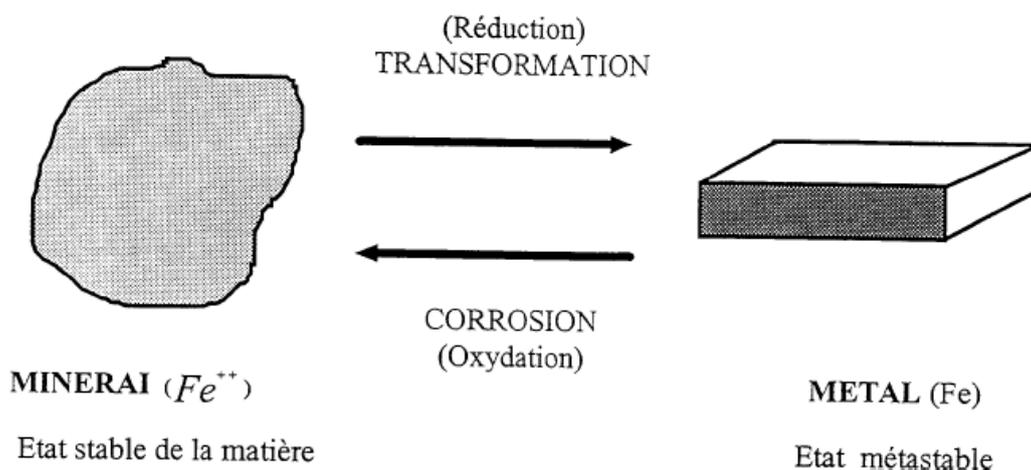


Figure I.1 : Processus de dégradation de la matière.

On peut distinguer deux catégories générales de corrosion :

I.1.1) Corrosion endogène :

Corrosion qui est propre au métal utilisé. Elle peut se manifester sous forme de corrosion uniforme dans le cas des métaux monophasés suffisamment homogènes ou dans le cas où les hétérogénéités sont réparties uniformément dans des matériaux polyphasés. Elle peut aussi se manifester sous forme de corrosion localisée lorsque les hétérogénéités (inclusions,..) sont suffisamment étendues pour fixer de manière permanente des aires anodiques en des points discrets de la surface du métal (par exemple: corrosion par piqures).

I.1.2) Corrosion exogène :

Pour ce type de corrosion, les causes ne sont pas à rechercher dans le métal lui-même mais dans des facteurs extérieurs. Cette corrosion se manifeste souvent par l'existence des zones anodiques et cathodiques localisées. Existence qui est causée par: les imperfections lors de la mise en œuvre du métal, défauts de surface (rayure,...), écrouissages locaux (cintrage des

tubes,...) etc., les défauts de conception de la structure tels que par exemple le couplage galvanique entre deux parties de l'appareil en métaux différents.

I.2) Morphologies de la corrosion :

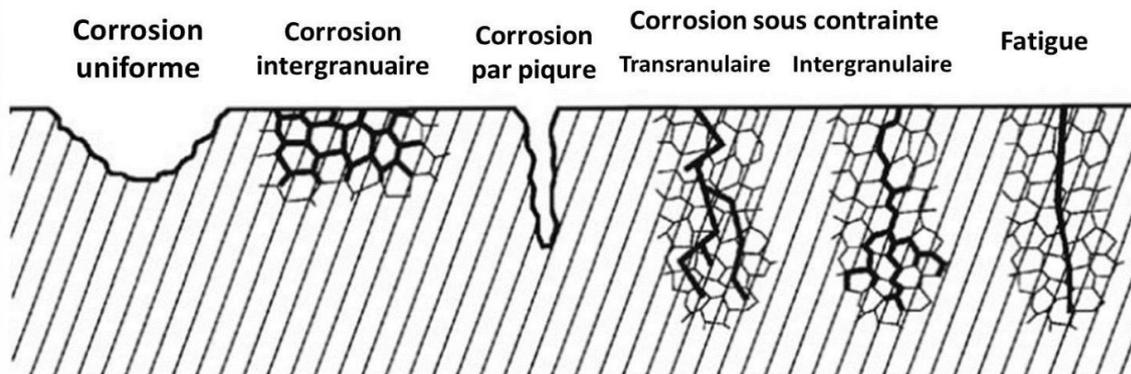


Figure I.2 : La morphologie de la corrosion

I.2.1) Corrosion uniforme (généralisée):

C'est la forme de corrosion la plus courante. Elle affecte les structures métalliques par une attaque généralisée et uniforme se traduisant par la présence des produits de corrosion à la surface du métal et par une perte de matière uniformément répartie. Les sites anodiques et cathodiques se forment au hasard sur l'électrode, et le processus conduit à une corrosion de type généralisée. Avec le temps, le métal voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement.

I.2.2) Corrosion localisée :

Dans ce cas le métal est mis en présence d'un environnement présentant un comportement sélectif qui peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau qu'au niveau de l'environnement.

I.2.2.1) Corrosion par piqures :

C'est un type de corrosion, qui se traduit à la surface du métal par la formation des trous, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur.

I.2.2.2) Corrosion intergranulaire (inter-cristalline):

C'est une attaque sélective aux joints des grains des cristaux de l'acier, causée par des différences physico-chimiques entre le centre et les bords du grain.

I.2.2.3) Corrosion par crevasse:

Appelée aussi corrosion cavernueuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique.

I.3) La corrosion dans les pipelines :

Plus l'industrie pétrolière grandie en termes de production et de revenu, plus les défaillances n'auront une plus grande signification. Et la corrosion est à l'origine de beaucoup de ces défaillances, comme le montre la figure I.3 et 1.4 suivantes :

causes	1999	2000	2001	2002
Activité de tiers(%)	17.3	24.5	22	28
corrosion(%)	21.4	22.4	29	28
Défaillance mécanique(%)	14.3	15	8	23
Erreur d'exploitation(%)	9.5	6.1	6	4
Autres(non identifiées) (%)	37.5	32	35	17

Figure I.3 : Tableaux des origines des défaillances dans l'industrie pétrolière

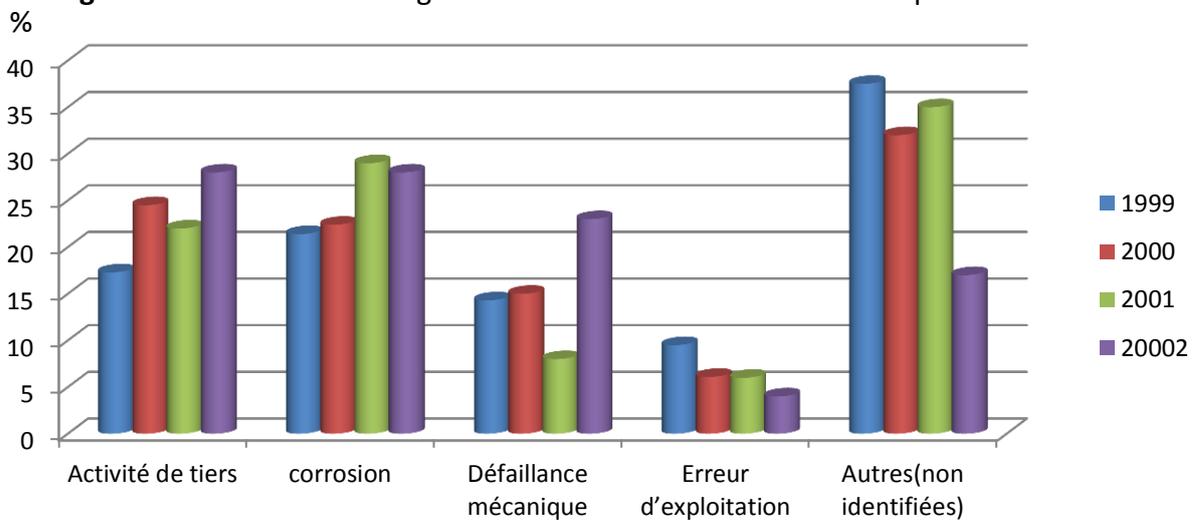


Figure I.4 : L'origine des défaillances dans l'industrie pétrolière

Sur le terrain, on ne peut s'empêcher de classer les cas de corrosion d'après leurs natures, causes, impacts et moyens de lutte (complexité et variabilité). Et donc on distingue deux classes, d'un côté la corrosion interne dont les origines peuvent varier selon la nature du produit pris en charge et celle de la structure exploitée, et dont les moyens de lutte varient largement suivant les caractéristiques disponibles et la gravité des cas. De l'autre côté, nous avons la corrosion externe, qui est la problématique de ce travail.

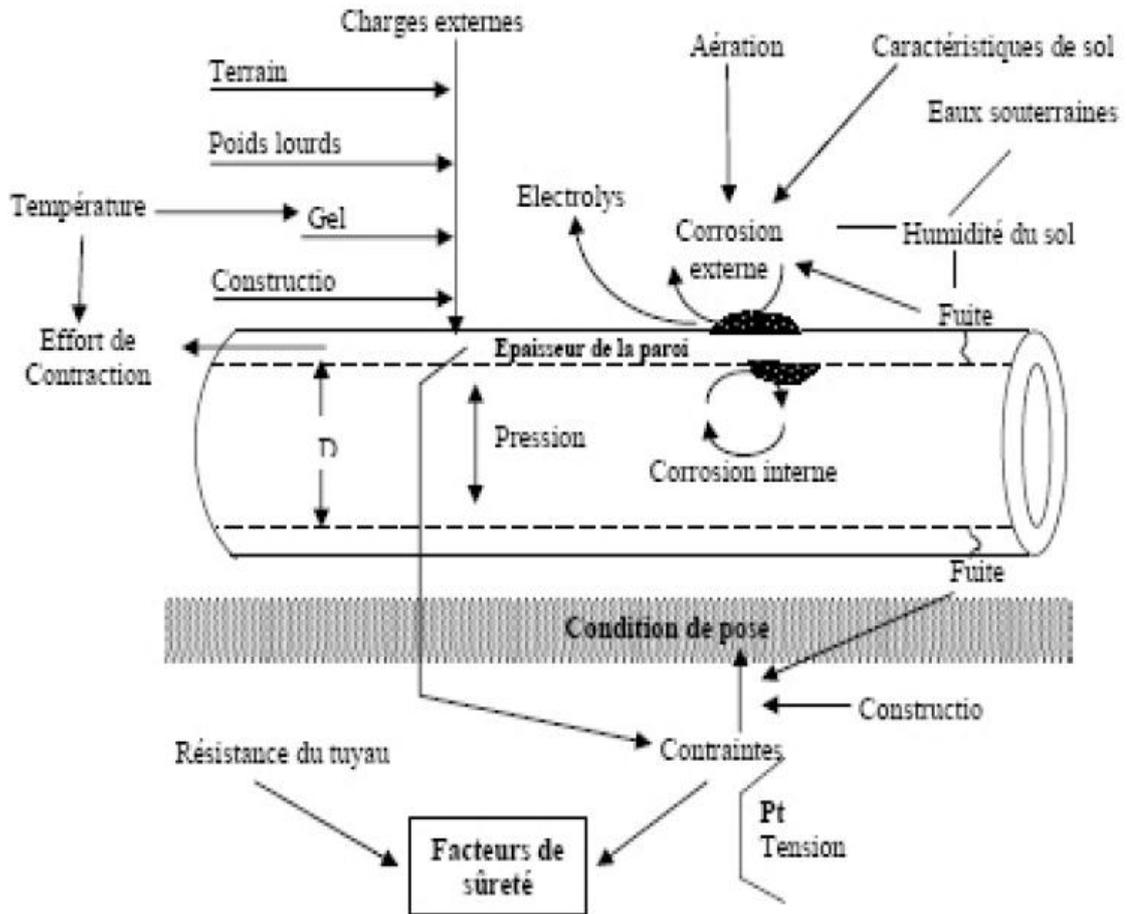


Figure I.5 : Les différents facteurs de la corrosion interne et externe

I.4) La corrosion externe :

La corrosion externe est un des principaux processus qui contribuent à la rupture des conduites. Ce phénomène apparaît à des endroits où le sol avoisinant est jugé agressif et/ou en présence de courants vagabonds. La corrosion affaiblit localement la structure des conduites et peut mener à leur rupture lorsque les zones affaiblies par la corrosion sont soumises à un stress intérieur ou extérieur (ex. : charge excessive en surface, variation rapide de pression, etc.).

I.4.1) Modèle de la double couche :

Si l'on plonge une petite éprouvette de fer très pur dans de l'eau pure, l'émission d'ions ferreux Fe^{2+} dans l'eau est immédiate. Les électrons libérés dans le métal contribuent à le charger négativement ; en conséquence les ions Fe^{2+} , chargés positivement sont retenus au

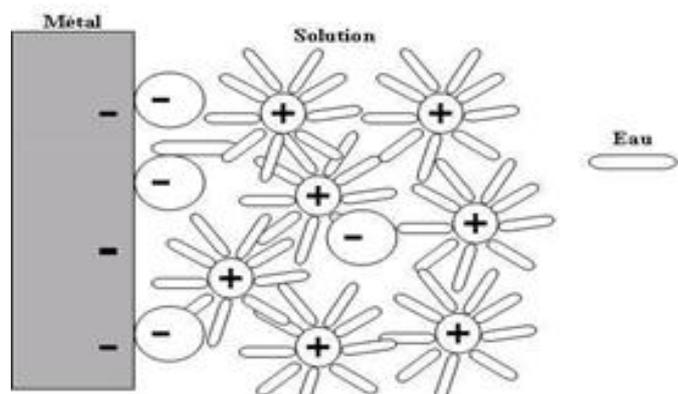


Figure : I.6 : Schéma du modèle de double couche

voisinage immédiat de la surface métallique sous l'effet des forces électrostatiques comme illustré sur la figure I.6. Par ailleurs, ces ions comme les autres ions présents dans la solution, sont solvatés, c'est-à-dire entourés d'un certain nombre de molécules d'eau. Cet ensemble (métal/solution), appelé communément couche double.

La notion de la double couche est essentielle pour comprendre le comportement de l'interface métal/électrolyte. En effet, le métal comporte des électrons libres, mobiles, susceptibles de «quitter» le métal. La densité d'électrons est distribuée de telle sorte que la charge électrique n'est pas uniforme sur quelques dixièmes de nanomètres en surface, épaisseur dans laquelle s'effectuent les échanges électroniques de tous les phénomènes électrochimiques.

Les propriétés de l'électrolyte dans cette zone, concentration des espèces (actives ou non), ainsi que l'épaisseur, influencent le comportement du métal dans la solution, et donc sa dissolution. L'accumulation d'ions sur cette interface modifie les propriétés électriques locales et crée alors une capacité, C_{dc} , dite de double couche ; l'interface métal- solution présente aussi une résistance à l'échange d'électrons, appelée de transfert de charge R_t , s'opposant au passage des courants entre la solution et le métal. R_t est dépendante du potentiel du métal, du taux de recouvrement et de la concentration des espèces. Ces deux grandeurs fondamentales sont accessibles par spectroscopie d'impédance électrochimique.

I.4.2) Les types de corrosions externes dans les pipelines :

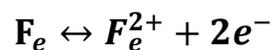
I.4.2.1) Corrosion électrochimique :

I.4.2.1.1) Définition :

C'est la corrosion résultante de la différence de potentiel entre les différents points d'un métal se trouvant dans un sol humide pouvant être considéré comme un électrolyte. Il faudra toutefois tenir compte des particularités de cet électrolyte qui consiste en un système hétérogène, capillaire, poreux, souvent colloïdal, dont les caractéristiques ne sont pas uniformes tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

I.4.2.1.2) Principe :

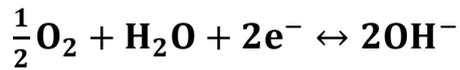
La corrosion d'un métal comme le fer est la résultante d'un processus qui peut être schématisé par l'équation suivante :



Cette équation signifie simplement que les atomes du métal (F_e) sous l'action d'un processus de corrosion se transforment en ions positifs (F_e^{2+}) qui quittent le métal pour passer dans le milieu. Il y a changement d'état de la matière lié à la réaction de dissolution du métal. Ce changement d'état s'accompagne de la libération d'électrons ($2e^-$ dans le cas du fer). La conservation de la neutralité du milieu impose que les électrons émis par la réaction de dissolution soient consommés dans une deuxième réaction qui peut être par exemple :



Milieu acide



Milieu aéré neutre et basique

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

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

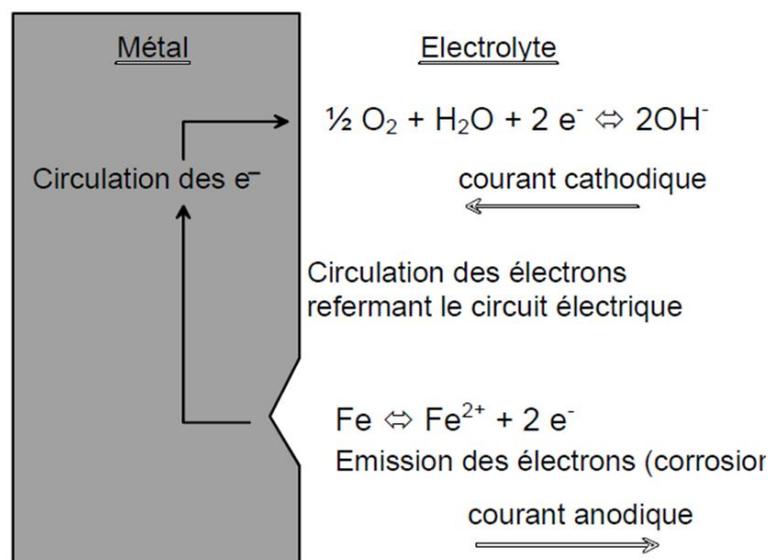
- 1- Réaction de dissolution ou d'oxydation (réaction anodique);
- 2- La réaction de décomposition du milieu : « réduction » (réaction cathodique).

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

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

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

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



Note: Les électrons ne circulent que dans le métal

Figure I.7 : Schéma du processus de corrosion

I.4.2.1.3) Différents types de piles de Corrosion :

A) Piles dues à l'électrolyte (piles géologiques) :

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage métallique de grande longueur et Parfaitement homogène, traversant des sols de compositions différentes, lui conférant des potentiels locaux différents, donnant naissance à un courant qui Conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal. Les zones soumises à une sortie de courant vont se corroder, Ce sont celles qui ont les potentiels les plus négatifs.

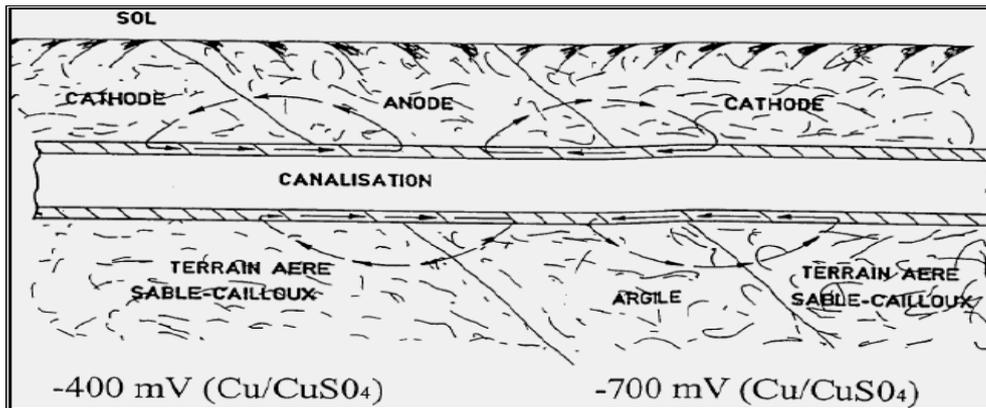


Figure I.8 : Piles dues à l'électrolyte (piles géologiques)

B) Piles dues à l'association de métaux différents (couplage galvanique) :

Le principe est que le contact électrique de 2 métaux différents dans un même sol entraînerait la corrosion de celui dont le potentiel est le plus négatif. Il est donc possible de prévoir le sens des réactions galvaniques en mesurant et en comparant les potentiels des métaux. Le contact électrique entre une conduite en acier et des métaux tels que le cuivre, plomb, la fonte et même l'acier oxydé, entraîne une corrosion de l'ouvrage en acier.

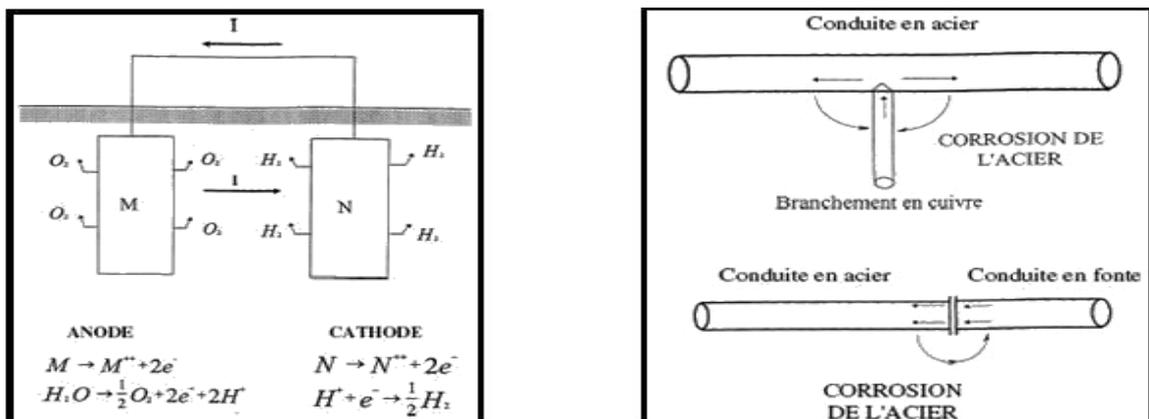


Figure I.9 : Piles dues à couplage galvanique

C) Piles dues à l'aération différentielle :

Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement. C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts.

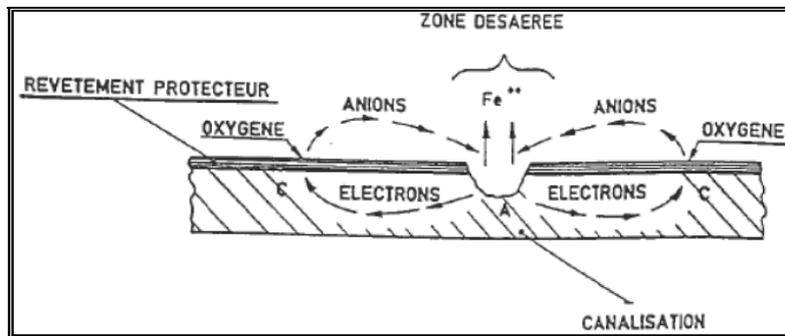


Figure I.10 : Piles dues à l'aération différentielles

I.4.2.2) Corrosion par érosion (par cavitation) :

Le risque d'apparition de ces phénomènes peut être diminué par une conception appropriée des canalisations véhiculant des fluides à vitesse élevée. On évitera en particulier les variations brutales de section créant des zones de turbulence ou les changements brusques de direction.

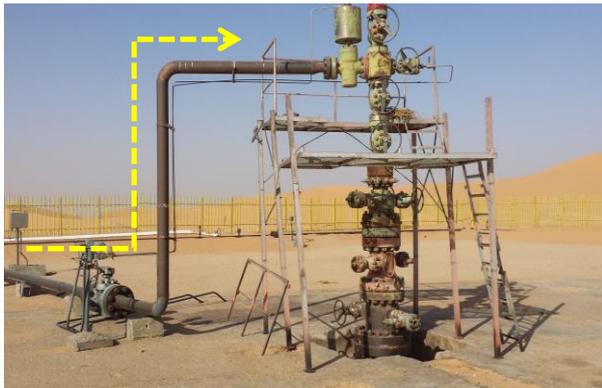


Figure I.11 : Corrosion dues à l'érosion

I.4.2.3) Corrosion sous contrainte :

Pour une même sollicitation globale appliquée, la distribution des contraintes dans une pièce peut dépendre de sa géométrie. Dans un milieu corrosif, des fissures sous forme transgranulaire ou intergranulaire apparaissent et se propagent

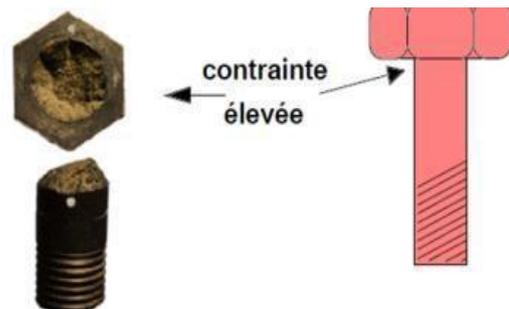


Figure I.12 : Corrosion sous contrainte

très vite et affectent la résistance de métal, favorisant ainsi la fatigue du métal.

I.4.2.4) La corrosion bactérienne :

Comme son nom l'indique, certaines bactéries peuvent corroder les conduites métalliques. Ces bactéries sont surtout les bactéries anaérobies réductrices de sulfates. Ces dernières se développent sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des sites de la conduite qui sont faiblement aérés.



Figure I.13 : La corrosion bactérienne

I.4.2.5) Corrosion par courant vagabond :

Dans les sols, on a souvent affaire à des courants vagabonds. Tout écoulement de courant continu dans le sol, ligne de traction avec retour par les rails (tramways, métro), usines électrochimiques comportant des cuves à électrolyse, etc..., peut alors être cause de corrosion importante. En effet, ces courants empruntent dans le sol des chemins de moindre résistance électrique, canalisations par exemple, créant sur un même matériau des zones à des potentiels électrochimiques différents. Les surfaces par où entrent les courants vagabonds sont plus électronégatives que le sol. Ces courants apportent des électrons à l'interface métal/sol où il se produit une réduction; les surfaces par où sortent les courants sont devenues plus électropositives que le sol; à cet endroit une corrosion du métal se produira inévitablement.

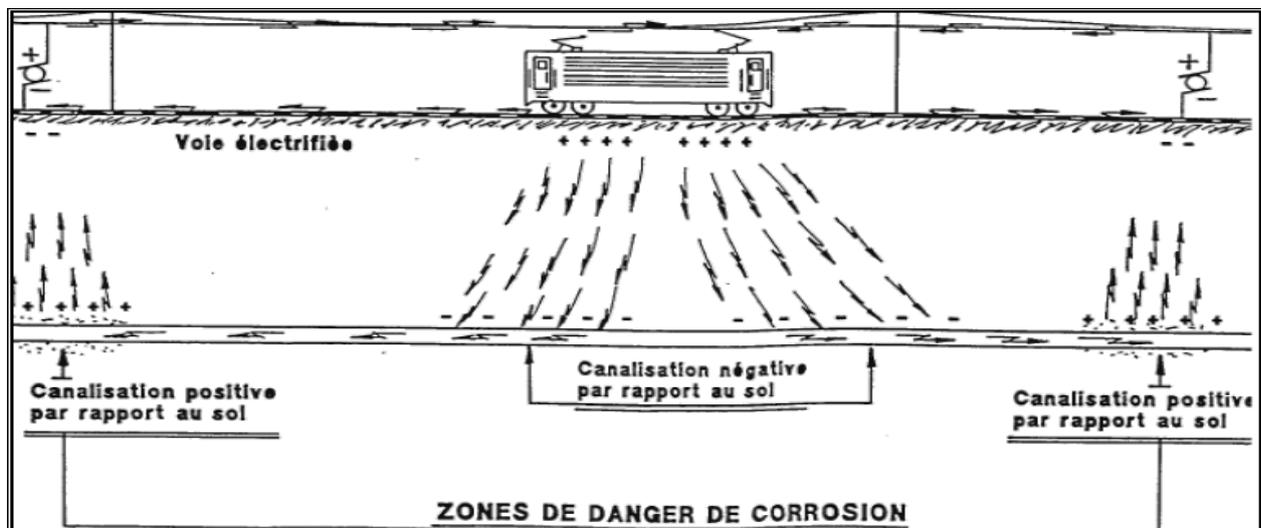


Figure I.14 : Corrosion par courant vagabond

I.4.3) Énumération des défauts de revêtement :

Différents types de défauts de revêtement sont observés sur les canalisations. Leurs origines et conséquences sont diverses, et peuvent dans certains cas conduire à une corrosion :

I.4.3.1) Porosité :

Le matériau du revêtement présente une porosité intrinsèque qui permet l'arrivée d'éléments potentiellement corrosifs à la surface du métal, (eau, oxygène, CO₂,...)

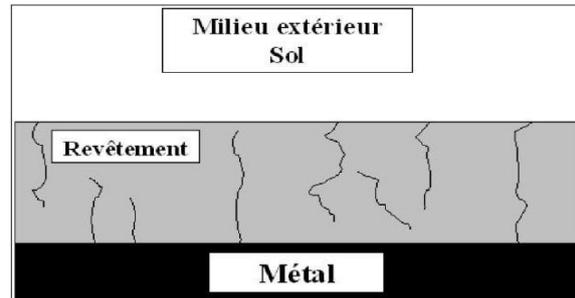


Figure I.15 : La Porosité sur le revêtement

I.4.3.2) Défaut ouvert :

Ce type de défaut est une lacune de revêtement, mettant le métal directement en contact avec le milieu électrolytique. La protection cathodique dans ces conditions sera efficace tant qu'il y aura continuité électrique. On pourra distinguer pour ce type de défaut une taille "critique", et dépendante de la conductivité du milieu extérieur, en dessous de laquelle les courants de protection ne seront plus efficaces car la résistance intrinsèque du défaut sera trop importante.

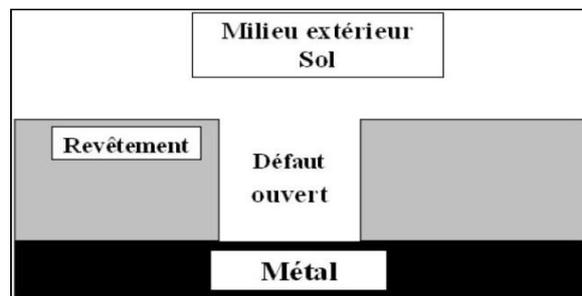


Figure I.16 : Défaut ouvert du revêtement

I.4.3.3) Défaut avec écran :

Un obstacle non conducteur, typiquement une pierre, a créé le défaut et reste enfiché dans le revêtement. L'espace libre entre la pierre et le revêtement peut entraîner une chute ohmique empêchant les courants de PC de protéger le métal (effet d'écran) mais laisser passer des produits potentiellement corrosifs (oxygène, eau,...). Il peut aussi se créer une pile d'aération différentielle entre le point de contact de la pierre (anodique) et la partie au contact de l'électrolyte aéré (cathodique).

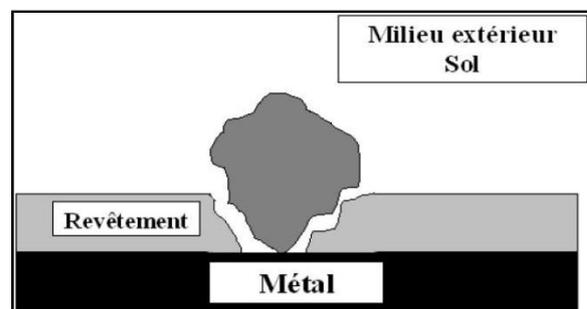


Figure I.17 : Défaut avec écran du revêtement

I.4.3.4) Défaut ouvert avec décollement du revêtement :

Souvent conséquence d'un vieillissement d'un trou existant, ou résultant d'un défaut d'application. On parlera de trou "unique débouchant" dans le cas d'un décollement présentant une seule ouverture sur le milieu extérieur. Les paramètres influents dans cette configuration sont la taille du défaut, la hauteur de l'interstice entre le métal et le revêtement, et la surface de métal mis à nu.

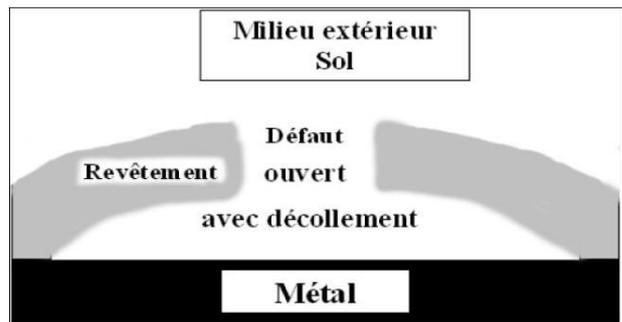


Figure I.18 : Défaut ouvert avec décollement du revêtement

I.4.3.5) Défauts ouverts communicants :

Plusieurs défauts ouverts proches les uns des autres peuvent finir par communiquer en raison du décollement du revêtement. Une circulation d'électrolyte peut alors s'instaurer.

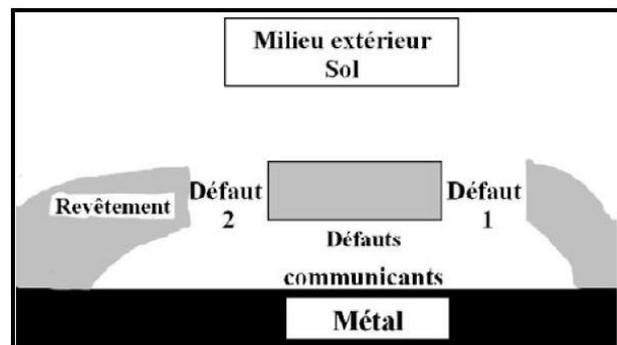


Figure I.19 : Défauts ouverts communicants du revêtement

I.4.4) Principes fondamentaux de l'électricité :

L'électricité dans un élément solide est définie par un flux continu d'électrons, ou de courant, d'un atome à un autre. Les électrons ne peuvent voyager qu'à travers un circuit métallique fermé dont la direction sera inverse à la direction conventionnelle du courant. La direction conventionnelle du courant passe du pôle positif au pôle négatif et est schématisée par le circuit de batterie de la figure suivante.

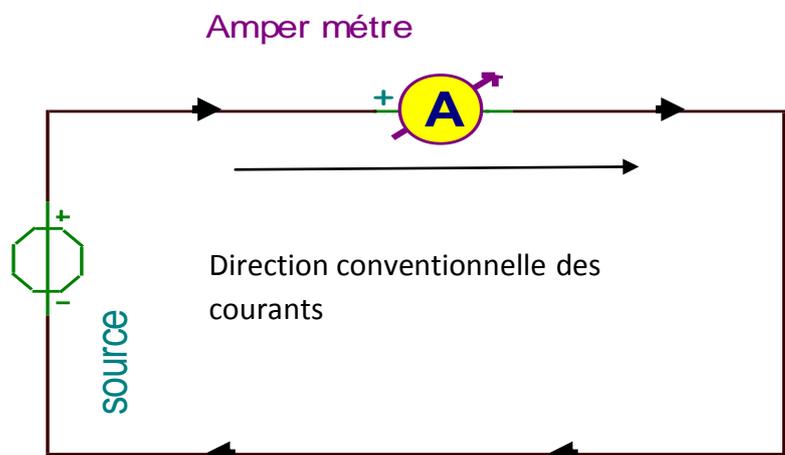


Figure I.20 : Principes fondamentaux de l'électricité

Chapitre I :
LA
CORROSION

I.1) Définition de la corrosion :

La corrosion est l'un des phénomènes les plus répandus et les plus redoutés en industrie, vu le nombre de défaillances dont elle est la cause. Elle est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie.

Elle correspond au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer, par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde, c'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydraté).

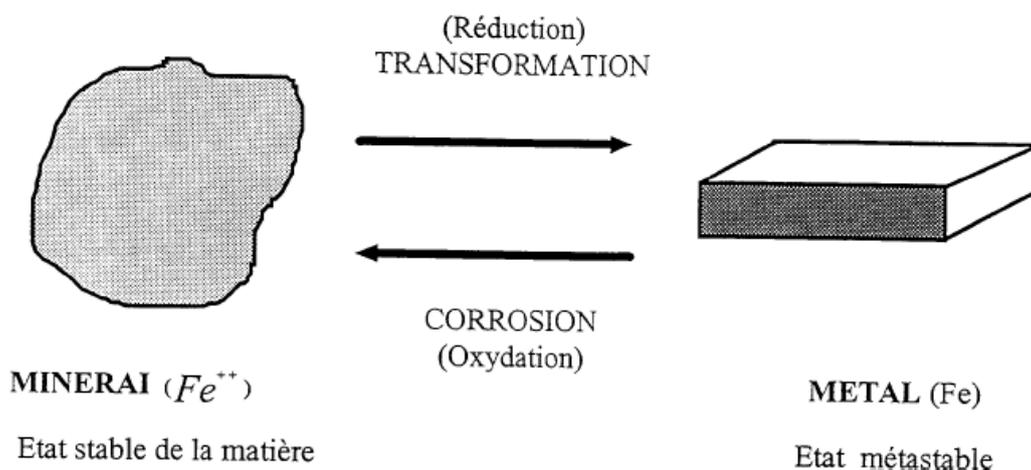


Figure I.1 : Processus de dégradation de la matière.

On peut distinguer deux catégories générales de corrosion :

I.1.1) Corrosion endogène :

Corrosion qui est propre au métal utilisé. Elle peut se manifester sous forme de corrosion uniforme dans le cas des métaux monophasés suffisamment homogènes ou dans le cas où les hétérogénéités sont réparties uniformément dans des matériaux polyphasés. Elle peut aussi se manifester sous forme de corrosion localisée lorsque les hétérogénéités (inclusions,..) sont suffisamment étendues pour fixer de manière permanente des aires anodiques en des points discrets de la surface du métal (par exemple: corrosion par piqures).

I.1.2) Corrosion exogène :

Pour ce type de corrosion, les causes ne sont pas à rechercher dans le métal lui-même mais dans des facteurs extérieurs. Cette corrosion se manifeste souvent par l'existence des zones anodiques et cathodiques localisées. Existence qui est causée par: les imperfections lors de la mise en œuvre du métal, défauts de surface (rayure,...), écrouissages locaux (cintrage des

tubes,...) etc., les défauts de conception de la structure tels que par exemple le couplage galvanique entre deux parties de l'appareil en métaux différents.

I.2) Morphologies de la corrosion :

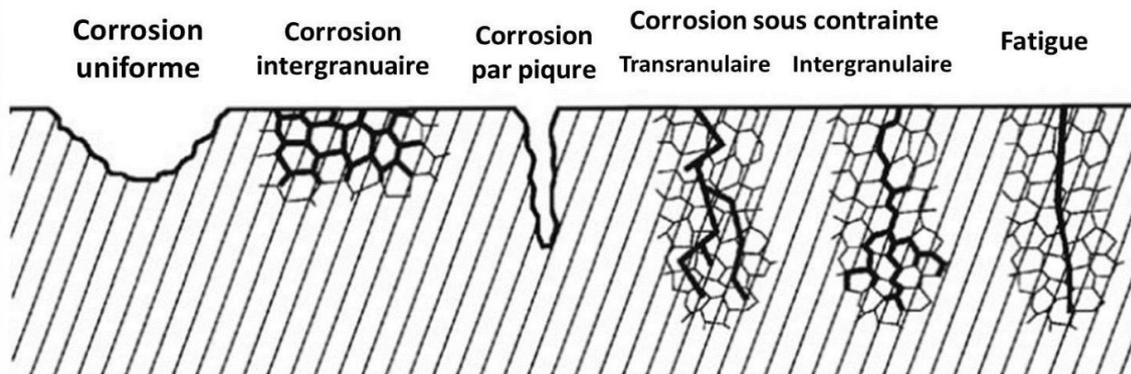


Figure I.2 : La morphologie de la corrosion

I.2.1) Corrosion uniforme (généralisée):

C'est la forme de corrosion la plus courante. Elle affecte les structures métalliques par une attaque généralisée et uniforme se traduisant par la présence des produits de corrosion à la surface du métal et par une perte de matière uniformément répartie. Les sites anodiques et cathodiques se forment au hasard sur l'électrode, et le processus conduit à une corrosion de type généralisée. Avec le temps, le métal voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement.

I.2.2) Corrosion localisée :

Dans ce cas le métal est mis en présence d'un environnement présentant un comportement sélectif qui peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau qu'au niveau de l'environnement.

I.2.2.1) Corrosion par piqures :

C'est un type de corrosion, qui se traduit à la surface du métal par la formation des trous, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur.

I.2.2.2) Corrosion intergranulaire (inter-cristalline):

C'est une attaque sélective aux joints des grains des cristaux de l'acier, causée par des différences physico-chimiques entre le centre et les bords du grain.

I.2.2.3) Corrosion par crevasse:

Appelée aussi corrosion cavernueuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique.

I.3) La corrosion dans les pipelines :

Plus l'industrie pétrolière grandie en termes de production et de revenu, plus les défaillances n'auront une plus grande signification. Et la corrosion est à l'origine de beaucoup de ces défaillances, comme le montre la figure I.3 et 1.4 suivantes :

causes	1999	2000	2001	2002
Activité de tiers(%)	17.3	24.5	22	28
corrosion(%)	21.4	22.4	29	28
Défaillance mécanique(%)	14.3	15	8	23
Erreur d'exploitation(%)	9.5	6.1	6	4
Autres(non identifiées) (%)	37.5	32	35	17

Figure I.3 : Tableaux des origines des défaillances dans l'industrie pétrolière

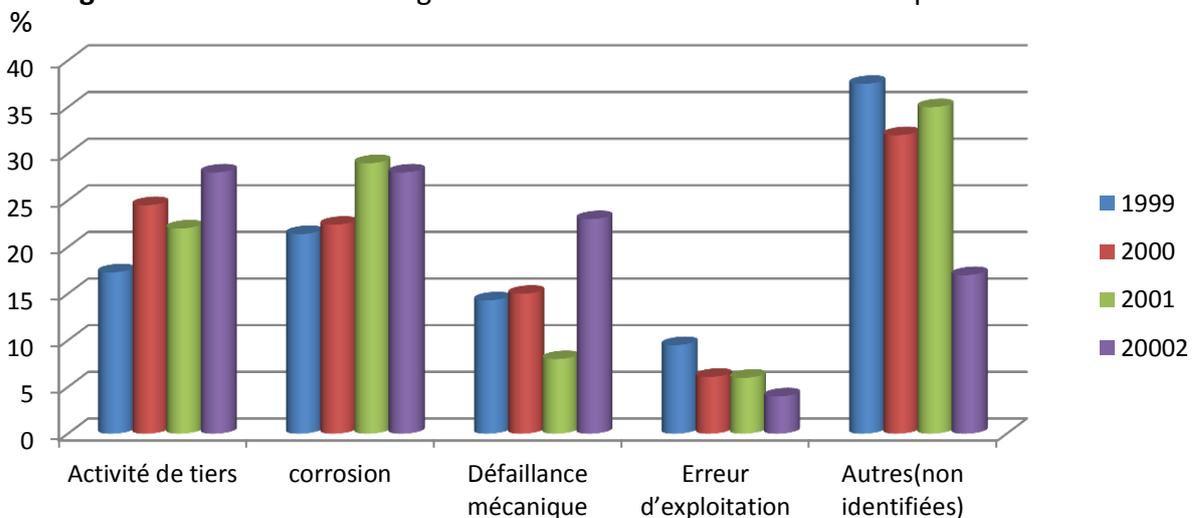


Figure I.4 : L'origine des défaillances dans l'industrie pétrolière

Sur le terrain, on ne peut s'empêcher de classer les cas de corrosion d'après leurs natures, causes, impacts et moyens de lutte (complexité et variabilité). Et donc on distingue deux classes, d'un côté la corrosion interne dont les origines peuvent varier selon la nature du produit pris en charge et celle de la structure exploitée, et dont les moyens de lutte varient largement suivant les caractéristiques disponibles et la gravité des cas. De l'autre côté, nous avons la corrosion externe, qui est la problématique de ce travail.

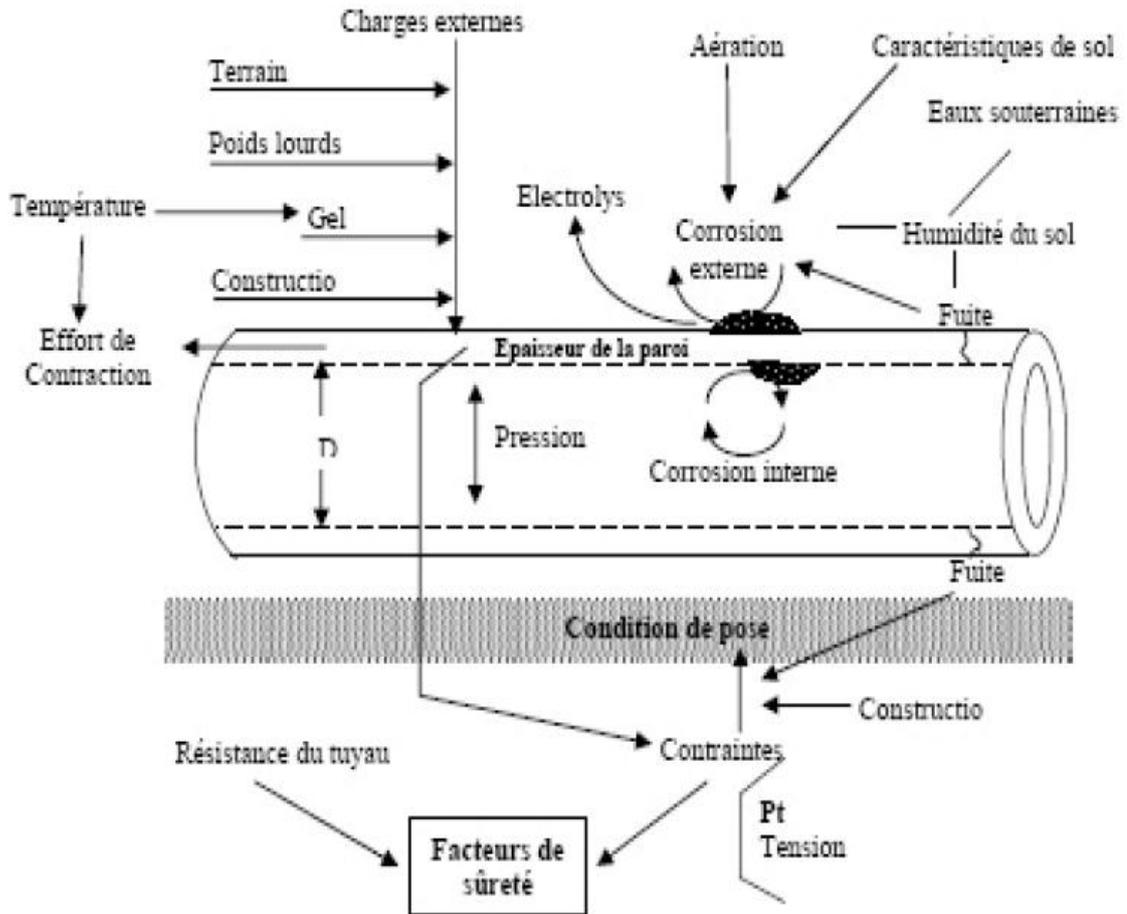


Figure I.5 : Les différents facteurs de la corrosion interne et externe

I.4) La corrosion externe :

La corrosion externe est un des principaux processus qui contribuent à la rupture des conduites. Ce phénomène apparaît à des endroits où le sol avoisinant est jugé agressif et/ou en présence de courants vagabonds. La corrosion affaiblit localement la structure des conduites et peut mener à leur rupture lorsque les zones affaiblies par la corrosion sont soumises à un stress intérieur ou extérieur (ex. : charge excessive en surface, variation rapide de pression, etc.).

I.4.1) Modèle de la double couche :

Si l'on plonge une petite éprouvette de fer très pur dans de l'eau pure, l'émission d'ions ferreux Fe^{2+} dans l'eau est immédiate. Les électrons libérés dans le métal contribuent à le charger négativement ; en conséquence les ions Fe^{2+} , chargés positivement sont retenus au

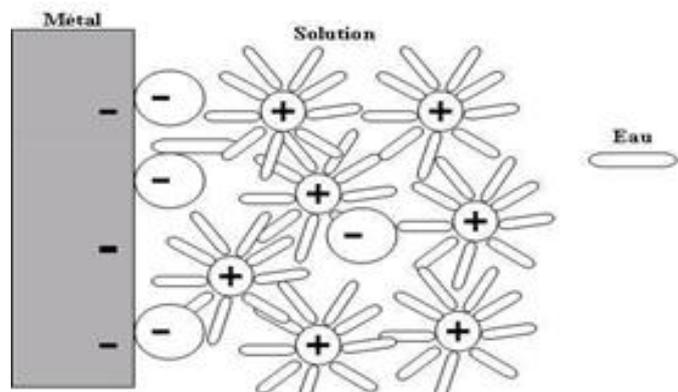


Figure : I.6 : Schéma du modèle de double couche

voisinage immédiat de la surface métallique sous l'effet des forces électrostatiques comme illustré sur la figure I.6. Par ailleurs, ces ions comme les autres ions présents dans la solution, sont solvatés, c'est-à-dire entourés d'un certain nombre de molécules d'eau. Cet ensemble (métal/solution), appelé communément couche double.

La notion de la double couche est essentielle pour comprendre le comportement de l'interface métal/électrolyte. En effet, le métal comporte des électrons libres, mobiles, susceptibles de «quitter» le métal. La densité d'électrons est distribuée de telle sorte que la charge électrique n'est pas uniforme sur quelques dixièmes de nanomètres en surface, épaisseur dans laquelle s'effectuent les échanges électroniques de tous les phénomènes électrochimiques.

Les propriétés de l'électrolyte dans cette zone, concentration des espèces (actives ou non), ainsi que l'épaisseur, influencent le comportement du métal dans la solution, et donc sa dissolution. L'accumulation d'ions sur cette interface modifie les propriétés électriques locales et crée alors une capacité, C_{dc} , dite de double couche ; l'interface métal- solution présente aussi une résistance à l'échange d'électrons, appelée de transfert de charge R_t , s'opposant au passage des courants entre la solution et le métal. R_t est dépendante du potentiel du métal, du taux de recouvrement et de la concentration des espèces. Ces deux grandeurs fondamentales sont accessibles par spectroscopie d'impédance électrochimique.

I.4.2) Les types de corrosions externes dans les pipelines :

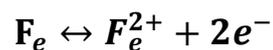
I.4.2.1) Corrosion électrochimique :

I.4.2.1.1) Définition :

C'est la corrosion résultante de la différence de potentiel entre les différents points d'un métal se trouvant dans un sol humide pouvant être considéré comme un électrolyte. Il faudra toutefois tenir compte des particularités de cet électrolyte qui consiste en un système hétérogène, capillaire, poreux, souvent colloïdal, dont les caractéristiques ne sont pas uniformes tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

I.4.2.1.2) Principe :

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



Cette équation signifie simplement que les atomes du métal (F_e) sous l'action d'un processus de corrosion se transforment en ions positifs (F_e^{2+}) qui quittent le métal pour passer dans le milieu. Il y a changement d'état de la matière lié à la réaction de dissolution du métal. Ce changement d'état s'accompagne de la libération d'électrons ($2e^-$ dans le cas du fer). La conservation de la neutralité du milieu impose que les électrons émis par la réaction de dissolution soient consommés dans une deuxième réaction qui peut être par exemple :



Milieu acide



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

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

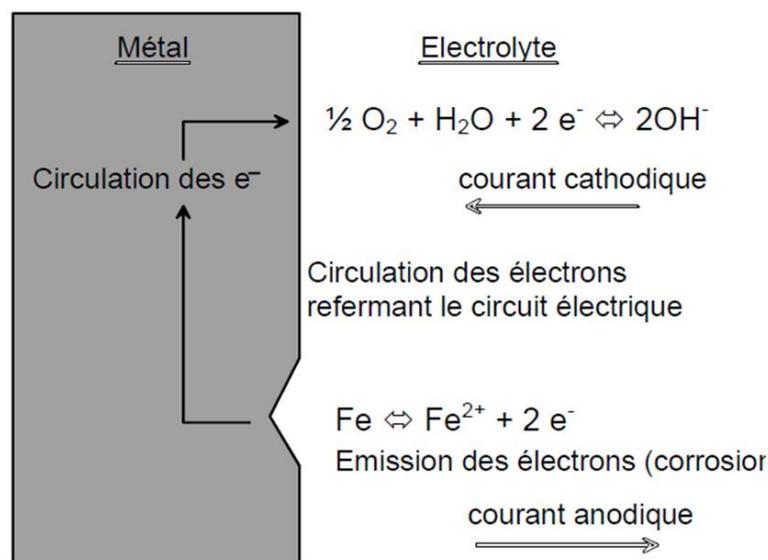
- 1- Réaction de dissolution ou d'oxydation (réaction anodique);
- 2- La réaction de décomposition du milieu : « réduction » (réaction cathodique).

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

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

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

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



Note: Les électrons ne circulent que dans le métal

Figure I.7 : Schéma du processus de corrosion

I.4.2.1.3) Différents types de piles de Corrosion :

A) Piles dues à l'électrolyte (piles géologiques) :

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage métallique de grande longueur et Parfaitement homogène, traversant des sols de compositions différentes, lui conférant des potentiels locaux différents, donnant naissance à un courant qui Conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal. Les zones soumises à une sortie de courant vont se corroder, Ce sont celles qui ont les potentiels les plus négatifs.

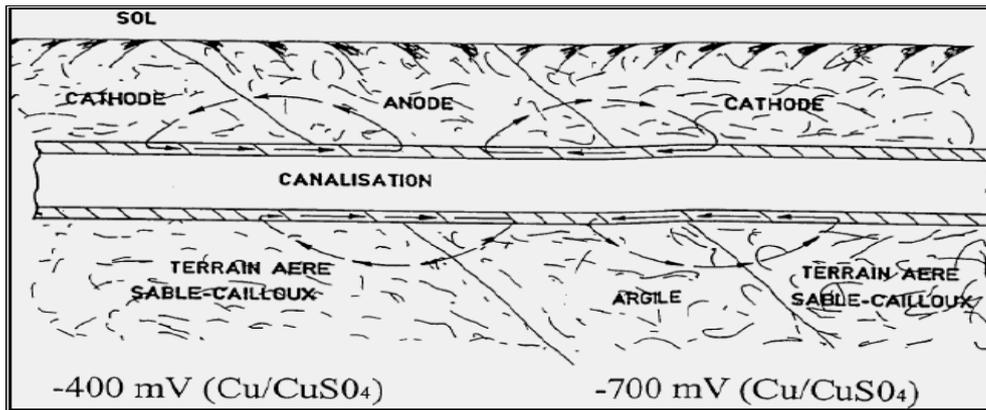


Figure I.8 : Piles dues à l'électrolyte (piles géologiques)

B) Piles dues à l'association de métaux différents (couplage galvanique) :

Le principe est que le contact électrique de 2 métaux différents dans un même sol entraînerait la corrosion de celui dont le potentiel est le plus négatif. Il est donc possible de prévoir le sens des réactions galvaniques en mesurant et en comparant les potentiels des métaux. Le contact électrique entre une conduite en acier et des métaux tels que le cuivre, plomb, la fonte et même l'acier oxydé, entraîne une corrosion de l'ouvrage en acier.

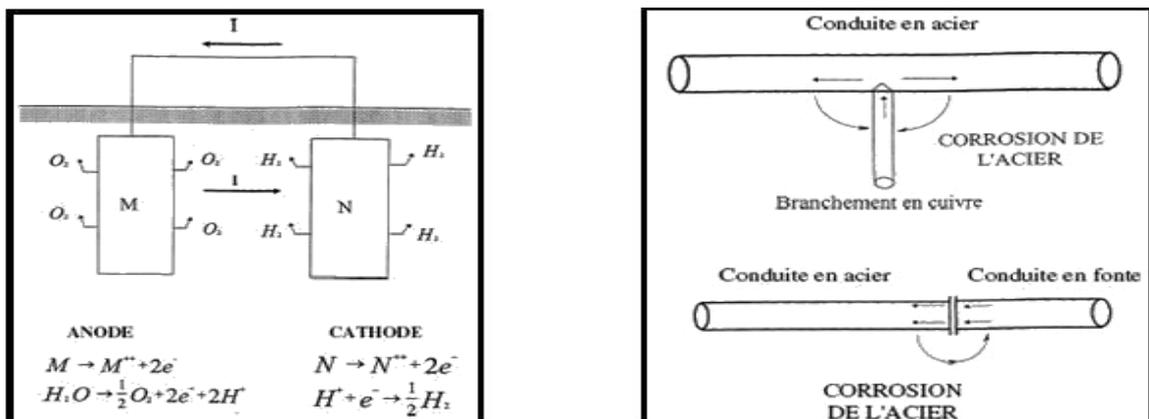


Figure I.9 : Piles dues à couplage galvanique

C) Piles dues à l'aération différentielle :

Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement. C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts.

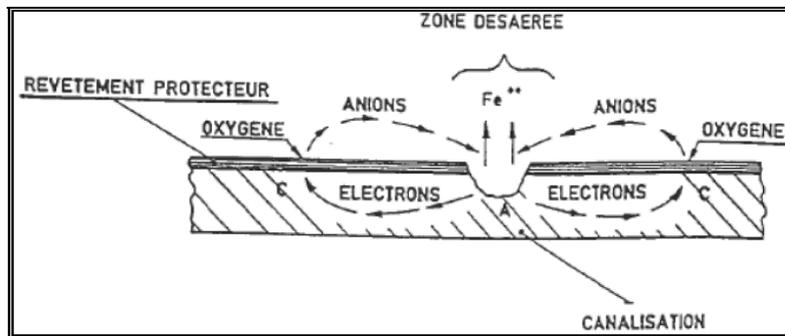


Figure I.10 : Piles dues à l'aération différentielles

I.4.2.2) Corrosion par érosion (par cavitation) :

Le risque d'apparition de ces phénomènes peut être diminué par une conception appropriée des canalisations véhiculant des fluides à vitesse élevée. On évitera en particulier les variations brutales de section créant des zones de turbulence ou les changements brusques de direction.



Figure I.11 : Corrosion dues à l'érosion

I.4.2.3) Corrosion sous contrainte :

Pour une même sollicitation globale appliquée, la distribution des contraintes dans une pièce peut dépendre de sa géométrie. Dans un milieu corrosif, des fissures sous forme transgranulaire ou intergranulaire apparaissent et se propagent

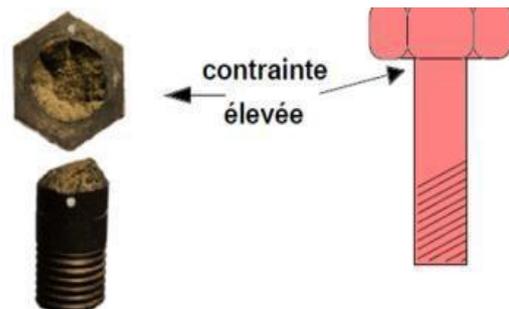


Figure I.12 : Corrosion sous contrainte

très vite et affectent la résistance de métal, favorisant ainsi la fatigue du métal.

I.4.2.4) La corrosion bactérienne :

Comme son nom l'indique, certaines bactéries peuvent corroder les conduites métalliques. Ces bactéries sont surtout les bactéries anaérobies réductrices de sulfates. Ces dernières se développent sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des sites de la conduite qui sont faiblement aérés.



Figure I.13 : La corrosion bactérienne

I.4.2.5) Corrosion par courant vagabond :

Dans les sols, on a souvent affaire à des courants vagabonds. Tout écoulement de courant continu dans le sol, ligne de traction avec retour par les rails (tramways, métro), usines électrochimiques comportant des cuves à électrolyse, etc..., peut alors être cause de corrosion importante. En effet, ces courants empruntent dans le sol des chemins de moindre résistance électrique, canalisations par exemple, créant sur un même matériau des zones à des potentiels électrochimiques différents. Les surfaces par où entrent les courants vagabonds sont plus électronégatives que le sol. Ces courants apportent des électrons à l'interface métal/sol où il se produit une réduction; les surfaces par où sortent les courants sont devenues plus électropositives que le sol; à cet endroit une corrosion du métal se produira inévitablement.

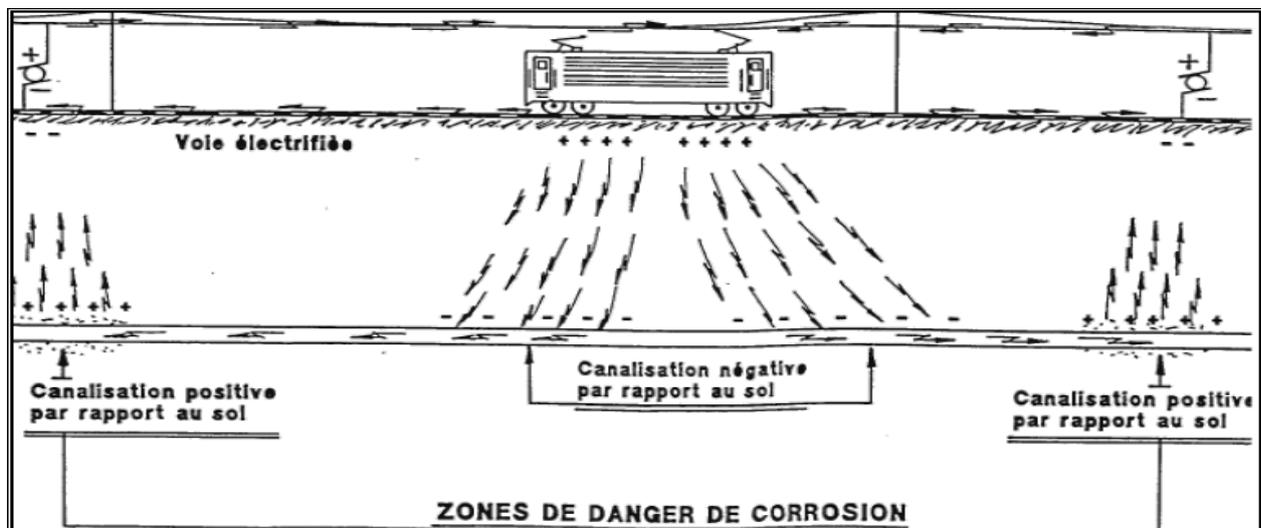


Figure I.14 : Corrosion par courant vagabond

I.4.3) Énumération des défauts de revêtement :

Différents types de défauts de revêtement sont observés sur les canalisations. Leurs origines et conséquences sont diverses, et peuvent dans certains cas conduire à une corrosion :

I.4.3.1) Porosité :

Le matériau du revêtement présente une porosité intrinsèque qui permet l'arrivée d'éléments potentiellement corrosifs à la surface du métal, (eau, oxygène, CO₂,...)

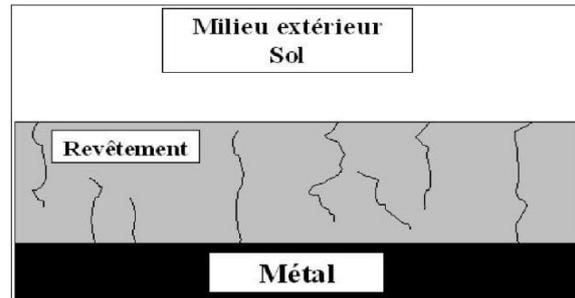


Figure I.15 : La Porosité sur le revêtement

I.4.3.2) Défaut ouvert :

Ce type de défaut est une lacune de revêtement, mettant le métal directement en contact avec le milieu électrolytique. La protection cathodique dans ces conditions sera efficace tant qu'il y aura continuité électrique. On pourra distinguer pour ce type de défaut une taille "critique", et dépendante de la conductivité du milieu extérieur, en dessous de laquelle les courants de protection ne seront plus efficaces car la résistance intrinsèque du défaut sera trop importante.

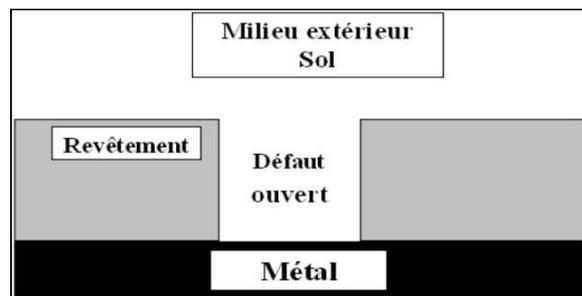


Figure I.16 : Défaut ouvert du revêtement

I.4.3.3) Défaut avec écran :

Un obstacle non conducteur, typiquement une pierre, a créé le défaut et reste enfiché dans le revêtement. L'espace libre entre la pierre et le revêtement peut entraîner une chute ohmique empêchant les courants de PC de protéger le métal (effet d'écran) mais laisser passer des produits potentiellement corrosifs (oxygène, eau,...). Il peut aussi se créer une pile d'aération différentielle entre le point de contact de la pierre (anodique) et la partie au contact de l'électrolyte aéré (cathodique).

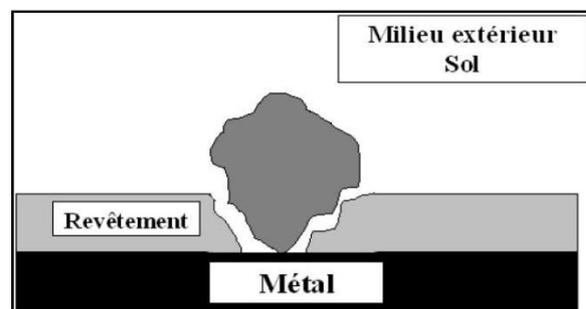


Figure I.17 : Défaut avec écran du revêtement

I.4.3.4) Défaut ouvert avec décollement du revêtement :

Souvent conséquence d'un vieillissement d'un trou existant, ou résultant d'un défaut d'application. On parlera de trou "unique débouchant" dans le cas d'un décollement présentant une seule ouverture sur le milieu extérieur. Les paramètres influents dans cette configuration sont la taille du défaut, la hauteur de l'interstice entre le métal et le revêtement, et la surface de métal mis à nu.

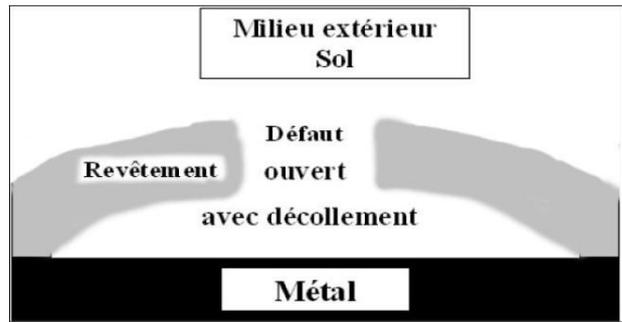


Figure I.18 : Défaut ouvert avec décollement du revêtement

I.4.3.5) Défauts ouverts communicants :

Plusieurs défauts ouverts proches les uns des autres peuvent finir par communiquer en raison du décollement du revêtement. Une circulation d'électrolyte peut alors s'instaurer.

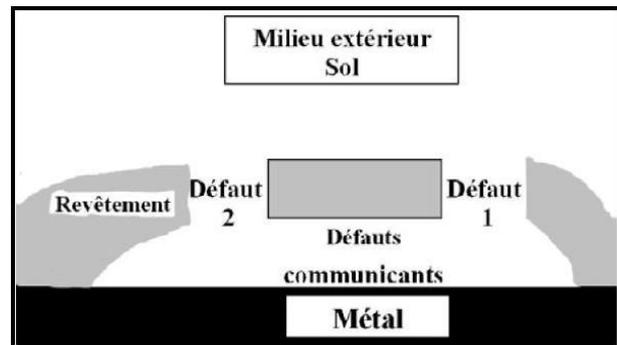


Figure I.19 : Défauts ouverts communicants du revêtement

I.4.4) Principes fondamentaux de l'électricité :

L'électricité dans un élément solide est définie par un flux continu d'électrons, ou de courant, d'un atome à un autre. Les électrons ne peuvent voyager qu'à travers un circuit métallique fermé dont la direction sera inverse à la direction conventionnelle du courant. La direction conventionnelle du courant passe du pôle positif au pôle négatif et est schématisée par le circuit de batterie de la figure suivante.

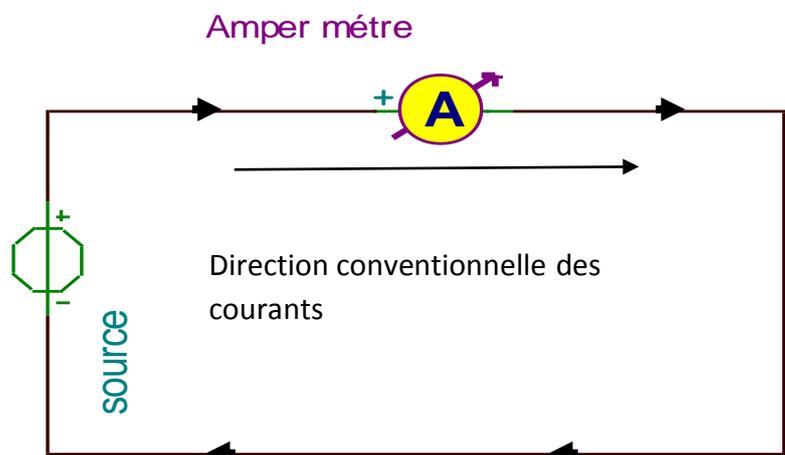


Figure I.20 : Principes fondamentaux de l'électricité

Chapitre II :
Moyens de lutte
contre la
corrosion

II.1) Introduction :

La protection d'un métal peut se faire à l'aide de différentes méthodes. Le marché propose une large variété de moyens de protection contre la corrosion, comportant une partie considérable, développée spécialement et destinée aux réseaux de transport pétrolier.

Il est important d'envisager de faire face à la corrosion pendant la conception d'une installation. Prévoir ce risque et y préparer des installations de protection permet d'un côté de contourner plusieurs problèmes notamment les accidents liés aux défaillances de corrosion et engendrant des dommages pour les employés, l'environnement et les structures. Et d'un autre, assurer une assez longue durée de vie aux équipements, et une production continue.

II.2) Critères et notions de base de la protection cathodique :**II.2.1) Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - Potentiel) :**

M. Pourbaix a établi pour la plupart des métaux des diagrammes pH-potentiel d'équilibre des réactions, qui décrivent les différentes réactions théoriques possibles entre un métal et ses ions en présence d'eau. Selon la solubilité des corps formés, il en a déduit des domaines théoriques de situation du métal.

Ainsi pour le fer on trouve :

Un domaine de corrosion où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles,

Un domaine de passivation où le fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant. C'est un domaine où le métal est protégé contre la solution, si le film a pu se former d'une manière uniforme, s'il reste adhérent, mécaniquement, rien ne vient le détruire.

Un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder, les réactions d'oxydation n'étant plus possibles. C'est le domaine de la protection cathodique.

Ces trois domaines et les conditions (pH et tension) qui les définissent peuvent être établis pour tous les métaux purs. Le diagramme du fer est montré sur la Figure II.1.

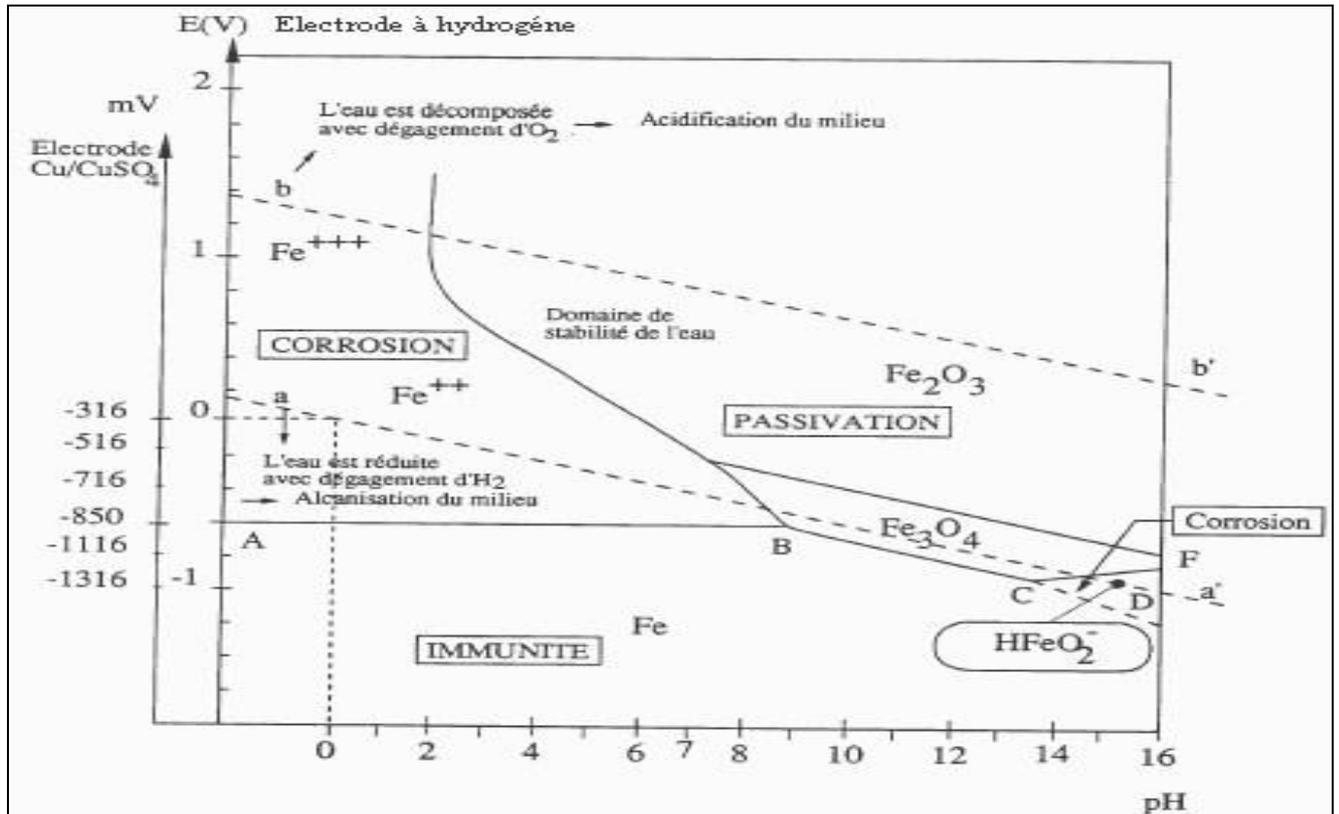


Figure II.1 : Diagramme de Pourbaix

II.2.2) Notions de chute ohmique ($I \cdot R$ Drop) :

La notion de chute ohmique ($I \cdot R$ Drop) est directement liée à la loi d'ohm. En effet, lorsqu'un courant voyage à travers une résistance, il se produit une chute de tension le long de l'élément du circuit qui est égal au courant (I) multiplié par la valeur de la résistance (R). Si le courant est stoppé, cette tension disparaît ou se rapproche de zéro.

Dans le cas de pipeline équipé d'une protection cathodique, la chute de tension qui nous intéresse correspond à celle incluse dans les mesures structure/électrolyte, qui se développe à la surface de la cathode par l'action de polarisation de la cellule de corrosion. Dans la mesure où le circuit est ouvert ou que la source de tension est stoppée, le courant tendra vers zéro et toutes les chutes de tensions auront tendance à disparaître à l'exception de celle développée par la réaction électrochimique de réduction se produisant à la cathode.

Ainsi, dans la mesure où une mesure de potentiel est prise immédiatement après l'arrêt du système, cette mesure de potentiel correspondra à une valeur dite « instant off » ou une lecture prise sans l'effet de la chute ohmique. Cette mesure est la plus précise quant à la vérification du potentiel de la structure elle-même et permet d'établir si la protection cathodique est efficace ou non afin de protéger la structure adéquatement. La figure suivante schématise les modifications de potentiel se produisant lorsque le courant est interrompu et qu'une mesure de potentiel « instant off » est réalisée.

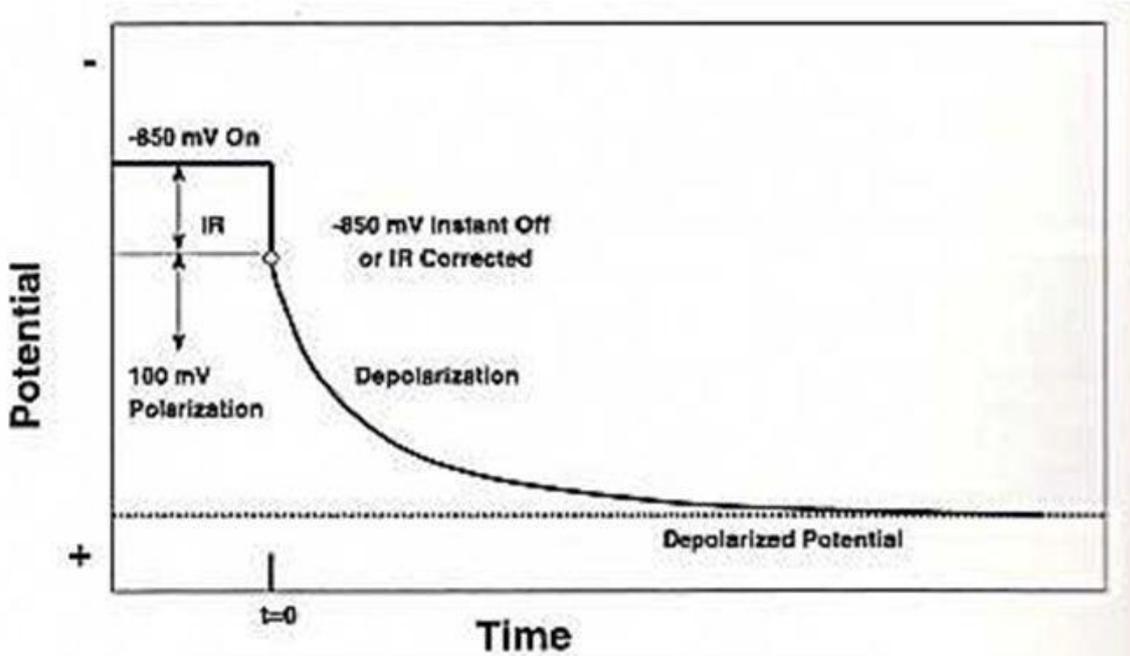


Figure II.2 : Mesure de potentiel structure / électrolyte

II.2.3) Potentiel de protection

Le critère le plus utilisé est celui de « Pourbaix » qui nous a permis d'admettre pour l'acier dans le sol, la valeur seuil d'immunité de (-850 mV) par rapport à l'électrode de référence (Cu/CuSO₄). Ce chiffre est retenu dans le document standard de (NACE) (National Association Corrosion Engineering). Si le potentiel d'un métal est égal ou inférieur au potentiel de protection E_{prot} , la vitesse de corrosion ne peut pour des raisons thermodynamiques dépasser une certaine valeur que l'on suppose négligeable. On peut donc protéger un métal en lui imposant un potentiel tel que :

$$E \leq E_{prot}$$

On définit le potentiel de protection E_{prot} par l'équation de NERNST suivante :

$$E_{prot} = E^0 + \left(\frac{R * T}{n * F}\right) * \ln(10^{-6})$$

Cette relation est prise pour une concentration d'ions métalliques dissoute de 10^{-6} mole/l (seuil de protection). Pour la température ambiante (25°C), elle devient :

$$E_{prot} = E^0 - \left(\frac{0.354}{n}\right)$$

On ne passe pas brutalement d'un état de corrosion à un état d'immunité par le simple franchissement de ce critère de protection de - 850 mV. L'expérience prouve qu'à cette valeur de - 850 mV, le taux de corrosion est suffisamment faible pour que ce potentiel soit considéré comme frontière du domaine d'immunité.

II.2.4) Densité de courant de protection :

La densité de courant nécessaire à l'obtention du seuil de protection est fonction du matériau à protéger et des paramètres physico-chimique de l'électrolyte au contact de celui-ci. Elle augmente quand le pH diminue, la teneur en oxygène dissous augmente ou la vitesse de circulation augmente. Le courant cathodique nécessaire pour imposer le potentiel de protection correspond au courant de protection I_{prot} dépend de la surface à protéger A et de la densité de courant de protection i_{prot} tel que montré dans l'équation suivante :

$$I_{\text{prot}} = i_{\text{prot}} * A$$

II.2.5) L'agressivité du sol :

L'agressivité du sol peut être définie comme étant la caractéristique du sol favorisant la corrosion, ou tout simplement la corrosivité du sol. Les paramètres suivants doivent être définis afin de parvenir à déterminer l'agressivité du sol :

1- Résistivité du sol : La résistivité du sol est inversement proportionnelle à la capacité du courant de corrosion et donc à l'activité de la corrosion.

2- pH : Le pH exprime la teneur en ions acidifiants dissous dans l'électrolyte (le sol) et indique l'aptitude d'un sol à être le siège de certaines réactions particulières influençant la corrosion. Un sol à faible pH indique un sol aux propriétés acides et un sol avec un pH élevé indique la présence de sels alcalins dans le sol.

3- Sulfures : La présence des sulfures indique l'existence de bactéries sulfato-réductrices. L'analyse considère les degrés de la réaction du catalyseur de l'échantillon du sol étudié (positif, trace ou aucune).

4- Potentiel d'oxydoréduction (Redox) : Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.

5- Humidité : Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion. L'analyse de l'humidité considère les conditions de drainage (excellente, moyenne, pauvre) plutôt que la teneur en eau effective de l'échantillon.

II.2.6) Résistivité du sol :

La faible résistivité du sol facilite le chemin parcouru par le courant de corrosion entre les zones anodiques et cathodiques d'une structure métallique enterrée dans un milieu conducteur comme celui-ci. Et c'est ce qui fait de la résistivité du sol un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion.

Le tableau suivant expose la corrosivité de certains sols selon leurs résistivités :

Plage de résistivité du sol ($\Omega.cm$)	Catégorie du sol
0-1500	Très corrosif
1500-3000	Corrosif
3000-5000	Moyennement corrosif
5000-10000	Faiblement corrosif
>10000	Peu corrosif

Figure II.3 : Tableau de la corrosivité de certains sols selon leurs résistivités

II.2.6.1) Méthode de mesure de la résistivité du sol :

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner. Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir d'autres résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables.

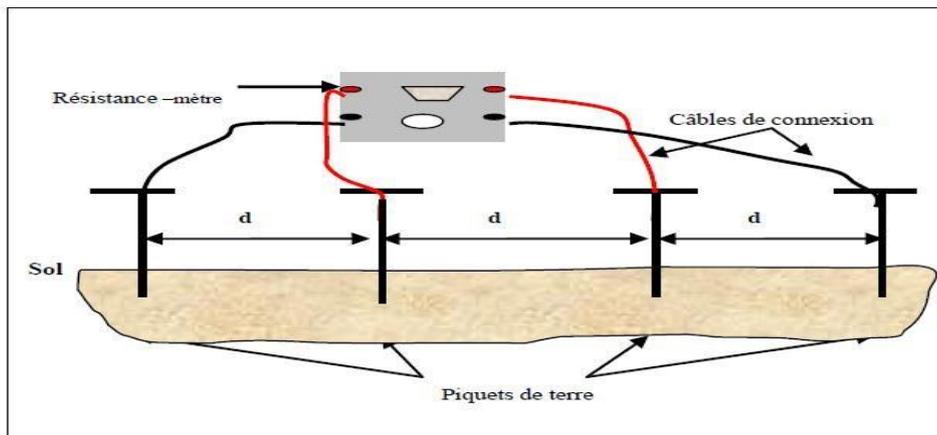


Figure II.4 : Méthode de Wenner de la mesure de la résistivité

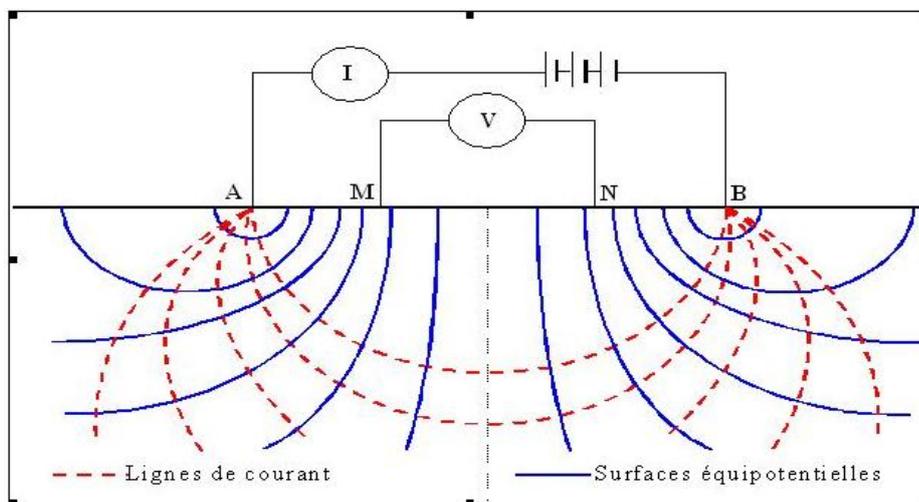


Figure II.5 : Schéma de la méthode des 4 piquets

Le principe est de faire circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et mesurer la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs. Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE permettent de calculer la résistivité du sol. Comme le sol n'est pas homogène, la valeur obtenue par la mesure ne correspond pas à la résistivité réelle du sol mais plutôt à une moyenne des résistivités des diverses couches le constituant. Ainsi, cette valeur est appelée la résistivité apparente. La résistivité moyenne du sol peut être déterminée à partir de la résistance mesurée par l'Ohm-mètre. Les quatre piquets de terre doivent être alignés suivant une distance égale pour être connectés par la suite avec des fils conducteurs aux bornes d'un ohm-mètre. La conception actuelle d'ohm-mètre utilisé permet de générer le courant à injecter, de mesurer le voltage et d'afficher la valeur de la résistance qui présente en fait la résistance moyenne du sol.

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule :

$$\rho = 2 \pi R d$$

Où :

ρ : résistivité moyenne du sol (Ω cm) ;

R : résistance moyenne du sol (Ω) ;

d : espacement entre deux piquets (cm).

Il est à noter que les relevés de résistivité du sol doivent être réalisés sous une profondeur constante. Il s'agit donc de l'exploration horizontale d'une surface de terrain d'épaisseur uniforme.

II.3) Prévention par choix des matériaux adéquats :

Le choix du métal à utiliser en industrie pétrolier dépend principalement de la structure qui en serait constituée et donc de la fonction à remplir, de toute sollicitation et contrainte possible, du produit pris en charge, des conditions de fonctionnement et de l'environnement de la structure en question.

Parlant de corrosion, aucun matériau n'y est parfaitement résistant, d'autant que la corrosivité ne dépend pas que du matériau, mais aussi du milieu dans lequel il se trouve. Chaque métal est défini par son propre potentiel de corrosion. Ainsi, les seuils de protection sont ajustés convenablement à chaque type de métal en fonction du milieu, comme le tableau II.6.

Métal	Domaines de protection préconisés dans le sol par rapport à l'électrode (Cu/Cu-SO ₄)
Acier et carbone : 1) Environnement aérobie 2) Environnement anaérobie	< -0.85 v < -0.95 v
Alliages cuivreux	< -0.50 v a -0.65 v
Aluminium	Entre -0.95 v et -1.20 v
Plomb	Entre -0.60 v et -1.50 v

Figure II.6 : Tableau des domaines de protection de différent métaux

Dans certaines situations, on opte pour l'utilisation d'alliages connus pour leur résistance à la corrosion en condition particulières.

II.4) La prévention par une forme adaptée de la pièce :

La tâche qu'une structure doit accomplir et les conditions de son fonctionnement ne sont prises en compte que dans le choix du matériau, mais aussi quand il s'agit de concevoir les éléments de la structure. Car, souvent, ces facteurs nous imposent des formes bien distinctes, à donner à nos pièces afin de leur procurer une meilleure résistance et une plus longue durée de vie.

Les cas les plus rencontrés en industrie pétrolière ont les suivants :

II.4.1) Eviter la formation des zones humides :

De façon générale la corrosion atmosphérique ne se produit qu'en présence d'humidité, cela dit en prévoyant un drainage plus ou moins parfait, en assurant une aération convenable et en empêchant l'humidité d'atteindre l'acier on évite l'accumulation de cette dernière et donc le risque de corrosion.

Plusieurs cas du genre sont rencontrés en industrie pétrolière, nous poussant à concevoir des pièces de forme adaptée aux fonctions citées précédemment. Par exemple :

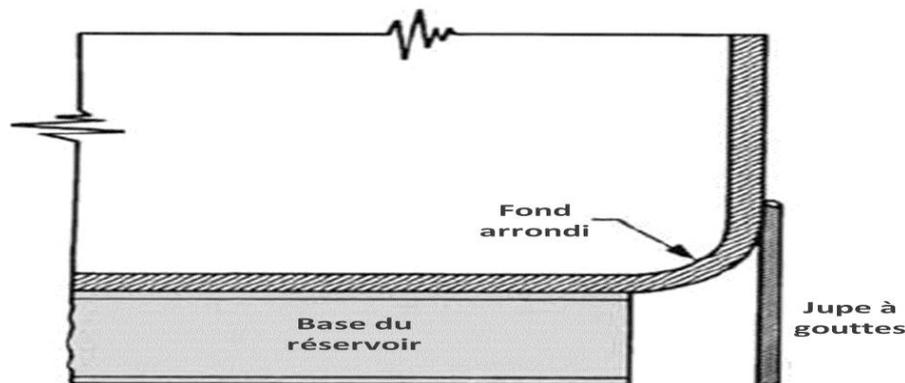


Figure II.7 : Forme permettant d'éviter l'accumulation des gouttelettes en bas des réservoirs

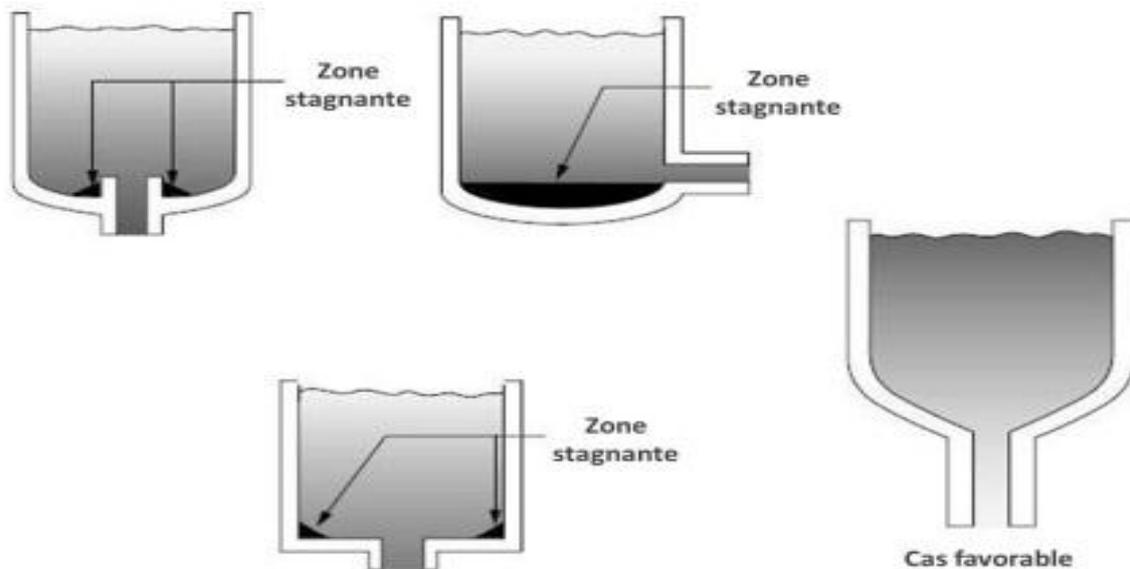


Figure II.8 : Forme de récipients, permettant un bon drainage et un meilleur vidage des récipients

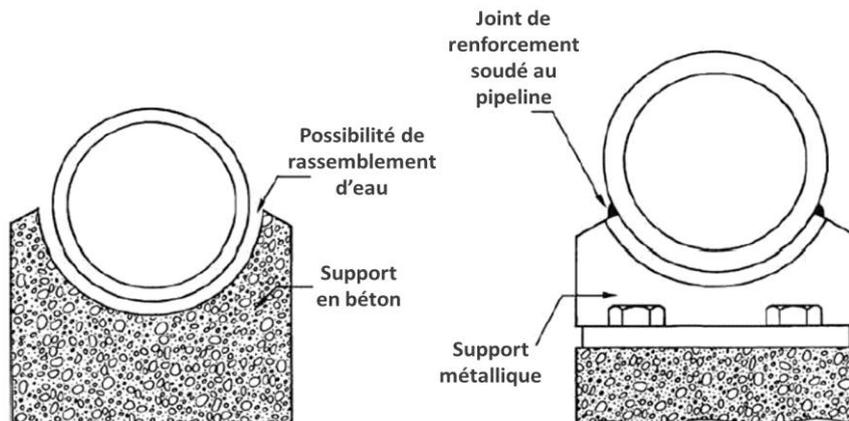


Figure II.9 : Forme permettant d'éviter l'accumulation d'humidité entre le pipeline et le support

II.4.2) Eviter le couplage galvanique :

Comme on l'a vu dans la pile due au couplage galvanique, une corrosion peut naître suite à un assemblage de métaux différents, à cause de leur différence de potentiels. Pourtant, parfois dans l'industrie pétrolière, pour des raisons de conception, on est dans l'obligation d'assembler des pièces de matériaux différents, par exemple c'est le cas des branchements des abonnées (conduite en cuivre) sur les réseaux de distribution urbaine de gaz (conduite en acier). Cela conduit les concepteurs à prévoir des solutions pour éviter la dégradation du métal le moins noble en utilisant l'une des formes suivantes :

-**Joint isolant**, dont le rôle est de couper le circuit électrique et d'empêcher toute circulation de courant à fin de protéger la partie anodique (le métal moins noble) :

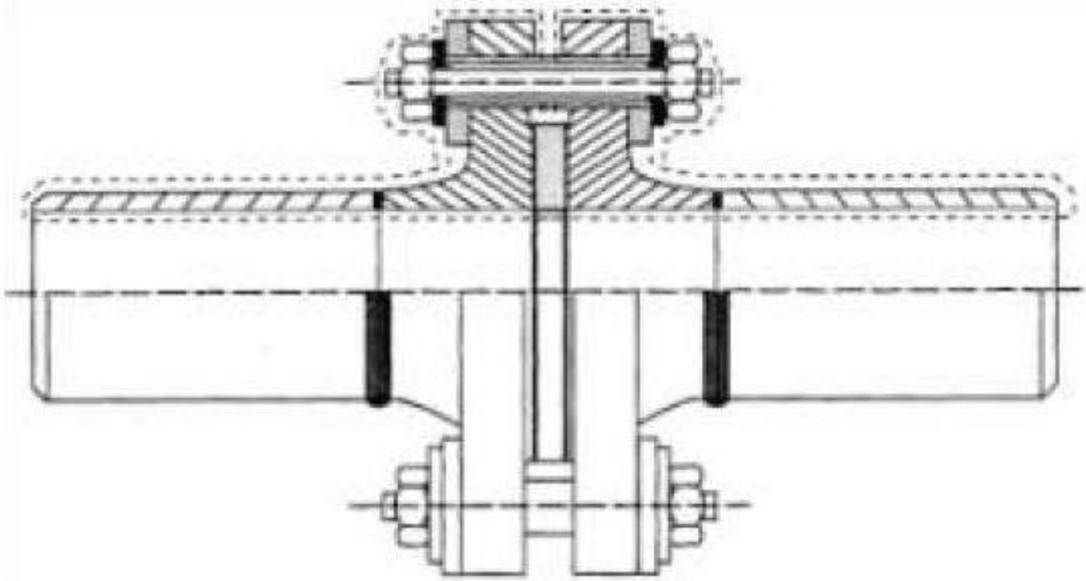


Figure II.10 : Installation d'un Joint isolant

- **Utilisation des pièces échangeables (sacrificielle)**, en installant une pièce que l'on sacrifie au profit de l'équipement qui devrait se corroder. Ainsi, c'est la pièce de rechange qui joue le rôle d'anode donc qui se corrode.

II.4.3) Eviter les cas d'érosion :

Généralement causés par l'écoulement du fluide, ce phénomène exige que nos pièces soient conçues de manière à gérer la grande vitesse d'écoulement et éviter les changements brusques de section et de direction. Les cas suivants sont les plus rencontrés :

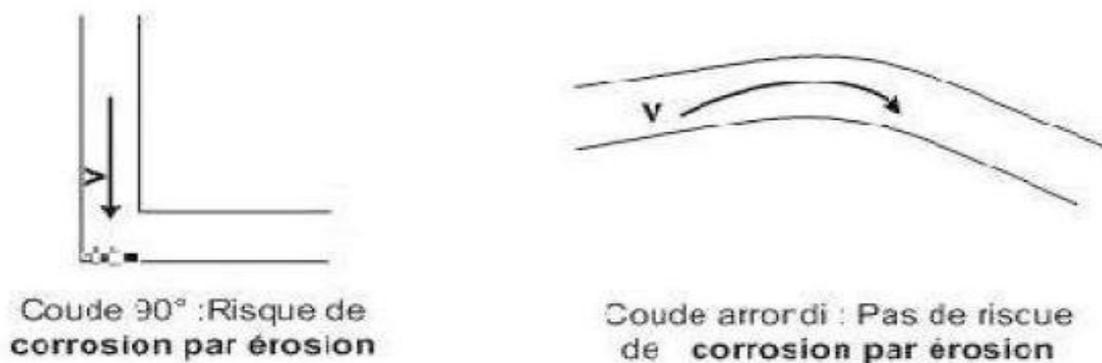


Figure II.11 : Changement de direction aux coudes



Figure II.12 : Changement de section influence la vitesse

II.4.4) Diminuer les risques de Cavitation :

Un phénomène qui se remarque particulièrement dans les extrémités des surfaces de contact entre les pièces, les recoins de la même pièce et les angles serrés des conduites. On y remédie par les méthodes suivantes :

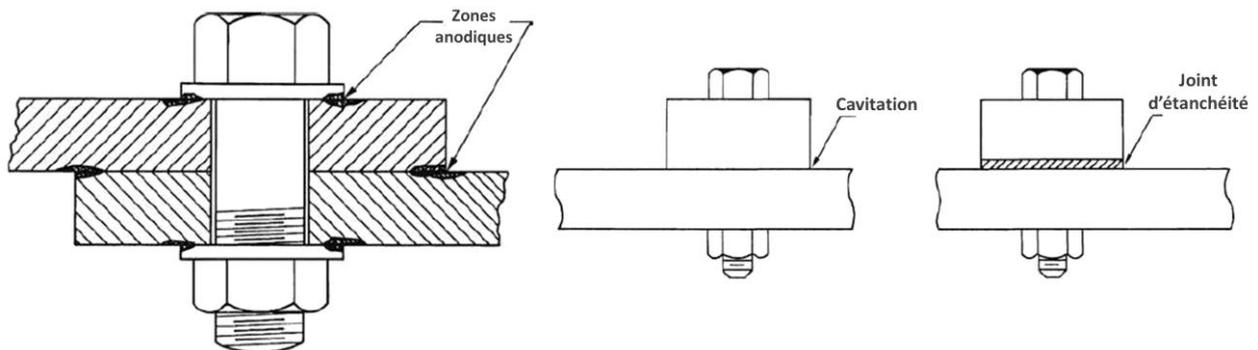


Figure II.13 : Installation de joints isolants là où il y a contact

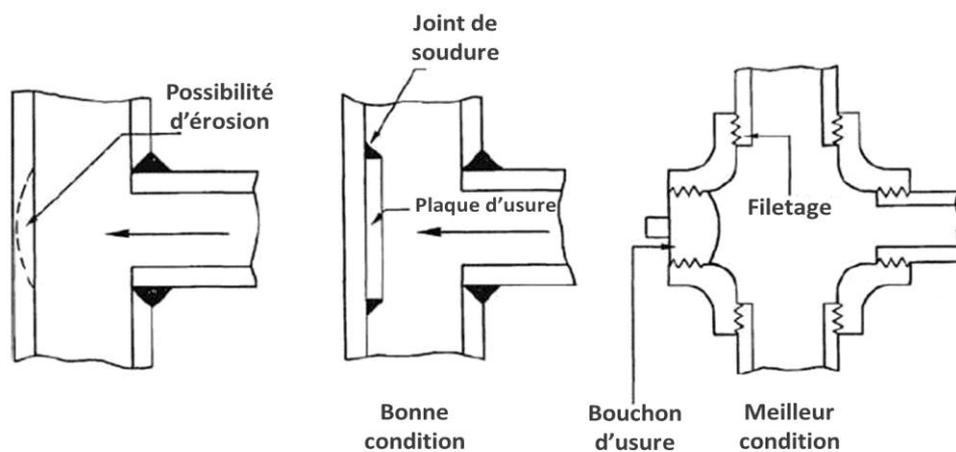


Figure II.14: Adoucissement des coins

II.4.5) Réduction des contraintes :

La géométrie des pièces joue le plus grand rôle dans la distribution des contraintes à travers toute sa surface, et cela pour une même sollicitation globale. C'est pourquoi, on doit lui donner une forme permettant une répartition des charges assez équilibrée.

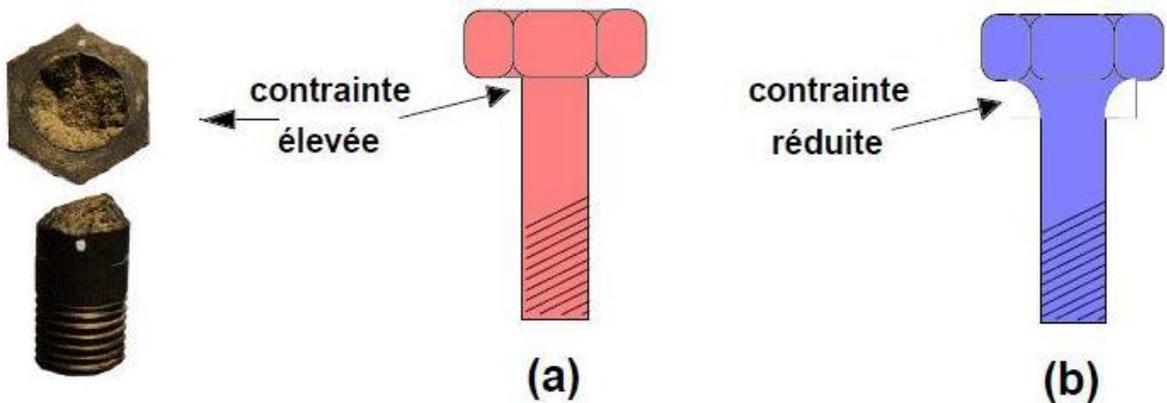


Figure II.15: La géométrie des pièces pour la réduction des contraintes

II.4.6) Formes et positionnement des joints de soudure :

En industrie pétrolière, on est le plus souvent exposé à des structures de grandes dimensions, et donc des structures composées de plusieurs parties. Ces parties sont reliées par des soudures réalisées avec le plus grand soin. Mais la précision n'étant pas suffisante, le plus important est que la soudure soit uniforme, homogène et qu'elle assure le plus de continuité possible avec la structure, ce qui a donné les formes de soudure suivant (fig. II.16).

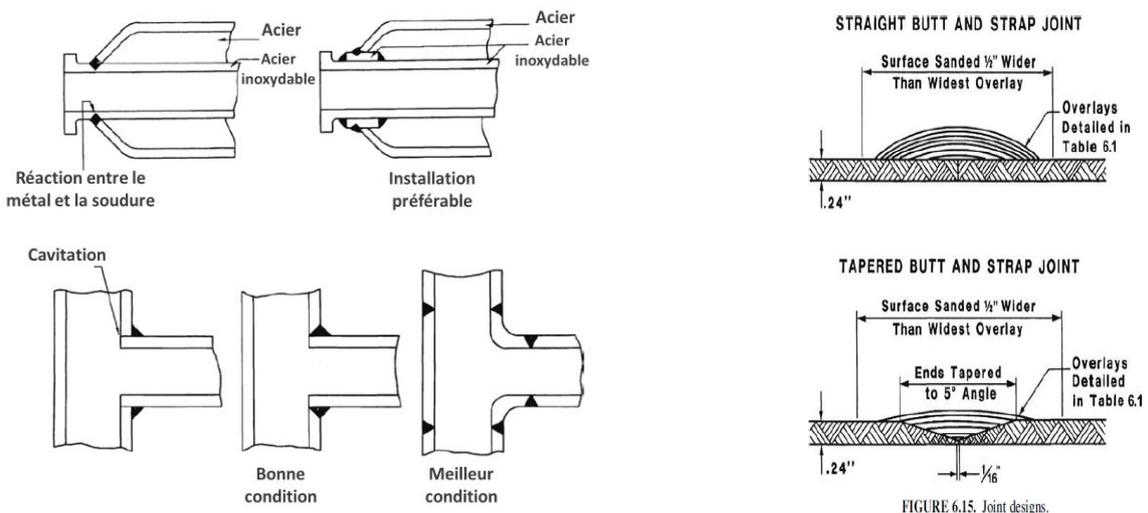


Figure II.16 : Formes et positionnement des joints de soudure

II.5) Protection par injection d'inhibiteur de corrosion :

Cette méthode n'est utilisée qu'en cas de prévention de corrosion interne des conduites métalliques. Ils sont injectés en de faibles quantités (faible concentration), de manière à équilibrer les réactions et ne pas altérer les propriétés du produit transporté.

Un écran passif, empêchant le processus de corrosion de se produire, est formé sur la paroi de la conduite à partir des interactions chimiques s'établissant entre l'inhibiteur et la surface du métal.

II.5.1) Types d'inhibiteurs :

En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distinguera donc les trois types suivants :

II.5.1.1) Inhibiteurs anodiques (passivant) :

Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur.

II.5.1.2) Inhibiteurs cathodiques :

Au contraire des précédents, l'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles suivant leur mode d'action

II.5.1.3) Inhibiteurs organiques :

Ils constituent un groupe important qui est difficile à classer dans les catégories précédentes car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface.

II.5.2) Autres fonctions des inhibiteurs :

En plus de leur fonction principale de complément de protection cathodique, les inhibiteurs de corrosion peuvent fonctionner autrement comme agent d'inhibition. Ils peuvent être injectés dans le liquide transporté pour ajuster son pH, récupérer la quantité d'oxygène dissout et neutraliser les espèces acides en solution. Finalement, ces fonctions ne sont pas loin de celle principale, car ces formes d'utilisation sont très pratiques et en même temps efficaces dans la lutte contre la corrosion.

II.6) Protection contre la corrosion par revêtement :

Le principe de ce type de protection est l'isolement électrique de la conduite par élimination de tout contacte directe avec le milieu environnant, ce qui nous permet d'anticiper toute formation des cellules de corrosion sur la surface du métal.

Ces revêtements épais (quelques millimètres) ont par ailleurs une fonction de protection mécanique du tube lors du remblai des fouilles, bien que ce ne soit pas le rôle principal. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré que la majorité des défauts de revêtement constatés sur les canalisations a été engendrée par des pierres tombées sur le tube ou ayant percé le revêtement.

II.6.1) Caractéristiques de base du revêtement :

Pour accomplir sa mission, un revêtement doit répondre à certaines caractéristiques de base, tel que :

- Présenter une résistance d'isolation électrique élevée en vue de s'opposer aux phénomènes électrochimiques se produisant entre la paroi de la canalisation.
- Etre suffisamment étanche à l'eau ainsi qu'à la vapeur d'eau afin d'empêcher la pénétration de toute trace d'humidité à travers le revêtement, ce qui compromettrait les performances d'isolement électrique.
- Avoir la meilleure inertie chimique, c'est-à-dire résister avec efficacité à l'action des corps chimiques se trouvant dans le milieu environnant.
- Etre insensible aux bactéries dont certaines peuvent endommager, voire détruire, le revêtement.
- Posséder la meilleure résistance mécanique, de façon à :
 - Supporter sans dommage les contraintes et sollicitations résultant des opérations de manutention (transport, stockage et pose).
 - Tenir aux déformations lors des épreuves hydrauliques.
 - Rester insensible aux mouvements du sol ainsi qu'aux actions du fluide transporté (température, vitesse, pression, surpression).
- Avoir une adhérence suffisante à la surface lui servant de support, ceci en vue d'éviter en cas de blessure le cheminement de l'humidité qui peut également se produire lors d'un mauvais mariage des zones de recouvrement du revêtement. L'adhérence dépend de facteurs tels que :
 - Etat de surface et propriétés intrinsèques du matériau.
 - Une bonne résistance aux chocs, pour limiter la détérioration du revêtement au cours de sa manipulation.
 - Une dureté convenable pour une gamme donnée de température.

-Une cohésion suffisante, lui permettant en extérieur de résister uniformément aux contraintes exercées par le sol sur la canalisation.

II.6.2) Autres fonctions des revêtements :

En plus de la fonction complémentaire à la protection électrochimique, les revêtements peuvent remplir les rôles suivants :

- Limiter la consommation de courant.
- Assurer une polarisation plus rapide.
- Assurer une portée de la protection cathodique dans des zones à géométrie complexe.
- Assurer une meilleure répartition du courant sur la structure.
- Réduire le coût global de protection.

II.6.3) Différents types de revêtements :

II.6.3.1) Les revêtements métalliques :

Ils sont le plus particulièrement utilisés comme revêtement contre la corrosion atmosphérique, pour acier. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme dans le cas des revêtements de chrome sur les robinets. En nous basant sur leurs compositions, on peut les répartir sur deux types de revêtements métalliques :

A) Les revêtements anodiques :

Un revêtement dont le métal constituant est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du couplage galvanique (exemple: revêtement de zinc), que nous avons déjà évoqué. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile galvanique locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. Donc la qualité de protection est fonction de la quantité de revêtement présente. En d'autres mots, la priorité, en question de protection va l'épaisseur du revêtement (et donc la quantité du métal constituant), avant l'absence des défauts. En général, l'épaisseur est comprise entre 100 et 200 μm .

B) Les revêtements cathodiques :

Un revêtement dont le métal constituant est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. L'effet, de la pile galvanique cette fois, est inversée en cas de défaut du revêtement. La pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la priorité est d'assurer une meilleure continuité du revêtement.

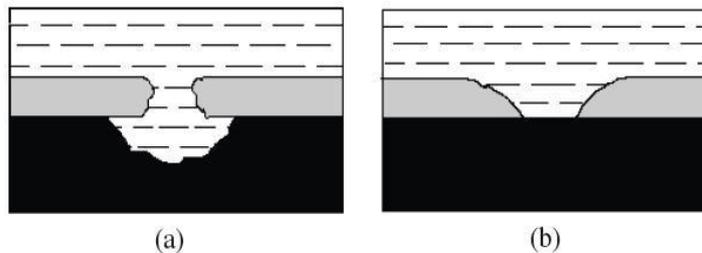


Figure II.17 : Forme du revêtement cathodique

II.6.3.2) Les revêtements organiques :

Le principe de ce type de revêtements est la formation d'une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. On distingue parmi ces revêtements :

- A) Les peintures et vernis
- B) Les bitume
- C) Les revêtements polymériques

II.6.3.3) Revêtements inorganiques non métalliques :

Les revêtements inorganiques non métalliques sont de deux types :

A) Les couches de conversion

Ces couches sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi ; elles contiennent donc toujours des ions provenant du substrat.

B) Les couches étrangères au substrat

Parmi les revêtements inorganiques non métalliques étrangers au substrat, il y a :

- Ceux plus nobles que le substrat,
- Les émaux,
- Les ciments,
- Les céramiques réfractaires.

II.6.4) Différentes techniques de pose des revêtements métalliques :

- L'électrodéposition (galvanoplastie),
- Immersion dans un métal liquide (galvanisation),
- La déposition chimique,
- La déposition par projection au pistolet,
- La déposition par phase gazeuse (PVD, CVD).

II.6.5) Vieillessement et dégradation du revêtement :

Les revêtements hydrocarbonés sont susceptibles de perdre leurs propriétés d'isolant électrique et de barrière physico-chimique selon plusieurs mécanismes. Ces modes de vieillissement sont principalement, une dégradation des propriétés intrinsèques du matériau constitutif ou une décohésion des interfaces matériau/renfort ou matériau/métal. Généralement, les facteurs les plus importants dans la dégradation des revêtements, quel que soit le matériau de base, sont ceux liés aux conditions de pose. Des défauts imputables à des conditions d'application inappropriées. On citera par exemple que les matériaux organiques perdent leurs propriétés de stabilité dans le temps si la température est trop élevée au moment de l'application, Ou encore que l'état de surface de l'acier au moment de la pose du revêtement est un des points clés pour obtenir de bonnes propriétés anticorrosion. Ces deux conditions (température, état de surface) étaient difficilement contrôlables sur le terrain. D'une manière générale, nous pouvons différencier deux phénomènes pouvant induire une dégradation des propriétés physico-chimiques des matériaux constitutifs, et par conséquent du revêtement lui-même. Il existe deux cas principaux qui peuvent conduire à des effets de décollement du revêtement Protecteur, précurseurs de la corrosion :

1. L'existence d'un défaut physique macroscopique du revêtement qui met localement à nu le métal en contact direct avec le milieu extérieur (défauts apparus lors de la fabrication, de la pose ou de l'exploitation de la canalisation).

2. La pénétration lente de la vapeur d'eau, de gaz corrosifs (oxygène, gaz carbonique) ou d'ions au travers du matériau (vieillessement physico-chimique du matériau), depuis la surface externe jusqu'à l'interface avec le métal. Ces deux types de configurations sont susceptibles d'engendrer localement un endommagement du métal par corrosion. Le premier est un vieillissement physique dû à l'absorption d'eau pouvant entraîner un gonflement et des contraintes mécaniques internes fragilisant l'interface acier/revêtement. Le second est un vieillissement chimique dû à des réactions entre des molécules de polymère et d'eau entraînant une hydrolyse des chaînes moléculaires. Généralement, ces deux phénomènes sont supposés être thermoactifs (dans les limites de respect des propriétés physiques du matériau).

II.6.6) Revêtement des soudures sur chantier :

L'isolation des soudures sur chantier devrait être entreprise immédiatement après leur contrôle. Le choix du type de bandes ou de matières plastiques thermo-rétractables le mieux adapté pour chaque cas d'application n'est pas toujours facile

La qualité du matériau devrait être au moins égale à celle du revêtement de tube. De plus, la mise en œuvre des systèmes de protection doit pouvoir s'effectuer facilement. Les systèmes courants utilisés aujourd'hui se composent de combinaisons de divers matériaux choisis en vue de conférer au revêtement une résistance suffisante au choc et à la déformation ; parmi ces systèmes, le choix peut se porter sur :

- bandes de bitume
- bandes de matière plastique sans couche intercalaire (caoutchouc butyle)
- bandes de matière plastique à deux couches renforcées par une feuille de polyéthylène enduite de caoutchouc butyle
- bandes de matière plastique avec couches intercalaire (3 couches renforcées par des feuilles de PE enduites des 2 côtés de caoutchouc butyle)
- matériaux thermo-rétractables selon les applications, ces systèmes peuvent être combinés sur la base des recommandations du fabricant en vue de répondre aux exigences posées

II.6.7) Contrôles du revêtement :

Après avoir terminé les travaux de revêtement sur le chantier, le revêtement doit être examiné, avec un appareil à haute tension (balai électrique), pour localiser les défauts dans le revêtement. On prend le soin d'effectuer ce contrôle peu avant la pose des tronçons de conduite dans la fouille, et exclusivement sur revêtement sec.

A cet effet il faut s'assurer que la sonde ait un contact permanent avec le revêtement de la section de mesure. Lors de cet essai, il y'a lieu d'attacher une importance spécial à l'état impeccable du matériel, ainsi qu'à sa sécurité de fonctionnement. La tension d'essai de 5KV/mm (épaisseur de couche). D'éventuelles détériorations doivent être repérées et immédiatement réparées selon prescriptions du fournisseur du revêtement.

Après la pose, il faut s'assurer qu'aucune détérioration du revêtement ne se soit produite par frottement contre les parois de la tranchée (écorchures), spécialement sur les parties latérales.

II.7) Protection contre les courants vagabonds :

Appelés ainsi parce qu'ils sont variables dans leur intensité, leur direction et le trajet qu'ils parcourent. Ces courants sont surtout fréquents à proximité des voies ferrées, de métro et de tramways, et sont liés à des fuites électriques provenant de ces installations qui sont alimentées en courants continus, mal isolées par rapport au sol.

II.7.1) Danger des courants vagabonds :

Le danger que présente la circulation des courants vagabonds, pour les ouvrages avoisinant se situe dans les régions de passage de ces courants entre le métal et le sol. Ces passages de courant conduisent à la formation de deux cellules d'électrolyse à savoir, dans le sens de circulation du courant, rail/sol/conduite et conduite/sol/rail.

Dans le premier cas : la circulation des courants s'effectue du rail vers l'ouvrage. Cela ne présente aucun danger de corrosion, au contraire ils favorisent la réaction de réduction (zone cathodique), par contre c'est l'ouvrage qui sera détérioré.

Dans le deuxième cas : la circulation des courants s'effectue de l'ouvrage vers le rail. Ces sorties de courant de l'ouvrage présente localement un danger de corrosion. Leur effet est de rendre la zone anodique favorable à une réaction d'oxydation.

II.7.2) Lutte contre les courants vagabonds :

II.7.2.1) Les procédés "passifs" :

On compte trois catégories de protection "passives" :

--Les revêtements qui consistent à isoler les canalisations du sol : un bon revêtement empêche tout échange de courants.

--Les joints isolants offrent un moyen "passif" de limiter l'intensité des courants qui circulent dans une canalisation, en interrompant sa continuité électrique. Ils complètent les revêtements en isolant les canalisations des installations auxquelles elles sont raccordées.

--Les déversoirs de courant qui sont destinées à faciliter l'évacuation des courants ayant emprunté le chemin d'une canalisation.

II.7.2.2) Les procédés "actifs" :

Ils consistent à neutraliser les courants vagabonds qui ont déjà pénétré dans les ouvrages, soit en les restituant à la source émettrice, soit en leur superposant d'autres courants de signes contraires, qui neutralisent leur influence défavorable. Le principe consiste à canaliser les courants dans un circuit préférentiel établi volontairement entre la canalisation et la rail et non plus à travers le sol. Pour cela on réalise une liaison généralement polarisée, entre la conduite et la rail. Le point d'inversion de polarité est ramené au point de liaison. En général, on complète le montage en insérant dans le circuit un système de régulation afin de limiter le courant de transit qui peut être très important, ce dispositif s'appelle drainage de courant. Pendant la phase de drainage, le potentiel de la structure au pont de connexion du drainage varie dans le même sens que celui de la rail tel que montré sur les figure II.18 et II.29.

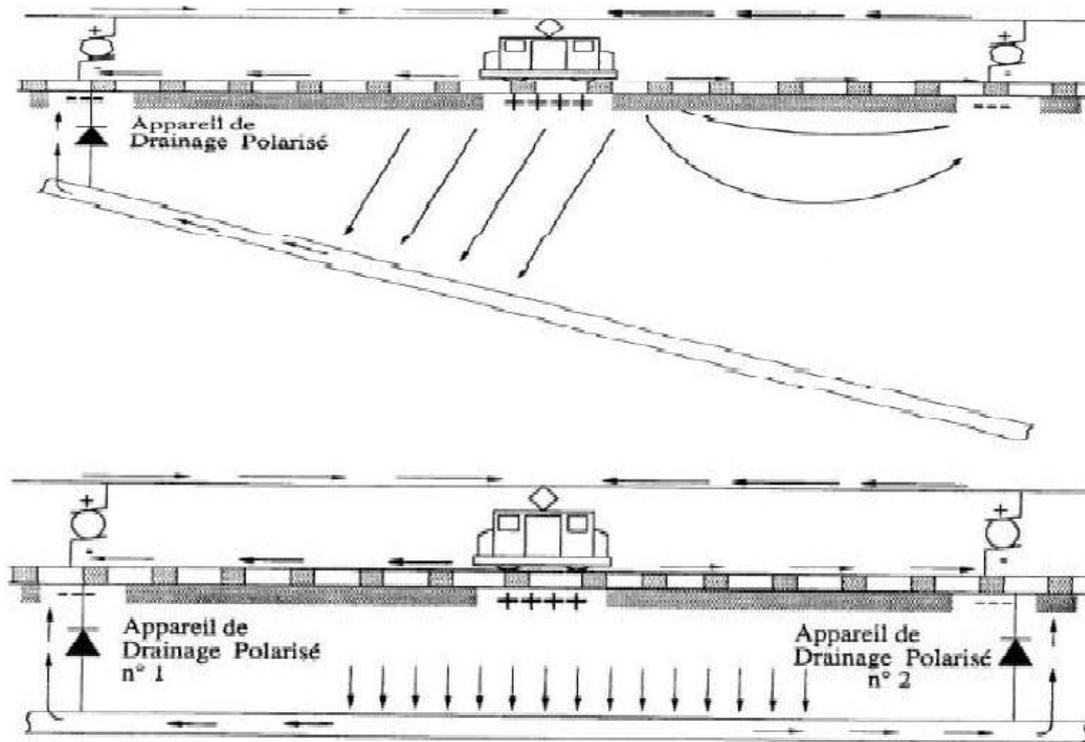


Figure II.18 : Protection active contre les courants vagabonds

Figure 4-15 Circuit d'un drainage polarisé
 1 rails 2 connexion inductive 3 fusible 4 diode
 5 résistance variable 6 conduite 7 électrode de référence

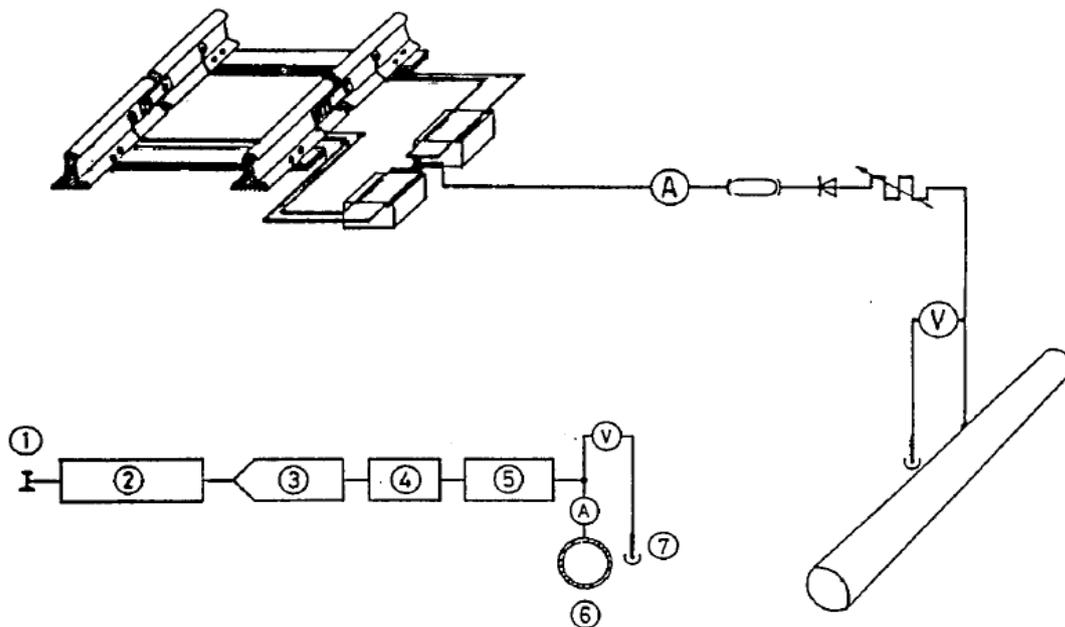


Figure II.19 : Circuit d'un drainage polarisé

II.8) La protection cathodique :

La mise en place d'un système de protection cathodique est actuellement considérée comme indispensable pour les structures métalliques en contact avec un milieu conducteur (électrolyte) en complément d'une protection organique (revêtement). Cette technique, basée sur des principes électrochimiques est développée sous deux modes différents (la Protection cathodique par anodes sacrificielles et la protection cathodique par courant imposé dit soutirage de courant). La protection cathodique consiste en l'abaissement du potentiel de la structure à protéger, à un niveau suffisamment bas, pour que la corrosion soit éliminée.

II.8.1) Principe de la protection cathodique :

Le principe de La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel électrochimique suffisamment « bas » pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable. Il faut pour cela fournir des électrons à l'interface métal/électrolyte. Cela induit un excès de charges négatives, d'où un abaissement du potentiel électrochimique du métal par rapport à l'électrolyte qui défavorise la réaction d'oxydation.

La cellule de corrosion peut se présenter en circuit électrique (figure à gauche). Ce circuit est principalement constitué d'une anode, d'une cathode, un conducteur du courant électrique et des résistances implantées en série. L'incorporation du système de protection cathodique au circuit d'une cellule de corrosion existante conduit à une modification des paramètres électriques du circuit préliminaire. Pour cela, il est indispensable de présenter un nouveau concept pour le circuit électrique qui est équivalent à l'ensemble du système (Cellule de corrosion - Système de protection cathodique) comme le montre la figure a droite.

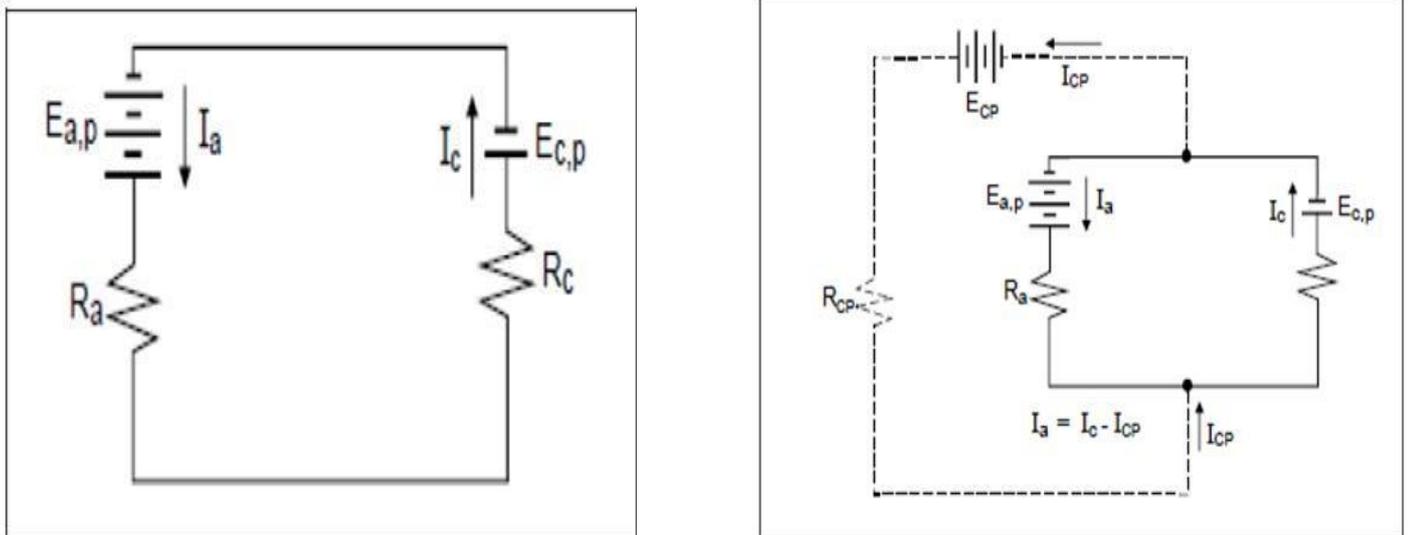


Figure II.20 : Circuit électrique du principe de la protection cathodique

I_c : Courant cathodique (A) ;
 R_a : Résistance anodique (Ω) ;
 R_c : Résistance cathodique (Ω) ;
 $E_{a,p}$: Potentiel de polarisation anodique (V) ;
 $E_{c,p}$: Potentiel de polarisation cathodique (V).

Selon la loi d'Ohm, le courant de corrosion (I_{corr}) présent dans le circuit d'une cellule simple de corrosion est déterminé par la formule suivante (NACE, 2007):

$$I_{corr} = (E_{a,p} - E_{c,p}) / (R_a + R_c)$$

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

Où :

I_{corr} : courant de corrosion (A);
 E_{cp} : potentiel de polarisation de la cathode (V);
 E_{ap} : potentiel de polarisation de l'anode (V);
 R_a : résistance de l'anode dans l'électrolyte (Ω);
 R_c : résistance de la cathode dans l'électrolyte (Ω);
 I_a : courant anodique (oxydation) (A);
 I_c : courant cathodique (réduction) (A).

Une fois que le système de protection cathodique incorporé, le courant fourni par ce système rejoint le circuit de la cellule de corrosion. Ainsi, les paramètres de courant (I_a) et (I_c) déterminés précédemment par la formule et ne sont plus valables. Selon le nouveau concept du circuit électrique du système intégral et en référence à la loi de Kirchhoff, le courant cathodique (I_c) est équivalent à la somme du courant anodique (I_a) et du courant de protection (I_{cp}) injecté par le système de protection cathodique.

$$I_c = I_a + I_{cp}$$

Ou

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

Où :

I_a : courant anodique (oxydation);
 I_c : courant cathodique (réduction);
 I_{cp} : courant de protection cathodique;
 $E_{c,p}$: potentiel de polarisation cathodique;
 E_{ap} : potentiel de polarisation anodique;
 E_{cp} : potentiel de protection cathodique.

D'après la formule ci-dessus, le courant de protection (I_{cp}) injecté dans le circuit de la cellule de corrosion réduit le courant de corrosion (I_{corr}) jusqu'à son élimination totale. Autrement dit, lorsque le courant I_{cp} augmente, la polarisation de la cathode augmente lors que la différence de potentiel ($E_{a,p} - E_{c,p}$) tend vers zéro.

On peut imaginer la possibilité de créer la circulation d'un courant électrique entre un métal et la solution qui l'entoure, circulation telle que le sens du courant passe de la solution vers le métal, et de favoriser ainsi la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion, en reportant la réaction d'oxydation sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation. C'est le principe de la protection cathodique. Plus explicitement sur La figure II.21, donne une représentation selon Evans du potentiel en fonction de l'intensité. On y voit que lorsque tout point de l'ouvrage aura atteint le potentiel E_p et comme E_p est inférieur à E_a , point de la courbe où le courant anodique est nul, il n'y a plus de réaction d'oxydations possibles, l'ensemble sera devenu une seule cathode annulant de ce fait le courant de corrosion (i_{corr}) par un courant de protection minimale ($I_{prot.min}$). On a alors réalisé la protection cathodique du métal. On peut abaisser l'ensemble à un potentiel plus bas que E_p avec un courant I_p . Il faut remarquer que le courant I_p est toujours supérieur au courant de corrosion I_{corr} et qu'il dépend des pentes respectives des courbes de l'anode et de la cathode. En contrepartie, il est nécessaire de fournir, par un système extérieur des électrons en quantité suffisante. Ce flux d'électrons est mesuré par l'intensité I_p Même si le principe se révèle simple, la mise en œuvre reste délicate aussi bien du point de vue dimensionnement (entre autres, action sur la masse anodique) que du point de vue vérification de l'efficacité (maintenance, monitoring, durée de vie).

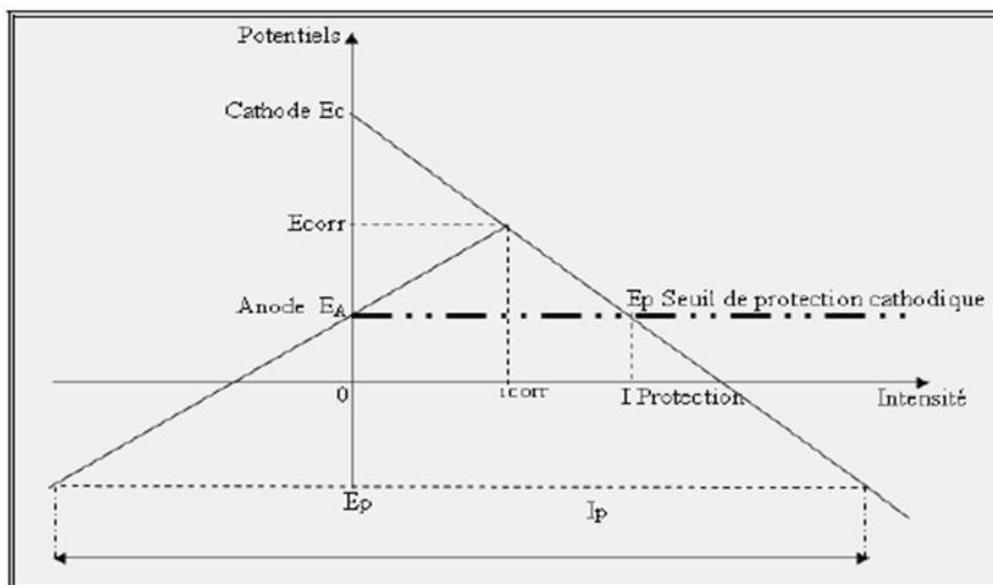


Figure II.21 : Diagramme du principe de la protection cathodique

II.8.2) Facteurs affectant la protection cathodique :

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

II.8.2.1) Insuffisance de continuité électrique :

L'insuffisance de la continuité électrique dans le système de protection cathodique se manifeste par :

- une faible conductibilité électrique de l'électrolyte ;
- la présence d'un revêtement qui inhibe le passage du courant de protection ;
- la présence des joints de raccordement non continus électriquement entre les différents éléments de l'ouvrage.

Ce manque de flux de courant se traduit par une insuffisance au niveau de la polarisation de la structure, ce qui crée des zones chaudes au niveau la structure (points de corrosion). Pour éviter que cela ne se produise il est donc nécessaire d'assurer la continuité électrique en tous points de la structure.

II.8.2.2) Perte d'adhérence des revêtements :

L'apparition du phénomène de décollement des revêtements provoqué par un excès de protection cathodique.

II.8.2.3) Influence des structures adjacentes :

La présence voisine des structures métalliques dans un électrolyte conducteur peut induire des interférences électriques défavorables sur la structure.

II.8.2.4) Influence des courants vagabonds :

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

II.8.3) Champs d'application de la protection cathodique :

II.8.3.1) Ouvrages au contact du sol :

- canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques.
- L'extérieur des cuvelages de puits (pétrole, gaz).
- Les réservoirs enterrés.
- Réservoirs (cylindriques, horizontaux ou sphères) de gaz liquéfiés inflammables comme le G.P.L.
- Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés.

-Réservoirs des stations-service les plus importantes.

II.8.3.2) Ouvrages immergés :

- Les installations offshore fixes et les navires,
- Les bouées et ouvrages portuaires

II.8.4) Les critères de protection cathodique :

En ce qui concerne la protection cathodique, les différentes normes nous donnent le choix entre 6 critères existants. Le tableau suivant présente les normes sur lesquelles on s'appuie et dont sont extraites les descriptions des 6 critères de PC.

Note : L'électrode de référence de type Cu/CuSO₄ (saturé) est couramment utilisée dans les milieux sol et par les transporteurs de gaz pour leurs mesures sur le terrain. Son potentiel est, à 25°C, égal à :

$$+0,316 \text{ V/ESH} = +0,075 \text{ V/ECS}$$

		Critères de protection cathodique					
		-850 v off/CuSO ₄	-850 v on/CuSO ₄	100 mV	Droite de Tafel	300 mV	Réseau de courant
Normes	NACE RP/SP0169	Critère mentionné depuis 1992	Critère mentionné	Critère mentionné	Critère exclu de la norme à partir de 1992		
	ISO 15589- 1 :2003	Critère mentionné		Critère mentionné comme critère palliatif			
	EN 12954 :200 1	Critère mentionné					
	A05- 655 :1994	Critère mentionné		Critère mentionné comme critère palliatif			
Justification utilisation		Scientifique et par retour d'expérience	par retour d'expérience				
		Europe	Amérique du Nord	Amérique du Nord	N'est plus utilisé	N'est plus utilisé	N'est plus utilisé

Figure II.22 : Tableau des critères de la protection cathodique

II.8.4.1) Le critère en polarisation des « -0,850 V off /Cu/CuSO4» :

a) Le principe :

-Selon la norme EN 12954 : 2001

Il consiste en un abaissement du potentiel électrochimique de l'acier par rapport à son potentiel naturel au minimum à une certaine valeur de potentiel, le potentiel de protection E_p . Ce potentiel de protection a pour valeur de base -0,850 V off/Cu/CuSO4 mais peut être ajusté en fonction des différentes conditions du milieu. Il peut s'agir de la granulométrie du sol, la résistivité du sol ainsi que du potentiel d'abandon (équivalent au terme « Potentiel naturel » du tableau) de l'acier selon le tableau II.24 :

Métal ou alliage	Milieu	Potentiel naturel E_n en V	Potentiel de protection E_p en V
Matériau ferreux ou non allié ou peu allié ayant une limite élastique $\leq 800 \text{ N/mm}^2$	Eau et sol en condition d'aérobiose	Conditions normales $T < 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-0.65 à 0.40
		$T > 60 \text{ }^\circ\text{C}$	-0.80 à -0.50
		Sol sableux aérés $100 < \rho < 1000 \text{ } \Omega.m$	-0.50 à -0.30
		Sol sableux aérés $\rho > 1000 \text{ } \Omega.m$	-0.40 à -0.20
	Eau et sol en condition d'anaérobiose		-0.80 à -0.65

Figure II.23 : Tableau des potentiels de protection et naturel

-Selon La norme ISO 15589-1 : 2003

Elle recommande également ces potentiels de protection et précise qu'en cas de présence de bactéries, il faut appliquer le potentiel de -0,950 V off/Cu/CuSO4.

-La norme NACE SP 0169-2007

Elle Propose uniquement la valeur de -0,850V off/Cu/CuSO4 quelle que soit la nature du sol et insiste sur la nécessité de mesurer la chute ohmique pour la bonne mise en application de ce critère.

b) Le domaine d'application :

- protection pour les aciers non ou faiblement alliés enterrés en milieu sol.

c) Les avantages :

- Prise en considération du phénomène de la chute ohmique.

d) les inconvénients :

Elle n'est pas définie pour certains sols. De plus, il n'y a aucun lien entre la vitesse de corrosion résiduelle et le potentiel de protection appliqué.

II.8.4.2) Le critère en polarisation des « -0,850 V on/Cu/CuSO₄ » :

a) le principe :

- Selon la norme NACE SP 0169-2007, il est possible d'adopter un critère de protection consistant à appliquer un potentiel inférieur ou égal à -0,850 V on/Cu/CuSO₄, en se référant à une mesure de potentiel sans qu'une correction de la chute ohmique ait nécessairement été réalisée.

b) le domaine d'application :

- la protection contre la corrosion des ouvrages enterrés.

c) les avantages :

- elle prend en compte la chute ohmique.

d) les inconvénients :

- Le critère des -0,850 V on/Cu/CuSO₄ est possible d'utilisation mais il repose sur une connaissance accrue des conditions environnementales. Il est probable que dans certains cas, ce critère suffise pour garantir des vitesses de corrosion négligeables. Mais des travaux PRCI ont montré que ce critère n'est pas valide dans nombre de situations. De plus il n'est pas cohérent avec la position des opérateurs européens de canalisations enterrées ni avec les principes de la norme EN 12954 : 2001, fondés sur des mesures de potentiel déduction faites des chutes ohmiques. Ce critère ne sera donc pas considéré dans la suite de notre étude.

II.8.4.3) Le critère en dépolarisation des 100 mV :

a) le principe :

- elle est décrit par la norme A05-655 : 1994 comme suit : « on doit mesurer une dépolarisation d'au moins 100 mV entre deux mesures de potentiel dont l'une effectuée dans la seconde suivant la coupure du courant de protection et l'autre à la fin de la dépolarisation ».

Pour vérifier sa bonne application, il est nécessaire de dépolariser la canalisation, c'est-à-dire de couper les courants cathodiques de protection.

b) le domaine d'application :

- La norme ISO 15589-1 :2003 précise que l'application de ce critère doit être évitée dans les zones de fortes températures, dans les sols pollués par des bactéries sulfato-réductrices ou s'il y a présence de courants vagabonds et/ou telluriques. Gummow rajoute que ce critère doit être utilisé dans des sols de teneur en eau supérieure à 5 % en masse par rapport au sol sec .

- De plus pour des ouvrages anciens sous PC.

c) les inconvénients :

- Le critère des « 100 mV » est difficile à mesurer du fait de la nécessité de dépolariser l'échantillon et le potentiel de dépolarisation peut être très long à obtenir et durant cette durée de dépolarisation la canalisation peut être soumise à des corrosions.

II.8.4.4) Le critère de polarisation des 300 mV :**a) le principe :**

Selon la norme A05-655 : 1994, le critère de polarisation est décrit comme suit : « un abaissement du potentiel d'au moins 300 mV doit être obtenu après l'application du courant de protection cathodique »

b) le domaine d'application :

- L'application de ce critère sur des structures non-revêtues dans des sols très aérés de forte résistivité est donc problématique car la chute ohmique est forte.

c) les inconvénients :

- ne prennent pas en compte la chute ohmique.

- Ce critère ne doit pas être utilisé dans les sols de résistivité élevée.

II.8.4.5) Le critère de « la droite de Tafel » :**a) le principe :**

- Ce critère repose sur l'enregistrement de la demi-courbe de polarisation, dans le domaine cathodique, de l'ouvrage dans son environnement. Cette courbe peut faire apparaître une portion linéaire, qui correspondrait au passage dans une zone de polarisation où le processus cathodique dominant est sous contrôle d'une étape de transfert de charge pur (i.e. tafélien). Au point où s'amorce cette droite correspond un courant (I_p) de protection à appliquer. Le couple de valeur (I_p, V_p) constitue le seuil de protection de la structure dans son état initial. Le

courant ainsi déterminé est supérieur au courant permanent qui sera finalement nécessaire après polarisation.

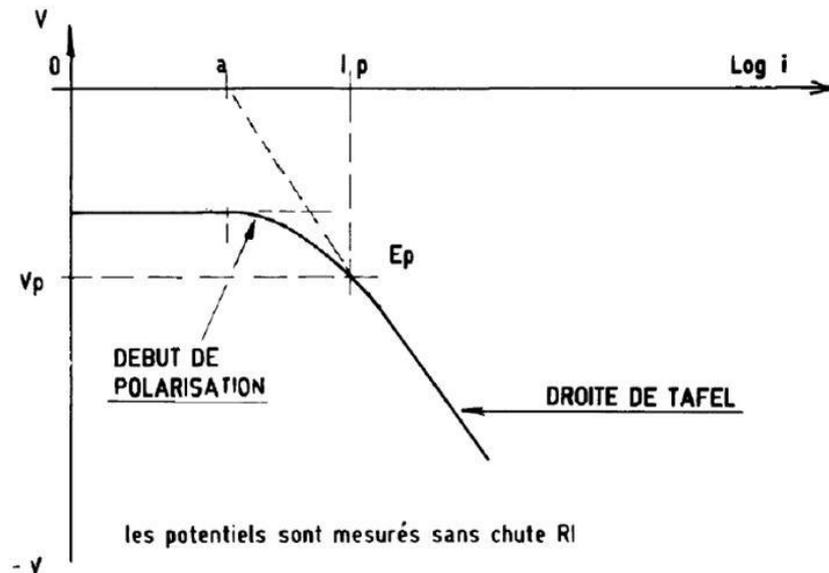


Figure II.24 : La droite de Tafel

b) les avantage :

- Ce critère est souvent considéré comme très précise car cette méthode requiert des mesures sur site et prend donc en compte les conditions particulières du terrain.

c) les inconvénients :

- difficiles à mettre en œuvre
- En revanche, la signification exacte du changement de pente est sujette à discussions et souvent ce critère est insuffisant pour protéger l'acier

II.8.4.6) Le critère du courant de protection en réseau :

a) le principe :

- C'est un critère « complet » et fondamentalement « correct », dans le sens qu'il ne peut y avoir de corrosion quand un flux de courant cathodique circule vers tous les sites anodiques.

b) le domaine d'application :

- les canalisations nues ou revêtues d'un revêtement très dégradé sur lesquelles s'exercent des macro-couplages galvaniques avec une individualisation et une localisation des zones anodiques parfaitement identifiées (courants vagabonds continus ou couplage entre une section ancienne nue et une section récente revêtue, par exemple).

c) les inconvénients :

- difficiles à mettre en œuvre.
- quand les sites de corrosion sont des petites cellules localisées, il n’y a pas de méthode pour mesurer le flux du courant net vers ces sites et donc ce critère n’a, dans ce cas, pas d’intérêt pratique.

II.8.5) les facteurs affectant les critères de la protection cathodique :

Les critères de la protection cathodique peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que :

- Température ;
- le PH
- Bactérie Sulfato-réductrice ;
- Courant alternatif (l’effet d’interférence) ;
- Type de métal (potentiel de corrosion) ;
- Métaux dissimilaires (potentiel mixte) ;
- Décollement de revêtement (excès de potentiel de protection) ;

II.8.6) Outils de mesure de protection cathodique :

II.8.6.1) Électrode de référence :

Plusieurs types d’électrodes de référence sont disponibles sur le marché. Cependant, l’électrode de référence la plus appropriée pour les relevés de potentiel à espace rapproché d’un pipeline enfoui dans le sol est une électrode de cuivre/sulfate de cuivre (Cu/CuSO₄ ou CSE). Cette électrode est composée d’une tige de cuivre plongée dans une solution saturée de sulfate de cuivre, le tout dans un cylindre fait d’un matériau non-conducteur dont l’extrémité est faite d’une céramique poreuse. La figure suivante schématise une électrode de référence de cuivre/sulfate de cuivre.

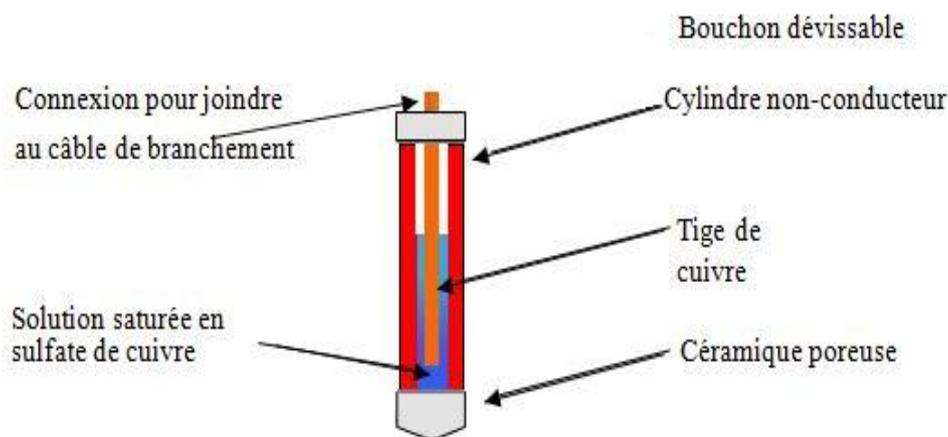


Figure II.25 : Electrode de référence

Electrode	Potentiel	
	Symbole	Valeur (mV)
Cuivre-Sulfate de cuivre saturée	CSE	+316
Argent-chlorure d'argent dans eau de mer	Ag/AgCl	+266
Calomel saturée	SCE	+242
Zinc dans remplissage de sulfate	ZSE	-800

Figure II.26 : Tableau des potentiels des différentes électrodes de référence

II.8.6.2) Multimètre :

La fonction de base du multimètre est la lecture des voltages (Mesure des potentiels), Mesure de courant et Mesure de résistances. Une attention particulière doit être portée aux branchements puisque plusieurs modes de lectures sont possibles.

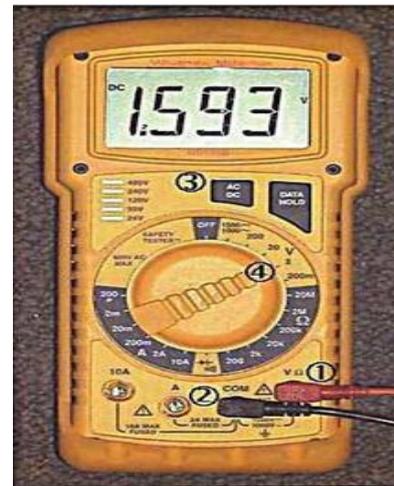


Figure II.27 : Multimètre

II.8.6.3) Interrupteur de courant :

L'interrupteur de courant permet la réalisation de mesures de potentiel en mode cyclique et est relié au redresseur de courant visé. En fait, un interrupteur est un commutateur permettant d'allumer et d'éteindre un redresseur de courant selon un cycle prédéfini par un moyen mécanique ou électrique. Il permet la mesure de potentiel dit instant Off et de prendre ainsi une mesure sans l'influence de la chute ohmique



Figure II.28 : Interrupteur de courant

II.8.7) les types de protection cathodique :

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée cathodiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continue

dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

- Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
- Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé. L'utilisation de l'un ou l'autre type d'anode est souvent justifié par les conditions environnementales (résistivité du sol, température, présence de bactéries, etc.) en plus des critères d'ordre économique tels que la conception de design, les spécifications des équipements et le mode d'installation ainsi que la maintenance et la consommation en matière d'énergie.

II.8.7.1) Protection par anodes sacrificielles :

La protection cathodique par anodes sacrificielles a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créée par l'association, dans un même électrolyte, de deux métaux différents : le métal à protéger et un métal moins noble qui constitue l'anode.

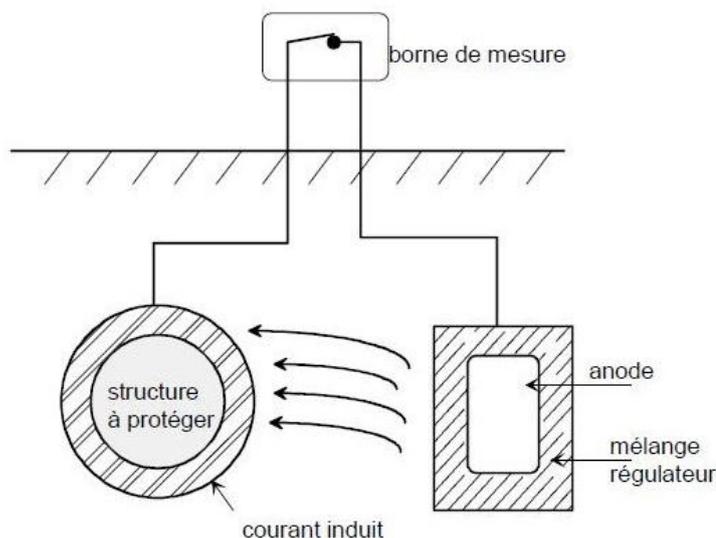


Figure II.29 : Protection par anodes sacrificielles

II.8.7.1.1) Principe :

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la figure II.30. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique. Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la

réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A.ans) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement. La loi de Faraday est exprimée par la formule suivante :

$$P = \left(\frac{M}{n * F} \right) * (I_{\text{corr}} * t)$$

Où :

P : masse de métal dissous;

M : masse molaire;

n : nombre d'électrons en jeux;

F : le nombre de Faraday;

I_{corr} : courant de corrosion et;

t : temps de consommation.

II.8.7.1.2) Installation :

Pour garantir cette protection, il faut que :

-L'anode soit reliée électriquement à l'acier.

-La surface à protéger et l'anode soient plongées toutes deux dans le même milieu corrosif.

-La surface à protéger soit du même côté que l'anode.

II.8.7.1.3) Caractéristiques des anodes :

Les caractéristiques suivantes devront être vérifiées :

-Degrés d'électronégativité, mesurés au moyen d'une électrode de référence, dans le milieu d'utilisation.

-Résistance à la passivation, dans les conditions d'emploi.

-Capacité exprimé en Ah/Kg : Cette valeur permettant de calculer leur durée de vie

-Degré de non nocivité pour le milieu ambiant.

II.8.7.1.4) Choix du matériau des anodes :

Les métaux les plus électronégatifs que l'acier, qui peuvent constituer une anode sont :

-L'aluminium est le moins coûteux et est surtout utilisé dans les milieux conducteurs renouvelés.

-Le zinc est également utilisé en milieux conducteurs mais il a l'avantage d'un fonctionnement plus sure en cas de faible sollicitation.

-Le magnésium possède le potentiel le plus actif et permet la protection dans les milieux les moins conducteurs.

Les caractéristiques de ces anodes sont regroupées dans le tableau suivant :

	Magnésium classique	Aluminium	Zinc
E^0/CuSO_4 (V)	-1.5	-1.28	-0.76
E_{corr} dans le sol (V)	-1.1 a -1.3	-0.6 a -1.9	-0.6 a -0.8
Potentiel par rapport à l'acier	-0.6	-0.3	-0.2
Capacité théorique (Ah/dm ³)	3840	8050	5840
Rendement (%)	50	80	90
Masse pouvant fournir 0.1 A pendant 10 ans (kg)	8	3.7	12

Figure II.30 : Tableau des caractéristiques des anodes

II.8.7.1.5) Durée de vie des anodes :

La durée de vie d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle est limitée par le temps de consommation du matériau composant l'anode et par le courant qu'elle délivre. Toutefois, le blocage électrochimique causé par la passivation de l'anode peut mettre fin au fonctionnement de cette dernière dont la durée usuelle est généralement estimée entre 10 à 15 ans. Cette période est déterminée lors du dimensionnement de design du système de protection qui prend en compte les paramètres de l'expérience.

II.8.7.1.6) Domaines d'application :

Pour la protection cathodique par anodes sacrificielles, on peut dire qu'on limité en matière d'application par l'espace plus ou moins rétréci de son efficacité, on peut l'appliquer par exemple dans :

- Les conduites de petites dimensions
- Les coques des navires
- Les réservoirs (surface ou enterrés)
- Les gaines des puits pétroliers
- Pompes et turbines
- Plateformes de petites dimensions

Elles sont souvent utilisées en eau de mer, qui est peu résistante (environ 0.3 Ω.m), et peuvent aussi être utiliser comme des mise à la terre tout en assurance la protection de l'ouvrage.

II.8.7.2) La protection cathodique par courant impose :

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et de conduites présentant un problème d'isolation. De même, certaines conditions environnementales peuvent parfois être à

l'origine de ce genre de problèmes. Devant des circonstances pareilles, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé.

II.8.7.2.1) Le principe :

La protection cathodique par courant imposé d'une structure métallique enterrée dans le sol repose principalement sur l'injection d'un courant continu à l'aide d'un générateur de courant.

Dans la protection cathodique par courant imposé, on relie les structures à protéger au pôle négatif du générateur à courant continu et le déversoir au pôle positif. Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi l'abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal. Par exemple, pour de l'acier dans un sol, la différence de potentiel (DDP) par rapport à l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850$ V en tous points de la structure.

Comme le montre la figure (II.32), le circuit d'un système de protection cathodique par courant imposé est constitué principalement des éléments suivants :

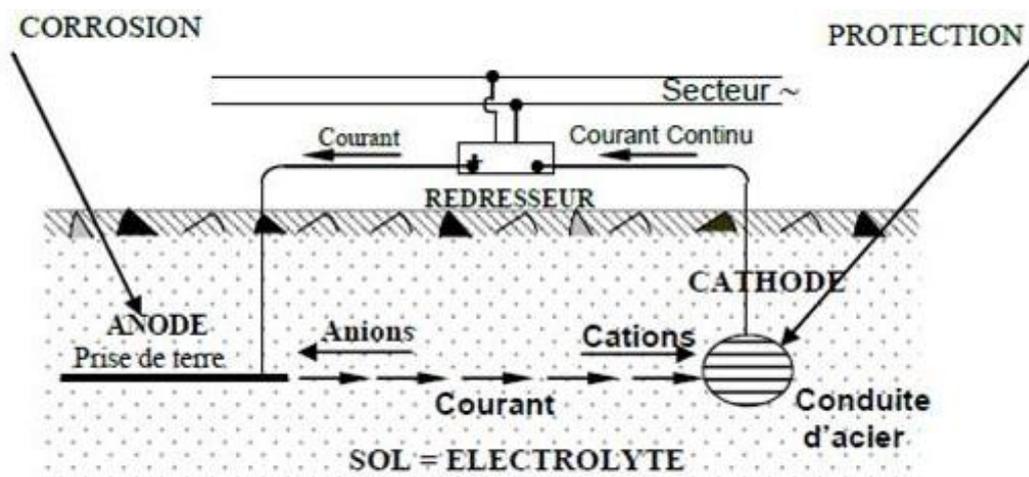


Figure II.31 : La protection cathodique par courant impose

II.8.7.2.2) Le domaine d'application :

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire a la protection est importante ou que la portée demandée est élevée :

- Conduites enterrées ou immergée, revêtues ou non ;
- Casings de forages ;
- Structure marines importantes (appontements, quais métalliques, plates-formes pétroliers, coques de navires, etc.) ;
- Réservoirs de stockage de grandes dimensions ;
- Ouvrages concentrés (stations de pompage ou de de compression, terminaux, etc.) ;
- Intérieur des capacités d'eau douce ;
- boites à eau d'échangeurs thermique ;

II.8.7.2.3) Le poste de soutirage :

Le poste de soutirage se compose surtout d'un transformateur-redresseur, du déversoir et des lignes de connexions entre la structure, le redresseur et le déversoir.

A) Le transformateur-redresseur :

Le transformateur-redresseur est conçu pour être utilisé avec un système de protection cathodique par courant imposé dans le but de fournir une sortie de courant continue variable qui peut être définie à un niveau afin de protéger la structure et empêcher la corrosion.



Figure II.32 : Le transformateur-redresseur

B) Le déversoir :

Le déversoir anodique est un système d'anodes entourées de backfill connecté à la borne positive de la source de courant continu, ces anodes peuvent être de forme et de dimensions très variables. Le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans. Les matériaux généralement utilisés pour la réalisation d'un déversoir sont récapitulés dans le tableau suivant.

Déversoir	Consommation (kg/A.an)	Milieu d'utilisation
Acier	9	- Tout types de sol -eau de mer -eau douce
Graphite	0.25 à 0.5	- Tout types de sol -eau de mer -eau douce
Ferro-Silicium	0.5	- Tout types de sol -Milieux liquide chlorurés -Milieux de faible résistivité
Magnétite	1.5 g/A.ans	- Tout types de sol -Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.ans	-milieux de faible résistivité

Figure II.33 : Tableau des caractéristiques des différents types de déversoirs

B.1) L'implantation du déversoir :

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

On distingue deux types d'emplacement :

a) -Déversoir anodique posé verticalement (puits anodique) :

Lorsque le terrain où doivent être posées les anodes est composé de couches superficielles à haute résistivité ou lorsqu'il existe à proximité des structures métalliques de tiers susceptibles de subir des influences, on préfère placer les anodes en profondeur, après forage du sol. Les déversoirs anodiques en profondeur présentent le très grand avantage d'occuper des surfaces plus large.

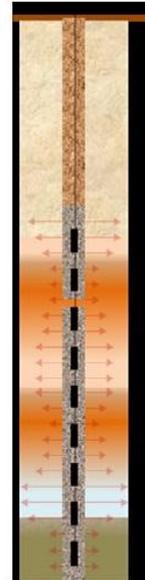


Figure II.34 : Puits anodique

b)-Déversoir anodique posé horizontalement (lit anodique) :

Ces déversoirs sont généralement placés dans un terrain ayant une résistivité suffisamment faible, ne dépassant pas 50 ohms m environ .ces déversoir devront être placés à une distance minimale de la canalisation à protéger, en fonction de l'intensité de courant nécessité.

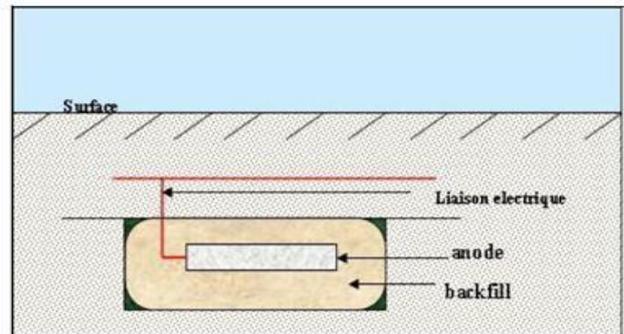


Figure II.35 : Lit anodique

B.2) Backfill :

Le backfill est un matériau à basse résistance, placé autour d'une anode enterrée pour augmenter l'aire réelle de contact avec le sol et pour maintenir un milieu constant autour des anodes.



Figure II.36 : Backfill

C) Les câbles de liaison :

La section des câbles est déterminée en fonction de la chute admissible et de l'échauffement. Pour des raisons de tenue mécanique une section minimale de 10 mm² est recommandée, la nature de l'isolant des câbles est déterminée en fonction du milieu. Dans beaucoup de cas un câble isolé en PVC est suffisant. Les bornes (+) et (-) sur l'appareil de soutirage et les câbles doivent être clairement repérées afin d'éviter des inversions qui provoqueraient la corrosion de la partie à protéger.

II.8.7.2.4) Facteurs qui influencent le niveau de la protection par courant imposé :

Les facteurs qui influencent le niveau de la protection cathodique par courant imposé, mis à part les erreurs du manipulateur, se traduisent par deux éléments principaux, à savoir :

a) Baisse du courant de protection cathodique :

Une baisse du courant de protection cathodique a pour conséquence une réduction de la polarisation à l'interface entre la conduite et le sol. Elle résulte le plus souvent de deux facteurs, soit :

a.1) Augmentation de la résistance du circuit :

Une résistance accrue du circuit, qui peut réduire l'ampleur du courant de protection cathodique dans un système de protection cathodique par courant imposé, provient soit du sol (En effet, l'augmentation de résistance peut provenir d'une masse de sol dont l'humidité a baissé) ou des connexions de câbles (l'augmentation de la résistance dans les câbles et connexions, elle est causée par la corrosion sur le circuit positif des systèmes à courant imposé, a causé des défauts de l'isolation sur le câble et par conséquent toute continuité électrique est perdue.

a.2) Défaillance à la source de courant :

S'il s'agit d'un système à courant imposé, il se peut que le redresseur de courant fonctionne mal, en raison entre autres d'un circuit ouvert, d'un court-circuit, d'une demi-ondulation causée par une panne de l'un des éléments redresseurs.

b) Dépolarisation de la conduite :

Tout facteur qui contribue à accélérer le transfert d'une charge à l'interface entre la conduite et le sol réduit le niveau de polarisation de la conduite, On peut donc s'attendre à une dépolarisation des conduites en cas de défaut de leur revêtement ou de leur isolation; de même, une aération accrue (du genre observé dans les sols à granulation brute) entraîne une dépolarisation, tout comme une baisse de pH du sol.

II.8.7.2.5) L'erreur de chute ohmique lors des mesures de potentiel :

Les potentiels fixés comme critères de protection sont ceux qui existent réellement à l'interface entre le matériau de l'ouvrage et l'électrolyte environnant. Pour effectuer ces mesures de potentiel, il est en général impossible de placer l'électrode de référence utilisée pour la mesure au contact intime du matériau et plus particulièrement aux défauts de son revêtement. La valeur de la chute ohmique (**produit de l'intensité du courant par la résistance électrique**) existant entre l'électrode de mesure et la surface dont on cherche à mesurer, le potentiel peut conduire à des erreurs de mesure de potentiel important dans les milieux peu conducteurs comme les sols, comme schématisé par la figure II.38.

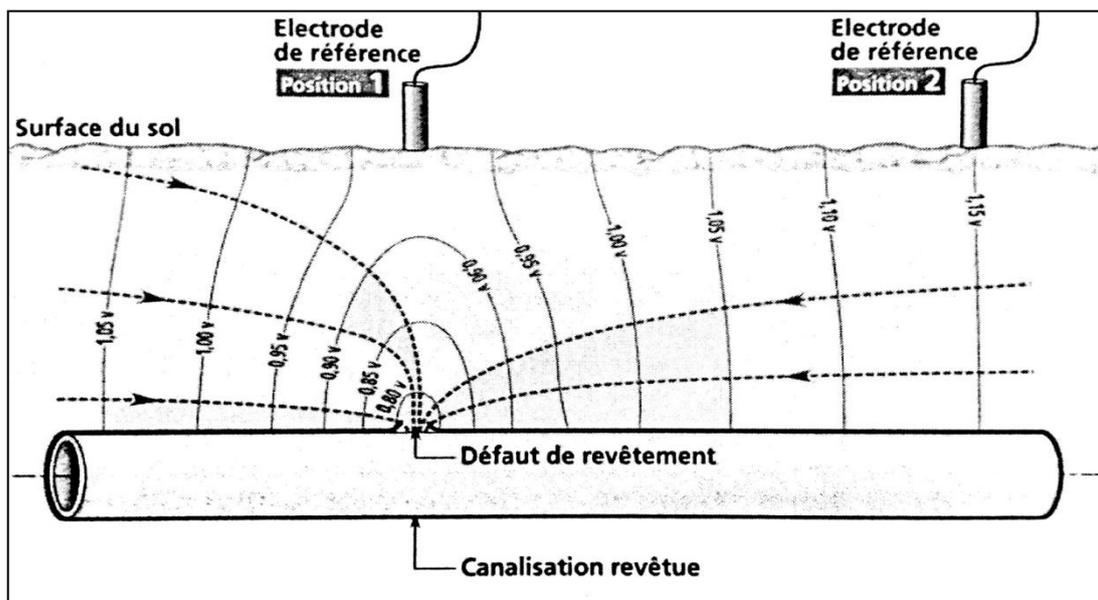


Figure II. 37 : L'erreur de chute ohmique lors des mesures de potentiel

II.8.7.2.6) Les différents sources d'alimentation des postes de soutirages :

a) Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. L'énergie Photovoltaïque stockée dans des accumulateurs convient à l'alimentation des systèmes établis dans des régions éloignées, comme cela est souvent le cas pour les postes de soutirage.

b) Groupes électrogènes :

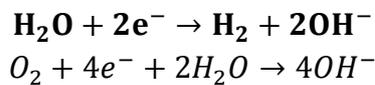
Les groupes électrogènes sont utilisés soit dans les zones que le réseau de distribution électrique ne dessert pas, soit pour pallier une éventuelle coupure d'alimentation électrique. Dans le deuxième cas, ils sont alors souvent utilisés en complément d'une alimentation sans interruption constituée d'une batterie d'accumulateurs qui alimente un onduleur. Ces dispositifs sont généralement utilisés pour assurer le fonctionnement des postes de soutirage en cas de coupure.

c) Les thermogénérateurs :

Ces générateurs utilisent le principe de la conversion d'énergie thermique en énergie électrique (principe du thermocouple) et permettent de disposer d'une force électromotrice aux bornes d'un module thermoélectrique à base de tellure de plomb, ou d'éléments semi-conducteurs. La source chaude est fournie par la combustion, avec flammes (1000°C) ou catalytique (250°C), de produits gazeux ou pétroliers. La source froide est assurée par l'air ambiant d'un convecteur. Ce générateur, par association en série ou en parallèle d'éléments, permet d'obtenir des puissances électriques de 100 à 200 Watt, avec des résistances de circuit de 1 à 50 Ω compatibles avec les postes de soutirages.

II.8.7.2.7) Effets de la protection cathodique sur les revêtements :

En présence d'une protection cathodique, la cinétique de la réaction anodique $F_e \rightarrow F_e^{2+} + 2e^-$ qui provoque la dissolution du métal est nettement ralentie, ce qui implique que la corrosion du métal est en définitive moindre voire négligeable. Simultanément, les réactions cathodiques sont favorisées:



Ce n'est donc que lorsqu'il existe un défaut macroscopique du revêtement que le processus de décollement est susceptible d'être endommageant pour le métal. La réaction cathodique produit des ions OH^- et du dihydrogène H_2 qui contribue le plus souvent à accélérer le décollement progressif du revêtement au voisinage du défaut. Pour certains auteurs, le phénomène de décollement est le résultat d'un processus électrochimique qui intervient à l'interface polymère/métal

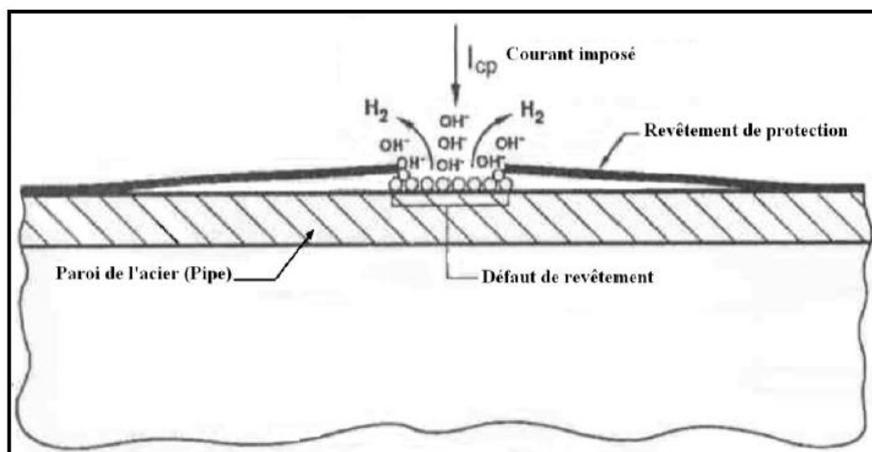


Figure II.38 : Décollement du revêtement à cause de la formation du OH^- et H_2

Castle et Watts ont montré sur un système époxy/acier que la réduction des oxydes interfaciaux était la cause directe du décollement. Pour certains auteurs, le phénomène de

décollement est le résultat d'un processus électrochimique qui intervient à l'interface polymère/métal. Le substrat métallique est polarisé le long du défaut dans une zone spécifique nommée MPEI (métal/polymère/électrolyte interface), tel que montré sur la figure II.40.

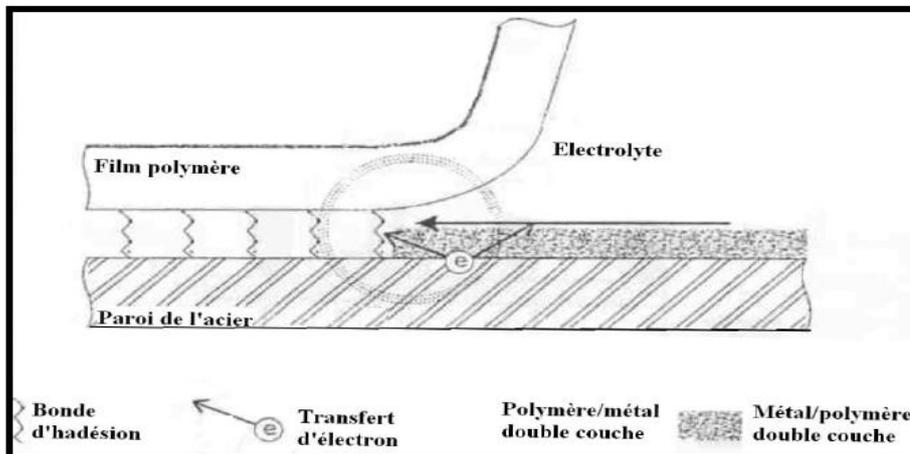


Figure II.39 : Décollement du revêtement la réduction des oxydes inter faciaux

Lorsqu'un courant cathodique est appliqué au métal, ce dernier accélère le processus électrochimique le long de cette zone, ce qui conduit à une dégradation rapide de l'interface polymère/métal. Ce phénomène de perte d'adhésion est plus connu sous le nom de décollement cathodique ou encore délamination cathodique. Lorsque le revêtement est soulevé, l'accès au front de délamination est facilité, ce qui accroît la vitesse de pénétration.

Les dégradations des liaisons adhesives sont favorisées par l'augmentation locale du pH à l'interface polymère/métal. Pour ce type de revêtement, il arrive parfois que le résultat de cette dégradation montre un aspect différent. Lorsqu'un défaut de surface se crée dans le revêtement (lacune de matière), le métal entre directement en contact avec l'environnement corrosif. Les produits de corrosion peuvent alors se former et « bloquent » le site endommagé. Dans ce type de situation, localement, l'accès à la surface des espèces agressives du milieu électrolytique est empêché par l'agglomération des produits de corrosion, tandis qu'à la périphérie du défaut, l'accès de ces espèces est possible par perméation à travers le revêtement mince.

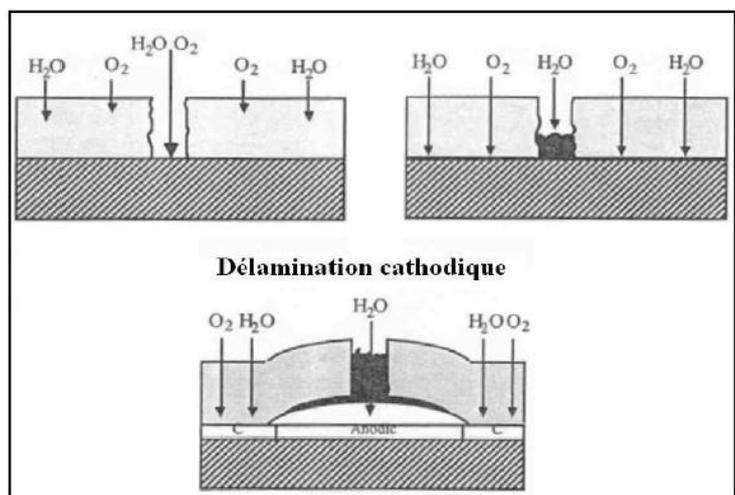


Figure II.40 : La dégradation rapide de l'interface polymère/métal

Chapitre III :
Déroulement et
processus d'installation
d'un système de
protection cathodique
par courant imposé

Chapitres III : Déroulement et processus d'installation d'un système de protection cathodique par courant imposé :

III.1) Importance de l'installation d'un système de protection cathodique par courant imposé :

Dans le cas de notre réseau, la zone Rhourde Nous est connue pour des taux de salinité et de Fer et surtout de carbone très élevés dans le produit. Ces composants, étant connus pour être corrosifs, imposent l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

Le problème de notre réseau réside dans le fait qu'il est, comme tout autre pipeline, exposé à une corrosion interne (causée par les composants cités plus haut), et une corrosion externe (causée par la réaction avec le milieu dans lequel notre conduite est enterrée). Et c'est cette double action qui conduit à une dégradation plus rapide et plus critique des structures.

Un revêtement protège la conduite et l'isole du milieu dans lequel elle est, mais les défauts sont inévitables sur les revêtements, et donc une protection permanente et contrôlable est nécessaire pour assurer la protection.

Par conséquent, même dans un sol peu corrosif (sable sec), l'installation d'un système de protection cathodique demeure indispensable à fin d'éliminer tout risque de corrosion externe, de se focaliser la corrosion interne, d'optimiser la durée de vie de la structure protégée et d'assurer le transport continu du produit.

III.2) Collecte des données :

III.2.1) Introduction :

La réalisation d'un système de protection cathodique dépend essentiellement des informations correctes obtenues, concernant la structure à protéger.

Les détails de cette structure, les conditions de service et sa durée de vie sont indispensables à l'établissement du plan comprenant correctement, la méthode et le matériel nécessaire à la mise en place d'un système de protection cathodique.

III.2.2) Détails de la structure :

La surface de l'étendue de la structure doit être vérifiée soit par calculs à partir des tableaux de dimensionnement ou par renseignement de la part du constructeur. Cela en plus des détails concernant les structures immergées ou enterrées ou voisinage.

Les détails sont présentés sous forme de :

- Localisation (cartes, tracé et élévation)

- Dimensionnement caractéristiques principales
- Détails de la protection cathodique
- Détails de revêtement
- Date de construction et de mise en service.

Toutes les informations servent à établir le plan et les méthodes permettant d'éviter tout effet sur la structure à protéger et celles avoisinantes.

III.2.3) Revêtement :

Les détails liés aux caractéristiques du revêtement avant et après l'installation, sa résistance moyenne, et courant de protection requis doivent être pris en compte.

III.2.4) Environnement :

Les conditions d'environnement vont avoir un impact majeur sur l'application de la protection cathodique et donc doivent être absolument pris en considération dans la réalisation les plus importantes étant :

- La résistance de l'électrolyte aux profondeurs et localisations convenables
- Conditions particulière du sol (profondeur de givre et la corrosivité de sol)
- Possibilité d'influence électrique
- Conditions d'aération
- Risque de dommage mécanique sur la structure
- Risque de dommage par foudre et les sources mécaniques sur les installations de la protection cathodique

III.2.5) Données spécifiques du pipeline :

- a) Une attention particulière doit être attribuée aux structures enterrés largement dispersées, et particulièrement les pipelines du moment qu'ils peuvent rencontrer une large variété de conditions.
- b) Pour les nouveaux pipelines, ou les extensions de ceux existants il doit être préparé les cartes et les descriptions du tracé du pipeline entier ce qui devrait clairement nous indiquer les détails suivants :
 - Détails topographique
 - Lignes aériennes de haute tension (HT)
 - Câbles et structures enterrés (pipelines inclus)
 - Détails de tout système de protection cathodique connu à proximité
 - Valves et régulateurs
 - Traversée de rivière
 - Traversée de route et de chemin de fer
 - Les parties de pipelines restantes après la construction (risque de cas de pile galvanique)

- Longueur, diamètre, épaisseur
- Revêtement utilisé
- Passage de pont
- Joints d'isolation
- Caractéristiques du système de soutirage du courant (A)
- Tout équipement en fonctionnement électrique (valve à fermeture automatique)
- Tout système de mise à la terre
- Tout système de mesure
- Détails de produit à transporter

III.3) Conception et conditions préalables :

Dans le but de concevoir un système de protection cathodique, on doit prendre en considération les conditions suivantes :

III.3.1) Isolation électrique :

Les structures à protéger doivent être isolées, par des dispositifs adéquats tel que les joints isolants dans le cas des pipelines, des structures étrangères comme les compresseurs, stations de distribution et installations internes.

Les joints isolants à leur tour doivent être installés d'après la conception en devisant le système en sections, par exemple dans le cas d'une partie aérées non protégée d'une conduite enterrée. Ces mêmes joints doivent être conçus pour résister à la condition de service (pression et température), et avoir une haute résistance électrique.

En pipelines enterrés, ils doivent être revêtus de matières compatibles avec celles de la structure. Et leur conception et installation doivent être entreprises de manière à ne pas avoir de contacte accidentel.

Pour éviter les défauts, des joints d'isolation, résultants de la haute tension due à la foudre ou au courant terrestre causé par les lignes de courant électrique, on doit considérer l'installation de dispositifs de protection, tel que des éclateurs.

Dans le cas où un joint est installé dans une zone classée dangereuse (zone peuplée, zone de travaux ou zone de production...etc.), il est important qu'il soit conforme aux exigences opérationnelles de la zone en question.

Remarque : Dans le cas d'un joint séparant deux tronçons de pipelines qui ont des potentiel différents ou constitués de matériaux différents, exemple : inox/acier ordinaire (plus noble/moins noble), il est important de veiller à ce que le joint soit intacte et qu'il n'y ait pas contacte directe ou indirecte entre les deux tronçons, comme dans le cas d'accumulation de sable sur les brides comme le montre la figure III.1.



Figure III.1 : Cas où le joint perd leur efficacité

III.3.2) Boîtes de mesure :

L'installation de ce genre de boîtes doit être considérée pour la mesure des potentiels, des courants et des résistances structure/électrolyte. Dans le cas d'un pipeline, il est suffisant d'installer des postes de mesure à des intervalles convenables. De préférence, pas plus de 3 Km d'écart au long du tracé du pipeline. Dans les zones construites, l'espacement doit être réduit à moins de 1 Km.

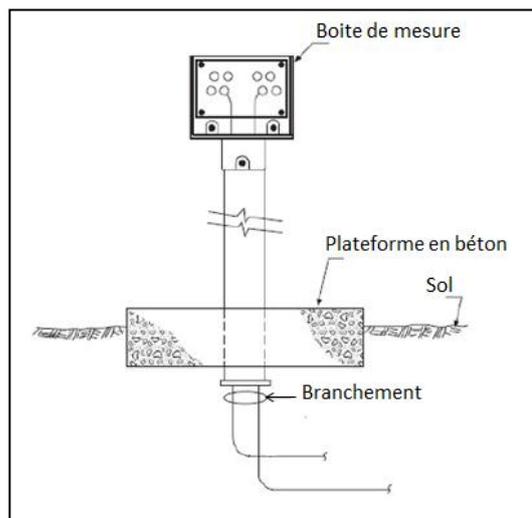


Figure III.2 : Une boîte de mesure

Leur installation doit être considérée dans les situations suivantes :

- Croisement avec un système de soutirage
- Croisement avec d'autres pipelines ou câbles enterrés
- Parallélisme avec d'autres pipelines ou câbles enterrés
- Gaines métalliques
- Joints isolants
- Croisement de route large
- Croisement de rivière
- Liaisons de connexion
- Mise à la terre

III.3.3) Gaine de pipelines enterrés :

Les gaines peuvent avoir un impact important sur la protection cathodique des pipelines de service, par conséquent, l'utilisation des gaines doit être évitée là où c'est possible. Et le pipeline à l'intérieur de la gaine doit toujours avoir un revêtement de très bonne qualité pour être protégé contre la corrosion (cas de corrosion humide).

Là où l'utilisation des gaines est inévitable, l'espace annulaire entre le pipeline et la gaine doit être jointé aux extrémités de cette dernière. En pratique, il est presque impossible d'établir une étanchéité parfaite.

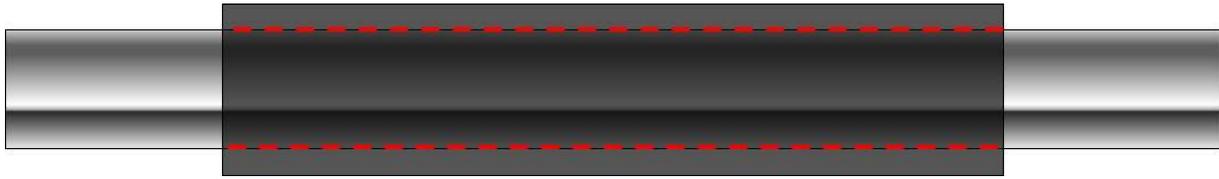


Figure III.3 : Gaine de pipelines enterrés

Les différentes mesures à prendre pour les différents types de gaines sont les suivantes :

a) Gains conservatrices de courant de protection cathodique :

Incluent les gaines fabriquées à base de plastique, de béton revêtu et d'acier revêtu. La protection anticorrosion du pipeline à l'intérieur de la gaine est souvent réalisée par des anodes galvaniques ou par remplissage de l'espace annulaire, entre la gaine et le pipeline, avec une matière efficace, ayant une durée de vie de propriétés anticorrosion suffisamment longue.

b) Gains conductrices de courant de protection cathodique :

Incluent les gaines en acier nu ou faiblement revêtu, et les gaines en béton non revêtu suffisamment conductrices. Dans ce cas, la protection cathodique externe du pipeline doit être efficace à l'intérieur de la gaine, à condition qu'il n'y ait aucun contact entre elle et le pipeline, et qu'on verse un électrolyte dans l'espace annulaire entre les deux. Sans cet électrolyte, on aura seulement un risque de corrosion atmosphérique.

III.3.4) Enclage, traversé d'obstacle et gaine pour pipelines :

Là où les traversés, enclage et gaines sont en béton il est nécessaire qu'il n'y ait pas contacte entre l'acier de renforcement et la structure protégée. C'est pourquoi un isolant adapté et un bon revêtement sur la structure protégée doivent être installés. En d'autre cas, la structure doit être considérée comme complexe.

III.3.5) Equipement en fonctionnement électrique :

Quand le sol est connecté à un équipement sur fonctionnement électrique (exemple d'une vanne ou pompe d'un réservoir enterré), la résistivité va diminuer en ce point, menaçant la protection cathodique.

Dans le but d'éviter le danger des chocs et au même temps maintenir une bonne protection cathodique, l'une des mesures suivantes doit être prise, tout en accord avec les normes de sécurité appropriées :

- a) Isolation des équipements électriques de la structure protégée
- b) Isolation des parties du pipeline en contact avec un équipement électrique (exemple d'une vanne automatique), du reste de la pipe.

III.3.6) Eclateur (protection anti-foudre) :

Une structure sous protection cathodique doit seulement être connectée à un éclateur (protection anti-foudre), ou à une structure elle-même y connectée à travers un appareil approprié.

III.3.7) Equipement de réduction d'interférences de courant alternatif :

Il existe deux types de base d'interférences de courant alternatif sur structure enterrées :

- a) Interférences de courte période, causées par des incidents de haute tension de courant alternatif et des changements opérationnels (effets ohmiques et inducteurs)
- b) Interférences de longue durée, causées par induction durant l'opération (effets inducteurs)

L'adoucissement de ces effets exige l'usage de systèmes de mise à la terre. Ces systèmes peuvent être réalisés en utilisant une large variété d'électrode (tel l'acier galvanique, le zinc ou le magnésium), et quelque uns de ces systèmes vont avoir un effet défavorable sur l'efficacité de la protection cathodique. Pour éviter cet effet, une mie à la terre, additionnelle, est relié à la structure.

III.3.8) Système de protection cathodique :

A. Postes de soutirage :

Les postes de soutirage sont principalement constitués de :

- transformateur redresseur ou autre équipement de soutirage continu (énergie solaire)
- Puits anodique

Leur emplacement doit être choisit en prenant en considération les facteurs suivants :

- Disponibilité d'une source d'énergie
- Degré de courant de protection requis
- Plus faible résistivité du sol que possible, dans la zone du puits anodique
- Accès facile aux installations
- Distance suffisante entre le puits anodique et les installations étrangères à fin de minimiser l'interférence
- Distance suffisante entre le puits anodique et la structure à protéger
- Localisation des zones dangereuses

A.1) Transformateur redresseur :

- **Armoire de protection :**

Il assure la protection nécessaire face aux facteurs extérieurs inattendus, comme l'humidité, la poussière, le vent, l'entrée ou le choc de corps étranger. En plus de la ventilation adaptée à la chaleur dégagée par les équipements. Le boîtier doit être verrouillé et, si possible, équipé de :

- Un espace pour transformateur redresseur
- Un espace pour boîte de connexion
- Un espace pour tableau électrique avec les dispositifs de sécurité exigés et des prises de courant
- Un espace pour câbles de connexion avec identification

- **Unités du transformateur redresseur :**

Elles sont spécifiques chaque application. Les spécifications doivent prendre en compte ce qui suit :

- Connexion à un courant alternatif entrant
- Type de rectification (redressement)
- Instruments de mesure : voltmètre, ampèremètre ...
- Commande de sortie (potentiel)
- Lien amovible permettant l'insertion d'un interrupteur cyclique
- Equipements électrique et sécurité appropriés
- Mesures de protection contre toute interférence de haute tension possible
- Tableau de détails d'identification et de classement
- Mesures de protection d'environnement

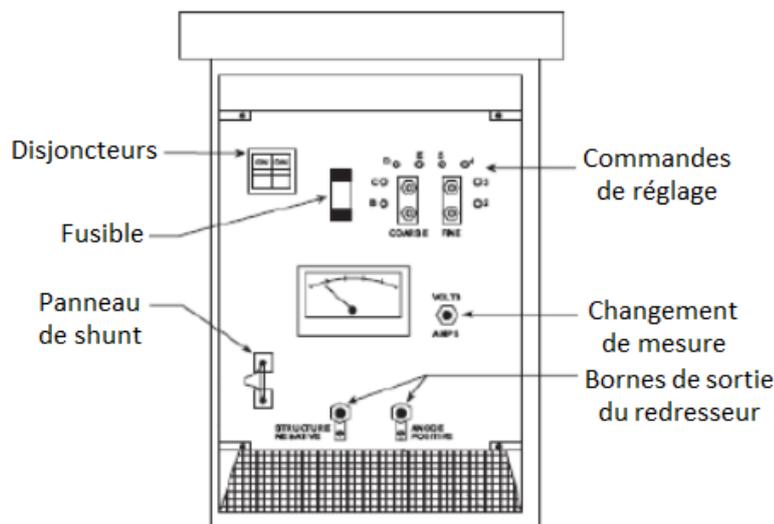


Figure III.4 : Un transformateur redresseur

A.2) Puits anodiques :

Les puits anodiques en courant imposé, peuvent être de deux types :

- Superficiels
- Profonds

Ils consistent en une ou plusieurs anodes de courant imposé, enterrées horizontalement ou verticalement. Les matériaux couramment utilisés sont les suivants :

- Ferro-silicium et ses alliages
- Graphite
- Oxydes de métal
- Polymères conducteurs
- Acier

La connexion entre le câble et la tête de l'anode doit être isolée avec attention pour éviter l'entrée d'humidité et donc les dégâts de corrosion.

Les matériaux d'isolation utilisés doivent avoir une résistance durable face aux effets physiques et chimiques de l'électrolyte. A la tête de l'anode, le câble doit être protégé contre les chocs.

Les anodes doivent être équipées avec un backfill approprié, et les puits doivent généralement être installés dans des sols à basses résistivités. La décharge doit être prise en compte pour les anodes superficielles à courant élevé et les anodes profondément enfouies.

L'impact environnemental de la dissolution des anodes et du backfill doit être considéré dans le choix des matériaux à utiliser.

A.3) Les câbles :

L'installation des câbles doit être réalisée avec conformément aux règles, d'électricité et de sécurité, appropriées.

Les câbles de mesure du potentiel doivent être séparés de ceux transportant le courant à fin d'éviter les erreurs de la chute de tension

Dans toutes les installations de protection cathodique, les câbles doivent être installés avec un grand soin pour éviter l'endommagement de l'isolation. Il est préférable de les installer dans des gaines de protection ou de les protéger avec suffisamment d'isolant en plus des rubans de prévention.

Les méthodes utilisées pour connecter les câble aux structures doivent assurer que :

- Les propriétés mécaniques de la structure ne seront pas négativement affectées
- Les caractéristiques mécaniques et électriques de la connexion sont favorables aux résultats voulus
- Toute réparation de revêtement est prudemment effectuée pour s'assurer que sa performance ne soit pas affectée.

Les joints des câbles doivent être évités là où c'est possible. Les joints des câbles enterrés et émergés doivent être compatibles avec l'enterrement ou l'immersion permanente.

III.3.9) Conception :

La conception est réalisée dans le cadre des critères suivants :

- Conditions préalables pour application de protection cathodique
- Base de données destinée à la conception
- Conditions sur la conception (sécurité, normes et environnement)

III.3.10) Protection cathodique temporaire :

Pendant la construction de la structure et celle de la protection cathodique permanente, des mesures temporaires de lutte anticorrosion doivent être prises.

La protection cathodique temporaire peut être réalisée par :

- Application de protection cathodique par anodes sacrificielles
- Démarrage des parties du système de protection cathodique permanent délivrées

III.4) Installation d'un système de PC par courant imposé :

III.4.1) Introduction :

Cette étape du travail est généralement entreprise, le plus tôt possible, après la fin de la construction de la structure à protéger. Une vérification générale incluant la sécurité et la fiabilité des installations et des instruments est exigée avant le début des travaux.

La suite portera sur les détails techniques de la mise en place des différents composants et du réseau de la protection cathodique.

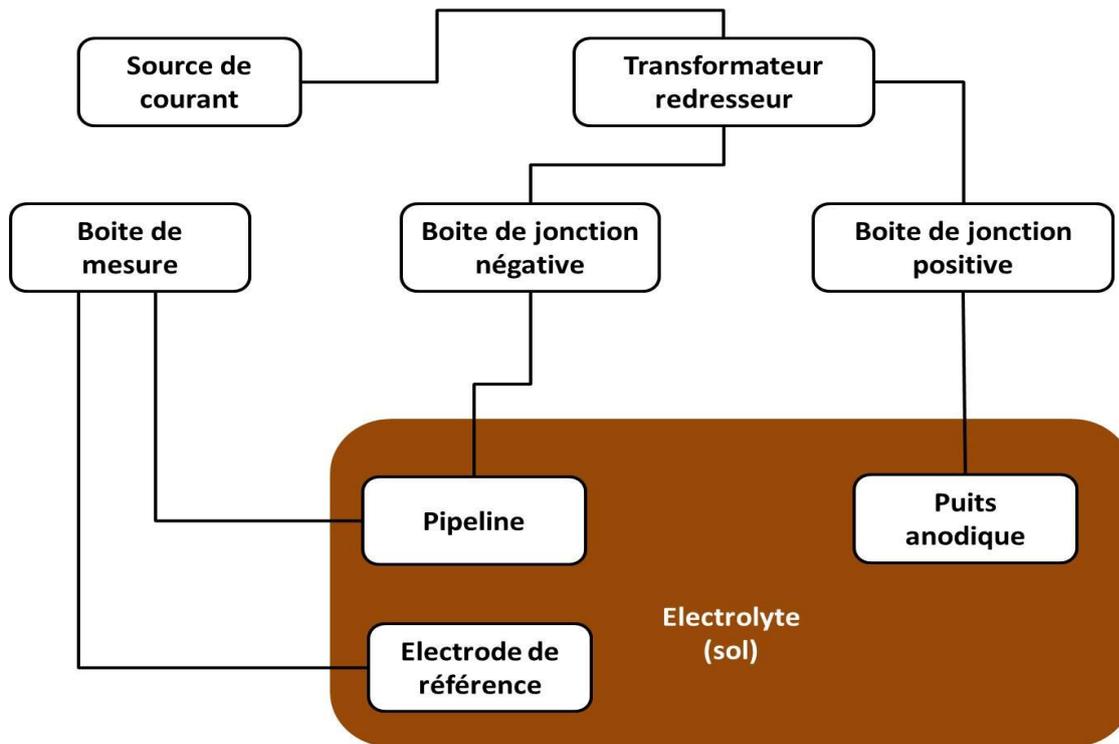


Figure III.5 : Schéma d'installation de la protection cathodique

III.4.2) Installation des sources de courant :

III.4.2.1) Générateur :

Généralement il s'agit d'une source électrique à alimentation triphasique (produisant une tension de 400V), et qui alimente le transformateur redresseur par un courant alternatif.

III.4.2.2) Poste transformateurs-redresseurs :

Il sera installé sur une plateforme sur-mesure, bien fixé pour éviter les mouvements et les vibrations, et clôturé pour installer une zone de sécurité.

Il reçoit le courant alternatif venant de la source. Le transformateur abaisse la tension jusqu'à atteindre celle convenable pour l'installation (de 400V jusqu'à 50V) pour avoir une DDP de -2.5V, et le redresseur corrige (redressement) le courant alternatif entrant en courant continu. Voir l'annexe 4.

III.4.3) Installation de puits anodique (le déversoir) :

Pour la plupart des pipelines, les anodes sont installées sous forme de lit suivant le long de la conduite. La forme du champ électrique est plus appropriée et la puissance des postes est optimale.

Dans notre cas, les conduites sont en forme de réseau, donc il s'agit d'une surface occupée par la structure et non d'une longueur. L'installation des anodes est en forme de puits

(forage) assurant la couverture de toute une aire, et optimisant ainsi l'efficacité de l'installation. Voir l'annexe 5.

III.4.3.1) Puits anodique avec des anodes en Ferro-silicium :

Il est constitué de 12 anodes en Ferro-silicium suspendus dans un puits rempli avec un backfill spécial de charbon.

Les anodes sont soutenues par un tube en PVC qui sert en même temps au dégazage du gaz formé à travers des trous de 3 mm réalisés tous les 152 mm.

Une boîte de contrôle et distribution sera montée sur des paliers à la tête du puits

Les câbles des anodes seront introduits dans cette boîte à travers des petits tubes en plastique.

Ces anodes sont en Ferro-silicium plus chrome, résistant donc en milieu avec chlore naissant.

L'anode a une forme cylindrique avec une tête grossie et percée pour le raccord du câble.

Une gaine thermorétractible autour du câble fournit une ultérieure protection contre l'oxygène et le chlore naissants qui se libèrent durant le fonctionnement.

Après la pose des anodes le puits sera rempli avec un backfill spécial de charbon suivant les modalités exposées en suite.

Chaque anode et son câble seront liés au tube en PVC par des liens en PVC eux même.

En plus les câbles seront liés au tube horizontal soudé à la tête du puits.

Enfin chaque câble sera connecté à son shunt pour la mesure de courant qui alimente l'anode correspondant.

III.4.3.2) Travail préliminaire :

Le puits sera contrôlé pour vérifier ces conditions :

- Verticalité
- Profondeur
- niveau d'eau s'il y a
- si tout le forage est vide et sans obstructions

III.4.3.3) Anodes :

Les anodes sont extraites des emballages et sont rangées avec leurs câbles en façon de faciliter les liaisons.

Chaque particulier sera contrôlé avec soin pour déceler tout dommage.



Figure III.6 : Les anodes

III.4.3.4) Tube de support :

Avant d'introduire le tube du support il faudra contrôler que le bord de la bouche d'entrée du puits ne présente pas des vives arêtes qui, si nécessaire, doivent être arrondies.

Un tube de 1'' en acier sera introduit dans le puits pour guider l'emplacement du tube de support en PVC.

Il est préférable de souder entre elles les barres du tube de 1'' pour en faciliter l'extraction.

A ce propos sera ainsi utile, au moment de l'introduction, appliqué du gras.

Une fois que le tube guide sera positionné à sa place on pourra coupler et introduire le tube en PVC avec les anodes selon spécifications décrites ci-après.

III.4.3.5) Instructions pour l'accouplement :

Les joints du type "bell and spigot" devront être propres et ses arêtes arrondies avec une meule à disque portative pour faciliter l'accouplement des tubes.

Avec un vilebrequin portatif faire 4 trous de 3 mm à 90 degrés entre eux ayant le soin de le réaliser perpendiculairement à la surface du tube.

Dans ces trous introduire les rivets à tirer avec ses pinces faisant attention à ne pas abîmer le tube. Voir l'annexe 7.

III.4.3.6) Mise en place des anodes :

Il faudra une grue ayant une hauteur de bras de 14 m minimum.

Les premières deux barres de tube seront accouplées en position horizontale avec les anodes respectives ; en partant du plus bas les anodes et leur câble seront fixés avec des liens en PVC.

L'ensemble sera soulevé par la grue avec une corde liée à l'extrémité supérieure du tube de support préparé.

Il est interdit de le soulever par les câbles des anodes.

Placer le tube, avec les anodes, autour du tube guide déjà introduire dans le puits et le faire descendre jusqu'au niveau du terrain.

III.4.3.7) Connexion :

Quand toutes les anodes seront en position, l'appareillage de montage sera déplacé et le backfill sera ensuite pompé dans le puits.

La boîte des jonctions sera installée sur le montant, à côté de la tête du puits.

Les câbles provenant des anodes seront liés au tube transversal soudé à l'intérieur de la tête du puits en laissant enroulés deux mètres de plus, amenés dans la boîte et fixés aux serre-fils, Voir l'annexe 3.

III.4.3.8) Méthode de pompage du backfill :

Le mélange adéquat en eau et charbon est préparé en quantité suffisante pour remplir le puits anodique, un réservoir et une pompe mobile sont installés temporairement près du puits. La pompe injecte le backfill (mélange eau et charbon) dans le puits en veillant à ce qu'il atteigne le point le plus profond. Il est préférable de fixer un intervalle de tassement pour permettre au mélange de prendre place dans le puits, pour ensuite reprendre le remplissage.



Figure III.7 : Pompage de backfill

III.4.4) Installation des postes :

III.4.4.1) Les boîtes de mesures :

Ils sont installés tout au long de la conduite, particulièrement à des points précis tel que les joints isolants, les joints de soudure, les traversées de routes, les croisements de pipelines.

Ils sont souvent équipés d'une électrode de référence en sulfate de cuivre (CuSO_4), enterrée à proximité et équipée d'un tube d'arrosage.

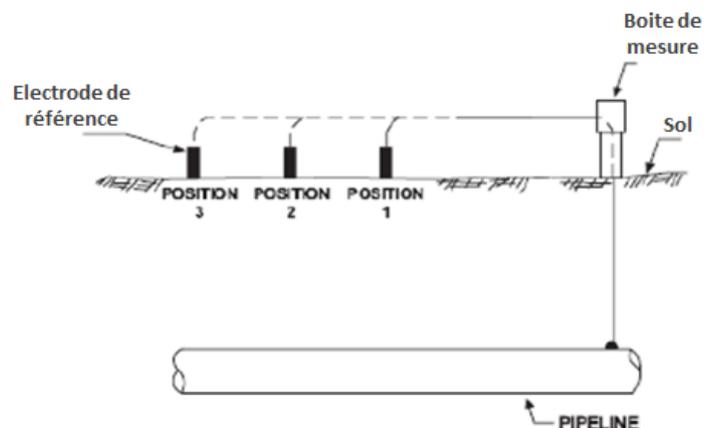


Figure III.8 : Installations des boîtes de mesure

III.4.4.2) La boîte des jonctions positive (d'anodes) :

C'est la boîte reliant la sortie du redresseur (pole+) aux anodes du puits, en shuntant les câbles des anodes en question au câble venant du redresseur. Les shunts étant exposés

(Barrette en cuivre avec une résistance bien connue), permettent de calculer le courant de chaque anode à partir des mesures du potentiel sur le poste.

Il est installé à la surface à côté du puits, et protège la connexion des câbles venants du puits à celui du redresseur. Voir l'annexe 2.

III.4.4.3) La boîte des jonctions négative (pipelines) :

C'est la boîte reliant la sortie négative du redresseur aux pipelines, en utilisant le même principe de la boîte précédente. La particularité est qu'elle est équipée de résistances variable à fin de régulariser le courant traversant le pipeline. Voir l'annexe 1.

III.4.5) Installation des câbles :

III.4.5.1) Les caractéristiques des câbles :

Les câbles enterrés sont utilisés pour relier la structure, les anodes, les postes de mesure et le transformateur redresseur. Et ne doivent pas avoir de protection métallique.

Les sections des câbles diffèrent en fonction de :

- Baisse de tension admissible
- Intensité mécanique
- Facteurs économiques

Les sections ne doivent pas être inférieures aux limites suivantes :

➤ Courant imposé :

- Câbles de la structure protégée : 10mm² Cu
- Câbles du puits anodique : 4X2.5mm² ou 10mm² Cu

➤ Autre installations :

- Mesure de potentiel : 2X2.5mm² ou 6mm² Cu
- Mesure de courant : 4X2.5mm² Cu
- Connexion de continuité : 4X2.5mm² ou 10mm² Cu

III.4.5.2) Le câblage :

Le générateur est relié à un transformateur redresseur, qui lui-même est relié à la structure protégée par son pôle négatif et au poste des jonctions du puits anodique par le pôle positif.

A l'intérieur du poste des jonctions, le câble entré est shunté à un nombre de câbles égale au nombre d'anodes (12 câbles dans le cas de notre puits). Ces câbles sont reliés aux anodes.

D'autres connexions existent tel que les postes de mesure où un câble venant de la structure protégée et un autre venant de l'électrode de référence sont reliés à la plaque du poste à fin de faciliter la prise de mesures.

III.4.6) Les accessoires de protection et de montage :

III.4.6.1) Les joints isolants entre la conduite et le puits :

Ce sont des joints standards, séparant la structure protégée des puits (injection et production), et cela pour éviter la perte de courant dans le sol à travers le puits et donc la baisse d'efficacité de la protection cathodique.

III.4.6.2) Résistance variable en croisement :

Dans le cas de croisement (ou parallèlement) de deux pipelines protégés cathodiquement, et dont les potentiels sont différents. On installe une résistance variable relié aux deux pipelines par des câbles électriques dont la fonction est de limiter le passage du courant et donc de maintenir la protection.

III.4.6.3) Les éclateurs :

Un éclateur est constitué d'une enveloppe contenant un gaz rare, neutre et isolant. C'est un dispositif qui permet de détourner en un temps bref la charge électrique de la foudre vers la terre à fin de protéger notre installation, et le joint isolant en évitant de le détruire sur ce choc. Ils sont connectés au pipeline et au puits, et ne laissent passer que les courant de décharge de plusieurs KA et donc n'ont aucune influence sur le courant de protection.

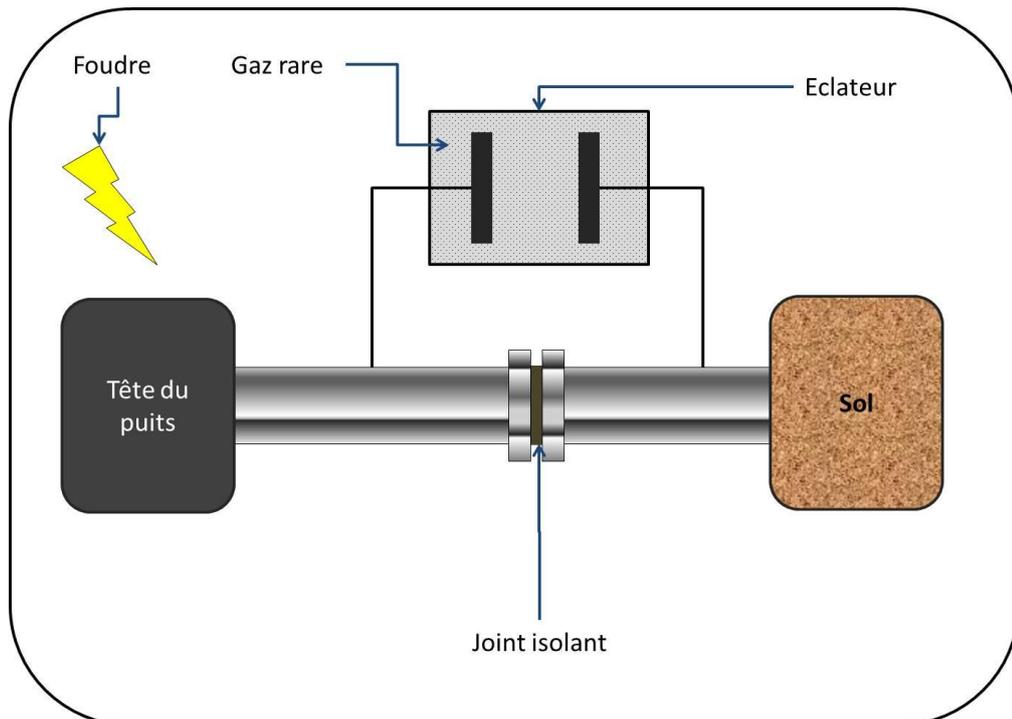


Figure III.9 : Installation d'un éclateur

III.4.6.4) Mise à la terre :

Tous les équipements devront être connectés au réseau de mise à la terre dans le but de les protéger en évacuant les surcharges éventuelles.

III.5) La vérification finale, inspection et maintenance :**III.5.1) La vérification finale :****III.5.1.1) Les vérifications préliminaires :**

Quand une protection cathodique temporaire est utilisée .le système doit être remplacé avant la vérification finale

Avant que le système PC ne soit activée, prendre le soin de vérification que tous les installations sont on accord avec la conception. En particulier, les câbles de connexion et les mesures de sécurité (isolation, anti-explosion) sont nécessairement vérifiés.

Les câbles de connexion au transformateur-redresseur doivent être vérifiés pour une correcte polarité.

Les mesures suivantes peuvent être faites et les résultats comparés avec les exigences de la conception :

a) La mesure de la résistance :

- la résistance du déversoir ou anode galvanique par rapport au sol.
- la résistance entre la structure protégée et le déversoir.

b) Isolation électrique de la structure :

- à l'isolation des joints.
- à la gaine métallique des pipes.

c) La mesure de potentiel :

- le potentiel de corrosion de la structure.
- interférence due à un courant vagabond suspecté.
- le potentiel (anode/électrolyte) des anodes galvaniques.
- le potentiel structure/électrolyte) des structures avoisinantes.

III.5.1.2) La mise en service :

- a) Allumez le poste transformateur-redresseur et confirme qu'il fonctionne correctement.

- b) A juste les paramètres du poste transformateur-redresseur pour qu'il soit conforme au potentiel requis par la conception .si des déviations majeure apparaissent les sources doivent être confirmées par les mesures.
- c) Quand nécessaire, on connecte les anodes galvanique a la structure protégée par une résistance variable pour limitation du courant.
- d) Ensuite faire les mesures suivantes :
 - La tension de sortie de redresseur sur le poste de transformateur-redresseur (V).
 - L'intensité du courant de protection (A).
 - Le potentiel aux extrémités des parties de la structure protégée par chaque redresseur (DDP.V).
 - Le potentiel et le courant requis par l'électrode de référence

III.5.1.3) Vérification de l'efficacité de la PC :

Une fois la structure protégée a suffisamment de contact avec le sol et après un période de polarisation convenable l'efficacité de la PC a besoin d'être vérifiés.

III.5.2) Inspection :

Après la vérification, une inspection régulier est nécessaire pour les procédures a prouvés, convenable avec le type la structure et son système de PC.

Les procédures doivent être soumises à la révision pour refléter l'expérience d'opération et la nouvelle technologie.

III.5.3) Maintenance :

C'est l'entretien de l'installation de la PC notamment par celle du transformateur-redresseur une foi par ans ou quand une vérification indique qu'elle est nécessaire, celle de puits anodique par son arrosage annuel et le remplacement des joints isolants, du revêtement et des électrodes de références.

Chapitre IV :
Théorie et modèle de
calcul du
dimensionnement
d'un poste de
protection
cathodique

Chapitre IV : Théorie et modèle de calcul du dimensionnement d'un poste de protection cathodique :

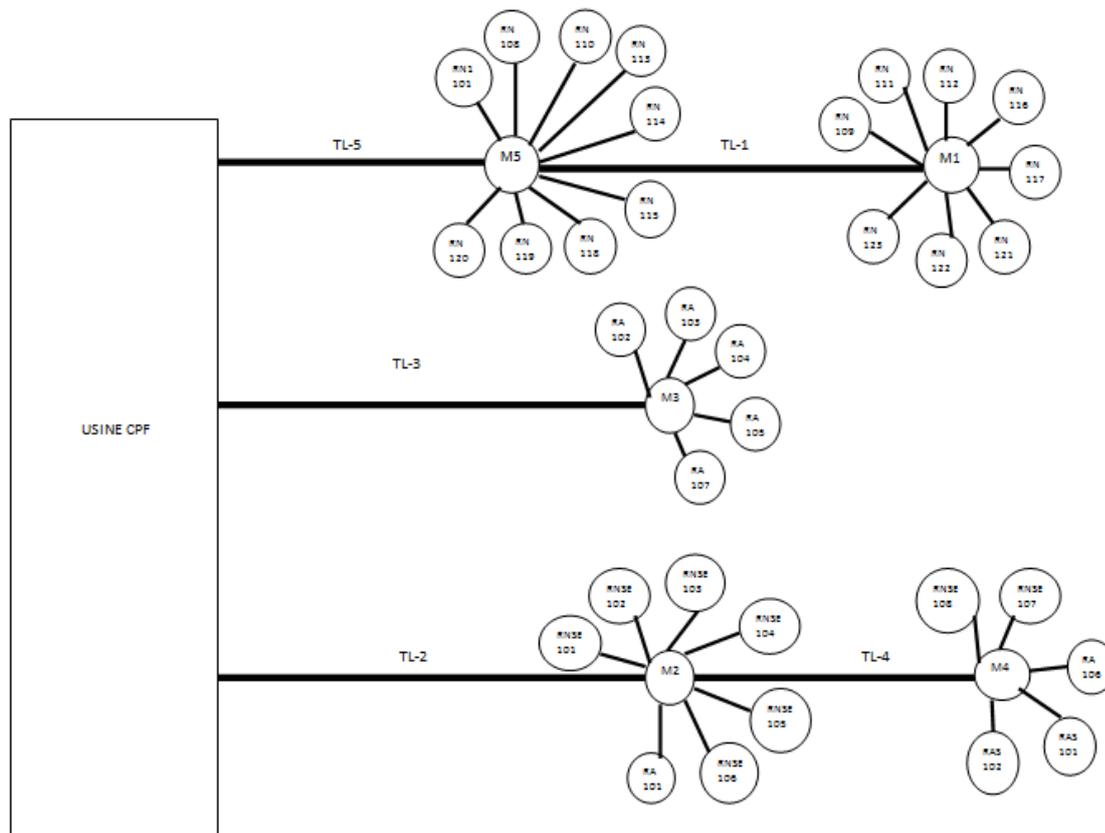


Figure IV.1 : Schéma du réseau collecte

IV.1) Spécification de dimensionnement d'un système de protection cathodique dans le cas d'un réseau de pipelines :

La différence entre une conduite unique et un réseau constitués de plusieurs conduites quand il s'agit de les protéger par un une installation de courant imposé, réside dans la grandeur de la structure à protéger, la distribution du courant et du potentiel le long de la conduite, la surface occupée par le réseau en question, la connexion des conduites le constituant au système de protection et les résistances qui s'opposent au passage du courant à travers les conduites en réseau.

Remarque : Dans les spécifications et la théorie de calcul, aucune partie de la structure ne peut être considérée comme étant compacte, et ce à cause des dimensions de notre structure (réseau) qui sont largement supérieures à celles pouvant être considérées comme compactes.

1. Grandeur de la structure à protéger :

Même quand on est en face de diamètre inférieur à ceux rencontrés sur les grande structures pétrolières. La quantité de métal utilisée dans la nôtre reste tout aussi importante, ce qui impose l'installation d'un système de protection cathodique.

2. Distribution du courant et du potentiel le long du réseau de pipelines :

La géométrie reste la même et donc la distribution circonférentielle sur la surface aussi, par contre la distribution longitudinale va varier du moment que toute les parties du réseau sont reliées électriquement.

La distribution, dans ce cas, va se soumettre aux principes de distribution du courant dans les réseaux électrique.

3. La surface occupée par le réseau de pipelines :

On dit surface occupée, ou l'étendu du réseau pour indiquer la zone de terrain sur laquelle sont installées toutes les conduites constituant le réseau.

On s'intéresse à cette propriété notamment pour étudier la résistivité du sol dans lequel est enfoui notre réseau. Généralement cette résistivité est étudiée de la même manière que dans le cas d'une simple conduite (méthode des quatre piquets), mais doit retracer le chemin de chaque branche faisant partie du réseau.

C'est pourquoi ce genre d'études fini par donner un modèle de résistivité du sol pour toute une aire. Et les coordonnées GPS sont le plus souvent utilisées pour la localisation.

4. Connexions des conduites du réseau au système de protection cathodique :

C'est la spécification qui a le plus d'impact sur le calcul, il s'agit essentiellement de la méthode selon laquelle sont reliées les conduites entre elles pour assurer une continuité électrique sur le réseau et selon laquelle le réseau lui-même est relié au système de protection cathodique.

Connaitre le branchement nous permet non seulement de poser un réseau électrique équivalent, mais aussi d'appliquer correctement nos calculs.

5. Les résistances qui s'opposent au passage du courant à travers les conduites en réseau :

Comme nous l'avons déjà mentionné, notre réseau prendra l'image d'un réseau électrique et donc les résistances, étant le paramètre qui nous importe le plus, seront calculées à travers le réseau en considérant nos conduites comme étant des résistances installées en parallèle ou en série. Comme il est détaillé dans la théorie de calcul et sur les schémas des résistances Fig IV.2.

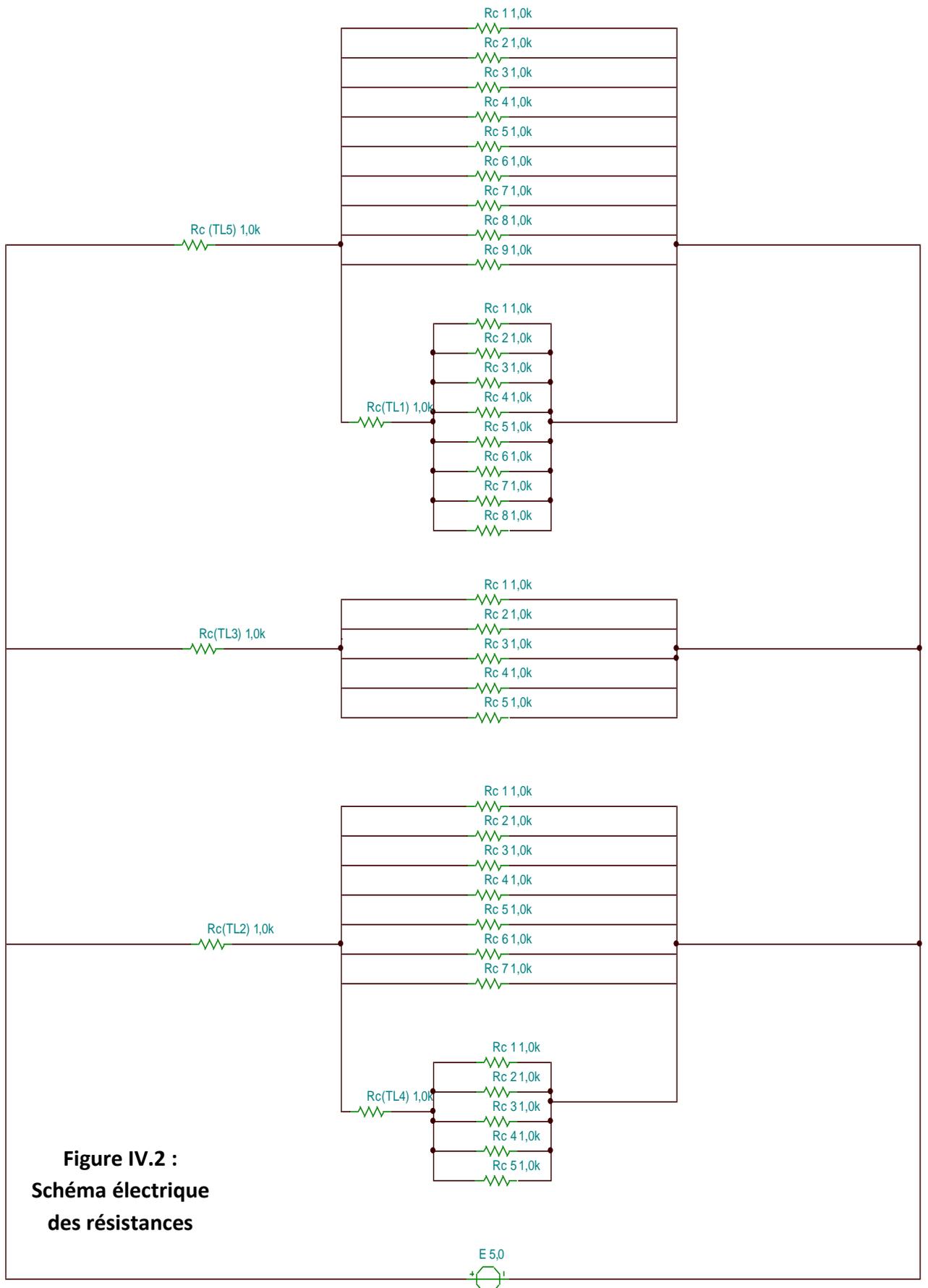
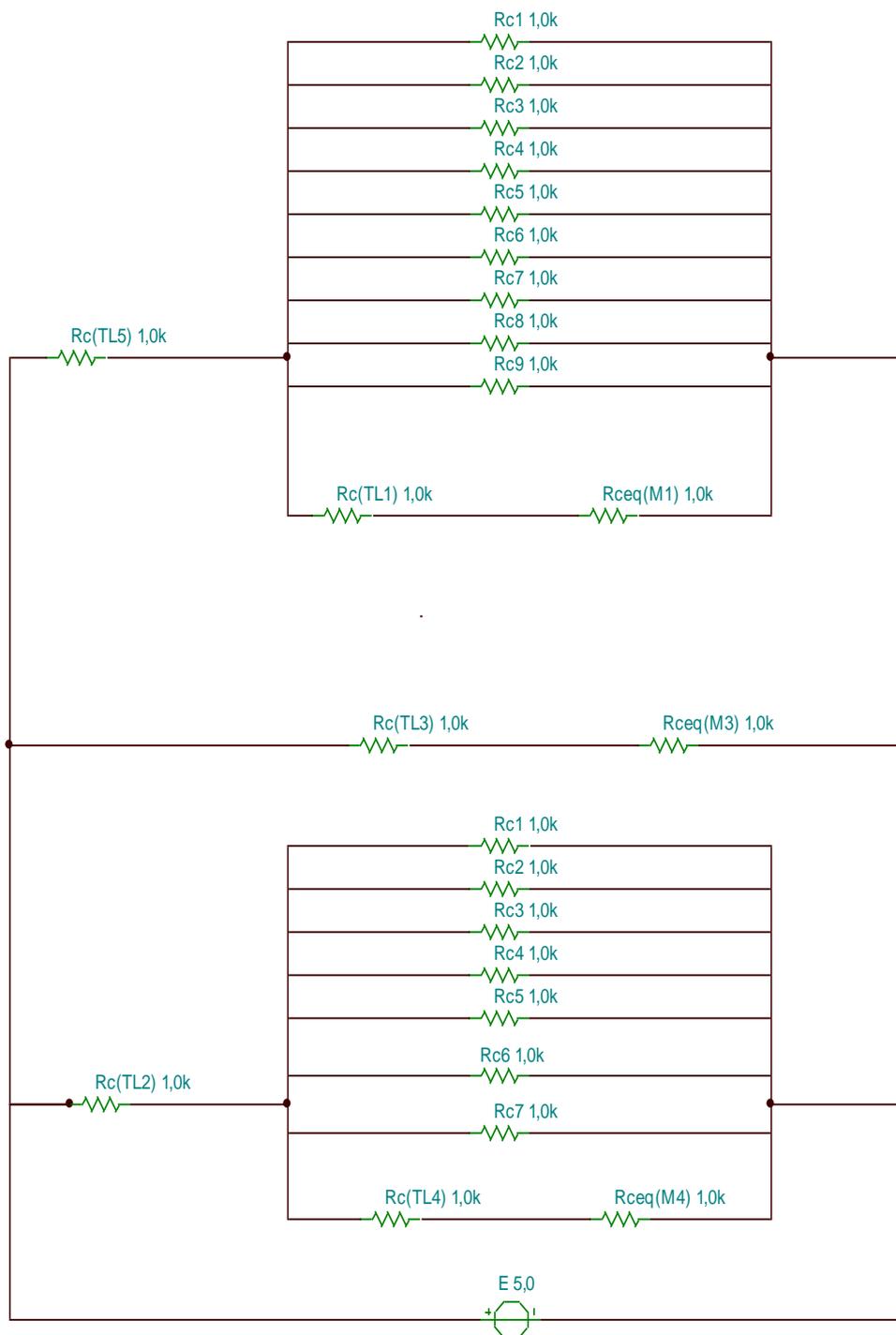
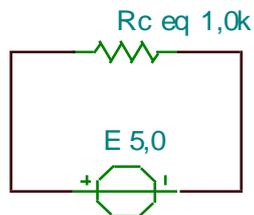
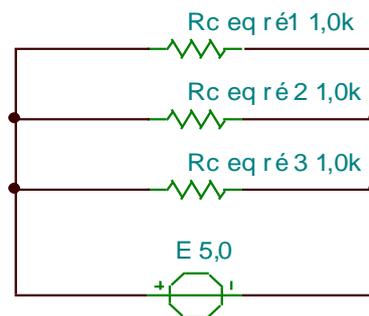
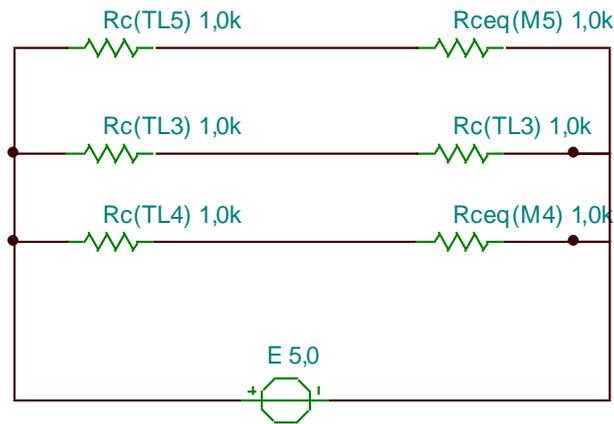


Figure IV.2 :
Schéma électrique
des résistances

Vue que la variation dans les diamètres de nos conduites par rapport à leurs longueurs n'est pas très importante, une résistance équivalente peut être appliquée pour les calculs électrique sur tout le réseau.





IV.2) Modélisation mathématique du phénomène d'atténuation :

IV.2.1) Résistivité du sol : ρ_{sm}

On déterminera la résistivité moyenne du sol comme suit :

$$\rho_{sm} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \rho_i$$

Où :

(IV-1)

ρ_i : la résistivité de chaque emplacement i [$\Omega \cdot m$]

n : est le nombre de mesures effectuées

IV.2.2) Résistance longitudinale (ou transversale) : R_c

IV.2.2.1) Résistance longitudinale de la canalisation i : R_{ci}

$$R_{ci} = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext i} - \delta_i) * \delta_i} \quad (IV-2)$$

Où :

R_{ci} : Résistance longitudinale de canalisation i en [Ω/m]

ρ_{acier} : Résistivité électrique de l'acier des tubes en [$\Omega \cdot m$]

$D_{ext i}$: Diamètre extérieur de la canalisation i en [m]

δ_i : L'épaisseur de la paroi de la canalisation i en [m]

IV.2.2.2) Résistance longitudinale équivalente du manifold k : $R_{c eq} (M_{k=1,2,3,4,5})$

$$\frac{1}{R_{c eq} (M_{k=1,3,4})} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{ci}} \right) \quad (IV-3)$$

$$\frac{1}{R_{c eq} (M_{k=2,5})} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{ci}} \right) + \frac{1}{R_{c eq} (M_{k=1,4}) + R_c (TL_{k=1,4})} \quad (IV-4)$$

Où :

$R_{c eq} (M_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance longitudinal équivalent du Manifold k en [Ω/m]

$R_c (TL_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance longitudinale de collecteur k en [Ω/m]

n : Nombre des canalisations qui relier les puits avec les manifolds

IV.2.2.3) Résistance longitudinale du collecteur k : $R_c (TL_{k=1,2,3,4,5})$

$$R_c (TL_{k=1,2,3,4,5}) = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext k} - \delta_k) * \delta_k} \tag{IV-5}$$

Où :

$R_c (TL_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance longitudinale de collecteur k en $[\Omega/m]$

IV.2.2.4) Résistance longitudinale équivalente du réseau i : $R_{c eq ré i}$

$$R_{c eq ré i} = R_{c i} (TL_{K=2,3,5}) + R_{c eq i} (M_{k=2,3,5}) \tag{IV-6}$$

Où:

$R_{c eq ré i}$: Résistance longitudinale équivalent du réseau i en $[\Omega/m]$

$R_{c i} (TL_{K=1,2,3,4,5})$: Résistance longitudinale de collecteur k du réseau i en $[\Omega/m]$

$R_{c eq i} (M_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance longitudinal équivalent du Manifold k du réseau i en $[\Omega/m]$

IV.2.2.5) Résistance longitudinale équivalente du réseau complet : $R_{c eq}$

$$\frac{1}{R_{c eq}} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{c eq ré i}} \tag{IV-7}$$

Où :

$R_{c eq}$: Résistance longitudinale équivalent du réseau complet en $[\Omega/m]$

n : nombre de réseau

IV.2.3) Résistance transitoire (conduite/sol) : R_t

Tout revêtement isolant utilisé dans le système de protection cathodique est caractérisé à un instant t par sa résistance qui est fonction de la résistance initiale R_{ti} , du coefficient

Vieillessement β et du temps d'exploitation. La diminution de pouvoir protecteur du revêtement avec le temps est causée par plusieurs facteurs d'exploitations et la variation de la résistance transitoire (conduite/sol) pour des pipelines en projet ou en exploitation par la relation suivante :

$$R_t(t) = R_{ti} * e^{-\beta t}$$

Où : (IV-8)

$R_t(t)$: Résistance transitoire (conduite /sol) à l' instant t en [$\Omega.m^2$]

R_{ti} : Résistance transitoire initial pour le revêtement neuf en [$\Omega.m^2$]

β : Le coefficient de vieillissement du revêtement en [1/ans]

t: Durée d'exploitation en [ans]

En général pour les calculs en protection cathodique on utilise plutôt la valeur moyenne de la résistance transitoire (conduite/sol) qu'on note R_{tm} pour une durée de protection t connue. Elle est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{\beta * t} * (1 - e^{-\beta * t})$$

(IV-9)

IV.2.4) Résistance d'isolement du revêtement moyenne : R_{rm}

C'est la résistance moyenne du revêtement pendant le délai d'exploitation.

IV.2.4.1) Résistance d'isolement du revêtement moyenne de la canalisation i :

R_{rmi}

$$R_{rmi} = \frac{R_{tm}}{\pi * D_{exti}}$$

Où: (IV-10)

R_{rmi} : Résistance d'isolement du revêtement de la canalisation i en [$\Omega.m$]

R_{tm} : Résistance transitoire moyen (conduite/sol) en [$\Omega.m^2$]

D_{exti} : Diamètre extérieur de la canalisation i [m]

IV.2.4.2) Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold

k : $R_{rmeq}(M_{k=1,2,3,4,5})$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_{k=1,3,4})} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r\ m\ i}} \quad (IV-11)$$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_{k=2,5})} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{r\ m\ i}} \right) + \frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_{k=1,4}) + R_{r\ m}(TL_{k=1,4})}$$

Où: (IV-12)

$R_{r\ m\ eq}(M_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance d'isolement du revêtement moyenne équivalente du Manifold k en $[\Omega.m]$

$R_{r\ m}(TL_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur k en $[\Omega.m]$

n : Nombre des canalisations qui relier les puits avec les manifolds

IV.2.4.3) Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur k :

$R_{r\ m}(TL_{k=1,2,3,4,5})$

$$R_{r\ m}(TL_{k=1,2,3,4,5}) = \frac{R_{t\ m}}{\pi * D_{ext\ k}}$$

Où: (IV-13)

$R_{r\ m}(TL_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur k en $[\Omega.m]$

IV.2.4.4) Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau i : $R_{r\ m\ eq\ ré\ i}$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ i} = R_{r\ m\ i}(TL_{K=1,2,3,4,5}) + R_{r\ m\ eq\ i}(M_{k=1,2,3,4,5})$$

Où: (IV-14)

$R_{r\ m\ eq\ ré\ i}$: Résistance d'isolement moyenne équivalent du revêtement par unité de longueur du réseau i

$R_{r\ m\ i}(TL_{K=1,2,3,4,5})$: Résistance d'isolement du revêtement du collecteur k du réseau i en $[\Omega.m]$

$R_{r\ m\ eq\ i}(M_{k=1,2,3,4,5})$: Résistance d'isolement du revêtement équivalent du Manifold k du réseau i $[\Omega.m]$

IV.2.4.5) Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau complet : $R_{r\ m\ eq}$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{r\ m\ eq\ ré\ i}}$$

Où : (IV-15)

$R_{r\ m\ eq}$: Résistance d'isolement moyenne équivalent du revêtement par unité de longueur du réseau complet en [$\Omega.m$]

N: nombre de réseau

IV.2.5) Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur au début de l'exploitation : $R_r(0)$

Au début de l'installation la résistance du revêtement est plus importante.

IV.2.5.1) Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la canalisation au début de l'exploitation : $R_{r\ i}(0)$

$$R_{r\ i}(0) = \frac{R_{t\ i}}{\pi * D_{ext\ i}}$$

Où : (IV-16)

$R_{r\ i}(0)$: Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur au début de l'exploitation de canalisation i en [$\Omega.m$]

IV.2.5.2) Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold k au début de l'exploitation : $R_{r\ eq(M_{k=1,2,3,4,5})}(0)$

$$\frac{1}{R_{r\ eq(M_{k=1,3,4})}(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r\ i}(0)}$$

(IV-17)

$$\frac{1}{R_{r\ eq(M_{k=2,5})}(0)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{r\ i}(0)} \right) + \frac{1}{R_{r\ eq(M_{k=1,4})}(0) + R_{r(TL_{k=1,4})}(0)}$$

Où: (IV-18)

$R_{req}(M_{k=1,2,3,4,5})(0)$: Résistance d'isolement du revêtement équivalent par unité de longueur du manifold au début de l'exploitation en $[\Omega.m]$

$R_r(TL_{k=1,2,3,4,5})(0)$: Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur k au début de l'exploitation en $[\Omega.m]$

IV.2.5.3) Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du collecteur k au début de l'exploitation : $R_{r(TL_{k=1,2,3,4,5})}(0)$

$$R_{r(TL_{k=1,2,3,4,5})}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext k}}$$

Où: (IV-19)

$R_r(TL_{k=1,2,3,4,5})(0)$: Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur k au début de l'exploitation en $[\Omega.m]$

IV.2.5.4) Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau i : $R_{reqréi}(0)$

$$R_{reqréi}(0) = R_{ri(TL_{K=1,2,3,4,5})}(0) + R_{reqi}(M_{k=1,2,3,4,5})(0)$$

Où: (IV-20)

$R_{ri}(TL_{K=1,2,3,4,5})(0)$: Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur k du réseau i au début de l'exploitation en $[\Omega.m]$

$R_{reqi}(M_{k=1,2,3,4,5})(0)$: Résistance d'isolement du revêtement équivalent par unité de longueur du manifold k du réseau i en $[\Omega.m]$

IV.2.5.5) Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau complet :

$$\frac{1}{R_{req}(0)} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{reqréi}(0)}$$

Où : (IV-21)

$R_{req}(0)$: Résistance d'isolement du revêtement équivalent par unité de longueur du réseau complet en $[\Omega.m]$

N: nombre de réseau

IV.2.6) Coefficient d'atténuation : α

Autrement appelé Constante de distribution du potentiel le long de la conduite, il traduit l'abaissement du potentiel le long d'un bras de protection.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{c\ eq}}{R_{r\ m\ eq}}}$$

Où : (IV-22)

α : Coefficient d'atténuation en [1/m]

IV.3) Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes :

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

IV.3.1) Résistance d'entrée moyenne d'une conduite revêtue : Z_m

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 toute résistance, ce paramètre est très importante lors de calcul et donc il faut avoir sa valeur moyenne pour un délai d'exploitation donnée, elle s'exprime en ohm et est donnée par :

$$Z_m = \frac{\sqrt{R_{c\ eq} * R_{r\ m\ eq}}}{2}$$

Où : (IV-23)

Z_m : Résistance d'entrée moyenne d'une conduite revêtue en [Ω]

IV.3.2) Résistance d'entrée d'une conduite revêtue au début de délai de l'exploitation : $z(0)$

C'est la résistance d'entrée de la canalisation revêtue au début de l'exploitation, elle s'exprime en ohm et est donnée par :

$$z(0) = \frac{\sqrt{R_{c\ eq} * R_{r\ eq}(0)}}{2}$$

(IV-24)

IV.3.3) Valeurs des potentiels:

Les potentiels sont mesurés par rapport à une électrode de référence qui sera utilisée tout au long de ce travail, c'est l'électrode du sulfate de cuivre (Cu-CuSO4). Pour les structures métalliques enterrées trois types de potentiels pris en compte dans les calculs de protection cathodique :

- **Le potentiel naturel :**

C'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol ; on le notera E_{nat}

- **Les potentiels de protection E_{max} et E_{min} :** 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 E_{max} , il est choisie en fonction du type de revêtement, c'est-à-dire que pour une valeur donnée, le gain de potentiel correspondant $E_{p max}$ ne doit pas excéder 1200(-mV) pour un revêtement en PE tri-couche.

$$E_{p max} = E_{max} - E_{nat} \tag{IV-25}$$

$$E_{p min} = E_{min} - E_{nat} \tag{IV-26}$$

Où :

$E_{p max}$, $E_{p min}$: Les potentiels de protection maximal et minimal [V]

E_{max} , E_{min} : Les potentiels maximal et minimal [V]

E_{nat} : Le potentiel naturel [V]

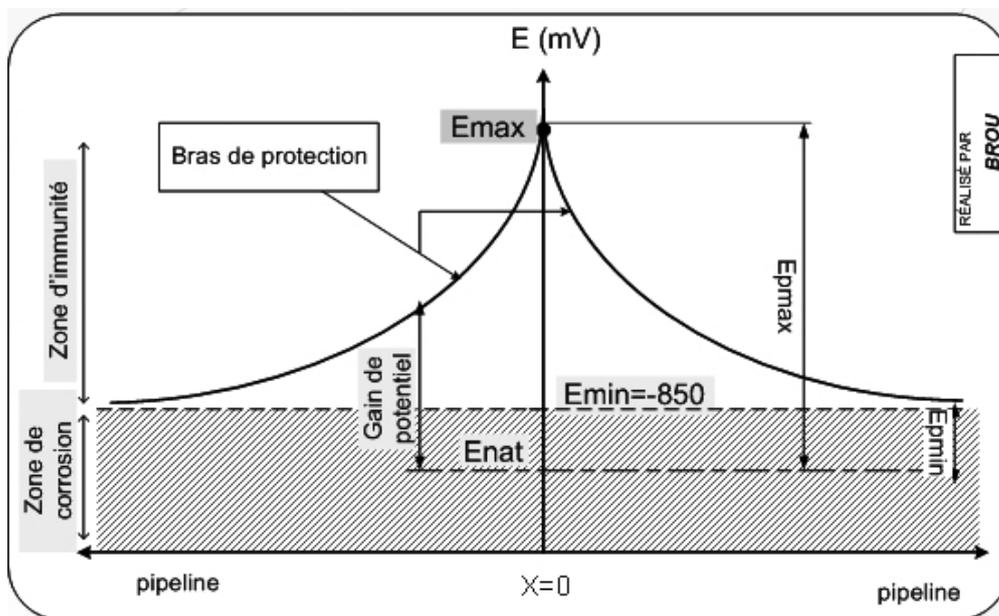


Figure IV.3: Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

IV.3.4) Distribution du potentiel et du courant :

En protection cathodique, il faut donc que toute la surface de la canalisation soit maintenue dans les limites de potentiel correspondant au domaine de protection. A cet effet, une étude générale sur l'influence des différents paramètres sur la distribution du potentiel le long du pipeline s'avère nécessaire.

Dans le cas des pipelines, les surtensions d'activation et de concentration ne sont pas prises en compte (considérées négligeables). Par contre, Afin d'établir l'expression de cette variation du potentiel et du courant j'émetts les hypothèses suivantes :

- la géométrie du système (Le diamètre, l'épaisseur de la paroi et la résistance électrique des tubes soudés sont constants),
- la conductivité de l'électrolyte (le sol est homogène le long du pipeline)
- les différentes résistances mises en jeux sont à considérer (Le revêtement de la conduite est uniforme le long de la canalisation).

Par conséquent, il en découle que la distribution du courant et du potentiel, dans ce type de système, serait du premier ordre ; et donc elle correspond à une distribution de type primaire.

L'intensité du courant de protection injecté dans le sol par le déversoir, se répartit à travers le sol et retourne à la conduite. Le passage du courant provoque dans la conduite une distribution du potentiel le long de la canalisation, et par conséquent l'abaissement du potentiel.

Ainsi, après calcul on retrouve les expressions donnant la variation du potentiel et du courant à un point x quelconque de la conduite :

$$E(x) = E_{\max} * \frac{\cosh(\alpha * (L_p - x))}{\cosh(\alpha * L_p)} \quad (IV-27)$$

$$I(x) = I_{\max} * \frac{\sinh(\alpha * (L_p - x))}{\sinh(\alpha * L_p)} \quad (IV-28)$$

Où :

E_{\max} : Le potentiel maximal en [v]

I_{\max} : Le courant maximal en [A]

α : Le coefficient d'atténuation en [1/m]

L_p : La longueur de protection en [m]

x : La coordonnée de la longueur, à partir du point de drainage [m]

IV.3.5) 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 introduit un facteur (de valeur approximative 0.5) dans les calculs de la longueur de protection d'un poste donné pour prendre en compte les postes avoisinants. Ce coefficient est obtenu par l'expression ci-dessous :

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{p \min}}{E_{p \max}}\right)^2 * \left(\frac{2 * \pi * y * z + \rho_{ms}}{2 * \pi * y * z_m}\right)}}$$

Où : (IV-29)

y : la distance entre le puits anodique et la structure [m]

IV.3.6) Longueur de protection d'un poste de soutirage : L_p

On appelle longueur de protection **L_p**, d'un poste de protection cathodique, la longueur maximale des conduites de réseau 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. **L_p** S'exprime en mètre **m** et est déterminé suivant la relation :

$$L_p = \left(\frac{2}{\alpha}\right) * \text{Ln}\left(\frac{2 * \pi * y * z}{k * \left(\frac{E_{p \min}}{E_{p \max}}\right) * (2 * \pi * y * z + \rho_{sm})}\right)$$

(IV-30)

IV.3.7) Nombre de postes de protection cathodique : N_{ppc}

Connaissant la longueur totale des conduites de réseau (L) à protéger et ayant déterminé la portée d'un poste de soutirage, nous pouvons établir l'expression donnant le nombre de postes de soutirage.

$$N_{ppc} = \frac{L}{L_p + 1}$$

Où : (IV-31)

L : la longueur totale des canalisations de réseau complet [km]

L_p : la longueur de protection [km]

IV.3.8) L'intensité du courant de protection : I_p

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 de réseau. Elle est exprimée en **A**, et donnée par la relation ci-dessous :

$$I_p = \frac{|E_{\max}|}{z * (1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}) + \frac{\rho_{sm}}{2 * \pi * y}}$$

(IV-32)

IV.3.9) L'intensité du courant de protection au début de l'exploitation : $I_p(0)$

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** :

$$I_p(0) = \frac{|E_{\max}|}{z(0) * (1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}) + \frac{\rho_{sm}}{2 * \pi * y}}$$

(IV-33)

IV.3.10) Nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : N_a

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 ci-dessous :

$$N_a = \frac{I_p * t * m}{\mu * M_a}$$

Où :

(IV-34)

m : consommation massique de l'anode [kg/A.ans]

M_a : la masse d'une anode [kg]

μ : Coefficient d'utilisation de l'anode

IV.4) Calcul de la puissance du poste de soutirage :

D'après les lois de l'électricité connaissant le courant délivré par le poste et sa tension, sa puissance joue un rôle très important pour dimensionner notre source d'énergie qui est considéré comme une tension de sortie du poste de protection cathodique, mais avant ça on doit calculer la valeur de la tension U de ce poste.

IV.4.1) Détermination de la tension du poste de soutirage : U

La tension du poste U , 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 .

$$U = \frac{R_{\text{tot}} * I_p}{\eta}$$

Où :

(IV-35)

η : Rendement du poste de protection

R_{tot} : La résistance totale de système de protection [Ω]

Telle que R_{tot} c'est la résistance totale du système de protection qui est obtenue par analogie électrique, comme montré sur la figure suivant :

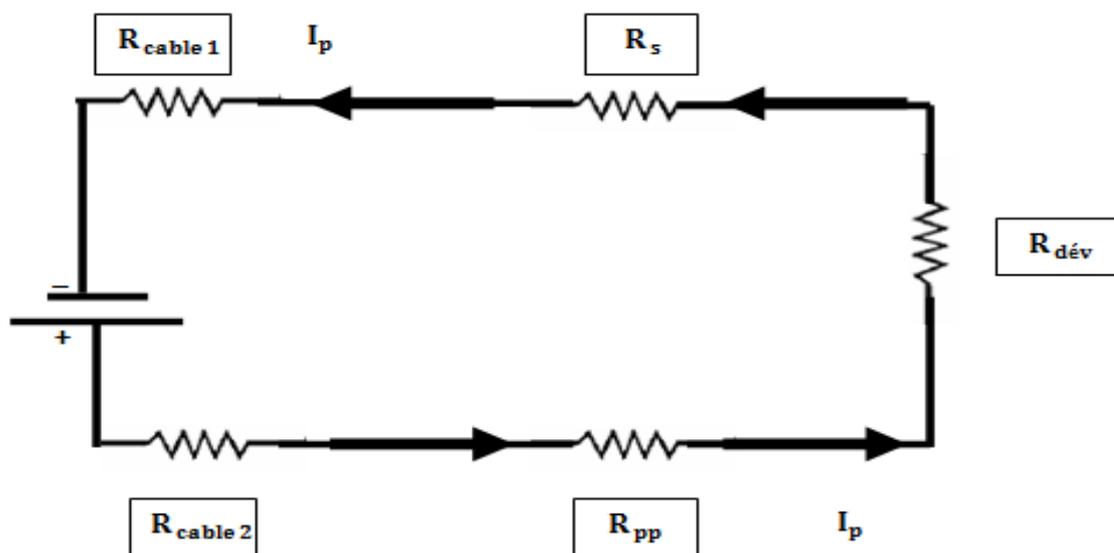


Figure IV.4 : Circuit électrique du système de protection

Où :

$R_{\text{cable } 1}$, R_{cable} : Résistances des câbles positive et négative de connexion en [Ω]

$R_{\text{dév}}$: Résistance de terre du déversoir en [Ω]

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

R_{pp} : Résistance due à la protection passive = Z_m en [Ω]

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

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{dév}} + R_{\text{cable}} + Z_m \quad (\text{IV-36})$$

IV.4.2) Résistance Du Déversoir : $R_{\text{dév}}$

La résistance de déversoir est donnée par la formule suivante

$$R_{\text{dév}} = R_p + R_{\text{ma}} + R_{\text{puit anodique}} \quad (\text{IV-37})$$

Remarque :

Selon les experts en protection cathodique, une valeur de $R_{\text{dév}}$ inférieure ou égale à 2Ω serait acceptable, à titre d'exemple, la GRTG. Spa, utilise pour la protection de ses ouvrages métalliques une résistance du puits d'anodes toujours inférieure ou égale à l'unité.

IV.4.2.1) Résistance de polarisation : R_p

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

$$R_p = \frac{U_a}{I_a}$$

Où : (IV-38)

U_a : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes en [V]

I_a : Moyenne arithmétique entre I_p et $I_p(0)$ en [A]

$$I_a = \frac{I_p + I_p(0)}{2}$$

(IV-39)

IV.4.2.2) Résistance de masse anodique : R_{ma}

Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{ma} = \frac{\rho_a * L_a}{S_a}$$

Où : (IV-40)

L_a : La longueur d'anode [m]

S_a : La section d'anode [m²]

$$S_a = \frac{\pi * D_a^2}{4}$$

Où : (IV-41)

D_a : Diamètre d'anode [m]

IV.4.2.3) Résistance de puits anodique : $R_{\text{puit anodique}}$

La Résistance de puits anodique est la somme de résistance (anode/backfill) et de résistance (backfill/sol)

$$R_{\text{puit anodique}} = R_{\text{anode/backfill}} + R_{\text{backfill/sol}}$$

(IV-42)

A) Résistance (anode/backfill) : $R_{\text{anode/backfill}}$

Elle est exprimée en Ω et donnée par la relation suivante :

$$R_{\text{anode/backfill}} = \frac{\rho_{\text{backfill}}}{2 * \pi * L_{\text{ch}}} * \left(\text{Ln} \left(\frac{8 * L_{\text{ch}}}{D_a} \right) - 1 \right)$$

Où: (IV-43)

ρ_{backfill} : La résistivité du backfill [$\Omega \cdot \text{m}$]

D_a : Diamètre d'anode [m]

L_{ch} : La longueur du chapelet d'anodes [m]

$$L_{ch} = (L_a * N_a) + E_a * (N_a - 1)$$

Où : (IV-44)

E_a : La distance entre les anodes [m]

B) Résistance (backfill/anode): $R_{backfill/sol}$

Elle est exprimée en Ω et donnée par la formule suivante :

$$R_{backfill/sol} = \frac{\rho_{sm}}{2 * \pi * L_{active}} * \left(\ln \left(\frac{8 * L_{active}}{D_{puit}} \right) - 1 \right)$$

Où: (IV-45)

D_{puit} : Le diamètre du puits anodique [m]

L_{active} : La longueur active du puits anodique [m]

$$L_{active} = L_{ch} + L_0$$

Où : (IV-46)

L_0 : La longueur totale des bouchons au-dessus et au-dessous des anodes [m]

IV.4.3) Résistance des câbles : R_{cable}

Comme toute résistance elle est exprimée en ohm. Pour l'obtenir j'applique la formule ci-dessous :

$$R_{cable} = \rho_{cable} * L_{cable}$$

Où : (IV-47)

ρ_{cable} : Résistivité du câble par unité de longueur en [Ω/m]

L_{cable} : La longueur totale des câbles de connexion en [m]

$$L_{cable} = (P_d - L_a) * N_a - \left(\frac{N_a * E_a * (N_a - 1)}{2} \right) + L_0 * (N_a + 1)$$

(IV-48)

Où :

P_d : Profondeur de puits anodique [m]

$$P_d = L_{active} + L_{inactive}$$

Où :

(IV-49)

L_{active} : La longueur active du puits anodique en [m]

$L_{inactive}$: La longueur inactive du puits anodique en [m]

Après quand on détermine de la résistance totale suivante la relation (IV-36) on calcul la tension de poste de soutirage suivante la relation (IV-35).

IV.4.4) Détermination de la puissance du poste de soutirage : P

La puissance délivrée par le poste soutirage de protection peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = U * I_p$$

(IV.50)

Ayant la puissance, nous pouvons procéder au choix et au dimensionnement de la source d'alimentation en énergie électrique du poste de soutirage.

Pour cette étude nous avons choisie d'utilisé l'énergie électrique de réseau de sonalgaz.

Chapitre V :
Dimensionnement
du système de
protection
cathodique du
réseau collectes de
l'usine de CPF de
région de Rhourde
Nouss

Chapitre V: Dimensionnement du système de protection cathodique du réseau collectes de l'usine de CPF de région de Rhourde Nouss :

V.1) Description et caractéristique du réseau collectes d'usine de CPF de région de Rhourde Nouss :

Le réseau de collecte de l'usine de CPF permettant de collecter le gaz de 34 puits producteurs de différent champs (Rhourde Nouss, Rhourde Al-adra) découverts au sud et sud-est de la région de Rhourde Nouss à travers 5 manifold jusqu'à l'usine de CPF à l'aide de 5 collecteurs de longueurs différentes, comme montrée sur le tableau suivante :

Diamètre (pousse)	Epaisseur (mm)	Nombre de collecteurs	Nombre de manifold	Nombre de puits
De 6.625 à 16	De 3.6 à 6	5	5	34

Figure V.1 : Tableau de description de réseau collectes de CPF

Ce système de tuyauterie de l'usine doit être protégé de l'extérieure par une installation de protection cathodique permanente pendant la durée de fonctionnement de 25 ans de la tuyauterie.

La protection cathodique permanente de système de tuyauterie du l'usine est de type protection cathodique par courant imposé basé sur une source électrique de courant continue qui alimente un certaine nombre d'anode tubulaire d'oxyde métallique mixte, suspendu dans un forage de mise à la terre, rempli avec de la coke de pétrole.

Donc notre but est de calculer les dimensionnes optimale de ce système de protection cathodique par courant imposé afin d'éviter tout problème de corrosion externe.

V.2) Caractéristiques du système de protection cathodique par courant imposé :

V.2.1) Caractéristiques de réseau de l'usine de CPF :

Manifolds	Réf. du puits	Diamètre (pousse)	Longueur(m)	Epaisseur (mm)
M1	RNZ109	6.625	1557	3.6
	RN111		1440	
	RN112		2289	
	RN116		2198	
	RN117		2246	
	RN121		1619	
	RN122		3886	
	RN123		1564	
M2	RNSE101	6.625	1536	
	RNSE102		3794	
	RNSE103		1565	
	RNSE104		1646	
	RNSE105		6764	
	RNSE106		9458	
	RA101		12743	
M3	RA102	6.625	5669	
	RA103		3320	
	RA104		4547	
	RA105		6918	
	RA107		2835	
M4	RNSE108	6.625	5622	
	RNSE107		2496	
	RA106		3267	
	RAS101		2520	
	RAS102		3635	
M5	RN101	6.625	1681	
	RN108		1917	
	RN110		2429	
	RN113		3543	
	RN114		1159	
	RN115		1289	
	RN118		1459	
	RN119		1777	
	RN120		376	

Figure V.2 : Tableau des caractéristiques des canalisations des manifolds et des puits

collecteur	Réf, des tuyauteries	Diamètre (pousse)	Longueur(m)	Epaisseur (mm)
1	TL-1	10.75	3745	4mm
2	TL-2	12.75	12191	5mm
3	TL-3	10.75	13212	4mm
4	TL-4	10.75	3455	4mm
5	TL-5	16	14000	6mm

Figure V.3: Tableau des caractéristiques des collecteurs

Résistivité électrique du matériau	$1.8 \cdot 10^{-7}$ ohm m
Type de revêtement	3LPE (polyéthylène 3 couche)
Résistance initial de revêtement	100000 ohm m ²
Coefficient de vieillissement	0.125
Durée de vie de l'ouvrage	25 ans
Potentiel naturel	-650 mv
Potentiel de protection min	-850mv
Potentiel de protection max	-1150mv

Figure V.4: Tableau des caractéristiques générales du réseau collecte

V.2.2) Résistivité du sol le long de réseau :

Une étude nécessaire de l'environnement le long du tracé choisi pour le réseau collecte, afin d'évaluer les risques de corrosion ou le pouvoir d'agressivité du sol, Et pour cela Une compagnie de mesures de résistivité du sol a été réalisée a trois profondeurs (1m, 2m, 3m).

Pour une meilleure exploitation de ces résultats de mesures l'étude de résistivité du sol s'effectue sur un échantillon de 22 valeurs, comme mentionné sur le tableau ci-dessous :

Emplacement	La résistivité (ohm m)	commentaire
1	53.34	Route compactée
2	113.34	Sable meuble
3	34.34	Sable meuble
4	78.34	Route compactée
5	89.34	Route compactée
6	7.767	Route compactée
7	8.34	Route compactée
8	26.67	Sable meuble
9	23	Route compactée
10	5.434	Route compactée
11	3.267	Route compactée
12	266.67	Sable meuble
13	116.67	Sable meuble
14	370	Sable meuble
15	273.134	Sable meuble
16	89.34	Sable meuble
17	64	compacté
18	600	Sable meuble
19	1500	Sable meuble
20	1863.34	Sable meuble
21	311.67	Sable meuble
22	346.67	Sable meuble

Figure V.5 : Tableau de la variation de la résistivité de sol entre l'emplacement 1 et 22

Les résultats obtenus des mesures de la résistivité de sol sont représentée sous forme d'histogramme :

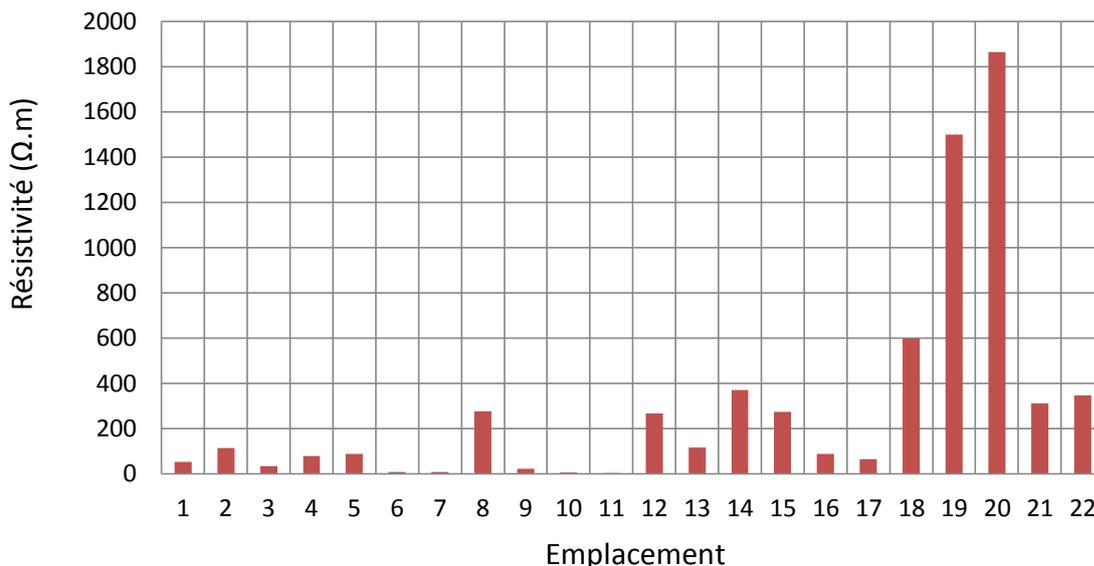


Figure V.7 : La résistivité du sol le long du réseau collecte sous forme histogramme

La mesure de la résistivité le long du réseau collecte dans différent sol permet de connaitre la variation de l'agressivité du sol suivant plusieurs emplacements. Le graphe suivant montre que l'augmentation de la résistivité provoque une diminution de l'agressivité du sol :

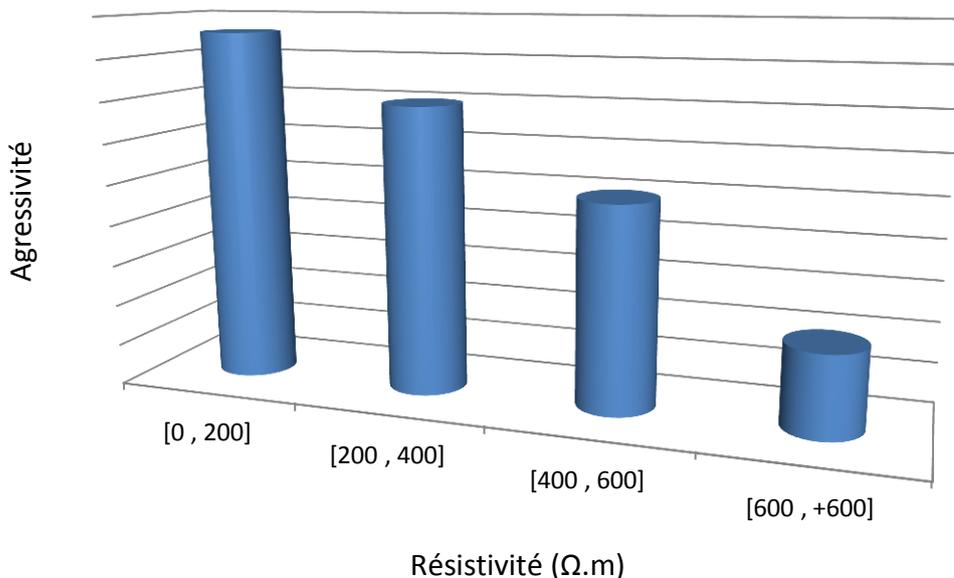


Figure V.8: L'agressivité du sol le long du réseau collecte

V.2.3) Caractéristiques des anodes et les câbles :

On utilise les anodes tubulaires de type d'oxyde métallique mixte (MOO) et des câbles construite de cuivre, les deux ayant des caractéristiques mentionnées dans le tableau suivantes :

Type d'anode	Anode d'oxyde métallique (MOO)
Longueur d'anode	1m
Diamètre d'anode	25mm
Poids unitaire	1.1kg
Consommation massique pratique	0.067kg/A. Ans
Coefficient d'utilisation	0.85
Prix	25€
Distance entre les anodes	3m
Longueur inactive de puit	80m
Longueur de câble (dessus de sol)	3.5m
Section du câble	16mm ²
Résistance par unité de longueur de câble	1.7*10 ⁻⁸ ohm/m
Prix du câble	3€
Distance entre le puits et la structure	300m
Résistivité de backfill	0.5ohm m

Figure V.9: Tableau des caractéristiques des anodes et des câbles

V.3) Dimensionnement du Système de Protection du réseau collectes :

En utilisant la note de calcul exposée dans le chapitre précédent et les données concernant le réseau collectes à protéger et les éléments de protection.

Dans un première temps en fera un calcul ordinaire afin de dimensionner le système de protection et puis on essayera d'optimiser ce système dans le chapitre suivante.

V.3.1) Calcul de la résistivité moyenne du sol : ρ_{sm}

$$\rho_{sm} = \frac{1}{N} * \sum_{k=0}^{n=22} \rho_k = \frac{1}{22} * (6494.672)$$

$$\rho_{sm} = 295.21 \Omega. m$$

V.3.2) Calcul de la Résistance longitudinale des 3 réseaux :

V.3.2.1) Le réseau 1 :

Le réseau 1 contient :

- Manifold M_1 et M_5
- Collecteurs TL_1 et TL_5
- 8 canalisations connecté 8 puits avec le manifold M_1
- 9 canalisations connecté 9 puits avec le manifold M_5

V.3.2.1.1) Résistance longitudinale de la canalisation i : R_{c_i}

Puisque on a toute les canalisations connectées les puits avec les manifolds de mêmes dimensions donc Il suffit de calculer une seul résistance longitudinale de la canalisation 1 :

$$R_{c1} = R_{c2} = R_{c3} = R_{c4} = R_{c5} = R_{c6} = R_{c7} = R_{c8} = R_{c9}$$

$$R_{c1} = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext1} - \delta_1) * \delta_1} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{(\pi * (0.1683 - 0.0036) * 0.0036)}$$

$$R_{c1} = 9.663 * 10^{-5} \Omega/m$$

NB : On prendre la valeur de R_{c1} dans la suite des calcules pour tout les réseaux (les canalisations qui connecte les puits avec le manifold est de mêmes dimensions)

V.3.2.1.2) Résistance longitudinale équivalente du manifold 1 : $R_{c_{eq}}(M_1)$

$$\frac{1}{R_{c_{eq}}(M_1)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{c_i}}\right) = \frac{8}{R_{c1}} = \frac{8}{9.663 * 10^{-5}}$$

$$R_{c_{eq}}(M_1) = 1.21 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.1.3) Résistance longitudinale du collecteur 1 : $R_c(TL_1)$

$$R_c(TL_1) = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext1} - \delta_1) * \delta_1} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{\pi * (0.27305 - 0.004) * 0.004}$$

$$R_c(TL_1) = 5.324 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.1.4) Résistance longitudinale équivalente du manifold 5 : $R_{c_{eq}}(M_5)$

$$\frac{1}{R_{c_{eq}}(M_5)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{c_i}}\right) + \frac{1}{R_{c_{eq}}(M_1) + R_c(TL_1)}$$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_5)} = \frac{9}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_1) + R_c(TL_1)}$$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_5)} = \frac{9}{9.663 * 10^{-5}} + \frac{1}{1.21 * 10^{-5} + 5.324 * 10^{-5}}$$

$$R_{c\text{eq}}(M_5) = 9.221 * 10^{-6} \Omega/m$$

V.3.2.1.5) Résistance longitudinale du collecteur 5 : $R_c(TL_5)$

$$R_c(TL_5) = \frac{\rho_{\text{acier}}}{\pi * (D_{\text{ext}5} - \delta_5) * \delta_5} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{\pi * (0.4064 - 0.006) * 0.006}$$

$$R_c(TL_5) = 2.385 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.1.6) Résistance longitudinale équivalente du réseau 1 : $R_{c\text{eq ré}1}$

$$R_{c\text{eq ré}1} = R_{c1}(TL_5) + R_{c\text{eq}1}(M_5)$$

$$R_{c\text{eq ré}1} = 2.385 * 10^{-5} + 9.221 * 10^{-6}$$

$$R_{c\text{eq ré}1} = 3.31 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.2) Le réseau 2 :

Le réseau 2 contient :

- Manifold M_3
- Collecteurs TL_3
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_3

V.3.2.2.1) Résistance longitudinale équivalente du manifold 3 : $R_{c\text{eq}}(M_3)$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_3)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{ci}} \right) = \frac{5}{R_{c1}} = \frac{5}{9.663 * 10^{-5}}$$

$$R_{c\text{eq}}(M_3) = 1.9326 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.2.2) Résistance longitudinale du collecteur 3 : $R_c(TL_3)$

$$R_c(TL_3) = \frac{\rho_{\text{acier}}}{\pi * (D_{\text{ext}3} - \delta_3) * \delta_3} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{\pi * (0.27305 - 0.004) * 0.004}$$

$$R_c(TL_3) = 5.324 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.2.3) Résistance longitudinale équivalente du réseau 2 : $R_{c\text{eq ré } 2}$

$$R_{c\text{eq ré } 2} = R_{c2} (TL_3) + R_{c\text{eq } 2}(M_3)$$

$$R_{c\text{eq ré } 2} = 5.324 * 10^{-5} + 1.9326 * 10^{-5}$$

$$R_{c\text{eq ré } 2} = 7.2566 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.3) Le réseau 3 :

Le réseau 3 contient :

- Manifold M_4 et M_2
- Collecteurs TL_4 et TL_2
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_4
- 7 canalisations connecté 7 puits avec le manifold M_2

V.3.2.3.1) Résistance longitudinale équivalente du manifold 4 : $R_{c\text{eq}}(M_4)$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_4)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{ci}}\right) = \frac{5}{R_{c1}} = \frac{5}{9.663 * 10^{-5}}$$

$$R_{c\text{eq}}(M_4) = 1.9326 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.3.2) Résistance longitudinale du collecteur 4 : $R_c(TL_4)$

$$R_c(TL_4) = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext4} - \delta_4) * \delta_4} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{\pi * (0.27305 - 0.004) * 0.004}$$

$$R_c(TL_4) = 5.324 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.3.3) Résistance longitudinale équivalente du manifold 2 : $R_{c\text{eq}}(M_2)$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_2)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{ci}}\right) + \frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_4) + R_c(TL_4)}$$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_2)} = \frac{7}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_4) + R_c(TL_4)}$$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}(M_2)} = \frac{7}{9.663 * 10^{-5}} + \frac{1}{1.9326 * 10^{-5} + 5.324 * 10^{-5}}$$

$$R_{c\text{eq}}(M_2) = 1.16 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.3.4) Résistance longitudinale du collecteur 2 : $R_c(TL_2)$

$$R_c(TL_2) = \frac{\rho_{acier}}{\pi * (D_{ext2} - \delta_2) * \delta_2} = \frac{1.8 * 10^{-7}}{\pi * (0.32385 - 0.005) * 0.005}$$

$$R_c(TL_2) = 3.594 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.3.5) Résistance longitudinale équivalente du réseau 3 : $R_{c\text{eq}\text{ré}3}$

$$R_{c\text{eq}\text{ré}3} = R_{c3}(TL_2) + R_{c\text{eq}3}(M_2)$$

$$R_{c\text{eq}\text{ré}3} = 3.594 * 10^{-5} + 1.16 * 10^{-5}$$

$$R_{c\text{eq}\text{ré}3} = 4.754 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.2.4) Résistance longitudinale équivalente du réseau complet : $R_{c\text{eq}}$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{c\text{eq}\text{ré}i}} = \frac{1}{R_{c\text{eq}\text{ré}1}} + \frac{1}{R_{c\text{eq}\text{ré}2}} + \frac{1}{R_{c\text{eq}\text{ré}3}}$$

$$\frac{1}{R_{c\text{eq}}} = \frac{1}{3.31 * 10^{-5}} + \frac{1}{7.2566 * 10^{-5}} + \frac{1}{4.754 * 10^{-5}}$$

$$R_{c\text{eq}} = 1.538 * 10^{-5} \Omega/m$$

V.3.3) Calcul de la résistance transitoire moyenne (conduite/sol) :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{\beta * t} * (1 - e^{-\beta * t}) = \frac{100000}{0.125 * 25} * (1 - e^{-0.125 * 25})$$

$$R_{tm} = 30594.02 \Omega.m^2$$

V.3.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement moyenne des 3 réseaux :

V.3.4.1) Le réseau 1 :

Le réseau 1 contient :

- Manifold M_1 et M_5
- Collecteurs TL_1 et TL_5
- 8 canalisations connecté 8 puits avec le manifold M_1
- 9 canalisations connecté 9 puits avec le manifold M_5

V.3.4.1.1) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement moyenne de la canalisation i : $R_{r m i}$

Puisque on a toute les canalisations connectées les puits avec les manifolds de mêmes dimensions donc Il suffit de calculer une seul résistance d'isolement du revêtement moyenne de la canalisation 1 :

$$R_{r m 1} = R_{r m 2} = R_{r m 3} = R_{r m 4} = R_{r m 5} = R_{r m 6} = R_{r m 7} = R_{r m 8} = R_{r m 9}$$

$$R_{r m 1} = \frac{R_{t m}}{\pi * D_{ext 1}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.1683)}$$

$$R_{r m 1} = 57863.215 \Omega . m$$

NB : On prendre la valeur de $R_{r m 1}$ dans la suite des calculs pour tous les réseaux (les canalisations qui connecte les puits avec le manifold est de mêmes dimensions)

V.3.4.1.2) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold 1 : $R_{r m eq}(M_1)$

$$\frac{1}{R_{r m eq}(M_1)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r m i}} = \frac{8}{R_{r m 1}} = \frac{8}{57863.215}$$

$$R_{r m eq}(M_1) = 7232.902 \Omega . m$$

V.3.4.1.3) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur 1: $R_{r m}(TL_1)$

$$R_{r m}(TL_1) = \frac{R_{t m}}{\pi * D_{ext 1}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{r m}(TL_1) = 35665.186 \Omega . m$$

V.3.4.1.4) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold 5 : $R_{r m eq}(M_5)$

$$\frac{1}{R_{r m eq}(M_5)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{r m i}} \right) + \frac{1}{R_{r m eq}(M_1) + R_{r m}(TL_1)}$$

$$\frac{1}{R_{r m eq}(M_5)} = \frac{9}{R_{r m 1}} + \frac{1}{7232.902 + 35665.186}$$

$$R_{r m eq}(M_5) = 5591.268 \Omega . m$$

V.3.4.1.5) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur 5: $R_{r\ m} (TL_5)$

$$R_{r\ m} (TL_5) = \frac{R_{t\ m}}{\pi * D_{ext\ 5}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.4064)}$$

$$R_{r\ m} (TL_5) = 23962.547 \ \Omega. m$$

V.3.4.1.6) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau 1 : $R_{r\ m\ eq\ ré\ 1}$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 1} = R_{r\ m\ 1} (TL_5) + R_{r\ m\ eq\ 1} (M_5)$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 1} = 23962.547 + 5591.268$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 1} = 29553.268 \ \Omega. m$$

V.3.4.2) Le réseau 2 :

Le réseau 2 contient :

- Manifold M_3
- Collecteurs TL_3
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_1

V.3.4.2.1) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold 3 : $R_{r\ m\ eq} (M_3)$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq} (M_3)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r\ m\ i}} = \frac{5}{R_{r\ m\ 1}} = \frac{5}{57863.215}$$

$$R_{r\ m\ eq} (M_3) = 11572.643 \ \Omega. m$$

V.3.4.2.2) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur 3: $R_{r\ m} (TL_3)$

$$R_{r\ m} (TL_3) = \frac{R_{t\ m}}{\pi * D_{ext\ 3}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{r\ m} (TL_3) = 35665.186 \ \Omega. m$$

V.3.4.2.3) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau 2 : $R_{r\ m\ eq\ ré\ 2}$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 2} = R_{r\ m\ 2} (TL_3) + R_{r\ m\ eq\ 2} (M_3)$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 2} = 35665.186 + 11572.643$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 2} = 47237.829\ \Omega.\ m$$

V.3.4.3) Le réseau 3 :

Le réseau 3 contient :

- Manifold M_4 et M_2
- Collecteurs TL_4 et TL_2
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_4
- 7 canalisations connecté 7 puits avec le manifold M_2

V.3.4.3.1) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold 4 : $R_{r\ m\ eq}(M_4)$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_4)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r\ m\ i}} = \frac{5}{R_{r\ m\ 1}} = \frac{5}{57863.215}$$

$$R_{r\ m\ eq}(M_4) = 11572.643\ \Omega.\ m$$

V.3.4.3.2) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur 4: $R_{r\ m}(TL_4)$

$$R_{r\ m}(TL_4) = \frac{R_{t\ m}}{\pi * D_{ext\ 4}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{r\ m}(TL_4) = 35665.186\ \Omega.\ m$$

V.3.4.3.3) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement de manifold 2 : $R_{r\ m\ eq}(M_2)$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_2)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{r\ m\ i}} \right) + \frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_4) + R_{r\ m}(TL_4)}$$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}(M_2)} = \frac{7}{R_{r\ m\ 1}} + \frac{1}{11572.643 + 35665.186}$$

$$R_{r\ m\ eq}(M_2) = 7035.098\ \Omega.\ m$$

V.3.4.3.4) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne du revêtement du collecteur 2: $R_{r\ m} (TL_2)$

$$R_{r\ m} (TL_2) = \frac{R_{t\ m}}{\pi * D_{ext\ 5}} = \frac{30594.02}{\pi * (0.32385)}$$

$$R_{r\ m} (TL_2) = 30070.67 \ \Omega. m$$

V.3.4.3.5) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau 3 : $R_{r\ m\ eq\ ré\ 3}$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 3} = R_{r\ m\ 3} (TL_2) + R_{r\ m\ eq\ 3} (M_2)$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 3} = 30070.67 + 7035.098$$

$$R_{r\ m\ eq\ ré\ 3} = 37105.768 \ \Omega. m$$

V.3.4.4) Calcul de la Résistance d'isolement moyenne équivalente du revêtement par unité de longueur du réseau complet : $R_{r\ m\ eq}$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{r\ m\ eq\ ré\ i}} = \frac{1}{R_{r\ m\ eq\ ré\ 1}} + \frac{1}{R_{r\ m\ eq\ ré\ 2}} + \frac{1}{R_{r\ m\ eq\ ré\ 3}}$$

$$\frac{1}{R_{r\ m\ eq}} = \frac{1}{29553.268} + \frac{1}{47237.829} + \frac{1}{37105.768}$$

$$R_{r\ m\ eq} = 12201.57 \ \Omega. m$$

V.3.5) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur au début de l'exploitation des 3 réseaux : $R_r (0)$

V.3.5.1) Le réseau 1 :

Le réseau 1 contient :

- Manifold M_1 et M_5
- Collecteurs TL_1 et TL_5
- 8 canalisations connecté 8 puits avec le manifold M_1
- 9 canalisations connecté 9 puits avec le manifold M_5

V.3.5.1.1) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la canalisation au début de l'exploitation : $R_{R_i}(0)$

Puisque on a toute les canalisations connectées les puits avec les manifolds de mêmes dimensions donc Il suffit de calculer une seul résistance d'isolement du revêtement au début de l'exploitation de la canalisation 1 :

$$R_{R_1}(0) = R_{R_2}(0) = R_{R_3}(0) = R_{R_4}(0) = R_{R_5}(0) = R_{R_6}(0) = R_{R_7}(0) = R_{R_8}(0) = R_{R_9}(0)$$

$$R_{R_i}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext i}}$$

$$R_{R_i}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext i}} = \frac{100000}{\pi * (0.1683)}$$

$$R_{R_i}(0) = 189132.4339 \Omega.m$$

NB : On prendre la valeur de $R_{R_i}(0)$ dans la suite des calculs pour tous les réseaux (les canalisations qui connecte les puits avec le manifold est de mêmes dimensions)

V.3.5.1.2) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold 1 au début de l'exploitation : $R_{Req(M_1)}(0)$

$$\frac{1}{R_{Req(M_1)}(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{R_i}(0)} = \frac{8}{R_{R_1}(0)} = \frac{8}{189132.4339}$$

$$R_{Req(M_1)}(0) = 23641.554 \Omega.m$$

V.3.5.1.3) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur 1 au début de l'exploitation : $R_{R(TL_1)}(0)$

$$R_{R(TL_1)}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext 1}} = \frac{100000}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{R(TL_1)}(0) = 116575.677 \Omega.m$$

V.3.5.1.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold 5 au début de l'exploitation : $R_{Req(M_5)}(0)$

$$\frac{1}{R_{Req(M_5)}(0)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{R_i}(0)} \right) + \frac{1}{R_{Req(M_1)}(0) + R_{R(TL_1)}(0)}$$

$$\frac{1}{R_{Req(M_5)}(0)} = \frac{9}{R_{R_1}(0)} + \frac{1}{R_{Req(M_1)}(0) + R_{R(TL_1)}(0)}$$

$$\frac{1}{R_{req(M_5)}(0)} = \frac{9}{189132.4339} + \frac{1}{23641.554 + 116575.677}$$

$$R_{req(M_5)}(0) = 18275.69 \Omega.m$$

V.3.5.1.5) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur 5 au début de l'exploitation : $R_{r(TL_5)}(0)$

$$R_{r(TL_5)}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext 5}} = \frac{100000}{\pi * (0.4064)}$$

$$R_{r(TL_5)}(0) = 78324.283 \Omega.m$$

V.3.5.1.6) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau 1 : $R_{req ré 1}(0)$

$$R_{req ré 1}(0) = R_{r 1(TL_5)}(0) + R_{req 1(M_5)}(0)$$

$$R_{req ré 1}(0) = 78324.283 + 18275.69$$

$$R_{req ré 1}(0) = 96599.973 \Omega.m$$

V.3.5.2) Le réseau 2 :

Le réseau 2 contient :

- Manifold M_3
- Collecteurs TL_3
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_3

V.3.5.2.1) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold 3 au début de l'exploitation : $R_{req(M_3)}(0)$

$$\frac{1}{R_{req(M_3)}(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ri}(0)} = \frac{5}{R_{r 1}(0)} = \frac{5}{189132.4339}$$

$$R_{req(M_3)}(0) = 37826.487 \Omega.m$$

V.3.5.2.2) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur 3 au début de l'exploitation : $R_{r(TL_3)}(0)$

$$R_{r(TL_3)}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext 3}} = \frac{100000}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{r(TL_3)}(0) = 116575.677 \Omega.m$$

V.3.5.2.3) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau 2 : $R_{r \text{ eq ré } 2}(0)$

$$R_{r \text{ eq ré } 2}(0) = R_{r 2(TL_3)}(0) + R_{r \text{ eq } 2(M_3)}(0)$$

$$R_{r \text{ eq ré } 2}(0) = 116575.677 + 37826.487$$

$$R_{r \text{ eq ré } 2}(0) = 154402.164 \Omega.m$$

V.3.5.3) Le réseau 3 :

Le réseau 3 contient :

- Manifold M_4 et M_2
- Collecteurs TL_2 et TL_4
- 5 canalisations connecté 5 puits avec le manifold M_4
- 7 canalisations connecté 7 puits avec le manifold M_2

V.3.5.3.1) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold 4 au début de l'exploitation : $R_{r \text{ eq}(M_4)}(0)$

$$\frac{1}{R_{r \text{ eq}(M_4)}(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{r i}(0)} = \frac{5}{R_{r 1}(0)} = \frac{5}{189132.4339}$$

$$R_{r \text{ eq}(M_4)}(0) = 37826.487 \Omega.m$$

V.3.5.3.2) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur 4 au début de l'exploitation : $R_{r(TL_4)}(0)$

$$R_{r(TL_4)}(0) = \frac{R_{t i}}{\pi * D_{\text{ext } 4}} = \frac{100000}{\pi * (0.27305)}$$

$$R_{r(TL_4)}(0) = 116575.677 \Omega.m$$

V.3.5.3.3) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du manifold 2 au début de l'exploitation : $R_{r \text{ eq}(M_2)}(0)$

$$\frac{1}{R_{r \text{ eq}(M_2)}(0)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{r i}(0)} \right) + \frac{1}{R_{r \text{ eq}(M_4)}(0) + R_{r(TL_4)}(0)}$$

$$\frac{1}{R_{r \text{ eq}(M_2)}(0)} = \frac{7}{R_{r 1}(0)} + \frac{1}{R_{r \text{ eq}(M_4)}(0) + R_{r(TL_4)}(0)}$$

$$\frac{1}{R_{req(M_2)}(0)} = \frac{7}{189132.4339} + \frac{1}{37826.487 + 116575.677}$$

$$R_{req(M_2)}(0) = 22995.01 \Omega.m$$

V.3.5.3.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur du collecteur 2 au début de l'exploitation : $R_{r(TL_2)}(0)$

$$R_{r(TL_2)}(0) = \frac{R_{ti}}{\pi * D_{ext2}} = \frac{100000}{\pi * (0.32385)}$$

$$R_{r(TL_2)}(0) = 98289.296 \Omega.m$$

V.3.5.3.5) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau 3 : $R_{reqré3}(0)$

$$R_{reqré3}(0) = R_{r3(TL_2)}(0) + R_{req3(M_2)}(0)$$

$$R_{reqré3}(0) = 98289.296 + 22995.01$$

$$R_{reqré3}(0) = 121284.306 \Omega.m$$

V.3.5.4) Calcul de la Résistance d'isolement du revêtement équivalente par unité de longueur du réseau complet :

$$\frac{1}{R_{req}(0)} = \sum_{i=1}^{N=3} \frac{1}{R_{reqréi}(0)} = \frac{1}{R_{reqré1}(0)} + \frac{1}{R_{reqré2}(0)} + \frac{1}{R_{reqré3}(0)}$$

$$\frac{1}{R_{req}(0)} = \frac{1}{96599.973} + \frac{1}{154402.164} + \frac{1}{121284.306}$$

$$R_{req}(0) = 39882.502 \Omega.m$$

V.3.6) Calcul de Coefficient d'atténuation : α

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{ceq}}{R_{rmeq}}} = \sqrt{\frac{1.538 * 10^{-5}}{12201.57}}$$

$$\alpha = 3.55 * 10^{-5} 1/m$$

V.3.7) Calcul de la Résistance d'entrée moyenne d'une conduite revêtue : Z_m

$$z_m = \frac{\sqrt{R_{c\text{ eq}} * R_{r\text{ eq}}}}{2} = \frac{\sqrt{1.538 * 10^{-5} * 12201.57}}{2}$$

$$z = 0.216 \Omega$$

V.3.8) Calcul de la Résistance d'entrée d'une conduite revêtue au début de délai de l'exploitation : $z(0)$

$$z(0) = \frac{\sqrt{R_{c\text{ eq}} * R_{r\text{ eq}}(0)}}{2} = \frac{\sqrt{1.538 * 10^{-5} * 39882.502}}{2}$$

$$z(0) = 0.391 \Omega$$

V.3.9) Calcul des Valeurs des potentiels:

$$E_{p\text{ max}} = E_{\text{ max}} - E_{\text{ nat}}$$

$$E_{p\text{ max}} = -1.15 - (-0.65)$$

$$E_{p\text{ max}} = -0.5 \text{ v}$$

$$E_{p\text{ min}} = E_{\text{ min}} - E_{\text{ nat}}$$

$$E_{p\text{ min}} = -0.850 - (-0.65)$$

$$E_{p\text{ min}} = -0.2 \text{ v}$$

V.3.10) Calcul du Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{p\text{ min}}}{E_{p\text{ max}}}\right)^2 * \left(\frac{2 * \pi * y * z + \rho_{ms}}{2 * \pi * y * z}\right)}}$$

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{-0.2}{-0.5}\right)^2 * \left(\frac{2 * \pi * 300 * 0.216 + 295.21}{2 * \pi * 300 * 0.216}\right)}}$$

$$k = 0.54$$

V.3.11) Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage : L_p

$$L_p = \left(\frac{2}{\alpha}\right) * \text{Ln}\left[\frac{2 * \pi * y * z}{k * \left(\frac{E_p \text{ min}}{E_p \text{ max}}\right) * (2 * \pi * y * z + \rho_{sm})}\right]$$

$$L_p = \left(\frac{2}{3.55 * 10^{-5}}\right) * \text{Ln}\left[\frac{2 * \pi * 300 * 0.216}{0.54 * \left(\frac{-0.2}{-0.5}\right) * (2 * \pi * 300 * 0.216 + 295.21)}\right]$$

$$L_p = 55617.626 \text{ m}$$

V.3.12) Calcul du nombre de postes de protection cathodique : N_{ppc}

$$N_{ppc} = \frac{L}{L_p + 1}$$

$$N_{ppc} = \frac{167.439}{55.617626 + 1}$$

$$N_{ppc} = 2.957$$

$$N_{ppc} = 3 \text{ poste}$$

V.3.13) Calcul de l'intensité du courant de protection : I_p

$$I_p = \frac{|E_{\text{max}}|}{z * (1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}) + \frac{\rho_{sm}}{2 * \pi * y}}$$

$$I_p = \frac{|-1.15|}{0.216 * (1 + 2 * e^{-3.55 * 10^{-5} * 55617.626}) + \frac{295.21}{2 * \pi * 300}}$$

$$I_p = 2.658 \text{ A}$$

V.3.14) Calcul de l'intensité du courant de protection au début de l'exploitation :
 $I_p(0)$

$$I_p(0) = \frac{|E_{\text{max}}|}{z(0) * (1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}) + \frac{\rho_{sm}}{2 * \pi * y}}$$

$$I_p(0) = 1.468 \text{ A}$$

V.3.15) Calcul du nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : N_a

$$N_a = \frac{I_p * t * m}{\mu * M_a}$$

$$N_a = \frac{2.658 * 25 * 0.077}{0.85 * 1.1}$$

$$N_a = 5.472$$

$$N_a = 6 \text{ anodes}$$

V.3.16) Calcul de la Résistance de polarisation : R_p

$$R_p = \frac{U_a}{I_a}$$

$$I_a = \frac{I_p + I_p(0)}{2}$$

$$I_a = 2.063 \text{ A}$$

$$R_p = \frac{2}{2.063}$$

$$R_p = 0.969 \Omega$$

V.3.17) Calcul de la Résistance de masse anodique : R_{ma}

$$R_{ma} = \frac{\rho_a * L_a}{S_a}$$

$$S_a = \frac{\pi * D_a^2}{4}$$

$$S_a = \frac{\pi * (0.025)^2}{4}$$

$$S_a = 4.909 * 10^{-4}$$

$$R_{ma} = \frac{0.22 * 10^{-6} * 1}{4.909 * 10^{-5}}$$

$$R_{ma} = 4.4816 * 10^{-3} \Omega$$

V.3.18) Calcul de la Résistance (anode/backfill) : $R_{\text{anode/backfill}}$

$$R_{\text{anode/backfill}} = \frac{\rho_{\text{backfill}}}{2 * \pi * L_{\text{ch}}} * (\text{Ln} \left(\frac{8 * L_{\text{ch}}}{D_a} \right) - 1)$$

1) Calcul De L_{ch}

$$L_{\text{ch}} = (L_a * N_a) + E_a * (N_a - 1)$$

$$L_{\text{ch}} = (1 * 6) + 3 * (6 - 1)$$

$$L_{\text{ch}} = 21 \text{ m}$$

$$R_{\text{anode/backfill}} = \frac{0.5}{2 * \pi * 21} * (\text{Ln} \left(\frac{8 * 21}{0.025} \right) - 1)$$

$$R_{\text{anode/backfill}} = 0.0296 \Omega$$

V.3.19) Calcul de la Résistance (backfill/anode): $R_{\text{backfill/sol}}$

$$R_{\text{backfill/sol}} = \frac{\rho_{\text{sm}}}{2 * \pi * L_{\text{active}}} * (\text{Ln} \left(\frac{8 * L_{\text{active}}}{D_{\text{puit}}} \right) - 1)$$

1) Calcul De L_{active}

$$L_{\text{active}} = L_{\text{ch}} + L_0$$

$$L_{\text{active}} = 21 + 5.5$$

$$L_{\text{active}} = 26.5 \text{ m}$$

$$R_{\text{backfill/sol}} = \frac{295.21}{2 * \pi * 26.5} * (\text{Ln} \left(\frac{8 * 26.5}{0.254} \right) - 1)$$

$$R_{\text{backfill/sol}} = 10.154 \Omega$$

V.3.20) Calcul de la Résistance de puits anodique : $R_{\text{puit anodique}}$

$$R_{\text{puit anodique}} = R_{\text{anode/backfill}} + R_{\text{backfill/sol}}$$

$$R_{\text{puit anodique}} = 0.0296 + 10.154$$

$$R_{\text{puit anodique}} = 10.1836 \Omega$$

V.3.21) Calcul de la Résistance Du Déversoir : $R_{\text{dév}}$

$$R_{\text{dév}} = R_p + R_{\text{ma}} + R_{\text{puit anodique}}$$

$$R_{dév} = 0.969 + 4.4816 * 10^{-3} + 10.1836$$

$$R_{dév} = 11.157 \Omega$$

V.3.22) Calcul de la Résistance des câbles : R_{cable}

$$R_{cable} = \rho_{cable} * L_{cable}$$

$$L_{cable} = (P_d - L_a) * N_a - \left(\frac{N_a * E_a * (N_a - 1)}{2} \right) + L_0 * (N_a + 1)$$

$$P_d = L_{active} + L_{inactive}$$

$$P_d = 26.5 + 80$$

$$P_d = 106.5 \text{ m}$$

$$L_{cable} = (106.5 - 1) * 6 - \left(\frac{6 * 3 * (6 - 1)}{2} \right) + 3.5 * (6 + 1)$$

$$L_{cable} = 612.5 \text{ m}$$

$$R_{cable} = 1.7 * 10^{-8} * 612.5$$

$$R_{cable} = 1.0412 * 10^{-5} \Omega$$

V.3.23) Calcul de la résistance total : R_{tot}

$$R_{tot} = R_{dév} + R_{cable} + z_m$$

$$R_{tot} = 11.157 + 1.0412 * 10^{-5} + 0.216$$

$$R_{tot} = 11.373 \Omega$$

V.3.24) Calcul de la tension du poste de soutirage : U

$$U = \frac{R_{tot} * I_p}{\eta}$$

$$U = \frac{11.373 * 2.658}{0.75}$$

$$U = 40.306 \text{ V}$$

V.3.25) Calcul de la puissance du poste de protection cathodique :

$$P = U * I_p$$

$$P = 40.306 * 2.658$$

$$P = 107.133 \text{ watt}$$

V.4) Conclusion :

Donc l'installation comportera 3 postes de protection, prenant en charge $L_p=55.617\text{Km}$ de conduite chaque un. Chaque poste comportera 6 anodes sacrificielles et nécessitera une intensité de courant de $I_p=2.658\text{A}$. La puissance du poste de protection nécessaire sera $P=107.133\text{W}$.

On remarque tout foie que a résistance du déversoir $R_{\text{dév}}=11.57\Omega$ dépasse largement celle imposée par les conditions de fonctionnement (2Ω). C'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer un calcul d'optimisation afin d'améliorer les paramètres de notre système de protection.

Chapitre VI :
Dimensionnement
optimal du système
de protection
cathodique

Chapitre VI : Dimensionnement optimal du système de protection cathodique :

Dans ce qui suit, on soumettra le calcul réalisé précédemment à une étape d'optimisation. Cette étape portera essentiellement sur la minimisation du coût de l'installation tout en maximisant son efficacité. L'étude se fera sur le réseau de collecte traité et commencera par une analyse de l'influence de certains paramètres sur les caractéristiques du système pour ensuite poser le modèle d'optimisation convenable.

VI.1) Analyse de l'influence de certains paramètres sur le système de PC :

Le cout de l'installation dépend essentiellement des équipements utilisés et particulièrement de la puissance des postes de soutirage, ce qui fait que la minimisation de cette dernière engendre la minimisation du cout de l'installation.

La condition stipulant que la résistance du déversoir, étant relié au poste, ne doit pas dépasser les 2Ω est le paramètre le plus influant, son expression étant :

$$R_{dév} = R_p + R_{ma} + R_{puit\ anodique}$$

Tel que :

$$R_p = \frac{U_a}{I_a}$$

Où :

U_a : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes en [V]

I_a : Moyenne arithmétique entre I_p et $I_p(0)$ en [A]

Et :

$$R_{ma} = \frac{\rho_a * L_a}{S_a}$$

Ou :

L_a : La longueur d'anode [m]

S_a : La section d'anode [m²]

Et :

$$R_{puit\ anodique} = R_{anode/backfill} + R_{backfill/sol}$$

Où :

$$R_{anode/backfill} = \frac{\rho_{backfill}}{2 * \pi * L_{ch}} * \left(\ln \left(\frac{8 * L_{ch}}{D_a} \right) - 1 \right)$$

Où:

ρ_{backfill} : La résistivité du backfill [$\Omega \cdot \text{m}$]

D_a : Diamètre d'anode [m]

L_{ch} : La longueur du chapelet d'anodes [m]

ET:

$$R_{\text{backfill/sol}} = \frac{\rho_{\text{sm}}}{2 * \pi * L_{\text{active}}} * \left(\text{Ln} \left(\frac{8 * L_{\text{active}}}{D_{\text{puit}}} \right) - 1 \right)$$

Où:

D_{puit} : Le diamètre du puits anodique [m]

L_{active} : La longueur active du puits anodique [m]

L'expression de la résistance du déversoir nous montre clairement que sa valeur dépend de la résistivité du sol ($R_{\text{backfill/sol}}$), du nombre d'anode (L_{ch} et L_{active}) et de la distance Y entre la structure et le déversoir (R_p).

C'est donc l'influences de ces paramètres sur les caractéristiques du système qu'on va analyser. Pour, au final, pouvoir poser notre modèle d'optimisation avec ses variables et ses contraintes.

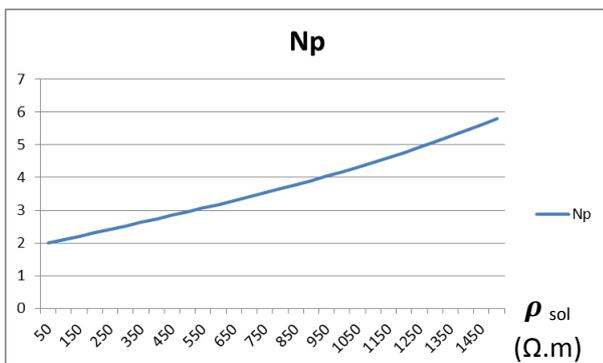
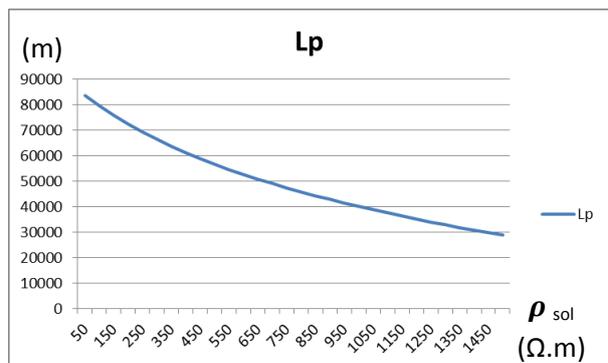
VI.1.1) Influence de la résistivité du sol :

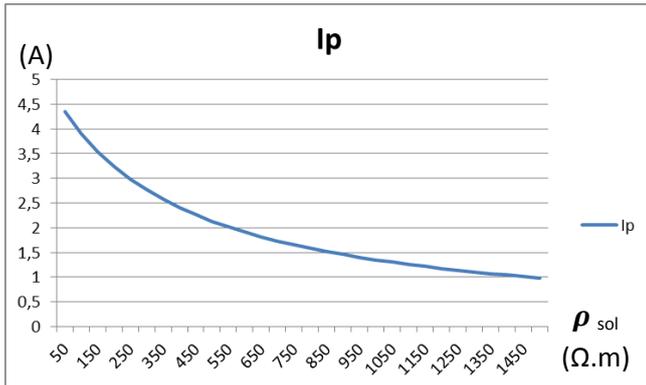
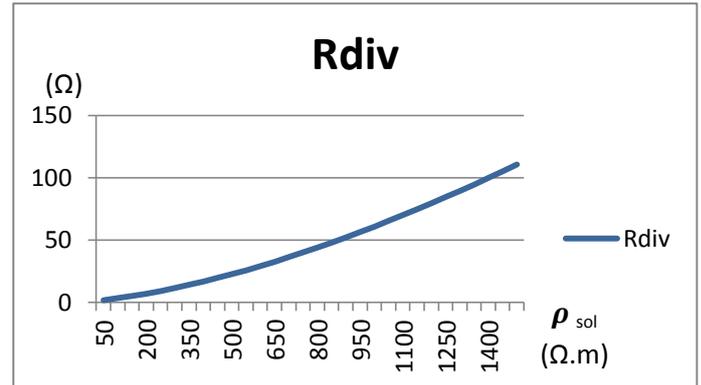
En variant la résistivité du sol tout en gardant le reste des paramètres constants, on obtient les résultats du tableau suivant :

$\rho_{\text{sol}} (\Omega, \text{m})$	Lp (m)	Ip (A)	Np	Na	Rdiv (Ω)	Rtot (Ω)	U (V)	P (W)
50	83615,5934	4,34412466	2,00246139	8,94378606	1,87567909	2,09169586	12,1154501	52,6310254
100	79468,1153	3,90131202	2,10696947	8,03211298	3,42370723	3,63972198	18,9329215	73,8632341
150	75731,375	3,53903756	2,21093026	7,28625379	5,18300264	5,39901579	25,4764262	90,1620291
200	72333,7018	3,23726711	2,31478109	6,66496169	7,14484328	7,36085514	31,7720723	102,854685
250	69220,4866	2,98208854	2,41888766	6,13959406	9,30120821	9,517219	37,8415863	112,846961
300	66349,1932	2,76354181	2,52356462	5,6896449	11,6446716	11,8606815	43,7033191	120,77595
350	63686,062	2,57431026	2,62908972	5,30005053	14,1683215	14,3843306	49,3729731	127,101351
400	61203,8633	2,40889935	2,73571398	4,95949866	16,865695	17,0817035	54,8641393	132,162189
450	58880,3248	2,26310341	2,84366904	4,65933056	19,7307272	19,9467351	60,1886991	136,213251
500	56697,0027	2,13364919	2,95317281	4,39280716	22,757708	22,9737154	65,3571325	139,449193
550	54638,4571	2,01795137	3,06443382	4,15460577	25,941247	26,1572539	70,3787554	142,020906
600	52691,6367	1,91394114	3,17765461	3,94046705	29,2762435	29,49225	75,2619076	144,046861
650	50845,4128	1,81994353	3,29303466	3,74694257	32,7578609	32,9738671	80,0141016	145,621147
700	49090,2219	1,73458811	3,41077271	3,57121082	36,3815047	36,5975106	84,6421426	146,819254
750	47417,7865	1,65674289	3,53106885	3,41094125	40,1428031	40,3588088	89,1522262	147,702317
800	45820,8959	1,58546471	3,65412641	3,26419205	44,0375903	44,2535957	93,5500189	148,320254
850	44293,2318	1,5199615	3,78015361	3,1293325	48,0618912	48,2778963	97,8407249	148,714135
900	42829,2272	1,45956326	3,90936521	3,00498317	52,2119085	52,4279134	102,029141	148,917985
950	41423,9529	1,40369943	4,04198407	2,88996942	56,4840103	56,700015	106,119705	148,96017
1000	40073,0243	1,35188119	4,17824271	2,7832848	60,87472	61,0907246	110,116535	148,864472
1050	38772,524	1,30368727	4,31838488	2,68406203	65,380706	65,5967103	114,023462	148,650935
1100	37518,9387	1,25875277	4,4626672	2,59154983	69,9987729	70,2147771	117,844061	148,336538
1150	36309,1055	1,21676003	4,61136088	2,50509417	74,7258539	74,941858	121,581676	147,935723
1200	35140,1669	1,1774312	4,76475356	2,42412305	79,5590033	79,7750072	125,239443	147,460827
1250	34009,5333	1,14052226	4,92315126	2,34813406	84,4953892	84,711393	128,820306	146,922426
1300	32914,8507	1,10581801	5,08688052	2,27668415	89,5322881	89,7482918	132,327037	146,329621
1350	31853,9729	1,07312796	5,25629077	2,20938109	94,6670787	94,8830822	135,762251	145,690267
1400	30824,938	1,04228284	5,43175686	2,14587643	99,8972364	100,11324	139,128416	145,01116
1450	29825,9481	1,0131318	5,61368195	2,08585958	105,220329	105,436332	142,427868	144,298201
1500	28855,3514	0,98553992	5,80250072	2,02905278	110,634012	110,850015	145,66282	143,556524

Figure VI.1 : Tableau d'influence de la résistivité du sol

L'influence de la résistivité du sol est notamment remarquable dans la variation du nombre de postes et de la longueur de protection, résistance du déversoir et du courant de protection, comme le montrent les graphes suivants :

Figure VI.2 : Variation du $N_p=f(\rho_{\text{sol}})$ Figure VI.3 : Variation du $L_p=f(\rho_{\text{sol}})$

Figure VI.4 : Variation du $I_p = f(\rho_{sol})$ Figure VI.5 : Variation du $R_{div} = f(\rho_{sol})$

-Interprétation des courbes $N_p = f(\rho_{sol})$ et $L_p = f(\rho_{sol})$:

Pour un sol de haute résistivité, le courant trouve des difficultés à passer à travers et donc la portée des postes diminue d'où la diminution de la longueur de protection, d'un autre côté cette diminution de la longueur de protection et la résistivité du sol engendre une augmentation du nombre de poste nécessaires pour protéger toute la structure cathodiquement.

-Interprétation des courbes $I_p = f(\rho_{sol})$ et $R_{div} = f(\rho_{sol})$:

On remarque l'augmentation de la résistance du déversoir, et cela est tout simplement dû au fait que cette dernière est directement calculée à partir de la résistivité du sol et dépend essentiellement d'elle.

Le courant de protection par contre diminue avec l'augmentation de la résistivité du sol et cela pour deux raisons ; la première est la diminution de la longueur de protection et donc de la taille de la structure à protéger et du courant nécessaire pour le faire. La deuxième raison est la diminution de l'agressivité du sol, car l'augmentant de la résistivité du sol signifie la diminution de sa conductivité et donc de son agressivité, ce dont résulte une diminution du courant nécessaire à la protection de la structure.

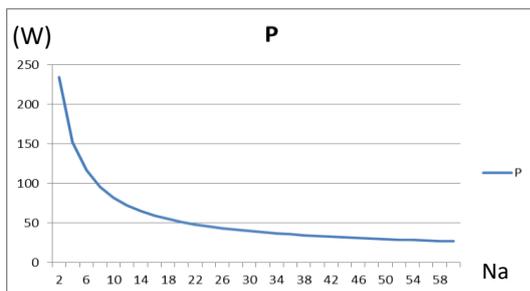
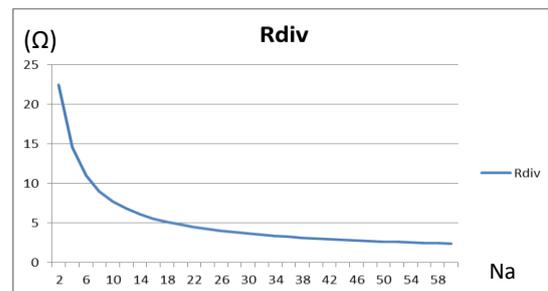
VI.1.2) Influence du nombre d'anodes :

En variant le nombre d'anodes, on obtiendra la variation des paramètres selon le tableau suivant :

Na	Rdiv (Ω)	Rtot (Ω)	U (V)	P (W)
2	22,4636849	22,6796881	84,1600568	234,226607
4	14,5512818	14,7672885	54,7986301	152,510557
6	11,0560971	11,2721075	41,828671	116,413748
8	9,05257737	9,26859191	34,3940014	95,7222527
10	7,74242889	7,95844791	29,5323034	82,1916175
12	6,81387804	7,02990187	26,0866436	72,6019711
14	6,11889969	6,33492866	23,5077288	65,4245702
16	5,57780366	5,79383813	21,4998436	59,8364069
18	5,14372406	5,35976436	19,8890775	55,3534694
20	4,78722378	5,00327025	18,5661949	51,6717429
22	4,48884472	4,70489771	17,4589905	48,5902725
24	4,23518948	4,45124931	16,517749	45,9706949
26	4,01672042	4,23278744	15,7070781	43,7145095
28	3,82645605	4,0425306	15,0010707	41,7496141
30	3,65916397	3,87524639	14,3803105	40,0219707
32	3,51084254	3,72693318	13,8299481	38,4902521
34	3,37837714	3,59447633	13,3384256	37,1222915
36	3,25930596	3,47541403	12,8966078	35,8926645
38	3,15165652	3,36777383	12,4971753	34,7810002
40	3,05382922	3,2699561	12,1341921	33,7707785
42	2,96451266	3,18064945	11,8027919	32,8484556
44	2,88262118	3,09876822	11,498946	32,0028195
46	2,80724802	3,02340565	11,2192897	31,2245056
48	2,73762972	2,95379828	10,9609899	30,5056289
50	2,67311871	2,88929855	10,7216435	29,8395019
52	2,61316202	2,82935347	10,4991986	29,2204134
54	2,55728449	2,77348788	10,2918919	28,6434564
56	2,50507548	2,72129116	10,0981997	28,1043898
58	2,45617822	2,67240653	9,91679802	27,5995292
60	2,41028119	2,62652248	9,74653094	27,1256574

Figure VI.6 : Tableau d'influence du nombre d'anodes

Cette variation, nous intéresse plus au niveau de la puissance du poste. Le graphe suivant montre clairement cette variation :

Figure VI.7 : Variation du $p=f(Na)$ Figure VI.8 : Variation du $R \text{ div}=f(Na)$

-Interprétation de la courbe $P=f(Na)$:

L'augmentation du nombre d'anode provoque une diminution de la résistance du puits anodique et donc de la résistance totale ; ce qui finit par une diminution de la puissance nécessaire aux postes pour assurer la protection.

-Interprétation de la courbe $R_{div}=f(Na)$:

L'augmentation du nombre d'anodes signifie une augmentation dans les profondeurs des puits anodiques et donc l'atteinte de profondeurs humides où la résistivité est moindre, ce qui diminue la résistance du déversoir.

VI.1.3) Influence de la distance entre la structure à protéger et le déversoir « Y »:

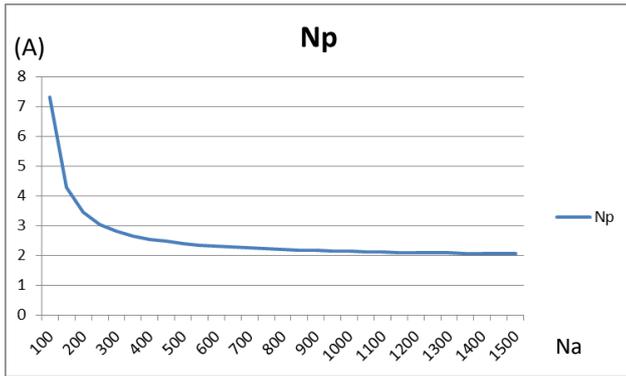
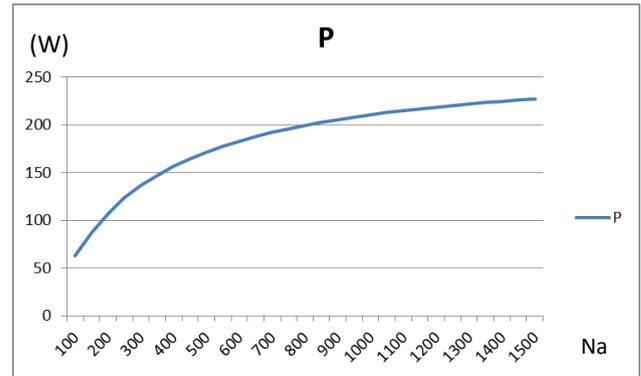
Cette fois ci, on va varier la distance Y entre le déversoir et la structure à fin d'obtenir son influence sur le reste des paramètres.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Y (m)	Lp (m)	Ip (A)	Np	Na	Rtot (Ω)	P (W)
100	22850,3191	1,67677275	7,32732316	3,45217918	16,7088622	62,6374439
150	39078,9533	2,1729784	4,28452406	4,47377906	13,9076833	87,5597166
200	48555,8717	2,55033785	3,44830699	5,25069557	12,3804162	107,366653
250	54872,8297	2,846982	3,05134526	5,86143352	11,4160487	123,374098
300	59415,001	3,08630572	2,81807926	6,35415884	10,7508436	136,53977
350	62849,7757	3,28345929	2,66407213	6,76006324	10,2639059	147,541662
400	65543,239	3,44868614	2,55459522	7,10023616	9,89187088	156,864445
450	67714,5192	3,58916061	2,47268281	7,38944831	9,59827441	164,860907
500	69503,3912	3,71005728	2,40904204	7,63835323	9,36062943	171,792824
550	71003,4651	3,81520234	2,35814747	7,85482834	9,16430674	177,858041
600	72279,9085	3,90748591	2,31650381	8,04482393	8,99937474	183,208625
650	73379,5443	3,98913184	2,28179011	8,2129185	8,8588521	187,96326
700	74336,9125	4,06187922	2,25240385	8,36269252	8,73768699	192,215865
750	75178,067	4,12710764	2,22720242	8,49698632	8,632133	196,041696
800	75923,0411	4,18592553	2,20534889	8,61808197	8,53935273	199,501738
850	76587,4977	4,23923364	2,18621601	8,72783396	8,4571577	202,645923
900	77183,8628	4,28777153	2,16932432	8,82776491	8,38383269	205,515514
950	77722,1234	4,33215207	2,15430097	8,91913661	8,31801432	208,144906
1000	78210,3995	4,37288744	2,1408516	9,00300356	8,25860521	210,562991
1050	78655,3613	4,41040903	2,12874073	9,08025389	8,20471203	212,794215
1100	79062,5407	4,44508272	2,11777766	9,1516409	8,15560022	214,859401
1150	79436,5636	4,4772209	2,10780634	9,21780773	8,11066014	216,776393
1200	79781,3292	4,50709186	2,09869781	9,27930677	8,06938164	218,560569
1250	80100,1473	4,53492735	2,09034459	9,33661513	8,03133453	220,225254
1300	80395,8457	4,56092856	2,08265633	9,39014704	7,99615348	221,782052
1350	80670,8551	4,58527102	2,07555658	9,44026387	7,96352626	223,241111
1400	80927,2765	4,60810856	2,06898018	9,48728233	7,93318443	224,611346
1450	81166,9353	4,62957654	2,06287125	9,53148112	7,9048959	225,900623
1500	81391,4253	4,64979459	2,0571816	9,57310651	7,87845899	227,115906

Figure VI.9 : Tableau d'influence de la distance entre la structure à protéger et le déversoir « Y » :

On va s'intéresser cette fois aux variations au niveau du nombre de postes et de leur puissance. Ces variations sont clairement tracées dans les courbes suivantes :

Figure VI.10 : Variation du $N_p=f(Y)$ Figure VI.11 : Variation du $P=f(Y)$

-Interprétation de la courbe $N_p=f(Y)$:

L'augmentation de la distance Y mène directement à une augmentation de la longueur de protection et cela en permettant aux postes de couvrir des parties plus importantes de la structure. De cette augmentation de la longueur de protection résulte une diminution obligatoire de nombre de poste nécessaires à la protection.

-Interprétation de la courbe $P=f(Y)$:

On remarque qu'à partir de ($Y=300$), la variation du nombre de postes n'est plus vraiment importante, par contre la puissance des postes (P) reflète parfaitement l'influence de la distance (Y), ce qui signifie que si (Y) dépasse les 300mètres, l'optimisation dépendra uniquement de la puissance des postes.

VI.1.4) Conclusion :

Cette étude nous permet de reconnaître les paramètres qui influencent le plus sur l'installation, et sur qui on peut agir à fin d'effectuer notre optimisation. Le premier paramètre étant la résistivité du sol qui peut avoir un impact majeur sur les dimensions du système de protection et qui doit, si possible, être réduite.

La distance « Y » qui touche plusieurs paramètre et le nombre d'anodes qui a une influence particulière sur la résistance du déversoir, sont les paramètres sur lesquels nous allons agir dans le but d'optimiser techniquement et économiquement notre système de protection.

VI.2) Dimensionnement optimal du système de protection cathodique :

Dans cette partie nous allons nous pencher sur l'établissement du système d'équation d'optimisation, et sa résolution à fin d'obtenir les meilleurs paramètres techniques et économiques.

VI.2.1) Modélisation du problème de dimensionnement de notre système :

Dans ce qui suit, nous allons convertir notre cas de dimensionnement en modèle d'optimisation en nous basant sur le calcul de dimensionnement précédemment réalisé et l'étude de sensibilité précédente.

VI.2.1.1) La fonction objective :

Le paramètre sur lequel nous allons nous baser est celui du coût de l'installation. Dans le cas de notre installation, le coût se calcule de la manière suivante :

$$C = \{N_p [C_p + (N_a * C_a) + (L_c * C_c)] \}$$

Tel que:

C: le coût de l'installation

N_p : le nombre de postes

C_p : le coût d'un poste

N_a : le nombre d'anodes

C_a : le coût d'une anode

L_c : la longueur des câbles

C_c : le coût du câble par unité de longueur

Le problème qui va être résolu par Excel doit être non linéaire multi variables avec contraintes. Notre fonction objective étant linéaire doit être rendu non linéaire à fin de la résoudre convenablement. Ce qui nous donne la fonction suivante :

$$F(\min) = C^2$$

$$F(\min) = \{N_p [C_p + (N_a * C_a) + (L_c * C_c)] \}^2$$

VI.2.1.2) Les variables d'état :

Ceux sont tous les paramètres peuvent influencer notre fonction objective. Dans notre cas on distingue :

-Le nombre de poste

-Le nombre d'anode

-La distance « Y »

-La résistance du déversoir

Certains paramètres dont la variation est négligeable ont été évités, tel que le $E_{p_{\min}}$ et le $E_{p_{\max}}$.

VI.2.1.3) Les contraintes :

Elles représentent le côté technique à respecter dans ce cas d'optimisation et se résument aux conditions suivantes :

- $150 < Y < 800$
- $1 < N_p < 10$
- $6 < N_a < 50$
- $0 < R_{div} < 2$
- $N_p = \text{entier}$
- $N_a = \text{entier}$
- $k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{p_{\min}}}{E_{p_{\max}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y \cdot z + \rho_{sm}}{2 \cdot \pi \cdot y \cdot z_m}\right)}}$
- $L_p = \left(\frac{2}{\alpha}\right) * \text{Ln}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y \cdot z}{k \cdot \left(\frac{E_{p_{\min}}}{E_{p_{\max}}}\right) \cdot (2 \cdot \pi \cdot y \cdot z + \rho_{sm})}\right)$
- $N_{ppc} = \frac{L}{L_p + 1}$
- $I_p = \frac{|E_{\max}|}{z \cdot (1 + 2 \cdot e^{-\alpha \cdot L_p}) + \frac{\rho_{sm}}{2 \cdot \pi \cdot y}}$
- $N_a = \frac{I_p \cdot t \cdot m}{\mu \cdot M_a}$
- $R_{dév} = \frac{2 \cdot U_a}{I_p + I_p(0)} + \frac{\rho_a \cdot L_a}{S_a} + R_{\text{puit anodique}}$
- $R_{\text{puit anodique}} = \left[\frac{\rho_{\text{backfill}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{ch}} * \left(\text{Ln}\left(\frac{8 \cdot L_{ch}}{D_a}\right) - 1\right)\right] + \left[\frac{\rho_{sm}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\text{active}}} * \left(\text{Ln}\left(\frac{8 \cdot L_{\text{active}}}{D_{\text{puit}}}\right) - 1\right)\right]$

Tel que :

$$L_{ch} = (L_a * N_a) + E_a * (N_a - 1)$$

$$L_{\text{active}} = L_{ch} + L_0$$

- $L_{\text{cable}} = (P_d - L_a) * N_a - \left(\frac{N_a * E_a * (N_a - 1)}{2}\right) + L_0 * (N_a + 1)$

VI.2.2) Optimisation et résolution du problème :

VI.2.2.1) Ajustement de la résistivité du sol :

En pratique, un arrosage régulier est effectué au niveau des puits anodiques, et ce dans le but de diminuer la résistivité du sol et donc celle du déversoir, ce qui permettrait d'optimiser son rendement tout en minimisant les dépenses liée à ce paramètre (nombre d'anodes élevé, courant nécessaire à la protection et puissance des postes de protection). Théoriquement, il est difficile d'assimiler une résistivité précise à notre cas, mais une valeur approximative peut nous donner des résultats assez proches de ceux réels.

La figure suivante nous montre la résistivité et la conductivité de certains sols :

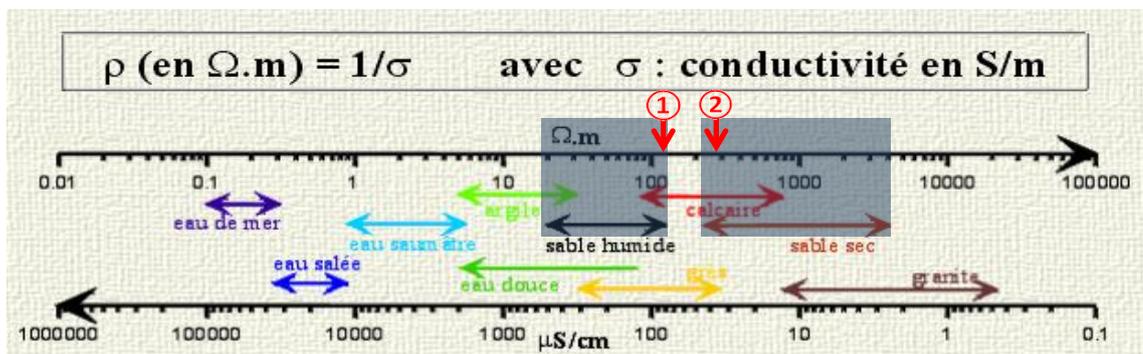


Figure VI.12 : Domaines des résistivités et des conductivités de certains sols

Le point ② représente la valeur de la résistivité du sol mesurée dans notre cas (sable sec, $\rho=295.21\Omega m$), le point ① représente la valeur maximale de la résistivité dans le cas d'un sable humide ($\rho=110\Omega m$, ce qui peut être considéré comme étant le cas le plus défavorable pour un sable humide).

Sachant que le puits anodique est fréquemment arrosé (en été beaucoup plus que qu'il garde une partie de son humidité en hiver), on peut assimiler la moyenne des deux résistivités précédentes au sol entourant le déversoir. On obtient :

$$\rho_{div} = \rho_{sec} + \rho_{hum}$$

$$\Rightarrow \rho_{div} = 202.6\Omega m$$

Cette valeur considérée optimale nous servira de résistivité du sol pour tout calcul concernant le déversoir.

VI.2.2.2) Résolution du problème d'optimisation :

Les résultats :

	1	2	3	4	5	6
F	2,23E+08	3,72E+09	5,43E+09	2,89E+09	2,09E+09	1,51E+09
Y	150	209,13	800	800	800	799
Np	5	4	3	3	3	3
Na	6	29	41	33	29	26
Rdiv	6,997	2	1,4953	1,808	1,9999	2,2225
Lcable	612,5	4504,94	7514,58	5366,654	4504,98	3762,484
C	14937,5	60959,28	73706,22	53774,886	45719,82	38812,356
	7	8	9	10	11	12
F	2,44E+09	2,09E+09	1,78E+09	2,29E+09	2,09E+09	1,28E+09
Y	799	734,6	506,46	506,45	510,05	681,07
Np	3	3	3	3	3	3
Na	31	29	27	30	29	24
Rdiv	1,906	2	2,105	1,943	2	2,34
Lcable	4894,1	4504,95	4125,1	4735,29	4504,95	3436,32
C	49371,9	45719,55	42150,9	47867,61	45719,55	35726,88
	13	14	15	16	17	18
F	1,24E+09	2,09E+09	1,87E+09	1,14E+09	2,09E+09	2,10E+09
Y	598	619,5	397,5	309,68	326,1	189,22
Np	3	3	3	3	3	4
Na	24	29	28	23	29	23
Rdiv	2,36	1,9999	2,711	2,436	1,9999	2,4
Lcable	3386,38	4504,95	4242,76	3223,35	4504,95	3290,7
C	35277,42	45719,55	43284,84	33735,15	45719,55	45788,4

Figure VI.13 : Tableau des résultats finals de l'optimisation

Les solutions colorées étant les meilleurs résultats obtenus par l'optimisation, on remarque que les résistances des déversoirs des solutions 14, 5 et 17 (pour $Y_{14}=619.5m$, $Y_5=800m$ et $Y_{17}=326.1m$ pour : $Rdiv=1.9999\Omega$) sont les plus appréciées.

On constate que la distance Y de la 17^{ème} solution est inférieure aux deux autres. Sur le terrain, éloigner le puits anodique de la structure le rend exposé, augmente le risque d'interférence avec d'autres structures, rend l'installation dispersée et impose plus de contraintes quand il s'agit d'installer d'autre structures ou d'élargir celles existantes et son rapprochement évite les pertes de courant.

Du coup, on va opter pour la solution 17 à fin de rapprocher le puits de la structure

VI.3) Conclusion :

Les caractéristiques optimales seront alors :

$\rho_{sol} (\Omega)$	295,21	Lch (m)	113
$\rho_{sol(div)}(\Omega)$	202,6	Lact (m)	118,5
Y(m)	326,1	Rpa (Ω)	1,97358772
K	0,53870176	Rdiv (Ω)	1,9999
Lp (m)	61318,3433	Lcab (m)	4504,95
Ip (A)	3,19374446	Rcab (Ω)	7,6584E-05
Ip(0) (A)	2,14921574	Rtot (Ω)	2,21597658
Np	3	U (V)	9,43635059
Na	29	P (W)	30,1372925

Figure VI.14 : Tableau des paramètres après l'optimisation

Et la réalisation pratique de notre système de protection cathodique comportera finalement trois postes (24V/6A). Chaque poste sera relié d'un côté à une partie de la structure (dont la longueur est égale à $L_p=61318.3433m$) et de l'autre à un puits anodique contenant 29 anodes et d'une profondeur $P_{puit}=198.5m$. La condition de fonctionnement ($R_{dév} \leq 2\Omega$) est satisfaite, et donc les paramètres de notre installation sont corrects et optimales.

Les puits seront répartis sur toute la surface recouverte par le réseau est alimentés directement par le réseau électrique des stations avoisinantes.

Chapitre VII :
ETUDE ET
MODELISATION DE LA
DISTRIBUTION DU
POTENTIEL ET DU
COURANT SUR LA
SURFACE DU
COLLECTEUR TL₂

VII. 1) ETUDE ET MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DU POTENTIEL ET DU COURANT SUR LA SURFACE DU COLLECTEUR TL₂ :

VII.1.1) Introduction :

Les différentes structures longilignes qu'utilise l'industrie des hydrocarbures sont soumises aux systèmes de protection cathodique par soutirage de courant.

La réussite dans la conception de ces systèmes est basée sur l'étude de la distribution du potentiel et de l'intensité de courant le long de la structure à protéger.

Le contrôle et la maîtrise des distributions de lignes de courant et de potentiel sont à la base de l'étude, dimensionnement et mise en œuvre des techniques de la protection cathodique. Une mauvaise distribution entraîne des risques très importants qui se manifestent souvent par des protubérances (court-circuit), pertes de rendement énergétique, et surtout par des phénomènes de corrosion non uniforme ou localisée de plus en plus intenses. Le potentiel le long de la structure à protéger doit être maintenu dans des limites correspondant au domaine de protection. De plus, la densité de courant, accrue en certains lieux par la géométrie, ne doit pas devenir trop élevée, car une fragilisation par l'hydrogène peut alors se produire.

VII.1.2) Traitement mathématique :

L'intensité du courant de protection « I » émis dans le sol par le déversoir, se répartit dans le sol et retourne au collecteur. Le passage du courant détermine dans le collecteur un abaissement de potentiel. Comme montre le schéma suivant :

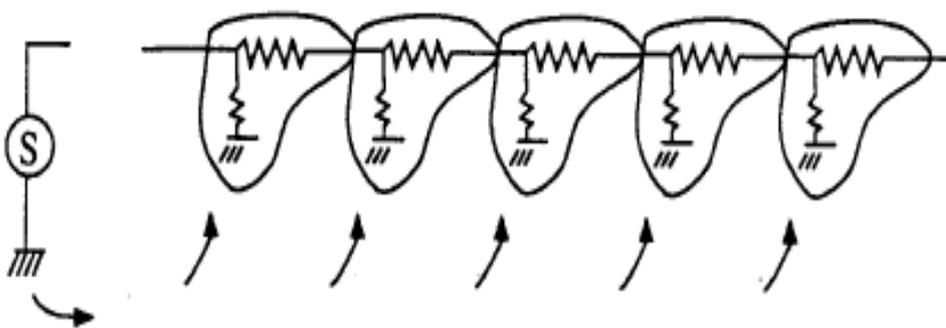


Figure VII.1: Schéma électrique du collecteur traversé par un courant

NB : Vu du point de soutirage tous les éléments du collecteur sont en parallèle

-Le circuit électrique équivalent du collecteur de longueur L et de caractéristiques suivantes :

R_C : Résistance longitudinale ohmique d'un mètre du collecteur (en ohm/m).

R_r : Résistance d'isolement du revêtement donnée par le revêtement du collecteur pour 1 mètre du collecteur (en ohm.m).

Comme montre le circuit électrique suivant :

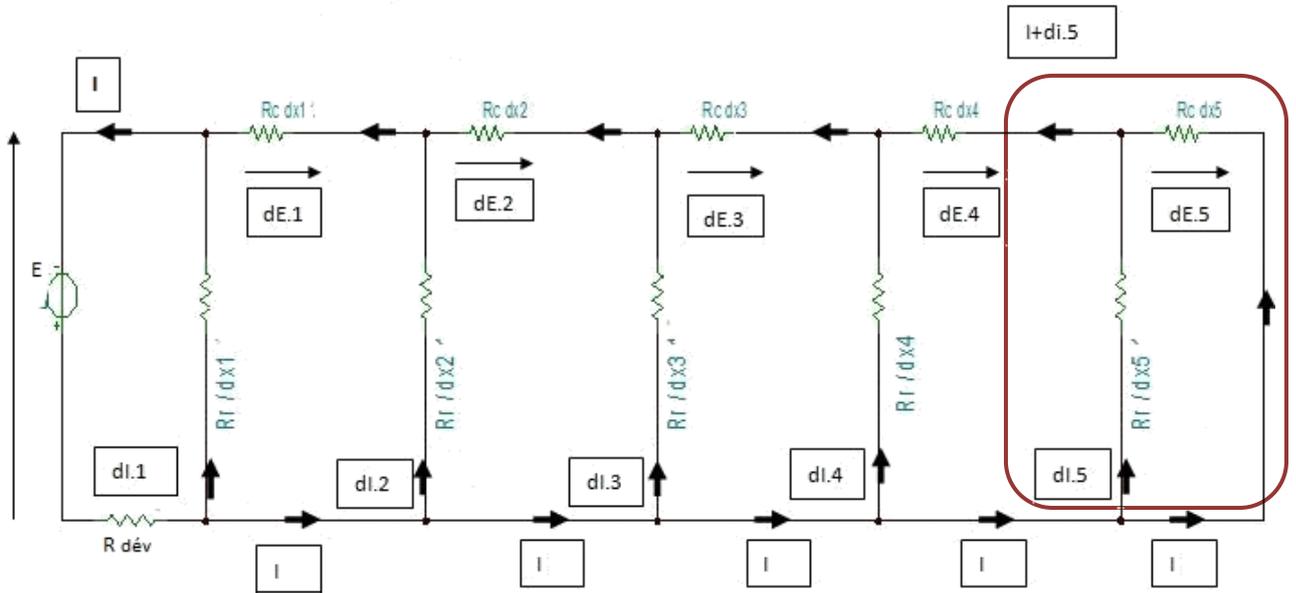


Figure VII.2: Circuit électrique du collecteur traversé par un courant

-Chaque élément AB de longueur dx de conduite, situé à la distance x du point de soutirage est représenté par le schéma ci-contre :

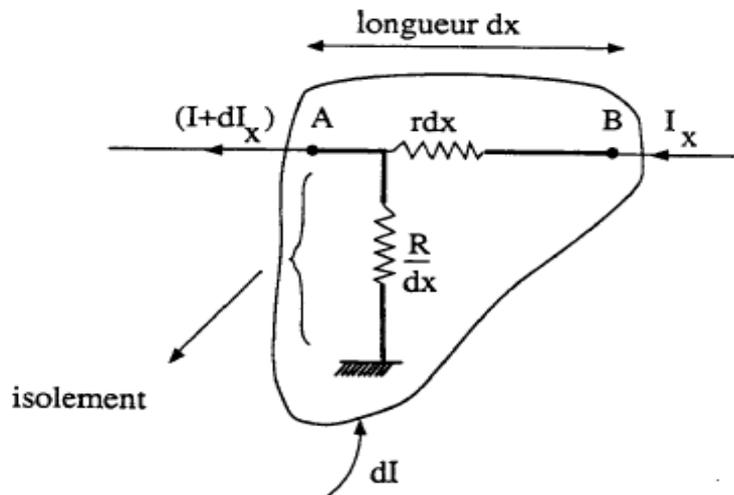


Figure VII.3: Schéma électrique d'une portion du collecteur traversée par un courant électrique

Cet élément dx du collecteur subit une entrée de courant transversale dI . La loi d'ohm permette de déterminer l'intensité du courant transversale dI en fonction du potentiel E du collecteur et de la résistance d'isolement du revêtement $\frac{R_r}{dx}$ à tout point du collecteur par la formule suivant :

$$dI = \frac{E}{\left(\frac{R_r}{dx}\right)}$$

Le courant I_{AB} travers l'élément dx provoque une chute de potentiel de l'élément AB du collecteur donné par la formule suivante :

$$dE = R_c dx * I$$

La résolution de ce système d'équations différentielles conduite, aux limites que l'on s'impose, à diverses expressions du courant et du potentiel en un point x du collecteur, et donc le système d'équation de l'élément AB de longueur dx devient :

$$dI_x = \frac{E_x}{\left(\frac{R_r}{dx}\right)} \quad (1)$$

$$dE_x = R_c dx * I_x \quad (2)$$

L'équation (2) donne :

$$\frac{dE_x}{dx} = R_c * I_x \quad (3)$$

La dérivé deuxième de l'équation(3) par rapport à(dx) donne :

$$\frac{d^2E_x}{dx^2} = R_c * \frac{dI_x}{dx} \quad (4)$$

De l'équation (1) :

$$\frac{dI_x}{dx} = \frac{E_x}{R_r} \quad (5)$$

On remplace l'expression de $\frac{dI_x}{dx}$ dans l'équation (4) :

$$\frac{d^2E_x}{dx^2} = R_c * \frac{E_x}{R_r} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} = \frac{R_c}{R_r} * E_x \quad (7)$$

On sait que :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r}}$$

Alors :

$$\frac{R_c}{R_r} = \alpha^2 \quad (8)$$

On remplace (8) dans l'équation (7) :

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} = \alpha^2 * E_x \quad (9)$$

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} - \alpha^2 * E_x = 0 \quad (10)$$

L'équation (10) est une équation différentielle linéaire d'ordre 2 à coefficient constant, cette équation possède deux solutions.

- La 1^{ère} solution générale de l'équation (10) : E_x

On a :

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} - \alpha^2 * E_x = 0 \quad (10)$$

On peut écrit l'équation (10) sous la forme suivant :

$$E_x'' - \alpha^2 * E_x = 0 \quad (11)$$

On pose :

$$E_x(x) = e^{\lambda * x} \quad (12)$$

Et on calcul la 1^{er} et la 2em dérivé de l'équation (12) :

$$E'_x(x) = \lambda * e^{\lambda * x} \quad (13)$$

$$E''_x(x) = \lambda^2 * e^{\lambda * x} \quad (14)$$

On remplace les équations (12), (14) dans l'équation (11) :

$$\lambda^2 * e^{\lambda * x} - \alpha^2 * e^{\lambda * x} = 0$$

$$e^{\lambda * x} * (\lambda^2 - \alpha^2) = 0$$

$$(\lambda^2 - \alpha^2) = 0$$

$$\lambda^2 = \alpha^2$$

$$\lambda = \pm \alpha$$

Donc : $\lambda_1 = -\alpha$ et $\lambda_2 = +\alpha$

On remplace λ_1 et λ_2 dans l'équation (12) :

$$E_x(x) = C_1 * e^{\lambda_1 * x} \quad \text{Donc} \quad E_{x1}(x) = C_1 * e^{-\alpha * x}$$

$$E_x(x) = C_2 * e^{\lambda_2 * x} \quad \text{Donc} \quad E_{x2}(x) = C_2 * e^{+\alpha * x}$$

$E_{x1}(x)$ Et $E_{x2}(x)$ sont des solutions de l'équation différentielle (10)

- On cherche maintenant de la solution générale de l'équation (10) :

On pose un changement de fonction :

$$U = E'_x - \lambda_1 * E_x \quad \text{Et} \quad U' = \lambda_2 * U \quad U(x) = C_2 * e^{\lambda_2 * x} \quad (15)$$

$$V = E'_x - \lambda_2 * E_x \quad \text{Et} \quad V' = \lambda_1 * U \quad V(x) = C_1 * e^{\lambda_1 * x} \quad (16)$$

On remplace λ_1 et λ_2 dans les équations (15), (16) :

$$E'_x + \alpha * E_x = K_2 * e^{\alpha * x} \quad (17)$$

$$E'_x - \alpha * E_x = K_1 * e^{-\alpha * x} \quad (18)$$

(17) – (18) donne :

$$2 * \alpha * E_x = K_2 * e^{\alpha * x} - K_1 * e^{-\alpha * x}$$

$$E_x = \frac{K_2}{2 * \alpha} * e^{\alpha * x} - \frac{K_1}{2 * \alpha} * e^{-\alpha * x} \quad (19)$$

On pose:

$$\frac{K_2}{2 * \alpha} = B \quad \text{ET} \quad -\frac{K_1}{2 * \alpha} = A$$

Donc :

$$E_x = B * e^{\alpha * x} + A * e^{-\alpha * x} \quad (20)$$

E_x Est la 1^{ère} solution de l'équation (10).

- La 2^{ème} solution générale de l'équation (10) : I_x

De l'équation 2 on a :

$$\frac{dE_x}{dx} = R_c * I_x \quad (21)$$

$$I_x = \frac{1}{R_c} * \frac{dE_x}{dx} \quad (22)$$

On remplace l'expression de E_x dans l'équation (22) :

$$I_x = \frac{1}{R_c} * \frac{d(B * e^{\alpha * x} + A * e^{-\alpha * x})}{dx}$$

$$I_x = -\frac{\alpha}{R_c} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{\alpha}{R_c} * B * e^{\alpha * x}$$

On sait que :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r}}$$

Alors :

$$I_x = -\frac{\sqrt{R_c}}{R_c} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{\sqrt{R_c}}{R_c} * B * e^{\alpha * x}$$

$$I_x = -\frac{R_c^{1/2}}{R_r^{1/2}} * R_c^{-1} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{R_c^{1/2}}{R_r^{1/2}} * R_c^{-1} * B * e^{\alpha * x}$$

$$I_x = -\frac{R_c^{-1/2}}{R_r^{1/2}} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{R_c^{-1/2}}{R_r^{1/2}} * B * e^{\alpha * x}$$

$$I_x = -\frac{1}{\sqrt{R_c * R_r}} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{1}{\sqrt{R_c * R_r}} * B * e^{\alpha * x}$$

On sait que la résistance caractéristique du collecteur est :

$$\lambda = \sqrt{R_c * R_r}$$

Alors

$$I_x = -\frac{1}{\lambda} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{1}{\lambda} * B * e^{\alpha * x} \quad (23)$$

I_x Est la 2em solution de l'équation (10).

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$E_x = B * e^{\alpha * x} + A * e^{-\alpha * x} \quad (24)$$

$$I_x = -\frac{1}{\lambda} * A * e^{-\alpha * x} + \frac{1}{\lambda} * B * e^{\alpha * x} \quad (25)$$

- Détermination des constant A et B :

En appliquant les conditions aux limites suivant :

$E_{x=0} = E_0$: Potentiel maximal

$I_{x=0} = I_0$: Courant de protection

$E_{x=L} = E_L$: Potentiel minimal

$I_{x=L} = 0$: Courant de protection minimal

Lorsque $x=0$ on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{x=0} = E_0 = B * e^0 + A * e^0 \\ I_{x=0} = I_0 = -\frac{1}{\lambda} * A * e^0 + \frac{1}{\lambda} * B * e^0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_0 = B + A \\ I_0 = -\frac{A}{\lambda} + \frac{B}{\lambda} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_0 = B + A \quad (26) \\ I_0 * \lambda = -A + B \quad (27) \end{array} \right.$$

(26) – (27) donne :

$$E_0 - I_0 * \lambda = 2 * A$$

Donc :

$$A = \frac{E_0 - I_0 * \lambda}{2}$$

D'autre part :

(26) + (27) donne :

$$E_0 + I_0 * \lambda = 2 * B$$

Donc :

$$B = \frac{E_0 + I_0 * \lambda}{2}$$

On remplace A et B dans l'équation (24) :

$$E_x = B * e^{\alpha * x} + A * e^{-\alpha * x}$$

$$E_x = \frac{E_0 + I_0 * \lambda}{2} * e^{\alpha * x} + \frac{E_0 - I_0 * \lambda}{2} * e^{-\alpha * x}$$

$$E_x = \frac{E_0}{2} * e^{\alpha * x} + \frac{I_0 * \lambda}{2} * e^{\alpha * x} + \frac{E_0}{2} * e^{-\alpha * x} - \frac{I_0 * \lambda}{2} * e^{-\alpha * x}$$

$$E_x = E_0 * \left(\frac{e^{\alpha*x} + e^{-\alpha*x}}{2} \right) + I_0 * \lambda * \left(\frac{e^{\alpha*x} - e^{-\alpha*x}}{2} \right)$$

$$E_x = E_0 * \left(\frac{e^{\alpha*x} + e^{-\alpha*x}}{2} \right) - I_0 * \lambda * \left(\frac{e^{-\alpha*x} - e^{\alpha*x}}{2} \right)$$

On sait que :

$$\cosh(x) = \left(\frac{e^x + e^{-x}}{2} \right) \text{ Et } \sinh(x) = \left(\frac{e^{-x} - e^x}{2} \right)$$

Alors :

$$E_x = E_0 * \cosh(\alpha * x) - I_0 * \lambda * \sinh(\alpha * x) \quad (28)$$

D'autre part on remplaçant A et B dans l'équation (25) :

$$I_x = -\frac{1}{\lambda} * A * e^{-\alpha*x} + \frac{1}{\lambda} * B * e^{\alpha*x}$$

$$I_x = -\frac{1}{\lambda} * \left(\frac{E_0 - I_0 * \lambda}{2} \right) * e^{-\alpha*x} + \frac{1}{\lambda} * \left(\frac{E_0 + I_0 * \lambda}{2} \right) * e^{\alpha*x}$$

$$I_x = -\frac{1}{\lambda} * \frac{E_0}{2} * e^{-\alpha*x} + \frac{I_0}{2} * e^{-\alpha*x} + \frac{1}{\lambda} * \frac{E_0}{2} * e^{\alpha*x} + \frac{I_0}{2} * e^{\alpha*x}$$

$$I_x = \frac{E_0}{\lambda} * \left(\frac{-e^{-\alpha*x} + e^{\alpha*x}}{2} \right) + I_0 * \left(\frac{e^{-\alpha*x} + e^{\alpha*x}}{2} \right)$$

$$I_x = I_0 * \left(\frac{e^{-\alpha*x} + e^{\alpha*x}}{2} \right) - \frac{E_0}{\lambda} * \left(\frac{e^{-\alpha*x} - e^{\alpha*x}}{2} \right)$$

$$I_x = I_0 * \cosh(\alpha * x) - \frac{E_0}{\lambda} * \sinh(\alpha * x) \quad (29)$$

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$E_x = E_0 * \cosh(\alpha * x) - I_0 * \lambda * \sinh(\alpha * x) \quad (28)$$

$$I_x = I_0 * \cosh(\alpha * x) - \frac{E_0}{\lambda} * \sinh(\alpha * x) \quad (29)$$

Lorsque $x=L$ on a :

$$I_{x=L} = 0 = I_0 * \cosh(\alpha * L) - \frac{E_0}{\lambda} * \sinh(\alpha * L)$$

$$I_0 * \cosh(\alpha * L) = \frac{E_0}{\lambda} \sinh(\alpha * L)$$

$$I_0 = \frac{E_0 * \sinh(\alpha * L)}{\lambda * \cosh(\alpha * L)} \quad (30)$$

On remplace l'expression de I_0 dans (28) :

$$E_x = E_0 * \cosh(\alpha * x) - I_0 * \lambda * \sinh(\alpha * x)$$

$$E_x = E_0 * \cosh(\alpha * x) - \frac{E_0 * \sinh(\alpha * L)}{\lambda * \cosh(\alpha * L)} * \lambda * \sinh(\alpha * x)$$

$$E_x = E_0 * \left(\cosh(\alpha * x) - \frac{\sinh(\alpha * L)}{\cosh(\alpha * L)} * \sinh(\alpha * x) \right)$$

$$E_x = E_0 * \left(\frac{\cosh(\alpha * x) * \cosh(\alpha * L) - \sinh(\alpha * L) * \sinh(\alpha * x)}{\cosh(\alpha * L)} \right)$$

On passe par les équations trianguler et on trouve l'expression de la distribution du potentiel le long du collecteur de la longueur L :

$$E_x = E_0 * \left(\frac{\cosh(\alpha * (L - x))}{\cosh(\alpha * L)} \right) \quad (31)$$

Lorsque $x=L$ on a :

(29) Donne:

$$I_{x=L} = 0 = I_0 * \cosh(\alpha * L) - \frac{E_0}{\lambda} * \sinh(\alpha * L)$$

$$I_0 * \cosh(\alpha * L) = \frac{E_0}{\lambda} \sinh(\alpha * L)$$

$$E_0 = I_0 * \lambda * \left(\frac{\cosh(\alpha * L)}{\sinh(\alpha * L)} \right) \quad (32)$$

On remplace l'expression de E_0 dans (29) :

$$I_x = I_0 * \cosh(\alpha * x) - \frac{E_0}{\lambda} * \sinh(\alpha * x)$$

$$I_x = I_0 * \cosh(\alpha * x) - \frac{1}{\lambda} * I_0 * \lambda * \left(\frac{\cosh(\alpha * L)}{\sinh(\alpha * L)} \right) * \sinh(\alpha * x)$$

$$I_x = I_0 * \left(\cosh(\alpha * x) - \frac{\cosh(\alpha * L)}{\sinh(\alpha * L)} * \sinh(\alpha * x) \right)$$

$$I_x = I_0 * \left(\frac{\cosh(\alpha * x) * \sinh(\alpha * L) - \cosh(\alpha * L) * \sinh(\alpha * x)}{\sinh(\alpha * L)} \right)$$

On passe par les équations trianguler et on trouve l'expression du courant en fonction de la distance :

$$I_x = I_0 * \frac{\sinh(\alpha * (L - x))}{\sinh(\alpha * L)} \quad (33)$$

VII.1.3) Etude de la variation du potentiel et de courant sur la surface du collecteur TL₂ a l'aide de l'outil de programmation « MATLAB 7.9.0 (R2009b) » :

VII.1.3.1) La variation du potentiel E_x le long du collecteur TL₂ :

VII.1.3.1.1) Algorithme de la variation du potentiel E_x en fonction de la distance X :

On présente ci-dessous l'algorithme du programme « MATLAB 7.9.0 (R2009b) » qui permet d'étudier la variation du potentiel de notre collecteur.

VII.1.3.1.2) Le graphe de la variation du potentiel E_x le long du collecteur TL₂:**Interprétation :**

On remarque sur le graphe que la variation du potentiel le long de la longueur de protection se fait entre -850mV et -1150mV, et donc le potentiel du collecteur est dans le domaine d'immunité. De ce fait, on peut dire que notre conduite est protégée.

V.1.3.2) La variation du courant de protection I_x le long du collecteur TL₂:

V.1.3.2.1) Algorithme de la variation du courant de protection I_x en fonction de la distance X:

V.1.3.2.2) Le graphe de la variation du Courant de protection I_x le long du collecteur TL₂:**Interprétation :**

Le courant de protection selon le graphe, diminue de sa valeur nominale (I_p) jusqu'à atteindre une valeur proche du zéro à la fin de la longueur de protection. Ce qui signifie que le courant injecté est suffisant pour la protection du collecteur.

V.1.4) L'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation de potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement :

Il est important de porter attention périodiquement, et dès la pose si possible, aux défauts traversant un revêtement protecteur anticorrosion appliqué sur l'acier des canalisations enterrées protégées cathodiquement.

Pour voir l'influence de la présence d'un défaut sur le revêtement, on va simuler l'impact d'un défaut sur la variation du potentiel le long de la longueur de protection. Pour cela on attribuera deux valeurs au coefficient d'atténuation α (α_1 : cas normal ; α_2 : cas d'un défaut) deux parties du collecteur.

L'algorithme suivant permet de donner le graphe de cette influence.

V.1.4.1) L'algorithme d'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation de potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement :

V.1.4.2) Le graphe de l'influence de coefficient d'atténuation α sur la variation du potentiel dans le cas d'un défaut sur le revêtement :

Interprétation :

On remarque qu'en prenant la valeur de α d'un revêtement intacte, la variation du potentiel ne pose aucun problème (dans le domaine d'immunité). Par contre, l'augmentation du α qui signifie la présence d'un défaut sur le revêtement, engendre une chute de potentiel à partir de l'emplacement du défaut, et qui entraîne notre collecteur dans le domaine de corrosion.

Conclusion

Conclusion

Vu l'importance du secteur de transport comme exposé au début de ce travail, il est tout à fait naturelle de prêter une attention particulière à la préservation et la protection des ouvrages de ce secteurs, spécialement contre des phénomènes dévastateurs tel que la corrosion. Ce travail comporte une idée générale sur le phénomène en question et les principaux moyens de lutte, notamment la protection cathodique par courant imposé.

On a exposé les grandes étapes à suivre et les composants nécessaires pour l'installation de ce genre de système de protection et on a établi les circuits électriques représentatifs du réseau (à l'aide d'EDISON4) et préciser les spécifications de la particularité de notre cas de réseau de collecte, pour ensuite procéder au calcul du dimensionnement de l'installation de protection cathodique par courant imposé.

Les résultats obtenus après dimensionnement n'étant pas applicables dans le cas réel. Une étude de sensibilité a été effectuée afin de définir les paramètres qui influencent sur notre installation. Ces paramètres ont par la suite fait l'objet d'une optimisation (sur Solver d'Excel) pour en fin obtenir des dimensions et des paramètres techniquement et économiquement favorables.

La dernière partie de ce travail était l'exposition d'un modèle mathématique pouvant nous donner la variation du courant et du potentiel le long d'un tronçon de conduite. Dans le monitoring, ce genre de variation sert de point de comparaison pour les mesures réelles, c'est pourquoi on a simulé la présence d'un défaut pour mieux comprendre le comportement du potentiel le long des canalisations en cas de défaillance.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

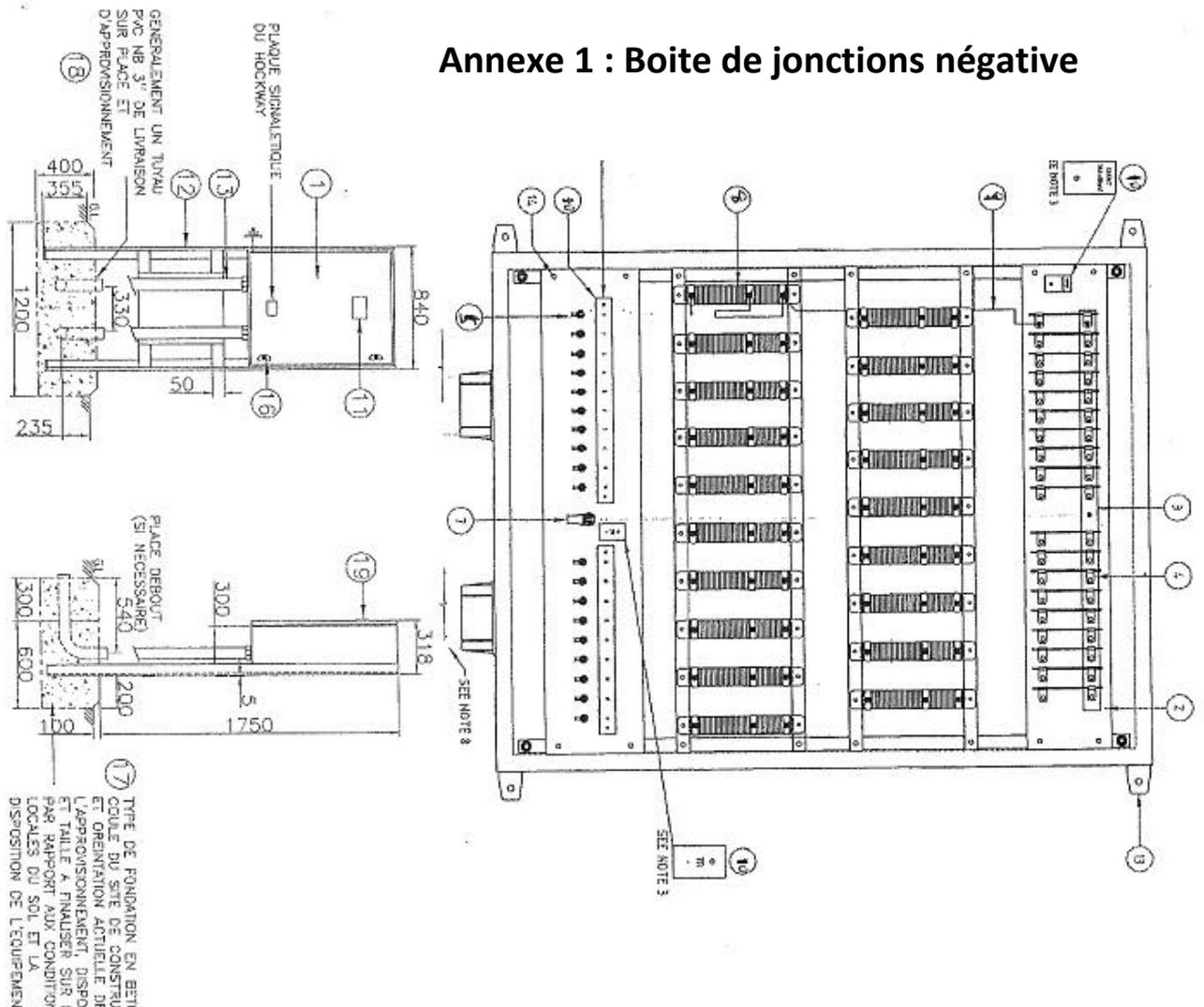
- 1- Protection cathodique manuel d'installation « Wilson Walton », international S.P.A « ITALIA », projet Rhourde Nous.
- 2- Protection cathodique intermédiaire par« Nouredine Kadoum », Nace cathodic protection specialist No 6529.
- 3- Corrosion et protection cathodique « IAP » partie 2
- 4- Creating value through cathodic protection « hoockway », cathodic protection systems.
- 5- Pipeline maintenance limited cathodic protection Enginnering materials supply.
- 6- Système de PC, étude de principe « snamprogetti », IMPIATO, unit Rhourde Nous, traitement.
- 7- Spécification général pour transformateur – redresseur « snamprogetti » SPC N° ZA-E ,96004.
- 8- Mémoire « étude-simulation-et –dimensionnement système PC », Mustapha, université Blida.
- 9- Conception de PC « hoockway » limited, CPF, Rhourde Nous.
- 10- Spécification général pour les anodes en Ferro-silicium « snamprogetti », SPC, N°ZA-E-96002.
- 11- Spécification général pour l'installation de système de PC « snamprogetti », SPC –N°ZA-E-96005.
- 12- Spécification général pour les essais après l'installation et de comissioning sur le système de PC « snamprogetti », SPC-N°ZA-E-96006
- 13- Cathodic protection systems design, presented by Denis I.Rossi, PE new England CP.
- 14- Hand book of corrosion Enginnering, Pierre. R. Ruberg, New York, London, Madrid.
- 15- Mémoire optimisation des méthodes d'inspection des pipelines.
- 16- Article : protection cathodique et lute contre la corrosion.
- 17- Mémoire « Djamel Bouzidi » corrosion et PC des conduites soutirages, Monterial, canada.
- 18- Articl: some recent in corrosion sience and their application to conservation, I.S.T.H «AUSTRALIA».
- 19-Mémoire “mécanique appliquée en Enginnering” évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitations.
- 20- Rapport de recherche, modélisation de la corrosion des conduites d'eau potable en font de la ville de Québec.

- 21- HAL- achive ouvertes apport des techniques électrochimiques pour l'amélioration de l'installation de l'efficacité de la PC des canalisations enterrées « Maud bar Balast »
- 22- Corrosion science and technologie série editor : Brian Ralph.
- 23- UHLIG'S corrosion " handbook third edition-R.winston Revie"
- 24- Galvanic corrosion 10, copyrighted materials.
- 25- Thèse de doctorat université lois Pastor, Strasbourg I, discipline sciences de gestion.
- 26- Articl: cathodic protection of pipeline in presence of intense stray currents, measurement .romote monitoring.
- 27- La protection cathodique de canalisations enterrées par Mehdi Sahoune.
- 28- Articl: corrosion and cathodic protection theory by James Bushman, Enginnering Bushman and associate in medina, Ohio, USA.
- 29- Comite d'étude de la corrosion et de la protection des canalisations -CEOCOR- corrosion par courant alternatif sur les canalisations cathodiquement protégées.
- 30- Articl: a new formula for use in calculating repulsion of coaxial cols. By Dr HB Dwight-Canada.
- 31- Pipeline corrosion and cathodic protection- third edition by Marshall. Parker and Edward's. G Peattie.
- 32- Livre: la protection cathodique des petite navires- galvatest.
- 33- Livre : la protection cathodique contre la corrosion des structures métalliques immergées par F. LEMAIRE.
- 34- Articl: a simplified method for calculating the substation grouding grid résistance .vol.9. N° 02 April 1994.
- 35- Impressed current cathodic protection systems design by James B-PE.USA.
- 36- Corrosion control for metallic structure using cathodic protection by Mohammed Youcef el shazley Cairo Matic, Cairo, EGYBT.
- 37-Risk Assessment and Management (RAM) Based Guidelines for Requalification of Marine Pipelines, Instituto Mexicano de Petroleo (IMP) by Professor Robert Bea Graduate Student Researcher Rune Iversen Marine Technology & Management Group *University of California at Berkeley* And Professor Ahsan Kareem Graduate Student Researcher Xinzhong Chen Department of Civil Engineering and Biological Sciences *University of Notre Dame*.
- 38- Peabody's control of pipeline corrosion second edition a.w. Peabody edited by Ronald I. Bianchetti.
- 39-Cathodic Protection System Application and Maintenance Guide Final Report, December 2005 EPRI Project Manager W. E. Johnson.
- 40- Articl: Deep well anode system design, TAH 12.31.2008 v1.0.

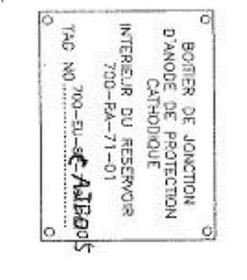
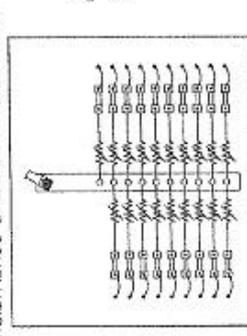
- 41- Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design, Rudolph Frederick Stapelberg, BScEng, MBA, PhD, DBA, Pr Eng Adjunct Professor Centre for Infrastructure and Engineering Management Griffith University Gold Coast Campus Queensland Australia.
- 42- Article: Evaluation of available codes for capacity assessment of corroded pipelines Belachew C. T., Mokhtar C. Ismail, and Saravanan K. Universiti Teknologi PETRONAS, Mechanical Engineering Department Bandar Sri Iskandar, 31750 Tronoh, Feb 2009.
- 43- Offshore standard det norske VERITAS dnv-os-f101 submarine pipeline systems October 2010.
- 44- Analyse des causes d'une corrosion ayant mené au percement d'une canalisation immergée, MATERIAUX 2014, Montpellier.
- 45- Theoretical considerations in the cathodic protection of wire rope m. h. Peterson metallurgy division April 1962.
- 46- Formation Initiation à Matlab Coriandre Vilain GIPSA-Lab Janvier 2014.
- 47- Initiation à Matlab A. Ezziani Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- 48- INITIATION A MATLAB Anne PETRENKO (COM, Marseille) Edition Avril 2004.
- 49- Université Mohammed V- Agdal Faculté des Sciences Département de Mathématiques Module Analyse 2 : Equations différentielles. Hamza BOUJEMAA.
- 50- Équations différentielles Philippe Fortin (Lycée Louis Barthou – Pau) / Roland Pomès (Lycée René Cassin – Bayonne).
- 51- Résolution des Equations Différentielles Ordinaires Frédéric Gouaisbaut Ver 1.2. EQUATIONS DIFFÉRENTIELLES ET MÉTHODES NUMÉRIQUES POUR INGÉNIEURS par Rémi VAILLANCOURT Notes pour le cours MAT 2784 B HIVER 2012.
- 52- Introduction aux équations différentielles et aux dérivées partielles Université Claude Bernard, Lyon I Licence Sciences, Technologies & Santé 43, boulevard 11 novembre 1918 Spécialité Mathématiques 69622 Villeurbanne cedex, France L. Pujo-Menjouet.
- 53- Université Paris XI Equations Différentielles Cours et Exercices Jean-Luc Raimbault 2007.

Annexes

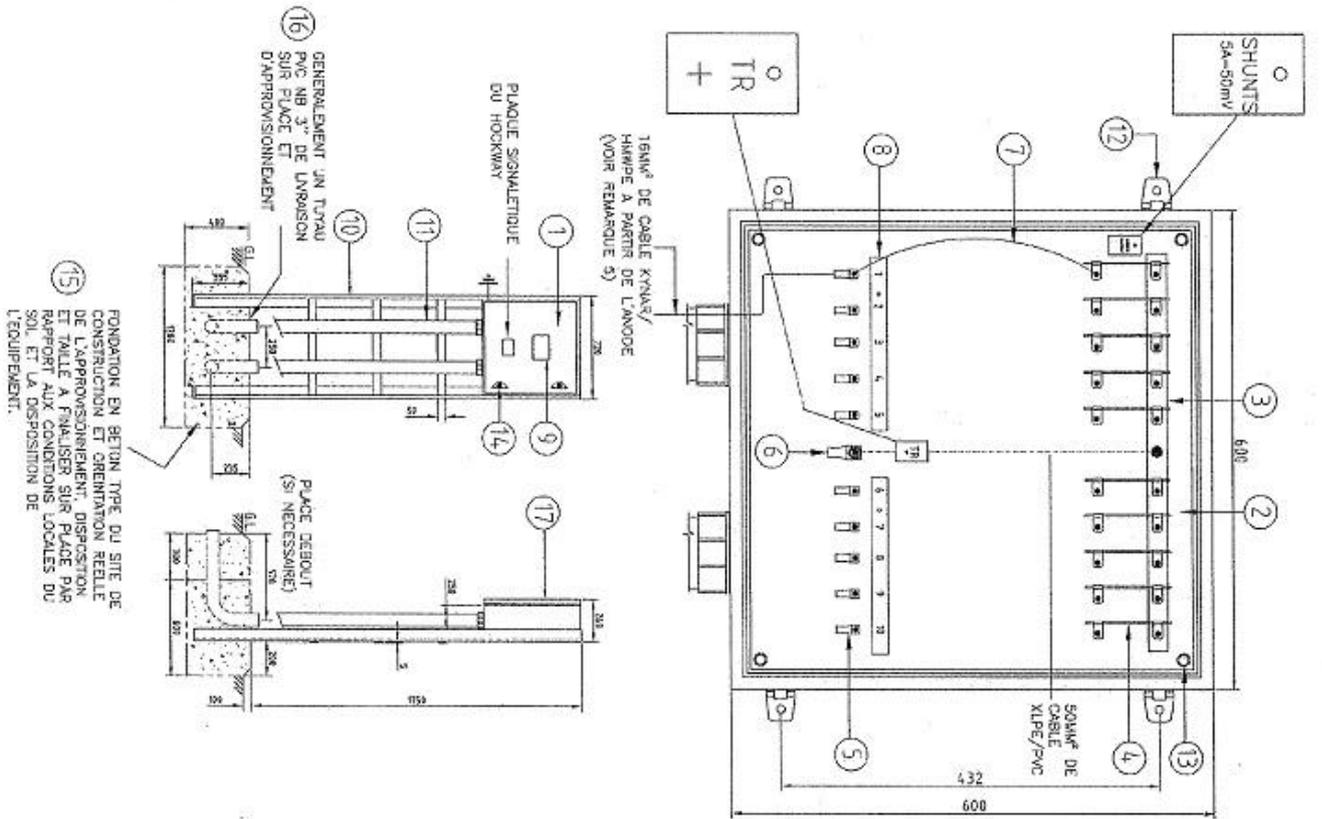
Annexe 1 : Boite de jonctions négative



ITEM	DESCRIPTION	QTE	FURNI PAR
1	ENCLOS DE TOLE D'ACIER EN CARBONE VERNI, PORTE VERROUILLABLE A CHARNIERE JOINTE EN POLYCHLOROPRENE & GALUON DE TERRE INTERNE DE CLASSE IP68 DE TAILLE 600CH x 600CH x 300D	1	HOCKWAY
2	PANNEAU ISOLANT PHENOLIQUE D'UNE EPaisseur DE 6MM	1	HOCKWAY
3	BARRE DE RACCORDEMENT EN CUIVRE ADAPTEE AU COURANT 150A	1	HOCKWAY
4	CLASSE 1,5 DU B989 SHUNT PAR FIL CLASSEE 20A-50mV	19	HOCKWAY
5	TERMINAL DE SORTIE EN CUIVRE M8, CONTRE-ECROUS, RONDELLES ELASTIQUES ET RONDELLES	10	HOCKWAY
6	TERMINAL DE SORTIE EN CUIVRE M8, CONTRE-ECROUS, RONDELLES ELASTIQUES, RONDELLES ET OREILLE DE CROSSE DE CABLE EN CUIVRE ELARGIE ADAPTEE AU 18MM	19	HOCKWAY
7	TERMINAL D'ENTREE EN CUIVRE M10, CONTRE-ECROUS, RONDELLES ELASTIQUES, RONDELLES ET OREILLE DE CROSSE DE CABLE EN CUIVRE ELARGIE ADAPTEE AU 35MM	1	HOCKWAY
8	QUARRÉ LA BOBINE DE RESISTANCE CLASSEE DE TYPE PH2000 DE 0,5 OHM A 100 WATT, AUSTEMENT DE BLOCAGE	19	HOCKWAY
9	4MM² DE HAUTE TEMP. INTERNE CABLE DE CONNEXION EN SILICONE DE GRADE 300/500V D'UNE TEMPERATURE DE 180° CLASSE 24 AMPS (CABLE D'ENTREE 25MM² CLASSE 90 AMPS)	BEAUCOUP	HOCKWAY
10	ETIQUETTE DE TRAFOLYTE GRAVEE INTERNE W/S/W (VOIR REMARQUE 3)	2	HOCKWAY
11	ETIQUETTE D'IDENTIFICATION DU TRAFOLYTE GRAVEE W/S/W (VOIR REMARQUE 3)	1	HOCKWAY
12	CADRE D'ACIER DE SoudURE LEGERE A GALVANISATION PAR IMERSION A CHAUD COMPOSE DE 2Mm DES ANDES VERTICAUX 50 x 50 x 5MM PAR 2m DE LONG ET 2Mm 50 x 50 x 5mm DE FIXATIONS DE BOTIERE ST PLAT	1	HOCKWAY
13	CANAL GALVANISE 3" DE 2M DE LONG, RACCORDE DE CANAL PLAQUE EN ZINC NPT 3", ANNEAU DETRANCHETE "O" BLANK ET LONGUEUR DU CANAL DU COL SOLANT PLASTIQUE ADAPTEE SUR PLACE	2	HOCKWAY
14	MONTAGE DES OREILLES	4	HOCKWAY
15	SUPPORTS D'ISOLATION	4	HOCKWAY
16	PORTE A CHARNIERE VERROUILLABLE	2	HOCKWAY
17	FONDATION A BETON	ASB	HOCKWAY
18	TUYAU UPVC NB 3"	2	HOCKWAY
19	DIAGRAMME DU CIRCUIT ENCAPSULE	1	HOCKWAY



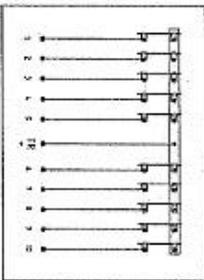
Annexe 2 : Boite de jonctions positive



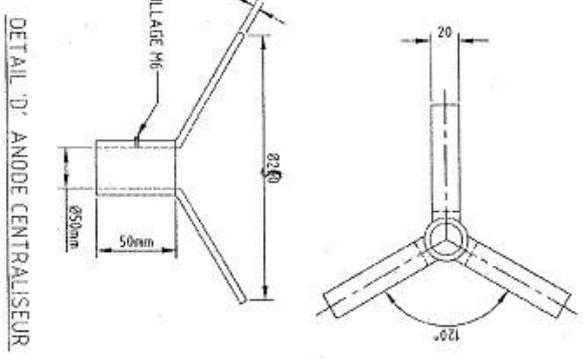
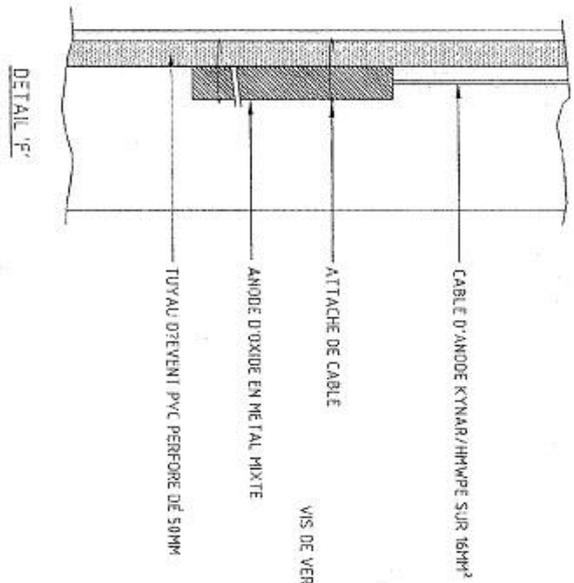
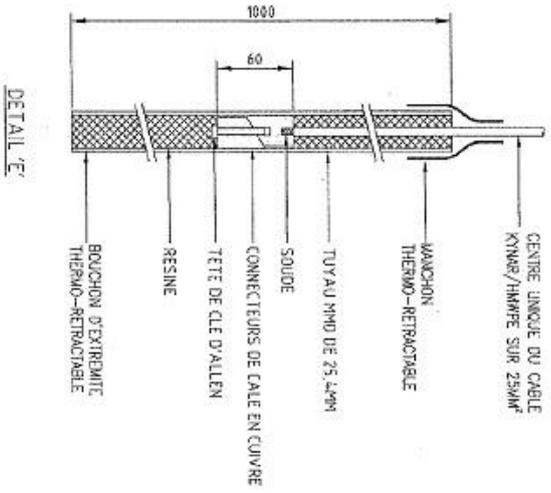
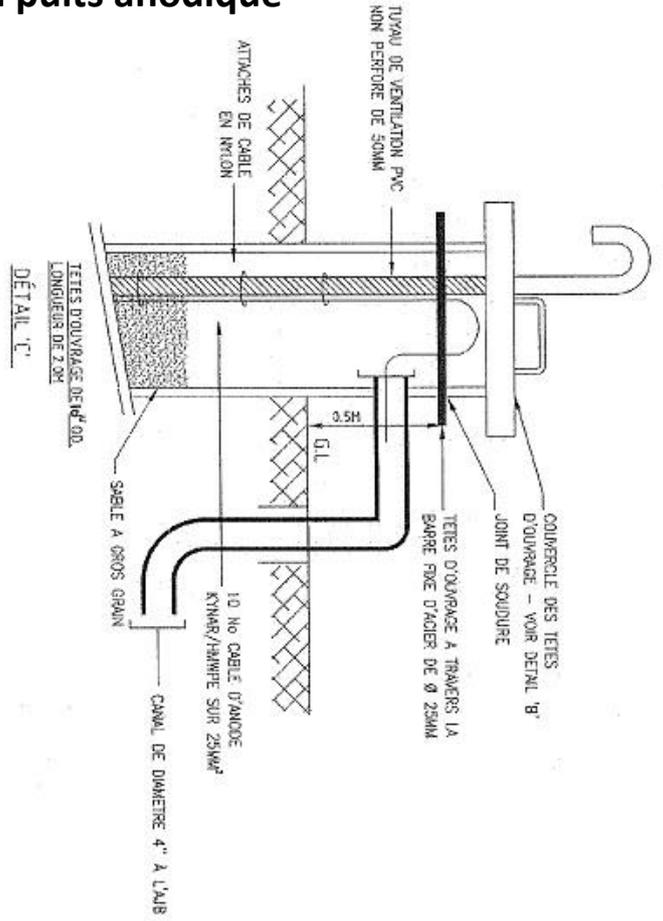
LISTE DE MATERIEL

ITEM	DESCRIPTION	QTE	FOURNI PAR
1	ENCLOS DE TOLE D'ACIER EN CARBONE VERNI, PORTE VERROUILLABLE A CHARNIERE JOINTE EN POLYCHLOROPRENE & GALVON DE TERRE INTERNE DE CLASSE IP68 DE TAILLE 600H x 900 larg. x 250D	1	HOCKWAY
2	PANNEAU ISOLANT FRIENOLIQUE D'UNE EMISSION DE 6MM	1	HOCKWAY
3	BARRÉ DE RACCORDEMENT EN CUIVRE ADAPTER AU COURANT 100 A	1	HOCKWAY
4	FL SHUNT 500V DE CLASSE 1.5 CLASSE 5A-50mV	10	HOCKWAY
5	TERMINAL DE SORTIE EN CUIVRE M8, CONTRE-ECROUS, RONDELLES ELASTIQUES, RONDELLES ET OREILLE DE COSSE DE CABLE EN CUIVRE ELARGIE ADAPTEE AU 16MM²	10	HOCKWAY
6	TERMINAL DE SORTIE EN CUIVRE M10, CONTRE-ECROUS, RONDELLES ELASTIQUES, RONDELLES ET OREILLE DE COSSE DE CABLE EN CUIVRE ELARGIE ADAPTEE AU 50MM²	1	HOCKWAY
7	4MM² DE HAUTE TEMP. INTERNE CABLE DE CONNEXION EN SILICONE DE GRADE 300/500V D'UNE TEMPERATURE DE 180°C CLASSE 24 AMPS (CABLE D'ENTREE 25MM² CLASSE 50 AMP/51)	BEAUCOUP	HOCKWAY
8	ETIQUETTE DE TRAFOLYTE GRAVEE INTERNE W/3/W (VOIR REMARQUE 3)	3	HOCKWAY
8	ETIQUETTE D'IDENTIFICATION DE TRAFOLYTE GRAVEE W/3/W (VOIR REMARQUE 3)	1	HOCKWAY
10	CADRE D'ACIER DE Soudure, LEDERE A GALVANISATION PAR IMMERSION A CHAUD COMPOSE DE 2 N° DES ANGLES VERTICAUX 50 x 50 x 5MM PAR 2M DE LONG ET 3N° 50x40mm DE FIXATIONS DE BOUTES 5T PLAT	1	HOCKWAY
11	CANAL GALVANISE 3" DE 2M DE LONG, RACCORD DE CANAL, PLAQUE DE ZINC NPT 3", BAGUE D'ETANCHÉITE 'O' ISOLANT PLASTIQUE ADAPTEE SUR PLACE	2	HOCKWAY
12	MONTAGE DES OREILLES	4	HOCKWAY
13	SUPPORTS D'ISOLATION	4	HOCKWAY
14	PORTE A CHARNIERE VERROUILLABLE	2	HOCKWAY
15	FOUNDATION A BETON	ASB	FOURNITURE SUR PLACE
16	TUYAU UPVC NB 3"	2	HOCKWAY
17	DIAGRAMME DU CIRCUIT ENCAPSULE	1	HOCKWAY

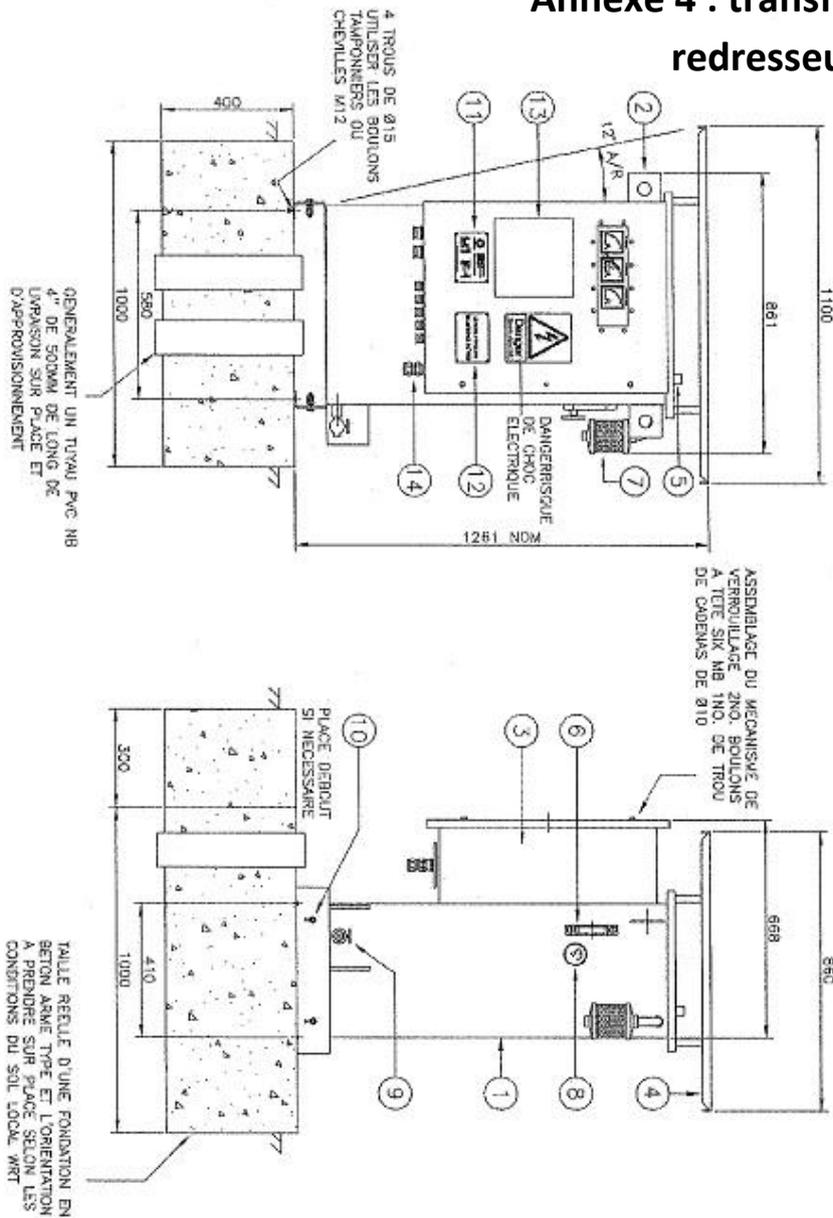
DIAGRAMME DU CIRCUIT SCHEMATIQUE



Annexe 3 : Composants du puits anodique

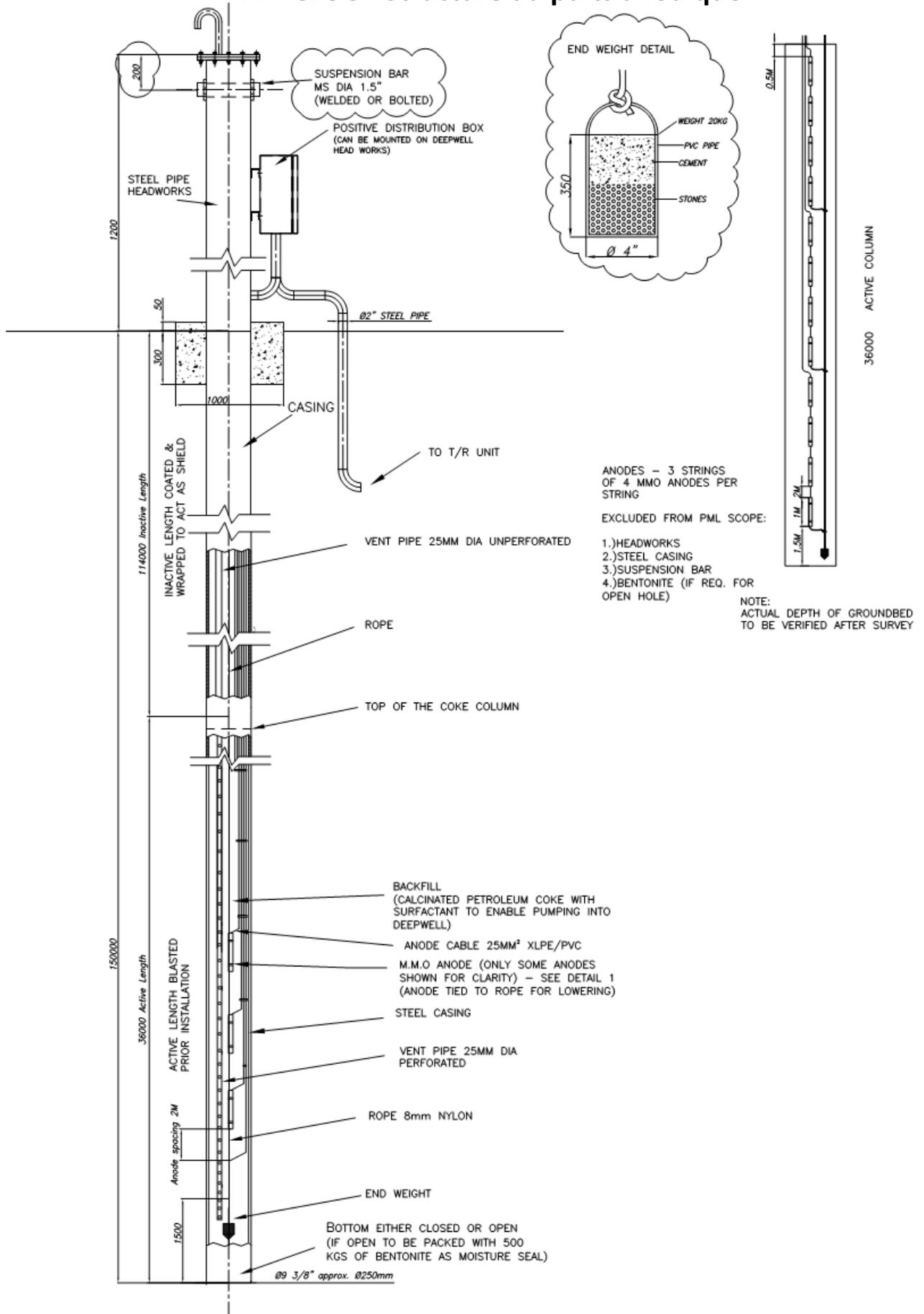


Annexe 4 : transformateur redresseur

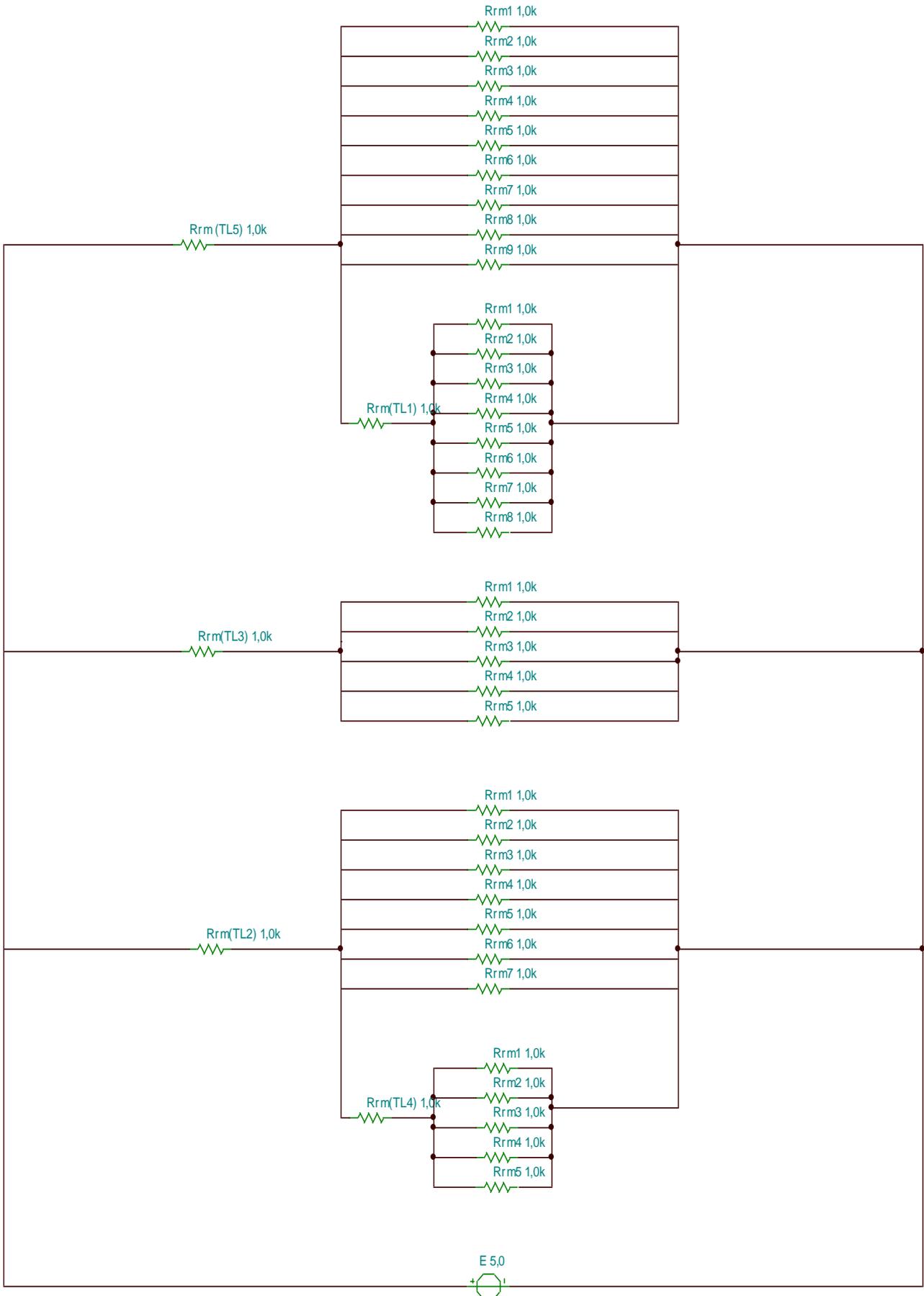


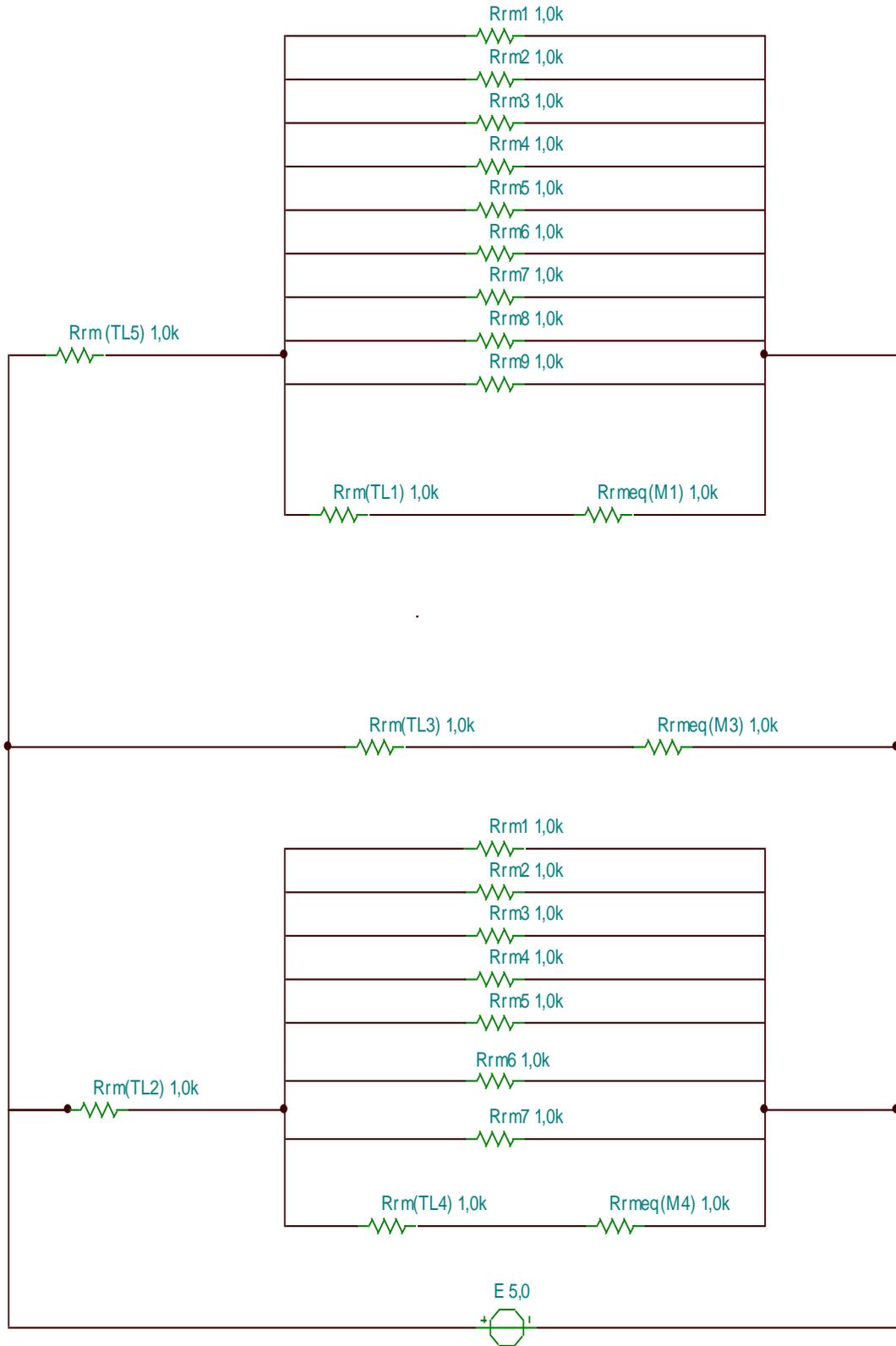
ITEM	DESCRIPTION
1	RESERVOIR DU TRANSFORMATEUR REDRESSEUR FABRIQUE A L'AIDE D'UN ACIER LEGER D'AU MOINS 3mm D'ÉPAISSEUR EQUIPE D'UN JOINT EPDM A UNE SEULE PIÈCE A CONVERGENCE VISSE SECURISE AVEC DES FIXATIONS EN ACIER INOXIDABLE. CLASSE IP66
2	OREILLES D'ELEVATION. TESTE POUR SOULEVER JUSQU'A 1500kg CERTIFICAT NO: T028A04
3	CUBICULE DE SORTIE ET DE CONTRÔLE FABRIQUE A L'AIDE D'UNE FEUILLE D'ACIER D'AU MOINS 3mm D'ACIER LEGER AVEC UN JOINT EPDM EN UNE SEULE PIÈCE EQUIPEE D'UNE PORTE CADREASSABLE, ZNO, AUX CHARNIÈRES SOUDÉES DE BOUT EN BOUT, AVEC UNE OUVRETURE MINIMALE DE LA PORTE DE 120° A 150°, AVEC DES BROCHES DE CHARNIÈRE EN ACIER INOXIDABLE DE 6mm DE DIA UNE PIÈCE UNIQUE MOBILE ET UN JOINT EPDM. PIQUE A SORTE ÉTRANCHE VISSE FOURNI NON PERFORE SELON LA NORME ET CLASSE IP68.
4	PARASOUIL FABRIQUE A PARTIR D'UNE FEUILLE EN ACIER LEGER, BOUTER PLAT FOURNI POUR UN ASSEMBLAGE SUR PLACE, COMPRESSEUR: 1100. COLVERCLE DU PARASOUIL 400. JEU DE VIS DE RONDELETS A TÊTE SIX EN ACIER INOXIDABLE & RONDELETS ELASTIQUE DE M8 x 16. 4 NO. SEPARATEURS ISOLANTS, Ø20 X 100.0g.
5	REMPLISSAGE D'HUILE 1" TUYAU BSP 1" PRISE EN ACIER BSP.
6	JAUGE DU NIVEAU D'HUILE. POLYMERE TRANSPARENT A BASE DE TECHNOLOGIE HAUTEMENT RESISTANT AUX CHOC. SOLVANTS, HUILES RAVIN DES ADHESIFS, LES ALIPHATIQUES & LES HYDROCARBONES AROMATIQUES. (VOIR REMARQUE 6)
7	REINFILAGE DE GEL EN SILICE, SCRYAN EN ACIER LEGER ENVELOPPER DE POLYETHYLENE/POLYCARBONATE DE HAUTE RESISTANCE & PLAQUES D'EXTRÊME POUR MOUAQE SOUTS PRESSION AVEC 3/4" LE DESERVANT D'ENTREE BSP DE COULEUR ORANGE SOIERE SE CHANGENT EN JAUNE PALE LORSQU'IL EST SATURE.
8	THERMOMETRE DE TYPE CADRAN, UNE BALANCE A CADRAN DE 63mm OSCILLANT DE -40 A 120°C ET LA LIGNE ROUGE A 85°C. 1/2" DE MALE BSP AVEC UNE DOUILLE DE CUIVRE DE 50mm DE LONG.
9	TYPE DE VANNIE DE CUIVRE LOURD DU ROBIET A VANNIE, BSP 1/2", EQUIPE D'UNE PRISE BSP 1/2" DE RESERVE.
10	1 NO. GAULON DE TERRE M10 D'OREILLE DE COSSE DE CABLE ELARGI POSITIONNEE DANS DES ANOLES DIAGONALEMENT OPPOSES. SEUL 1100 EST EQUIPE COMME STANDARD.
11	PLAQUE DE CLASSEMENT « ORANGE & PEINTE » EN ACIER INOXIDABLE DE CLASSE 316.
12	ETIQUETTE D'IDENTIFICATION, BMB GRAYE DE TRAFOLYTE. (VOIR REMARQUE 8)
13	CLASSEUR DE DOCUMENT M4. (VOIR REMARQUE 7)
14	COMPRESSEUR DES BOTTES ÉTRANGLES EN CUIVRE, CONTRE-ÉCROUS EN CUIVRE, RONDELES IP & QUINTE ET TAILLE (PARSON) PVC, ADAPTE AU CA ET CC ET SURVEILLANCE DE LA QTE ACTUELLE DES CABLES POUR RESPONDE AUX EXIGENCES DU PROJET

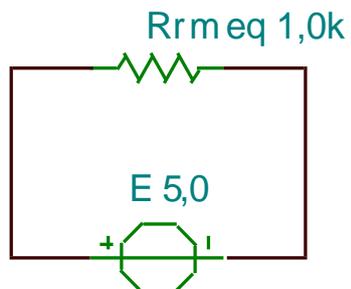
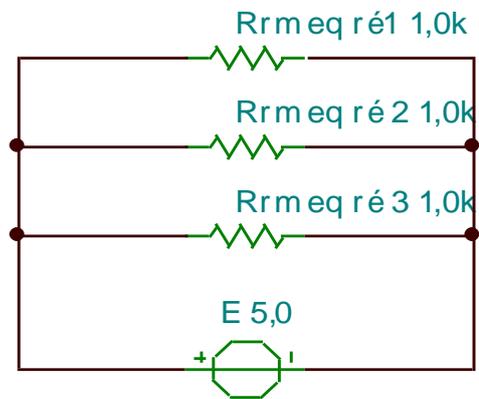
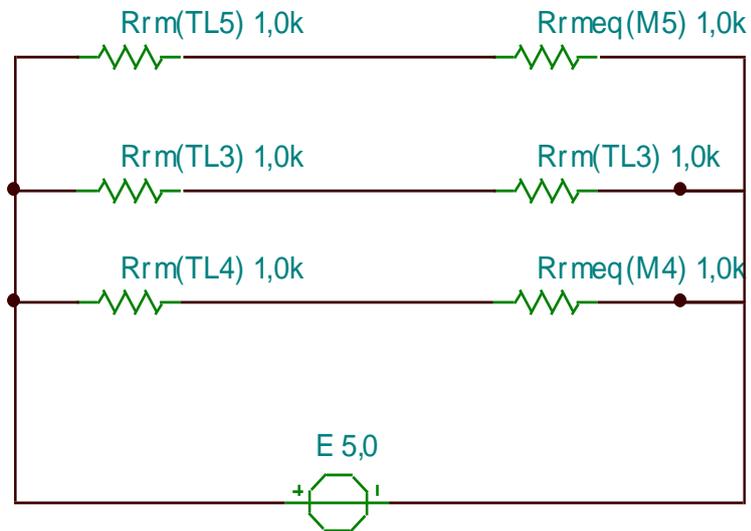
Annexe 5 : Structure du puits anodique



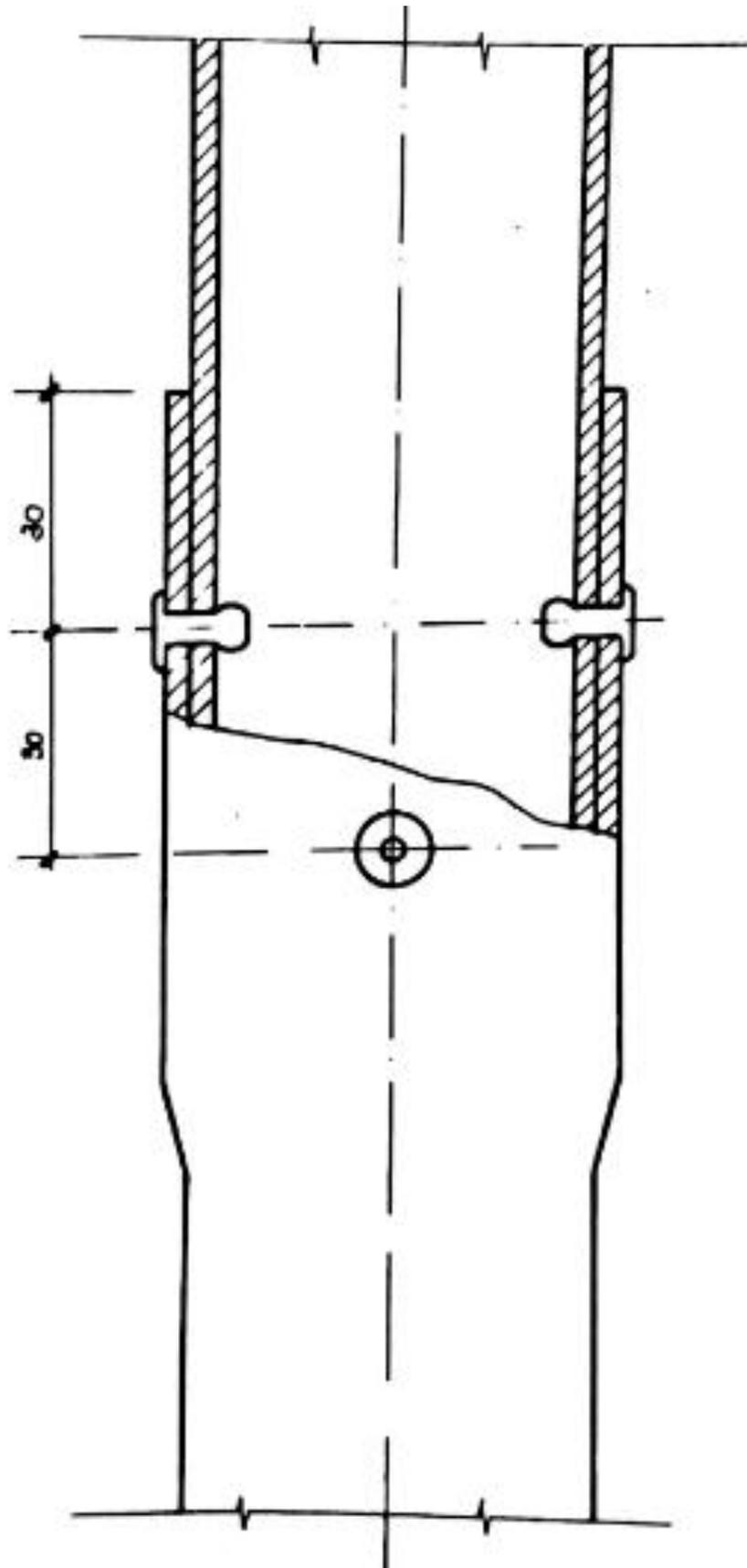
Annexe 6 : Circuit électrique de R_{rm} du réseau

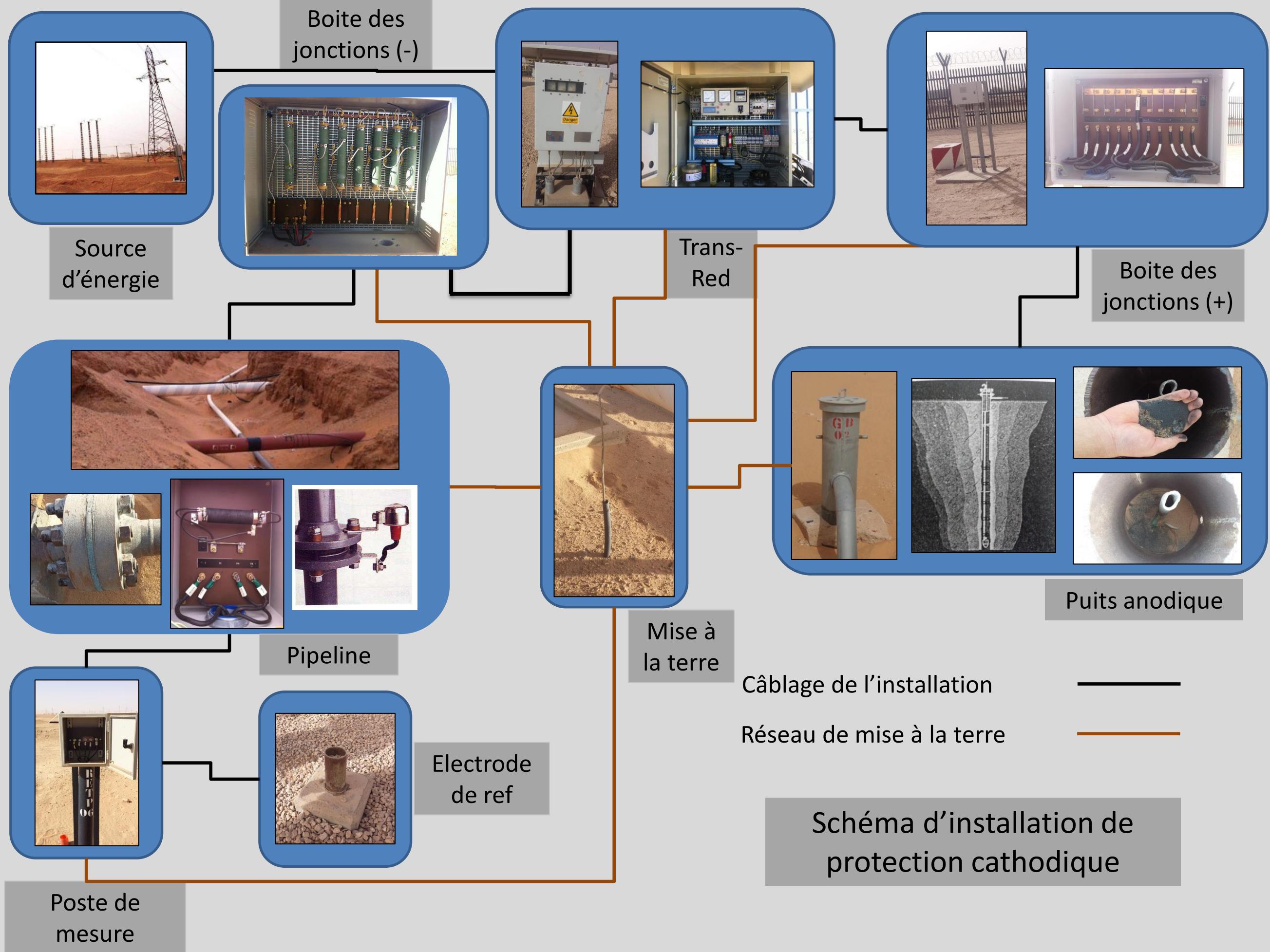






Annexe 7 : Attachement des tubes PVC (rivets)





Boîte des jonctions (-)

Trans-Red

Boîte des jonctions (+)

Pipeline

Mise à la terre

Puits anodique

Electrode de ref

Poste de mesure

Câblage de l'installation

Réseau de mise à la terre

Schéma d'installation de protection cathodique