

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Rabia Amine et Rechdaoui Sofiane

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Machines électriques**

Dimensionnement de la protection cathodique

Soutenu le 15/07/ 2019 devant le jury :

Mr GOUNI	Said	Professeur	Université UMBB	Président
Mr KHALFI	Kamel	MAA	Université UMBB	Examineur
Mr AOUZELLAG	Haroune	MCB	Université UMBB	Examineur
Mme M'ZIOU	Nassima	Professeur	Université UMBB	Rapporteur
Mr BOUDINA	Abd el karim	Ingénieur	Sonatrach	Co-Rapporteur

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes cher parents, mon père allah yarhmo qui n'a pas pu assister à ce jour et à ma mère.

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

À mes frères.

À Ma fiancée

À tous les membres de ma famille

À mes amis et à mes camarades

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

R.AMINE

Dédicaces

Je dédie ce travail à *mon grand-père « Allah yerahmo »* qui n'a pas pu assister à ce jour et mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieu vous protègent et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

- Mon frère, mes sœurs et leur famille.
- Mes oncles, mes tantes et leur famille.
- Tous mes cousins et cousines.
- Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

R.SOFIANE

Remerciements

C'est avec un grand plaisir qu'on réserve ces quelques lignes en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à ceux qui, de près ou loin, ont contribué à la réalisation et à l'aboutissement de ce travail.

*Nous remercions tout d'abord **ALLAH** pour la volonté, la santé et la puissance qu'il nous a donné durant toutes ces années.*

*On voudrais tout d'abord adresser toute notre reconnaissance a la promotrice de ce mémoire madame **m'ziou**.*

*Nos remerciements les plus sincères sont adressés aux **membres de jury de soutenance** pour avoir bien voulu faire partie de ce jury. On espère que ce travail sera à la hauteur de leurs exigences scientifiques.*

Enfin, volontiers d'un devoir de gratitude et de remerciement à tous nos enseignants pour le savoir qu'ils nous ont transmis à travers tous notre cycle de licence.

Résumé

La longévité et la sécurité des pipelines dans l'industrie sont des éléments importants sinon vitaux pour le transport et la distribution des hydrocarbures. Baignant dans différents milieux corrosifs, ces pipelines se corrodent dans le temps, voire se dégradent totalement entraînant ainsi des pertes économiques très importantes

Notre étude concerne la protection du tronçon 8'' d'une longueur de 5930 m transportant le gaz lift à une pression de 142 bars, cette étude nous a été proposée par l'accompagnateur de la société Sonatrach BARKAOUI, lors de notre stage.

Nous avons expliqué la théorie du phénomène de la dégradation par corrosion, les moyens et méthodes de protection.

Dans le cas du projet, nous avons opté pour la protection cathodique à courant imposé pour la raison essentielle du sol agressif.

Nous avons procédé aux dimensionnements de la protection cathodique qui consiste à déterminer :

- le nombre de poste de soutirage
- le dimensionnement du déversoir
- la tension au niveau des bornes du redresseur

Mots clés : protection cathodique, déversoir.

Abstract

The longevity and safety of pipelines in the industry are important if not vital elements for the transportation and distribution of hydrocarbons. Bathed in different corrosive environments, these pipelines corrode in time, or even degrade totally, thus causing very significant economic losses.

Our study concerns the protection of the section 8 " of a length of 5930 m carrying the gas lift at a pressure of 142 bars, this study was proposed to us by the accompanist of the company Sonatrach BARKAOUI, during our course of 15 days.

We have explained the theory of the phenomenon of degradation by corrosion, means and methods of protection.

In this project, we opted for cathodic current protection for the essential reason of the aggressive soil.

We proceeded to the dimensions of the cathodic protection which consists of determining:

- the number of filling stations
- the sizing of the weir
- the voltage at the terminals of the rectifier

Keywords: cathodic protection, spillway.

ملخص

يعد طول وسلامة خطوط الأنابيب في الصناعة من العناصر الهامة إن لم تكن حيوية لنقل وتوزيع المواد الهيدروكربونية. في خطوط بيئية مختلفة قابلة للتآكل. تتآكل خطوط هذه الأنابيب في الوقت المناسب، أو تتحلل تمامًا، وبالتالي تتسبب في خسائر اقتصادية كبيرة.

تتعلق دراستنا بحماية القسم 8 " بطول 5930 مترًا الذي يحمل المصعد الغازي عند ضغط 142 بارًا، وقد تم اقتراح هذه الدراسة لنا من قبل مرافقة شركة سوناطراك ببركاوي خلال الدورة التدريبية الخاصة بنا والتي تبلغ 15 أيام لقد شرحنا نظرية ظاهرة التدهور عن طريق التآكل ووسائل الحماية. في هذا المشروع ، اخترنا الحماية الكاثودية الحالية للسبب الأساسي للترتبة العدوانية. انتقلنا إلى أبعاد الحماية الكاثودية التي تتكون من تحديد:

- عدد محطات التعبئة
 - التحجيم من السد
 - الجهد عند أطراف المقوم
- كلمات المفتاحية: الحماية الكاثودية، المجرى المائي.

Table des matières

Dédicaces1	i
Dédicaces2	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	iv
ملخص.....	v
Table des matières	vi
Liste des abréviations	xii
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xiii
Introduction générale.....	1

Chapitre I Corrosion Dans L'industrie Pétrolière

I.1. Rappels sur les métaux et électrolytes	3
I.1.1 Électrode métallique	3
I.1.2 Électrolyte	3
I.1.3 Conduction	4
I.2. La corrosion	5
I.2.1 Processus électrochimiques de la corrosion.....	5
I.2.1.1 équilibre d'un métal dans une solution	5
I.2.1.2 Potentiel du métal dans la solution	6
I.2.1.3 Processus de corrosion	7
I.2.1.3.1 Destruction de l'équilibre par réaction du milieu	7
I.2.1.3.2 Rupture de l'équilibre d'un métal dans une solution par couplage électrique (ou galvanique)	10
I.2.1.4 Dégradation quantitative (loi de FARADAY)	11
I.2.2 Principe de Mesure du Potentiel d'un Métal	12
I.2.2.1. Mesure du potentiel d'une canalisation enterrée	13
I.2.2.2 Électrode de référence.....	14
I.2.3 Diagramme de Pour Baix	16
I.2.4 Généralités sur les différents types de corrosion dans le sol	17

I.2.4.1 Corrosion électrochimique : piles de corrosion	18
I.2.4.2 Piles dues à l'électrolyte (Piles géologiques)	18
I.2.4.3 Piles dues à l'association des métaux différents (couplage galvanique).....	19
I.2.4.4 Corrosion par Aérations différentielles	19
I.2.4.5 Corrosion Bactérienne.....	20
I.2.4.6 Corrosion par les courants vagabonds	21
I.2.5 Corrosion par les sols.....	22
I.2.5.1 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés	22
I.2.6 Résistivité du sol.....	22
I.2.6.1 Paramètres constitutifs des sols influençant la résistivité électrique	24
I.2.6.1.1 Influence du pH.....	24
I.2.6.1.2 Humidité	25
I.2.6.1.3 Aération	25
I.2.7 Eléments chimiques présents dans le sol	25
 Chapitre II Protection et Moyens de Lutte Contre la Corrosion 	
Introduction	28
II.1 Protection passive	28
II.1.1 But de revêtements	28
II.1.2 Différentes catégories de revêtements.....	28
a Revêtements à base de produits hydrocarbonés	29
b Revêtements thermoplastiques	29
c Revêtements à base de produits thermodurcissables	29
II.2 Protection Active	29
II.2.1 Protection cathodique	29
II.2.1.1 Principe de fonctionnement	30
II.2.2 Protection par anode sacrificielle	30
II.2.2.1 Principe	30
II.2.2.2 Domaine d'utilisation	31
II.2.2.3 Types d'anodes sacrificielles couramment utilisées	32

a Anode en Zinc	32
b Anode en Magnésium	32
c Anode en Aluminium.....	32
II.2.3 Protection cathodique par courant imposé.....	33
II.2.3.1 Principe	33
II.2.3.2 Générateur du courant continu et ses caractéristiques.....	34
II.2.3.3 Déversoir anodique et leur implantation	34
II.2.3.3.1 Une pose verticale	35
II.2.3.3.2 Une pose horizontale	36
II.2.4 Domaine D'Applications	36
II.2.5 Avantages et inconvénients d'anodes sacrificielles et courant imposé	37
II.2.5.1 Anode sacrificielles	37
II.2.5.2 Système à courant imposé	37
II.2.6 Comparaison des différents de protection par d'anodes sacrificielles et par courant imposé	38
Conclusion.....	39

Chapitre III Dimensionnement de la Protection Cathodique

Introduction	40
III.1 Calcul des paramètres de protection :	40
III.1.1 résistivité du terrain	40
III.1.2 Nombres des points de soutirage	41
III.1.2.1 Portée de la protection cathodique	42
III.1.2.1.1 Coefficient d'atténuation (α).....	43
III.1.2.1.1.1 Résistance longitudinale de la conduite	43
III.1.2.1.1.2 Résistance transversale de la conduite	43
III.1.2.1.1.3 Abaissement minimal de potentiel à l'extrémité de la conduite .	44
III.1.2.1.1.4 Abaissement maximal de potentiel au point de soutirage	45
III.1.2.1.3 Poste de soutirage.....	45
III.1.2.1.3.1 Dimensionnement du déversoir.....	46
III.1.2.1.3.2 Intensité totale du courant	48

III.1.3.3 Calcul des nombres d'anodes	49
III.1.3.4 Profondeur du déversoir	49
III.1.3.5 Calcul de la tension au niveau des bornes du redresseur	51
III.1.3.5.1 Résistance des câbles	51
III.1.4 Calcul du potentiel et du courant au point X.....	52
III.1.4.1 Calcul du courant soutirage.....	56
III.1.4.2 Calcul de potentiel de soutirage	57
III.5 Calcul de dimensionnement	57
III.5.1 Caractéristiques de pipe	57
III.5.2 Calcul des Paramètres de la Protection	57
III.5.2.1 Résistivité du terrain	57
III.5.2.2 Nombres de poste de soutirage N	58
III.5.2.3 Calcul des paramètres de Poste de soutirage	60
III.5.3 Potentiel de minimaux de protection à une distance x du point de soutirage	62
Conclusion.....	63
Conclusion générale	64
Bibliographie	65

Liste des abréviations

ρ : Résistivité du sol.

A : Distance entre piquets.

r : Résistance longitudinale.

R : Résistance mesurée

N : Nombre des postes de soutirage

L_{max} : La portée de la protection cathodique.

L: La longueur de la conduite.

a : Coefficient d'atténuation.

ΔE_s : Abaissement maximal de potentiel au point de soutirage.

ΔE_L : Abaissement minimal de potentiel à l'extrémité de la conduite.

r: Résistivité longitudinale de la conduite

R_T : Résistance transversale de la conduite

e : Epaisseur du tube.

D_{ext} : Diamètre extérieur de la conduite

ρ_a : Résistivité de l'acier

β : Coefficient de vieillissement du revêtement.

$R_{is}(t_0)$: Résistance d'isolement initial.

E_p : Potentiel de conduit/sol min aux extrémités du domaine de protection.

E_n : Potentiel naturel de la conduite.

E_s : Potentiel conduit /sol max au point d'injection.

M : Masse totale des anodes du déversoir .

K : Consommation des anodes.

I : Intensité totale du courant.

t : Durée de vie de l'ouvrage à protéger.

σ : Densité du courant.

N_a : Nombre d'anodes.

M_a : La masse de l'anode.

Lds : Longueur des anodes.

Ra : La résistance de déversoir.

Ld : La longueur d'anode.

F : Facteur.

ΔU_c : La tension du câble .

ΔU_d : La tension de déversoir .

ΔU_{sc} : La tension au niveau de pipe .

Rc : La résistance des câbles du circuit reliant le poste avec la conduite en ohms.

E_{max} : Abaissement maximal de potentiel.

E_{min} : Le potentiel de soutirage.

ρ_t : Résistivité du cuivre .

Lc : La longueur du câble .

Sc : Section du câble.

E_x : Potentiel de minimaux de protection à une distance x de point de soutirage.

I_x : Courant de protection à une distance x de point de soutirage.

I_s : Courant de soutirage.

E : Potentiel de soutirage.

n ; nombre de couche de valence

Liste Des Tableaux

Tab I.1	Echelle de NERNST	6
Tab I.2	Standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode d'hydrogène.....	14
Tab I.3	Standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre	15
Tab I.4	Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols	24
Tab I.5	Evolution du nombre de perforations en fonction de la résistivité des sols	24
Tab I.6	Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols	25
Tab II.1	Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs	35
Tab.II.2	Comparaison des deux systèmes de protection	38
Tab III.1	Valeurs moyenne des résistances d'isolement	44
Tab III.2	Domaines de potentiel de protection préconisés	45
Tab III.3	Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs	47
Tab III.4	Dimensionnement de l'anode selon son type	49
Tab III.5	La profondeur de pose des anodes.....	49
Tab III.6	Résistivité de métal.....	51
Tab III.7	Dimensions de la conduite 8'' GLA-PK6	56

Liste des figures

Fig I.1	Equilibre d'un métal dans une solution	7
Fig I.2	Destruction de l'équilibre	8
Fig I.3	Identification de courant	9
Fig I.4	Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée	9
Fig I.5	Métaux en équilibre dans la solution	10
Fig I.6	Rupture de l'équilibre par couplage galvanique	10
Fig 1.7	Identification du courant.....	11
Fig 1.8	Mesure du Potentiel d'un Métal	12
Fig 1.9	Mesure du potentiel d'une canalisation enterrée.....	13
Fig 1.10	Mesure du potentiel	13
Fig 1.11	Electrode Cu/CuSO ₄	14
Fig I.12	Diagramme de Pourbaix du fer à 25° c	16
Fig I.13	Pile de corrosion géologique.....	18
Fig I.14	Exemple de couples galvanique	19
Fig I.15	Réactions électrochimiques possibles dans la zone cathodique.....	20
Fig I.16	Corrosion par les courants vagabonds.	21
Fig II.1	Représentation selon Evans du principe de la protection cathodique.....	30
Fig II.2	Protection cathodique par couplage galvanique	31
Fig II.3	Principe protection cathodique d'un métal par courant imposé	34
Fig II.4	Déversoir anodique posé verticalement	36
Fig II.5	Déversoir anodique posé horizontalement	36
Fig III.1	Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des 4 barres	41
Fig.III.2	Poste de Soutirage.....	46
Fig III.3	Schéma électrique d'une portion de conduite traversée par un courant.	47

Introduction Générale

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

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

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

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

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

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

En Algérie, la région de transport centre (RTC) a environ 1200km de pipeline, des stations de pompage, une station de compression, des bacs de stockage...etc. qui sont tous

exposés au phénomène de corrosion. Et l'entreprise nationale SONATRACH fait en sorte que ces structures soit protégées le plus longtemps possible de la corrosion.

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

Nous avons eu l'opportunité de bénéficier d'un stage de 15 jours auprès du service chargé de la protection cathodique, au niveau de la société SONATRACH, région de BERKAOUI. Nous avons trouvé toute l'aide nécessaire auprès de l'ingénieur qui nous a accompagné durant la durée du stage. L'ingénieur nous a proposé d'étudier la protection cathodique du tronçon 8'' transportant le gaz lift produit du centre de production GLA au point PK6 : soit une longueur de 5930 m. les données utilisées dans le dimensionnement de la protection cathodique de cet ouvrage sont proposées par l'Ingénieur accompagnateur.

Aussi, notre présente étude est structurée en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié aux différents rappels bibliographiques en relation avec le sujet à savoir des rappels sur le phénomène de la corrosion, les processus électrochimiques de la corrosion, et les Généralités sur les différents types de corrosion

Le deuxième chapitre est dédié aux différents moyens et techniques de lutte contre la corrosion ; traite la protection cathodique active, et la protection passive et les différents paramètres à tenir en compte dans ces domaines.

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

Chapitre I

Corrosion dans l'industrie

Pétrolière

Introduction

Dans ce chapitre , Nous allons trouver les fondements théoriques de la corrosion et ses conséquences sur les pipelines utilisées pour le transport des hydrocarbures. Nous allons présenter aussi les différents types de corrosion qui existent.

I.1 Rappels sur les métaux et électrolytes

La corrosion est le résultat de la présence simultanée de deux acteurs à savoir 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 [2].

I.1.1 Électrode métallique

Un métal M est constitué par un édifice cristallin d'ions positifs M^{n+} dans lequel circulent des électrons libres. On sait que ce nuage électronique est responsable de la conductibilité des métaux. La mise en mouvement de ces électrons sous l'effet d'un champ électrique crée une circulation de courant dans le métal. La particularité d'un conducteur métallique est de laisser passer le courant électrique sans subir de modification chimique [3].

I.1.2 Électrolyte

Un électrolyte est un système qui renferme des particules ionisées. Ces particules peuvent être des atomes ionisés, ou des ions complexes constitués de plusieurs atomes.

Les ions positifs ou cations proviennent d'atomes qui ont perdu un ou plusieurs électrons. C'est le cas des atomes métalliques :

H^+, Na^+, K^+ : sont des cations univalents.

$Ca^{+2}, Mg^{+2}, Cu^{+2}$ (ion ferreux) : sont des cations divalents.

Al^{+3}, Fe^{+3} (ion ferrique) : sont des cations trivalents.

Les ions négatifs ou anions proviennent d'atomes qui ont gagné un ou plusieurs électrons. C'est en général le cas des métalloïdes :

Br^-, Cl^- (l'ion chlore) : sont univalents.

S^{-2} : sont divalents.

Les ions complexes pourvus d'une charge positive ou négative

ion oxhydrile OH^-, HCO_3^-

ion sulfate SO_4^{-2}

ion peroxosulfate $S_2O_8^{-2}$

ion ferryle $FeO^{++}, Fe(OH)_2^+, NH_4^+$

Si l'on exclut le cas des électrolytes fondus, ces particules ionisées de l'électrolyte sont dissoutes, en plus ou moins grande quantité, dans un solvant.

L'eau est un solvant très dissociant, dit ionisant. Ce n'est pas un solvant inerte car la molécule d'eau a la propriété, par action électrostatique, de se combiner avec des particules du soluté pour former des ions hydratés (ions solvates) [3].

I.1.3 Conduction

La conduction sous l'action d'un champ électrique est due, dans le cas de l'électrolyte, au déplacement des ions. Les cations (ions +) se déplacent dans le sens du champ et se dirigent vers la cathode. Les anions (ions -) se dirigent vers l'anode. Plus la concentration en espèces ionisées est grande, meilleure sera la conductibilité électrique de l'électrolyte.

La particularité du conducteur électrolytique est d'être décomposé par le passage du courant électrique. Les électrodes qui apportent le courant dans l'électrolyte sont le siège de réactions d'oxydoréduction ou de phénomènes d'électrolyse.

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

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

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 [3].

I.2 Corrosion

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

Les phénomènes de corrosion sont généralement classés en deux grandes catégories :

- La corrosion électrochimique (ou corrosion humide)
- La corrosion à haute température (ou corrosion sèche).

nous n'aborderons que la corrosion électrochimique pour laquelle la protection cathodique peut être efficace et ne concerne que les ouvrages enterrés ou immergés [4].

I.2.1 Processus électrochimiques de la corrosion

I.2.1.1 Equilibre d'un métal dans une solution

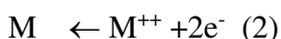
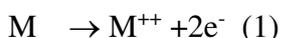
Couche double à l'interface métal-solution :

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.

Ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs.

Il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons. Les réactions (1 et 2) ont lieu simultanément.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte [5].

I.2.1.2 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 permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse.

Un métal noble s'ionise peu, parce qu'il existe des forces de cohésion importantes entre les atomes. Plus son potentiel est élevé, plus le métal considéré est noble, à l'inverse d'un métal classé vil, de potentiel plus faible.

L'or, le platine, dont les potentiels normaux d'oxydoréduction sont les plus élevés, sont très nobles, donc peu ionisables et peu corrodables. Le cuivre est plus noble que le fer, son potentiel étant plus élevé que celui du fer [6].

Tab I.1 Echelle de NERNST [6]

Métal	Potentiel
Or	Plus noble  Moins noble
Platine	
Argent	
Cuivre	
H ₂	
Plomb	
Fer	
Zinc	
Aluminium	
Magnésium	

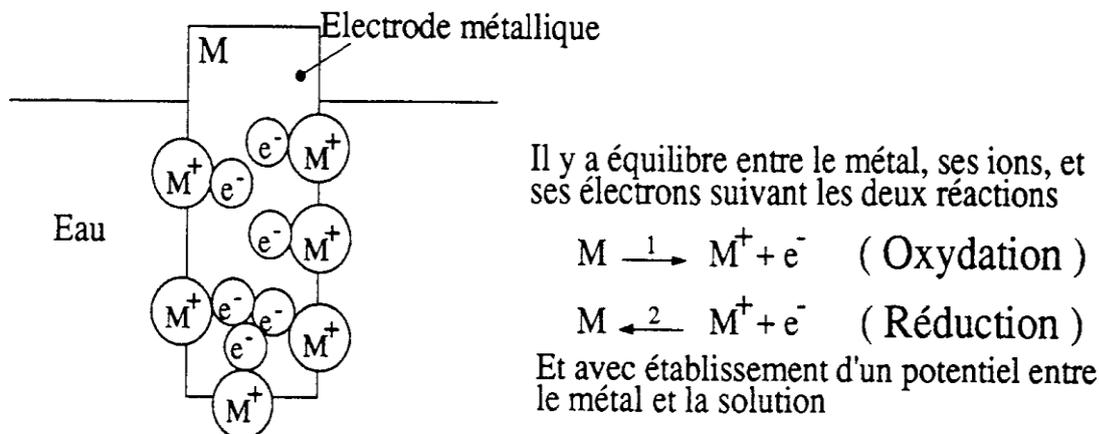
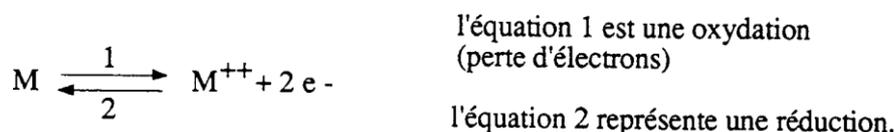


Fig I.1 Equilibre d'un métal dans une solution [6]

I.2.1.3 Processus de corrosion [6]

Nous avons vu qu'une électrode métallique plongée dans un électrolyte était le siège d'un équilibre :



Si par un moyen quelconque, on absorbe les électrons participant au maintien de la couche double, on conçoit que l'équilibre des charges étant détruit, les ions métalliques M^{++} puissent passer en solution.

La réaction 1 d'oxydation se développera tant que l'on absorbera les électrons. Le processus de corrosion est établi.

I.2.1.3.1 Destruction de l'équilibre par réaction du milieu

Tout système chimique, contenu dans l'électrolyte, capable de fixer au contact de l'électrode métallique les électrons du métal (ce qui est le cas des oxydants de la solution) provoquera une oxydation du métal. (voir fig I.2)

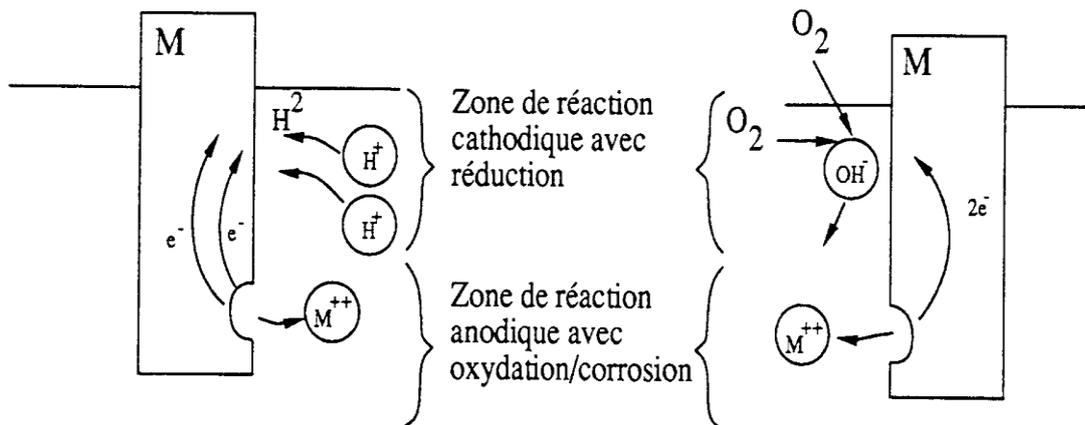
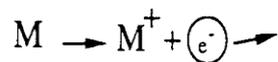
Les oxydants de la solution sont réduits (gain d'électrons).

Le métal, qui est dit réducteur, est, lui, oxydé (perte d'électrons). C'est le cas par exemple :

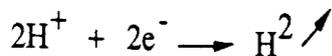
- L'ion hydrogène en milieu acide : $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- L'oxygène en milieu acide : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- L'oxygène en milieu basique : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
- Ion métallique contenu
- La solution qui peut être réduite : $\text{M}^{m+} + \text{électron} \rightarrow \text{M}^{n+}$ avec $m > n$

Les sites anodiques et cathodiques se formant au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisé. Avec le temps, l'électrode voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement [6].

- Exemple de destruction de l'équilibre



a) Par action des ions H^+ en milieu acide avec pour résultat formation d'hydrogène



b) Par action de l'oxygène avec pour résultat une alcalinisation du milieu

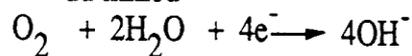


Fig I.2 Destruction de l'équilibre[6]

- Identification de courant

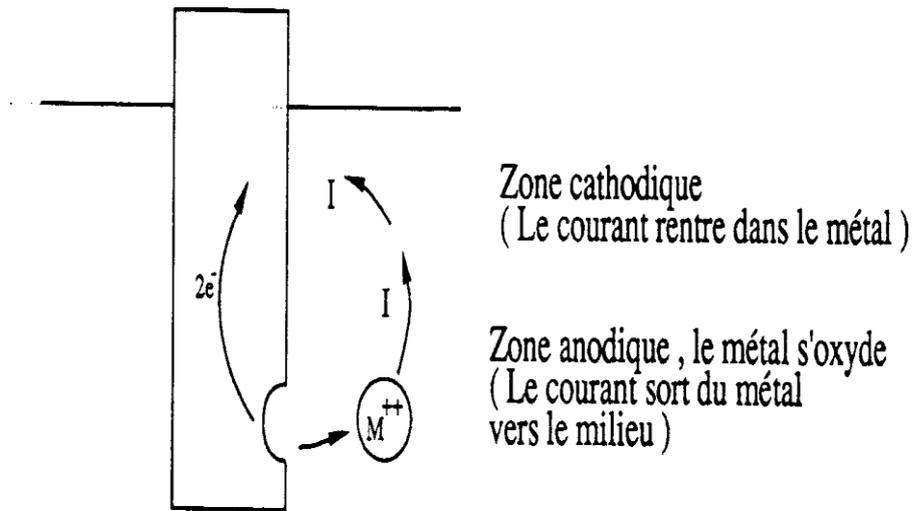


Fig I.3: Identification de courant [6]

Il y a circulation d'un courant entre les zones anodique et cathodique

Exemple : Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée :

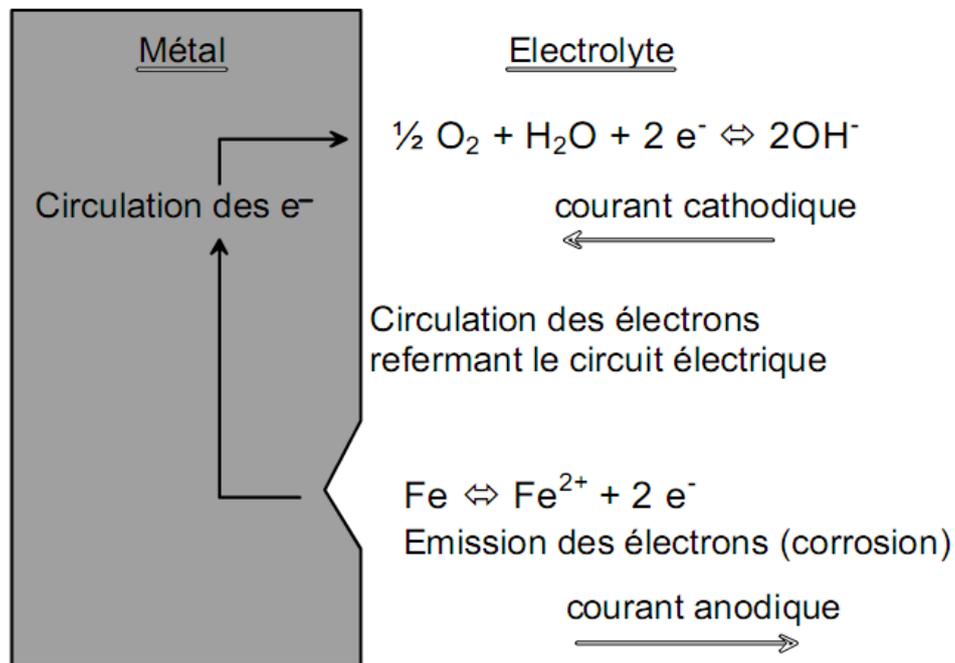


Fig I.4 Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée [2]

I.2.1.3.2 Rupture de l'équilibre d'un métal dans une solution par couplage électrique (ou galvanique)

Métaux en équilibre dans la solution :

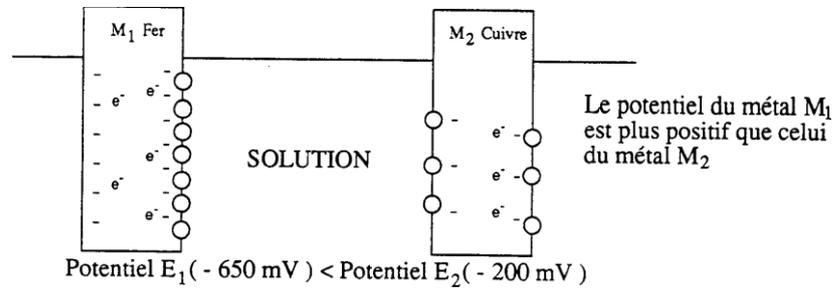


Fig I.5: Métaux en équilibre dans la solution [6]

Rupture de l'équilibre par couplage galvanique :

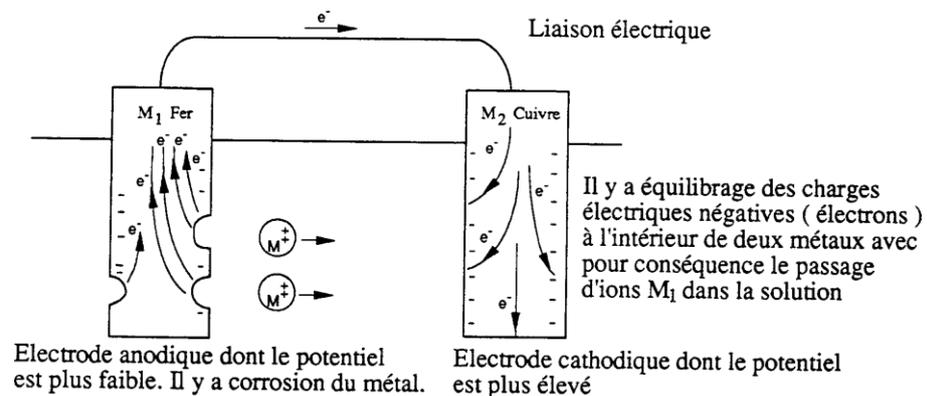


Fig I.6 Rupture de l'équilibre par couplage galvanique [6]

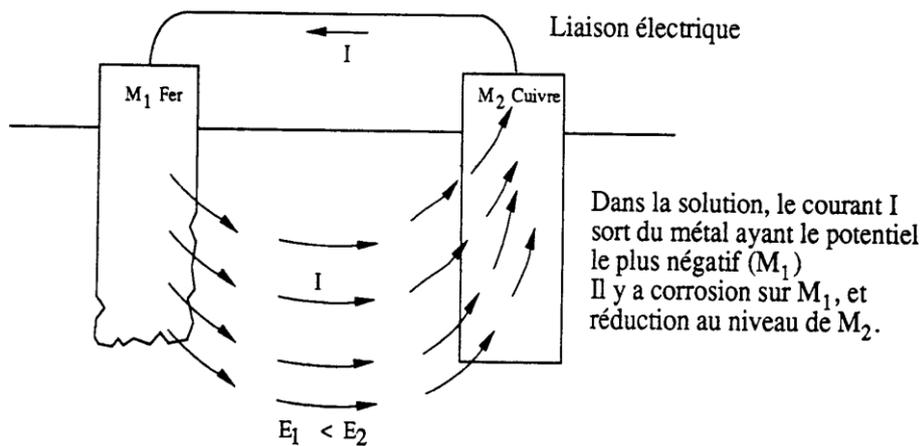


Fig I.7 Identification du courant [6]

A l'anode M_1 , l'équilibre est détruit, de la matière métallique (M^{++}) passe en solution. Il y a corrosion. L'anode est l'électrode, ou la partie de l'électrode, sur laquelle se développe une réaction d'oxydation. L'anode est sujette à dissolution.

A la cathode M_2 , l'afflux des électrons permet à l'équilibre de se renforcer, des réactions cathodiques se développent à l'interface métal/solution. La cathode est l'électrode, ou la partie d'électrode, sur laquelle se développe une réaction de réduction.

I.2.1.4 Dégradation quantitative (loi de FARADAY)

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

$$m_{(g)} = \frac{1}{96500} \times \frac{M_g}{n} \times I_{(A)} \times t_{(s)}$$

M : masse atomique du métal

m : valence de l'ion métallique

Calculée pour les métaux usuels, cette loi montre qu'une réaction d'oxydation mise en jeu par un courant amène des consommations dont l'ordre de grandeur est le suivant :

10,4 kg de cuivre par A. an 10 kg de fer par A.an

10,7 kg de zinc par A.an 10 g de fer par mA.an

34 kg de plomb par A.an 1 g de fer par A.h

Ces chiffres sont déjà éloquentes par eux-mêmes et laissent présager de l'importance des dégâts auxquels une anode est soumise.

Mais si l'on fait intervenir la notion de densité de courant (A/m^2), on comprend qu'à perte de poids égale, le danger se présentera plus rapidement sur les petites surfaces soumises à de fortes densités, que sur les grandes surfaces où la densité de courant peut être très faible ; la perte de poids se répartissant sur tout l'ouvrage [3].

I.2.2 Principe mesure du potentiel d'un métal

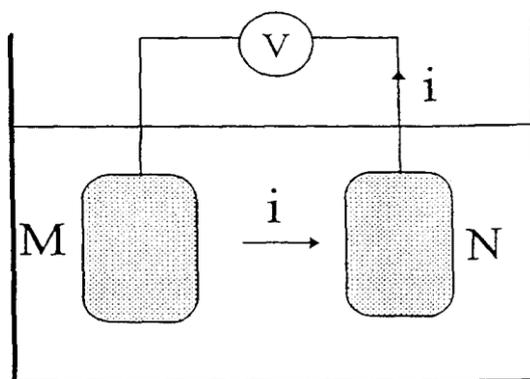


Fig I.8 Mesure du potentiel d'un Métal [7]

On mesure la force électromotrice en circuit ouvert d'une pile électrique (couple galvanique). Il faut que la résistance interne du voltmètre soit la plus élevée que possible de manière à minimiser le courant "i" de la pile électrique. Plus "i" est grand, plus les potentiels de "M" et de "N" évolueront dans le temps. Le potentiel de "M" mesuré par rapport au métal "N" est égal à la déviation du voltmètre "V". Avec une telle mesure, le métal "N" est pris comme référence. Le potentiel du métal "M" ne doit pas être modifié par la circulation du courant "i". Le couple "métal N-électrolyte" doit être impolarisable. Si l'on change de métal de référence, le potentiel de "M" sera modifié. Lors d'une mesure de potentiel, il faut toujours préciser la nature de la demi pile électrique (électrode de référence) qui a été prise comme référence [7].

I.2.2.1. Mesure du potentiel d'une canalisation enterrée

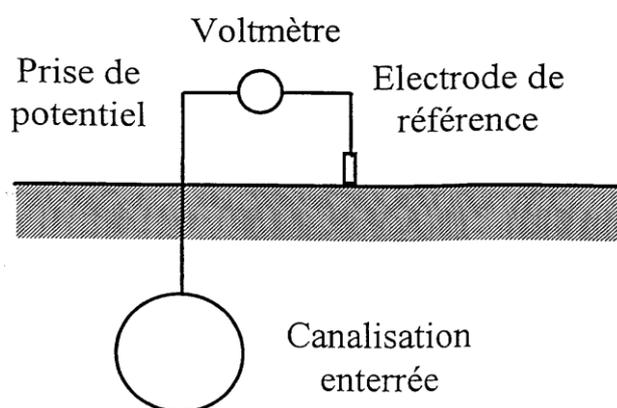


Fig I.9 Mesure du potentiel d'une canalisation enterrée [6]

La mesure du potentiel d'une canalisation enterrée s'effectue à l'aide d'une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturée et d'un voltmètre de très élevée résistance interne.

Cependant, compte tenu de la circulation des courants de protection cathodique dans le sol, la mesure ainsi effectuée ne correspond pas au potentiel du métal de la canalisation en contact avec le sol [6].

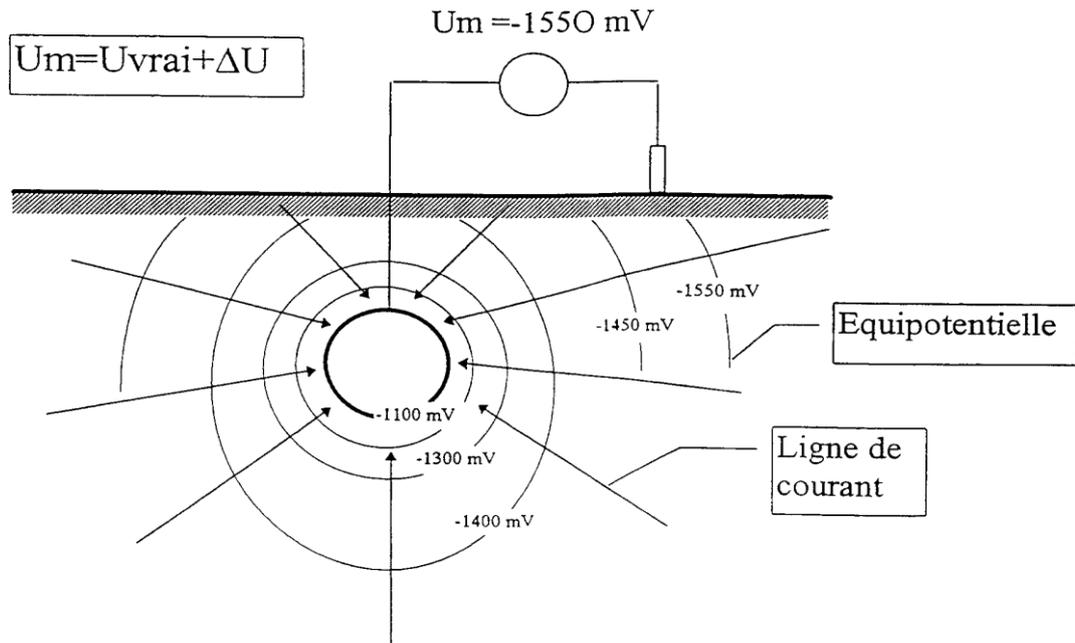


Fig I.10 Mesure du potentiel [6]

I.2.2.2 L'électrode 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/ Cu SO₄, Ag/ Ag Cl, au calomel (Hg – Hg₂ Cl₂ – KCl), dont on connaît les potentiels respectifs

L'électrode Cu/CuSO₄ est la plus couramment employée pour les mesures de potentiel sur les conduites enterrées [4].

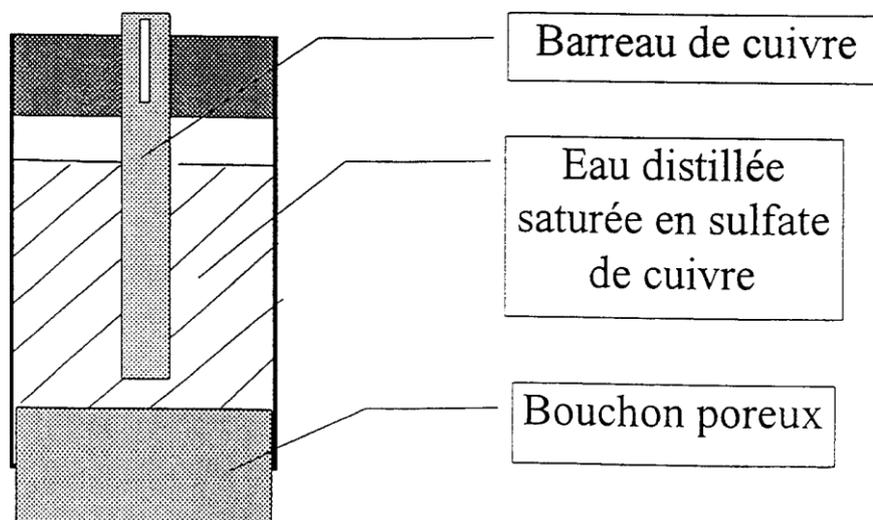


Fig I.11 Electrode Cu/CuSO₄ [3]

Le tableau I.2 donne le potentiel standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode d'hydrogène.

Tab I.2 standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode d'hydrogène [7] :

Electrode	Potentiel par rapport à l'électrode d'hydrogène (V)
Or	+ 1.50 Métaux
Au/ Au ³⁺ + 3 é	+ 1.20 Nobles
Platine Pt/ Pt ²⁺ + 2é	+ 0.80
Argent Ag/ Ag ⁺ + é	+ 0.40
Oxygen O ₂ + 2H ₂ o + 4é / 4OH ⁻	+ 0.34
Cuivre Cu/ Cu ²⁺ + 2é	0 (Après quelque jours)
Inox – Duplex	0
Hydrogène 2 H ⁺ /H ₂ + 2 é	- 0.13
Plomb Pb/ Pb ²⁺ + 2 é	- 0.26

Nickel Ni/ Ni ²⁺ + 2é	- 0.447
Fer Fe/ Fe ²⁺ + 2é	- 0.74
Chrome Cr/Cr ³⁺ + 3é	- 0.76
Zinc Zn/Zn ²⁺ + 2é	- 1.63
Titan Ti/ Ti + 2é	- 1.66
Aluminium Al/ Al ³⁺ + 3 é	- 2.37
Magnésium Mg / Mg ²⁺ + 3é	

Le tableau suivant donne le potentiel standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre

Tab I.3 Standard des principales réactions électrochimiques par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre [8] :

Métaux	Potentiels
Graphite	+ 0.1
Fonte à forte teneur en silicium	+ 0.1
Cuivre, laiton et bronze	+ 0.1
Fonte	- 0.2
Acier doux rouille	+ 0.1 à - 0.2
Acier doux propre	- 0.5 à - 0.2
Aluminium	- 0.5
Zinc	- 0.8
Magnésium	- 1.3

I.2.3 Diagramme de Pour Baix

Les diagrammes de Pour Baix appelés aussi diagrammes potentiel-[pH], indique sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément. Ils sont construits à partir de données thermodynamiques. La figure I.12 suivante donne l'exemple d'un diagramme simplifié de Pourbaix du fer [9].

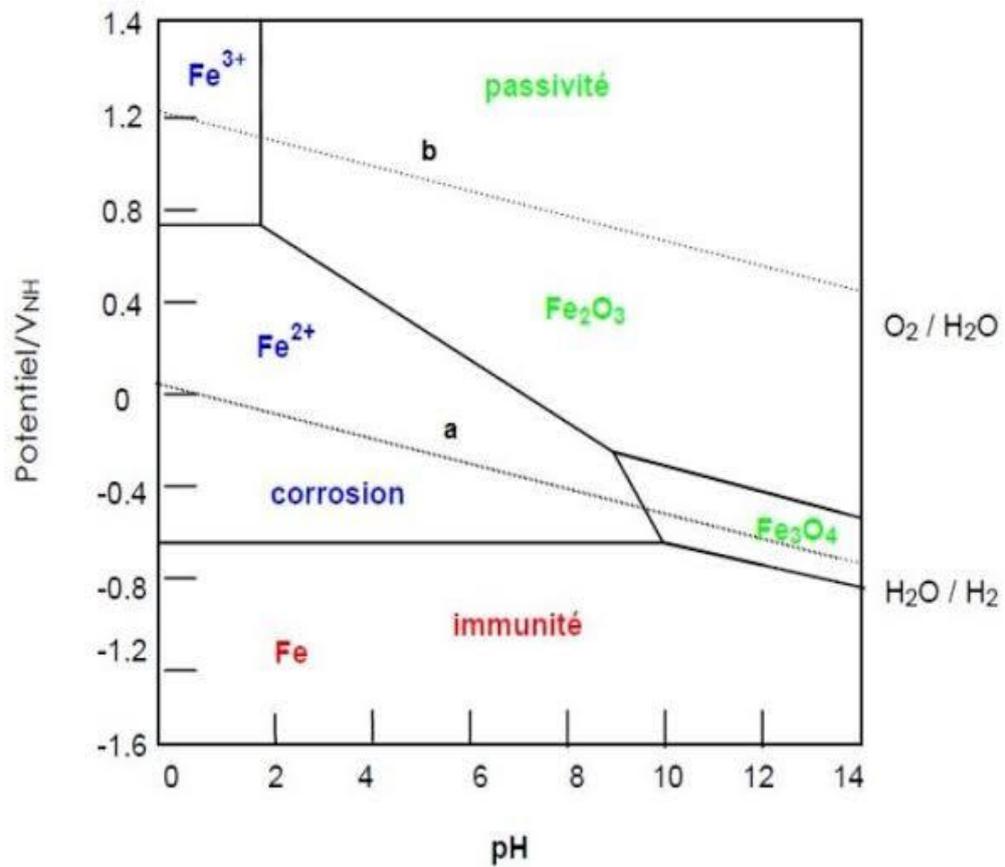


Fig I.12 Diagramme de Pour Baix du fer à 25° c [3]

Selon le diagramme dans la figure I.12, on peut distinguer trois états thermodynamiques où se trouve le fer suivant son potentiel E et le pH de la solution dans laquelle il est immergé :

- Passivation thermodynamique : correspond aux domaines de stabilité des hydroxydes Ferreux ou ferrique (Fe_2O_3), ou le Fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant.
- Activité ou Corrosion : correspond aux domaines de stabilité des ions ferreux et ferrique (Fe^{3+} , Fe^{2+} HFe vers les pH extrêmes) ; ou le Fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.
- Domaine d'immunité : correspond à la partie du diagramme correspondant à la stabilité du Fer (Fe) ; ou le Fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder. C'est le domaine de la protection cathodique.

Dans l'état d'immunité, le métal et le milieu ambiant sont dans un état de stabilité thermodynamique ; ils ne peuvent réagir et par conséquent, la corrosion n'est pas possible. Cette situation se rencontre naturellement avec les métaux nobles.

Dans l'état de passivité, le métal et le milieu ne sont pas dans un état de stabilité thermodynamique, mais le métal se recouvre naturellement d'un film protecteur qui l'isole du milieu extérieur. Ce film (couche passive) doit être thermodynamiquement stable vis-à-vis du milieu extérieur et ne pas présenter de faiblesse localement. Dans le cas contraire, le métal se corrode localement.

Dans l'état d'activité, le métal n'est pas stable thermodynamiquement, et n'est pas recouvert d'un film protecteur, il réagit avec son environnement et se corrode.

I.2.4 Généralités sur les différents types de corrosion dans le sol

Le sol étant un système à trois phases :

Une phase solide constituée par des débris minéraux ou organiques,

Une phase liquide : l'eau,

Une phase gazeuse : l'air ou autres gaz.

C'est un milieu poreux, hétérogène et discontinu, souvent colloïdal, où l'eau peut avoir des liaisons physico-mécaniques, physico-chimiques ou chimiques [10].

Le comportement à la corrosion de toutes les canalisations enterrées, qu'il s'agisse de réseaux de distribution d'eau, de gaz, de chauffage urbain, d'électricité, etc... est sans doute un des problèmes les plus difficiles à maîtriser et à contrôler plus ou moins à long terme [11].

- Les différents types de corrosion des pipes rencontrés dans les sols se présentent comme suit :

I.2.4.1 Corrosion électrochimique : piles de corrosion :

Un sol humide pouvant être considéré comme un électrolyte, il est fondé les processus de corrosion des métaux dans le sol du point de vue de la théorie électrochimique. Il faudra toutefois tenir compte des particularités de cet électrolyte qui consiste en un système hétérogène, capillaire, poreux, souvent colloïdal, dont les caractéristiques ne sont pas uniformes tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

Du point de vue de la théorie électrochimique, la corrosion d'un métal dans un sol résulte comme dans un électrolyte de l'activité de piles dites « piles de corrosion ». Cependant on distingue trois types de pile de corrosion.

I.2.4.2 Piles dues à l'électrolyte (Piles géologiques)

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

En général, les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent des zones anodiques vis à vis des autres terrains, (zones argileuses dans l'exemple ci-dessous, figure I.13) [11].

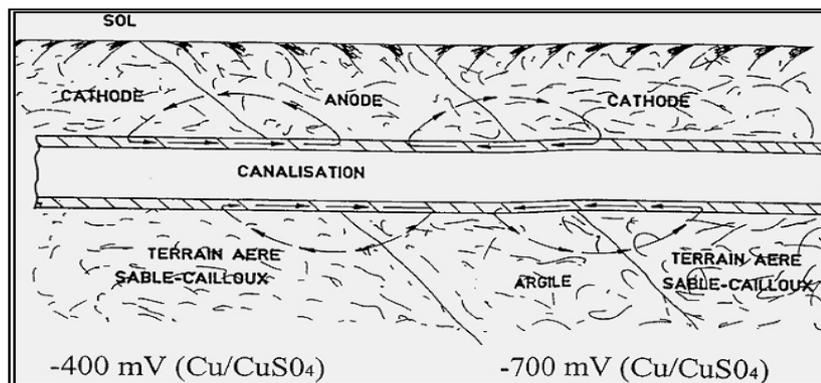


Fig I.13 Pile de corrosion géologique [11]

I.2.4.3 Piles dues à l'association des métaux différents (couplage galvanique) :

On a vu que le contact électrique de 2 métaux différents dans un même sol entraînerait la corrosion de celui dont le potentiel est le plus négatif. Il est donc possible de prévoir le sens des réactions galvaniques en mesurant et en comparant les potentiels des métaux.

Le contact électrique entre une conduite en acier et des métaux tels que le cuivre, plomb, la fonte et même l'acier oxydé, entraîne une corrosion de l'ouvrage en acier. Les piquages directs sur les conduites de gaz, réalisés en cuivre ou en fonte sont néfastes pour la conduite en acier, de même que son raccordement, au niveau d'une installation gazière, à un réseau de terres électriques en cuivre. Ces phénomènes de couplage décrits pour une conduite, existent bien entendu également à l'échelle macroscopique au niveau d'une soudure, en raison, par exemple, des disparités entre le métal de base et le métal d'apport, et même à l'échelle microscopique au niveau des inclusions ou hétérogénéités du métal tels que montrés dans les (fig I.14)[11].

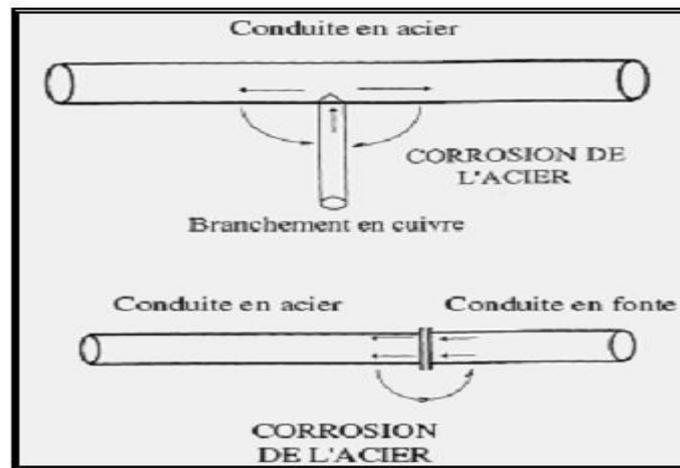


Fig I.14 Exemple de couples galvaniques [11]

I.2.4.4 Corrosion par Aérations différentielles :

Les phénomènes d'aérations différentielles sont à énumérer dans ce chapitre. Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement. C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts. Ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins, ainsi que des corrosions qui apparaissent au niveau des sols dont l'aération n'est pas la même en tous points (sable ou cailloux et argile par exemple) [11].

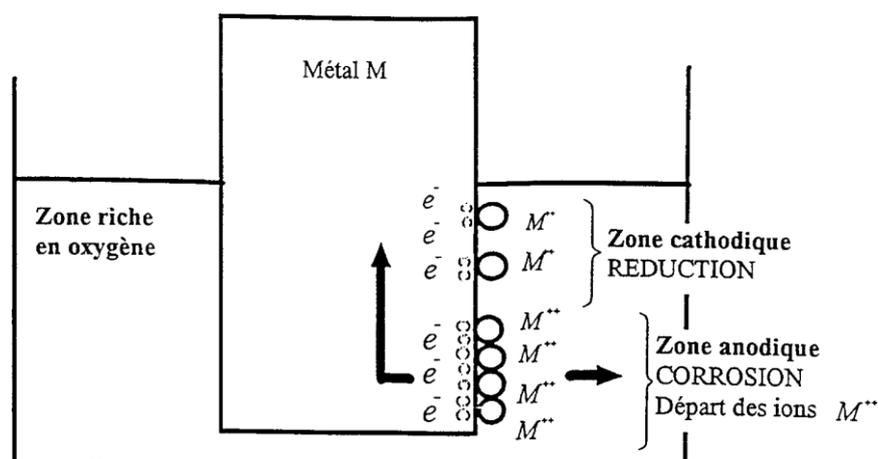


Fig I.15 Réactions électrochimiques possibles dans la zone cathodique [11]

I.2.4.5 Corrosion bactérienne

Dans l'industrie pétrolière, il s'agit de la corrosion bactérienne induite par les bactéries sulfurogènes en milieu anaérobie [12]. La corrosion bactérienne rassemble tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissent directement, ou par l'intermédiaire de leur métabolisme, jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement.

Certaines bactéries consomment l'hydrogène produit au niveau des microcathodes, permettant ainsi à la corrosion de se poursuivre, et transformant les sulfates en sulfure de fer, lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau, elles créent ce que l'on appelle alors un bio film.

Les développements de colonies bactériennes sont en effet fréquents dans de nombreux milieux (sols ; eau, etc.), et peuvent avoir différentes incidences sur les métaux :[15]

- Productions de substances corrosives (acides organiques ou minéraux, sulfures, substances complexantes),
- Dépolarisation cathodique associée à des développements anaérobies. Les bactéries anaérobies (bactéries se développant en absence d'oxygène), peuvent en effet accélérer la réaction de réduction des ions H^+ en hydrogène par émission de substances pouvant jouer le rôle de catalyseur (sulfures, enzymes,...),
- Modifications locales d'environnement provoquant des différences de potentiels de corrosion en différentes zones du même métal. Il en résulte l'établissement d'une corrosion de type caverneuse. Les modifications d'environnement peuvent intéresser l'aération, le pH, les concentrations salines, etc...
- Dégradation de substances protectrices (dégradation des revêtements protecteurs de canalisations enterrées par exemple).
- La corrosion bactérienne peut provoquer des dégradations rapides dans des milieux dont la corrosivité à l'état stérile est faible. Certaines zones de conduites enterrées par exemple subissent une corrosion pouvant aller jusqu'au percement alors que les régions non exposées aux bactéries sont pratiquement intactes.

En milieu aqueux non aéré et proche de la neutralité ou basique par contre, ou la vitesse de corrosion des aciers est limitée par celle de la réaction cathodique de réduction

des ions H^+ et est donc normalement assez lente, des attaques sévères ont pu être constatées et attribuées aux bactéries, sulfatréductrices (SRB).

I.2.4.6 Corrosion par les courants vagabonds

Dans les sols, on a souvent à faire des courants vagabonds. Tout écoulement de courant continu dans le sol, ligne de traction avec retour par les rails (tramways, métro), usines électrochimiques comportant des cuves 3 électrolyses, etc....., peut alors être cause de corrosion importante.

En effet, ces courants empruntent dans le sol des chemins de moindre résistance électrique, canalisations par exemple, créant sur un même matériau des zones à des potentiels électrochimiques différents (figure I.16). Les surfaces par ou entrent les courants vagabonds sont plus électronégatives que le sol. Ces courants apportent des électrons à l'interface métal/sol ou il se produit une réduction ; les surfaces par ou sortent les courants sont devenues plus électropositives que le sol ; à cet endroit une corrosion du métal se produira inévitablement [10].

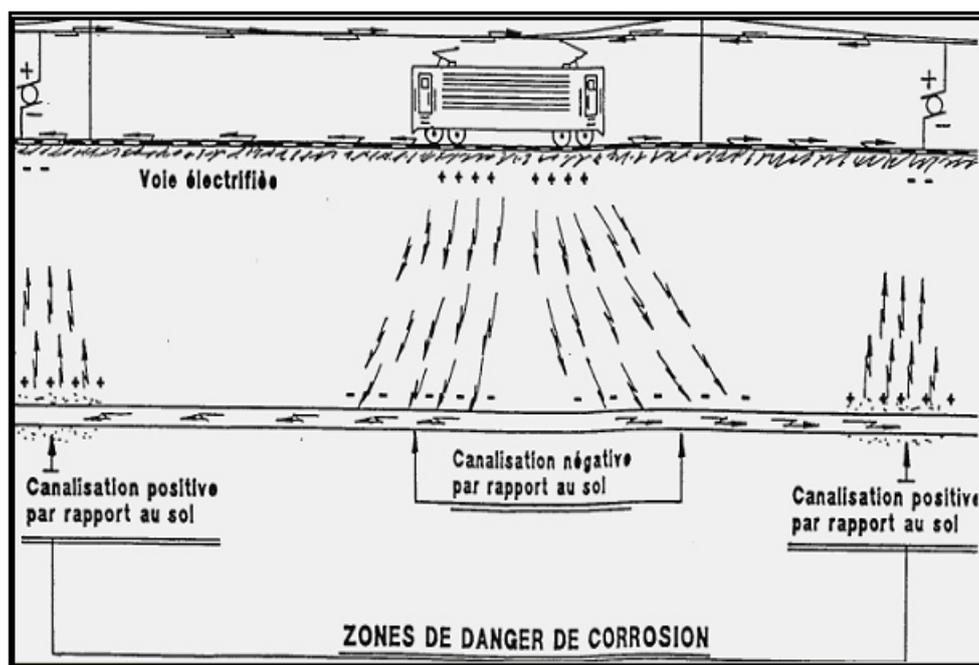


Fig I.16 Corrosion par les courants vagabonds [10]

L'importance de la corrosion est directement proportionnelle aux intensités mises en jeu (la Loi de Faraday donne pour l'acier une consommation d'environ 10 kg par ampère et par an).

Or il n'est pas rare de voir transiter des courants de plusieurs dizaines d'ampères dans les conduites. Les pertes de métal se chiffrent alors en grammes par heure, et des percements de conduites peuvent alors se produire en quelques semaines.

On pourrait citer des cas où ce phénomène s'est produit avant même que la conduite ne soit en service et que les moyens de lutte contre la corrosion n'aient été mis en œuvre.

I.2.5 Corrosion par les sols

On peut considérer que les propriétés corrosives des sols sont, dans une large mesure, déterminées par trois facteurs principaux (valeur instantanée et évolution dans le temps de ces facteurs) :

- La teneur en eau du sol qui dépend essentiellement des conditions climatiques locales, et des conditions de drainage.
- Les teneurs en oxygène et en gaz carbonique qui sont liées aux propriétés de drainage du sol, mais aussi aux conditions hydrologiques.
- La composition chimique de l'eau du sol qui est fortement déterminée par les réactions chimiques eau/substrat minéral du sol qui se produisent lors de la percolation des eaux de précipitation à travers les couches supérieures du sol.

Une autre spécificité des sols est la présence de perturbations électriques [16], parmi lesquelles on peut noter les courants dits "vagabonds", dus aux courants de protection cathodique d'ouvrages tiers ou des lignes ferroviaires. Ensuite, peuvent être cités les courants induits par les lignes hautes tensions [17], et les courants telluriques [18] capables de générer une corrosion locale au droit des défauts de revêtement.

I.2.5.1 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés

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

I.2.6 Résistivité du sol

La résistivité électrique est un paramètre familier des géophysiciens, moins pour les pédologues qui emploient préférentiellement son inverse la conductivité électrique, pour

caractériser la salinité des sols, la minéralisation de la solution du sol ou de l'eau des aquifères. La résistivité d'un horizon de sol est sa capacité à limiter le passage du courant électrique. Cette faculté est étroitement liée à ses caractéristiques intrinsèques.

Lorsqu'on relie les deux plaques conductrices à un générateur de courant la résistivité de l'échantillon est $\rho = \frac{SV}{LI} = \frac{1}{\sigma}$

La résistivité électrique σ s'exprime en ohm. Mètre (.m), pour S en m^2 , L en m, V en volt (V) et I en ampère (A). On inverse la conductivité, σ s'exprime en siemens par mètre (S/m) [19].

L'évaluation de l'agressivité des sols est relative à la mesure de la résistivité, cette dernière très complexe du fait qu'elle dépend de facteurs géologiques et métrologiques qui peuvent avoir un effet considérable sur l'exactitude de ces valeurs [20].

La corrosivité augmente avec l'abaissement de la résistivité du sol tel que montré dans le tableau I.4 suivant :

Tab I.4 Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols [21]

Résistivité de sol (ohm-mètre)	Classe selon la vitesse de corrosion
< 25	Très corrosive (> 13)
= 26-50	Modérément corrosive (9-12)
= 51-100	Moyennement corrosive (4 -9)
≥ 100	Très moyennement corrosive (<4)

Un découpage est corroboré par l'analyse des cas de corrosion survenus sur un réseau de conduites en service où la proportion des incidents apparait directement être en relation avec la résistivité [10]

Tab I.5 Evolution du nombre de perforations en fonction de la résistivité des sols [10]

Résistivité du sol en (ohm.m)	Nombres de perforations en % du nombre total de perforations observées
< 500	50.2
500 à 1000	18.5
1000 à 2000	20.5

2000 à 5000	9.6
5000 à 10000	0.3
>10000	1.4

La résistivité ne représente pas tous les phénomènes qui entraînent la corrosion du métal ; ce n'est pas un critère formel de décision, mais plutôt un critère d'orientation, à cet effet nous citerons les différents facteurs favorisant l'effet corrosif du sol".

I.2.6.1 Paramètres constitutifs des sols influençant la résistivité électrique :

Les facteurs influant sur la valeur de la résistivité électrique sont largement décrits dans la littérature. Nous le rappelons ici, en précisant que la conduction du courant électrique dans les sols est essentiellement électrolytique et fait intervenir le déplacement des ions en solution dans l'eau interstitielle. La conduction électrolytique est réalisée grâce aux connections interstitielles du sol dont la matrice est généralement considérée comme isolante; les autres modes de conduction, électronique ou les charges sont transitées par le déplacement des électrons libres dans les métaux et diélectrique faisant intervenir les courants de déplacement sous l'influence de champs de très haute fréquence. [21]

I.2.6.1.1 Influence du pH

Le rôle du pH dans les phénomènes de corrosion est relativement bien connu à ce jour. Les travaux de référence en ce domaine sont ceux de Pourbaix [9]. D'autres ont confirmé l'effet bénéfique d'un pH élevé sur la limitation de la dissolution anodique du fer dans l'eau (formation d'une couche protectrice de produits de corrosion). Par ailleurs, des conséquences néfastes sur les liaisons adhésives métal/revêtement ont été mis en évidence.

Le rapport général entre les valeurs du pH et la corrosion correspondante est montré dans le tableau suivant [22].

Tab I.6 Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols [22]

Caractéristique du sol	Valeur du pH	Taux de corrosion
Milieu extrêmement acide	< 4.5	Très forte corrosion Corrosion faible Corrosion très élevée
Acide très fort	4.5-5.0	
Acide fort	5.1-5.5	
Acide moyen	5.6-6.0	
Acide faible	6.1-6.5	
Milieu neutre	6.6-7.3	
Alcalinité moyenne	7.4-7.8	
Forte alcalinité	8.5-9.0	
Très forte alcalinité	9.1 et plus	

I.2.6.1.2 Humidité

Sans constituer à vrai dire un facteur intrinsèque du sol, l'humidité est un facteur complémentaire, qui va jouer un rôle important sur les processus de corrosion, par son incidence sur la résistivité et sur l'aération [10].

Ce facteur dépend de la saison, de l'endroit, du type de sol, du niveau d'eaux souterraines ; en présence de sols très humides autrement dit de sels très solubles, la corrosion se développe très fortement [21].

I.2.6.1.3 Aération

L'aération est une mesure de la présence de l'oxygène au contact du métal déclenchant le processus de corrosion. Les caractéristiques d'aération d'un sol dépendent principalement de la dimension des particules ; il est remarqué que la propagation de la corrosion diminue avec l'augmentation du taux d'aération.

I.2.7 Eléments chimiques présents dans le sol

On distingue dans un sol des constituants solubles et des constituants insolubles. L'ensemble des anions et cations influenceront la force ionique de l'eau du sol et sa résistivité. Ils joueront dans l'eau du sol un rôle analogue à celui qu'on leur connaît dans les eaux salines.

Une attention particulière est portée aux chlorures et aux sulfates qui sont des éléments défavorables, leur effet néfaste apparaît respectivement pour des concentrations supérieures à 100 mg/kg et 200 mg/kg, tant par l'abaissement de résistivité qu'ils entraînent, que par leur rôle propre : action dépassivant des chlorures, intervention des sulfates dans les processus de corrosion bactérienne.

Actuellement on cherche à modéliser l'action de chacun des facteurs susceptibles de jouer un rôle et à juger ensuite de la corrosivité du sol d'après le résultat d'une formule empirique.

Dans le but d'estimer la vitesse de corrosion du l'acier enfoui dans le sol et de concevoir les méthodes de protection, la (National Institute of Standards and Technologies) NIST a développé un modèle de type $Y = f(X1, X2, X3, X4)$

Regroupant la résistivité du sol, la valeur du pH, l'humidité et l'aération [23].

Avec, Y : vitesse de corrosion (mils (1.6 km) /an)

X1 : Résistivité (ohm.cm)

X2 : pH

X3 : Humidité (%)

X4 : Aération (%)

Après plusieurs itérations le modèle est donné comme suit :

$$y = 3.36 - 9.63 \cdot 10^{-5} \cdot X1 + 0.29 \cdot X2 + 0.034 \cdot X3 + 0.012 \cdot X4 \quad (1.12)$$

Ce modèle peut être appliqué pour différents sols

Conclusion

Dans ce chapitre, on a expliqué le phénomène de corrosion et son processus d'occurrence, aussi on a classé les différents types de corrosions selon leurs causes. On a évoqué aussi l'influence de la corrosion et ses conséquences dans l'industrie du pétrole et pourquoi ce phénomène représente un danger menaçant des réseaux de conduites des hydrocarbures.

Chapitre II

Protection et moyens de lutte contre la corrosion

Introduction

Dans ce chapitre nous allons parler des différents moyens et techniques de lutte contre la corrosion des pipelines. En premier on va parler de la protection passive qui ne nécessite aucun équipement supplémentaire de façon que la protection soit assurée juste par les revêtements. La deuxième approche appelée la protection active, cette dernière nécessite l'introduction d'équipement supplémentaire dans le but d'assurer la protection des ouvrages avec deux approches différentes qu'on va bien démontrer chacune.

II.1 Protection passive

Elle est constituée par le revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant. Ce revêtement cependant ne constitue pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage [24].

Il est toujours souhaitable que le revêtement utilisé possède les qualités suivantes :

- Une excellente adhérence avec le métal support pour éviter l'infiltration du milieu électrolyte et les risques de corrosion qui y sont associés malgré la présence d'un système de protection cathodique fonctionnant correctement
- Une résistance d'isolement élevée vis-à-vis du milieu électrolytique afin de limiter la consommation de courant de protection et, dans le cas de structures de grande longueur, d'augmenter au maximum la portée de la protection. [25].

II.1.1 But de revêtements

Les revêtements sont souvent associés à la protection cathodique afin de :

A-Offrir une protection supplémentaire contre la corrosion et de façon "passive"

B-Aider la protection cathodique dans les rôles suivants [25]:

- Limiter le courant consommé,
- Réduire la consommation des anodes,
- Assurer une polarisation plus rapide,
- Assurer une portée de la protection cathodique dans les structures complexes,
- Assurer une meilleure répartition du courant dans la structure
- Réduire le coût global de la protection.

II.1.2 Différentes catégories de revêtements

Il convient de choisir des revêtements compatibles avec leur situation [26] :

- Une adhérence parfaite et pérenne sur la structure,

- Un pH du milieu rendu alcalin.

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

a. Revêtements à base de produits hydrocarbonés

Le revêtement est constitué d'un primaire synthétique ou hydrocarboné et d'une armature en toile de verre imprégnée d'un liant hydrocarboné. Les brais en houille et les bitumes de pétrole, ainsi appliqués, présentent des épaisseurs d'environ 3 mm [27].

b. Revêtements thermoplastiques

- Revêtement en polyéthylène extrudé avec primaire d'accrochage à base de caoutchouc butyle, d'épaisseur 3 mm environ.
- Bandes adhésives minces, à support PVC, ou polyéthylène, appliquées sur primaire, et recouvertes d'une bande de protection mécanique supplémentaire [27].

c. Revêtements à base de produits thermodurcissables

Ce sont des revêtements constitués par des résines époxydes, en épaisseur de 500 µm environ, ou par des polyuréthanes ou des produits composites tels les brai-polyuréthanes et les brai-époxydes [27].

II.2 Protection Active :

On parlera de protection active lorsque l'on veut modifier les conditions dans lesquelles se déroule la corrosion, elle consiste à modifier le potentiel métal-solution pour amener le métal initialement situé dans la zone de corrosion ; soit dans la zone d'immunité soit dans la zone de passivité. En abaissant le potentiel métal-solution, on peut faire passer le métal dans la zone d'immunité (protection cathodique) comme on peut le voir sur le diagramme de Pour Baix (Fig.I.12). En élevant le potentiel, on peut faire passer le métal dans la zone de passivité ce qui est le principe de la protection cathodique.

II.2.1 La protection cathodique

La mise en place d'un système de protection cathodique est actuellement considérée comme indispensable pour les structures métalliques en contact avec un milieu conducteur (électrolyte) en complément d'une protection organique (revêtement) [28].

Cette technique, basée sur des principes électrochimiques est développée sous deux modes différents :

- Création d'une pile artificielle bloquant la réaction naturelle de corrosion du métal (Phénomène électrochimique), en fournissant au métal à protéger un excès d'électrons afin d'empêcher le transfert des cations dans la solution : Protection cathodique par anodes sacrificielles.

- Circulation d'un courant électrique continu dans l'électrolyte entre une masse anodique et le métal à protéger : Protection cathodique par courant imposé dit soutirage de courant

II.2.1.1 Le principe de fonctionnement

La protection cathodique consiste en l'abaissement du potentiel de la structure à protéger à un niveau suffisamment bas, pour que la corrosion soit éliminée [29].

La **Fig.II.1** donne une représentation selon Evans du potentiel en fonction de l'intensité. On y voit que lorsque tout point de l'ouvrage aura atteint le potentiel E_p et comme E_p est inférieur à E_a , point de la courbe où le courant anodique est nul, il n'y a plus de réaction d'oxydations possibles, l'ensemble sera devenu une seule cathode annulant de ce fait le courant de corrosion (I_{corr}) par un courant de protection minimale ($I_{prot.min}$). On a alors réalisé la protection cathodique du métal.

On peut abaisser l'ensemble à un potentiel plus bas que E_p avec un courant I_p . Il faut remarquer que le courant I_p est toujours supérieur au courant de corrosion I_{corr} et qu'il dépend des pentes respectives des courbes de l'anode et de la cathode.

En contre partie, il est nécessaire de fournir, par un système extérieur des électrons en quantité suffisante. Ce flux d'électrons est mesuré par l'intensité I_p [32]

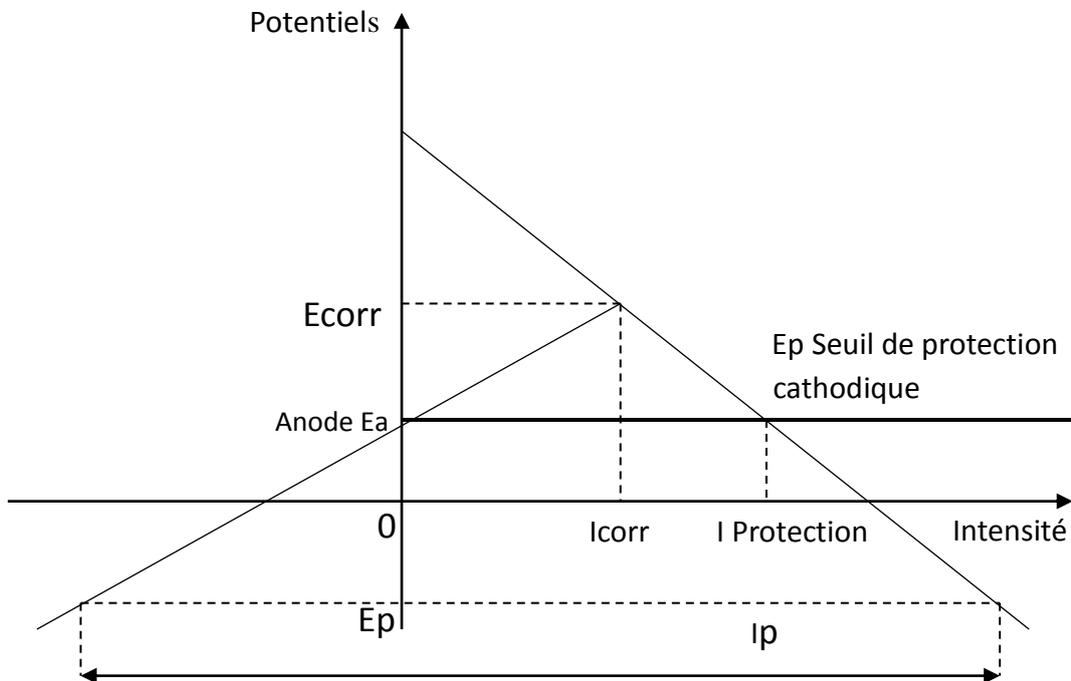


Fig II.1 Représentation selon Evans du principe de la protection cathodique [30]

II.2.2 Protection par anode sacrificielle

II.2.2.1 Principe

La protection cathodique par anode sacrificielle (anode réactive) a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créé par l'association, dans un même électrolyte, deux métaux différents [25]:

- Le métal à protéger
- Un métal moins noble qui constitue l'anode

La protection par anode sacrificielle n'a pas une durée indéterminée, elle s'arrête avec la disparition de l'anode avec le temps.

Pour garantir cette protection, il faut que :

- L'anode soit reliée électriquement à l'acier
- La surface à protéger et l'anode soient plongées toutes deux dans le même milieu corrosif
- La surface à protéger soit du même côté que l'anode

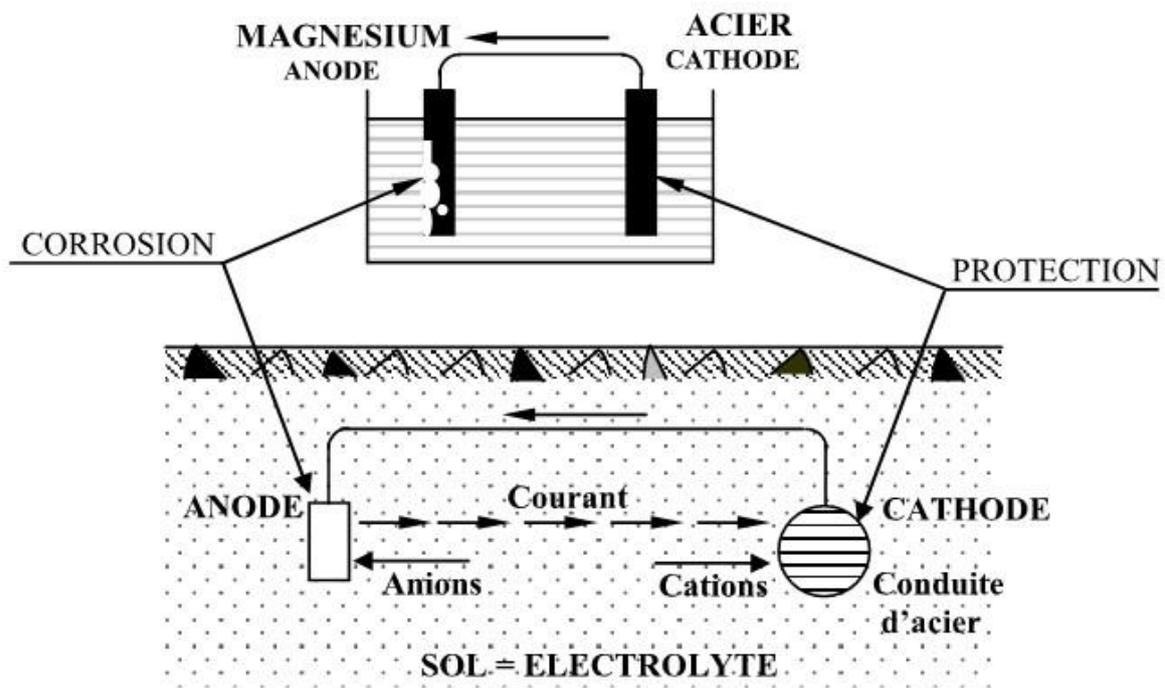


Fig II.2 Protection cathodique par couplage galvanique [31]

II.2.2.2 Domaines d'utilisation

Les anodes galvaniques ne sont utilisées que pour assurer la protection de réseau dont l'isolement est correct, de petite envergure (1 à 2 km de conduites) et pour lesquels on peut être sûr que les extensions importantes ne seront pas réalisées dans les années à venir.

Elles peuvent aussi être installées pour jouer le rôle de mise à la terre électrique d'un ouvrage, tout en assurant la protection cathodique de l'ouvrage, et en évitant de ce fait, les couples galvaniques acier/ cuivre qui peuvent se développer lors de l'utilisation de terres en cuivre dans les terrains très conducteurs.

Dans les autres domaines, les anodes galvaniques sont utilisées avec succès sur des structures complexes, compactes ou longilignes, baignant en eau de mer, l'électrolyte peu résistant (0.3 Ohm.m), permet des débits de l'ordre de l'ampère [32].

II.2.2.3 Types d'anodes sacrificielles couramment utilisées :

a. Anode en Zinc

Les anodes à base de zinc présentent une très grande fiabilité de fonctionnement et ont de ce fait une très grande durée de vie, avec une consommation presque totale du matériau. Leur domaine d'utilisation est très varié car elles peuvent être employées aussi bien en terrains acides qu'alcalins, en eau douce ou en eau de mer. Cependant, avec la faible tension de travail qu'elles proposent, on ne les emploie que dans les électrolytes très peu résistantes, et pour de faible débit de courant.

- Consommation massique pratique : environ 11.9 kg/ A.an
- Potentiel dans le sol : -1100 mV (électrique Cu/CuSo4)
- Ecart de potentiel par rapport aux critères de protection : 250 mV [34].

Domaines d'utilisation des anodes en Zinc [26] :

- Conduites enterrées de faible longueur
- Ouvrage immergé
- Capacité métallique

b. Anode en Magnésium

L'anode en magnésium présente, sur celle en zinc l'avantage d'offrir une tension plus importante, et donc permettre son utilisation sur des ouvrages plus importants dans les terrains de forte résistivité ou en eau douce. Cet avantage général peut dans certains cas, être un inconvénient, car il se traduit par une durée de vie plus faible, des débits de courant plus importants qui, en milieu marin, peuvent être incompatibles avec la tenue de certaines peintures :

- Consommation massique pratique : environ 7 kg/ A.an
- Potentiel dans le sol : -1600 mV (électrodes Cu/CuSo4)
- Ecart de potentiel par rapport au critère de protection : 750 mV [3]

Domaines d'utilisation des anodes en Magnésium [25]

- Protection de conduites enterrées sur de faibles longueurs

- Protection de conduite offshore sur plusieurs kilomètres à partir de plates-formes.

c. Anode en Aluminium :

Les anodes aluminium ne sont pas adaptées à la protection cathodique dans les sols, mais plutôt au milieu marin très conducteur.

- Consommation massique pratique : environ 3.2 à 3.5 kg/ A.an.
- Potentiel en eau de mer : - 1050 mV (électrodes Ag/AgCl) [3].

Domaines d'utilisation principaux :

- Plates-formes offshore.
- Conduites offshore chaudes.
- Capacité métallique.

II.2.3 Protection cathodique par courant imposé [25]

II.2.3.1 Principe

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

- Un déversoir (masse anodique)
- 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. 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.

Le déversoir du courant doit être constitué d'un métal le moins corrodable possible pour avoir une durée de vie la plus longue possible.

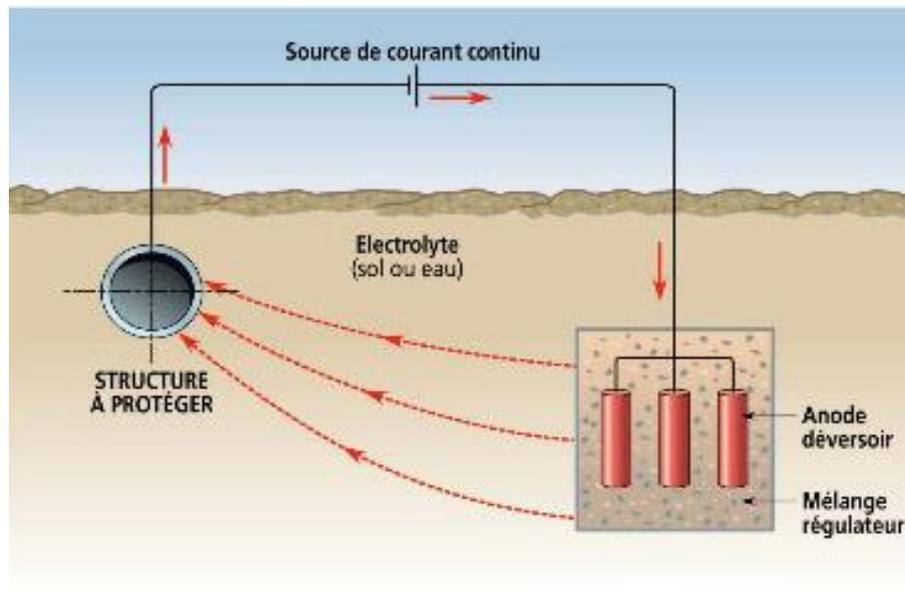


Fig II.3 Principe de protection cathodique d'un métal par courant imposé [33]

Note

Soutirage ce mot vient du système de protection qui consiste à soutirer de la conduite à protéger le courant nécessaire pour porter la masse métallique à un potentiel plus négatif. Ceci s'obtient au moyen d'une source de courant continu [25].

Une installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé comprend essentiellement :

- Un générateur à courant continu.
- Une anode déversoir.
- Des câbles de liaison entre appareil et anode, et appareil.
- Structure à protéger

II.2.3.2 Générateur du courant continu et ses caractéristiques

Habituellement, il est constitué par un transfo-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension. Mais d'autres sources d'alimentation peuvent être envisagées comme [9]:

- Les panneaux solaires photovoltaïques
- Les groupes électrogènes
- Les thermos générateurs
- Les générateurs de type éolien
- Piles à combustibles
- Générateur nucléaire.

Le débit de l'appareil est en fonction des caractéristiques de l'installation réalisée, il est défini par la loi d'Ohm

La tension se situe en général dans la catégorie très basse tension. La résistance du circuit est conditionnée par la résistance des anodes déversoirs [34].

II.2.3.3 Déversoir anodique et leur implantation

Le déversoir anodique est constitué d’un ensemble d’anodes, ces dernières peuvent être de forme et de dimensions très variables.

Le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d’oxydation. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminés pour que l’installation ait une durée de vie de l’ordre de 15 à 20 ans [34].

Les matériaux généralement utilisés pour la réalisation d’un déversoir sont récapitulés dans le tab II.1 suivant :

Tab II.1 propriétés et milieu d’utilisation des déversoirs [36]

Déversoir	Consommation (Kg/A.an)	Milieu d’utilisation
Acier	9	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Graphite	0.25 à 0.5	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Ferro silicium	0.5	Tous types de sol Milieux liquides chlorurés Milieux de faible résistivité
Magnétite	1.5 g/A.an	Tous types de sol Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.an	Milieu de faible résistivité

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

II.2.3.3.1 Une pose verticale

Le procédé de pose consiste à enterrer les anodes verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur comprise entre 1 et 2 m selon la nature du terrain tel que montré dans la figure suivante [34] :

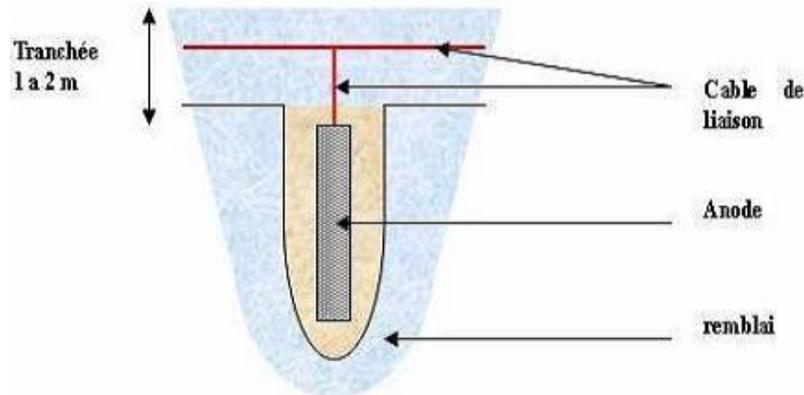


Fig II.4 Déversoir anodique posé verticalement [34]

II.2.3.3.2 Une pose horizontale

Ce type de pose est conseillé lorsque la résistivité du sol en surface est faible et lorsqu'on dispose de place sur le terrain tel que montré dans la figure échéante[34] :

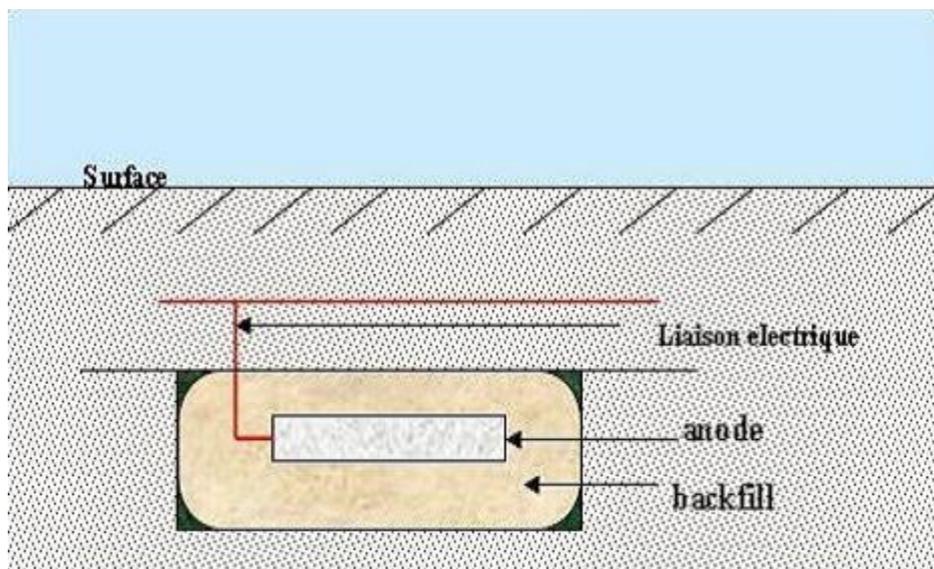


Fig II.5 déversoir anodique posé horizontalement [34]

La section des câbles est déterminée en fonction de la chute admissible et de l'échauffement. Pour des raisons de tenue mécanique une section minimale de 10 mm^2 est recommandée, la nature de l'isolant des câbles est déterminée en fonction du milieu. Dans beaucoup de cas un câble isolant en PVC est suffisant.

Les bornes (+) et (-) sur l'appareil de soutirage et les câbles doivent être clairement repérées afin d'éviter des inversions qui provoqueraient la corrosion de la partie à protéger.

En plus des appareils déjà cités, il faut disposer d'autres appareils électriques :

Les appareils de coupure : des interrupteurs permettant d'établir ou d'interrompre l'alimentation du poste de soutirage

Les appareils de protection : disjoncteurs permettant la coupure et la protection contre les surcharges et les surintensités.

Les appareils de mesure : qui ont but d'indiquer :

- La tension d'alimentation
- L'intensité de débit
- Le potentiel de la structure
- Le temps de fonctionnement

II.2.4 Domaine d'application

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante ou que la portée demandée est élevée [25] :

- Conduites enterrées ou immergées, revêtues ou non.
- Casings de forages .
- Structures marines importantes (appontements, quais métalliques, plates-formes pétrolières, coques de navires, etc.).
- Réservoirs de stockage de grande dimension.
- Ouvrage concentrés (station de pompage ou de compression, terminaux, etc.) .
- Intérieur des capacités d'eau douce.
- Boîtes à eau d'échangeurs thermiques

II.2.5 Avantages et inconvénients de protection par d'anodes sacrificielles et par courant imposé

II.2.5.1 Anodes sacrificielles

- **Avantages**

- Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer
- Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés)
- Excellent rendement
- Peu sensibles aux salissures marines

- **Inconvénients**

- Portée limitée (faible potentiel)
- Température d'utilisation limitée à 60 °C
- Poids spécifique élevé [37]

II.2.5.2 Système à courant imposé

- **Avantages**
 - Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer
 - Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute)
 - Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement
 - Coût en année et plus faible (forte capacité pratique)
- **Inconvénients**
 - Moins adapté dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu), Vulnérable aux salissures marines
 - Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée. [37]

II.2.6 Comparaison des différents anodes sacrificielles et courant imposé

Tab II.2 Comparaison des deux systèmes de protection [3]

	Anode galvanique ou sacrificielle	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour les longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop Grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	élevé
Nombre d'anode	Important	faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistance	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucune	Possible
Interférence avec d'autres	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (post de soutirage)

Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requisse par un spécialiste
--------------	------------------------	-------------------------------------------------------

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté les techniques de lutte contre la corrosion qu'on peut classer en deux catégories la première est une protection passive faite avec les différents types de revêtements, et la deuxième qui est la protection active (protection cathodique).

Chapitre III

Dimensionnement de la protection cathodique

Introduction

Ce chapitre est consacré au dimensionnement de la protection cathodique du pipe. Le dimensionnement des anodes se fait suivant différentes méthodes plus ou moins empiriques, du fait de la complexité de fonctionnement du système galvanique liée à sa variation dans le temps et en fonction de la géométrie de la structure. Il faut s'assurer, d'une part que le nombre et la masse des anodes permettra une durée de vie de la protection conforme à ce qui est demandé d'autre part que leur forme et dimension garantissent que la polarisation de la structure sera possible et suffisamment rapide et que la protection sera encore effective en fin de vie quand l'anode sera pratiquement consommée.

Pour définir un pipe il faut déterminer :

- La section ;
- La longueur.

Dans le langage courant, le terme de « pipe » désigne un tube cylindrique ; pour le définir, il faut alors déterminer :

- Le diamètre extérieur ;
- Le diamètre intérieur ;
- La longueur.

Ou bien :

Déterminer le diamètre moyen, parfois appelé « diamètre au plan neutre » ou bien abusivement « diamètre à la fibre neutre » ; alors on doit déterminer :

- L'épaisseur ;
- La longueur.

III.1 Calcul des paramètres de la protection

III.1.1 Résistivité du terrain

Les mesures de la résistivité du terrain sont généralement prises avant la pose des canalisations pour l'étude des prospections contre la corrosion.

La méthode utilisée pour prendre ces mesures est appelée la méthode de WENNER, cette technique de mesure consiste à planter 4 piquets en acier galvanique équidistante dans le sol. Sur la même ligne droite, ces derniers sont reliés par des conducteurs électriques à l'appareil de mesure de résistivité (Fig.III.1)[38].

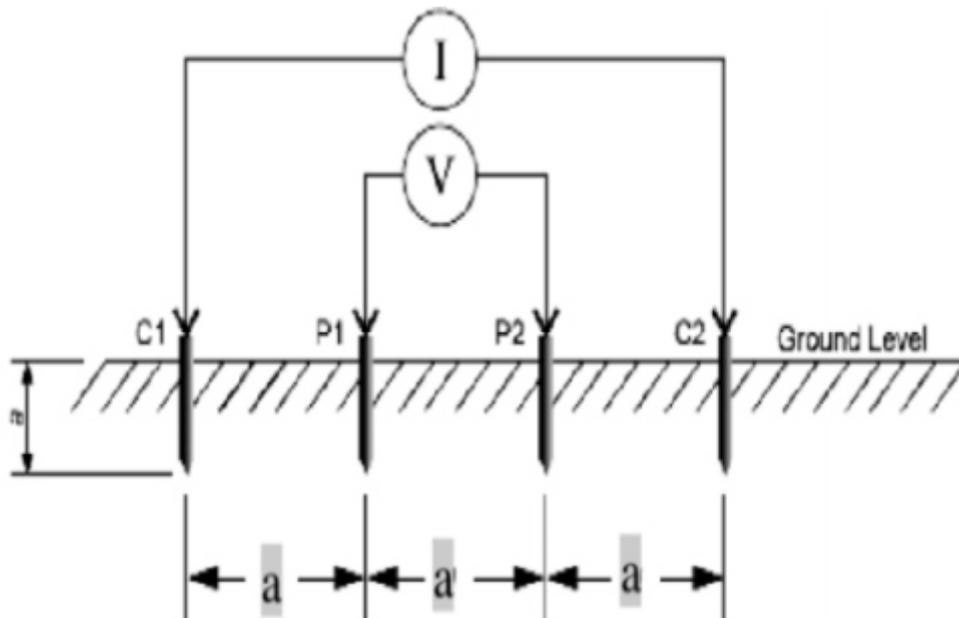


Fig. III.1 Principe de la mesure de résistivité du sol par la méthode des 4 barres [38].

La résistivité du sol ρ pour chaque mesure est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = 2 \pi A R \quad (\text{III.1})$$

Avec :

ρ : résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{m}$)

A : distance entre piquet (m)

R: résistance mesurée (Ω)

On admet généralement pour l'acier les critères suivants :

- $\rho \leq 50 \ \Omega \cdot \text{m}$; sol agressif
- $50 < \rho \leq 100 \ \Omega \cdot \text{m}$; sol faiblement agressif
- $\rho > 100 \ \Omega \cdot \text{m}$; sol peu agressif

III.1.2 Nombre de postes de soutirage N

Le rapport entre la longueur de la conduite et la portée de la protection cathodique permet de connaître le nombre (N) nécessaire de postes de soutirage pour couvrir toute la conduite.

Ce nombre est donné par l'expression suivant :

$$N = \frac{L}{L_{max}} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

L_{max} : la portée de la protection cathodique(m).

L : la longueur de la conduite(m).

III.1.2.1 Portée de la protection cathodique

La longueur maximale de la portée de la protection cathodique est donnée par l'expression suivante :

$$L_{max} = \left(\frac{1}{a}\right) \cosh^{-1} \frac{\Delta E_s}{\Delta E_L} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

a : coefficient d'atténuation.

ΔE_s : abaissement maximale de potentiel au point de soutirage.

ΔE_L : abaissement minimale de potentiel à l'extrémité de la conduite.

Pour calculer L_{max} on doit calculer a , ΔE_s et ΔE_L :

III.1.2.1.1 Coefficient d'atténuation (a)

Coefficient d'atténuation ou affaiblissement est la diminution relative de la puissance d'un signal au cours de sa transmission. C'est le rapport entre la valeur efficace du signal à la sortie par celle à l'entrée de la section considérée.

Il apparaît que le Coefficient d'atténuation (a) joue un rôle essentiel à la fois dans la distribution du potentiel et celle du courant. Ce facteur dépend de la résistivité du matériau de la pipe et surtout de la résistance transversale du revêtement qui évolue évidemment avec le temps, il est calculé comme suit :

$$a = \sqrt{\frac{r}{R_T}} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

r : résistivité longitudinale de la conduite en $\Omega.m^1$

R_T : résistance transversale de la conduite en Ω

III.1.2.1.1 Résistance longitudinale de la conduite

La résistance longitudinale de la conduite est donnée par l'expression suivante :

$$r = \frac{\rho_a}{\pi \cdot e \cdot (D_{\text{ext}} - e)} \quad (\text{III. 5})$$

Avec :

e : épaisseur du tube en m.

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite en m.

ρ_a : résistivité de l'acier : $21 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$, elle varie de 20 à $24 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$

III.1.2.1.2 Résistance transversale de la conduite

Calculé comme suit :

$$R_T = \frac{R_{is}(t)}{\pi \cdot D_{\text{ext}}} \quad (\text{III. 6})$$

$R_{is}(t)$: la résistance d'isolement tube-sol. Elle est calculée comme suit :

$$R_{is}(t) = \frac{R_{is}(t_0)}{\beta \cdot t} [1 - e^{-\beta t}] \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

$R_{is}(t_0)$: résistance d'isolement initial. Ces valeurs sont mentionnées dans le tableau

(Tab.III.1).

β : coefficient de vieillissement du revêtement.

Généralement la valeur du degré de vieillissement (B) pour le brai de houille est comprise entre (0.116 et 0.138) en (1/an). Cette valeur dépend essentiellement de la résistivité du sol et de l'état électrique initial du revêtement

Tab. III.1 Valeurs moyennes des résistances d'isolement initial [25]

Différents cas	R(Ω)
Structure nue enfouie dans le sol	5 à 20
Structure nue en eau de mer sou protection cathodique	Env.10
Conduite revêtue de jute et bitume enfouie depuis une tiretaine d'année	30 à 200

Valeur minimale pour canalisation dans des cas défavorables comme la traversée de marais ou fleuves	100 à 1500
Conduite revêtue carboplast qualité C dans de bonnes condition	5000 à 10000 Ou plus
Conduite revêtue polyéthylène (sans point d'accroc)	10^{11}

III.1.2.1.3 Abaissement minimale de potentiel à l'extrémité de la conduite(ΔEL)

$$\Delta EL = E_p - E_n \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

E_p : potentiel de conduit/sol min aux extrémités du domaine de protection.

E_n : potentiel naturel de la conduite.

III.1.2.1.4 Abaissement maximale de potentiel au point de soutirage(ΔEs) :

$$\Delta Es = E_s - E_n \quad (\text{III. 9})$$

Avec :

E_s : potentiel conduit /sol max au point d'injection en v

Remarque : le potentiel de protection E_p , peut dépendre dans une certaine mesure, de la corrosivité de l'environnement (électrolyte), mais il dépend surtout du type de métal utilisé (voir Tab III.2). Dans ce tableau on trouve les domaines de potentiel généralement recommandés, pour différents métaux dans différents milieux.

Tab III.2 Domaines de potentiel de protection préconisés [37]

Métal	Domaines de protection préconisés	
	Ep Dans les sols (électrode Cu/Cu-SO ₄)	En eau de mer (Électrode Ag/Ag-Cl)
Acier et carbone :		
1) environnement aérobie	< -0.85V	< -0.80
2) environnement anaérobie	< -0.95V	< -0.90
Alliages cuivreux	< -0.50 V a – 0.65V	< -0.45 V a – 0.60V
Aluminium	Entre -0.95 V et -1.20 V	Entre -0.90 V et -1.15 V
Plomb	Entre -0.60 V et -1.50 V	Entre -0.55 V et -1.45 V

III.1.3 Poste de soutirage

Un poste de soutirage comprend l'équipement et les matériels nécessaires pour assurer la protection cathodique par un courant imposé. Ces équipements et matériels comprennent les anodes à courant imposé (déversoirs), les câbles et la source de courant continu Voir (Fig. III.2)

Pour calculer les paramètres de points de soutirage nous devons suivre les étapes suivantes :

- **1ère étape Dimensionner le déversoir :**

Déterminer l'intensité du courant de protection, et par la suite déterminer la masse totale des anodes du déversoir, après calculer la résistance du déversoir pour calculer la profondeur de déversoir, et terminer par le calcul de nombre des anodes

- **2ème étape calculer la tension au niveau des bornes du redresseur :** En utilisant la loi d'additivité des tensions. Pour appliquer cette loi il faut d'abord calculer les tensions suivantes (tension au niveau du déversoir, tension au niveau des câbles, tension au niveau de la station).

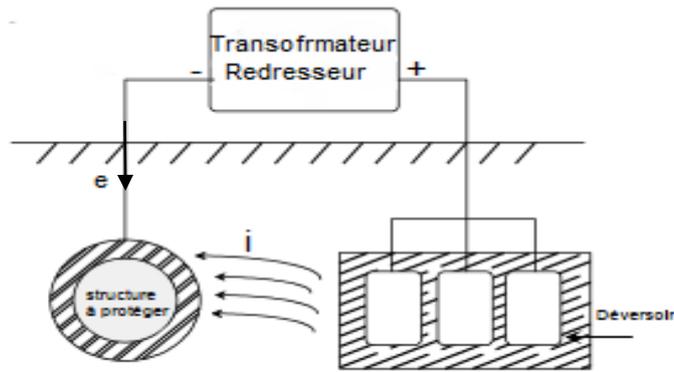


Fig.III.2 Poste de Soutirage

III 1.3.1 Dimensionnement de déversoir

Le déversoir utilisé est une masse de matériau conducteur d'électricité dont le rôle est d'injecter le courant dans le milieu où se trouve la structure à protéger. Sa résistance de contact au sol doit être la plus faible possible et sa masse est déterminée pour avoir la longévité souhaitée. Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- L'acier (rails, tubes...),
- Le graphite,
- Le Ferro silicium, etc.

La résistance du déversoir est faible en pratique (quelques ohms en général) doit être déterminée en fonction du besoin en courant et doit être définie lors de l'étude.

La masse de l'anode à utiliser est donnée par la formule suivante :

$$M = K \cdot I \cdot t \quad (\text{III. 10})$$

Avec :

M : masse totale des anodes du déversoir en Kg.

K : consommation des anodes en Kg/A.an.

I : intensité totale du courant en A

t : durée de vie de l'ouvrage à protéger =30 ans.

Les matériaux généralement utilisés pour la réalisation d'un déversoir sont récapitulés dans le tableau III.3suivant :

Tab III.3 Propriétés et milieux d'utilisation des déversoirs [36]

<i>Déversoir</i>	<i>Consommation (Kg/A.an)</i>	<i>Milieu d'utilisation</i>
Acier	9	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Graphite	0.25 à 0.5	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Ferro silicium	0.5	Tous types de sol Milieux liquides chlorurés Milieux de faible résistivité
Magnétite	1.5 g/A.an	Tous types de sol Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.an	Milieu de faible résistivité

III.1.3.2 Intensité totale du courant

L'intensité du courant totale (de protection) I émis dans le sol par le déversoir, se répartit dans le sol et retourne à la conduite. Le passage du courant détermine dans la conduite un abaissement de potentiel.

Chaque élément AB de longueur dx de conduite, situé à la distance X du point de soutirage est représenté par le schéma ci-contre :

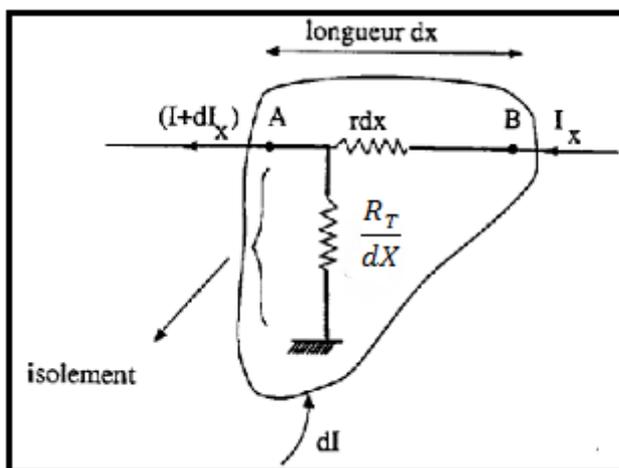


Fig III.3 Schéma électrique d'une portion de conduite traversée par un courant.

Calculé comme suit :

$$I = \sigma \cdot \pi \cdot D_{\text{ext}} \cdot L \quad (\text{III.11})$$

Avec :

σ : densité du courant en mA/m²

Dans certaines circonstances si la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant assurant la protection cathodique.

La densité de courant est déterminée selon 'UHLIG [39] comme suit :

- 0,7 mA/m² pour un acier dans le ciment
- 5 mA/m² pour un acier dans un sol anaérobie sans bactérie
- 35 mA/m² dans un sol aéré
- 60 mA/m² dans l'eau douce agitée
- 100 mA/m² dans l'eau de mer calme
- ≥ 500 mA/m² dans l'eau de mer mise en mouvement.

III.1.3.3 Calcul des nombres d'anodes

$$N_a = \frac{M}{M_a} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

M_a : la masse de l'anode

III.1.3.4 Profondeur du déversoir

Le calcul de la profondeur(p)d'un déversoir dépend essentiellement de deux paramètres :

ρ : la résistivité du sol de l'endroit choisi pour la réalisation du déversoir.

R_a : la résistance de déversoir. Elle est donnée comme suit :

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2Lds}{rs} - 1 \right) \quad (\text{III.13})$$

$$Lds = \frac{M}{M_a} Ld \quad (\text{III.14})$$

Avec :

ρ : résistivité du sol.

Lds : longueur des anodes.

Ld : longueur d'anode (voir tableau III.4).

rs : rayon de la section.

Le tableau III.5 nous permet de déterminer les valeurs de la profondeur (P) et la longueur (Ld) du déversoir en fonction du facteur F qui est calculé comme suit :

$$F = \frac{Ra}{\rho} \quad (\text{III.15})$$

Le tableau suivant nous donne les caractéristiques de plusieurs types d'anodes :

Tab III.4 Dimensionnement de l'anode selon son type [40]

Type d anode	Poids en (kg)	Diamètre en (mm)	Longueur en (mm)
Ferro silicium	23	50	1500
Zinc	20	70	80
Magnésium	15	110	800

Le tableau suivant nous donne la profondeur de déversoir :

Tab III.5 La profondeur de pose des anodes [41]

p(m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
F	0.1291	0.11700	0.11848	0.11392	0.11342	0.11309	0.11287
	0.07558	0.07091	0.06952	0.06884	0.06844	0.06817	0.06798
	0.04569	0.05215	0.05117	0.05065	0.05032	0.05009	0.04993
	0.04331	0.04169	0.04097	0.04055	0.04028	0.04008	0.03994
	0.03607	0.03945	0.03439	0.03404	0.03381	0.03364	0.03351
	0.03102	0.03020	0.02975	0.02946	0.02926	0.02912	0.02900
	0.02729	0.02666	0.02629	0.02605	0.02587	0.02547	0.02664
	0.02414	0.02391	0.02361	0.02340	0.02324	0.02313	0.02303
	0.02212	0.01217	0.02145	0.02127	0.02113	0.02103	0.02094
	0.02024	0.09900	0.01968	0.01952	0.01940	0.01930	0.01923
	0.01868	0.01839	0.01820	0.01806	0.01795	0.01786	0.01779
	0.01735	0.01711	0.01694	0.01681	0.01671	0.01664	0.01657
	0.01621	0.01600	0.01585	0.01574	0.01565	0.01558	0.01552
	0.01522	0.01504	0.01491	0.01480	0.01472	0.01466	0.01460
	0.01435	0.01419	0.01407	0.01398	0.01391	0.01384	0.01379
0.01358	0.01344	0.01333	0.01325	0.01318	0.01312	0.01308	

0.01290	0.01270	0.01267	0.01260	0.01253	0.01284	0.01244
0.01282	0.01217	0.01208	0.01200	0.01195	0.01190	0.01186
0.01173	0.01162	0.01154	0.01148	0.01142	0.01138	0.01134
0.01122	0.01113	0.01105	0.01099	0.01094	0.01090	0.01086

III.1.3.5 Calcul de la tension au niveau des bornes du redresseur

Cette tension est donnée par l'expression suivante :

$$U_r = \Delta U_d + \Delta U_c + \Delta U_{sc} \quad (\text{III.16})$$

Où :

- la tension du câble

$$\Delta U_c = R_c \cdot I \quad (\text{III.17})$$

- la tension de déversoir

$$\Delta U_d = R_a \cdot I \quad (\text{III.18})$$

- la tension au niveau de pipe

$$\Delta U_{sc} = E_{\max} - E_{\min} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

R_c : la résistance des câbles du circuit reliant le poste avec la conduite en Ohm.

E_{\max} : abaissement maximal de potentiel.

E_{\min} : le potentiel de soutirage.

III.1.3.5.1 Résistance des câbles

Les câbles électriques sont des conducteurs, ou composants électrotechniques, grâce auxquels se fait la circulation de l'électricité (ou énergie) et des informations. Le câble est composé d'une partie centrale en cuivre conductrice et gainée dans une couche isolante. Il est aussi appelé conducteur simple.

En règle générale, Les liaisons électriques doivent répondre à deux critères

- Faible résistance électrique
- Très bon isolement par rapport au milieu (en particulier la liaison déversoir).

On n'utilise pas de câble de faible section pour des raisons de résistance mécanique.

- ❖ La résistance des câbles est calculée comme suit :

$$R_c = \frac{(\rho_t \cdot L_c)}{S_c} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

ρ_t : résistivité du cuivre (voir Tab.III.6)

L_c : la longueur du câble = (80 m).

S_c : section du câble 490 mm².

Tab.III.6 Résistivité de métal [42]

Métal	Résistivité ρ_t (Ohm.mètre x10 ⁻⁹)
Aluminium	30
Argent	16
Bronze	50
Constantan	500
Cuivre recuit	17
Cuivre écroui	18
Duralumin AU4G	50
Etain	142
Fer	104

III.1.4 Calcul du potentiel et du courant au point X3[27]

Si l'on effectue un bilan de charges à travers l'élément dx de la conduite (fig. III.4) en considérant que le gradient de potentiel dans la conduite obéit à une loi du type de la loi d'Ohm, cet élément subit une entrée de courant transversal dI, en tout point de la canalisation de potentiel E donnée par :

$$dI = \frac{E_x}{R_T} dx \quad (\text{III.21})$$

Avec :

E_x : potentiel de minimale de protection à une distance x de point de soutirage

I_x : courant de protection à une distance x de point de soutirage

Aussi, la chute de potentiel le long de l'élément AB (fig. III.4) de la canalisation est donnée par :

$$dEx = r dx \cdot I \quad (\text{III.22})$$

En admettant que, à l'interface, seule la résistance du revêtement est à considérer et reliée au potentiel du métal par la relation linéaire $E = R \cdot I$. (assimilée à une résistance de polarisation dans le cas d'un transfert de charge). Ainsi, pour une valeur de potentiel fixe, si la résistance R augmente l'intensité de courant doit diminuer et vice-versa.

Par conséquent,

$$dIx = \frac{Ex}{R} \cdot dx \quad (\text{III.23})$$

Traduisant les entrées du courant à travers le revêtement

$$dEx = r \cdot Ix \cdot dx \quad (\text{III.24})$$

Traduisant la chute du potentiel au point x de la conduite provoquée par le passage du courant.

La variation du courant I le long de la structure :

$$\frac{dEx}{dx} = r \cdot Ix \Leftrightarrow \frac{d^2Ex}{dx^2} = r \cdot \frac{dIx}{dx}$$

$$\frac{d^2Ex}{dx^2} = r \cdot \frac{dx}{R} \Leftrightarrow \frac{d^2Ex}{dx^2} = \frac{r}{R} \cdot Ex$$

$$\frac{d^2Ex}{dX^2} = a^2 Ex$$

On pose :

$$a = \sqrt{\frac{r}{R_T}} \quad : \text{Facteur d'atténuation}$$

$R_c = \sqrt{r \cdot R_T} = \lambda$: Résistance caractéristique de la conduite d'où l'équation

différentielle type

$$\frac{d^2Ex}{dx^2} - a^2 Ex = 0 \quad (\text{III.25})$$

Cette équation possède deux solutions, dont la forme mathématique est :

$$Ex = A'e^{-ax} + Be^{+ax} \quad (\text{III.26})$$

$$\frac{dEx}{dX} = r \cdot Ix \Leftrightarrow \frac{1}{r} \frac{dEx}{dX} = Ix$$

$$I_x = \frac{1}{r} \frac{dE_x}{dx} = \frac{1}{r} (-aA'e^{-ax} + aBe^{+ax})$$

Ou (a) décide l'abaissement de la courbe

$$I_x = -\frac{a}{r} A' e^{-ax} + \frac{a}{r} B e^{+ax} \quad (\text{III.27})$$

Sachant que :

$$\frac{a}{r} = \sqrt{\frac{r}{R}} \Gamma^{-1} = \frac{r^{\frac{1}{2}}}{R^{\frac{1}{2}}} \Gamma^{-1} = \frac{1}{r^{\frac{1}{2}} R^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{r.R}} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Par définition}$$

$$(\text{III.27}) (\text{III.23}) \Rightarrow I_x = -\frac{A'}{\lambda} e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} e^{+ax} \quad (\text{III.28})$$

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$E_x = A' e^{-ax} + B e^{+ax} \quad (\text{III.26})$$

$$I_x = -\frac{A'}{\lambda} e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} e^{+ax} \quad (\text{III.28})$$

❖ En appliquant les conditions aux limites :

$E_{x=0} = E_0$ Potentiel minimal de protection, appelé potentiel desoutirage (E_0)

$I_{x=0} = I_s$ Courant de protection, appelé courant de soutirage (I_s)

$E_{x=L} = E_L$ Potentiel minimal de protection à l'extrémité de la conduite

$I_{x=L} = 0$ Courant s'annule à l'extrémité de la conduite du fait de l'atténuation (a)

$$\begin{cases} E_0 = A' + B \\ I_0 = \frac{-A'}{\lambda} + \frac{B}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_0 = A' + B \\ I_0 \lambda = -A' + B \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

$$(\text{III.30})$$

$$(\text{III.29}) - (\text{III.30}) \Rightarrow E_0 - I_0 \lambda = A' + B - (-A') - B = 2A'$$

D'où :

$$A' = \frac{E_0 - I_0 \lambda}{2}$$

D'autre part on a :

$$(\text{III.29}) + (\text{III.30}) \Rightarrow E_0 - I_0 \lambda = A' + B - A' + B = 2B$$

D'où :

$$B = \frac{E_0 + I_0 \lambda}{2}$$

On met (A') et (B) dans l'équation (III.29)

$$\begin{aligned}
 Ex &= \frac{E_0 - I_0 \lambda}{2} e^{-ax} + \frac{E_0 + I_0 \lambda}{2} e^{+ax} \\
 \rightarrow Ex &= \frac{E_0}{2} e^{-ax} - \frac{I_0 \lambda}{2} e^{-ax} + \frac{E_0}{2} e^{+ax} + \frac{I_0 \lambda}{2} e^{+ax} \\
 \rightarrow Ex &= E_0 \left(\frac{e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right) - I_0 \lambda \left(\frac{e^{-ax} - e^{+ax}}{2} \right) \\
 \rightarrow Ex &= E_0 (\cosh(ax)) - I_0 \lambda \left(\frac{e^{-ax} - e^{+ax}}{2} \right) \\
 \rightarrow Ex &= E_0 (\cosh(ax)) - I_0 \lambda (\sinh(ax)) \quad (\text{III.31})
 \end{aligned}$$

D'autre part on a :

$$\begin{aligned}
 Ix &= -\frac{A'}{\lambda} e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} e^{+ax} \\
 \rightarrow Ix &= -\left(\frac{E_0 - I_0 \lambda}{2} \right) \frac{1}{\lambda} e^{-ax} + \left(\frac{E_0 + I_0 \lambda}{2} \right) \frac{1}{\lambda} e^{+ax} \\
 \rightarrow Ix &= -\frac{E_0}{2\lambda} e^{-ax} - \frac{I_0}{2} e^{-ax} + \frac{E_0}{2\lambda} e^{+ax} + \frac{I_0}{2} e^{+ax} \\
 \rightarrow Ix &= \frac{E_0}{\lambda} \left(\frac{e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right) - I_0 \lambda \left(\frac{e^{-ax} - e^{+ax}}{2} \right) \\
 \rightarrow Ix &= I_0 (\cosh(ax)) - \frac{E_0}{\lambda} (\sinh(ax)) \quad (\text{III.32})
 \end{aligned}$$

En appliquant les conditions aux limites on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} Ex = E(\cosh(ax)) - I_s \lambda (\sinh(ax)) & (\text{III. 31}) \\ I_x = I_s (\cosh(ax)) - \frac{E_s}{\lambda} (\sinh(ax)) & (\text{III. 32}) \end{cases}$$

- X=L

$$(\text{III.32}) \rightarrow I_{x=L} = 0 = I_s (\cosh(ax)) - \frac{E}{\lambda} (\sinh(ax))$$

$$\rightarrow \frac{E}{\lambda} (\sinh(aL)) = I_s (\cosh(aL)) \Leftrightarrow I_s = \frac{E}{\lambda} \left(\frac{\sinh(aL)}{\cosh(aL)} \right) \text{ dans (III.31)}$$

On obtient Ex :

$$\rightarrow E_x = \frac{E}{\lambda} (\cosh(ax)) - \frac{E_s}{\lambda} \frac{\sinh(aL)}{\cosh(aL)} (\sinh(ax))$$

$$\rightarrow E_x = E \left[\cosh(ax) - \frac{\sinh(aL)}{\cosh(aL)} (\sinh(ax)) \right]$$

$$\rightarrow E_x = E \left[\frac{\cosh(ax) \cosh(aL) - \sinh(aL) \sinh(ax)}{\cosh(aL)} \right]$$

Ainsi la distribution du potentiel le long de la canalisation de longueur l est donnée par l'expression du potentiel en fonction de la distance

$$E_x = E \left[\frac{\cosh a(x-L)}{\cosh(aL)} \right] \quad (\text{III.33})$$

Après on obtient I_x :

- X=L

$$(\text{III.31}) \Rightarrow I_{x=L} = 0 = I_s (\cosh(aL)) - \frac{E}{\lambda} (\sinh(aL))$$

$$\frac{E_{sm}}{\lambda} (\sinh(aL)) = I_s (\cosh(aL)) \Leftrightarrow E_{sm} = I_s \lambda \left(\frac{\cosh(aL)}{\sinh(aL)} \right) \text{ dans (III.32)}$$

On obtient donc

$$\rightarrow I_x = I_s \cosh(ax) - \frac{I_s \cosh(aL)}{\lambda \sinh(aL)} (\sinh(ax))$$

$$\rightarrow I_x = I_s \left[\cosh(ax) - \frac{\cosh(aL)}{\sinh(aL)} (\sinh(ax)) \right]$$

$$\rightarrow I_x = I_s \left[\frac{\cosh(ax) \sinh(aL) - \cosh(aL) \sinh(ax)}{\sinh(aL)} \right]$$

Aussi la distribution du potentiel le long de la canalisation de longueur l est donnée par l'expression du courant en fonction de la distance

$$I_x = I_s \left[\frac{\sinh a(L-x)}{\sinh(aL)} \right] \quad (\text{III.34})$$

III.1.4.1 Calcul du courant soutirage :

Le courant de soutirage I_s est calculé comme suit :

$$I_s = \left(\frac{\Delta EL}{R_C} \right) \sinh(a.L) \quad (\text{III.35})$$

III.1.4.2 Calcul de potentiel de soutirage :

$$E = E_s + E_n \quad (\text{III.36})$$

$$E_s = (\Delta EL) \cosh(a.L) \quad (\text{III.37})$$

Avec :

E : potentiel de soutirage

a : coefficient d'atténuation.

L : longueur de la conduite.

ΔEL : abaissement de potentiel à l'extrémité de la conduite.

III.5 Calcul de dimensionnement

III.5.1 Caractéristiques de pipe

L'ouvrage à protéger est le tronçon 8'' transportant le gaz lift produit du centre de production GLA au point PK6, Les caractéristiques techniques de cet ouvrage sont comme suit :

Tab.III.7 Dimensions de la conduite 8'' GLA-PK6

La pression de la ligne	P = 140 bars
Diamètre extérieur	$D_{ext}=8'' = 203.2 \text{ mm}$
Diamètre intérieur	$D_{int} = 187.3 \text{ mm}$
Nuance en acier	API 5L grade B
Epaisseur moyenne	15.88 mm
Longueur	5930 m
Nature du revêtement	Bande adhésive noire

III.5.2 Calcul des paramètres de la protection

III.5.2.1 Résistivité du terrain

$$\rho = 2 \pi A R \quad (\text{III.1})$$

On a :

$$A=1.6\text{m}$$

On a mesuré $R=4.97 \Omega$.

$$\rho=2*3.14*1.6*4.79 =48. 154\approx 50\Omega.\text{m}$$

La valeur de résistivité pour le champ de la région est inférieure à 50 Ω .m. Donc il s'agit d'un sol agressif.

III.5.2.2 Nombre de postes de soutirage N

Pour calculer le nombre de postes de soutirage N il faut d'abord calculer les éléments suivants :

- **La résistance transversale de la conduite :**

Pour calculer La résistance transversale de la conduite R_T il faut d'abord calculer la résistance d'isolement R_{is} selon l'équation (III.7)

D'après (Tab. III.1) on a $R_{is}(t_0) = (50000 \Omega.m^2)$

Pour $T=30$ ans

$\beta = 0.116$, pour un terrain peu agressif comme notre cas

$$R_{is}(30) = \frac{50000}{0.116 * 30} [1 - e^{-0.116*30}]$$

$$R_{is}(30) = 13925.18 \Omega.m^2$$

En remplace la valeur $R_{is}(t)$ dans la formule (III.6) on trouve :

$$R_T = \frac{13925.18}{\pi * 0.2032}$$

$$R_T = 21813.60 \Omega.m$$

- **Résistance longitudinale de la conduite :**

La résistance longitudinale de la conduite r est calculée par l'expression (III.5)

$$r = \frac{21 * 10^{-8}}{\pi * 0.01588 * (0.2032 - 0.01588)}$$

$$r = 2.24 * 10^{-5} \Omega.m^{-1}$$

- **Facteur d'atténuation :**

Pour calculer le facteur d'atténuation a en remplaçant (III.5) et (III.6) dans l'équation (III.4) on trouve :

$$a = \sqrt{\frac{2.24 * 10^{-5}}{21813.60}}$$

$$a = 3.20 * 10^{-5} m^{-1}$$

- **Abaissement minimal du potentiel à l'extrémité de la conduite (ΔEL) :**
 ΔEL est calculée par l'expression (III. 8)

D'après tableau (le tab III.2) on trouve :

$$E_p = 0.85 \text{ V}$$

$$E_n = 0.55 \text{ V}$$

$$\Delta EL = 0.85 - 0.55$$

$$\Delta EL = 0.3 \text{ V}$$

- **Abaissement maximal du potentiel au point de soutirage ΔEs :**
 ΔEs est calculée par l'expression (III. 8)

$$E_s = 2 \text{ V}$$

$$\Delta Es = 2 - 0.55 = 1.45 \text{ V}$$

- **La portée de la protection cathodique L_{max} :**

Pour calculer La portée de la protection cathodique en remplaçant (III.4) , (III.8) et (III.9) dans (III.3)

$$L_{max} = \left(\frac{1}{3.20 * 10^{-5}} \right) \cosh^{-1} \frac{1.45}{0.3}$$

$$L_{max} = 70556.43 \text{ m}$$

A la fin on terminer par le calcul du nombre du soutirage N en remplaçant la valeur de L_{max} dans l'équation (III.2) on trouve :

$$N = \frac{5930}{70556.43}$$

$$N = 0.08$$

Donc 1 seul poste de soutirage suffisant pour protéger le pipe

III.5.2.3 Calculs les paramètres de poste de soutirage

- **Dimensionnement du déversoir :**

On détermine l'Intensité totale du courant selon l'équation (III.11)

On a un acier dans un sol anaérobie sans bactérie alors $\sigma = 5 \text{ mA/m}^2$ alors:

$$I = 5 * \pi * 0.2032 * 5930$$

$$I = 18.89 \text{ A}$$

Alors pour que tout le pipe (de longueur = 5930 m) soit protégé il faut que le déversoir débite un courant de 18.89A

D'après le tableau (tab III.3); les anodes utilisés seront en Ferro silicium, avec une consommation de 0.5 Kg/A.an. donc la masse des anodes selon l'équation (III.10) est :

$$M = 0.5 * 18.89 * 30$$

$$M = 283.350 \text{ kg}$$

- **Calculons les nombres d'anodes :**

Selon le (Tab III.4)) on détermine le poids de l'anode (Ma) pour finalement calculer le nombre des anodes selon l'équation (III.12)

$$N_a = \frac{283.350}{23}$$

$$N_a = 12.319$$

Donc on doit utiliser 13 anodes

- **Calcul de la profondeur du déversoir :**

pour calculer la profondeur on doit déterminer :

- ❖ Premièrement la longueur des anodes (III.14)

$$L_{ds} = \frac{283.350}{23} * 1.50$$

$$L_{ds} = 18.479 \text{ m}$$

- ❖ Deuxièmement la résistance du déversoir (III.13)

$$R_a = \frac{48.154}{2 * \pi * 18.479} \left(\ln \frac{2 * 18.479}{0.0255} - 1 \right)$$

$$R_a = 2.659 \Omega$$

- ❖ Troisièmement on doit calculer le facteur F (III.15)

$$F = \frac{Ra}{\rho}$$

$$F = \frac{2.659}{48.154}$$

$$F = 0.055 \text{ m}^{-1}$$

Finally the depth of the pose ($P=5-10 \text{ m}$). elle est obtenue en fonction du facteur F et d'après la lecture depuis le Tableau (**Tab III.5**), on obtient la profondeur de recouvrement (profondeur de pose).

- **Calcul de la tension du poste redresseur :**

La tension du poste : pour calculer la tension du poste redresseur U_r on doit déterminer :

- ❖ Premièrement la tension du câble il faut d'abord calculer la résistance du câble R_c selon l'équation (III.20)

D'après le tableau (tab III.6) le résistivité du cuivre $\rho_t = 0.018(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$

$$R_c = \frac{(0.018 * 80)}{490}$$

Pour calculer la tension de câble ΔU_c en remplaçant R_c dans (III.17)

$$\Delta U_c = 0.0029 * 18.89$$

$$\Delta U_c = 0.055 \text{ V}$$

Donc la tension au niveau des câbles en égale à 0.055V

- ❖ Deuxièmement la tension du déversoir ΔU_d calculer selon l'équation (III.18)

$$\Delta U_d = 3.656 * 18.89 \text{ A}$$

$$\Delta U_d = 69.06 \text{ V}$$

Donc la tension au niveau du déversoir en égale à 69.06V

- ❖ Troisièmement calculer la tension au niveau de pipe ΔU_{sc} (III.19)

$$E_{\text{max}} = E_s = 2 \text{ V}$$

$$E_{min}=E=0.89V$$

$$\Delta U_{sc} = 2-0.89$$

$$\Delta U_{sc} = 1.11V$$

Donc la tension au niveau de pipe en égale à 1.11V

A la fin pour déterminer la tension du post redresseur U_r il faut remplace (III.17), (III.18) et (III.19) dans (III.16)

$$U_r=14.55+0.051+1.11$$

$$U_r=70.225V$$

Donc la tension au niveau des bornes du redresseur en égale à 70.225V

III.5.3 Potentiel de minimaux de protection à une distance x de point de soutirage

- Potentiel de soutirage : pour calculer le potentiel de soutirage E il faut d'abord calculé abaissement maximal de potentiel selon équation (III.37)

$$E_s = (0.3) \cosh(3.20 * 10^{-5} * 5930)$$

$$E_s=0.305V$$

en remplaçant (III.37) dans (III.36)

$$E=0.305+0.55$$

$$E=0.855V$$

Donc en calculant le potentiel minimal de protection à une distance x de point de soutirage :

en prend $x=3000m$ et on remplace x dans l'équations (III.33)

$$E_x = 0.855 * \left[\frac{\cosh 3.20 * 10^{-5} (3000 - 5930)}{\cosh(3.20 * 10^{-5} * 5930)} \right]$$

$$E_x = 0.84V$$

- Pour calculer le courant de protection à une distance x de point de soutirage il faut d'abord Calcule de courant de soutirage I_s selon l'équation (III.35)

$$I_s = \left(\frac{0.3}{0.699}\right) \sinh(3.20 * 10^{-5} * 5930)$$

$$I_s = 0.08A$$

Donc on calcul le courant de protection à une distance x de point de soutirage :

En remplaçant (III.35) dans (III.34) et la valeur x =3000m on trouve :

$$I_x = 0.08 \left[\frac{\sinh 3.20 * 10^{-5} (5930 - 3000)}{\sinh(3.20 * 10^{-5} * 5930)} \right]$$

$$I_x = 0.03$$

Conclusion

Dans ce chapitre on a fait le dimensionnement de la protection cathodique par courant imposé d'une conduite de 8" de diamètre et de 5930 m de longueur. On conclut que le facteur d'atténuation est inversement proportionnel à la longueur de la portée de la protection et donc du nombre de points de soutirages.

On peut conclure que le courant et le voltage de poste dépendent de la résistance du déversoir et de la résistance des câbles électriques. Donc, pour avoir une consommation optimale il faut jouer sur les dimensions et la profondeur du déversoir de manière que sa résistance soit le plus petit possible, ainsi que la section des câbles électriques et leur longueur pour une résistance plus petite aussi.

Conclusion générale

Conclusion Générale

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

Afin de réaliser une parfaite et efficace protection cathodique, plusieurs paramètres doivent être maîtrisés. Dans ce travail, nous avons fait le dimensionnement de la protection cathodique pour le tronçon 8'' GLA-PK6 transportant le gaz lift de l'usine de production GLA vers les trois champs de la région, le dimensionnement passe par le contrôle d'un nombre de paramètres caractéristiques à la fois du milieu, de l'environnement et des caractères de la conduite protégée. La nature du sol, la nuance du matériau de la conduite, le type de revêtement, ainsi que la nature, les dimensions et l'emplacement des déversoirs sont tous des grandeurs à considérer dans la mise en œuvre de la technique de protection cathodique. 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 sera réduite et aura pour conséquence une augmentation des postes de soutirage répartis le long des canalisations.

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

Bibliographie

- [1] <https://www.metaleo.fr/division-gaz/>
- [2] G.V. Akimov, « Théorie et Méthodes d'Essai de la corrosion des métaux », Dunod,1957
- [3] Marec, « corrosion et protection cathodique », TRAN,1996.
- [4] G. Daufin, J. Talbot, « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages », 51 (507), pp (375-398),INRA Editions, 1971.
- [5] Philippe, M. florian, « Analytical Methods in corrosion science and engineering », U.S.A,2006.
- [6] H.H. Uhlig , « Corrosion et Protection », DUNOD 1970
- [7] Marcel Dekker, « Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering », New York Basel 2002
- [8] <https://eas-pc.pagesperso-orange.fr/pages/accueil.htm>,France,2011.
- [9] M. Pour Baix, « leçons en corrosion électrochimie »,2 eme ed. Cebelcor : bruxelles,1975.
- [10] C. Basalo , « les canalisation d'eau et de gaz : corrosion dégradation et protection», technique et documentation Lavoisier 1987
- [11] P. Lacombe, « Protection contre la corrosion dans les sols : généralités sur la corrosion dans les sols », CEFRACOR,1997.
- [12] M. Magot, T. Jacquenod, et J.L. Crolet, « An updated portrait of the sulfidogenic Bacteria potentially involved in the microbial corrosion of steel » dans microbially induced corrosion EFC pub N°22, the institute of metals, landres,1997.
- [13] Bakhta, S., « Synthèse et pyrrolisation de nouveau hétérocycles dérivés de l'imidazopyridine, application dans l'inhibition de la corrosion acide et bactérien », mémoire de magister, IAP, Boumerdes,2001.
- [14] <http://www.cefracor.org/html/publica.htm>,consulté le 11.03.2005.
- [15] B. Sutter, «la corrosion, différentes formes, prévention », corrosion et anticorrosion journées cetim France 25 et 26 novembre .1997.
- [16] M.Marec, «la protection cathodique des ouvrage », Département d'expertise et de service protection cathodique contre la corrosion,1997.
- [17] M.pansa, Gautheryou,J«l'analys du sol : échantillonna instrumentation et contrôle », MASSON ,paris,1998.
- [18] J. Perdomo,« Chemical and electrochemical condition on steel under disbanded coatings », Thésis de doctorat ;USA:case Western Reserve University;1996

- [19] M.D. Michot, « Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire », Thèse de Doctorat de Paris 6,2003.
- [20] J.A. Laver, et H. Griffiths, « the variability of soils on earthing measurement and earthing system performance », Rev, Power Engineering,2001.
- [21] S.M. Bashi, N. F. Maillah, et Radzi, M.A,« cathodic protection System », National Power and Energyconference;Bangui,Malaysia,2003.
- [22] Sen, P.K., Nelson, J.P., et Malmedal, K, « Steel Grounding Design Guide and Application Notes », Rural Electric Power Conference IEEE,2002.
- [23] J.C. Casanova, « Caractérisation de la dégradation en milieu marin d'un revêtement epoxy-vinyle d'anticorrosion déposé sur un substrat acier », thèse de Doctorat U.F.R. des sciences et technique, Université de Bourgogne, 1994.
- [24] <https://eas-pc.pagesperso-orange.fr/pages/accueil.htm>,France,2011.
- [25] M. Michel « chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel », Editions technip– Paris, 1986.
- [26] INERIS, « Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) »,France, Novembre 2017.
- [27] DJAMA, M. « Etude, Simulation et Dimensionnement d'un System de Protection Cathodique par Courant Imposé d'une Structure Entrée de Pipeline », blida,3 novembre 2008.
- [28] P. Paumelle, « Simulation des systèmes de protection cathodique, corrosion et anticorrosion », CETIM,25 au 26 novembre1997.
- [29] N. Pavel, « Steel passivity induced by industrial cathodic protection », euro cor,2005.
- [30] W. Scwenk, « Fundamentals and concepts of corrosion and Electrochemical Protection », USA, 1997.
- [31] Galland,«Traitement de Surface»,Technique de l'ingénieur,France,1993.
- [32] Séminaire « la protection cathodique édition I.A.P formation industrie », avril 2007.
- [33] Marcel. R, « L'ESSENTIEL SUR LA PROTECTION CATHODIQUE ». 11 mars 2015.
- [34] Pallass M.M. Moinard, A et calais, M, « manuel de protection cathodique », Edition Techniq paris,1970
- [35] Jeffers. K.E., et Orazem.M« Application of electrochemical impedance spectroscopy to characterize the time of pender corrosion of steel in simulated soils environment ».198th Electrochemical society meeting, Phenix: Arizona,2000

- [36] Genod, J. V, « le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation », Technip, Paris 1979.
- [37] Nguyen, Thuy LE, «GIL_Protecton cathodique » , INERIS DRA-PREV -01/2008
- [38] Sonelgaz, « manuel pour la protection des réseaux de distribution en acier- direction de la distribution S.T.GXD.G D45 », Septembre 1996.
- [39] H.Uhlig, « corrosion et protection », Paris, Dunod 1970
- [40] <http://www.jacquet-dechaume.fr/fr/anodes-ferrosilicium-2-x-60-23k-htm-France>.
- [41] SONATRACH, Documents internes de l'entreprise
- [42] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23B/RM23B01.html> .