

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par :

Zemmour Mohand Ameziane

Ousid Abdelghani

Thème

Protection Cathodique par courant imposé, calculs et dimensionnement

Soutenu le 10/10/2021 devant le jury composé de:

Mr. KHELFAOUI Youcef

Président

Mr. AMARI Djamel

Rapporteur

Mme. AKILAL Naima

Examineur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de mémoire.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement **Mr. Amari Djamel** qui nous a permis de bénéficier de son encadrement, et pour son orientation, ses conseils judicieux et la disponibilité qu'il nous a témoignée pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à **Mr Nadir ait atman** chef de département de protection cathodique au sein de Sonatrach, **Mme Ayadi** responsable des stages au sein de l'entreprise.

Nos remerciements également **Mr .Salim** ingénieur de maintenance au sein de l'entreprise, pour son aides, et pour son orientation.

Nos remerciements également tous les membres du **jury** d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos respects et remerciements à nos professeurs du département **Génie Mécanique**.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

Dédicaces

*

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère, à mon cher père

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, qui ont cru en moi et encouragées, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes deux adorables sœurs

Qui n'ont pas cessé de me soutenir et encourager, que dieu les protège.

A mon adorable neveu (Iyad)

A ma chère famille

A la mémoire de mes grands parents

A mes chers amis

(Eto, Slogman, Ghani, Aymen, Fofu, momoh, Mounir.S, meziane, Lalah, Djamel.O, Mouloud, Amin, Mounir.A, Aloula, Ami Rabah, Faouzi, Noureddine, Rami, Amirouche, Stiven, Nosnos, le Hadj, Daou, Riad, Abdou, Said)

A ma chère Sassa

A mon cher binôme (abd elghani)

Aux travailleurs de la R.U.Iryahen

Aux membres du bureau d'A.C.Tussna d Yidles

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère, à mon cher père

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, qui ont cru en moi et encouragées, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes trois adorables sœurs

Qui n'ont pas cessé de me soutenir et encourager, que dieu les protège

A mon cher frère (Salam)

A mes adorables neveux (yousaf,sydia, asyle)

A ma chère famille

A la mémoire de mes grands parents

A mes chers amis

(Faysal,monir ,morad,ahmamouche,khalad,wahab,alyas)

A ma chère sydia

A mon cher binôme (Zemmour M-Ameziane)

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Sommaire	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	IX
NOMENCLATURE	X
Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I CORROSION ET MOYENS DE PROTECTION	1
I.1. Introduction	2
I.2. Corrosion.....	2
I.2.1. Différents processus de la corrosion.....	3
I.2.2. Morphologie de la corrosion	6
I.2.3. Notion de la double couche	12
I.2.4. Les facteurs de la corrosion.....	13
I.3. Moyens de protection	13
I.3.1. Peinture : il est nécessaire d'appliquer successivement deux types de peinture :	13
I.3.2. Protection par courant imposé.....	14
I.3.3. Principes	14
I.3.4. Protection par anodes sacrificielles	15
I.3.5. Choix d'anodes sacrificielles.....	16
I.3.6. Installation des anodes.....	17
I.4. Potentiel d'équilibre de quelques métaux.....	17
I.5. Métaux et électrolytes	17
I.6. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique.....	19
I.6.1. Couche double à l'interface métal-solution	19
I.6.2. Potentiel du métal dans la solution.....	20
I.6.3. Electrode de référence	20
I.6.4. Processus de corrosion	23
I.7. Destruction de l'équilibre par réaction du milieu	24
I.8. Conclusion.....	26
Chapitre II Protection cathodique.....	
II.1. Introduction	27
II.2. Diagramme de Pourbaix.....	27

II.3.	Potentiels de protection cathodique.....	29
II.4.	Densité de courant de protection cathodique.....	31
II.5.	Comparaison de la protection cathodique par anodes sacrificielles (PCAS) et par courant imposé (PCCI).....	31
II.6.	Résistivité.....	32
II.7.	Système de protection cathodique par courant imposé	34
II.8.	Transformateur redresseur.....	35
II.9.	Poste de soutirage.....	36
II.10.	Réalisation des déversoirs	39
II.11.	Facteurs de limitation d'efficacité de la protection cathodique.....	43
II.12.	Courants vagabonds.....	44
II.13.	Conclusion.....	46
Chapitre III Calculs et dimensionnement		27
III.1.	Introduction	48
III.2.	Caractéristiques de pipe-line	48
III.3.	Calculs de courant qu'on doit fournir pour la protection de canalisation.....	48
III.3.1.	Calcul de la portée de la protection cathodique.....	48
III.3.2.	Masse anodique en Fe-Si nécessaire	51
III.3.3.	Nombre d'anodes nécessaire	51
III.4.	Calcul des résistances de terre des déversoirs	51
III.4.1.	Déversoirs horizontaux (rails, profilés,...).....	51
III.4.2.	Déversoirs verticaux (tige cylindrique, anode circulaire.....).....	52
III.5.	Utilisation de backfill	53
Chapitre IV : Maintenance des pipelines.....		48
IV.1.	Introduction	54
IV.2.	Méthodes inspection et détection de corrosion.....	54
IV.2.1.	Le contrôle visuel	54
IV.2.2.	Inspection en ligne outil intelligent, les techniques MFL.....	55
IV.2.3.	Le contrôle et Détection par ultrasons.....	56
IV.2.4.	Le test ultrasonique longue portée (Long Range Ultrasonic Testing LRUT).....	57
IV.3.	Règle de classement	59
IV.3.1.	Règles générales	60
IV.4.	Méthode de relevés de potentiel à espaces rapprochées.....	61
IV.4.1.	Préparation de l'intervention	61
IV.4.2.	Méthode de relevé par dépolarisation.....	63
IV.4.3.	Méthode d'évaluation de l'influence des redresseurs de courant.....	64
IV.4.4.	Méthode de relevés aux prises de potentiel.....	64
IV.5.	Prise de mesures au point de vérification	64

Conclusion Générale	66
Références Bibliographiques.....	67
ANNEXES	79

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Corrosion, la réaction chimique comment ça marche.....	4
Figure I.2 : La corrosion uniforme	6
Figure I.3 : (a) corrosion localisées ; (b) corrosion uniforme d'un métal	7
Figure I.4 : La corrosion galvanique	8
Figure I.5 : Piquuration du pipeline	8
Figure I.6 : Fissuration sous contrainte ; (a)fissure inter granulaire ; (b) fissure trans granulaire	9
Figure I.7 : Corrosion caverneuse	10
Figure I.8 : Corrosion-érosion dans une zone turbulente	11
Figure I.9 : Etapes de développement du phénomène de corrosion-érosion.....	11
Figure I.10 : Modèles double couche schématique à l'interface métal/solution.....	12
Figure I.11 : Principe de la protection par courant imposé.....	15
Figure I.12 : Equilibre de deux métaux différents dans une solution	19
Figure I.13 : Equilibre d'un métal dans une solution	20
Figure I.14 : Mesure de potentiel d'un métal dans une solution avec électrode de référence....	20
Figure I.15 : (a) électrode de référence ; (b) électrode utilisé par l'entreprise	22
Figure I.16 : Potentiel respectifs des différentes électrodes	23
Figure I.17 : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion	24
Figure I.18 : Destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par action du milieu(1) : ...	25
A) Equilibre du métal dans la solution	
B) Exemple de la destruction de l'équilibre	
C) Identification du courant	

Chapitre II

Figure II.1 : Diagramme E-PH de pourbaix du système (Fe-H ₂ O) à 25°C.....	28
Figure II.2 : Montage nécessaire à un relevé à espace rapproché.....	30
Figure II.3 : Essais d'un relevé de potentiel	30
Figure II.4 : Principe de fonctionnement de la méthode de wenner	33
Figure II.5 : Transformateur redresseur P-DH-100-100.....	36

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Facteur de corrosion.....13

Tableau I.2 : Potentiel d'équilibre de quelques métaux 17

Tableau II.1 : Densité de courant de protection cathodique pour l'acier nu31

Tableau II.2 : Comparaison entre les deux méthodes de protection cathodique32

Tableau II.3 : L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité33.

Tableau II.4 : Anodes utilisées pour la protection cathodique par courant imposé.....38

Tableau III.1 : Caractéristique de la canalisation48

Tableau III.2 : Caractéristique d'une anode en Ferro-silicium..... 50

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
U	: Tension aux bornes de redresseur	V
E	: Potentiel du courant	V
I	: Courant	A
C _a	: Consommation de l'anode	Kg/A.an
T	: Durée de vie	ans
N _a	: Nombre d'anodes	/
M _a	: Masse totale	Kg
m _a	: Masse unitaire d'anode	Kg

Symboles grecs

ν	: Viscosité cinématique	$m^2 s^{-1}$
ρ	: Résistivité du sol	$\Omega.m$
ρ_v	: Masse volumique	Kg/m^3

Nomenclature

Abréviations

PC	: Protection cathodique
Cu/CuSO ₄	: Par rapport à l'électrode de cuivre-sulfate
Fe ²⁺	: Ion Ferreux
Fe ³⁺	: Ion Ferrique
Fe ₂ O ₃	: Oxyde de fer (magnétite)
Fe ₃ O ₄	: Oxyde de fer magnétique
H ₂ O	: Molécule d'eau
O ₂	: Atome d'Oxygène (gaz)
Zn ²⁺	: Ion de zinc
H ₂	: Atome d'hydrogène (gaz)
PH	: Pression d'hydrogène
API	: American Petroleum Institute
Pb ₃ O ₄	: Minium
SO ₄ ⁻²	: Sulfate
FeS	: Sulfure de Fer II
Cu	: Cuivre
Zn	: Zinc
H ₂ SO ₄	: Acide sulfurique

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

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

Les canalisations en aciers de grade API (American Petroleum Institute) sont des structures enterrées, dont la profondeur varie de 0.6 à 2.5 m et sont protégées contre la corrosion par des différents traitements, telles que la protection cathodique, les traitements de surfaces ou encore la modification du milieu corrosif par ajout d'inhibiteurs de corrosion. Plus de 95% des aciers micro alliés sont sollicités par le phénomène de corrosion qui se produit sur les surfaces extérieures des pipelines par suite des interactions du matériau avec l'environnement corrosif du sol.

Malgré la protection de ces aciers, la corrosion interne et externe reste un grand problème mondial qui touche tous les secteurs surtout dans l'industrie pétrolière. On a estimé à 15% de la production annuelle d'acier la perte subie chaque année, et soit environ 5 tonnes d'acier détruites par seconde.

Les canalisations, dont le matériau constitutif le plus répandu est l'acier non allié, sont particulièrement exposées à la corrosion, soit de leur environnement, soit de leur fonction (transport de fluides corrosifs). Parmi les conséquences : la corrosion sous plusieurs formes, la rupture sous pression ; la fuite de liquides corrosifs, dangereux ou polluants.

La corrosion localisée est la forme la plus dangereuse pour l'endommagement des pipelines enterrés quand elles sont en contact avec le milieu agressif. Ce type de corrosion se développe localement en formant une pile galvanique de corrosion entre la surface extérieure, passive et cathodique, et l'intérieur de la pique, actif et anodique entraînant une cavité qui peut rapidement devenir profonde bien qu'une petite quantité de métal se dissolve globalement.

Nous sommes intéressés dans ce travail à étudier du système de protection cathodique (PC) de la canalisation Akbou Oued Amizour.

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

La méthodologie que nous développerons dans ce travail consiste à relever les mesures de potentiel de quelque ligne

Nous présenterons dans le chapitre 1, une étude théorique sur la corrosion et ces différentes formes et dans le chapitre 2, une étude théorique sur la protection cathodique et sur les différentes méthodes de protection, et sur les différentes étapes pour afin qu'on protège notre structure. Le chapitre 3 sera consacré au calcul et dimensionnement du système de la protection cathodique de 38 Km de pipeline, Le chapitre 4, maintenance des pipelines (le matériel et les méthodes utilisés pour détection et contrôle de la corrosion soit interne ou externe).

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale

**CHAPITRE I ;
CORROSION ET MOYENS
DE PROTECTION**

I.1. Introduction

De nombreux ouvrages métalliques, tels les canalisations de gaz, et de pétrole, les pipelines et les bacs de stockage de brut sont détériorés par la corrosion que l'on peut définir comme étant la destruction d'un métal par réaction chimique ou électrochimique.

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

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

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

I.2. Corrosion

La corrosion, du latin "corrodere", signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que

Bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en œuvre etc. Leurs inconvénients est leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est à dire leur durabilité. Mais pour mieux remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue on emploie des techniques de protection adéquates contre la corrosion. L'emploi de nouveaux matériaux résistants à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherche ces dernières années.

La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et

Céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé.

L'évaluation des pertes dues à la corrosion doit prendre en considération :

- Les pertes indirectes : réparation, pertes de production.
- Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion et plus chers, de Revêtement et de protection cathodique
- Les mesures de préventions surdimensionnement Les pertes directes : remplacement des matériaux et équipements corrodés.
- des structures porteuses inspection, entretien.

Les pertes directes ne représentent donc qu'une partie des coûts de la corrosion Elles sont souvent Inférieures aux pertes indirectes [7].

1.2.1. Différents processus de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées [7].

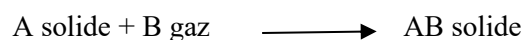
En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

a) Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action de gaz (O_2 , H_2S et CO_2). Lorsque le réactif est gazeux ou que cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : corrosion sèche ou corrosion à haute température

L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (Al dans CCl_4) peut être considérée comme une corrosion chimique. Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [7].



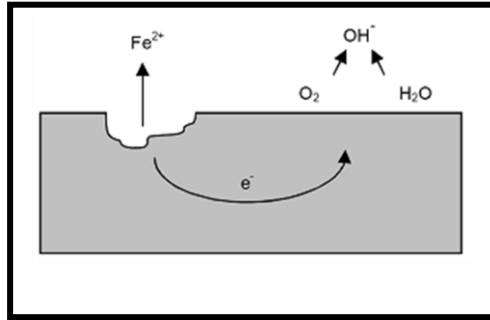


Figure I.1 : Corrosion, la réaction chimique comment ça marche

b) Corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

- Chimique par production de substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.
- Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.

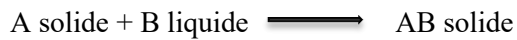


- Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène [7].

c) Corrosion électrochimique

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition.

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :



En général il n'existe pas un métal idéalement pur, il contient toujours des hétérogénéités physiques ou chimiques dont le potentiel de corrosion est en général différent de celui de la matrice. C'est à dire les métaux ne sont pas monophasés lorsqu'ils sont plongés dans le réactif. Même pour un alliage, si ces éléments d'addition sont en solution solide, on ne peut pas les considérer comme parfaitement monophasés, car ils présentent toujours des inclusions. Oxydes, sulfures etc. ou bien des régions écrouis.

Donc les légères différences de propriétés chimiques ou physiques entre les différentes parties du métal déterminent une électrode composite (cellule électrochimique) qui contient des microcathodes et des microanodes en court-circuit, c'est à dire formant des couples électriques (piles).

Lorsqu'une électrode composite est plongée dans un électrolyte, ce qui est toujours réalisé, elle est donc le siège d'un phénomène de corrosion électrochimique et les anodes sont attaquées avec une vitesse qui dépend de l'intensité du courant débité par les piles locales [7].

➤ Exemples d'électrodes composites

Le fer contenant des inclusions de sulfure de fer, le fer représente la cathode de la pile, le potentiel de corrosion ainsi que le courant de corrosion seront élevés dans le cas où la teneur en sulfure de fer est grande et plus le potentiel de corrosion de l'électrode ne devient plus négatif. Le deuxième exemple est celui de l'acier laminé, recouvert d'une couche d'oxyde, en général, cette couche n'est pas parfaitement continue, si bien qu'en certains points l'acier est à nu, l'oxyde constitue la cathode de la pile d'acier et l'acier représente l'anode. Plus la surface d'acier exempte d'oxyde est grande et plus l'intensité du courant de corrosion est élevée. Si la surface des anodes est très petite, il est possible que localement la densité de courant soit très élevée et qu'ainsi une piqûre se développe rapidement ; par contre si la surface des anodes est grande, bien que la quantité de métal attaqué soit élevée, la diminution de l'épaisseur de la pièce pourra être faible en chaque point [7].

d) Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une

canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion petite donc se développer à nouveau.

1.2.2. Morphologie de la corrosion

En tenant compte de la forme et des sites de l'attaque, les différentes formes de corrosion sont réparties en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée.

1.2.2.1. Corrosion uniforme (généralisée)

C'est une forme de corrosion dans laquelle la perte de métal est à peu près uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu. Elle peut se produire sur une surface "Nue" et l'on parle alors de surface active ou de métal actif. La dégradation peut alors être Rapide.

Elle se produit souvent sur une surface protégée par une couche superficielle d'oxydes (film Passif). La vitesse de dégradation du matériau est alors faible voire négligeable mais non Nulle.

La corrosion uniforme est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles Périodiques Fig. (I.2) [6].

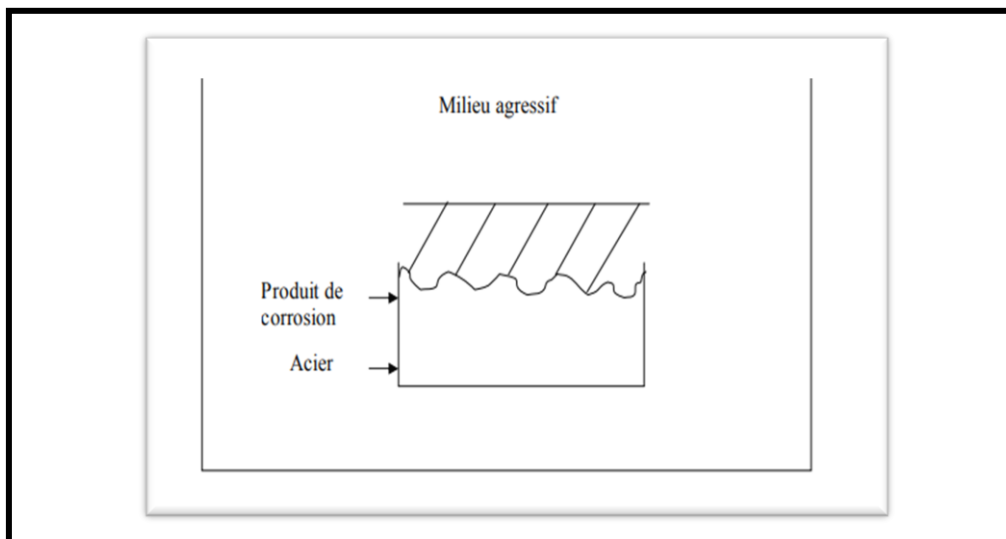


Figure I.2 : La corrosion uniforme.

1.2.2.2. Corrosion localisée

Comme son nom l'indique, elle est localisée sur des sites bien précis du métal, la vitesse de Corrosion étant plus grande sur les sites préférentiels de la surface. En pratique, la corrosion Localisée provient d'une hétérogénéité (existence de micro-piles) du matériau ou de l'environnement. Ce type de corrosion ne peut pas être mesuré par la perte de masse ou par la Diminution de l'épaisseur. On doit réaliser des observations métallographiques et des mesures

Électrochimiques [1].

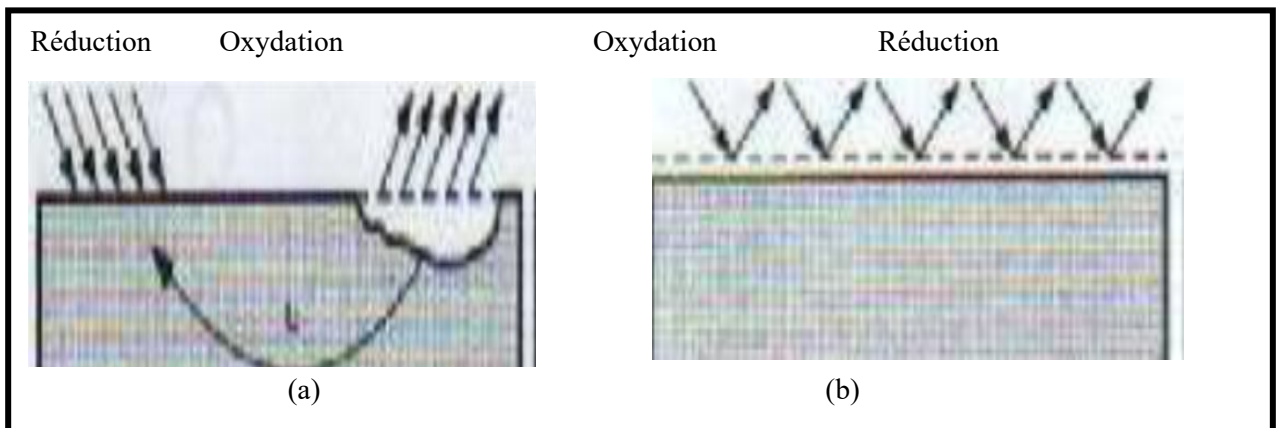


Figure I.3 : (a)Corrosions localisées ; (b) corrosion uniforme d'un métal [1].

Ce type de corrosion englobe à son tour les formes suivantes :

➤ Corrosion galvanique

Milieu conducteur appelé électrolytique. Cette situation est appelée "couplage galvanique", la Corrosion galvanique fonctionne comme une pile qui constituée de deux électrodes plongent Dans une solution électrolyte qui est en général une solution diluée d'acide.

Les deux électrodes sont reliées extérieurement par un circuit électrique qui assure la Circulation des électrons. Par exemple : dans la figure suivante [2].

L'électrolyte ➡ H_2SO_4 .

Anode ➡ Zn.

Cathode ➡ Cu.

L'anode en Zn est oxydée : $Zn \rightarrow Zn^{+2} + 2 e^-$.

Sur la cathode en cuivre il y a réduction des H^+ : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Donc la réaction globale est : $Zn + 2 H_2O \rightarrow Zn (OH)_2 + H_2$

Cette pile produise de l'électricité en consommant du zinc (moins noble) par rapport au cuivre (Plus noble).

Les conditions de cette corrosion [2].

➤ Métaux de nature différente (potentiel différent).

- Présence d'un électrolyte.
- Continuité électrique entre les deux métaux

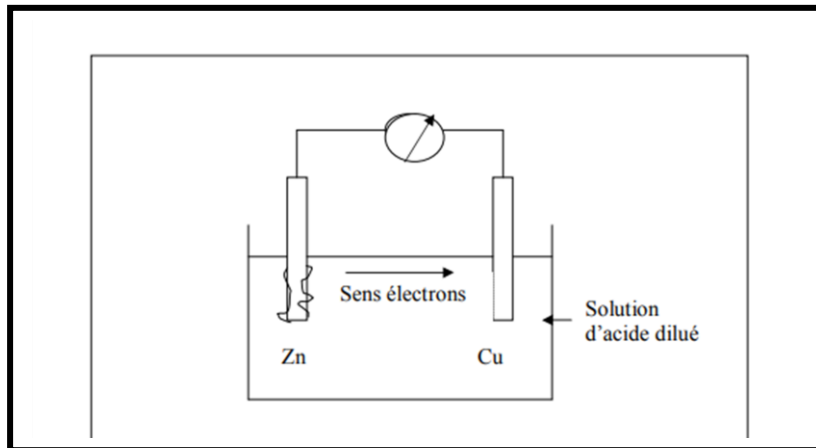


Figure I.4 : La corrosion galvanique.

- Corrosion par piqûre

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des trous ou piqûre, très localisés et pouvant progresser très rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte en poids appréciable de l'ensemble de la structure n'apparaisse. Elle concerne la plupart des métaux et Alliages et notamment ceux d'usage courant : aciers au carbone, aciers inoxydables, alliages D'aluminium et de cuivre.

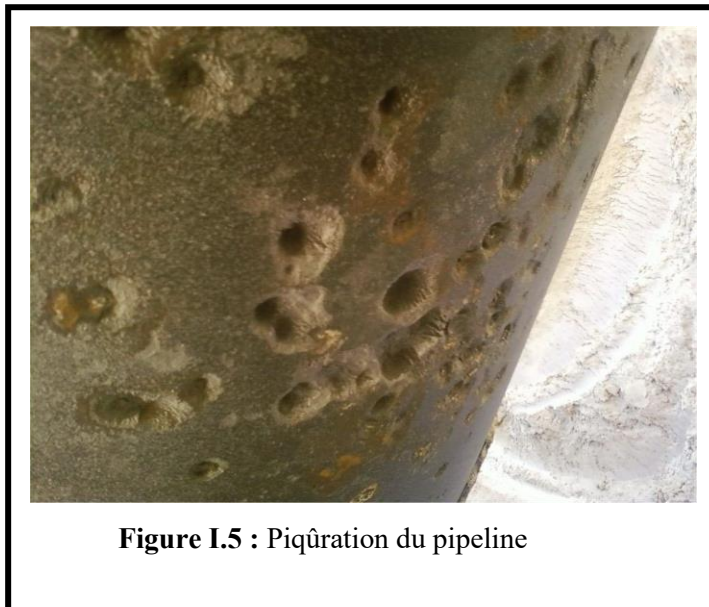


Figure I.5 : Piqûration du pipeline

- Corrosion inter granulaire

C'est une attaque localisée aux joints de grains d'un métal, le joint de grains agit comme anode et de grandes surfaces de grains se comportent comme des cathodes [2].

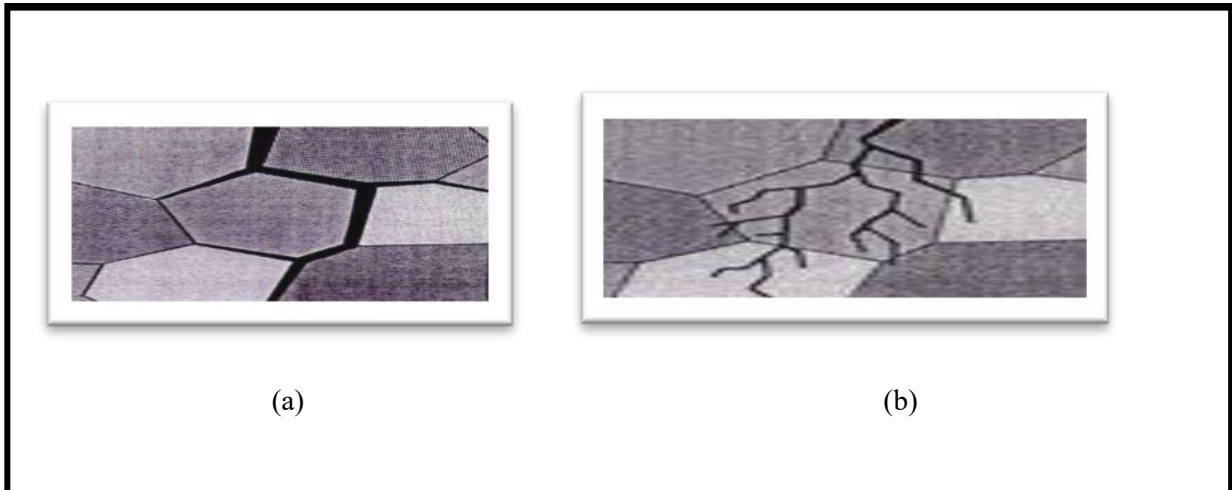


Figure I.6 : Fissuration sous contrainte ; a) fissure inter granulaire

b) fissure Trans granulaire [2].

➤ Corrosion sous contrainte

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique ; La corrosion sous contrainte est caractérisée par un temps d'incubation. Plus la contrainte est élevée, plus le temps d'incubation est court. Les fissures s'amorcent ensuite et se propagent alors d'une façon relativement rapide.

Les fissures sont initiées par des défauts de surface, elles peuvent être inter granulaires ou Trans granulaires, simples ou branchées suivant l'environnement et la structure du métal. Leur propagation est perpendiculaire à la direction de la contrainte. La corrosion sous contrainte est influencée par certains facteurs métallurgiques [2].

- Composition du métal
- Orientation des grains
- Composition et répartition des précipités
- Dislocations, traitement thermique

On peut citer aussi : la corrosion par érosion, corrosion par fatigue, la corrosion par frottement, la corrosion bactérienne

➤ La corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est un type de corrosion qui se produit dans des interstices entre Matériaux de même nature, dépôt diverse, des zones de recoin ou des matériaux métalliques se trouve localement en contact avec un milieu corrosif confiné. Le processus de développement de la corrosion caverneuse n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûre, cependant la cinétique et la morphologie de l'attaque s'étend en largeur a la surface de l'interstice ou sous le dépôt et non pas en profondeur comme corrosion pour les piqûres

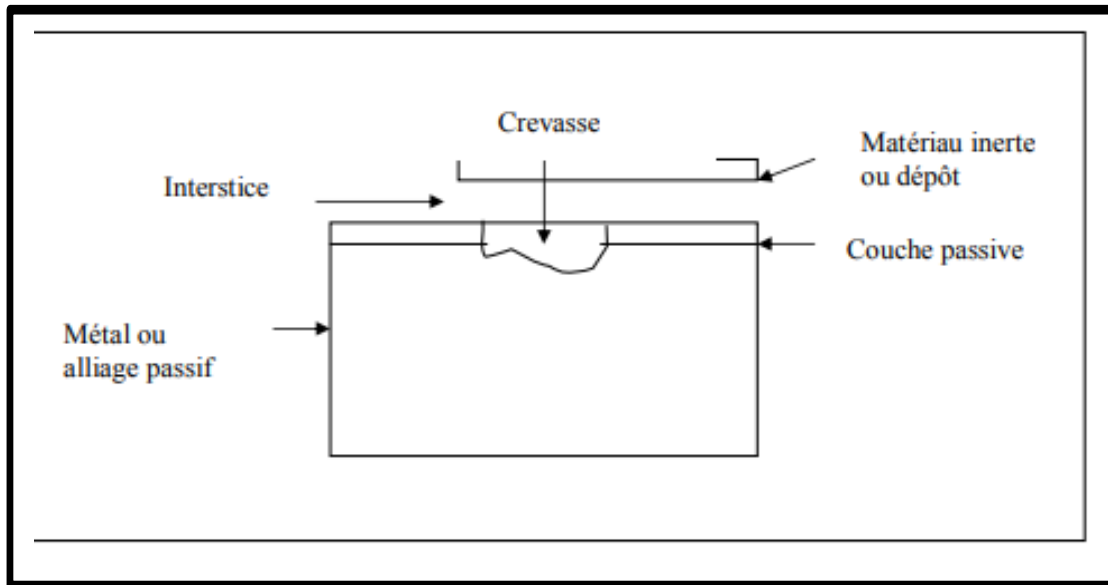


Figure I.7 : Corrosion caverneuse.

➤ Corrosion-fatigue

La corrosion-fatigue se distingue de la C.S.T par le fait que les contraintes appliquées ne sont pas plus statiques mais cycliques (efforts périodiques alternés). Elle peut être réduite en Diminuant les contraintes, soit par un recuit de détente, soit en modifiant la conception de l'appareil, Soit enfin par des traitements mécaniques comme le grenailage

➤ Fragilisation par l'hydrogène

La présence d'hydrogène dans un réseau métallique peut entraîner d'importantes détériorations du métal avec chute catastrophique de ses propriétés mécaniques. Ces atomes d'hydrogène ont pour origine l'atmosphère environnante, les procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique. Une fois qu'il a pénétré dans le réseau. L'atome d'hydrogène peut provoquer plusieurs types de dégâts.

➤ Corrosion-érosion

La corrosion-érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...) et est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière (Figure I.6).



Figure I.8 : Corrosion-érosion dans une zone turbulente

Elle est souvent favorisée par l'écoulement fort d'un fluide et se développe progressivement selon trois étapes telles que cela est représenté sur la Figure I.7.

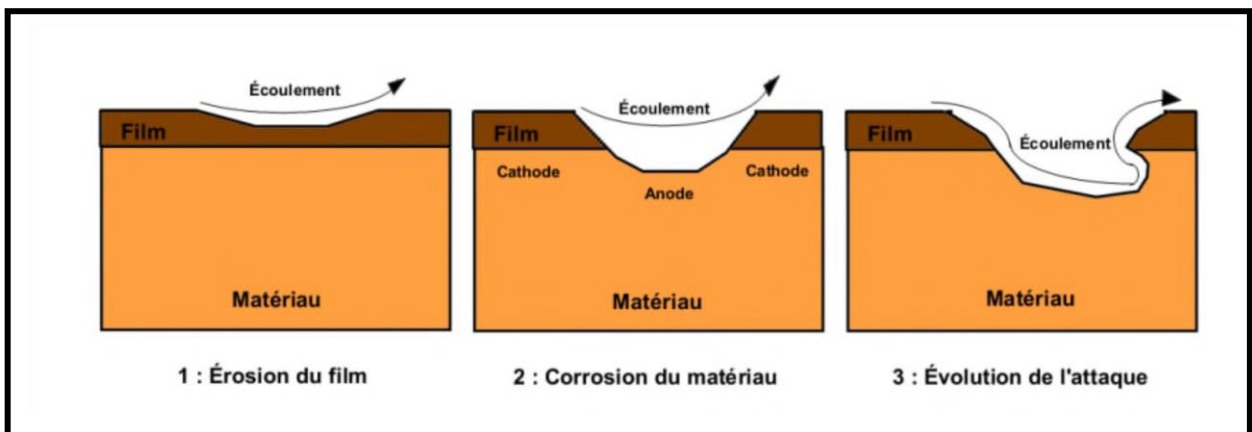


Figure I.9 : Etapes de développement du phénomène de corrosion-érosion.

➤ Corrosion sélective

Avec certains alliages exposés à des ambiances agressives, un des constituants peut se subir une attaque préférentielle. L'attaque peut être localisée et conduire à des perforations ou répartie uniformément et aboutir à une chute des caractéristiques mécaniques. Dans le second cas, les dégradations peuvent échapper à l'observation visuelle, la pièce conservant sa forme et son état de surface initial.

Les différents cas de corrosion sélective sont classés suivant la nature des alliages considérés :

Le laitron (alliage de cuivre et de zinc) prend la teinte rouge du cuivre. Graphitisation des fontes : corrosion du fer, le fer se dissout sans dégradation visible.

- Corrosion par crevasse

Cette photo illustre la corrosion par crevasse sous des écrous et des têtes de rivets.

Stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints et dans des crevasses, par exemple sous Les écrous et têtes de rivets [2].

- Corrosion filiforme (type particulier de corrosion par crevasse)

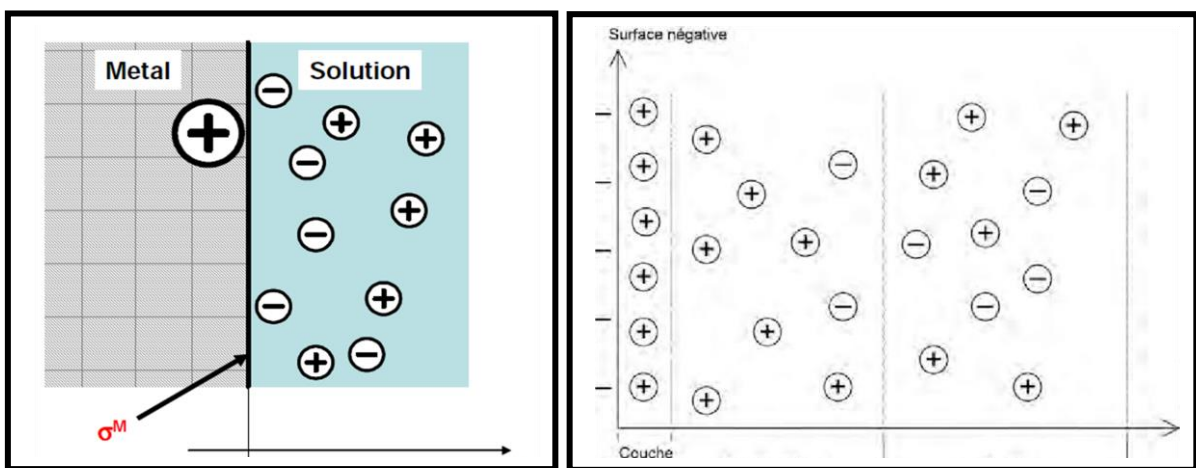
Elle se produit sous des films protecteurs [2].

1.2.3. Notion de la double couche

La notion de la double couche est essentielle pour comprendre et expliquer le comportement de l'interface électrochimique. Elle est constituée d'ions adsorbés et de contre-ions libres, susceptibles de participer aux échanges électroniques de tous les phénomènes électrochimiques. Trois modèles ont été proposés pour décrire les propriétés des interfaces électrochimiques. Le premier est celui de Helmholtz, amélioré par Gouy-Chapman pour tenir compte des variations de concentration des ions. Stern a combiné les deux modèles précédents.

Il s'agit d'une couche de contre-ions qui se forme à l'interface du métal et de la solution, et donc sa dissolution.

La résistance de transfert de charge 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 électrochimique [3].



Modèle Gouy-Chapman

Modèle Stern et Gerry

Figure I.10 : modèles de la double couche électrochimique.

I.2.4. Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaque
- Facteurs métallurgiques,
- Facteurs définissant les conditions d'emploi,
- Facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant [7].

Tableau I.1 : Facteurs de la corrosion [7].

Facteur définissant les modes d'attaque	Facteur métallurgique	Facteur définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
<ul style="list-style-type: none"> - concentration du réactif - teneur en oxygène - PH du milieu - addition d'inhibiteurs - température - pression 	<ul style="list-style-type: none"> -composition de l'alliage - procédé d'élaboration - impuretés - traitements thermiques - traitements mécaniques - additions protectrices 	<ul style="list-style-type: none"> - état de surface - forme des pièces -sollicitations mécaniques - emploie d'inhibiteurs -procédés d'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> - vieillissement - tensions mécaniques - température - modification des revêtements protecteurs

I.3. Moyens de protection

Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, le milieu agressif d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets en agissant sur l'un ou l'autre des deux partenaires.

I.3.1. Peinture : il est nécessaire d'appliquer successivement deux types de peinture :

- Peintures primaires

Elles sont le plus souvent à base de minium Pb_3O_4 , l'huile de lin servant de liant. Ce Procédé est utilisé depuis très longtemps mais on connaît encore assez mal de mode d'action du minium. On

emploie également les peintures Glycérophthaliques au chromate de zinc. Elles Assurent une très bonne protection d'une part à cause de leur adhérence et de leur Imperméabilité, d'autre part grâce à l'action électrochimique du zinc qui exerce une Protection cathodique.

➤ Peintures de finition

La peinture de finition sert à protéger la peinture primaire, destinée plus particulièrement à éviter la corrosion, et à donner aux structures métalliques un aspect agréable.

1.3.2. Protection par courant imposé

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

1.3.3. Principes

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

- Masse anodique ou (un déversoir).
- L'électrolyte (sol ou eau).
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger. Comme le montre la Figure (2.3) le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal. Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel (ddp) entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850$ V en tous points de la structure. En général, la valeur limite inférieure que l'on cherche à atteindre est d'environ -1 V [8].

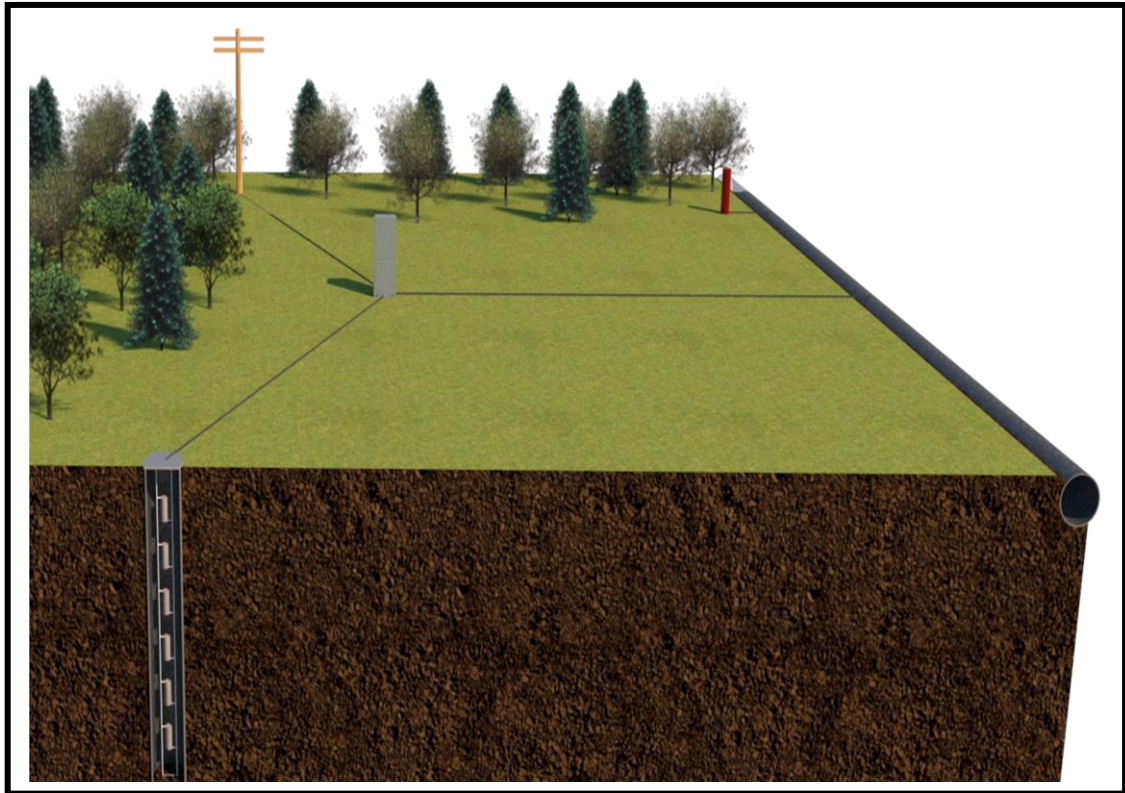


Figure I.11 : Principe de la protection par courant imposé

1.3.4. 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.

Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger dans son domaine de potentiel d'immunité. La réalisation est schématisée

Pour que la protection existe, il faut :

- Que la pile débite, donc que l'anode soit reliée électriquement au métal,
- Que la surface à protéger et l'anode soient plongées toutes les deux dans le même milieu électrolytique,
- Que l'installation soit adaptée à la surface à protéger (dimensions, nombre, répartition des anodes).

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'oxydoréduction est directement proportionnelle à l'intensité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A. ans) dépend de l'intensité de 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 : [9]

$$m = \frac{M \times I \times t}{nF} \dots\dots\dots(I.1)$$

Où :

m : masse de métal dissous ;

M : masse molaire ;

n : nombre d'électrons en jeux ;

F : le nombre de Faraday ;

I : courant (A) ;

t : temps de consommation ;

1.3.5. Choix d'anodes sacrificielles

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes.

Les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées.

- Anode de magnésium

Les anodes de magnésium pour la protection cathodique ne sont pas en magnésium pur, mais à base d'alliage. Plusieurs types sont utilisés ayant des compositions et des caractéristiques Electrochimiques différentes : (addition de Zn et Al) dont les propriétés sont les suivantes :

- Potentiel : -1.3V (Cu/CuSO₄)
- Consommation entre 6.5 et 8Kg/A.an

- Anodes aux alliages d'aluminium

Les anodes d'aluminium se recouvrent très rapidement d'une couche d'oxyde qui s'oppose au

Fonctionnement du couple fer-aluminium, empêchant ainsi l'aluminium de jouer son rôle d'anode sacrificielle. On utilise donc des alliages pour éviter cet inconvénient. Ces alliages présentent des caractéristiques électrochimiques (dues à la passivation d'Aluminium dans l'eau aérée) intéressantes du point de vue de la protection cathodique en eau de mer [9].

- Potentiel : - 0.5V (Cu/CuSO₄)
- Consommation réelle : 3 à 4 Kg/A.an

- Anode de zinc

Élabore à partir de zinc de haute pureté avec une teneur en fer particulièrement faible

- Potentiel : - 0.8V (Cu/CuSO₄)
- Consommation réelle : 13 Kg/A.an [9]

1.3.6. Installation des anodes

La protection par anode réactive ne s'applique qu'aux réseaux de petites longueurs (2 à 3km) Et bien isolées dont la résistance d'isolement des conduites par rapport au sol est bonne (au Moins 5000 \square .m²).

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

- Au milieu de l'ouvrage à protéger, de manière à ce que sa portée englobe l'ensemble de L'ouvrage ;
- A une distance supérieure à 3 mètres de la conduite à protéger et de tout autre ouvrage Métallique enterré ; La partie supérieure de l'anode doit être située sous le niveau de la génératrice de la Canalisation. Avant de remblayer la fouille, l'ensemble anode régulateur doit être imbibé d'eau pour que le Milieu entourant l'anode devienne une boue épaisse.

I.4. Potentiel d'équilibre de quelques métaux

Le tableau ci-dessous, nous résume quelques potentiels standard à T = 25°C et P = 1 atm, mesurés par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH).

Tableau I.2 : Potentiel d'équilibre de quelques métaux

Métal	Réaction à l'équilibre	Potentiel (V/ENH)
Or	Au = Au⁺⁺⁺ + 3e⁻	+1.42
Platine	Pt = Pt⁺⁺⁺ + 2e⁻	+1.20
Argent	Ag = Ag⁺ + e⁻	+0.80
Cuivre	Cu = Cu⁺⁺ + 2e⁻	+0.34
Hydrogène	H = 2H⁺ + 2e⁻	0.00 par convention
Plomb	Pb = Pb⁺⁺ + 2e⁻	-0.13
Fer	Fe = Fe⁺⁺ + 2e⁻	-0.44
Zinc	Zn = Zn⁺⁺ + 2e⁻	-0.76
Aluminium	Al = Al⁺⁺ + 3e⁻	-1.67
Magnésium	Mg = Mg⁺⁺ + 2e⁻	-2.34

I.5. Métaux et électrolytes

La corrosion est le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif. L'environnement est un milieu corrosif, à partir du moment où il contient de l'eau ; ce milieu, c'est,

bien entendu, l'eau elle-même, milieu complexe contenant quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi les sols qui contiennent tous plus ou moins d'humidité, et encore les gaz amenant des condensations d'eau. Cet environnement c'est aussi la plupart des milieux industriels liquides.

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

- Potentiel du métal dans la solution

Dans le cas où le métal est plongé dans une solution normale d'un de ses ions, on peut, en utilisant les lois de la thermodynamique, calculer ce potentiel.

Ce potentiel a une valeur déterminée pour un métal donné et permet le classement des métaux suivant leur aptitude à s'ioniser. L'échelle de Nernst permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse. Tableau I.2 [4].

- L'électrode métallique :

Un métal M est constitué par un édifice cristallin d'ions positifs Mn^+ dans lequel circulent

Des électrons libres. On sait que ce nuage électronique est responsable de la conductibilité

Des métaux. La particularité d'un conducteur métallique est de laisser passer le courant Électrique sans subir de modification chimique.

En résumé, la distinction entre métal et électrolyte, en ce qui concerne la conduction du

Courant, s'établit comme suit :

- ✓ Le métal conduit le courant par ses électrons.
- ✓ Le métal est un conducteur électronique.
- ✓ La tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant qui le

Traverse, c'est un conducteur ohmique auquel s'applique la loi d'Ohm [4].

$$U = R \times I \dots\dots\dots(I.2)$$

U : la tension en V

R : la Résistance en ohm

I : le Courant en A

L'électrolyte conduit le courant par ses particules ionisées, il s'agit d'une conduction ionique. L'application d'une tension minimale d'électrolyse est nécessaire ici pour assurer la Circulation D'un courant dans l'électrolyte. Il y a existence d'une force contre-électromotrice, dépendant de l'électrolyte mais aussi des conditions d'expérience, qui retarde l'apparition du courant. L'électrolyte est un conducteur ionique auquel s'applique la loi d'Ohm généralisée [4].

$$U = E + (R \times I) \dots\dots\dots(I.3)$$

U : la tension en V

E : le Potentiel V

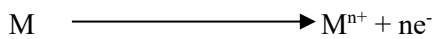
R : la Résistance en ohm

I : le courant en A

I.6. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique

I.6.1. Couche double à l'interface métal-solution

Plongeons un métal dans un électrolyte ionisant inerte. Les ions du réseau métallique tendent à passer en solution et laissent le métal chargé négativement par ses électrons (voir les figures (I.12), (I.13), (I.14)). Ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs. Il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons. Les réactions 1 et 2 ont lieu simultanément.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche Electrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte [4].

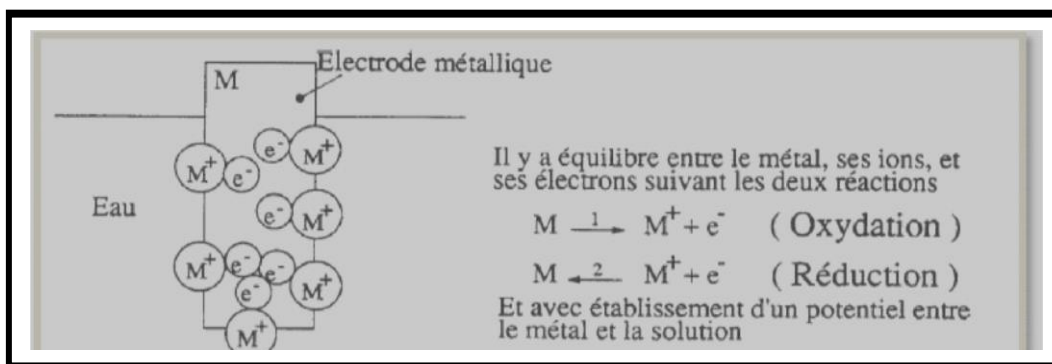


Figure I.12 : Equilibre de deux métaux différents dans une solution [4].

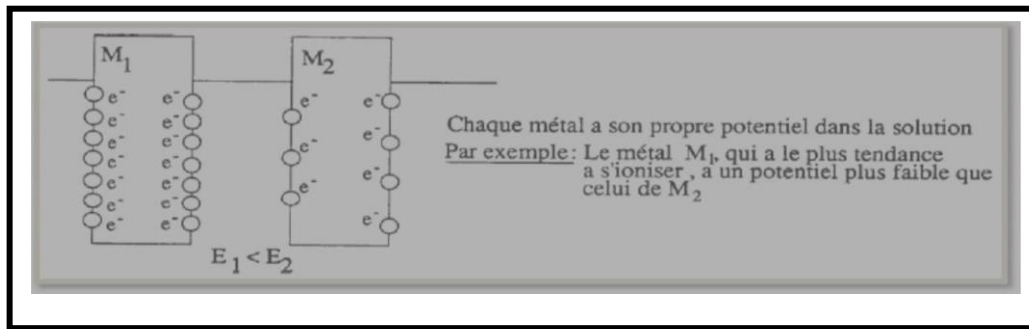


Figure I.13 : Equilibre d'un métal dans une solution [4].

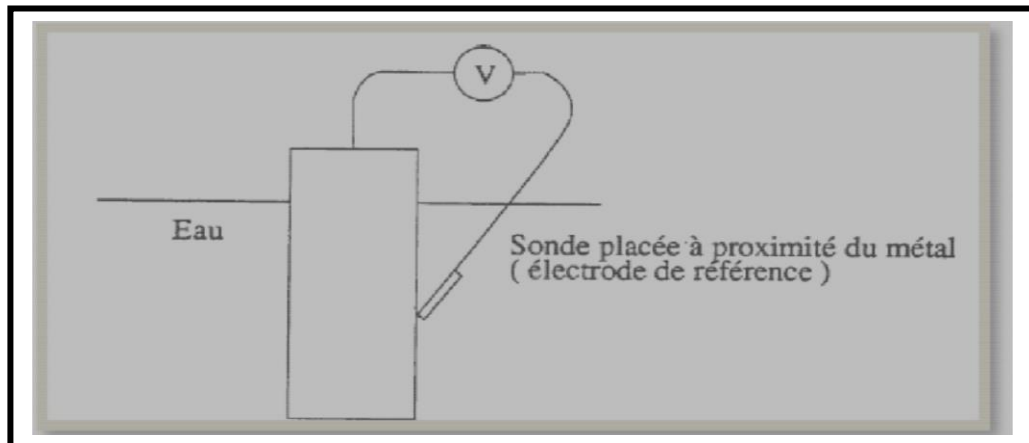


Figure I.14 : Mesure du potentiel d'un métal dans une solution Avec une électrode de référence [4].

1.6.2. Potentiel du métal dans la solution

Dans le cas où le métal est plongé dans une solution normale d'un de ses ions, on peut, en utilisant les lois de la thermodynamique, calculer ce potentiel.

Ce potentiel a une valeur déterminée pour un métal donné et permet le classement des métaux suivant leur aptitude à s'ioniser. L'échelle de Nernst Tableau (I.2) permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse [4].

1.6.3. Electrode de référence

Une électrode métallique plongée dans un électrolyte est assimilable à une demi-pile. Son potentiel ne peut se mesurer physiquement.

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

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

Elle Possède son propre potentiel normal. L'électrode standard à hydrogène a été choisie arbitrairement comme zéro de l'échelle des potentiels, mais dans la pratique on utilise des électrodes de référence plus simples, telles L'électrode Cu/CuSO₄, Ag/Ag Cl, au calomel (Hg/Hg₂Cl₂/KCl), dont on connaît les potentiels respectifs [4].

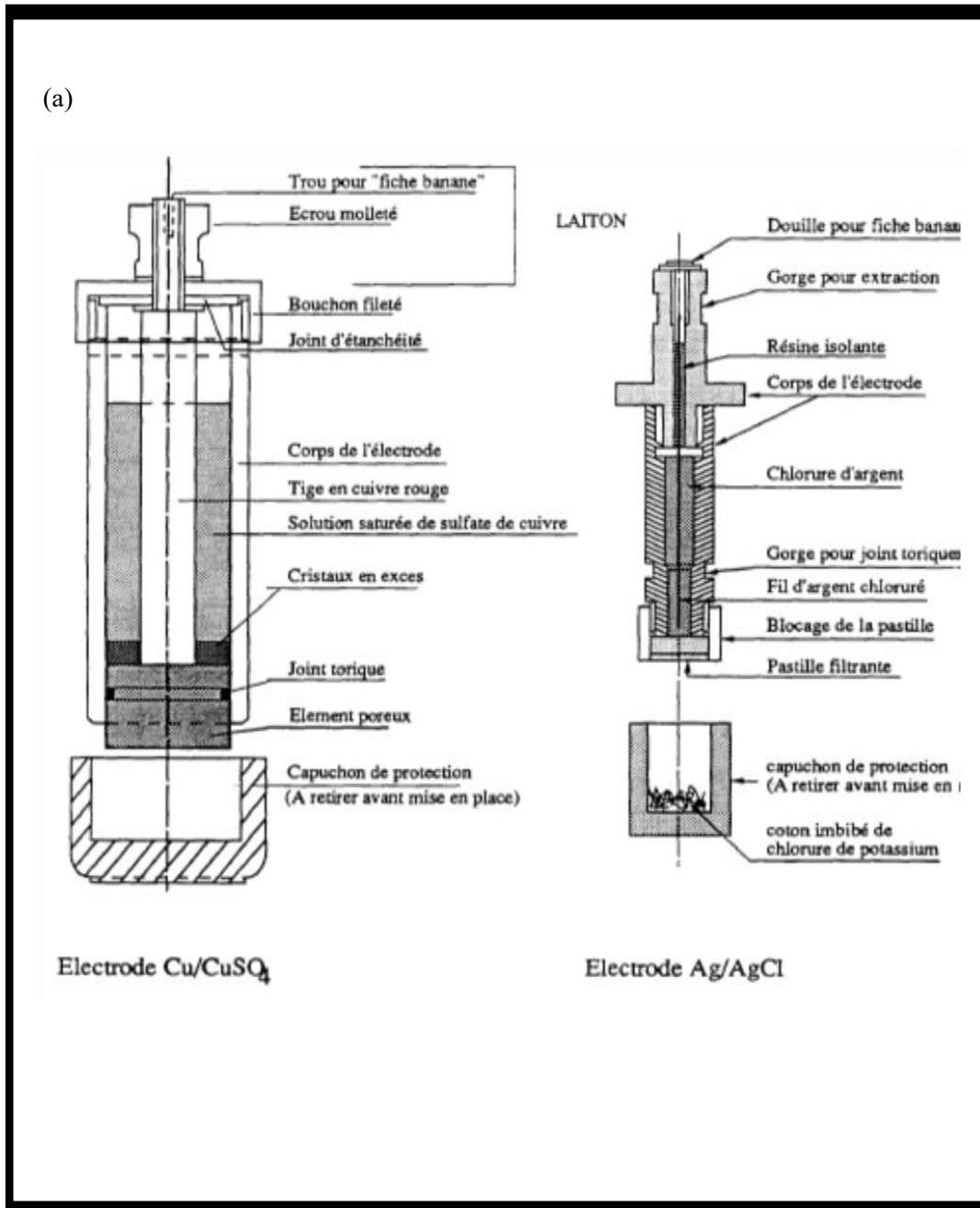




Figure I.15 :

- a) Electrode de référence [4]
- b) Electrode utilisé par l'entreprise

➤ Conversion entre les potentiels de quelques électrodes :

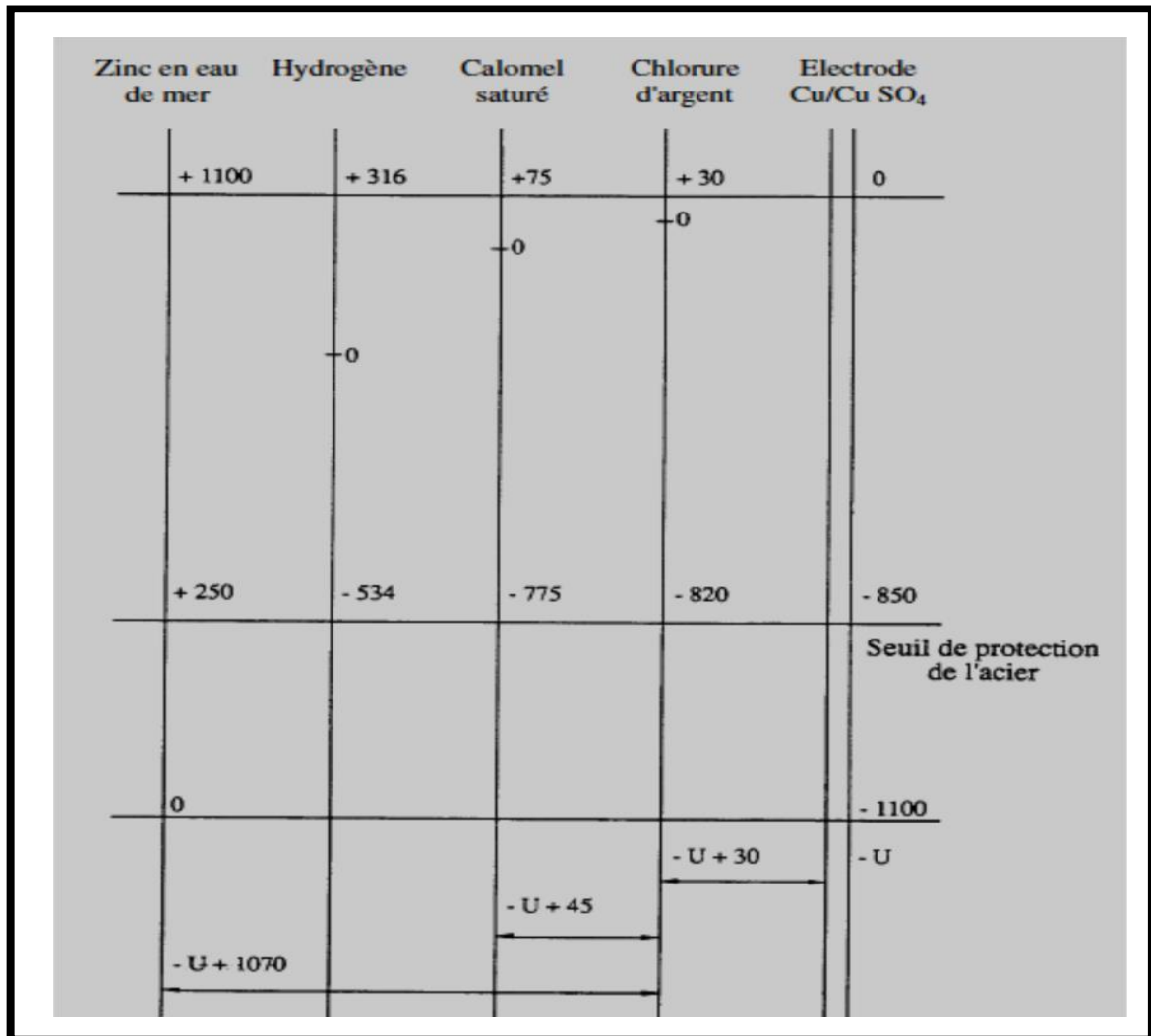


Figure I.16 : Potentiels respectifs des différentes électrodes [41]

I.6.4. Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par Action chimique ou électrochimique. La surface métallique est attaquée par son milieu et se transforme en composé d'oxyde, en sel ou en autre composé.

Il s'agit d'une circulation de courant électrique produite sous l'échange d'électrons à l'interface de métal/ électrolyte par l'intermédiaire des réactions chimiques. Les Réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des piles galvaniques Figure I.13 [5].

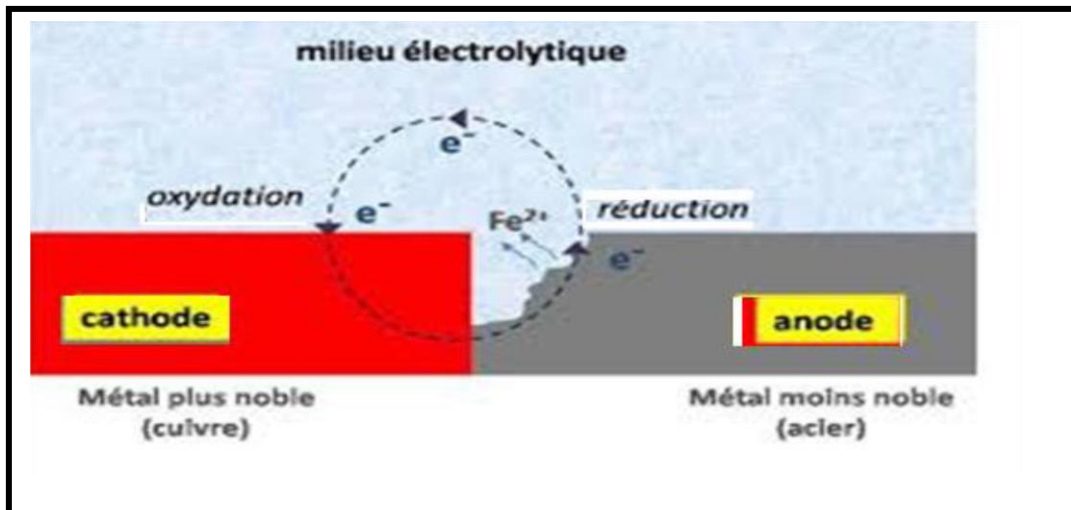


Figure I.17 : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [5].

Par ailleurs, le phénomène de dissolution ne se produit que lorsque les quatre éléments ci-dessus sont présents.

- La zone anodique

Elle est le siège de la réaction d'oxydation. À cet endroit, le métal s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique aux endroits appelés zones anodiques. Le mécanisme réactionnel de cette

Réaction chimique est décrite par les réactions dans la Figure I.17 [5].

- La zone cathodique

Il s'agit du siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions d'hydrogène présents dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant le gaz d'hydrogène selon le processus chimique suivant. En présence de sols aérés, une autre possibilité de réaction chimique peut avoir lieu à la cathode. C'est la réduction des atomes d'oxygène dissous dans l'électrolyte qui se produit selon la réaction dans la Figure I.17 [5].

I.7. . Destruction de l'équilibre par réaction du milieu

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

Les sites anodiques et cathodiques se formant au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisée. Avec le temps, l'électrode voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement Figure (I.14) / A. B.C [4].

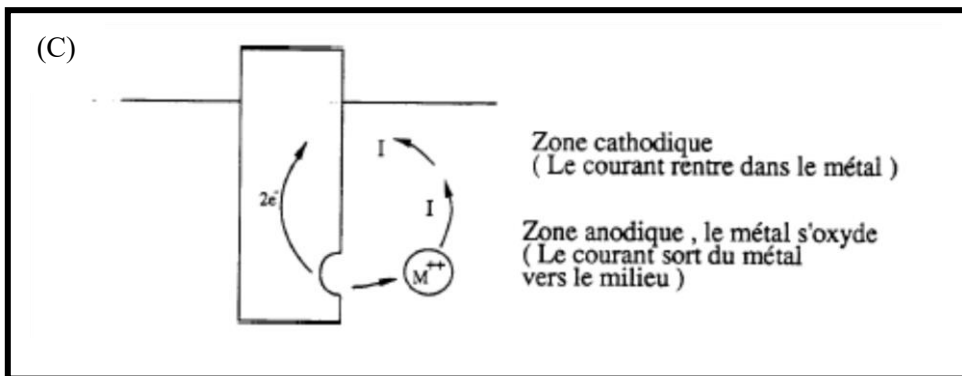
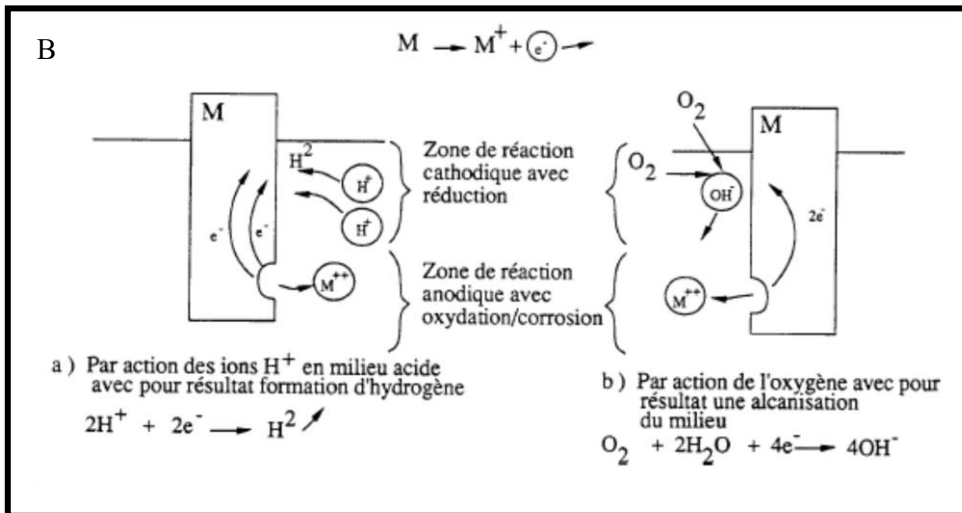
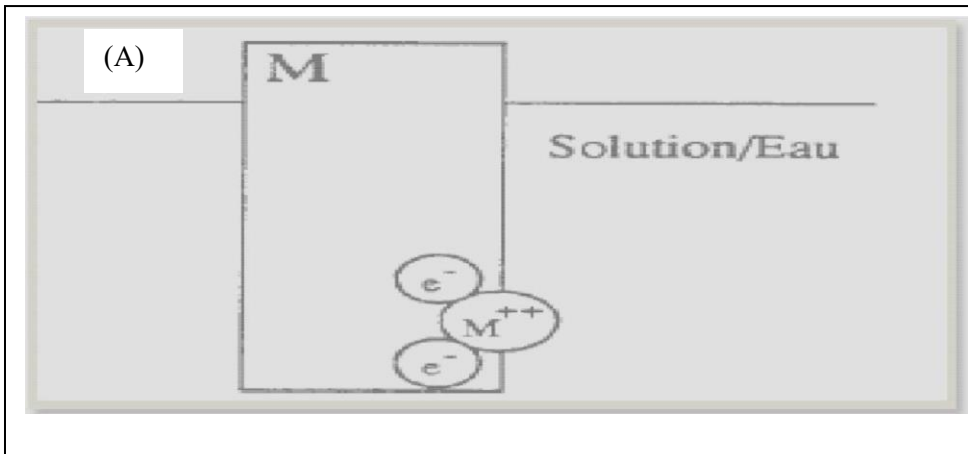


Figure I.18 : Destruction de l'équilibre d'un métal dans une solution par action du milieu [4].

- A) Equilibre du métal dans la solution
- B) Exemple de la destruction de l'équilibre
- C) Identification du courant

I.8. Conclusion

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

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

Chapitre II : Protection cathodique

II.1. Introduction

Étude dans le cadre de ce projet a étendu sur les études du système de protection des structures métalliques entre les lignes du réseau de canalisations exploitées par l'entreprise nationale **SONATRACH**. Différents distance et différents produits transporté.

Les canalisations, dont le matériau n'est pas constitué, sont alliées à une API 5L X52 selon la norme API (institut américain du pétrole) sont protégées par un revêtement externe et interne (Protection passive) aussi possible que possible pour isoler l'acier des milieux corrosifs. Ces revêtements sont une base de polyéthylène pour l'adhésif et une couche de plusieurs millimètres en polymères PE, en polyéthylène, ou en polypropylène PP. Cette protection est complète par une protection cathodique active dont le potentiel n'est pas maintenu à $- 850 \text{ mV} / \text{Cu} / \text{CuSO}_4$ par imposition ou par anode sacrificielle. Les travaux d'inspection ont été montrés. Les exposés sont particulièrement exposés aux risques liés aux défauts de fabrication de leur environnement (tubes entrants) et aux phénomènes de dégradation par corrosion et par fissuration sur les surfaces extérieures de la ligne.

A propos de la formation des piqûres de corrosion, la méthodologie qui a été développée dans ce projet a été dévoilée par les différentes mesures possibles de la protection cathodique en position ON et par les mesures de résistivité du sol.

Des études ont été réalisées dans le but de défaire les défaillances particulièrement les défaillances par corrélation afin d'éviter les images de corrosion et plus particulièrement les régions ou la résistivité du sol et de maintenir le potentiel de la ligne par rapport au potentiel standard de protection.

Nous consacrerons ce chapitre à la présentation des méthodes de protection cathodique.

Les produits selon la norme API 5L (American Petroleum Institute) sont conçus pour satisfaire les charges les plus sévères comme la résistance à la corrosion.

Parmi les paramètres qui influencent les structures enterrées, la corrosivité des sols qui peuvent être estimés par les mesures de la résistance du sol à la conception de l'ouvrage métallique.

II.2. Diagramme de Pourbaix

Il nous permet d'étudier l'aspect thermodynamique de la corrosion pour mieux comprendre le comportement d'un métal dans un milieu aux différentes valeurs de pH et en fonction du potentiel. On peut prévoir ainsi les réactions thermodynamiquement possibles. Le diagramme potentiel-pH d'un système *Matériau - H₂O* est tracé à $T = 25^\circ\text{C}$ et une pression totale constante de 1 bar. Le diagramme $E - pH$ présente plusieurs domaines caractéristiques de chacune des espèces susceptibles d'exister.

- Domaine de stabilité : le métal est stable et inattaquable.
- Domaine de prédominance : la concentration en espèces dissoutes est supérieure à $10^{-6} \text{ mol. L}^{-1}$.
- Domaine d'existence : le métal est recouvert d'une couche d'oxyde qui peut le protéger de la corrosion.[10]

La Figure II.1 présente le diagramme $E - pH$ de Pourbaix du système ($Fe - H_2O$) à $25^\circ C$.

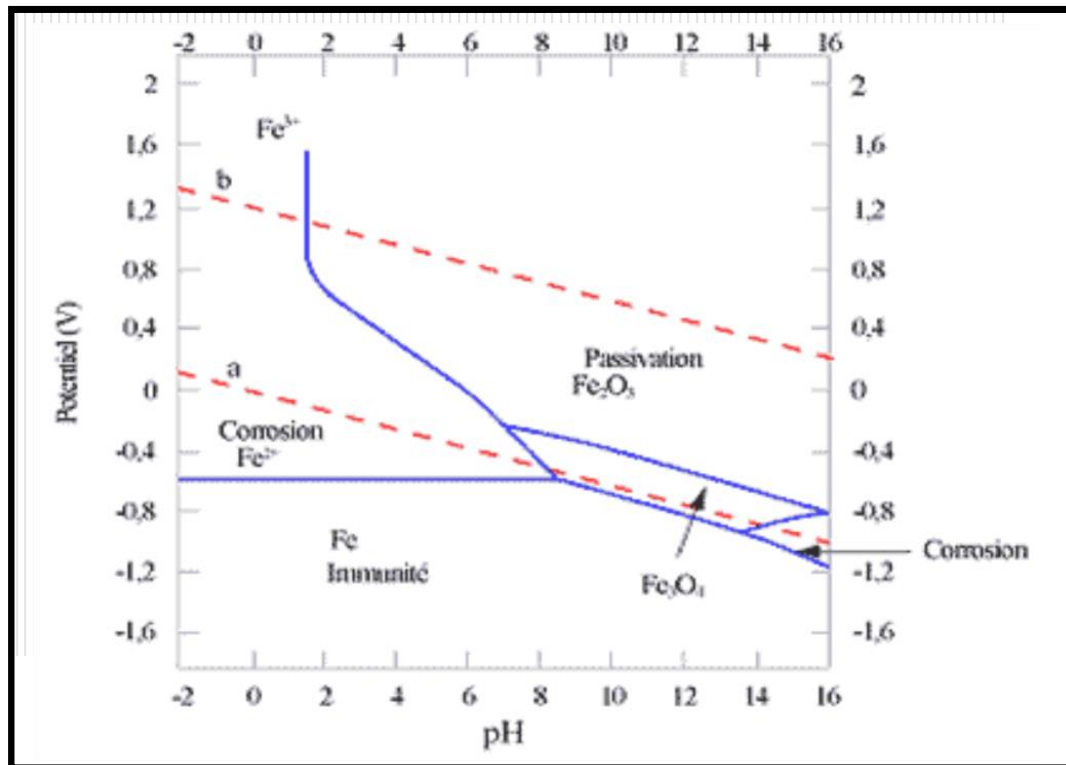


Figure II.1 : le diagramme $E - pH$ de Pourbaix du système ($Fe - H_2O$) à $25^\circ C$
[10]

Pour protéger le fer contre la corrosion on peut procéder de 3 manières différentes :

- On déplace le potentiel de Fe vers des valeurs plus négatives ($E_{Fe} < -0.7 V/ENH$). Le matériau se trouvera alors dans le domaine d'immunité (Figures II.1). c'est la **protection cathodique**.
- On déplace le potentiel de Fe vers des valeurs plus noble que son potentiel d'équilibre ($E_{Fe} > 0 V/ENH$), le fer sera protégé par une couche d'oxyde. C'est la **protection anodique**.
- On alcalinise le milieu en ramenant, par exemple, le pH dans le domaine ($pH \geq 8$). Le fer se retrouve alors dans un domaine de potentiel correspondant à la **zone de passivation**.

II.2.1. Définition des trois phases de diagramme (E-pH)

- **Phase d'immunité** : À cet état thermodynamique, la corrosion du métal ne peut pas se produire dans son milieu environnant parce qu'il atteint un état stable assuré par l'effet d'équilibre thermodynamique provoqué par le niveau énergétique emmagasiné dans le métal (polarisation).
- **Phase de corrosion** : Dans cet état de système, le métal se transforme d'un niveau stable à un niveau actif (corrosion). Cette transformation se traduit par la dissolution de métal en ions solubles dans l'électrolyte. En solution neutre ou acide, le diagramme prévoit la dissolution du fer avec la formation d'ions ferreux Fe^{2+} et d'ions ferriques Fe^{3+} tandis qu'en solution alcaline, le fer est sous forme d'ions ferrate $HFeO_2$.
- **Phase de passivité** : C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion. Le métal a donc été oxydé en surface mais ce film le protège d'une agression en profondeur. La couche passive recouvrant la surface métallique est généralement très stable, compacte et fortement liée au métal [10].

II.3. Potentiels de protection cathodique

Il s'agit d'appliquer un potentiel inférieur au potentiel de protection tel que la vitesse de corrosion soit réduite : $E \leq E_{prot}$

Le potentiel de protection cathodique est donné par l'équation de Nernst :

$$E_{prot} = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln 10^{-6} \dots \dots \dots (II.1)$$

A température ambiante (25°C), cette expression devient :

$$E_{prot} = E^{\circ} - \frac{0.354}{n} (V/ENH) \dots \dots \dots (II.2)$$

Il est admis et standardisé que le seuil de potentiel de PC pour l'acier enterré est de

- **0.85 V/(Cu/CuSO₄)** en milieu aéré.
- **0.95 V/(Cu/CuSO₄)** pour les sols désaérés.

Ces valeurs ont été mesurées par rapport à une électrode de sulfate de cuivre. [11]

II.3.1. Les prises de potentiel

Ces prises permettent d'assurer un contrôle périodique de l'installation protégée. Elles comprennent trois parties [11].

- a) La liaison du tube avec une partie métallique pouvant être assurée par :

- Une pièce métallique soudée sur le tube ;
- Une pastille collée sur le tube avec une surface de contact suffisante ;
- b) Le câble reliant le tube au coffret de mesures sera revêtu au chlorure de polyvinyle, au caoutchouc butylique ou au néoprène, de section 16 ou 25 mm.
- c) Le coffret extérieur

II.3.2. Répartition des prises de potentiel

La répartition de ces prises est très variable suivant l'installation à protéger et les conditions géographiques. Les distances peuvent varier de quelques centaines de mètre à 10 km. Ces points sont choisis selon l'un des critères suivants : [3]

- accessibilité (bordure de route ou de chemin carrossable) ;
- résistivité des sols (un sol peu résistant et plus agressif et la conduite aura besoin d'une surveillance accrue) ;
- traversées de rivières (les oueds) ;
- croisement avec d'autres conduites métalliques ou parallélisme ;
- croisement de câbles de télécommunication ;
- traversées de voies ferrées électrifié ;
- passage sous gaine métallique (une prise sur la condition, une prise sur le tube) ;
- extrémité d'antenne.

En l'absence de points particuliers et pour avoir un contrôle efficace de la conduite protégée, une distance moyenne de 3km entre deux prises de potentiel est satisfaisante.

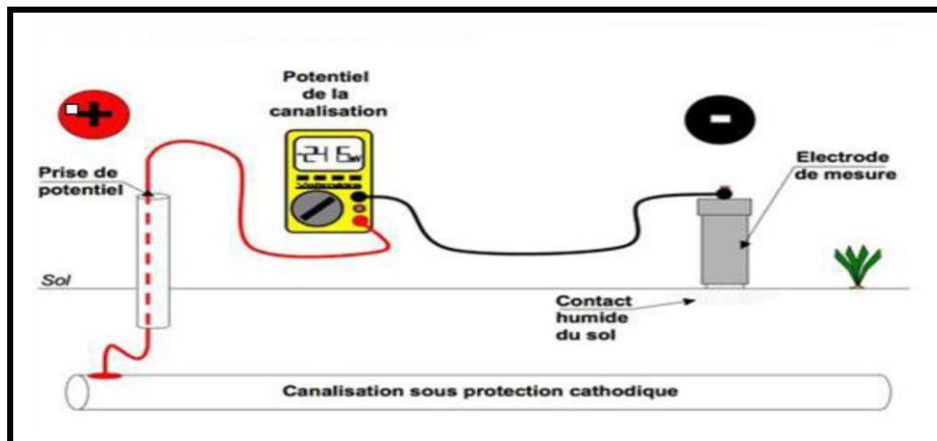


Figure II.2 : Montage nécessaire à un relevé à espace rapproché



Figure II.3 : Essais d'un relevé de potentiel potentiel

II.4. Densité de courant de protection cathodique

Au préalable, il faut garder le métal dans sa zone de stabilité où la structure est protégée. Pour ce faire, il faut obtenir un potentiel de protection en appliquant un courant appelé densité de protection cathodique. La protection cathodique n'est économique que dans les eaux, les sols et le béton. Le Tableau II.1 présente quelques valeurs de la densité de courant de PC pour l'acier nu en contact de différents environnements [12].

Tableau II.1 : Densité de courant de protection cathodique pour l'acier nu.

L'environnement	mA/m²
Sol neutre	4,5-16
Sol neutre bien aéré	21,5-32
Sol très acidifié	32-160
Sol à base de sulfate	65-450
Sol chauffé	32-270
Eau douce stationnaire	11-65
eau douce oxygénée, En mouvement	54-160
Eau de mer	32-110

II.5. Comparaison de la protection cathodique par anodes sacrificielles (PCAS) et par courant imposé (PCCI)

Le tableau ci-dessous nous montre les critères de choix entre les deux protections cathodiques.

Tableau II.2 : Comparaison entre les deux méthodes de protection cathodique [13].

	PCAS	PCCI
Installation	Simple	Complexe
Maintenance	pas de maintenance	Nécessite une maintenance
Source externe	Non	Oui
Tension de conduite	Fixe	Variable
Courant requis	Limiter et faible	Variable et élevée
Conductivité du sol	Elevée	Large gamme
		Problèmes possibles : courant parasite (corrosion) Décollement du revêtement.

II.6. Résistivité

II.6.1. 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 : non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevées de mesure rapide et données facilement interprétables.

La figure II.2 présente une illustration de cette technique qui consiste à disposer quatre piquets dans le sol. On s'assure à ce que les piquets soient équidistants (distance d). Les deux piquets externes sont reliés à un milliampèremètre (A) monté en série avec un générateur (G).

Quant aux deux piquets internes, ils sont reliés à un millivoltmètre (V). Le branchement étant réalisé, on règle ensuite le générateur à une tension. On note l'intensité du courant I qui passe dans le sol et on relève la tension ΔU , dans le sol. On fait varier la tension aux bornes du générateur de sorte à effectuer plusieurs mesures [15].

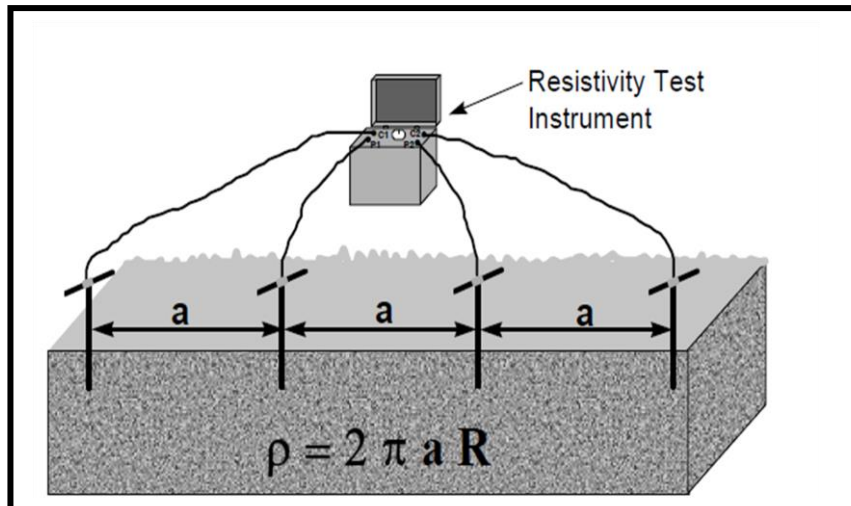


Figure II.4 : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner [15].

Utiliser la méthode **Wenner**, la résistivité de sol, ρ (lettre Grec rho), sont unité est ohm-centimètre, elle est déterminé l'aide de la relation suivante :

$$\rho = 2 \times \pi \times R \dots \dots \dots (II.3)$$

- ρ : résistivité de sol en ohm-centimètre
- a : la distance entre les prises en centimètre
- R : la résistance en ohm

II.6.2. Degré de résistivité (ρ)

Dans tableau II.3 on remarque que la corrossivité a un lien directe avec la résistivité de du sol, à chaque fois que on travaille sur un sol plus résistant, on protège mieux notre structure métallique.

Tableau II.3 : L'agressivité du milieu en fonction de sa résistivité

Résistivité du sol en $\Omega.cm$	Corrosivité du sol
Inférieure à 500	Très sévère
500 à 2000	Sévère
2000 à 5000	Haute
5000 à 10 000	Modérée
10 000 à 25 000	Moyenne
25 000 à 50 000	Légère
Supérieure à 50 000	Faible

Les sols de plus faible résistivité se révèlent plus corrosifs que des sols de haute résistivité.

$$C = \frac{1}{\rho} \dots \dots \dots (II.4)$$

C : la corrosivité du sol.

Haute résistivité → conductivité petite

Le système de protection cathodique par courant imposé présente des avantages et des inconvénients. En effet, pour une structure équipée d'une protection cathodique par courant imposé on peut citer les avantages suivants [14].

- La possibilité de protéger une grande surface.
- Peu d'anodes, même dans des environnements à haute résistivité.
- Protège les structures mal revêtues.
- Le plus avantageux pour les grandes structures à long terme.
- Convient pour les milieux ayant une faible conductivité.
- Le courant est contrôlable.

Par ailleurs, ce système de protection présente néanmoins certains inconvénients tels que : [14]

- Le risque de la rupture des revêtements.
- Besoin d'une alimentation en courant continue.
- Exige un système de surveillance.

II.7. Système de protection cathodique par courant imposé

II.7.1. Réalisation de soutirages

La protection cathodique par courant imposé est reliée aux paramètres suivants :

- La densité de courant de protection.
- Les caractéristiques du générateur [16].

II.7.2. Densité de courant de protection

C'est par définition l'intensité du courant par unité de surface qui doit circuler dans le circuit. Les critères suivants doivent être respectés [14].

- La qualité d'isolement du revêtement.
- L'agressivité du milieu environnant.

II.7.3. Caractéristiques du générateur

Le débit d'un générateur est défini par la loi d'ohm :

$$I = \frac{U}{R} \dots \dots \dots (II.5)$$

Où U est la tension de la source continue et R la résistance du circuit.

La tension U est, en général, située dans la catégorie des très basses tensions (TBT) $< 50V$. Dans certains cas, la tension délivrée par le générateur de courant peut être supérieure à la limite de la TBT. L'installation de protection cathodique est soumise à la réglementation concernant les installations électriques. La résistance du circuit est, dans la plupart des cas, liée à la résistance des anodes. Il est important que la résistance de masse anodique soit aussi faible que possible, particulièrement pour les revêtements à forte valeur d'isolement où la résistance de la structure en contact avec le sol n'est pas négligeable [14].

II.8. Transformateur redresseur

II.8.1. Définition

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, c'est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension et un courant tous deux les plus continus possibles, à partir d'une source de tension alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension.

a) Exemple d'un transfo redresseur utilisé par l'entreprise

- Alimentation triphasé 380V AC-50Hz
- Plage de tension de sortie de 78V à 100V en CC
- Plage de courant de sortie de 78A à 100A en CC
- Refroidissement par huile



Figure II.5 : Transformateur-redresseur P-DH- 100-100

II.9. Poste de soutirage

II.9.1. Implantation des postes de soutirage

L'implantation d'un poste de soutirage doit tenir compte des paramètres suivants :[17]

- Possibilité d'occupation du sol,
- Terrain de faible résistivité,
- Disponibilité et coût d'alimentation en énergie électrique,
- Facilité d'accès,
- Evité de mettre un poste de soutirage à l'extrémité d'une conduite.

II.9.2. Composition typique d'un poste de soutirage

Un poste de soutirage de protection cathodique par courant imposé est un appareil fournissant le courant nécessaire pour atteindre le potentiel de protection, il est constitué par : [17]

- Une source d'énergie
- Un déversoir
- Des câbles de liaison
- Un appareillage électrique auxiliaire

II.9.2.1. Source d'énergie

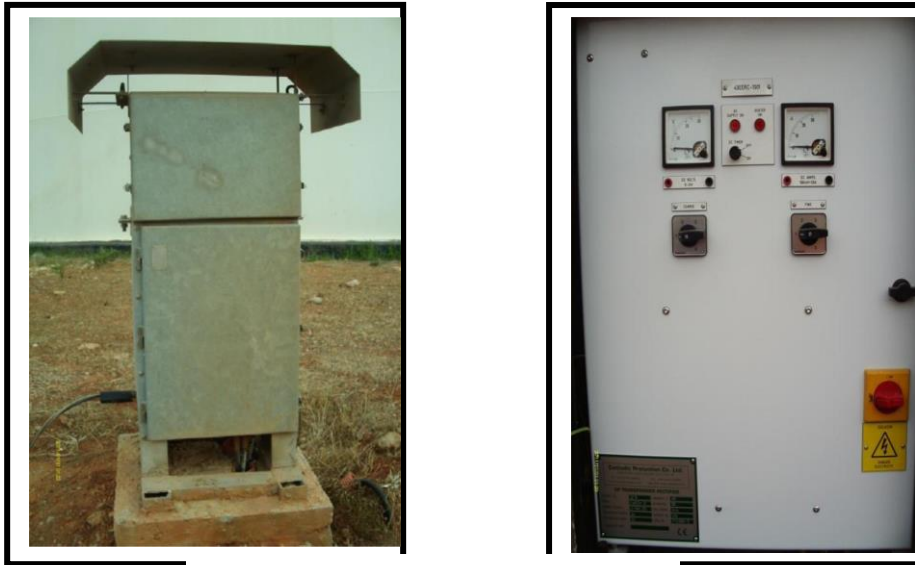


Figure II.6 : Poste de soutirage.

La source d'énergie comprend les éléments suivants : [17]

- Réseau local de distribution
- Panneaux photovoltaïques qui fournissent une énergie électrique utilisée pour la PCCI
- Générateurs thermoélectriques
- Eoliennes.
- Avec la possibilité d'utilisation des piles à l'avenir comme les piles au lithium.
- Les turbines entraînées par le fluide.
- Les turbogénérateurs

II.9.2.2 Déversoir (masse anodique)

C'est un conducteur électrique, dont la fonction est d'injecter un courant dans l'environnement dans lequel se trouve la structure à protéger. La résistance de la masse anodique en contact avec le sol doit être très faible et sa masse est calculée pour déterminer la durée de vie de la protection.

Les matériaux les plus utilisées sont :

- l'acier (rails de chemin de fer provenant du rebut, vieux tubes ou tiges de forage rebutés, etc.) ;
- le graphite ;
- le ferro silicium ;
- le titane platiné, etc.

Les anodes les plus utilisées pour la protection cathodique par courant imposé sont données dans le Tableau II.4 [18].

Tableau II.4 : Anodes utilisées pour la protection cathodique par courant imposé [18].

Les anodes	Fer	Ferro-silicium	Graphite	Magnétite
Longueur(m)	1	0.5 - 1.2 - 1.5	1 - 1.2 - 1.5	0.9
Diamètre (m)	0.3 0.13	0.04 - 0.06 - 0.075	0.06 - 0.06 - 0.08	0.04
Poids(Kg)	56	16 - 26 - 43	5 - 6 - 8	6
Densité (g/cm ³)	7.8	7 - 7 - 7	2.1 - 2.1 - 2.1	5.18
Perte pratique sans l'utilisation de backfill	10	0.2 à 0.3	1 - 1 - 1	0.002
Perte pratique avec Backfill	5	Ca 0.1	Ca 0.2 à 0.5	
La durée de vie 1 A par anode sans backfill (année)	5	50 - 80 - 140	5 - 6 - 8	200
La durée de vie 1 A par anode avec backfill (année)	10	160 - 260 - 430	10 - 12 - 16	
Risque	Aucun	Modérer	Elever	Modérer
Site d'installation Recommandé	L'installation des anodes avec backfill dans des sols faiblement conducteurs, très économique	Principalement utilisé pour les anodes par courant imposé avec une longue durée de vie, également sans backfill	Sols agressifs et solutions aqueuses également sans backfill, relativement économique	Sols eau de mer

II.9.2.2.1 Le choix du type d'anodes installé

il dépend des conditions suivantes : [18]

- Le milieu
- La consommation (la durée de vie)
- La densité de courant admissible
- Le prix (fourniture et mise en œuvre).

II.9.2.2.2 Choix de l'emplacement

- l'emplacement du déversoir est déterminé par une étude préalable du terrain et du tracé (ou de l'implantation) de la structure à protéger.
- la distance entre le déversoir et la structure à protéger ne doit pas être trop faible. Un minimum de 50m est conseillé pour les canalisations.
- la résistivité du sol est mesurée. Le choix se porte sur la zone où la résistivité est la plus faible.
- la résistance du déversoir doit être la plus faible possible pour éviter une tension trop élevée aux bornes de redresseur (sécurité du personnel et économie d'énergie). On admet comme très bonne une résistance de 1 ohm, une valeur de 2 à 3 ohms restant très acceptable.

II.10. Réalisation des déversoirs

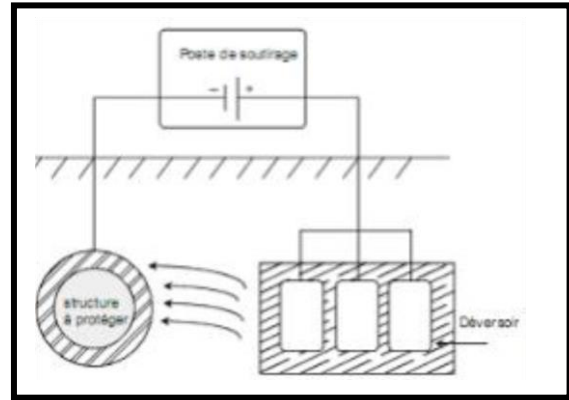
II.10.1. Déversoirs de surface

- **Anodes posées horizontalement** : ce mode de pose est à retenir lorsque la résistivité du sol est faible en surface et lorsqu'on dispose de place sur terrain. Il est recommandé, par exemple, lorsqu'on utilise des vieux rails ou autre ferrailles de formes similaires [19].

- **Anodes posées verticalement** : il s'agit toujours de déversoir de surface, mais les anodes y sont enterrées verticalement dans les trous creusés au fond de la tranchée où sont posés les câbles. Les anodes se trouvent ainsi à une profondeur comprise entre 1 et 2 m, et selon la nature du sol, dans un terrain plus humide qu'en surface [19].



(a)



(b)

Figure II.7 : Les modes de poses des anodes : a- anodes posées horizontalement

b- anodes posées verticalement

II.10.2. Déversoirs en casing (déversoir profond)

On a recours à ce genre de déversoir lorsque [19] :

- il est impossible, par un déversoir de surface, d'obtenir une répartition convenable du courant sur la surface à protéger ;
- il y a risque d'interférences trop importantes sur les structures voisines ;
- la résistivité du sol en surface ne permet pas d'obtenir une valeur acceptable.

Le procédé consiste à :

- Forer un trou dont le cuvelage en acier est réalisé en tube de diamètre intérieur généralement entre 120 et 200 mm.
- Le cuvelage doit être réalisé au fur et à mesure de l'avancement du forage, les tubes étant soudés bout à bout.
- Il est recommandé de mesurer la résistance de contact sol-cuvelage tous les 5m par exemple. On considère comme favorable la profondeur à partir de laquelle la résistance mesurée décroît nettement ;
- Forer au-dessous de cette profondeur pour recevoir la totalité des anodes prévues ;
- Introduire les anodes dans le forage (on constituera plusieurs chapelets électriquement indépendants) en assurant le maintien des anodes par un cordage imputrescible et non par les câbles électriques ;
- Remplir l'espace entre anodes et tubage avec de charbon.

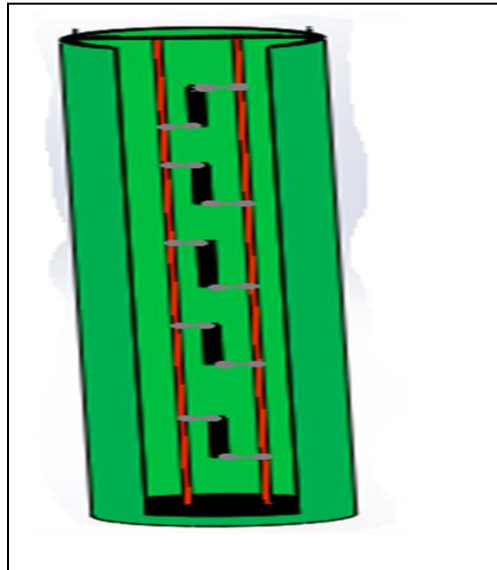


Figure II 8. : Schéma du puits anodique.

II.10.3. Masse anodique et nombre d’anodes nécessaires

Après la détermination du besoin de courant protecteur, la masse anodique utiliser Dépendra du type d’anode qu’on choisit pour notre déversoir. Elle est donnée par l’équation :[20]

$$Ma = C_a \cdot t \cdot I \dots\dots\dots(II.6)$$

Avec :

- Ma : masse totale en Kg
- C_a : consommation de l’anode en Kg/A/an
- t : durée de vie désirée
- I : courant totale en ampère

En pratique, une anode ne se consomme qu’à 80% de sa masse initiale, d’où la formule De la masse anodique ajustée est :

D’où le nombre d’anodes utiliser est :

$$N = \frac{Ma}{ma} \dots\dots\dots(II.7)$$

Avec :

- N : nombre d’anodes FeSiCr
- Ma : masse totale en Kg
- ma : masse unitaire d’anode en Kg

- Tension d'alimentation,
 - Tension d'utilisation,
 - Intensité débitée,
 - Potentiel de la structure,
 - Temps de fonctionnement,
-
- **Boîte de jonction** : Le fil positif du rectificateur (redresseur) est relié aux anodes par une boîte de jonction, elle permet de surveiller la mesure de courant aux anodes [21].



Figure II.10 : Boîte de jonction.

II.11. Facteurs de limitation d'efficacité de la protection cathodique

II.11.1. Perte d'adhérence des revêtements

Le phénomène de décollement cathodique a été décrit par un mécanisme à trois étapes, avec une exigence que le revêtement ne soit pas étanche. Principalement ce phénomène est applicable pour les revêtements suivants : Les revêtements minces et perméables : le dioxygène dissous et les molécules d'eau sont transportés à la surface du métal qui est considéré comme une étape indispensable. En premier lieu, l'eau et le dioxygène dissous pénètrent dans le revêtement engendrant un processus de réduction de ces espèces à l'interface métal-solution. La dernière étape traduit la rupture de la liaison métal-revêtement. Les revêtements épais et quasi perméables : dans ce cas, la première étape n'existe pas. En présence de défauts ouverts, il y a un contact direct entre les agents corrosifs et la surface du métal. Dans la zone de contact, il se produit la réduction du dioxygène dissous et la formation des ions OH^- . L'augmentation locale du pH va provoquer la détérioration de la liaison entre le métal et le revêtement et donc la perte d'adhérence de ce dernier [22].

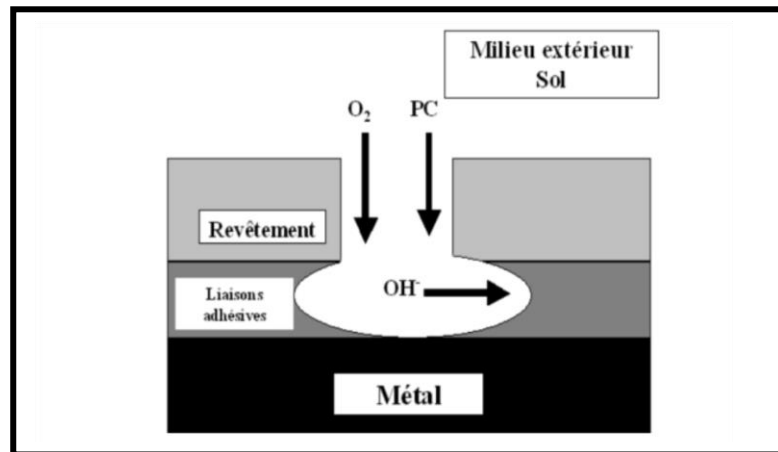


Figure II.11 : Schéma de formation d'un décollement cathodique

II.11.2. L'influence d'une source de courant alternatif

Dans un système de protection cathodique le courant continu se propage du déversoir, à travers le sol, vers la cathode. Cependant, si ce courant, dans son chemin, croise une structure métallique il sera capté par cette dernière. La décharge de ce courant, sur un point de la structure, provoquera une réaction de dissolution (formation d'ions M^{n+}). Autrement dit, la structure se comporte comme une anode. Le courant qui s'écoule à l'intérieur de la structure métallique s'appelle le courant vagabond ou bien le courant parasite. Les courants vagabonds proviennent des systèmes à courant continu tels que l'ascenseur, le train électrique...etc.

La corrosion par courant alternatif peut se produire sur des structures protégées cathodiquement. Plusieurs défaillances de pipelines sous protection cathodique sont causées par le courant AC. En 1986, une enquête Allemande autour d'une défaillance provoquée par la corrosion par un courant AC a révélé un phénomène de corrosion par piqûres avec des taux trop élevés malgré les valeurs d'intensité de courant de protection entre 1.5 et $2 A/m^2$ et des potentiels de protection entre -1.8 et -2 V. Ils ont noté que le taux de corrosion croît avec de grandes valeurs de densité de courant AC. Ils ont également démontré que l'absence de Courant AC ou bien les faibles densités de courant alternatif moins de $20 A/m^2$ l'acier est protégé pour un potentiel de $-0.95 V/ECu/CuSO_4$. En revanche, pour des valeurs de densité de courants AC supérieurs à $20 A/m^2$ le potentiel de protection cathodique doit être déplacé vers des valeurs plus négatives. [23,24]

II.12. Courants vagabonds

II.12.1. Définition

On appelle courants vagabonds, des courants électriques qui utilisent, pour revenir à leur source, des structures dans lesquelles ils ne devraient pas, normalement, circuler. Ces courants se rencontrent principalement dans le cas de voies ferrées électrifiées, de machines d'extractions de mines, etc.

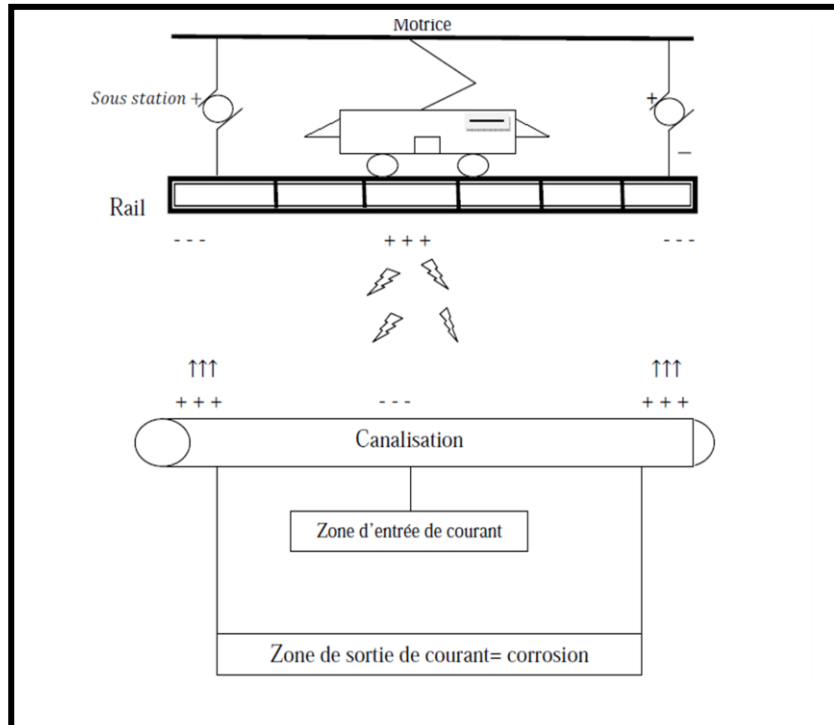


Figure II.12 : Corrosion par courants vagabonds

II.12.2. Effets des courants vagabonds sur les structures enterrées

Une partie du courant de retour circule dans le sol. Ce courant prend de préférence les circuits naturels bons conducteurs, comme les couches de terrain à faible résistivité, les lits des cours d'eau, et bien sûr toutes les structures métalliques rencontrées. En circulant dans ces structures, le courant a deux effets :

- dans les zones d'entrée de courant, la structure devient négative par rapport au terrain. Si le potentiel est suffisamment négatif, elle est protégée cathodiquement ;
- dans les zones de sortie de courant, la structure devient positive par rapport au sol. Elle est donc en état de corrosion.

II.13. Conclusion

La protection cathodique par courant imposé couplée à une protection passive (PE), présente l'inconvénient majeur d'exiger le contrôle et la maîtrise de toute une batterie de paramètres en temps réel et qui peuvent être affectés par le moindre défaut dans la structure ou dans le revêtement qui la protège. Une mauvaise distribution du potentiel appliqué sur les canalisations entraîne des protubérances (court-circuit), pertes énergétiques par effet joule. Lorsque la protection cathodique n'est pas totalement maîtrisée différents défauts peuvent apparaître sur les revêtements. Dans ce travail, nous avons montré que la maîtrise de la distribution du potentiel, qui doit être maintenu le long de la conduite à un niveau de protection minimum, passe nécessairement par le contrôle strict d'un nombre de paramètres caractéristique à la fois du milieu, de l'environnement et des outils de protection utilisés. La nature du sol, la nuance du matériau pipelinier, le type de revêtement, ainsi que nature, dimensions et emplacements des déversoirs sont tous des grandeurs à considérer dans la mise en œuvre de la technique de protection cathodique. La bonne distribution du potentiel de protection le long de la structure dépend essentiellement de l'optimisation des emplacements et des valeurs des résistances de terre (déversoirs anodiques), et surtout de la valeur du coefficient d'atténuation (a) qui est fonction de la résistance d'isolement et donc de l'état du revêtement. Plus la valeur de la résistance d'isolement est importante, plus le facteur d'atténuation est faible, et donc une portée de soutirage plus grande. Inversement avec un facteur d'atténuation important, la portée du soutirage est réduite et aura pour conséquence une augmentation des postes de soutirage répartis le long des canalisations lorsque l'on aura affaire à un ouvrage de faible valeur de la résistance d'isolement, d'où la nécessité d'un contrôle optimal de l'état du revêtement et d'une maîtrise du potentiel de protection. Enfin, Il reste toutefois à vérifier sur le terrain l'apport et efficacité de notre modeste contribution.

Chapitre III : Calculs et dimensionnement

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va calculer et dimensionner. On veut protéger un tronçon de pipe-line (OB1) qui se situe entre Akbou PK du PPC 606 et Amizour PK du PPC 644, un tronçon de 38 Km par protection cathodique (par anodes sacrificielles) pour une durée de 20 ans.

III.2. Caractéristiques de pipe-line

Tableau III.1 : Caractéristique de la canalisation

Caractéristique	Unité	Valeur
Longueur de la canalisation	m	38000
Diamètre extérieure de la canalisation	Ø ‘’	22
Epaisseur de pipe-line	mm	7.92
Résistance du sol	Ω.m	1,2
Densité de courant de PC pour une canalisation revêtu en en polyéthylène	mA/m ²	0.005
	A/m ²	0.000005
Nuance de l’acier	/	X52
Résistance de l’acier	Ω.m	21×10 ⁻⁸
Coefficient de revêtement	/	0.125
Durée de vie de la canalisation	Année	20

Dans le cas d’une conduite enterrée, la portée de la protection cathodique est fonction, En premier lieu, de la densité moyenne de courant protecteur i_s et la chute de potentiel U sur la résistance longitudinale $R=R' \times L$ de la conduite que l’on veut protéger.

Une formule est utilisée :

Formule de Von Baeckmann-Schwenk :

La formule de Von Baeckmann-Schwenk permet de calculer la portée de la protection cathodique d’une conduite enterrée, d’où la détermination de la valeur de courant de protection nécessaire est donnée par l’équation

Formule de la portée :

$$2L = \sqrt{\frac{8 \times \Delta U_L}{\pi \times D \times i_s \times R'}} \dots\dots\dots(III.1)$$

Avec :

- i_s : la densité de courant protecteur avec le polyéthylène (0.005 mA/m²)
- D : le diamètre de la conduite (en m)
- R' : la résistance linéique du tube (en $\mu\Omega / m$)
- U la chute de tension sur le tube ($\Delta U_L = U_{Lmax} - U_{Lmin}$)

(U_{Lmax} le potentiel maximum au niveau de l'installation de protection UCu/CuSO₄= -1.700V)

(U_{Lmin} le potentiel minimum l'extrémité du tronçon protégé UCu/CuSO₄= -0.800 V)

$$\Delta U_L = 900 \text{ mV}$$

$$2L = \sqrt{\frac{8 \times 900}{3.14 \times 558.8 \times i_s \times R'}}$$

Le calcul de la résistance linéique du tube est donnée par :

$$R' = \frac{1}{\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4 \times \sigma}} \longrightarrow R' = \frac{1}{5.6 \times 10^6 \frac{(558.8^2 - 542.96^2) \times 3.14}{4}}$$

- d : diamètre intérieure de de tube (en mm) $d = D - 2e$, e : épaisseur du pipe.

- σ_{Fe} : conductibilité du fer, ($\sigma_{Fe} = 5.6 \times 10^6 \text{ S/m}$)

$$R' = 2.17 \mu\Omega / m$$

Calcul de la résistance longitudinale
 $R = R' \times L$

$$R = 2.17 \times 38000 \longrightarrow \boxed{R = 82460 \mu\Omega}$$

La conduite d'OB1 est revêtue au PE, et la densité de courant protecteur pour le PE est

$$i_s = 0.005 \text{ mA/m}^2$$

$$2L = \sqrt{\frac{8 \times \Delta U_L}{\pi \times D \times i_s \times R'}} \longrightarrow 2L = \sqrt{\frac{8 \times 900}{3.14 \times 558.8 \times 0.005 \times 2.17}}$$

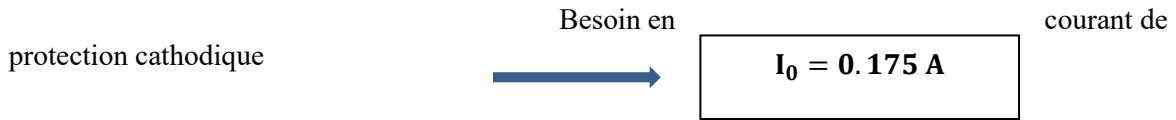
$$2L = 38 \text{ Km}$$

L'intensité du courant calculée à partir de la portée de la protection cathodique 2L par la formule :

$$2I_0 = 2L \times \pi \times D \times i \dots\dots\dots(III.2)$$

$$2I_0 = 38000 \times 3.14 \times 0.000005 \times 0.5588$$

$$2I_0 = 0.33333 \approx 0.35 \text{ A}$$



$$I_{PC} = K \cdot S \cdot i \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec :

- I_{PC} : Courant de protection cathodique (A),
- S : surface de la canalisation (m²),
- K : facteur de (≥ 1.25) ou facteur de sécurité,
- i : densité de courant de protection cathodique pour une canalisation revêtu ($i = \frac{I}{S}$ (A/m²)).

$$S = \pi \cdot L \cdot D \dots\dots\dots(III.4)$$

$$S = 3.14 \times 0.5588 \times 38000 = 66676,016 \text{ m}^2$$

$S = 66676,016 \text{ m}^2$

$$I_{PC} = 1.25 \times 66676.016 \times 0.000005$$

$I_{pc} = 0,416 \text{ A}$

Tableau III.2 : Caractéristique d'une anode en Ferro-Silicium

Information	Unité	Valeur
Courant de protection cathodique	A	0.416
Durée d'exploitation du déversoir	An	20
Poids brut d'une anode	kg	2
Consommation massique de la matière d'anode	Kg/A.an	1
Facteur de sécurité	%	125
Diamètre de l'anode	mm	300
Longueur de l'anode	mm	30

III.3.2. *Masse anodique en Fe-Si nécessaire*

Après la détermination du besoin de courant protecteur, la masse anodique utiliser dépendra du type d'anode qu'on choisit pour notre déversoir. Elle est donnée par l'équation :

$$M_a = C_m \times t \times I_{PC} \times F \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec :

- M_a : masse anodique totale en Kg
- C_m : consommation massique de la matière d'anode en Kg/A.an,
- t : durée de vie désirée de déversoir,
- I_{PC} : courant de protection cathodique A,
- F : facteur de sécurité en (%) = 125 %.

$M_a = 1 \times 0.416 \times 20 \times 1.25$ la masse minimale anodique qu'il faut utilisée

$M_a = 10.4 \text{ kg}$

Nombre d'anodes nécessaire

En pratique, une anode ne se consomme qu'à 80 % de sa masse initiale, d'où Le nombre d'anodes nécessaires pour la protection cathodique est :

$$M_a = 10.4 \times 0.8 \dots\dots\dots$$

$M_a = 8.02 \text{ Kg}$

La masse réelle consommée

La masse restante, correspondant à 20% égale 2,08 Kg

$$N_a = \frac{M_a}{m_a} \dots\dots\dots(III.4)$$

Avec :

- N_a : Nombre d'anodes
- M_a : Masse anodiques totale en Kg
- m_a : Poids brut d'une anode de (Fe-Si) en Kg

$$N = \frac{10.4}{2}$$

$N = 5.2 \approx 6 \text{ anodes}$

III.4. **Calcul des résistances de terre des déversoirs**

III.4.1. *Déversoirs horizontaux (rails, profilés,...)*

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left(L \ln \frac{L^2 + L\sqrt{4h^2 + L^2}}{ah} + \frac{2h}{L} \right) - \sqrt{\frac{4h^2 + L^2}{L}} \dots\dots\dots(III.5)$$

Avec

- RH : La résistance de l'anode, en (Ω),
- ρ : La résistivité du sol, en ($\Omega.m$),
- L : La longueur de l'anode en (m),
- h : Profondeur en (m),
- a : le rayon de l'anode en (m).

III.4.2. Déversoirs verticaux (tige cylindrique, anode circulaire...)

Le calcul des résistances est déduit de la relation suivante :

$$R_V = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

R_V : la résistance en Ω

ρ : la résistivité de sol en $\Omega .m$

L : la longueur de l'anode en m

a : le rayon de l'anode en m

Résistivité du sol

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R$$

- ρ : résistivité de sol en ohm-mètre
- a : la distance entre les prises en mètre
- R : la résistance du sol en ohm-mètre donne le Tableau (III.1) $R=1.2 \Omega.m$

$$\rho = 2 \times 3,14 \times 2,5 \times 1,2$$



$$\rho = 18,84 \Omega.m$$

$$R_V = \frac{18,84}{2 \times 3,14 \times 0,4} \left(\ln \frac{4 \times 0,4}{0,015} - 1 \right)$$



$$R_V = 27,5 \Omega$$

$$U = R \times I \quad \longrightarrow \quad 27,5 \times 0,416$$

$$U = 11,44 V$$

III.5. Utilisation de backfill

Pour favoriser l'émission du courant, créer un milieu conducteur autour de l'anode, le déversoir est entouré par un anolyte de remplissage dit backfill». Ce milieu homogène permettra, de plus, une corrosion plus uniforme du déversoir et prolongera ainsi sa durée de vie. Les principaux "backfill" utilisés sont base d'argile ou de graphite.

La masse du backfill pour remplir le casing est calculée avec la formule suivante :

$$M_{\text{backfill}} = M_V \times \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (D_b)^2 \times L_b \dots\dots\dots(III.5)$$

Avec

- M_{backfill} : Masse volumique du backfill ;
- D_b : Diamètre de remplissage du backfill : $D_b = 0,4 \text{ m}$;
- L_b : Longueur de backfill à utiliser pour chaque anode $L_b = 1 \text{ m}$.

$$M_V = \rho = \frac{m}{V} = 650 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \left(\pi \times \frac{D^2}{4} \times h\right)$$

$$V_{\text{total}} = V \times N_a$$

$$M_{\text{backfill}} = \rho \times V$$

$$V_{\text{TOTAL}} = 0,7536 \text{ m}^3$$

$$M_{\text{backfill}} = 0,7536 \times 650$$

$$M_{\text{backfill}} = 489,84 \text{ kg}$$

Chapitre IV : Maintenance des pipelines

IV.1. Introduction

L'utilisation et la maintenance de pipelines sont essentielles dans l'industrie des pipelines. Les fournisseurs de service de contrôle non destructif (CND) et les exploitants de pipelines déploient des efforts considérables pour assurer la sécurité du transport du pétrole brut, du gaz naturel, des produits pétroliers raffinés et du gaz liquéfié sur leurs réseaux. La gestion de l'intégrité des pipelines, leur inspection, la prévention de la corrosion, la surveillance, la détection des fuites et la prévention des dommages dans son ensemble sont essentiels pour éviter la survenue d'incidents.

La corrosion externe ne formera pas sur ces équipements, grâce à leur revêtement externe par la peinture, ainsi que le climat dans cette région est sec.

IV.2. Méthodes inspection et détection de corrosion

La détection de pertes en métal et de fissures est le domaine où l'utilisation d'outils intelligents connus le plus d'intérêt. Deux techniques sont mises en évidence concernant la détection des pertes de métal :

- a) Perte d'épaisseur avec les méthodes non destructives :
 - Détection par flux magnétique MFL (magnétique flux leakage).
 - Détection par contrôle visuel ou par ultrason UT (technique ultrasonique).
- b) Perte de masse avec Les essais au laboratoire.

IV.2.1. Le contrôle visuel

Ce type d'inspection s'applique à l'état de l'équipement pour rechercher à l'œil toute corrosion de la surface du métal Figure (IV.1). Cette inspection préliminaire, dans la plus part des cas, ne permet de déceler que des défauts majeurs à l'œil nu, et parmi ces défauts on peut citer :

La déformation excessive (perte définitive de la géométrie originale de l'équipement),

La perte d'épaisseur de l'équipement.

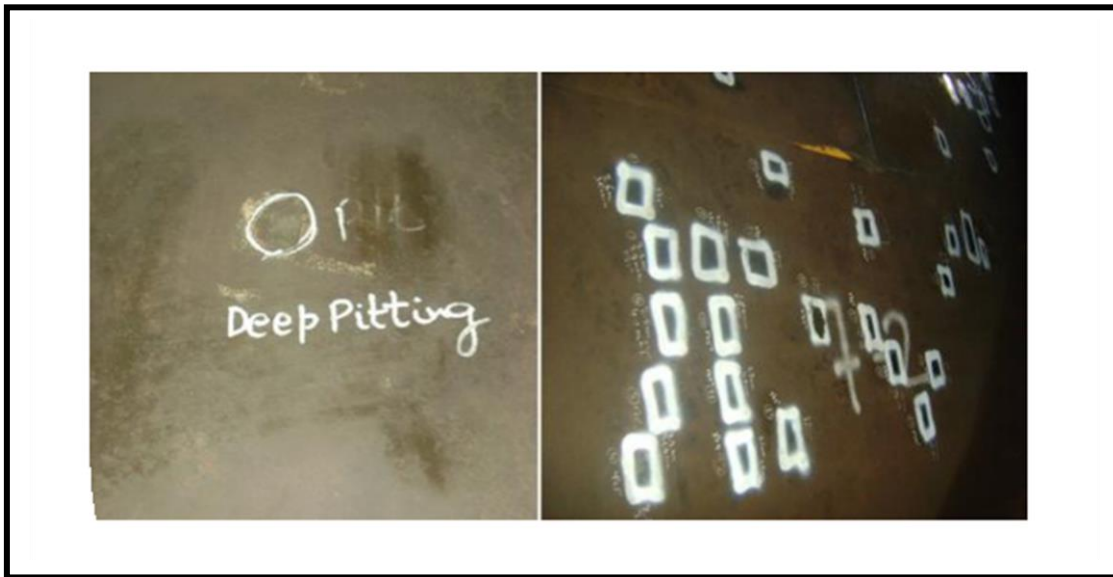


Figure (IV.1) : Le contrôle visuel.

IV.2.2. Inspection en ligne outil intelligent, les techniques MFL

Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée. Les premiers outils MFL ont particulièrement souffert de cet inconvénient surtout pour les grands diamètres.

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

Un grand nombre de pipelines à travers le monde ont dépassé la limite d'âge prévue de leur utilisation. Ils continuent pourtant à être parfaitement fonctionnels. Ceci moyennant un suivi régulier de leur état technique et une politique de maintenance appropriée.

La question fondamentale qui se pose dans ces cas-là est la suivante : Réparation ou réhabilitation ?

La première étape pour répondre à cette question est un programme détaillé d'inspection pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation de l'état de la ligne.

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

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

- Nettoyage de la conduite par outil conventionnel Figure (IV.2)/A.
- Envoi de l'outil géométrique en vue de détecter les risques de blocage Figure (IV.2)/B.
- Envoi de l'outil intelligent pour la localisation des pertes de métal et l'évaluation de leur importance Figure (IV.2) /C.

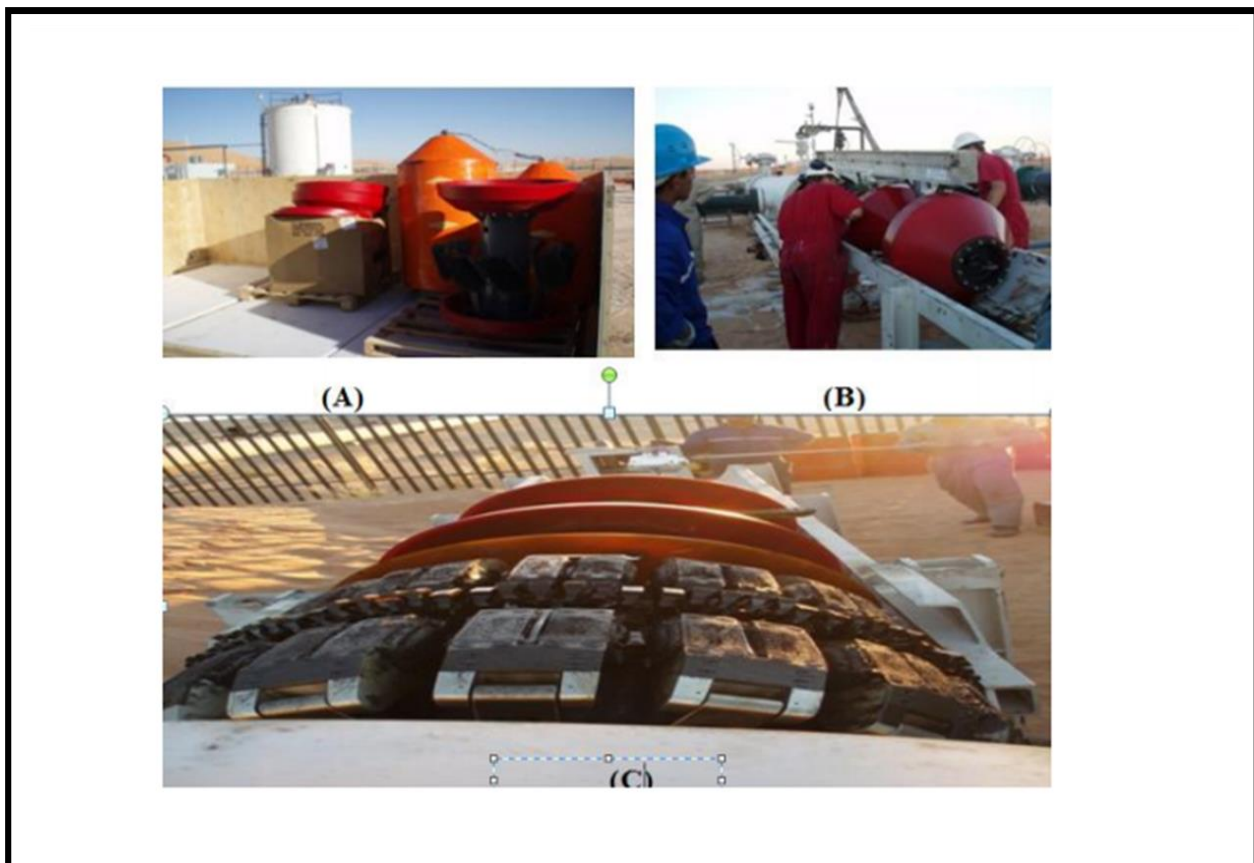


Figure (IV.2) : Les outils intelligents

Néanmoins, ce type d'inspection peut guider l'inspecteur dans l'analyse des causes et de la nature des dégradations (comme la corrosion galvanique suite à l'assemblage de deux matériaux de nature différentes).

IV.2.3. Le contrôle et Détection par ultrasons

- Principe

Le principe du contrôle non destructif par ultrasons (également appelé contrôle par échographie) consiste à émettre une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit à la manière d'un écho sur les obstacles qu'elle rencontre (anomalies, limites de la pièce). Les contrôles non destructifs par ultrasons permettent :

- de détecter des défauts internes dans différents matériaux.
- d'effectuer des mesures d'épaisseur sur les revêtements.
- de contrôler des équipements sans démontage.
- d'effectuer des mesures des corrosions internes ou externes.
- d'effectuer des contrôles d'adhérence et de délaminage.
- de vérifier la conformité des soudures, pièces de forge et de fonderie, céramiques ...

Le contrôle par échographie est rapide à exécuter et fournit des résultats immédiats. L'utilisation du gel d'échographie ECHOGEL lors des contrôles non destructifs optimisera la lecture et la réalisation des tests. Figure (IV.3).



Figure (IV.3) : principe de mesure avec UT

IV.2.4. Le test ultrasonique longue portée (Long Range Ultrasonic Testing LRUT)

IV.2.4.1. Principe

Est une technique avancée d'examen non destructif qui a été développée pour tester de grands volumes de matériau à partir d'un seul point de test. Ce qui différencie cela des méthodes de test ultrasonores plus traditionnelles, c'est que, avec LRUT, un couplant liquide entre les transducteurs et la surface n'est pas nécessaire. Pour cette raison, LRUT est l'un des outils d'inspection les plus rapides pour la surveillance de la corrosion et des autres dommages sur les pipelines.

LRUT est une technique d'essai non destructif inestimable qui trouve des applications dans l'industrie pétrolière et gazière. Il est largement utilisé pour l'inspection des canalisations dans des domaines tels que les croisements de routes et de rivières, les tubes de centrales électriques, les colonnes montantes, les canalisations en surface, les lignes de jetées et les canalisations de raffinerie pour la détection de problèmes tels que la corrosion sous isolation. Il a également trouvé un usage répandu dans les situations où les tuyaux ou les tubes ne sont pas accessibles aux autres méthodes de détection, tels que les tuyaux enfouis dans le sol, ceux enfermés dans un manchon ou ceux situés à une altitude élevée. En particulier pour les applications suivantes :

- Criblage de tuyaux isolés pour la corrosion externe et interne sans retrait d'isolant.
- Criblage du tuyau passant à travers le mur de digue.
- Criblage des canalisations de traversée :
 - de rivière
 - des lignes
 - de jetée.

Criblage des canalisations en mer, y compris la zone de projection de la colonne montante.



Figure (IV.4) : Détection la corrosion réalisée avec LRUT.

La LRUT est réalisée à l'aide d'un système composé d'un détecteur de défauts basse fréquence, d'un récepteur d'impulsions, de quelques anneaux de transducteurs et d'un ordinateur portable contenant le logiciel qui contrôle le système Figure (IV.4). Pour commencer, les anneaux du transducteur sont fixés autour d'un tuyau, à travers lequel ils vont générer une série d'ondes guidées à basse fréquence. C'est l'espacement uniforme des transducteurs à ultrasons sur la circonférence du tuyau qui permet aux ondes guidées de se propager symétriquement le long de l'axe du tuyau, offrant une couverture complète et à 100% de la paroi du tuyau, y compris à proximité de colliers et de tuyaux gainés ou enterrés. Les ondes sont ensuite renvoyées vers le transducteur lorsqu'elles atteignent un changement d'épaisseur de paroi, ce qui permet au processus de détecter la corrosion, les pertes de métal ou les discontinuités.

IV.2.4.2. Présentation des résultats

Le résultat de chaque site de test est présenté sur une feuille de rapport similaire à celle présentée Figure (IV.5).

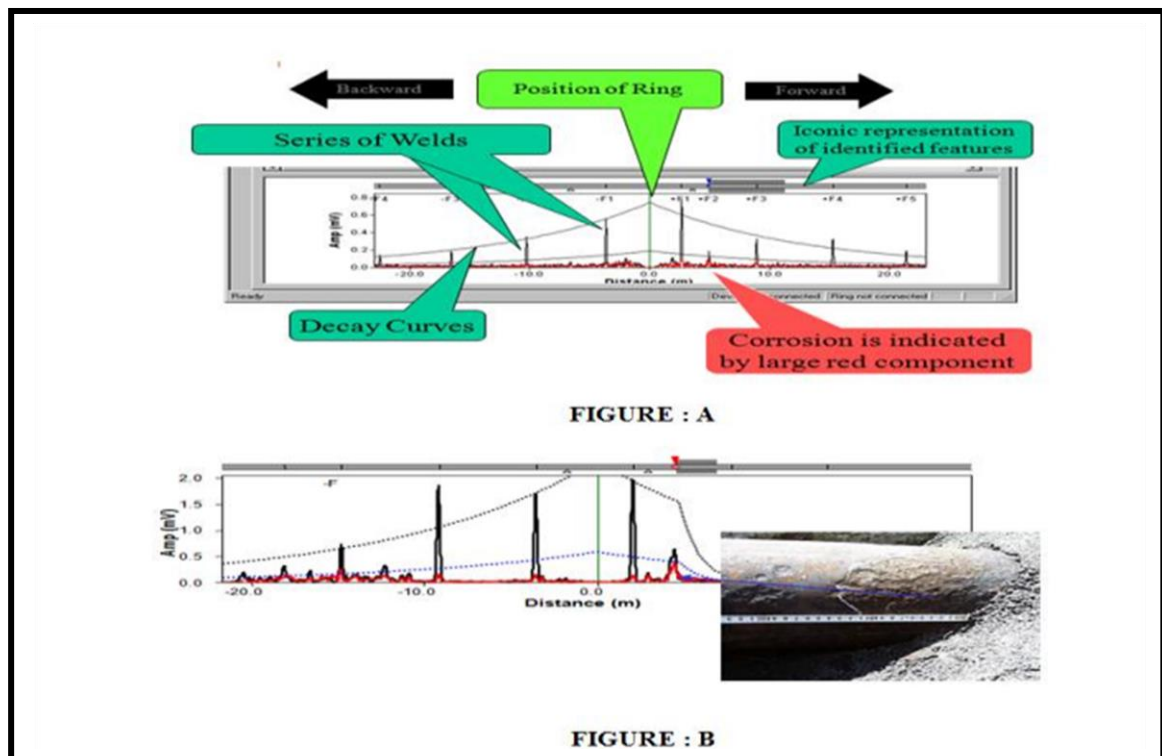


Figure (IV.5) : Présentation et lecture de résultat par Méthode LRUT.

IV.3. Règle de classement

A. Règle de classement 1 : (Corrosion sévère)

Ce niveau de corrosion est approprié lorsque les traces noires et rouges se trouvent au-dessus du DAC d'appel. Cela devrait correspondre à un défaut qui risque fortement de pénétrer dans toute la paroi du tuyau. Il apparaît sous la forme d'un point d'exclamation rouge (!) Dans les résultats.

B. Règle de classement 2 : (Corrosion moyenne)

Ce niveau de corrosion est approprié lorsque la trace noire se situe entre le DAC d'appel et le DAC de soudage, mais que la trace rouge reste inférieure à celle du DAC d'appel. Il devrait correspondre à une perte de plus de 10% de la section transversale répartie de manière à ne pas constituer un défaut de paroi traversant. Il apparaît sous la forme d'un point d'exclamation bleu (!) Dans les résultats.

C. Règle de classement 3 : (Corrosion mineure non déclarable)

Ce niveau de corrosion est approprié lorsque la trace noire (symétrique) et la trace rouge (non symétrique) se trouvent en dessous du DAC d'appel. Cela devrait être corrélé à la corrosion pour laquelle moins de 10% de la section transversale a été perdue. Ces indications sont généralement indiquées pour indiquer que les tuyaux sont en bon état général. Il apparaît sous la forme d'un point noir (!) Dans les résultats.

IV.3.1. Règles générales

Le matériau du coupon Figure (4.13) doit être exempt de défaut afin de permettre des mesures successives :

- L'état de surface doit être homogène.
- Le positionnement dans la veine fluide doit être adapté à la forme du coupon.
- Il doit être isolé électriquement de son support.
- Il doit être dégraissé avant son utilisation et protégé lors de son stockage.
- Et pesé en grammes avec 4 décimales. Utiliser des gants en plastique lors de la manipulation.

Si les coupons ne sont pas pesés immédiatement, ils doivent être stockés dans un endroit sec et sous vide d'air.



Figure (IV.6) : Placement coupon.

IV.4. Méthode de relevés de potentiel à espaces rapprochés

Le relevé de potentiel à espaces rapprochés permet d'évaluer les conditions de protection d'une structure enfouie à savoir :

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

Les mesures de potentiel à espace rapproché relevées le long du pipeline permettent d'évaluer les variations de la protection cathodique présentes le long de ce dernier.

Suite à la campagne de mesures, les résultats sont présentés sous forme de graphique permettant d'évaluer le profil de la protection cathodique le long du pipeline et d'évaluer les points chauds nécessitant une protection supplémentaire.

IV.4.1. Préparation de l'intervention

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

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

A. Mise en place des équipements

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

- Identifier le redresseur de courant à interrompre.
- Prendre en note ses paramètres actuels d'opération (voltage et courant).
- Éteindre le redresseur de courant.
- Vérifier que le courant n'excède pas celui des limites de l'interrupteur de courant. Ne jamais installer un interrupteur de courant ayant une limite en courant inférieure au courant du redresseur.
- Installer l'interrupteur de courant en série avec la borne positive ou négative du redresseur de courant

- Ajuster l'interrupteur de courant au mode cyclique désiré ON/OFF (usuellement, le mode considéré est de 8 secondes ON et 2 secondes OFF, ou 800 millisecondes ON et 200 millisecondes OFF)
- Énergiser le redresseur de courant en le remettant en fonction.
- Démarrer l'interrupteur de courant ajusté au mode d'interruption désirée et passer à l'étape de mesure de potentiels.

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

B. Mesures de potentiels

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

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

C. Retrait de l'équipement :

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

- Éteindre l'interrupteur de courant.
- Éteindre le redresseur de courant.
- Retirer l'interrupteur de courant branché en série avec le redresseur de courant.
- Energisé le redresseur de courant en le remettant en fonction.

S'assurer de la fonctionnalité du redresseur de courant selon les paramètres d'opération initiaux. Ces étapes doivent être réalisées à chacun des redresseurs de courant ayant fait l'objet de la mise en place d'un interrupteur de courant pour la campagne de mesures de potentiels à espace rapproché en mode cyclique.

D. Post-intervention

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

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

IV.4.2. Méthode de relevé par dépolarisation

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

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

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

- Préparation de l'intervention.
- Préparation de la dépolarisation Mesures de potentiels.

- Remise en fonction des redresseurs de courant Post-Intervention.

IV.4.3. Méthode d'évaluation de l'influence des redresseurs de courant

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

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

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

IV.4.4. Méthode de relevés aux prises de potentiel

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

Potentiels « ON » et « OFF »

Potentiel des blindages (s'il y a lieu)

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

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

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

IV.5. Prise de mesures au point de vérification

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

Identifier le point de vérification à évaluer :

- Schématiser les câbles présents ainsi que les connexions qui s'y trouvent.
- Connecter une électrode de référence de cuivre/sulfate de cuivre à la borne négative du voltmètre
- Connecter la borne positive (généralement rouge) du voltmètre à un câble du contact négatif de la structure à vérifier.

- Mettre en place l'électrode de référence sur le sol à proximité de la prise de potentiel et s'assurer d'un contact direct avec le sol et non avec d'autres matériaux tel que du béton, de la pierre ou de la végétation.
- Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre et s'assurer de sa stabilité. Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur.
- Dans le cas où un second câble négatif serait présent au point de vérification, connecter la borne positive du voltmètre à ce câble.
- Lire la valeur du potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, s'assurer de sa stabilité et qu'elle correspond bien à la première valeur relevée permettant de s'assurer d'un contact négatif adéquat.
- Noter le potentiel apparaissant à l'écran du voltmètre, ainsi que sa polarité (+ ou -). Dans le cas d'un voltmètre à mémoire, sauvegarder cette valeur.
- Répéter ces mesures à chacun des points de vérification.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à la protection cathodique des structures métalliques enterrées dans le sol comme l'exemple qu'on a abordé des pipelines exploités par l'entreprise nationale Sonatrach de Bejaia qui sert à transporter les produits pétroliers. Les canalisations de transport d'hydrocarbure dont le matériau constitutif est l'acier, ces derniers sont protégés par des revêtements externes (protection passive) à base de bitume routier (revêtement organique) est associé à un système actif de protection cathodique par courant imposé dont le potentiel est maintenu à $-850 \text{ mV} / \text{Cu}/\text{CuSO}_4$.

Afin de maintenir la structure métallique dans son domaine d'immunité, il est nécessaire de surveiller régulièrement les facteurs influant tel que : le potentiel, les paramètres du sol sur lequel est disposé le pipeline de transport (résistivité, pH).

Le degré d'agressivité du sol est déterminé par la mesure de sa résistivité. Un sol très corrosif (faible résistivité) sa vitesse de corrosion est très élevée contrairement au sol peu corrosif (grande résistivité) le taux de corrosivité est très faible. Pour déterminer les valeurs de la résistivité de sol (Akbou) nous avons utilisé la méthode de **Wenner** qui nous a permis de définir le degré d'agressivité de milieu, les résultats obtenus ont montré que le sol de pipeline est très corrosif, pour connaître les réactions qui se produisent entre le sol et la surface extérieure du pipeline.

La mesure de potentiel du pipeline à l'aide de l'électrode de référence de sulfate de cuivre Cu/CuSO_4 a montré que nous avons obtenu une valeur différente à celle de seuil de protection de l'acier qui est de $-850 \text{ mV}/\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ mais comme cette valeur mesurée est inférieure à -850 mV la structure est toujours protégée, les valeurs de potentiel très négatives peuvent entraîner une détérioration du revêtement.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de pipeline nous ont permis de connaître le nombre d'anode nécessaire pour protéger toute la surface extérieure de ce dernier.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] J. Bernard : métallurgie générale, 2^{ème} édition Masson, 1997.
- [2] auteur :La corrosion des métaux et alliages, corrosion et génie industriel, recueil des conférences, (1974), p 4-27.
- [3] CEFRACOR : Matériaux métalliques : phénomènes de corrosion, deuxième partie : propriété et caractérisation des surfaces et interfaces. CEFRACOR 2003, p 22-26.
- [4] Marec, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.
- [5] D. Bouzidi, corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieur, école de technologie supérieur université de Québec 2011.
- [6] La protection cathodique, guide pratique, édition technip, paris 1986.
- [7] S. Bensaada : cours de corrosion.
- [8] V. S. Sasti, E. Ghali, M. Elboujdaini ‘corrosion prevention and protection practical solutions’ ed J.Wiley & Sons LTD 2007 ISBN : 978-0-470-02402-7.
- [9] M. BOUNOUGHAZ , thèse de doctorat en métallurgie, ENP, 2006.
- [10] M. DEKOSTER, Etude du comportement mécanique des structures en béton armée dégradé par la corrosion, Thèse doctorat, université de Lille1, Génie civil, 2003.
- [11] PM. Chess, JP. Broomfield, Cathodic protection of steel in concrete and masonry, CRC Press, New york,2014.
- [12] B. Normaand, N. Pébère, C. Richard, M.wery, Prévention et lutte contre la corrosion : une approche scientifique et technique. Presses Polytechniques et universitaires Romandes.2004
- [13] IA. Metwally, HM. Al-Mandhari, A Gastli.Z.Nadir, factors affecting cathodic-protection interference, Elsevier, 31(2007).
- [14] R. Baboian, Corrosion tests and standards : Application and interpretation, ASTM International, USA, 2nd Edition, 2005.
- [15] National Association of corrosion engineers. Conference, USA (56, 2001)
- [16] La protection cathodique-guide pratique, Technip, France, 1986.
- [17] M.Kutz, Handbook of environmental degradation of materials. William andrew, USA,2005.
- [18] Wv.baeckmann, W.Schwenk, W.prinz, Handbook of cathodic corrosion protection, Gulf professional publishing, UK, 1997.
- [19] M.Lyes, Protection Cathodique & dimensionnement et réalisation d'un déversoir horizontal, RTC, DPC, IAP, 2017.
- [20].....
- [21] SD.Cramer, S Bernard, Jr.Covino, Corrosion : environments and industries, ASM international, USA, 2006.

[22] S. Gastaud. 2002 Influence de l'état du revêtements hydrocarboné sur le risque de corrosion des canalisations enterrées de transport de gaz. Thèse de doctorat. L'institut National Des Science Appliquées de Lyon.

[23] Z. Ahmed, Principles of corrosion engineering and corrosion control, Butterworth-Heinemann, New York, 2006.

[24] D.Kuang. 2016. Pipeline corrosion and coating failure under alternating current interference. Thesis Degree pf Doctor of Philosophie. University of Calgary.

ANNEXES

Annexe A : Présentation de l'entreprise

1. Présentation :

Sonatrach est la plus importante compagnie d'hydrocarbures en Algérie et en Afrique

Créée le 31 décembre 1963 elle joue un rôle très important dans l'économie du pays.

Optant pour une stratégie de développement, Sonatrach intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisations, la transformation et la commercialisation des

hydrocarbures et de leurs dérivés, La compagnie s'est également adapté au nouvel environnement économique mondial en diversifiant ses activités, par conséquent,

investit dans d'autres créneaux économiques notamment les mines, la génération électrique, l'eau, le transport aérien et maritime...etc.

Confirmant sa vision d'internationalisation, Sonatrach opère en Algérie et dans plusieurs

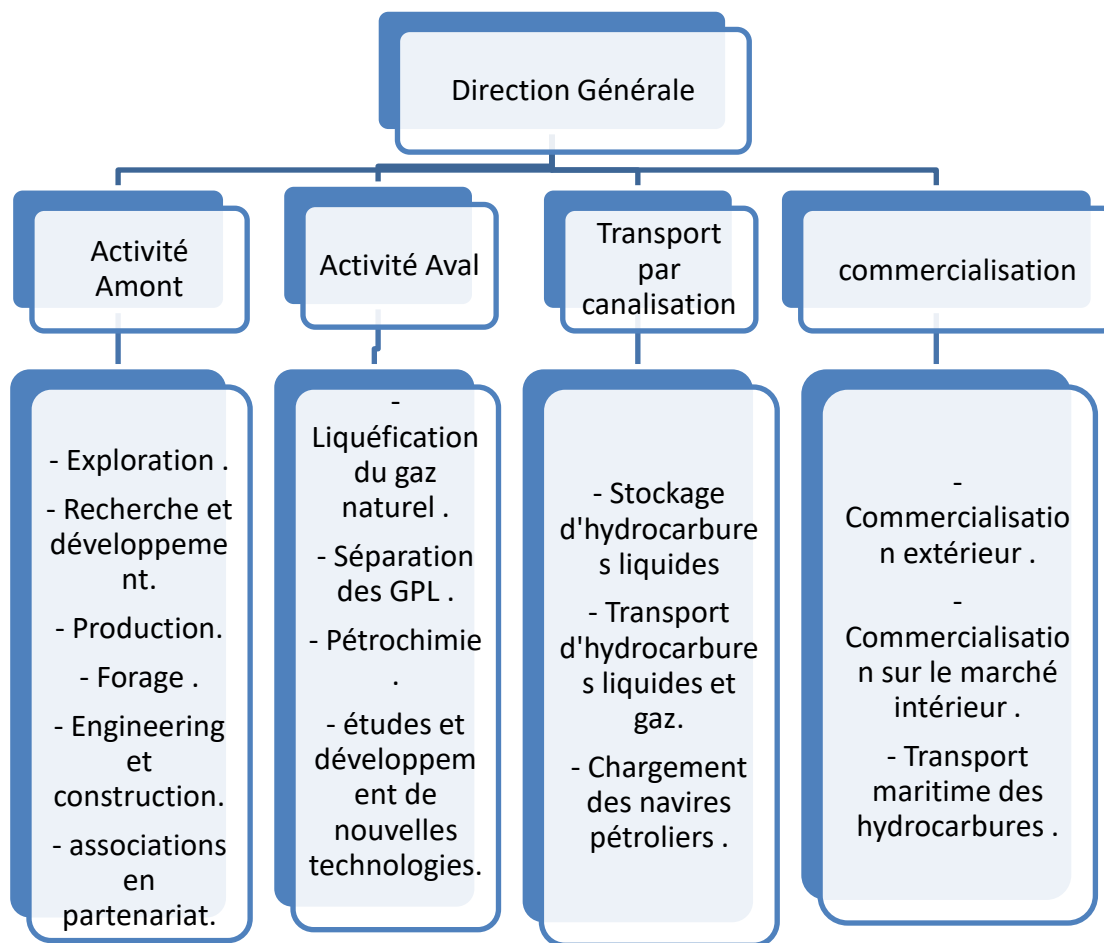
régions du monde Afrique (Mali, Niger, Libye, Egypte), Europe (Espagne, Italie, Portugal,

Grande Bretagne), Amérique Latine (Pérou) et USA. Ce qui lui permet d'être aujourd'hui un

Acteur majeur dans le domaine du pétrole et du gaz. Avec un chiffre de 67,8 milliards de dollars de revenus en 2013 elle occupe la place du leader en Afrique et 12ème au monde.

2. Principales activités de la Sonatrach :

Les activités de Sonatrach s'articulent autour de quatre branches principales :



2.1 Activité Amont

L'Activité Amont recouvre les métiers de recherche, d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures. Dans le but de remplir ses missions prioritaires, savoir le développement des gisements découverts, l'amélioration des taux de récupération, le renforcement des capacités de production pétrolières et gazières, Sonatrach initié et réalisé seule ou en association de partenariat des projets de grandes envergures.

2.2 Activité Aval

L'activité Aval en charge le développement et l'exploitation des complexes de liquéfaction de gaz naturel, de séparation de GPL, de raffinage et des gaz industriels.

2.3. Activité Transport par Canalisation

Le transport par canalisations est l'une des plus importantes activités de Sonatrach. La branche TRC se charge l'aide d'un important réseau de pipe, de la collecte et de l'acheminement des hydrocarbures partir des sites de production vers les sites

D'exploitations et vers les terminaux pour l'exportation.

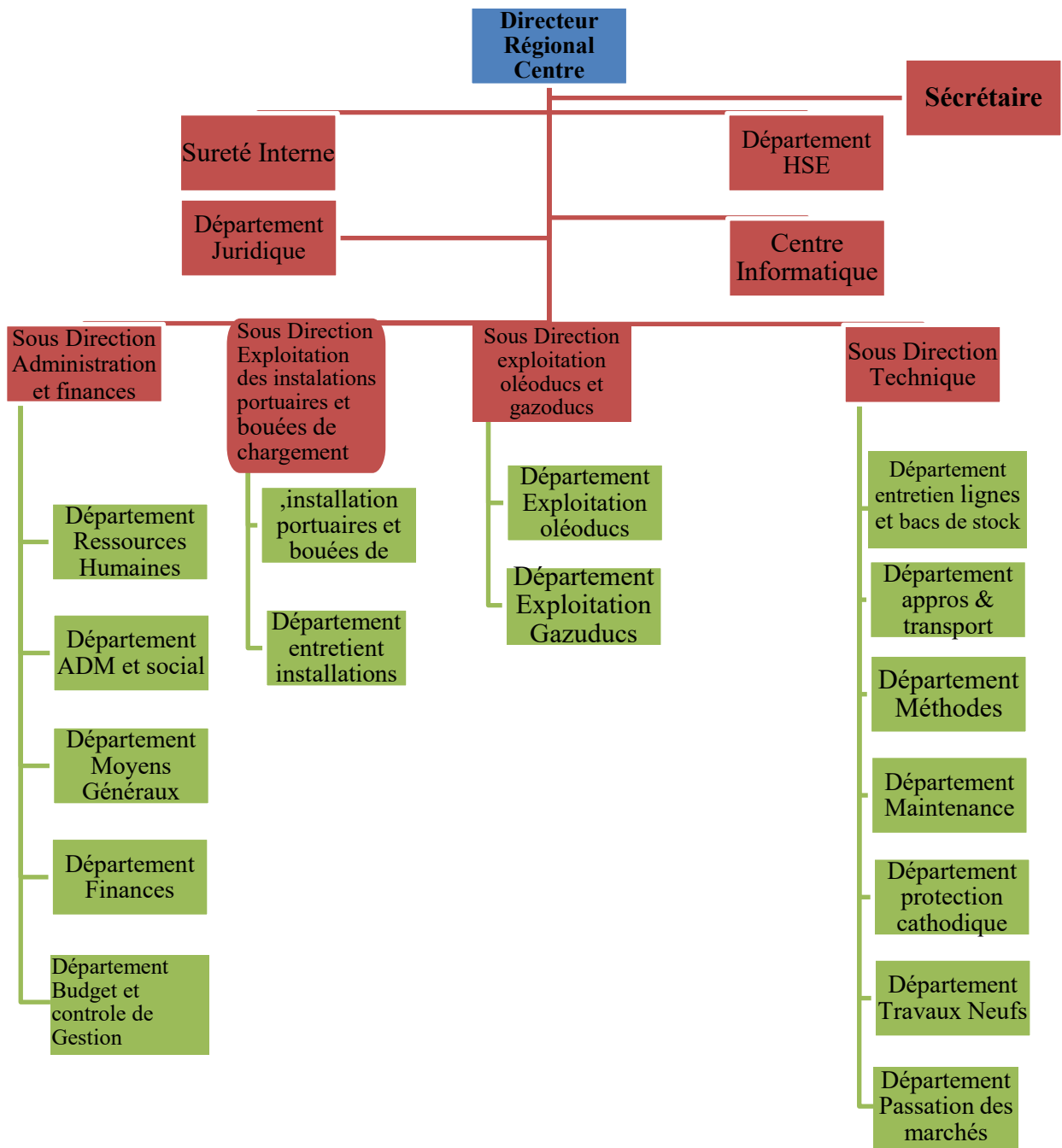
L'activité TRC est organisée comme suit :

- R.T.C Région de Transport Centre (Bejaia).
- R.T.O Région de Transport Ouest (Arzew).
- R.T.E Région de Transport Est (Skikda).
- R.T.I Région de Transport In-Amenas (In-Amenas).
- R.T.H Région de Transport Haoud-el-Hamra (Centre □ distributeur).
- GPDF: Région Gazoduc PEDRO DUAN FARELL
- GEM Région Gazoduc ENRICO MATTEI
- GHR Région Gazoduc HASSI RMEL

2.4 Activité Commercialisation

L'activité Commercialisation pour missions l'élaboration et l'application de la stratégie de Sonatrach en matière de commercialisation des hydrocarbures sur le marché intérieur et l'international par les opérations de trading et de shipping. l'Activité Commercialisation gère les interfaces et les opérations avec les autres opérateurs nationaux pour satisfaire la demande du marché national dans les meilleures conditions économiques et de qualité de service.

3. Aperçu sur la Région de Transport Centre (RTC Bejaia) :



La direction régionale de Bejaia relève de la division exploitation de la branche transport par canalisations de Sonatrach. Elle est chargée du transport, stockage, et de livraison des hydrocarbures (pétrole bruts), ainsi que du gaz naturel.

La R.T.C, dispose d'un réseau de canalisation (pipe-line) dépassant 1200 Km, présenté comme suit :

- Oléoduc (OB1) « Haoued-el-Hamra – Bejaia» (24/22 pouces), d'une longueur de 668 Km.

Il assure l'acheminement du pétrole brut de Haoued-el-Hamra vers la station "Beni Mansour" et le "parc de stockage de Bejaia".

- Oléoduc (D'OG1) «Beni-Mansour-Sidi-Arcine» (20 pouces), d'une longueur de 144 Km.

Il assure l'alimentation en pétrole brut de la raffinerie d'Alger (Sidi-Arcine).

- Gazoduc (GG1) «Hassi Rmel - Bordj-Menaïl» (42 pouces), d'une longueur de 439 Km,

il compte plus de 20 postes de prélèvement destinés à l'alimentation en gaz naturel de toutes les régions du centre du pays.

La RTC dispose également de 4 stations de pompage, une station de compression, deux terminaux et un port pétrolier.

<i>Ouvrage</i>	<i>Ouvrage ou site</i>	<i>Localisation</i>	<i>Observations</i>
<i>OB1</i>	<i>Station SP1bis</i>	<i>Pk190</i>	<i>DJAMAA (EL OUED)</i>
	<i>Station SP2</i>	<i>Pk 350</i>	<i>EL OUTAYA (BISKRA)</i>
	<i>Station SP3</i>	<i>Pk 495</i>	<i>M'SILA</i>
	<i>Terminal marin</i>	<i>Pk 668</i>	<i>12 Bacs de stockage de 35000m³ TMB Nord 04 Bacs de stockage de 5000m³ TMB sud 02 Manifolds Une gare à racleur</i>
	<i>Port pétrolier</i>	<i>/</i>	<i>03 quais de chargement</i>
<i>D'OG1</i>	<i>Station SBM</i>		<i>Beni-Mansour</i>
	<i>Terminal TRA</i>		<i>TERMINAL Alger</i>
<i>GG1</i>	<i>Station SC3</i>	<i>Pk 181</i>	<i>MOUDJBARA</i>
	<i>TBM</i>	<i>Pk 439</i>	<i>Le terminal Gazier de BORJ-MNAEL</i>

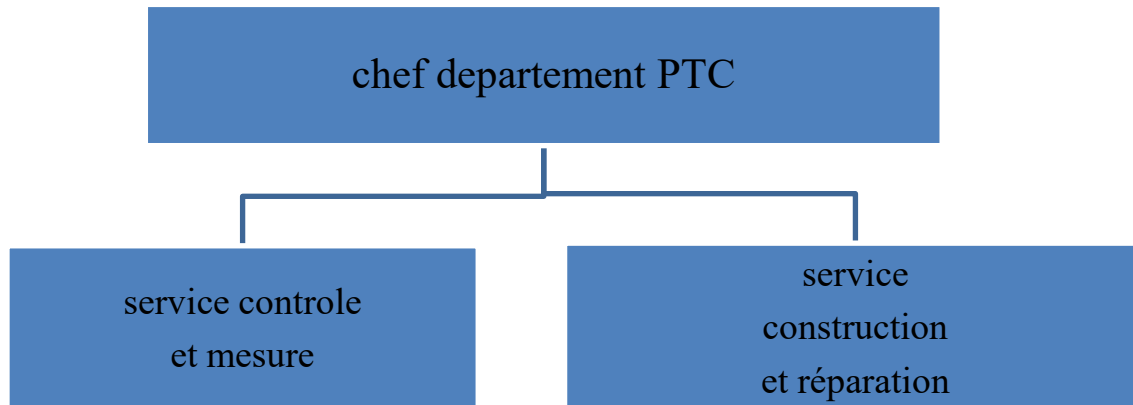
Tableau III.1 : Les stations de la RTC

4 Présentation du département PTC :

Après la mise en application du nouveau organigramme de TRC, le service protection cathodique est érigé en Département, en raison de l'importance des tâches et missions qui lui sont confiées et qui consistent essentiellement à protéger les ouvrages et canalisations enterrées du réseau de transport des hydrocarbures, contre la corrosion externe. Le département PROTECTION CATHODIQUE est l'un des départements naissants de la sous-direction technique, il est Composé de deux services :

- Contrôle et mesure

- Construction et réparation



4.1 Principales missions des agents du département Protection Cathodique :

1. Inspection et visite mensuelle des postes de protection cathodique des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés.
 2. Veiller au bon fonctionnement de la protection cathodique des canalisations et ouvrages concentrés.
 3. Réalisation de campagnes de mesure de potentiel ON, des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés, une fois par an.
 4. Réalisation de campagne de mesure de potentiel ON/OFF, des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés une fois tout les cinq ans.
 5. Mise en œuvre des actions de maintenance et d'amélioration du système de protection cathodique, savoir :
 - Installation et mise en service des nouveaux PPC si nécessaire au niveau des zones sous protégées.
 - Réalisation et rénovation des déversoirs de la protection cathodique (horizontaux et verticaux).
- ❖ Maintenance des équipements de la protection cathodique tels que :
- la réparation des transformateurs-redresseurs
 - la réparation des transformateurs aériens
 - réparation des coupures des câbles électriques enterrés.

- ❖ Installation des prises de mesures : pour la mesure du potentiel d'électrode de la structure métallique, des courants et des résistances.
- Aux croisements d'autres canalisations (prise type PCTE).
- Aux points de parallélismes avec d'autres canalisations (prise type PPS).
- Aux droit de fourreaux métallique (prise type PTG).
- Aux droit de joints isolants (prise type PJI).
- Aux traversées de routes, de chemin de fer et de digues importantes.
- Aux traversées de rivières.
- proximité des postes de protection cathodique
- Aux points de raccordement des anodes galvaniques.

Avec :

- PCTE : Prise de Croisement Tube Externe
- PJI : Prise Joint Isolant
- PMA : Prise de Mesure Ampère-métrique
- PPS : Prise de Potentiel Simple
- PTG : Prise de Traversé Gaine
- ❖ Installation des joints isolants pour protéger la structure métallique des autres structures ;

Par exemple :

- au niveau des ouvrages concentrés
- à l'amont et a l'aval des nouveaux tronçons installés
- raccordement à un ouvrage tiers.

Pour assurer la protection des installations de la RTC, Le département "Protection Cathodique" dispose de plusieurs postes de protection cathodique répartis tout au long des pipe-lines (oléoducs ou gazoduc), d'une telle manière atteindre une protection maximale dans tous ses ouvrages.

4.2 La liste des postes de protection cathodique :

Sur toute la ligne des canalisations de sud jusqu'au nord on trouve ces PPC si dessous :

OUVRAGE OU SITE :		OB1
NUM PPC	PK DU PPC	LOCALISATION
1	0	HEH
2	20	HEH
3	39	ROUTE HEH
4	80	HJIRA
5	120	
6	135	SPA TOUGGOURT
7	153	TOUGGOURT OUARGLA
8	172	DJAMAA EL OUED
9	190	SP1 bis
10	211	DJAMAA EL OUED
11	232	EL MEGHAIER EL OUED
12	255	EL MEGHAIER EL OUED
13	271	STILL ELBAADJ EL OUED
14	313	SPB OUMACHE BISKRA
15	329	EL HADJEB
16	350	SP2 EL OUTAYA
17	373	FDG
18	393	BITAM
19	421	BARIKA
20	449	AIN EL KHADRA
21	472	SOUAMAA
22	495	SP3 M'SILA
23	425	DEVIATION H DALAA
24	534	HAMMAM DALAA
25	560	REGBET MAIZ
26	581	SPD BENI MANSOUR
27	606	AKBOU
28	644	AMIZOUR

Tableau III.2 : Les PPC de OB1

OUVRAGE OU SITE :		D'OG1
NUM PPC	PK DU PPC	LOCALISATION
1	21	BECHLOUL BOUIRA
2	75	KHABOUZIA BOUIRA
3	133	LARBAA SIDI MOUSSA

Tableau III.3 : Les PPC de OG1

<i>NUM PPC</i>	<i>PK DU PPC</i>	<i>LOCALISATION</i>
2	32	BELLIL
5	93	KSAR EL HIRANE (LAGHOUAT)
7	141	MESSAAD (DJELFA)
9	213	MOUILEH (DJELFA)
10	252	MEDJEDEL
11	283	SIDI AMEUR
13	331	AIN LAHDJEL (M'SILA)
14	326	SIDI AISSA (M'SILA)
15	335	SIDI AISSA (M'SILA)
16	350	DIRAH (BOUIRA)
17	368	BORDJ OKHRISS (BOUIRA)
18	389	AIN EL HADJAR (BOUIRA)
19	409	OMAR GARE (BOUIRA)
20	429	CHAABET EL AMEUR

Tableau III.4 : Les PPC de GC1

PPC : POSTE PROTECTION CATHODIQUE.

Annexe B : Densités de courant adoptées pour assurer la protection cathodique d'une structure en acier

Tableau B1

Type de structure	Densité de courant (mA/m ²)
Acier nu enterré avec activité bactérienne	300 à 500
acier nu en eau de mer très agitée	100 à 500
acier nu en eau de mer calme	50 à 80
Acier nu enterrée (hors activité bactérienne)	20 à 50
Acier nu noyé du béton	0.5 à 2
Acier nu noyé du béton poreux et dégradé	2 à 10
Conduite d'acier immergée avec revêtement à liant hydrocarboné	0.05 à 1
Conduite d'acier enterrée avec revêtement à liant hydrocarboné	0.3 à 0.6
Conduite d'acier enterrée avec revêtement à liant hydrocarboné en bon état ou revêtement de résine époxydique	0.01 à 0.15
Conduite d'acier enterrée revêtue de polyéthylène	0.005 à 0.1

RÉSUMÉ

Les résultats obtenus par cette étude confirment que la résistivité du sol est le paramètre le plus pertinent ayant un effet important sur la vitesse de corrosion externe. Ce paramètre de rupture a été à son tour relié à un ensemble de facteurs dont la concentration en ions chlorure et le pH. Le modèle du diagnostic permet ainsi de classer la corrosivité du sol entourant la conduite selon la valeur des différentes variables indépendantes retenues. D'autre part, il a été trouvé que pour le même sol, le premier critère explicatif du bris des conduites d'aqueduc est l'année de pose de celles-ci. Cependant, les inspections réalisées ont démontré que dans un sol de très faible résistivité, la corrosivité du sol semble avoir un impact crucial sur la corrosion de la conduite, et ce indépendamment de l'année de son installation. Concernant les systèmes de protection cathodique installés, il a été retenu que ces derniers sont majoritairement fonctionnels mais avec des degrés de performance variables. Néanmoins, une protection cathodique installée adéquatement demeure une solution efficace pour la réduction des bris.

Mots clés : Pipeline, corrosion, protection cathodique, Résistivité du sol, Courant, Anodes sacrificielles, déversoir.

ABSTRACT

The results of this study confirm that the soil resistivity is the most relevant parameter having a significant effect on the rate of external corrosion. This parameter is controlled by a combination of other factors including the concentration of chloride ions and pH. Also, the diagnostic model allows classifying the soil corrosivity surrounding the pipe according to the value of the different retained variables. On the other hand, it was found that for the same soil, the first explanatory criterion of water main's breakage is the year of the laying pipe. However, inspections have shown that in a very low soil resistivity, the soil corrosivity appears to have a crucial impact on the corrosion of the pipe regardless the year of its laying. Concerning the cathodic protection systems installed, it was founded that they are mostly functional but with varying degrees of performance. However, cathodic protection installed properly remains an effective solution to reduce the breakage of water mains.

Keywords: pipeline, Soil resistivity, Corrosion, Cathodic Protection, Corant, sacrificial anodes, spillway .