

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES, DE LA TECHNOLOGIE ET DES SCIENCES DE LA MATIERE



DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

SPECIALITE : GENIE DES PROCEDES

OPTION : GENIE CHIMIQUE

Présenté par :

MESSAOUDA Bennouh

SAMIHA Kouidri

Thème :

*Détermination de nombre
des anodes sacrificielles pour la méthode
de la protection cathodique*

Soutenu publiquement le 19/06/2010 devant le jury composé de :

Pr. SEKHRI Lakhdar
Mr. GUERRI Messaoud
M^{elle}. KANDOUR Zaouia
Mr. TABCHOUCHE Ahmed

Université kasdi Merbah Ouargla
Université kasdi Merbah Ouargla
Université kasdi Merbah Ouargla
Université kasdi Merbah Ouargla

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Année universitaire 2009/2010

Sommaire

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction	1
Chapitre I : Corrosion des matériaux métalliques	
I-1- Généralités	4
I-1-1 La corrosion à haute température (ou corrosion sèche)	4
I-1-2 La corrosion électrochimique (ou corrosion humide)	5
I-1-3 Nature de la corrosion	6
I-1-4 Le milieu corrosif	7
I-2 -Les facteurs provoquant la corrosion	8
I-2-1- Les facteurs liés au milieu	8
I-2-2- Les facteurs liés au métal	10
I-2-3- Les facteurs liés aux conditions d'emploi	11
I-2-4- Les facteurs mécaniques	11
I-2-5- Les facteurs biologiques	11
I-2-6- Les facteurs électriques	11
I-3- Les différents formes de la corrosion	11
I-3-1- Corrosion uniforme	12
I-3-2- Corrosion localisée	12
I-3-3 - Corrosion galvanique	13
I-3-4- Corrosion cavernueuse	14
I-3-5- Corrosion érosion	14
I-3-6- Corrosion sélective	15
I-3-7- Corrosion sous tension (sous contrainte)	15
I-4- Le diagramme de Pourbaix	16
Chapitre II : Protection contre la corrosion	
II-1- Généralités	19
II-1-1- Moyens naturels	19
II-1-2- Contrôle du milieu corrosif	19
II-1-3- Emploi d'additifs chimiques à faible concentration	19
II-1-4- Traitements de surface et revêtements	19
II-1-5- Protection électrique	20
II-2- Protection passive	20
II-2-1- Définition	20
II-2-2- Revêtements à froid	20
II-2-3- Revêtements à chaud	21
II-3- Protection électrochimique (électrique)	22
II-3-1- Protection anodique	22
II-3-2- Protection active (cathodique)	22
Chapitre III : Protection cathodique par anodes sacrificielles	
III-1- Définition	29
III-2- Principe	29
III-3 - Critères de choix	30
III-4- Choix des anodes sacrificielles	30
III-4-1 Anode de zinc	31
III-4-2- Anode d'aluminium	31
III-4-3- Anode de magnésium	32

III-5-Utilisation des anodes sacrificielles	34
III-6-Etudes des protections cathodiques par anodes sacrificielles	35
III-7-Durée de service des anodes sacrificielles	37
III-8-Technique de pose des anodes	38
III-9-Bornes de contrôle	39
III-10 -Exemple de calcul de la protection cathodique	40
III-11- Contrôle des anodes	40
III-12 -Mise en œuvre des anodes sacrificielles.....	41
III-13-Exemples de réalisations de protection cathodique par anodes sacrificielles....	42
Chapitre IV : Etude pour la réalisation de la protection cathodique	
IV-1-Généralité	44
IV-1-1- La résistance moyenne d'isolement	44
IV-1-2- Le potentiel	46
IV-1-3- la résistivité électrique du sol.....	51
IV-1-4- Régulateur de corrosion (Back fill).....	54
IV-1-5- La résistance longitudinale de la conduite	55
IV-1-6- La résistance transversale de la conduite	55
IV-2-Etude mathématique	55
IV-2-1-Calcul du coefficient d'atténuation	56
IV-2-2-Résistance caractéristique	56
IV-2-3-La densité de courant de protection i en (mA /m ²) est	57
IV-2-4-L'intensité de courant de protection	58
IV-2-5-Résistance de terre d'une anode	59
IV-2-6- Calcul de la résistance d'anode	59
IV-2-7- Détermination du courant débité par l'anode	59
IV-2-8- Détermination du nombre d'anode pour un tronçon	60
IV-2-9- Calcul de la longueur qui sera protégée par chaque anode	60
IV-2-10-Calcul de la résistance totale	60
IV-2-11-Comparaison entre les trois techniques de protection	61
IV-3-Phase calcul	63
Conclusion et Recommandation.....	63
Références bibliographiques.....	66

Liste des figures

N°	Titre de figure	Page
Chapitre I : Corrosion des matériaux métalliques		
Figure I-1	la corrosion du métal	4
Figure I-2	Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée	5
Figure I-3	Couples galvaniques calamine acier	6
Figure. I-4	Elément métallique dans l'environnement marin	7
Figure. I-5	Taux de corrosion d'un acier dans différentes atmosphères	8
Figure I-6	Corrosion uniforme	12
Figure I-7	Corrosion par piqûres	12
Figure I-8	Corrosion inter granulaire	13
Figure I-9	Corrosion galvanique	13
Figure I-10	Corrosion caverneuse	14
Figure I-11	Corrosion érosion	14
Figure I-12	Corrosion sélective	15
Figure I-13	Corrosion sous contrainte	15
Figure I-14	Diagramme de Pourbaix Fe H ₂ O à 25°C.	16
Chapitre II : Protection contre la corrosion		
Figure II-1	Protection passive	20
Figure II-2	Exemple de revêtement blessé sans toutefois aucune trace de corrosion Après 50 ans	21
Figure II-3	Schéma de principe de la protection cathodique	23
Figure. II-4	Principe de la protection cathodique à courant imposé	25
Figure II-5	Schéma d'une Installation de P.C.	25
Figure II-6	Principe de drainage de courant	26
Figure II-7	Protection par drainage de courant	27
Chapitre III : Protection cathodique par anodes sacrificielles		
Figure III-1	Anodes sacrificielles	29
Figure III-2	Schéma d'une anode	29
Figure III-3	Implantation des anodes sacrificielles	30
Figure III-4	Anodes de Zinc	31
Figure III-5	Anodes de Magnésium	32
Figure III-6	Pose d'une anode prébackfillée	39
Figure III-7	Fixation des anodes	41
Chapitre IV : Etude pour la réalisation de la protection cathodique		
Figure IV- 1	Répartition du potentiel d'une conduite en fonction de son isolement	45
Figure IV-2	Les courbes des relevés de potentiels	47
Figure IV-3	Electrode cuivre/sulfate	48
Figure IV-4	Mesure simple du potentiel	49
Figure IV-5	Détection des défauts	49
Figure IV-6	Méthode de recherche des défauts	50
Figure IV-7	Le matériel de la méthode	51
Figure IV-8	Méthode des deux terres	53
Figure IV-9	Méthode de quatre terres.	54
Figure IV-10	Principe de mesure	57

Liste des tableaux

N°	Titre de tableau	Page
Chapitre III : Protection cathodique par anodes sacrificielles		
Tableau III -1	Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles	32
Tableau III-2	Caractéristiques des réseaux enterrés ou immergés	36
Chapitre IV : Etude pour la réalisation de la protection cathodique		
Tableau IV-1	Les valeurs de résistance d'isolement par rapport les différents types de revêtement	45
Tableau IV-2	Fonctionnement de l'agressivité par la variation des valeurs de la résistivité	52
Tableau IV-3	Résumé des différents contrôles	62

Summary:

During our work we have tried to address the following issues:

What is corrosion?

What are the ways to fight corrosion?

Our study was mainly based on the cathodic protection by sacrificial anodes, which is one among many methods of protecting metallic structures against corrosion. As intended, we proposed equations to determine the number of sacrificial anodes from some examples.

Key words: corrosion, cathodic protection, sacrificial anodes,

ملخص:

خلال فترة عملنا, حاولنا معالجة الإشكالية التالية:

- ما هو التآكل؟

- ما هي الحلول من أجل الحد من هذا التآكل؟

تعتمد دراستنا هذه بالتحديد على الحماية المهبطية بواسطة المصاعد المجرحة، التي تعتبر من بين طرق حماية

الإصدارات المعدنية من التآكل.

و كهدف مبتغى، اقترحنا منهجية تجمع بين معادلات مختلفة للحصول في النهاية على عدد المصاعد المجرحة. ولتعزيز

هذه المنهجية قمنا بتوضيح تجريبي يتمثل في بعض الأمثلة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الحماية المهبطية، المصاعد المجرحة.

Introduction

Introduction

Le terme de « corrosion » définit toute attaque de la surface d'un métal ou d'un alliage par un agent chimique [1], donc La corrosion est une dégradation du matériau ou ses propriétés, elle résulte d'interaction entre le matériau et son environnement [2].

Ce phénomène à réalité un problème très complexe touche tous les domaines d'activité, mais c'est peut-être dans les industries gazière et pétrolière qu'elle montre le plus son caractère pernicieux: généralement enterrés, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production, de transport et de distribution, se faisant même oublier, les ouvrages gaziers baignent dans un milieu particulièrement agressif du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient [3].

C'est ainsi toute construction métallique qui est, enterrée, immergée et même bétonnée subit inévitablement les phénomènes de corrosion électrochimique dès sa mise en contact avec un électrolyte. Sauf précaution volontaire lorsqu'il est neuf, leur action demeure dissimulée mais impose une dégradation plus ou moins rapide de l'ouvrage [4].

La lutte contre la corrosion est considérée comme un art, une science et une technique représentant un enjeu économique important. Les techniques de prévention de la corrosion sont diverses : le dimensionnement de l'acier, la protection par peinture ou autre revêtement de surface ou la protection cathodique. Le choix de l'une ou de plusieurs de ces techniques dépend de divers paramètres comme l'agressivité du milieu ambiant, la durée de protection envisagée, les possibilités de mise en œuvre et d'entretien et le coût. Une optimisation technico-économique est à faire entre ces différents facteurs [5].

Après quelques généralités sur la corrosion, nous exposerons les différentes techniques citées précédemment, en se concentrant uniquement sur la protection cathodique. Cette dernière technique est couramment appliquée à des structures diverses que : les conduites enterrées ou immergées, les réservoirs, les bateaux, les installations portuaires, ou off-shore, les armatures métalliques des câbles électriques ou téléphoniques ...etc [6].

Au durant de notre travail, on a traité ce problème en concentrant sur la méthode de la protection cathodique par anodes sacrificielles à pour but de déterminer le nombre de ces anodes. Avec l'exposition des deux grandes parties suivantes :

- Dans un 1^{er} lieu : Partie théorique qui contient les trois chapitres :
 - ✓ Chapitre I : Corrosion des matériaux métalliques
 - ✓ Chapitre II : Protection contre la corrosion
 - ✓ Chapitre III : Protection cathodique par anodes sacrificielles

- Dans un 2^{ème} lieu : Partie expérimentale qui concerne :
- ✓ Chapitre IV : Contrôle des installations de protection cathodique

Chapitre I
Corrosion des matériaux
métalliques

I-1- Généralités :

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).

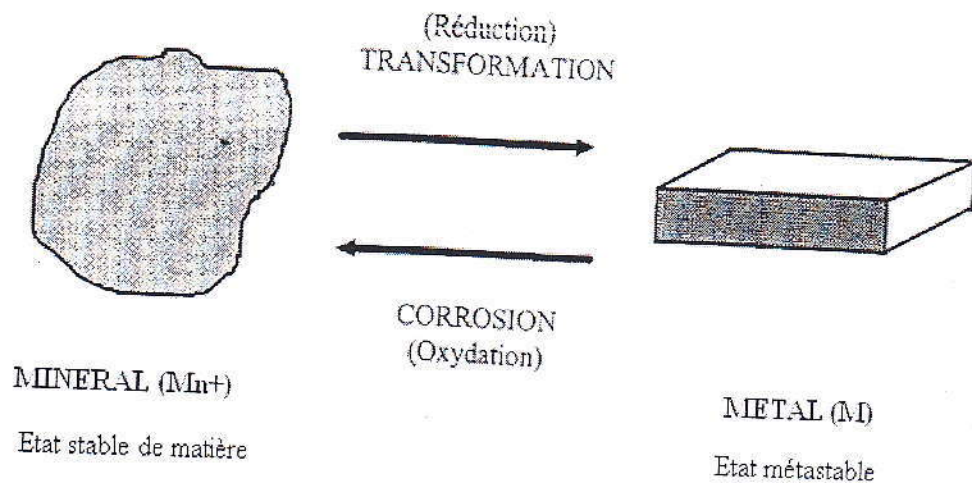


Figure I-1- la corrosion du métal

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) [7].

✓ I-1-1 La corrosion à haute température (ou corrosion sèche) :

La corrosion chimique n'est autre chose que la destruction spontanée des métaux soumis aux lois qui régissent l'évolution des réactions chimiques hétérogènes classiques. La destruction des métaux exposés à l'action des gaz agressifs à température élevée, qui excluent la condensation de l'humidité à la surface du métal ainsi que vraisemblablement leur dissolution en contact de milieux organiques non-conducteurs électriques, se classent parmi les phénomènes de corrosion chimique. C'est la combinaison chimique du métal et de l'électrolyte (passage des ions directement en solution) [8].

I-1-2 La corrosion électrochimique (ou corrosion humide) :

Lorsque un métal est plongé dans un électrolyte, par exemple le sol, les atomes périphériques passent en solution sous forme d'ions. Les ions et les électrons sont en équilibre ; une différence de potentiel apparaît entre le métal et l'électrolyte ; il existe alors à la surface du métal une couche double ou couche limite qui est électriquement neutre et le potentiel de celui-ci est appelé alors potentiel d'équilibre (E_{eq}).

L'équilibre est dû à la couche double d'ions métalliques (cations) neutralisés par des charges électriques négatives (-) [9].



La corrosion électrochimique représente par ailleurs la grande majorité des problèmes de corrosion rencontrés car liée à la présence de l'eau au contact des métaux. C'est le cas en particulier des environnements naturels, tels que les eaux douces, l'eau de mer ou les sols.

C'est aussi le cas de la plupart des milieux liquides de l'industrie, ainsi que des gaz conduisant à des condensations liquides contenant de l'eau (seulement si l'eau est acide ou contient de l'oxygène dissous) [7].

Exemple :

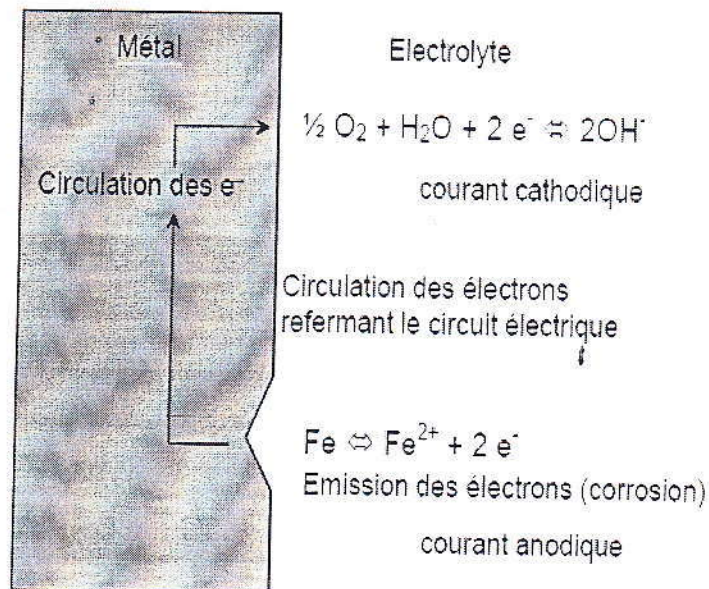


Figure I-2- Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée

I-1-3 Nature de la corrosion :

La corrosion se traduit par la formation de rouille pour l'acier, ce produit composé d'oxydes plus ou moins hydratés ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'eau à température ambiante. Cette corrosion est dite aqueuse, et c'est la forme la plus fréquemment rencontrée en construction métallique.

La corrosion est un phénomène électrochimique : cela signifie qu'il se crée des piles à la surface de l'acier, dans lesquelles une des électrodes, l'anode, se consomme au bénéfice de l'autre, la cathode, qui reste intacte. L'électrolyte est constitué par l'eau, plus ou moins conductrice et oxygénée.

Dans la pratique, ces piles se forment dès qu'il y a hétérogénéité à la surface de l'acier et qu'il se crée des zones anodiques et des zones cathodiques. Ces piles se forment également lorsque l'acier est relié à un autre en présence d'électrolyte (couples galvaniques).

Ainsi, à chaque fois que l'acier se trouvera en position anodique, il se corrodera; au contraire, en position cathodique, il restera intact. Ce phénomène se produit fréquemment lorsque les surfaces d'acier sont recouvertes par des écailles de calamine ou de rouille qui sont cathodiques par rapport à leur support.

Il est important de comprendre la différence fondamentale qu'il existe entre la rouille et la calamine: la rouille se forme en présence d'humidité et d'air à température ambiante, tandis que la calamine est une couche d'oxydes qui apparaît à haute température lors de l'élaboration et de la transformation de l'acier; elle a une couleur bleuâtre caractéristique; il est impératif de l'éliminer avant tout revêtement de l'acier [5].

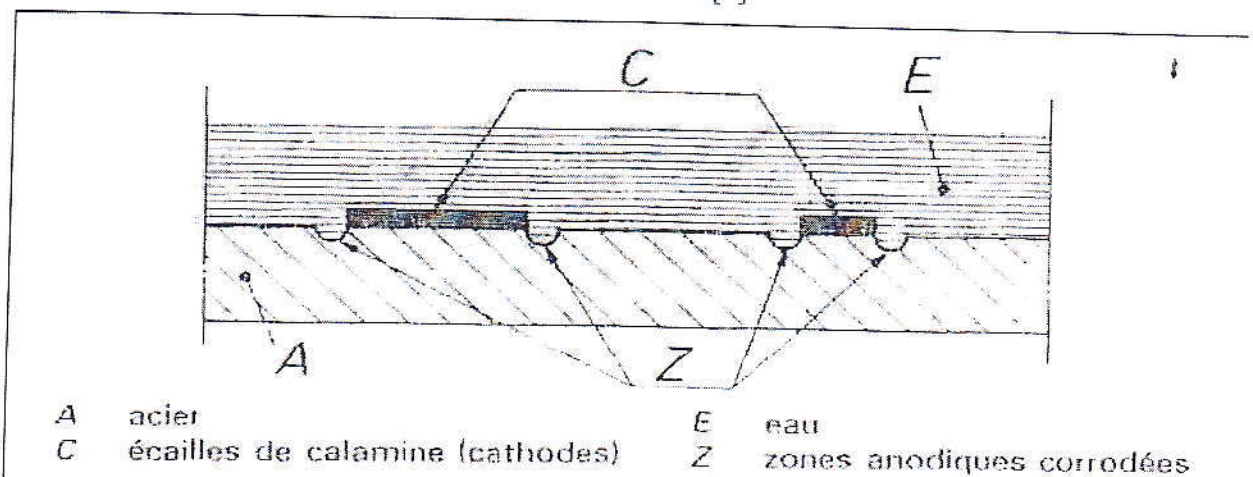


Figure I-3- Couples galvaniques calamine-acier

I-1-4 Le milieu corrosif :

Les milieux corrosifs les plus courants sont l'atmosphère, le sol et l'eau. L'eau de mer et l'eau douce sont suffisamment chargées en sels pour être des éléments actifs des piles de corrosion, au contact de l'acier nu. L'eau de pluie et l'eau de condensation de l'humidité atmosphérique ne sont pas chargées de sel et leurs conductivités électriques sont faibles. Cependant, lorsque l'atmosphère contient des impuretés telles que du dioxyde de soufre (SO_2), du dioxyde de carbone (CO_2), des chlorures en bord de mer, et autres composés, l'eau de pluie ou de condensation s'en trouve chargée, devient conductrice et, par suite, peut favoriser la corrosion.

L'eau étant un des éléments nécessaire à la corrosion, il est évident que les structures en acier exposées à l'atmosphère, occasionnellement au contact de l'eau (pluie, condensation), subiront une corrosion moindre que celles constamment ou surtout alternativement immergées et émergées.

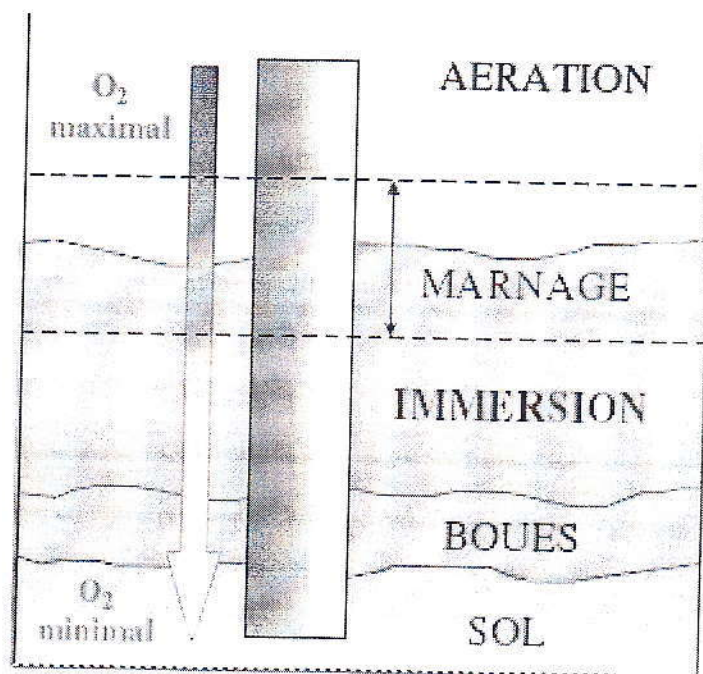
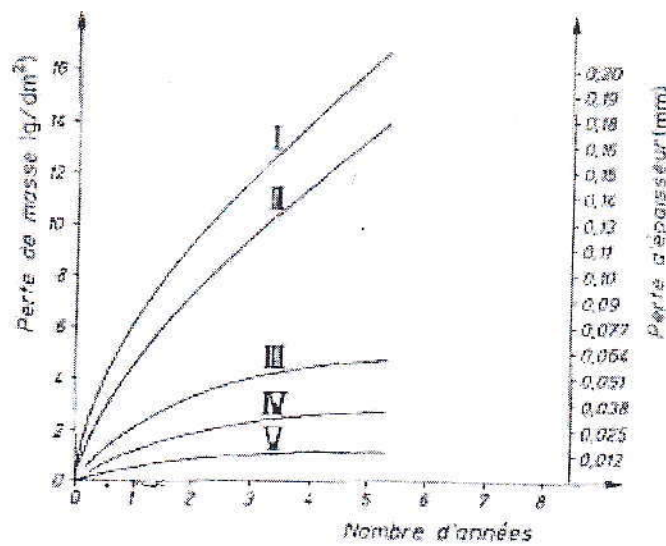


Figure. I-4- Élément métallique dans l'environnement marin



I- atmosphère humide et polluée

II- atmosphère marine (nord)

III- atmosphère marine (méditerranée)

IV- atmosphère pure et humide

V- atmosphère pure et sèche

Figure. I-5- Taux de corrosion d'un acier dans différentes atmosphères

Aux phénomènes électrochimiques s'ajoutent les phénomènes biologiques que sont les bios films et les salissures marines.

La figure suivante donne un ordre de grandeur de l'importance des taux de corrosion d'un acier dans différentes atmosphères [5].

I-2 -Les facteurs provoquant la corrosion :

La corrosion est un phénomène de dégradation des matériaux complexe qui dépend de plusieurs paramètres, relatifs au milieu ou métal. Les cas de corrosion sont parfois difficiles à expliquer par ce que la cause de la corrosion n'a pas été identifiée ou que les bases théoriques ne permettent pas toujours d'apporter une réponse satisfaisante.

La tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de nombreux facteurs inhérents au métal lui-même, au milieu dans lequel il est placé et aux conditions d'emploi [10].

I-2-1- Les facteurs liés au milieu :

Le milieu joue un rôle très important sur la tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage. Il n'est nul besoin de longs développements pour reconnaître ce fait d'expérience.

Parmi les facteurs liés on a :

I-2-1-1-La nature du milieu :

Il n'est pas facile de dresser une typologie rigoureuse des milieux par rapport aux phénomènes de corrosion des métaux. On peut toute fois avancer les tendances suivantes :

- Dans les milieux aqueux ionisés, les réactions électrochimiques fondamentales de la corrosion des métaux peuvent avoir lieu.
- Dans les milieux organiques non aqueux, non ionisables, il n'y a pas de réaction d'oxydoréductions possible ; il faut donc s'attendre à ce que la tenue soit très différente. Il faut aussi distinguer entre :
 - les milieux gazeux qui sont généralement peu réactif à la température ambiante, sauf en présence d'humidité ;
 - les milieux liquides, dans lesquels le contact avec le métal est facile, surtout le liquide mouille le métal. C'est dans ces milieux que les réactions seront les plus probables;
 - les milieux solides, comme les pulvérulents, qui sont généralement peu réactif, sauf en présence d'humidité. Les sels minéraux anhydres n'ont en théorie aucune action s'ils sont réellement anhydres [11].

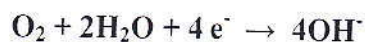
I-2-1-2-La concentration :

La concentration est un facteur important de la corrosion des métaux. En règle générale, la vitesse de corrosion augmente avec la concentration des agents actifs de la corrosion. Mais la relation entre leur concentration dans l'air, dans l'eau, etc....., et la vitesse de corrosion n'est pas forcément proportionnelle.

I-2-1-3-La teneur en oxygène :

La vitesse et la forme de la corrosion de certains métaux dont le fer sont fortement influencées par la teneur en oxygène de l'eau.

L'oxygène est un oxydant et un facteur de corrosion en ce sens qu'il dépasse les cathodes en entretenant la réaction cathodique :



Ce qui a comme conséquence de favoriser la réaction d'oxydation à l'anode, c'est-à-dire la corrosion.

I-2-1-4-Le pH:

Le pH est un facteur très important de la tenue à la corrosion des métaux dans les solutions fonction de potentiel E par rapport à l'électrode à hydrogène et du pH. Ces diagrammes délimitent plusieurs domaines : corrosion, passivation, immunité.

Toutefois, le pH n'est pas un indicateur suffisant pour prévoir la tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dans une solution aqueuse. Il faut aussi connaître la nature de l'acide (donc de l'anion associé au proton H^+) et celle de la base (donc du cation associé à OH^-) [11].

I-2-1-5-La température:

Il est connu que l'élévation de température augmente la vitesse des réactions chimiques.

Cela est vérifié dans le cas de la corrosion de l'aluminium, dans les acides et les bases inorganiques et aussi dans certains milieux organiques (dont les alcools, les phénols et les dérivés chlorés), surtout quand la température s'approche de leur point d'ébullition.

Par contre dans l'eau pure, distillée ou peu minéralisée, l'élévation de température a pour effet de modifier la forme de la corrosion de l'aluminium parce que le film d'oxyde naturel peut réagir avec l'eau pour former une couche protectrice de boehmite. la tenue à la corrosion de l'aluminium dans l'eau dépend de la température [12].

I-2-1-6-L'eau:

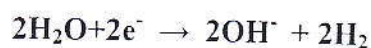
La corrosion par l'eau pure est possible mais sa vitesse de corrosion est très faible; l'eau pure étant peu dissociée, sa conductivité électrique est très faible, d'autre part la seule espèce réductible est constitué par les ions (H^+) provenant de la dissociation de l'eau.

Réaction de réduction :

En milieu acide :



En milieu basique ou milieu neutre:



I-2-1-7-La pression:

La pression ne semble pas avoir d'effet direct sur la corrosion, elle joue simplement sur la quantité de gaz dissous. Elle favorise l'attaque lorsque celle-ci est faible, elle la ralentit lorsque celle-ci est grande [11].

I-2-1-8-La vitesse d'écoulement:

Par exemple, dans le cas du fer attaqué par une solution neutre, la vitesse de circulation accroît la corrosion [10].

I-2-2- Les facteurs liés au métal :

Ils concernent le métal (ou alliage) lui-même .c'est sur la composition des alliages, les gammes de transformation et les traitements thermiques que les métallurgistes et les

corrosionnistes essayent de jouer pour obtenir la meilleure résistance à la corrosion possible [12].

I-2-3- Les facteurs liés aux conditions d'emploi :

Ils sont souvent décisifs. L'expérience montre que dans beaucoup de cas de corrosion en service, ce n'est pas l'alliage, souvent choisi à bon escient, qui en est la cause, mais les dispositions constructives et les conditions d'emploi [11].

I-2-4- Les facteurs mécaniques:

L'interaction physique entre le métal et son environnement influe sur la corrosion.

Les plus répandues sont:

- Dans la phase aqueuse, l'hydro- dynamique, dans les zones de forte turbulence, où l'on parle alors de corrosion érosion.

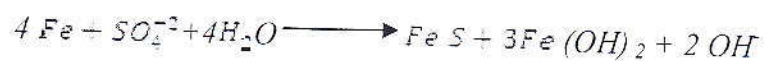
- On trouve les effets de la corrosion cavitation dans les pompesetc.

I-2-5- Les facteurs biologiques:

Dans certains milieux faiblement aérés (argiles, vases...) peuvent conduire à des corrosions dites "bactériennes" qui se présentent sous la forme de cratère. Les bactéries "desulfovibrio-disulfuricans" ou (réductrices de sulfates) dépolarisent la réaction cathodique en réduisant les ions sulfates en ions sulfures.



Globalement, du sulfate de fer est formé:



I-2-6- Les facteurs électriques :

C'est le passage du courant électrique entre le métal et électrolyte modifiant ainsi l'état de corrosion, il s'agit d'un courant qui sort du métal, en accélérant la corrosion, comme l'effet des courants vagabonds.

I-3- Les différentes formes de la corrosion :

Si les processus élémentaires de la corrosion métallique humide sont toujours les mêmes, la morphologie de l'attaque peut prendre les formes très diverses, résultant de la répartition des zones anodiques et cathodiques à l'interface métal-électrolyte et, éventuellement, de l'interaction d'autres phénomènes (électrochimiques, électriques,

mécaniques, biologiques,...) avec le phénomène de la corrosion. Le classement suivant peut en être donné [6] Les formes de la corrosion électrochimique :

I-3-1- Corrosion uniforme:

Elle se traduit par diminution d'épaisseur régulière et uniforme de toute la surface
- Le phénomène se caractérise par la vitesse d'attaque qui se mesure soit en millimètres par ans, soit en milligrammes par décimètre carré et par jour, cette attaque n'est pas forcément proportionnel au temps [13].

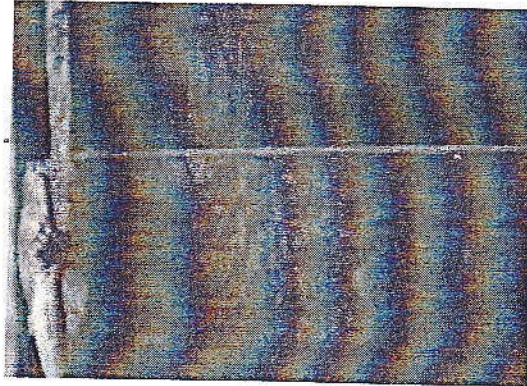


Figure I-6- Corrosion uniforme

I-3-2- Corrosion localisée :

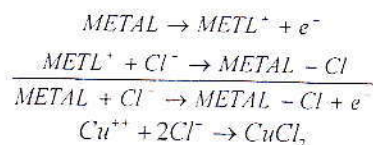
Elle provient de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, pour des raisons d'hétérogénéité dans le métal ou dans l'électrolyte. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible [6].

La corrosion peut être localisée sur le métal. C'est le cas de la corrosion par piqûres (essentiellement en présence d'ions chlorures, comme dans l'eau de mer) ou de la corrosion inter granulaire (hétérogénéité de la structure cristalline du métal). Ce peut être également le cas dans un métal subissant des contraintes inhomogènes : [1]

A- Corrosion par piqûres :

Elle correspond à une attaque limitée à des zones de très petite surface (environ 1mm^2).

Ce type de corrosion devient catastrophique si la profondeur des piqûres devient égale à l'épaisseur du tube [13].



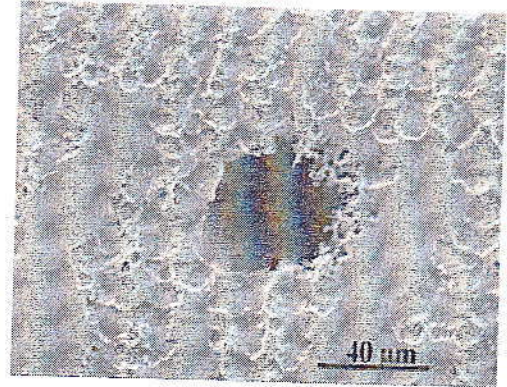
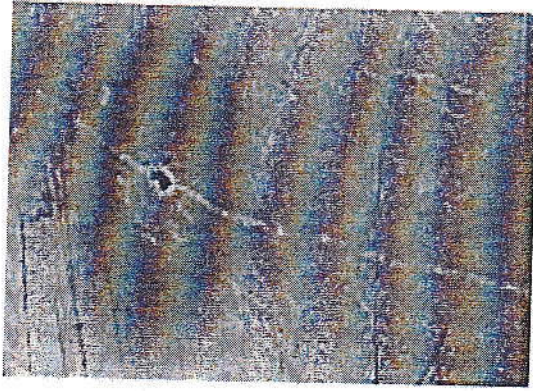


Figure I-7- Corrosion par piqûres

B- Corrosion inter granulaire:

-Les joints de grains sont le siège d'une corrosion localisée très importante alors que le reste du matériau n'est pas attaqué [14], et les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées [15].

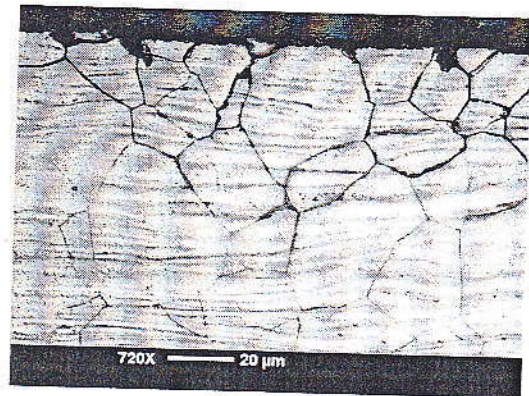
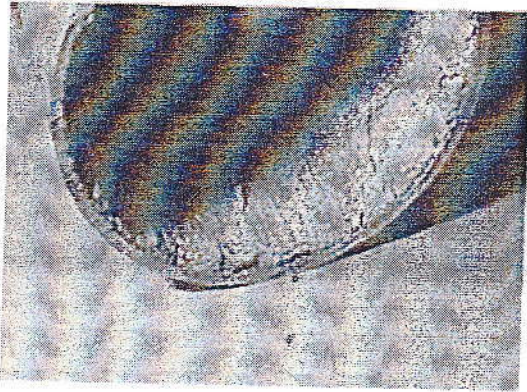


Figure I-8-Corrosion inter granulaire

I-3-3 - Corrosion galvanique:

Il y a deux métaux de natures différentes sont mis en contact. Le métal le moins noble s'oxyde et se dissout (anode), tandis que le métal le plus noble accueille la réaction de réduction (cathode) [14].



Figure I-9- Corrosion galvanique

I-3-4- Corrosion caverneuse:

Comme toutes les corrosions localisées en milieu neutre chloruré, la corrosion caverneuse des aciers inoxydables est due à une acidification locale du milieu corrosif, ici le milieu stagnant emprisonné dans les interstices. Cette acidification est liée à l'existence de films d'eau extrêmement minces, et présentant une très grande surface de contact avec le métal.

L'objectif pratique consiste alors à repousser les durées d'incubation au-delà des durées de service [16].

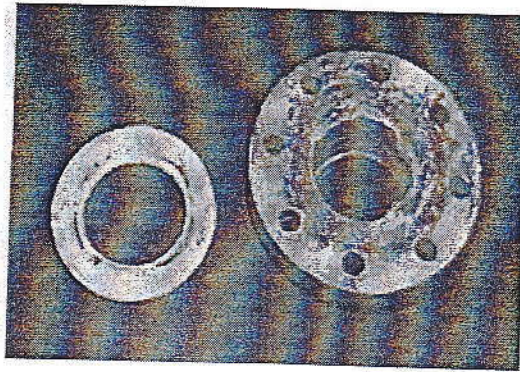


Figure I-10-Corrosion caverneuse

I-3-5- Corrosion érosion:

La corrosion érosion implique une accélération ou un accroissement de la vitesse de détérioration ou d'attaque d'un métal en raison du mouvement relatif entre un fluide corrosif et la surface métallique. Le métal est éliminé en surface sous forme d'ions dissous ou encore sous forme des produits solides qui sont mécaniquement balayés de la surface métallique [13].



Figure I-11-Corrosion érosion

I-3-6- Corrosion sélective:

C'est l'oxydation d'un composé de l'alliage par la dissolution sélective de l'un de ses éléments conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [15].

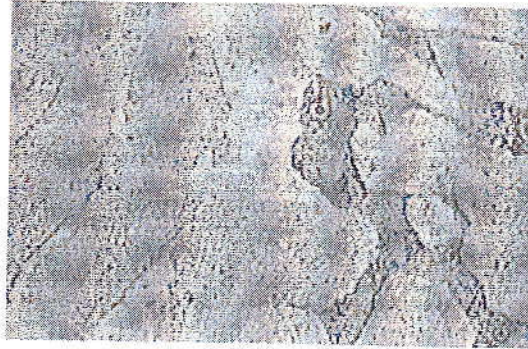


Figure I-12-Corrosion sélective

I-3-7- Corrosion sous tension (sous contrainte):

La corrosion sous tension des aciers inoxydables nécessite, en règle générale, la réunion des trois conditions suivantes :

- présence de chlorure ;
- température élevée ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- présence de contraintes mécaniques de traction.

La corrosion sous tension des aciers inoxydables est due, à l'échelle du réseau cristallin, à une perturbation de la passivité provoquée par un micro fluage du métal [16].

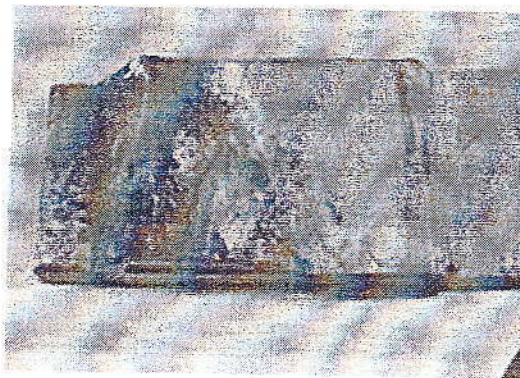


Figure I-13-Corrosion sous contrainte

I-4-Le digramme de Pourbaix:

Le professeur Marcel Pourbaix établi un digramme permettant de broder le métal dans les conditions spécifiées lui permettant d'être immuniser appelé aussi diagramme potentiel - pH, se basant sur les calculs thermodynamiques, ainsi tracé il fait ressortir d'état du métal dans différents situations. C'est la représentation isotherme de l'évolution de la tension d'une électrode en fonction de pH de la solution électrolytique pour une composition donnée (Fig. I-14).

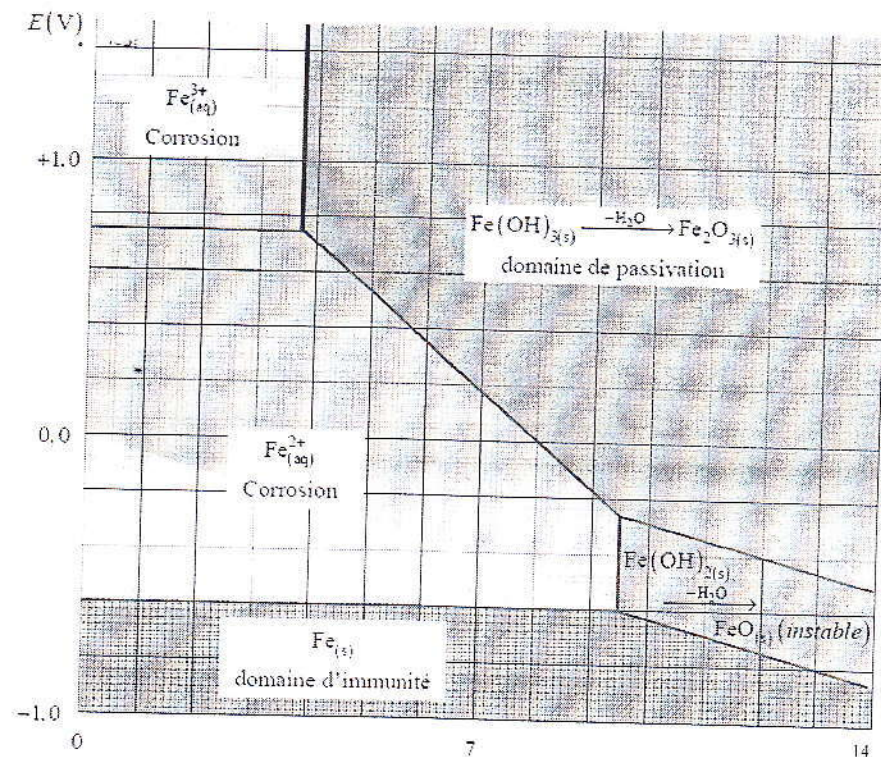


Figure I-14- Diagramme de Pourbaix Fe-H₂O à 25°C [1].

➤ Utilisation de diagramme d'équilibre de Pourbaix:

Pour exploiter le diagramme E , pH en corrosion, il est convenu que :

Le métal se corrode si $[M^{+n}] > 10^{-6}$ mol/l, le métal est passif s'il se forme une espèce insoluble, dans les autres cas, le métal est dans l'état d'immunité.

On peut déterminer dans le plan E , pH.

- Un domaine de passivation: le métal est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant, le métal est protégé contre la corrosion (Fe_2O_3 , $Fe(OH)_2$).

- Un domaine de corrosion: le métal se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles (Fe^{+2} , Fe^{+3} , $\text{Fe}(\text{OH})_3$) [17].
- Un domaine d'immunité: le métal reste à l'état métallique, les réactions d'oxydations n'étant plus possible, c'est le domaine de protection cathodique [9].

Chapitre II
Protection contre
la corrosion

II-1-Généralités:

La lutte contre la corrosion est une discipline scientifique et technique en perpétuelle évolution [16], les moyens de protection contre la corrosion peuvent être classés:

II-1-1- Moyens naturels :

Il s'agit d'effectuer un choix de matériaux permettant d'éviter ou de limiter la corrosion. On peut choisir, lorsque le coût le permet des matériaux ou alliages passifs, voire à l'état d'immunité dans le milieu corrosif en question. Il y a aussi possibilité de limiter la corrosion en agissant sur la conception de l'installation.

II-1-2- Contrôle du milieu corrosif :

On peut parfois agir sur certains paramètres physico-chimiques, comme la température, le pH (alcalinisation) le dégazage, le pouvoir oxydant (désaération, addition de produits oxydants...) [6].

II-1-3- Emploi d'additifs chimiques à faible concentration:

*-Inhibiteur de corrosion :

Un inhibiteur est une substance chimique, qui à ajoutée en très faibles quantités dans le milieu, supprime les inconvénients de ce milieu, sans le modifier [18].

On distingue trois types :

- Inhibiteur cathodique (sels de sodium ou zinc)
- Inhibiteur anodique (sels de sodium, phosphates, carbonates, etc.)
- Inhibiteur mixtes : ceux-ci forment un produit insoluble sur les deux électrodes.

*-Bactéricides :

Le rôle de bactéricides est de tuer les bactéries ou limiter leurs métabolismes.

*-Les aldéhydes :

Possèdent un large spectre d'action ; ils sont efficaces vis-à-vis des bactéries aérobies et anaérobies.

*-Les ammoniums quaternaires :

Associent une fonction détergente et inhibitrice à leur propriété bactéricide [14].

II-1-4- Traitements de surface et revêtements:

Le but est de constituer une barrière aussi parfaite que possible entre le milieu agressif et le métal. On distingue les traitements de surface (phosphatation, chromisation, anodisation...), les peintures, les revêtements organiques (pour la protection de pipelines enterrés notamment), les revêtements métalliques divers (galvanisation, nickelage...).

II-1-5- Protection électrique:

Il s'agit de modifier le comportement électrochimique du métal dans le milieu corrosif par l'intermédiaire d'un courant électrique. La protection anodique, assez peu utilisée, consiste à maintenir le potentiel d'un alliage passivable dans un domaine de passivité stable, en élevant son potentiel sous l'effet d'un faible courant anodique.

La protection cathodique, beaucoup plus répandue, et objet du présent ouvrage, consiste, au contraire, à abaisser le potentiel du métal à un niveau suffisamment bas pour que la corrosion soit éliminée, ceci, sous l'effet d'un courant cathodique. Enfin, des systèmes de drainage de courants vagabonds permettent de se mettre à l'abri de leurs effets [6].

On concerne notre étude sur les deux principaux types de protection des ouvrages métalliques qui sont complémentaires :

- Protection passive.
- Protection électrochimique.

II-2-Protection passive :

II-2-1-Définition :

La protection passive consiste à isoler les structures métalliques par rapport au sol par l'utilisation de revêtements appropriés cette isolation permet d'augmenter la durée de vie des installations et de réduire les besoins en courant de protection par coupure du circuit ionique entre le métal et le sol.



Figure II-1-Protection passive

On distingue deux types de revêtement :

II-2-2-Revêtements à froid:

Ils sont appliqués à température ambiante après nettoyage des surfaces à revêtir [14], en général ils constituent :

A- Les peintures :

Il existe de nombreuses familles de peinture, pour structures enterrées les principales utilisations sont les suivantes :

- les peintures bitumineuses
- les peintures à base de brai époxy.

B- Les bandes :

Ces produits sont essentiellement utilisés pour la réparation des revêtements au droit des soudures de raccordement ou des zones importantes de dégradation, on distingue trois types :

- les bandes grasses
- les bandes auto adhésives
- les bandes plastiques [6].

II-2-3-Revêtements à chaud :

Ce sont en général les émaux à base de brai de houille ou de pétrole, on cite [14] :

A- Les produits thermo rétractables :

Ils sont appliqués, éventuellement sur métal revêtu de primaire, par chauffage à l'aide d'un chalumeau à flamme molle.

B- Les revêtements à liants hydrocarbonés :

Ils sont constitués par :

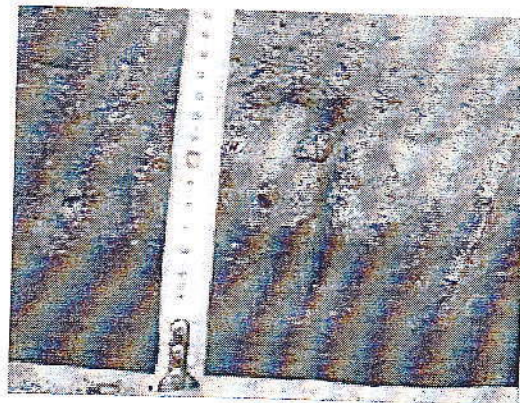
- un primaire d'adhérence appliqué à froid
- une (ou plusieurs) couche de brai de houille ou de bitume de pétrole appliquée à chaud [6].

C- Les revêtements polyéthylènes :

Ils sont constitués d'une couche de 2 à 4 mm de polyéthylène appliquée soit par poudre fondant directement sur le tube préchauffé à 300 °C.

D- Les revêtements époxy (poudres) :

Il s'agit d'une couche mince (300 à 500 μ) appliquée par pulvérisation électrostatique de poudre sur tube chauffé vers 240 °C sans primaire. Ils sont largement utilisés pour les conduites chaudes (jusqu'à environ 100°C).



**Figure II-2- Exemple de revêtement blessé sans toutefois aucune trace de corrosion
Après 50 ans**

II-3- Protection électrochimique :

La protection électrochimique englobe les deux méthodes suivantes :

II-3-1- Protection anodique :

La protection anodique qui consiste à maintenir le potentiel d'un alliage passivable dans un domaine de passivité stable, en élevant son potentiel sous l'effet d'un faible courant anodique. Cette méthode est peu utilisée car son application est soumise à des limitations importantes : contrairement à la protection cathodique, on ne peut pas appliquer cette protection sur toute l'échelle des pH, et de plus elle peut-être altérée si le film de passivation est détruit, c'est à dire si les ions chlorures sont présents [7].

II-3-2- Protection cathodique (active) :

La protection cathodique est une méthode de lutte contre la corrosion bien adaptée pour les ouvrages métalliques en contact avec des électrolytes conducteurs. Cette technique date de plus d'un siècle : en effet elle a été découverte empiriquement pour la première fois en 1820 par l'anglais Davy, lorsqu'il plaça sur les coques de navires en cuivre des plaques de Zinc.

Plus tard, la célèbre loi de Faraday se révéla fondamentale dans le processus de la corrosion. C'est ainsi que le physicien a pu démontrer que dans une corrosion électrochimique de Fer au cours d'une année un courant de 1A dissout 9 kg.

$$m = \frac{1}{96500} \cdot \frac{A}{n} \cdot i \cdot t$$

A partir de cette période et surtout après la deuxième guerre mondiale que l'étude de la corrosion cathodique et d'une manière générale des techniques de lutte contre la corrosion a connu un développement remarquable.

A titre d'exemple cette méthode a connu un grand essor en France après, elle est devenue obligatoire, elle est appliquée couramment pour les canalisations de gaz, d'hydrocarbures, d'eaux, etc.....

Actuellement dans la majorité des pays cette technique se pratique couramment sur les structures importantes c'est le cas des pipelines, des installations portuaires, des plates formes marines etc.....

C'est-à-dire elle est appliquée aux métaux en contact avec le milieu conducteur toutefois elle n'est pas possible contre le gaz ou l'atmosphère.

Sur le plan économique : lorsqu'elle est réalisée en tant que technique préventive, elle ne constitue pas une lourde charge financière pour l'industrie.

A titre indicatif : pour les conduites de gaz les frais sont évalués aux environs de 0,25 à 0,5% alors que pour les conduites d'eau les investissements sont estimés entre 0,5 et 1% du capital investi.

Quand aux frais annuels d'exploitation, ils ne représentent que 0,05% du prix total.

[14]

II-3-2-1- But :

- Supprimer les couples galvaniques et les piles géologiques par égalisation des potentiels.
- Polariser négativement le métal par rapport au milieu extérieur de manière à abaisser son potentiel jusqu'à son domaine d'immunité.

II-3-2-2-Principe de la protection cathodique :

La possibilité de créer la circulation d'un courant électrique entre un métal et la solution qui l'entoure, circulation telle que le sens du courant passe de la solution vers le métal, et de favoriser ainsi la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion, en reportant la réaction d'oxydation sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation, donc la protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable [3].

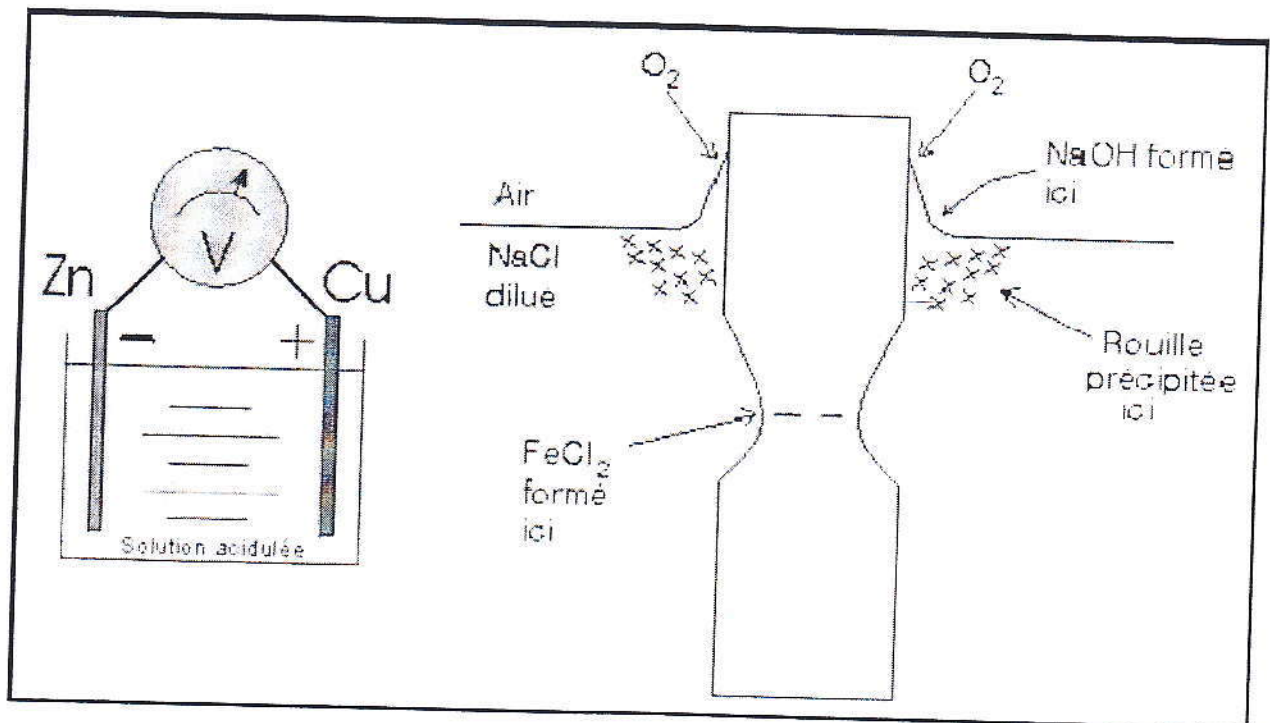


Figure II-3- Schéma de principe de la protection cathodique

II-3-2-3-Choix de la protection cathodique :

Le choix de la méthode de protection n'étant pas aisé du fait qu'aucune méthode n'est universellement applicable, le choix se fait d'une part selon le milieu Environnant, d'autre part, selon les considérations économiques. Ces dernières n'incluent pas seulement le coût initial de mise en œuvre, mais aussi le coût de la maintenance telle que le remplacement des parties corrodées et dans certains cas le renouvellement de la protection. Une des méthodes les plus utilisées industriellement est la protection cathodique qui s'avère généralement peu coûteuse et efficace sur une longue durée lorsque cette technique est maîtrisée et accompagnée d'une bonne connaissance des conditions environnantes [7].

II- 3-2-4- Réalisation pratique de la protection cathodique :

D'après ce qui vient d'être dit, il existe trois manières de réaliser la protection cathodique :

A- La protection cathodique par anodes sacrificielles (réactives ou galvaniques) :

Le métal est relié électriquement avec un autre métal moins noble que lui, c'est-à-dire dont le potentiel dans la solution est plus négatif. Ce métal moins noble va se dissoudre par oxydation en émettant dans le sol un courant qui viendra protéger la structure. On a réalisé ainsi une protection cathodique dite par anode galvanique ou sacrificielle [3].

B- La protection cathodique par courant imposé :

L'abaissement de potentiel des canalisations à la valeur portant le métal en phase d'immunité est obtenu en connectant le réseau. En un ou plusieurs de ses points, au pôle négatif d'une source électrique de courant continu .généralement, on ne dispose que de courant alternatif .Il est donc nécessaire de transformer le courant alternatif du secteur basse tension en courant continu, à l'aide d'appareils dits « redresseur ».

Le circuit électrique se constitue alors ainsi :

- la borne positif de sortie du redresseur est reliée à une masse métallique enterrée nommée : anode, prise de terre, ou masse sacrificielle et sur la quelle la corrosion sera reportée.
- La borne négative correspondante est reliée au réseau de conduite à protéger [19].

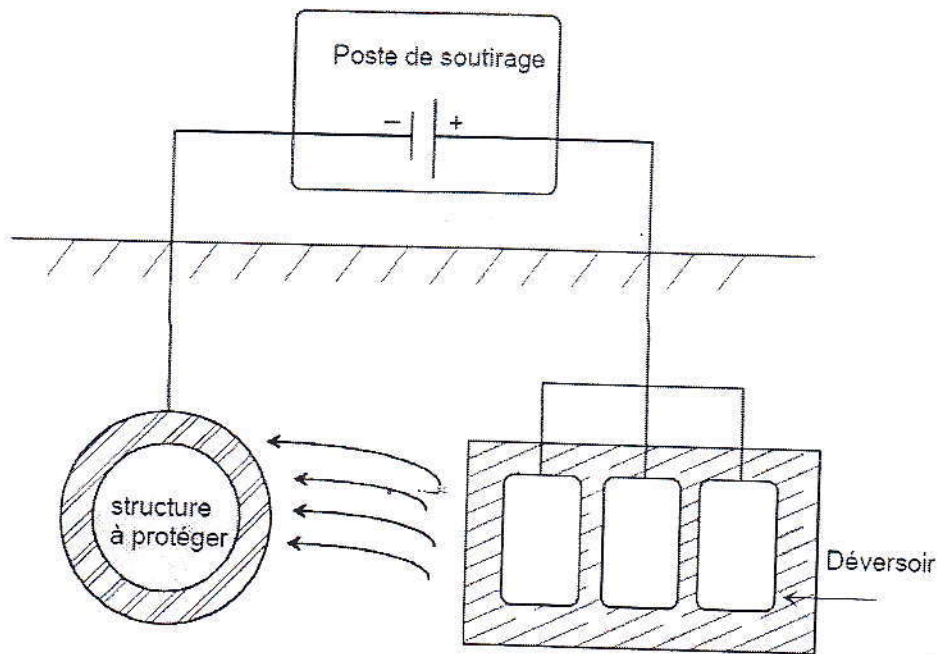


Figure. II-4-Principe de la protection cathodique à courant imposé

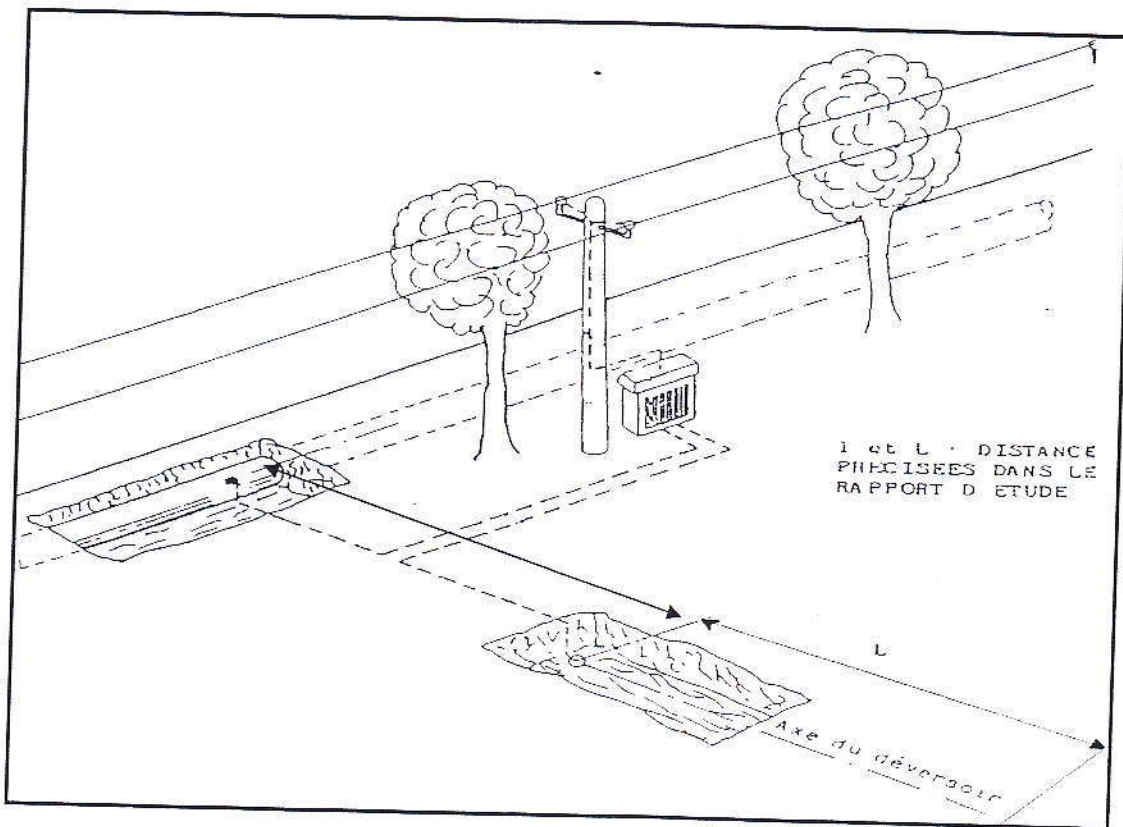


Figure II-5- Schéma d'une Installation de Protection cathodique.

C- La protection cathodique par drainage de courant :

Le drainage de courant est utilisé dans les cas où les risques d'électrolyse sont dus à la présence dans le sol de courants vagabonds.

L'objet à protéger ①

On écarte le danger en reliant électriquement ② l'objet au pôle négatif de la génératrice. Dans la majorité des cas c'est une voie ferrée qui est le perturbateur, donc on relie la structure à protéger au rail lui-même.

Les courants vagabonds qui circulent dans le réseau sont directement restitués à la génératrice par le câble de liaison ② et ne passent plus par le sol.

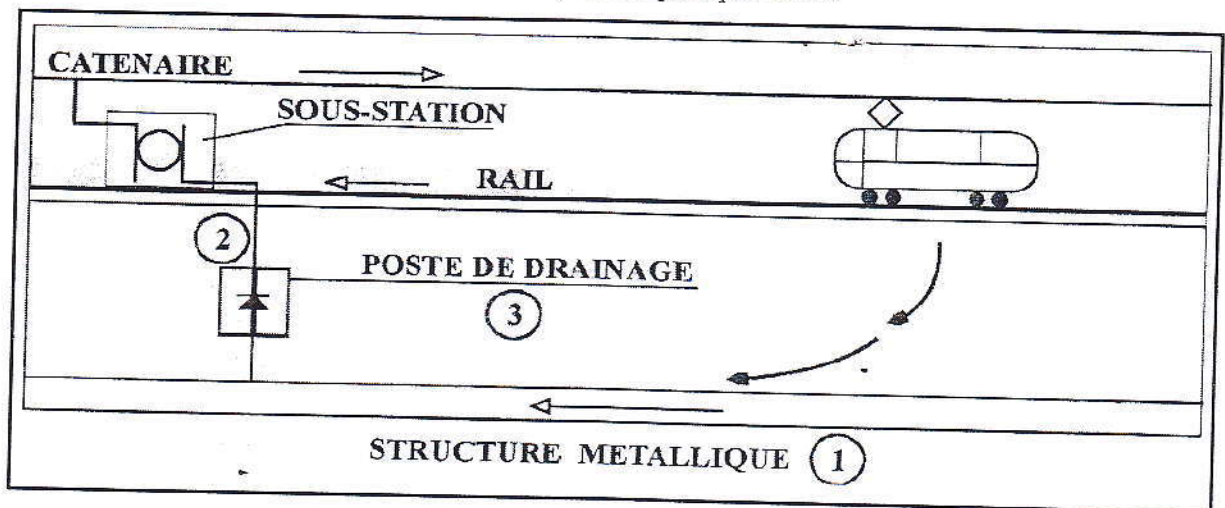


Figure II-6- Principe de drainage de courant

-L'appareil de drainage ③

L'appareil de drainage est constitué de manière que les courants ne circulent que dans le sens conduite-rail [20].

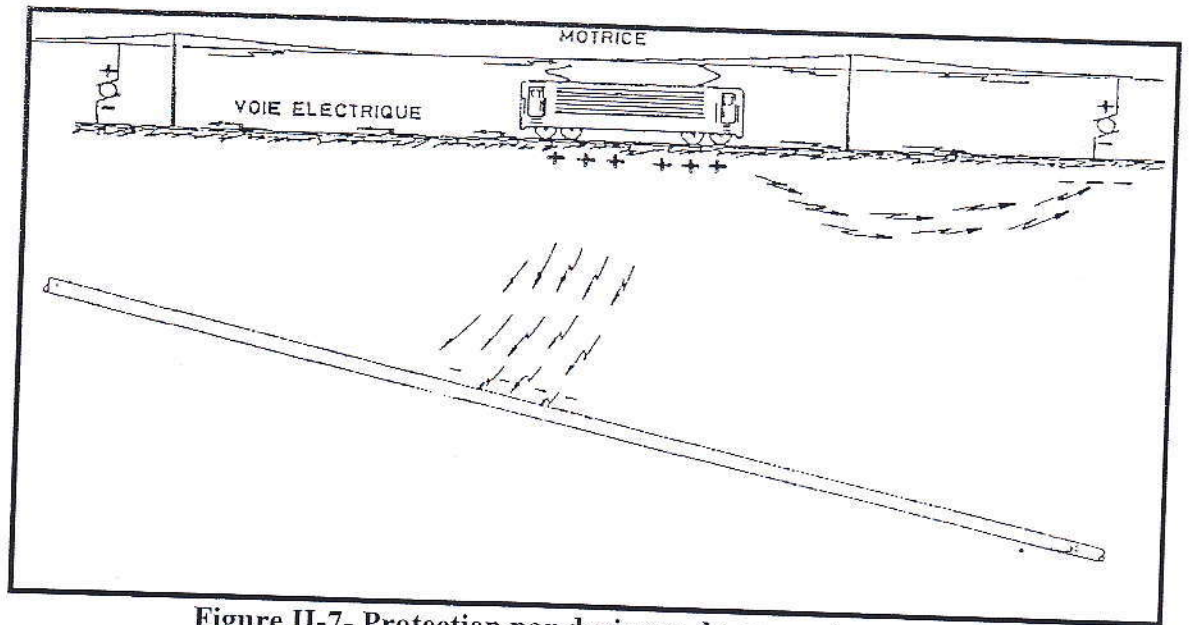


Figure II-7- Protection par drainage de courant

Après quelques informations sur la protection cathodique on a choisi cette méthode par anodes sacrificielles

Chapitre III
Protection cathodique
par anodes sacrificielles

III-1-Définition :

La protection cathodique par anode sacrificielle a pour but de créer une pile avec deux métaux différents: l'acier de la surface à protéger (cathode) et un métal moins électropositif qui constitue (l'anode).

Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution et permet de porter la surface à protéger au potentiel de non corrosion de l'acier [10].

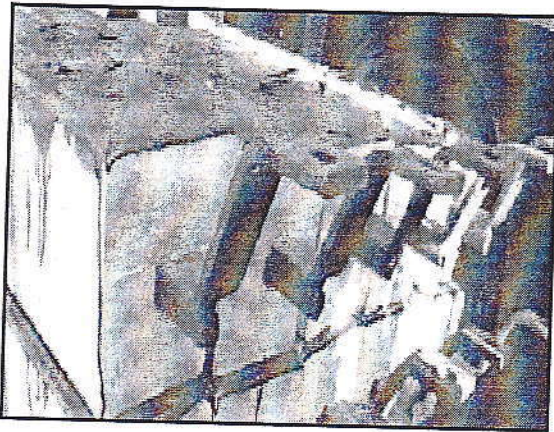


Figure .III-1 -Anodes sacrificielles

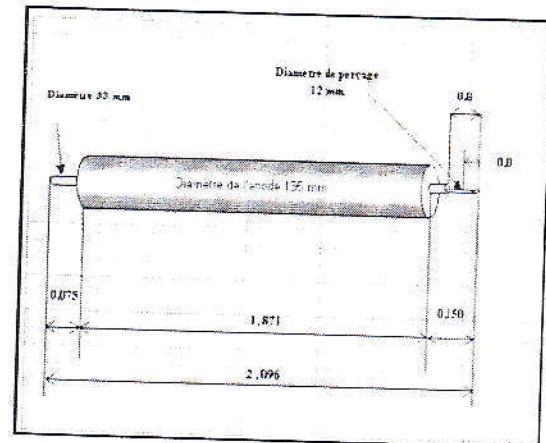


Figure III -2-Schéma d'une anode

III-2-Principe :

L'anode sacrificielle forme une pile électrochimique avec la structure à protéger, qui joue alors le rôle de cathode. L'anode sacrificielle doit donc posséder un potentiel réversible inférieur à celui du métal que l'on veut préserver. Pour protéger l'acier, par exemple, on utilise le magnésium, le Zinc et l'aluminium, ainsi que leurs alliages. De préférence on utilise le magnésium pour protéger des structures enterrées, car il donne la différence de potentiel la plus élevée et possède la meilleure capacité volumique. Les anodes sacrificielles ont différentes formes : tiges, blocs, anneaux, etc. soit on les fixe sur l'objet à protéger, soit on les enterre à une certaine distance [21].

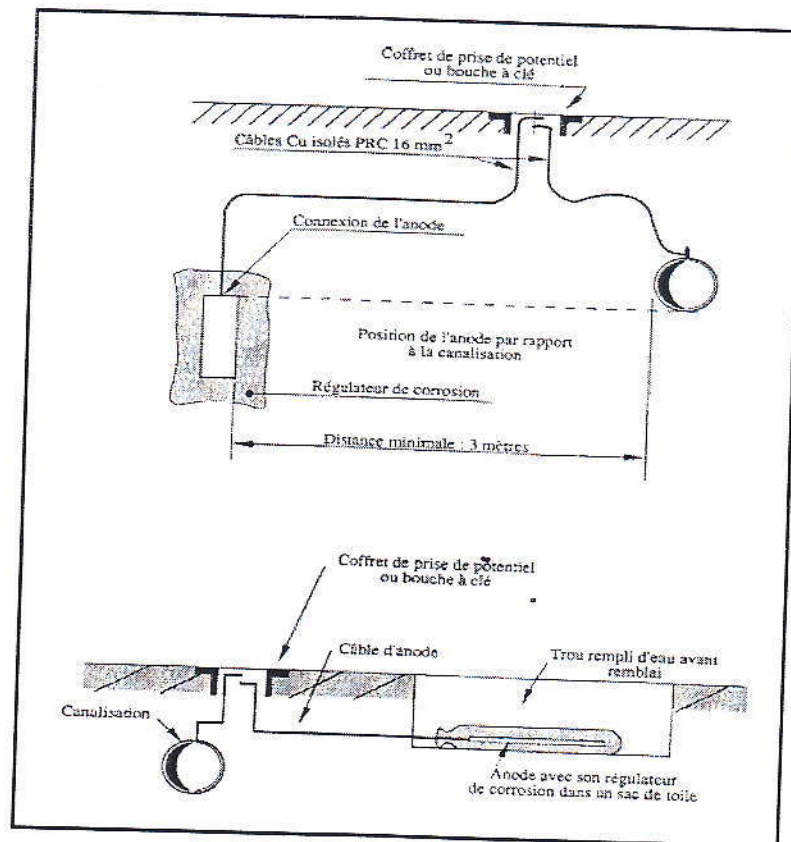


Figure .III -3-Implantation des anodes sacrificielles

III-3 -Critères de choix :

Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, on utilise une anode installée dans le même électrolyte .Les anodes peuvent être de deux types :

- ✓ soit des anodes ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger (anode galvanique ou sacrificielle),
- ✓ soit des anodes couplées à un générateur de courant imposant une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à courant imposé).

Le choix d'un système par rapport à un autre doit être établi en tenant compte des comparaisons techniques et des critères économiques (conception, équipement, installation, maintenance, consommation en matière et en énergie) [7].

III-4-Choix des anodes sacrificielles :

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes .Le tableau III-1 résume les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées, avec les avantages et inconvénients de chacune.

Dans le cas de la protection de l'acier, les anodes utilisées sont à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium .Des études et l'expérience ont permis de déterminer, pour

chacun des métaux les seuils d'impureté admissibles ainsi que les éléments d'alliage complémentaires nécessaires pour obtenir les meilleures performances .De nombreux alliages spécifiques pour la protection cathodique existent aujourd'hui sur le marché [7].

III-4-1 -Anode de zinc :

Le zinc utilisé pour les anodes sacrificielles est très pur .La pureté minimum nécessaire est de 99,997% et la teneur en fer, inférieur à 0,0014.%

Il comporte quelques additions :aluminium et cadmium ou magnésium dont la présence est nécessaire pour permettre une teneur en Fe plus élevées sans passivation de l'anode [10] .

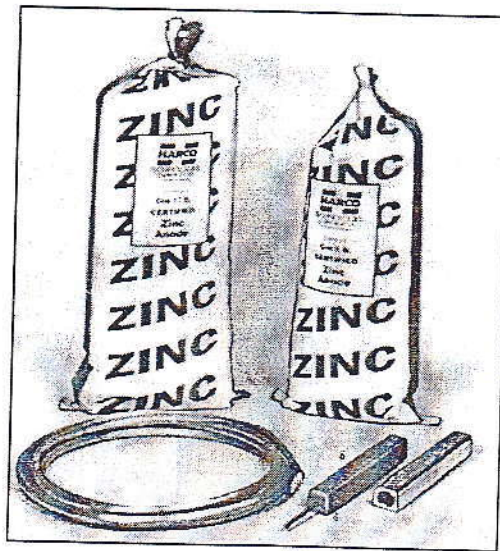


Figure .III -4- Anodes de Zinc [22]

III-4-2-Anode d'aluminium :

L'aluminium se passivant spontanément par formation d'une couche d'alumine superficielle, il est nécessaire d'introduire dans la composition du matériau anodique un agent activateur, généralement le mercure ou l'indium [6].

La passivation anodique de l'aluminium dans l'eau aérée a conduit à l'utilisation uniquement sous forme alliée .L'alliage à 3 à 6% de Zn qui permet d'obtenir un potentiel de l'ordre de -1,1v pour un rendement limité à 40 ou 50 %tend à être abandonné au profit d'alliages plus élaborés tels que Mercatal 616, Galvalum, Alcan 420, Aloline, Alcoa HP7 (noms commerciaux de divers alliages d'aluminium) présentant les caractéristiques suivantes :

- Potentiel -1,2 à -1,5v.
- Rendement 80 à 90.%
- Consommation réelle 3 à 4 Kg/A/an,

III-4-3-Anode de magnésium :

Les anodes de magnésium comportent comme les anodes de Zinc, des additions : 6 % d'aluminium, 3% de Zinc, 0.2% de manganèse.

Il a été reconnu que cette composition permet une structure plus fine et une corrosion plus régulière du métal et favorisait le rendement [10].

Il existe deux types principaux d'anodes à base de magnésium :

- l'un contenant environ 6 % d'aluminium, 3% de Zinc et donnant un potentiel de l'ordre -1.5v (par rapport à l'électrode Ag/AgCl/eau de mer) : type standard.

- L'autre sans Zinc, mais avec du magnésium pur et du manganèse, donnant un potentiel de -1.7v : type haut potentiel [6].

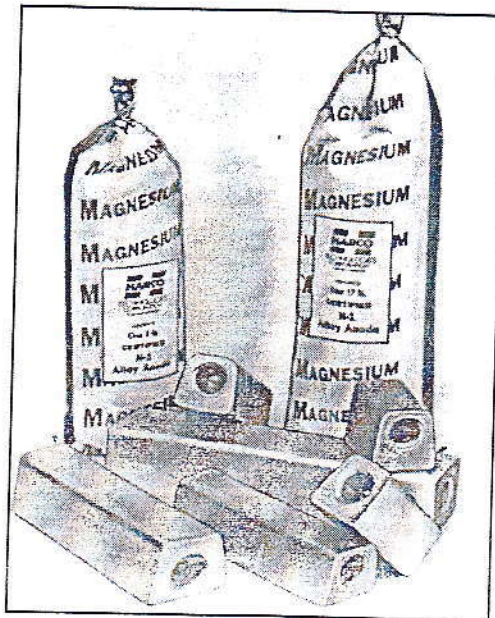


Figure .III-5 -Anodes de Magnésium [21]

On peut conclure la comparaison entre les différents types d'anodes sacrificielles :

Tableau III -1 Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles

	Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
Potentiel en charge (V)	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10V à terre	-1,05	- 1,4 à -1,5 (type standard) - 1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
Capacité pratique (Ah/Kg)	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)

Consommation pratique (Kg/A.an)	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6,5 à 8
Rendement électrochimique (%)	95 en eau de mer 90 à terre	87	55
Application	<ul style="list-style-type: none"> -Conduites enterrées de faible longueur -Ouvrages immergés -Capacités métalliques (intérieur ou extérieur) -Réservoirs sous talus 	<ul style="list-style-type: none"> -Plates-formes offshore -Conduite offshore chaude - Capacité métalliques (intérieur). -Utilisation bien adaptée en milieu marin, compte tenu de l'expérience actuelle. 	<ul style="list-style-type: none"> -Conduites enterrées sur de faibles longueurs -Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes -Pré polarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le relais. -Réservoirs sous talus. -Prohibé par certaines compagnies d'assurance dans les citernes de pétroliers du fait des risques d'exploitation en cas de chute accidentelle. -protection de conduites enterrées sur de faibles longueurs dans de milieu ayant des résistivités inférieurs à 50 Ω.m.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -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 	<ul style="list-style-type: none"> -Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique) -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. -Force électromotrice bien adaptée 	<ul style="list-style-type: none"> -Portée élevée (fort potentiel). -Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer). -Faible poids spécifique. -Rayon d'influence élevé.

	<ul style="list-style-type: none"> -Peu sensibles aux salissures marines. -Fiabilité excellente, quelque soit le débit, et même après un arrêt prolongé. -Prix de l'Ampère/an avantageux (comparable à d'aluminium), pas de surcharge à craindre. 	<p>en eau de mer, très bon rendement, rayon d'influence plus grand que celui du zinc, pas de surcharge local, usure régulière, faible poids.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Peu être utilisé en milieu marine explosif citernes de tankers (à condition de ne pas contenir de Mg) exigé par certaines compagnies d'assurances risque d'explosion en cas de chute. 	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Portée limitée (faible potentiel) -Température d'utilisation limitée à 60 °C - Cout par A/an plus élevée que celui de l'aluminium (cas des ouvrages en mer). - Poids spécifique élevé - Rayon d'influence limité. - Encrassement : le résidu de corrosion n'est pas conducteur 	<ul style="list-style-type: none"> -Moins adaptée 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 . - les alliages courants actuels sont généralement déconseillés pour les milieux faiblement renouvelés, donc non utilisables dans le sol, il ya chute du rendement par suite de l'acidification du milieu. - risque de polarisation par formation d'alumine si le dépolarisant n'est pas bien disposé dans l'alliage, encrassement facile par le fouling. 	<ul style="list-style-type: none"> -Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture). -Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires). -Rendement médiocre en eau de mer. -Coût de l'A/an le plus élevé.

III-5-Utilisation des anodes sacrificielles :

Les anodes sacrificielles en zinc ou en magnésium sont utilisées fréquemment pour la protection cathodique d'ouvrage de toutes sortes en eau de mer (palplanche, coque de navires, etc.). Ou enterrées. Elles conviennent particulièrement bien aux réseaux de canalisations en acier surtout lorsqu'il s'agit de protection locale : traversées de terrains agressifs, de rivières par exemple.

Il n'est pas exclu, d'ailleurs, d'envisager la protection d'un réseau en totalité par ce procédé, surtout si le réseau est d'étendue moyenne, les réseaux très importants exigent un nombre d'anodes très élevé, on préfère souvent le soutirage de courant, plus puissant, réglable à la demande et susceptible de portées plus considérables.

Les anodes sacrificielles s'imposent en particulier dans les petits réseaux ruraux car elles nécessitent ni entretien, ni surveillance et cette considération est importante car, dans ce cas, la plupart du temps, aucun technicien qualifié ne se trouve sur place pour contrôler incessamment l'exploitation du service.

Il n'existe pas de règle ou de considérations formelles qui permettent de choisir entre le zinc ou le magnésium. On remarquera toutefois que le magnésium étant plus électro-négatif que le zinc, on obtiendra plus facilement la chute de potentiel voulue avec ce métal dans le cas où la résistivité de sol est relativement élevée ou si l'isolement du réseau par rapport au sol est faible. D'autre part, le magnésium s'accommode mieux des sols à tendance acide et le zinc des sols à tendances alcaline ou acide.

Les produits de corrosion qui se forment autour des anodes au cours de leur fonctionnement modèrent, après quelques années de services, leur efficacité. Il semble, par expérience, que le zinc soit moins sensible à ce fait [19].

III-6-Etudes des protections cathodiques par anodes sacrificielles :

L'étude d'un avant-projet peut être faite sur plans et carte géologique.

Le projet définitif étant établi après étude du sol sur place, les régions du réseau où les conduites seront en sols agressifs, peuvent être bien déterminées.

On en déduira pour chacune d'elles les surfaces de conduites intéressées.

Nous rappelons que pour protéger cathodiquement une structure enterrée ou immergée, l'expérience enseigne que les densités de courant habituellement nécessaires peuvent être évaluées comme ci-dessous : 1^{er} colonne du tableau III-2

Dans le tableau, les basses résistivités sont comprises entre 2000 et 3000 $\Omega \cdot \text{cm}$, les très basses résistivités sont inférieures à 2000 $\Omega \cdot \text{cm}$. Soit, S, la surface prévisible et I, le débit probable d'une anode, le nombre N d'anodes à prévoir est :

$$N = Si / I$$

III-7-Durée de service des anodes sacrificielles :

Les caractéristiques des sols varient saisonnièrement. En particulier, leur teneur en eau, leur aération, leur activité biochimique sont sans cesse influencées par les conditions climatiques du moment. Il en résulte que leur résistivité, leur pH, leur potentiel Redox sont susceptibles d'être constants.

Le débit des anodes sera donc variable au cours du temps, en concordance principalement avec la résistivité du sol.

Les anodes sacrificielles présentent donc une propriété autorégulatrice intéressante : Leur débit, donc leur action protectrice étant finalement fonction directe à l'agressivité actuelle du milieu.

Pour évaluer le temps de durée d'une anode, il faut donc, soit considérer son débit mesuré comme constant, ce qui est inexact, soit admettre une valeur moyenne, (on peut, plus exactement connaître le poids de métal dissous, après plusieurs mesures de débit en un an par exemple, mesures dont on fera la moyenne pondérée).

Il a été établi que :

1 ampère-heure dissout : 1.51g de Zinc et 0.67g de magnésium.

Dans la pratique, afin de tenir compte de la corrosion propre de l'anode, il est sage de majorer ces chiffres et d'admettre par ampère-heure une consommation de :

2 g pour les anodes en Zinc.

1 g pour les anodes en magnésium

.On a alors : [19]

Anodes de Zinc	Anodes de Magnésium
En un an (8760 heures) un débit moyen de 1 ampère dissout :	En un an (8760 heures) un débit moyen de 1 ampère dissout :
$P_z = 2.10^{-3} \times 8760 \times I$	$P_m = 1.10^{-3} \times 8760 \times I$
$= 17,52 \times I \text{ kg}$	$= 8,76 \times I \text{ kg}$
Si le poids de l'anode est P (kg) le nombre d'années de service sera :	
$T = \frac{P}{17,52 I}$	$T = \frac{P}{8,76 I}$
$T = 0,057 \frac{P}{I}$	$T = 0,114 \frac{P}{I}$

III-8-Technique de pose des anodes :

a) Préparation des têtes d'anodes :

Avant d'installer les anodes aux points prévus du réseau à protéger, il y a lieu de relier à celles-ci le câble de liaison à la conduite et d'assurer l'isolement de la connexion.

Ce travail peut être effectué sur chantier, mais il est préférable de l'exécuter avant, en atelier : le temps de pose s'en trouve réduit et la qualité du travail, plus facilement exécuté, est meilleure.

Les diverses opérations comprennent :

-l'exécution d'un méplat sur l'âme et son perçage transversal permettant d'y appliquer et d'y visser une forte cosse, sur laquelle est soudée, préalablement, l'extrémité du câble.

-l'isolement de cette connexion est indispensable, elle évite le contact intempestif de cette surface avec le sol et prévient ainsi la baisse de rendement qui en résulterait.

b) Pose des anodes :

Nous seulement les anodes doivent être posées dans des sols de basse résistivité. La technique de pose des anodes qu'elles soient en zinc ou en magnésium, est la même. Elles doivent être posées à une distance de 2 à 4 m de la canalisation, verticalement de préférence, leur tête étant sensiblement au niveau du diamètre horizontal de celle-ci.

Les terrassements nécessaires comprennent donc une fouille d'environ 1 m de profondeur et de section suffisante pour que le travail du terrassier soit possible. Au fond de cette fouille, on ménage à la bêche, le logement de l'anode : 0,50 m à 0,80 m de profondeur, suivant le poids de l'anode et 0,40 m de diamètre environ.

L'anode est placée dans ce logement et doit être entourée d'une bouillie épaisse constituant un mélange (backfill) excitateur dont le but est de la maintenir dans un milieu assurant sa corrosion uniforme et un rendement optimum.

Le conducteur reliant l'anode à la conduite doit être bien isolé et protégé mécaniquement ; il est placé dans une fouille en rigole d'au moins 70 cm de profondeur, sa section doit être de 5 mm² environ de cuivre.

La connexion sur la conduite est faite, soit à l'aide d'une petite équerre d'acier soudée sur la conduite, sur laquelle se visse la cosse terminale du câble d'anode, soit par simple soudure du câble sur la conduite par un procédé aluminothermique actuellement fort répandu (Caldwell, par exemple). Le câble étant dénudé sur 5 cm environ, il est maintenu sur la génératrice supérieure de la conduite préalablement mise à nu et bien nettoyée, à l'aide d'un petit creuset en graphite, rempli d'une poudre spéciale que l'on enflamme. Dans le cas où

plusieurs anodes sont prévues, la technique de pose est la même que s'il s'agit d'une seule anode. On les dispose en série en veillant à les espacer, les unes des autres, d'au moins 3 à 4 mètres.



Figure .III-6- Pose d'une anode prébackfillée

III-9-Bornes de contrôle :

Afin de faciliter la mesure des débits d'anodes et des potentiels, on installe souvent des bornes de contrôle sur le trajet des canalisations. Ces bornes sont constituées par des tubes en acier munis d'un socle et obturés à leur partie supérieure par un capot avec cadenas. La liaison électrique conduite-anode est reliée, dans la borne, à un plot portant une barrette mobile. On peut alors (barrette en place) mesurer le potentiel de la conduite, protection cathodique en fonctionnement ou bien (barrette enlevée) mesurer :

- ✓ le potentiel de l'anode.
- ✓ le potentiel de la conduite hors protection cathodique.
- ✓ le débit conduite-anode.

Lorsque ces bornes sont disposées en des points qui ne comportent pas l'anode, elles constituent des prises de potentiels.

Elles ne sont donc reliées à la conduite que par un conducteur unique. Les prises de potentiel peuvent donc être utilisées quel que soit le type de protection cathodique en usage. Les bornes sont toujours préférables aux bouches à clé, qui finissent toujours par disparaître dans les herbes ou sous les revêtements de chaussées [19].

III-10 -Exemple de calcul de la protection cathodique :

Le calcul de la protection cathodique par anodes sacrificielles pour des structures en palplanches ou pieux est défini à partir de la recommandation ONU RPB 401 de 1993 et des paramètres suivants :

- La durée de vie des anodes (15 ans actuellement, mais qui peut se limiter à 10 ans en fonction du contexte économique).
- Les caractéristiques des paramètres des eaux (salinité, pH, résistivité),
- Les densités de courant à prendre en compte en fonction des zones (marnante, immergée et en-fiche), à titre indicatif pour des structures non revêtues ou prendre 90 mA/m^2 pour les zones marnantes et immergées et 20 mA/m^2 pour les zones en fiche. Ces valeurs passent respectivement à 30 mA/m^2 et 10 mA/m^2 si la structure est revêtue (Baltoflake),

La capacité en courant des anodes en fonction du choix de l'alliage (au environ de 2500 Ah/kg et 750 Ah/kg respectivement pour un alliage à base d'aluminium et de zinc). Ce premier jeu de paramètres permet de définir la masse d'alliage à répartir sur l'ouvrage afin d'obtenir le potentiel moyen de -950 mV avec un seuil minimum de -900 mV . La détermination géométrique et dimensionnelle de l'anode ainsi que la nature de l'alliage conduisant à la masse anodique unitaire à répartir sur la structure afin d'uniformiser le potentiel en début et fin de vie avec une consommation de la masse anodique maximale fixée à (90.%) [5].

III-11- Contrôle des anodes :

Les anodes proposées par l'Entrepreneur sont associées à des spécificités électrochimiques qui sont liées à la composition de l'alliage. Il est donc indispensable que des essais de contrôle soient effectués dans le cadre de l'acceptation des fournitures. Ces essais consistent sur la base de recommandation du «D et Works Veritas RP 401 Cathodic Protection Design » et « NACE Standard Recommended Practice RP 0387-90 » à vérifier :

- La capacité électrochimique (en Ah/kg), par analyses,
- La composition chimique déterminée sur des éprouvettes issues, par analyses
- Les dimensions et poids des anodes (fissuration, flèche,...),
- La qualité interne par sciage.

La capacité électrochimique est déterminée sur des éprouvettes issues de chaque coulée qui sont baignées dans une solution à 20°C et reliées à un système de mesure de

l'intensité ; il est effectué sur 96 heures .La composition chimique est déterminée par mesure d'étincelage qui fournit les différents pourcentages de chacun des composants de l'alliage.

Les dimensions et le poids des anodes sont contrôlés par sondage ; l'aspect fait l'objet d'une inspection visuelle et la qualité interne est vérifiée par des sciages à 25 %, 33 % et 50 % de la longueur de l'anode à raison d'une anode pour 10 t.

III-12 -Mise en œuvre des anodes sacrificielles

Le principe consiste en la pose d'un élément métallique (exemple le Havre :anode aluminium) afin d'abaisser le potentiel des ouvrages :

- 1 /Un plongeur doit nettoyer la surface du pieux,
- 2 /Il vient souder la fixation du bas,
- 3 /On descend l'anode .Il suffit de faire coulisser l'embout dans la fixation.
- 4 /On soude la fixation du haut.
- 5 /Les anodes sont entretenues tous les 10 à 20 ans selon leur exposition [5].

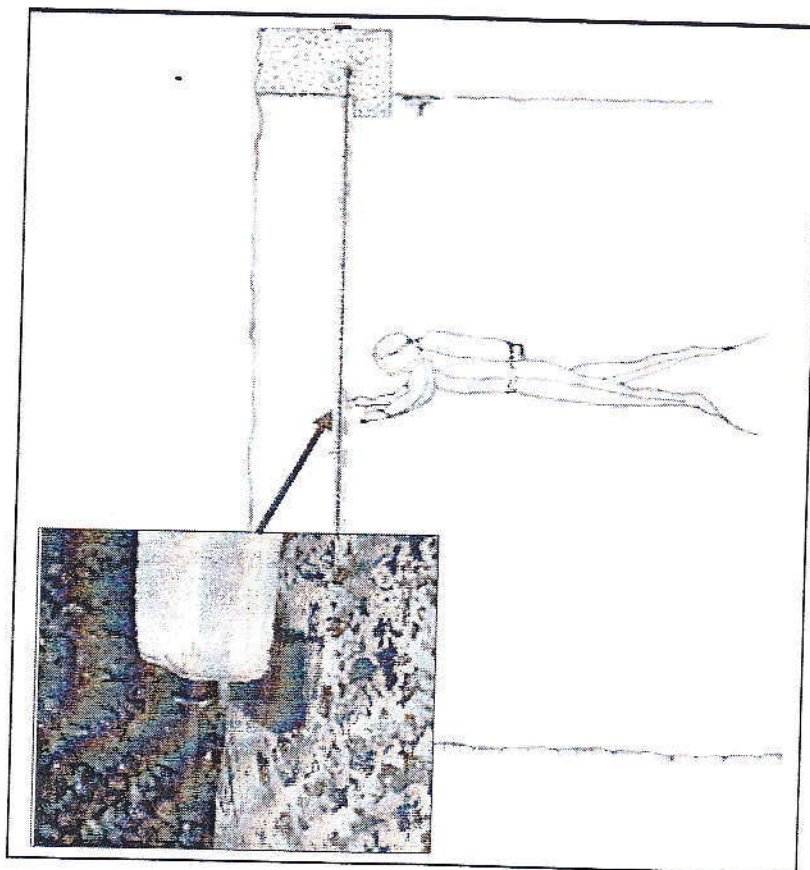


Figure III-7- Fixation des anodes

III-13-Exemples de réalisations de protection cathodique par anodes sacrificielles :

Nous indiquons ci-après quelques exemples d'utilisation des anodes sacrificielles pour la protection de structures. Ils évaluent que cette liste n'est pas complète et que de nouvelles applications apparaissent quotidiennement.

Parmi les applications classiques ; nous citerons :

- les ouvrages immergés, tels que les plates-formes de forage ou de production, les sea-lines.
- certaines capacités enterrées, par exemple les cuves d'hydrocarbures des stations-service, les citernes à fioul domestique, etc.
- les conduites dont la nature du revêtement est compatible avec ce moyen de protection ;
- le complément à d'autres dispositifs de protection (sur circuit de mise à la terre de vannes, à l'intérieur de l'espace annulaire entre tube et gaine, etc.)
- la protection externe ou interne de réservoirs, métalliques de stockage (pour assurer la protection interne il est nécessaire que les anodes soient immergées dans un milieu conducteur homogène) [6].

Chapitre IV
Contrôle des installations
de protection cathodique

IV-1-Généralité :

Pour entamer la phase calcul dimensionnement il est nécessaire d'avoir un certain nombre de données de calcul à savoir [9].

IV-1-1- La résistance moyenne d'isolement :

Dans le cas d'un réseau de distribution, la valeur d'isolement moyenne approchée peut être calculée à partir de la formule :

$$R = \frac{\Delta U}{I} \times S$$

R : en $\Omega.m^2$ (valeur d'isolement moyenne approchée),

I : en A (intensité débitée au cours de l'essai),

S : en m^2 (surface de l'ouvrage à protéger),

ΔU : en V (moyenne des gains de potentiel déterminée en calculant la différence entre le potentiel de l'ouvrage à courant établi, valeur relevée lors de l'essai décrit au 1.1, et le potentiel spontané de l'ouvrage avant l'essai.

Cette valeur calculée n'est qu'un indicateur du niveau d'isolement moyen d'un ouvrage.

Ainsi, par exemple, pour un revêtement C, une valeur de 50000 $\Omega.m^2$ est signe d'un ouvrage bien isolé, alors qu'une valeur inférieure à 5000 $\Omega.m^2$ est signe d'un ouvrage mal isolé.

Avec des revêtements de type polyéthylène, les valeurs d'isolement sont bien supérieures et peuvent atteindre 1 million ohms m^2 . Pour ce type de revêtement, 50000 ohms m^2 est signe d'un ouvrage mal isolé.

Dans le cas de faibles valeurs d'isolement, on procède à une recherche de défauts permettant de déceler :

- l'existence de contacts avec d'autres ouvrages,
- les raccords isolants manquants ou défectueux,
- les détériorations de revêtement.

➤ Estimation :

En absence d'élément relevé sur le site d'essai, des valeurs d'isolement sont données dans le tableau IV-1 suivant :

Les conditions de pose difficiles, la présence de sol très rocheux ou de terrain imbibé d'eau peuvent abaisser les limites fixées dans ce tableau [23]:

Tableau IV-1 Les valeurs de résistance d'isolement par rapport les différents types de revêtement

Type de conduite	Résistance d'isolement ($\Omega.m^2$)
Réseau de canalisation à revêtement très dégradé	500 à 1000
Réseau maillé avec revêtement type C	5000 à 15000
Conduite d'acier avec revêtement type C	5000 à 10000
Conduite en acier enterrée revêtue en bande PE	104 à plus de 105
Conduite en acier enterrée revêtue en PE extrudé	105 à plus de 106

La figure IV-1 suivant permet de tirer les longueurs à protéger à des valeurs différentes de la résistance d'isolement. [3]

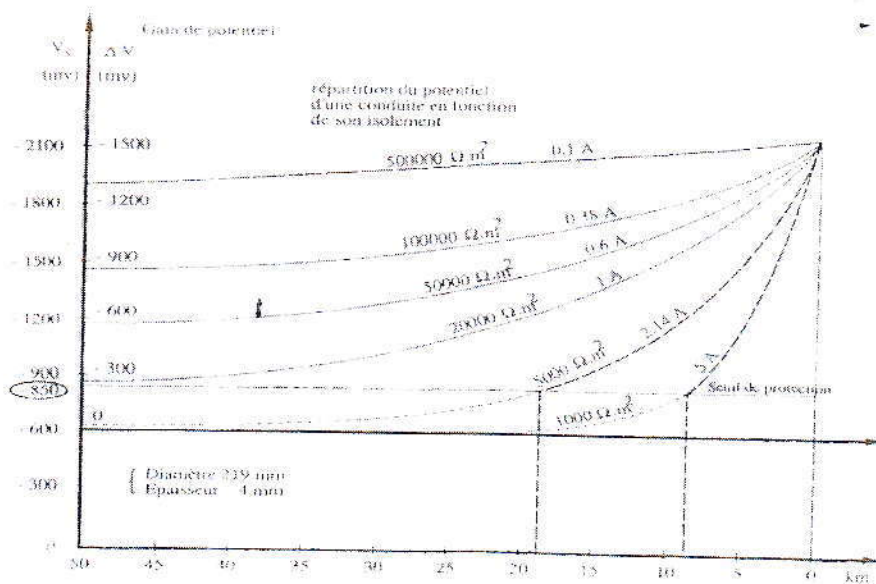


Figure : IV- 1- Répartition du potentiel d'une conduite en fonction de son isolement

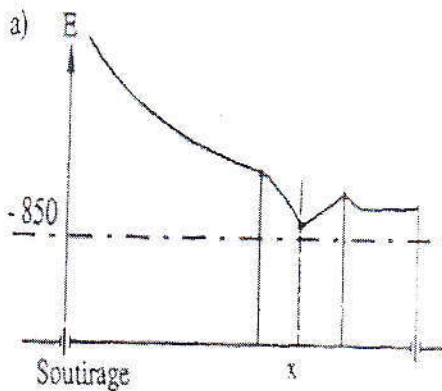
IV-1-2-Le potentiel :

IV-1-2-1-Représentation graphique du potentiel d'une conduite :

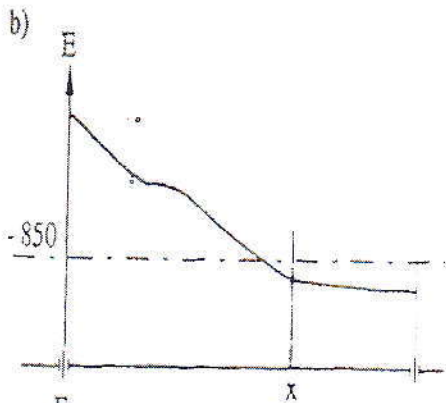
La figure IV-1 représente les courbes des relevés de potentiels d'une conduite de 80km protégée soit par un soutirage, soit par deux.

L'isolement global de cette conduite est correct.

Sur les courbes réelles certaines situations, qui peuvent s'expliquer mathématiquement peuvent conduire à des profils de potentiels tels que visualisés ci-dessous [3].

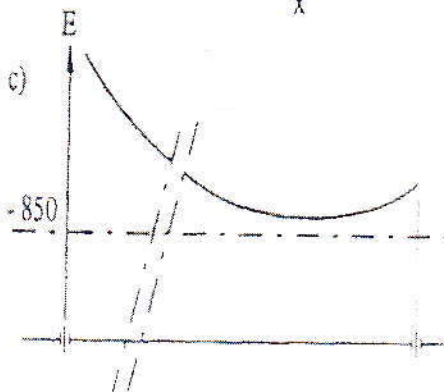


Au point x le potentiel de la conduite peut être plus faible que celui qui est mesuré aux points encadrants.



La raison peut en être une résistance du sol localement très forte, ou la présence d'une petite mise à la terre.

Au point x existe une mise à la terre importante ; le potentiel de protection n'est plus atteint sur le reste de la conduite



En bout d'une conduite en antenne on constate souvent une remontée du potentiel de l'ouvrage.

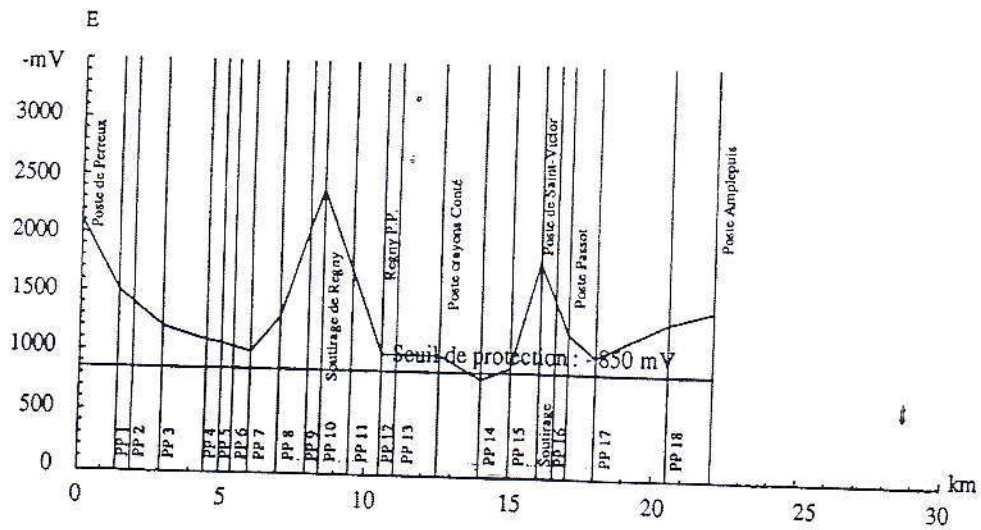
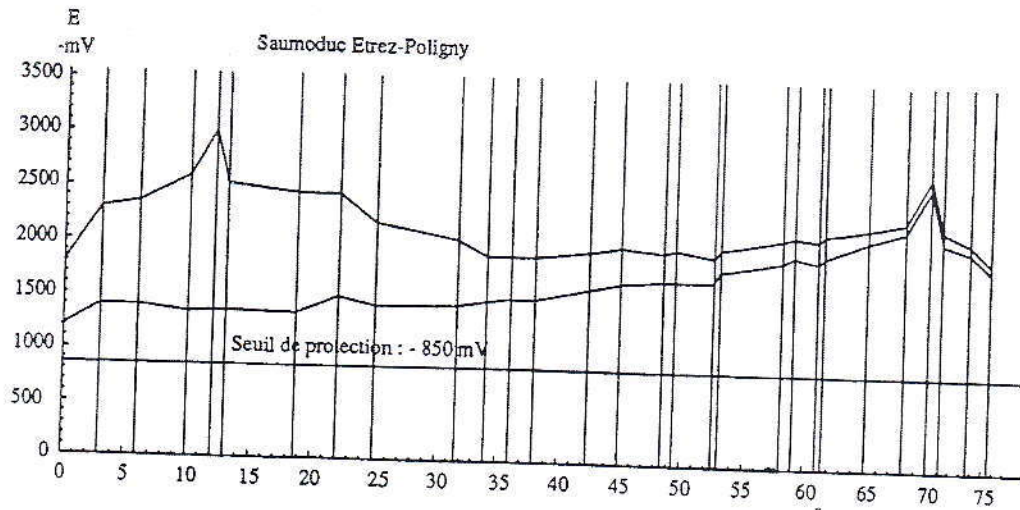


Figure IV-2 Les courbes des relevés de potentiels

IV-1-2-2- Mesures et contrôles :

IV-1-2-2-1- Points de mesure :

Ils sont destinés à contrôler le potentiel d'une canalisation par rapport au sol. Le nombre de points de mesure dépend de la configuration de l'ouvrage.

IV-1-2-2-2- Mesure de potentiel :

La mesure du potentiel des canalisations dans le sol est indispensable pour contrôler l'efficacité de la protection cathodique. Or, celles-ci étant assimilables à des éprouvettes plongées dans un électrolyte, on mesure le potentiel par l'intermédiaire d'électrodes de référence. La conduite dans le sol constitue une demi-pile que l'on associe à l'autre demi-pile, l'électrode.

Les électrodes utilisées sont :

- électrode au calomel (laboratoire),
- électrode au sulfate de cuivre Cu/CuSO_4 (couramment utilisée),
- électrode au chlorure d'argent Ag/AgCl (eau de mer),
- électrode au zinc (eau de mer). [24]

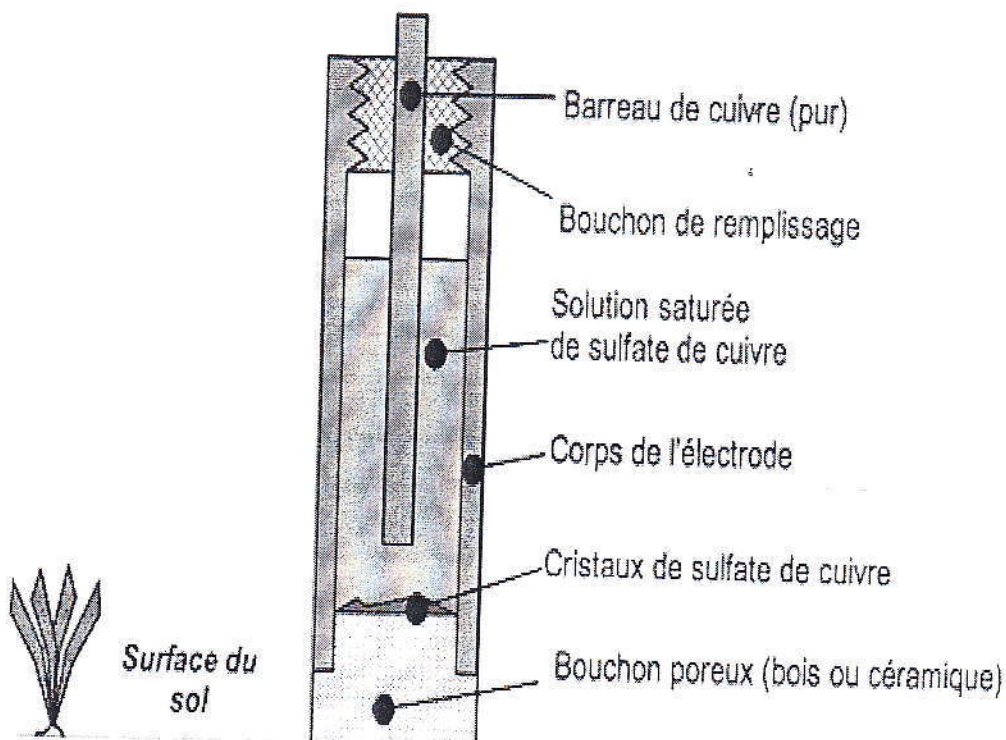


Figure IV-3- Electrode cuivre/sulfate

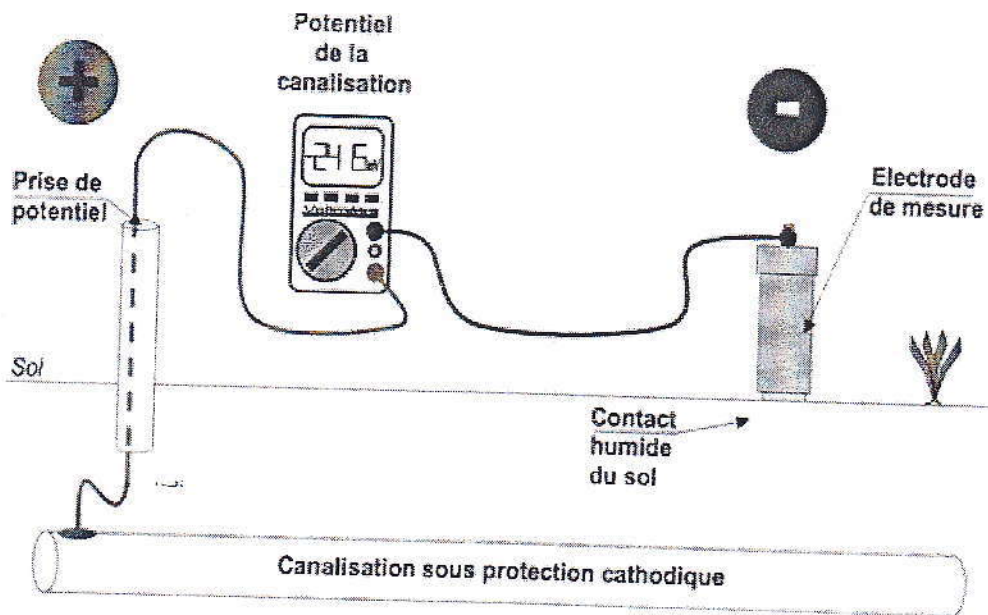


Figure IV-4- Mesure simple du potentiel

IV-1-2-2-3-Détection des défauts :

La détection de défauts de revêtement de canalisation est utilisée sur des canalisations enterrées afin de localiser les défauts du revêtement[24] .



Figure IV-5- Détection des défauts

IV-1-2-2-4- La théorie :

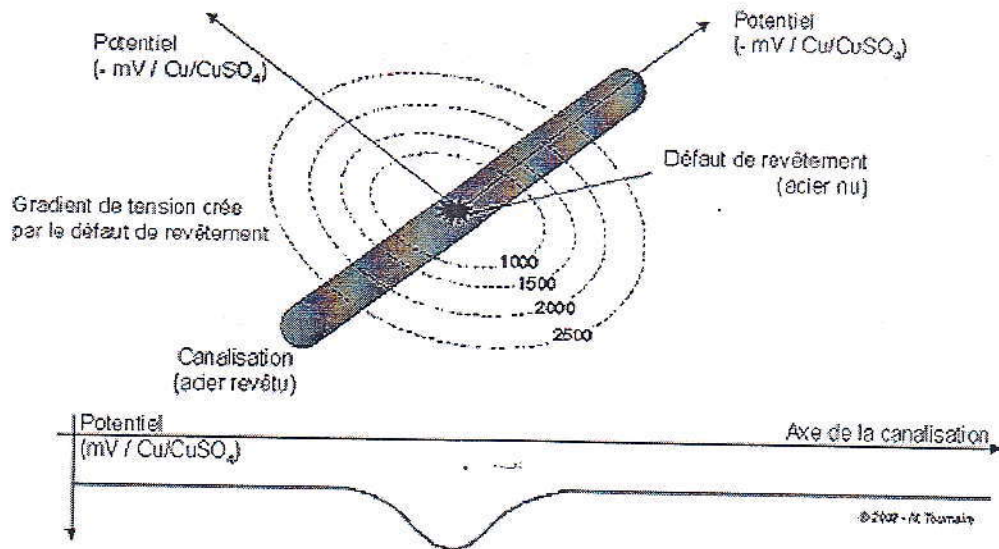


Figure IV-6- Méthode de recherche des défauts

Cette méthode de recherche des défauts de revêtement de canalisation repose sur la mesure du gradient de tension créé par un défaut de revêtement (métal apparent).

La mise sous tension de la canalisation se fait à partir du système de protection cathodique existant sur la canalisation, ou bien à l'aide d'une injection provisoire.

- Cette méthode ne s'applique qu'aux canalisations électriquement continues (canalisations en fonte exclues).

IV-1-2-2-5-Le matériel :

- Emetteur : il permet la mise sous et hors tension de la canalisation (fréquence 1 Hz).
- Cannes-électrodes : elles permettent de mesurer les gradients de tension créés par les défauts de revêtement.
- Récepteur : Il est constitué par un voltmètre analogique à zéro central [24] .

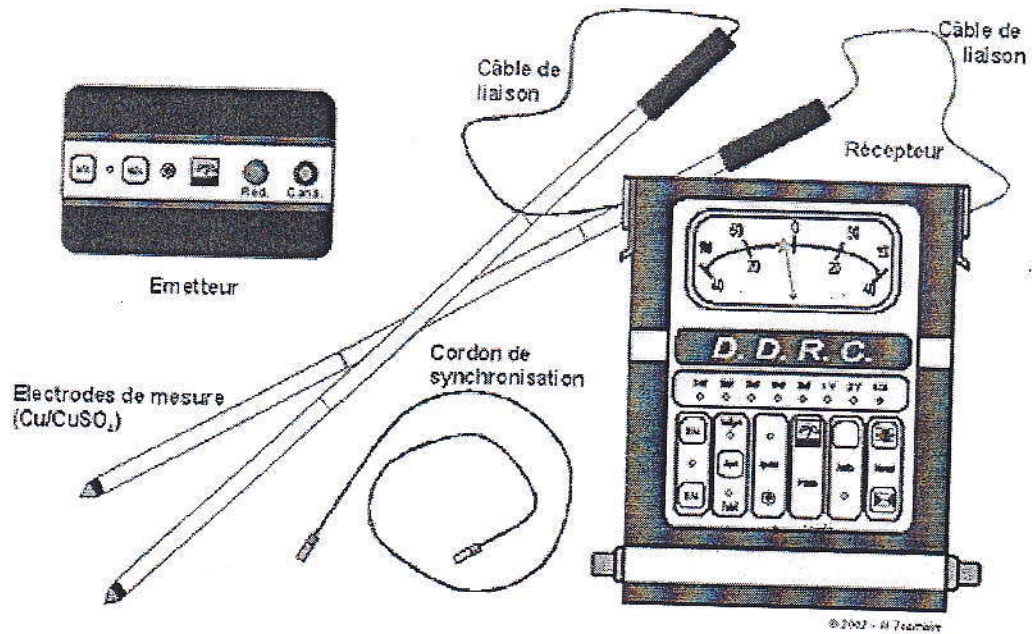


Figure IV-7- Le matériel de la méthode.

IV-1-3-La résistivité électrique du sol :

L'objet de cette planche est de déterminer les risques de corrosion dans le sol à partir d'une évaluation de l'agressivité du terrain.

L'agressivité d'un sol dépend en particulier, des paramètres ci-après :

- nature chimique :
- teneur en Cl > 300 mg / Kg de terre L'objet,
- teneur en SO_4 > 500 mg / Kg de terre,
- taux d'humidité du sol,
- pH,
- aération du sol (compact ou poreux),
- bactéries,
- granulométrie.

Parmi l'ensemble des critères généralement reconnus pour apprécier l'agressivité d'un sol, la mesure de la résistivité électrique est l'un des plus fréquemment utilisé car représentative de la plupart des paramètres énumérés ci dessus.

Celle ci permet de déterminer seulement le risque de certaines corrosions, telle que corrosion par aération différentielle ou par formation de piles géologiques sur tout ouvrage en acier enterré.

Par contre, elle ne permet pas de détecter les risques de corrosion bactérienne car, dans des terrains marécageux ou argileux (faible résistivité, $5,5 < \text{pH} < 8,5$ et $30^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C}$ et milieu anaérobie) se rencontrent en général les bactéries sulfatoréductrices.

En plus de la mesure de la résistivité, une analyse chimique doit être effectuée en déterminant le pH et la présence de sulfate dans le sol et d'autres produits qui provoquent la corrosion.

IV-1-3-1- Relation avec l'agressivité :

L'agressivité des sols, évaluée en fonction de la résistivité, est d'autant plus forte que la résistivité est plus faible. On admet généralement pour l'acier les valeurs de résistivité mentionnées dans le tableau ci dessous :

Tableau IV-2 Fonctionnement de l'agressivité par la variation des valeurs de la résistivité

Résistivité du sol en Ohm.m	Agressivité
$\rho > 100$	Très faible
$50 < \rho < 100$	Faible
$20 < \rho < 50$	Moyenne
$5 < \rho < 20$	Elevée
$\rho < 5$	Très élevée

IV-1-3-2- Mesure de résistivité de sol:

Les mesures de résistivité sont généralement effectuées avant la pose de l'ouvrage, à l'occasion de la reconnaissance du tracé d'une canalisation pour les études de protection cathodique, c'est ce que l'on appelle la prospection géologique des sols.

Il existe plusieurs méthodes de mesures de la résistivité du sol qui sont :

- ✓ méthode de Canne Scheppard,
- ✓ méthode des deux terres,
- ✓ méthode des quatre terres (Dr Wenner) [25].

A- Méthode des deux terres :

Elle est relativement précise, elle explore le sol à une profondeur ≈ 2.5 m. On use de deux barres à mines semblables, disposées à 10m environ l'une de l'autre. Elles ont un diamètre de 22 mm et foncées à l'aide d'une bouterolle amovible.

On mesure à l'ohmmètre (méthode de Kohlrausch) la résistance équivalente du circuit et on peut calculer aisément la résistivité moyenne sur une couche de terrain de 2 à 3 m de profondeur.

$$\rho = (\pi RL) / \log\left(\frac{2L}{a}\right)$$

ρ : résistivité du sol en ohm-mètre

L : longueur de chaque électrode dans le sol (m)

a : rayon de chaque électrode dans le sol (m)

R : résistance de terre des 2 électrodes (Ω). [13]

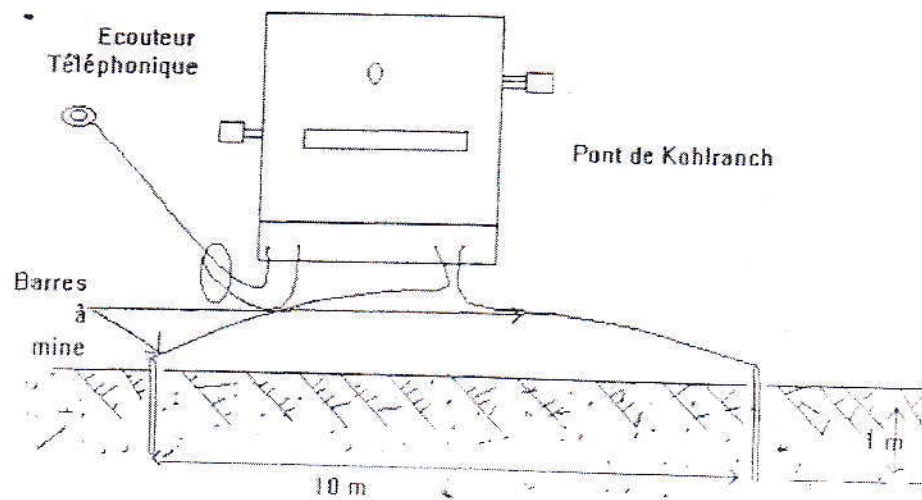


Figure IV-8- Méthode des deux terres

B- Méthode des quatre terres (Dr Wenner) :

Cette dernière méthode utilisée par la Sonelgaz, consiste à enfoncer dans le sol en ligne droite et équidistantes d'une distance "a", quatre électrodes métalliques (piquets).

Les piquets extrêmes (A et B) sont alimentés à l'aide d'un générateur de courant. On mesure l'intensité et la différence de potentiel entre les piquets intermédiaires (M et N) (voir figure IV-3 ci-dessous)

Cette mesure peut être effectuée par un géohmètre qui donne directement la valeur de la résistance de terre

La résistivité du sol sondé est donnée par la formule simplifiée suivante :

$$\rho = \frac{2\pi a V}{I} = 2\pi a R$$

Avec :

ρ : en ohm-mètre,

V : différence de potentiel en volts entre les piquets N et M,

I : intensité de courant en Ampères,

a : distance entre les piquets en mètres = 1 ou 1,6 mètre,

R : résistance du sol.

➤ **Principe de mesure de la résistivité :**

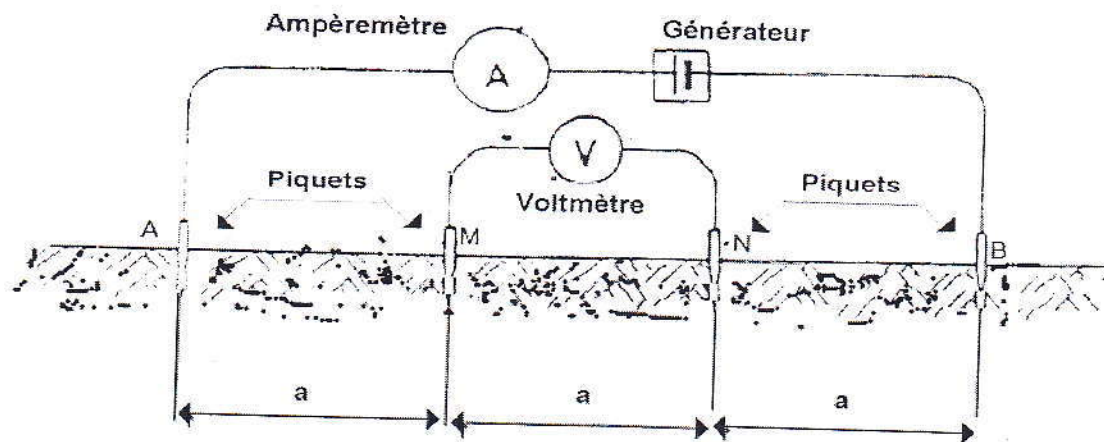


Figure IV-9- Méthode de quatre terres.

Cette méthode permet de mesurer la résistivité du sol à différentes profondeurs en faisant varier l'écartement des électrodes (l'écartement entre les piquets a : profondeur englobée par la mesure de résistivité ρ). De ce fait, elle est très utile pour la détermination des points d'implantation des déversoirs et le cheminement de la canalisation.

- **Description des piquets :**

Les piquets sont des tiges en acier de diamètre 12 mm et d'une longueur de 40 cm environ. Pour que la mesure soit faite dans de bonnes conditions, il suffit d'enfoncer les piquets d'une dizaine de centimètres ($< a/5$) et de veiller tout particulièrement au bon contact avec le sol des deux piquets extrêmes [25].

IV-1-4-Régulateur de corrosion (Backfill) :

Généralement ces anodes sont livrées dans un sac de jute contenant le régulateur (Backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau, avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement. Ce régulateur permet une consommation régulière de l'anode et réduit la résistance de contact anode / sol.

Pour une anode de 20 Kg il faut :

- 50 Kg de bentonite,
- 12,5 Kg de gypse (sulfate de calcium),
- une grande quantité d'eau [26].

IV-1-5- La résistance longitudinale de la conduite :

C'est une résistance longitudinale ohmique d'un mètre de conduite.

$$r = \frac{\rho_a}{\pi D_{ext} e}$$

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega.m^{-1}$,

ρ_a : résistivité de l'acier qui varie entre 17 et $24 \cdot 10^{-8} \Omega.m$,

e : épaisseur du tube en m,

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

IV-1-6- La résistance transversale de la conduite :

C'est la résistance transversale d'isolement donnée par le revêtement de la conduite pour 1 mètre de conduite.

$$R = \frac{R_{is}}{\pi D_{ext}}$$

R : résistance transversale de la conduite en $\Omega.m$

R_{is} : résistance d'isolement en $\Omega.m^2$,

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite en mètre [23].

IV-2-Etude mathématique :

On peut, à partir de la courbe réelle des potentiels relevés, essayer de déterminer le facteur d'atténuation (a) et en déduire la valeur de R , résistance d'isolement.

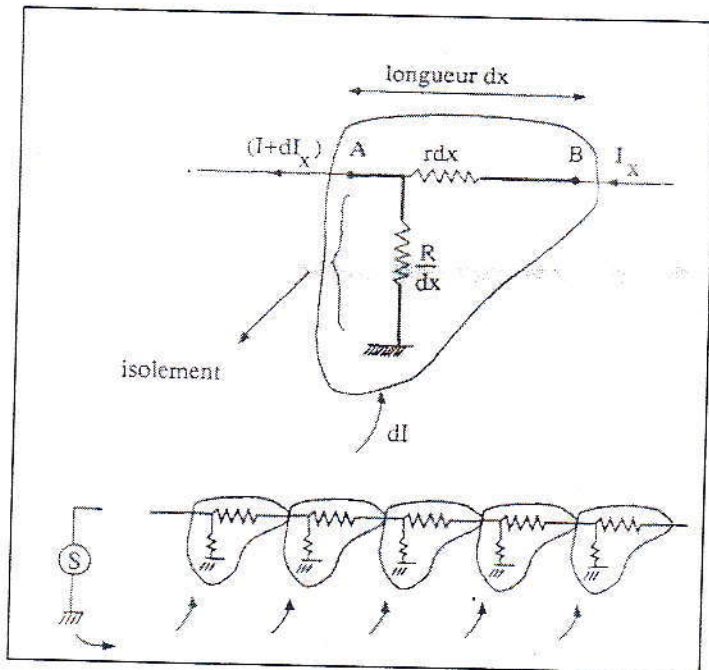
Il est à noter que les formules de protection cathodique appliquées à une conduite infinie (c'est-à-dire de longueur telle que le gain de potentiel à l'infini est nul) et transcrites en coordonnées semi-logarithmiques, montrent que la pente de la droite représentative du gain de potentiel est proportionnelle au facteur d'atténuation (a).

L'intensité du courant de protection I_s 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.

Supposons une conduite de longueur l et de caractéristiques r et R .

Chaque élément AB de longueur dx de conduite, situé à la distance x du point de soutirage et représenté par le schéma ci-contre [3].

Cet élément subit une entrée de courant transversal :



Cet élément subit une entrée de courant transversal $dI = \frac{E}{R}$

La chute de potentiel dans l'élément AB

$$dE = r dx \times I$$

La résolution de ce système d'équations différentielles conduit, aux limites que l'on s'impose, à diverses expressions du courant et du potentiel en un point x de la conduite.

Vus du point de soutirage tous les éléments de conduite sont en parallèle

IV-2-1-Calcul du coefficient d'atténuation :

C'est le rapport entre la résistance longitudinale et la résistance transversale.

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

α : Coefficient d'atténuation en m^{-1} .

r : Résistance longitudinale de la conduite en $\Omega.m^{-1}$.

R : Résistance transversale de la conduite en $\Omega.m$.

Ce coefficient varie de 1 à 20×10^{-5} , il est inversement proportionnel à la valeur d'isolement, plus la valeur d'isolement est importante plus le α est faible et plus la portée de la protection est importante [23].

IV-2-2-Résistance caractéristique :

Représente la résistance de terre d'une conduite de longueur infinie.

γ s'exprime en Ω , et varie d'une fraction à quelques centaines d'Ohm [3].

$$\gamma = \sqrt{rR}$$

Avec :

γ : Résistance caractéristique en Ω

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega.m^{-1}$.

R : résistance transversale de la conduite en $\Omega.m$.

IV-2-3-La densité de courant de protection i en (mA / m^2) est :

On appelle densité de courant le rapport de la quantité de courant reçue par un témoin donné par la surface de ce témoin [27].

$$i = \frac{I}{S}$$

Avec :

i : Densité de courant en mA / m^2

I : Quantité de courant en mA

S : Surface de témoin en m^2

D'autre part :

$$i = \frac{E_{rep} - E_{prot}}{R_{is}}$$

Avec :

E_{rep} : potentiel naturel de l'acier = $- 0.4 V / (Cu/CuSO_4)$.

E_{prot} : potentiel seuil de la conduite en protection = $- 1 V$.

R_{is} : résistance d'isolément en $\Omega.m^2$ de l'ouvrage considéré [23].

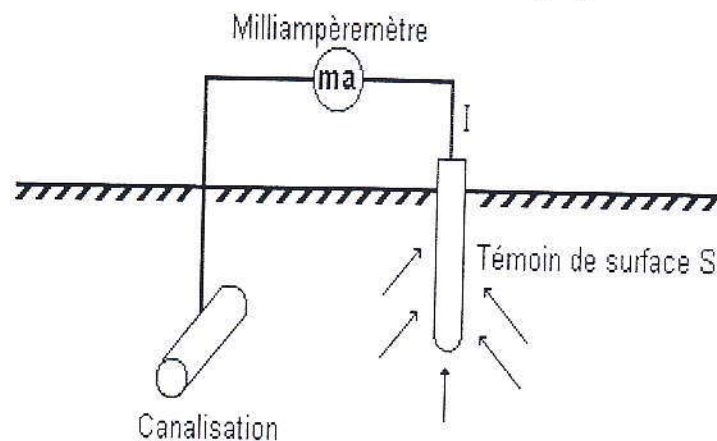


Figure IV-10- Principe de mesure

Le principe de la méthode est simple, mais la valeur de la densité de courant ainsi mesurée est fonction de :

- la forme géométrique du témoin métallique,
- de la surface du témoin métallique,
- du temps d'application de courant,
- du métal qui constitue le témoin.

Les résultats d'expériences donnent pour l'acier les densités de courant suivantes qui assurent l'immunité du métal :

- (0,7 mA / m²) : pour l'acier nu dans le ciment,
- (5 mA / m²) : pour l'acier nu dans un sol anaérobie sans bactérie,
- (35 mA / m²) : pour l'acier nu dans un sol aéré,
- (60 mA / m²) : pour l'acier nu dans l'eau douce agitée,
- (100 mA / m²) : pour l'acier nu dans l'eau de mer calme,
- (400 mA / m²) : pour l'acier nu au milieu anaérobie avec bactéries sulfato-réductrices.

Ces valeurs sont des moyennes et doivent toujours être ajustées en fonction des caractéristiques réelles des sols rencontrés [27].

IV-2-4-L'intensité de courant de protection :

La mesure du courant circulant dans la conduite peut être faite au niveau du poste de soutirage ou de l'anode galvanique assurant la protection. Mais on peut, si l'équipement en raccords isolants a été prévu, tronçonner électriquement des conduites ou des réseaux, et mesurer les débits dans chacune des parties ainsi séparées [3].

Elle est fonction du métal à protéger et de l'état de son enrobage c'est-à-dire, de sa résistance d'isolement R_{is} [9].

$$I_x = iS = i\pi D_{ext} L$$

I_x : Courant de protection du tronçon, calculé pour chaque diamètre en Ampère,

i : Densité de courant en mA/m².

S : Surface à protégée en m².

D_{ext} : Diamètre extérieure du tube en m.

L : Longueur du tube en m [23].

$$I_x = \frac{E_0}{\gamma} sh(ax) + I_0 ch(ax)$$

I_x : Courant de protection.

E_0, I_0 : Chute de potentiel et intensité connus, au point 0 pris comme origine.

γ : Résistance caractéristique en Ω

α : Coefficient d'atténuation en m⁻¹.

x : distance du point de soutirage [3].

IV-2-5-Résistance de terre d'une anode :

C'est la résistance de terre d'un cylindre posé verticalement dans le sol :

La formule de PETERS répond à la question :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \log_e \frac{4L}{D}$$

Avec :

R : Résistance de terre en Ω

ρ : Résistivité du milieu en $\Omega \cdot \text{cm}$

L : Longueur du cylindre en cm

D : Diamètre du cylindre en cm

Cette formule peut être écrite ainsi : [19]

$$R = \frac{0,366}{L} \log_{10} \frac{4L}{D}$$

IV-2-6- Calcul de la résistance d'anode :

$$R_A = \frac{\rho_s}{2\pi L} \text{Ln} \frac{2L}{2d} \Rightarrow R_A = 0,366 \frac{\rho_s}{L} \log \frac{2L}{d}$$

R_A : Résistance d'anode en Ω .

ρ_s : Résistivité du sol en $\Omega \cdot \text{m}$.

L : Longueur de l'anode en mètre,

Ln : Logarithme népérien,

d : Diamètre de l'anode en mètre,

\log : Logarithme décimal [23].

IV-2-7- Détermination du courant débité par l'anode :

Sachant que

$$U = I_A \times R_A$$

$$I_A = \frac{U}{R_A} = \frac{U_s - U_A}{R_A}$$

U_s : Potentiel seuil de protection = (-0,85 à) (-1V) (mesurer par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄).

U_A : Potentiel naturel de l'anode = (-1,55V) pour le Mg et (-1,1V) pour le Zn.

I_A : Débit de l'anode en Ampère.

R_A : Résistance de l'anode en Ω .

IV-2-8- Détermination du nombre d'anode pour un tronçon :

$$N = \frac{I_x}{I_A}$$

N : Nombre d'anodes pour protéger le réseau,

I_x : Courant de protection du tronçon de diamètre D en Ampère,

I_A : Débit d'anode en Ampère [23].

IV-2-9- Calcul de la longueur qui sera protégée par chaque anode :

Calcul de la surface externe A_{ext} par mètre linéaire.

$$A_{ext} = \pi D_{ext} \text{ en m}^2/\text{m} \quad (L = 1 \text{ mètre})$$

La longueur protégée par une seule anode est :

$$L_A = \frac{I_A}{i A_{ext}}$$

I_A : Débit d'une anode.

i : Densité de courant.

A_{ext} : Surface calculé pour chaque diamètre de conduite en m [23].

IV-2-10- Calcul de la résistance totale :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = \frac{0.366 \cdot \rho_s}{L} \cdot [\text{Log}(3L/2d) + \text{Log}(3L/8h)]$$

$$R_2 = \frac{\rho_a \cdot L_i}{\pi \cdot D \cdot e}$$

$$R_3 = \rho(Y/S)$$

Avec :

R_1 : Résistance d'anode en Ω

R_2 : Résistance de la conduite/sol en Ω

R_3 : Résistance des câbles en Ω

ρ_a : Résistivité des anodes en $\Omega \cdot \text{m}$

d : Diamètre de l'anode en m.

Y : Distance entre la conduite et le déversoir en m

h : Profondeur de pose de la masse anodique en m.

L_i : Longueur totale de la conduite en m [10].

IV-2-11-Comparaison entre les trois techniques de protection cathodique:

Le tableau suivant représente le résumé des différents contrôles et mesures à effectuer sur les installations de protection cathodique (conduites, anodes réactives, soutirages du courant, drainage et fourreaux métalliques).

Tableau IV-3-Résumé des différents contrôles [28]

CONTROLES A EFFECTUER	PERIODICITE
CONDUITES	à minima 2 fois par an
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures des potentiels conduite/sol. - Mesures des courants de protection. 	
ANODES REACTIVES	à minima 2 fois par an
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures des potentiels par rapport au sol : <ul style="list-style-type: none"> . de l'anode seule, . de la conduite seule, . de l'anode et de la conduite raccordée. - Mesures du débit de l'anode. 	
SOUTIRAGES DE COURANT	<ul style="list-style-type: none"> une fois par mois à minima 2 fois par an hebdomadaire et après chaque orage hebdomadaire tous les 3 ans
<p style="text-align: center;">Transformateur redresseur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - relevé de la tension, - relevé de l'intensité débitée, - relevé de la consommation d'énergie. - mesures de la tension de sortie, - mesures de l'intensité débitée, - vérification du bon fonctionnement. - vérification des câbles de connexion - contrôle de la valeur de la prise de terre des masses. 	
DRAINAGE	<ul style="list-style-type: none"> tous les quinze jours à minima 2 fois par an hebdomadaire et après chaque orage tous les 3 ans
<ul style="list-style-type: none"> - relevé des indications de l'ampèremètre (mini-maxi pendant un intervalle de temps de 10 mn environ) : - enregistrement du potentiel conduite / sol. - enregistrement de l'intensité drainée. - enregistrement du potentiel rail / sol. - vérification du bon fonctionnement - contrôle de la valeur de la prise de terre des masses. 	
FOURREAUX METALLIQUES	à minima 2 fois par an
<ul style="list-style-type: none"> - mesure de potentiel conduite / sol, - mesure de potentiel fourreau / sol 	

IV-3-Phase calcul :

Calcul le nombre des anodes nécessaires à la protection d'un ouvrage par anodes réactives :

Pour la protection par anodes sacrificielles on donnera un simple exemple de calcul ou appliquera pour la détermination de la résistance d'anode la formule de PETERS.

Le but est de déterminer le nombre d'anodes sacrificielles nécessaire pour la protection d'une surface quelconque.

Exemple n°1 : anode de zinc [9]

- Les anodes sacrificielles considérées sont en zinc de :
 - ✓ Section carrée (6 cm*6 cm) donc $S = 36 \text{ cm}^2$
 - ✓ Diamètre équivalent $D=6,77 \text{ cm}$.
 - ✓ Longueur $L=120 \text{ cm}$.
- Le potentiel de protection recherché est $E_{\text{prot}}=-850 \text{ mV}=-0,85 \text{ V}$ par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO_4
- Le potentiel d'anode $E_a = -1,1 \text{ V}/\text{Cu}/\text{CuSO}_4$.
- La résistivité moyenne du sol est $\rho=25 \text{ } \Omega \cdot \text{m} = 2500 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$
- La densité de courant de protection $i= 1 \text{ mA} / \text{m}^2$.
- La surface à protéger est $S \approx 120 \text{ m}^2$

$$R_a = \frac{2500}{6,28 \cdot 120} \ln \frac{480}{6,77} = 14,13 \Omega$$

Et :

$$\Delta U = E_{\text{prot}} - E_a = -0,85 - (-1,1) = 0,25 \text{ V}$$

L'intensité de courant délivrée par une anode est donnée par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{\Delta U}{R_a} = \frac{0,25}{14,13} = 0,018 \text{ A}$$

Le courant total de protection en (A) est :

$$I_{\text{total}} = i \cdot S = 0,001 \cdot 120 = 0,12 \text{ A}$$

Le nombre d'anodes est alors :

$$N = \frac{I_{\text{total}}}{I} = \frac{0,12}{0,018} = 7 \text{ anodes}$$

Exemple n°2 : anode de l'aluminium à l'indium [6]

➤ Les anodes sacrificielles considérées sont en l'aluminium de :

✓ Section carrée (6 cm*6 cm)

✓ Diamètre équivalent

$$D = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{36}{\pi}} = 6,77 \text{ cm}$$

✓ Longueur L=120 cm

$$R = \frac{2500}{6,28 \cdot 120} \ln \frac{480}{6,77} = 14 \Omega$$

➤ Potentiel des anodes : -1,05 V/Cu-CuSO₄ saturé

$$\Delta U = 1,05 - 0,85 = 0,2 \text{ V}$$

$$I = \frac{0,2}{14} = 0,014 \text{ A}$$

Si la surface à protéger est de 120 m², et que l'on impose une densité de courant de 30 mA /m², il faudra :

$$I_{\text{total}} = i \cdot S = 0,03 \cdot 120 \cong 4 \text{ A}$$

Le nombre des anodes :

$$N = \frac{4}{0,014} = 286 \text{ anodes}$$

Conclusion et Recommandation

Conclusion :

Dans ce travail, nous essayons de déterminer le nombre des anodes sacrificielles de quelques testes.

Les étapes qu'on a suivies sont :

- identification des paramètres et les coefficients électriques et électrochimiques (résistance longitudinale, résistance transversal, coefficient d'atténuation ...) et les différents paramètres qui dépend de l'anode : la résistance, le courant débité,.....etc.
- calcul de l'intensité de courant I_x

En fin on obtenir le nombre d'anodes sacrificielles qui sera utilisé pour protéger les différents conduites.

Recommandations :

- Généralement, les anodes uniquement utilisées, sont les anodes en zinc et magnésium. Ces anodes de forme parallélépipédique ont un poids de 20 Kg pour une longueur de 600 mm pour le zinc, et 300 mm pour le magnésium. Elles sont livrées dans un sac de jute contenant des produits pour réguler la corrosion du métal et diminuer la résistivité du sol autour de l'anode.
- L'anode implantée à une distance d'environ 3 m de la conduite à protéger au niveau de la génératrice inférieure de cette conduite. L'anode est posée horizontalement ou verticalement dans la tranchée. Avant de la remblayer, on remplit celle-ci d'eau, de façon à ce que le milieu entourant l'anode devienne une boue épaisse. On termine le remblaiement.
- Les anodes doivent être posées dans des terrains de faible résistivité électrique, inférieure à 30 $\Omega.m$ pour le zinc et inférieure à 50 $\Omega.m$ pour le magnésium. Le terrain doit être le plus humide possible : aussi, en ville, faudra-t-il veiller à ne pas poser des anodes sous les chaussées, trottoirs recouverts de matériaux étanches en béton ou en bitume, etc.).
- Performances :
Si les anodes sont posées dans les règles de l'art, les débits attendus pour la protection d'ouvrages sont de l'ordre de :
1 à 10 mA avec une anode en zinc.
5 à 20 mA avec une anode en magnésium.
En réalité, le débit délivré par les anodes est fonction de la résistance électrique du circuit, constitué par la résistance de terre de l'anode et celle de la conduite :
- La résistance de terre de l'anode, fonction de ses dimensions, dépend de la résistivité du sol.
- La résistance de terre de la conduite, fonction de ses caractéristiques dimensionnelles (longueur, diamètre), dépend en grande partie de la valeur d'isolement du revêtement. Elle peut varier de quelques ohms pour des réseaux mal isolés à 1000 ohms pour des conduites, de faible longueur, bien isolés.
- Les anodes galvaniques sont par fois utilisées pour des installations du transport de gaz pour assure la protection des conduites enterrées, de faible longueur ou dans certaine station de compression, lorsque les sols se révèlent agressifs. Elles peuvent aussi être installées pour jouer un rôle de mise à la terre électrique d'un ouvrage, et, ainsi, éviter les couples galvaniques acier-cuivre qui peuvent développer lors de l'utilisation de terres en cuivre dans des terrains très conducteurs.
- Dans les domaines autres que gaziers, les anodes galvaniques sont utilisées avec succès sur des structures complexes, compactes ou longilignes, baignant en eau de mer.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Jean Le Hir ; Cours de chimie ; Oxydoréduction ; Phénomène de corrosion ; pages (1,3)
- [2] H.Sakhri ; Mémoire d'ingénieur ; Université d'Ouargla ; 2001; page (2)
- [3] Mn MAREC; Corrosion et protection cathodique; Ecole d'application des techniques gazières; 1996; pages (5, 28, 53, 55, 59,65 et 122).
- [4] Corrosion et protection cathodique (Aspects technico-économiques) ; COD /asptc-08/99 ; page (2)
- [5] Schoefs Franck; Andre Mathieu; Bazin Julien; Fouache Cédric; Payraudeau Hugues; Techniques de prévention des pathologies de corrosion des structures métalliques; Universitaire de Nantes; pages (4, 7, 23 et 24)
- [6] Comité des techniciens ; La protection cathodique (guide pratique) ; Edition technip; Paris; 1986; pages (2, 10, 13, 16, 17, 37, 44, 45 et 48)
- [7] Nguyen; Thuy LE;GIL. Protection cathodique; INERIS DRA-PREV-Version 1,1; Janvier 2008; pages (7, 13, 20 et 23)
- [8] L. ANTROPOV ; Electrochimie théorique ; Edit mir-Moscou ; 1979.
- [9] T. Mazouaou; Protection des ouvrages en acier enterrés; La protection cathodique; Document de sonelgaz; AOUT 2000 ; pages (3, 9, 21 et 26)
- [10] A .Tabchouche; Mémoire d'ingénieur; Université de Ferhat Abbas Sétif; 2001; pages (7, 10, 19, 21 et 59)
- [11] Christian Vargel; Corrosion de l'aluminium; dunod; 2002; pages (177 et 178)
- [12] J. Talbot ; La corrosion des métaux dans la construction ; Edit EYROLLES ; Paris ; 1976.
- [13] B. Bensayah; MED L. Sekirifa; A. Ben menine; Mémoire d'ingénieur; Université de Ouargla; 1996; pages (3, 7 et 23)
- [14] R. Kateb; N. Benmeriem; Mémoire d'ingénieur; université d'Ouargla; 2008;pages (12, 11, 16, 18, 19, 20 et 21)
- [15] - W. Hamrouni; S. Rechache; Mémoire d'ingénieur; Université de Ouargla; 2009; page (5)
- [16] Jean-Louis CROLET; Métaux et alliages passivables; Techniques de l'ingénieur; page (6)
- [17] J. Barallis ; G. Moeder ; Précis de métallurgie ; Elaboration ; Edit AFNOR Nathan ; Paris ; 1993.

- [18] Y. Berger; Chambre syndicale de la recherche et de production du pétrole et du gaz naturel; Comité des techniciens; Corrosion et inhibition des puits et collectes; Edition Technip; Paris; 1981; page (43)
- [19] M. Neveux ; La corrosion des conduites d'eau et de gaz ; Causes et remèdes ; Edit EYROLLES ; 1968 ; pages (364,381à388)
- [20] Protection cathodique ; INDARCO ; page (15)
- [21] D .Landolt ; Traité des matériaux ; V12 ; Corrosion et chimie de surface des métaux ; Presses polytechniques et universitaire romandes ; 1993 ; page (501)
- [22] Ronald L; Bianchetti; Control of pipeline corrosion; Cathodic protection with galvanic anodes (Chapter 9); Second Edition; 2001 ; page (178)
- [23] Protection des ouvrages ; Protection active; Document de sonelgaz ; 09/06/1997; pages (4, 7 et 8)
- [24] <http://www.outils-cetu.fr/didactu/tunnel/matériaux/matériau-métallique /protection.cathodique.html>; 05/05/2010.
- [25] Protection des ouvrages ; Mesure de résistivité ; Document de sonelgaz ; 09/06/1997 ; pages (2, 3,4)
- [26] Protection des ouvrages ; Mise en œuvre d'une anode réactive; Document de sonelgaz ; 09/06/1997 ; page(3)
- [27] Surveillance; Mesure des intensités; Document de sonelgaz; 09/06/1997; pages (3,4)
- [28] Division technique distribution gaz; Protection cathodique; Direction de la distribution zone d'oran ; juin 2000

Summary:

During our work we have tried to address the following issues:

What is corrosion?

What are the ways to fight corrosion?

Our study was mainly based on the cathodic protection by sacrificial anodes, which is one among many methods of protecting metallic structures against corrosion. As intended, we proposed equations to determine the number of sacrificial anodes from some examples.

Key words: corrosion, cathodic protection, sacrificial anodes.

ملخص:

خلال فترة عملنا، حاولنا معالجة الإشكالية التالية:

- ما هو التآكل؟

- ما هي الحلول من أجل الحد من هذا التآكل؟

تعتمد دراستنا هذه بالتحديد على الحماية المهبطية بواسطة المصاعد المجرحة، التي تعتبر من بين طرق حماية

الإصدارات المعدنية من التآكل.

و كهدف مبتغى، اقترحنا منهجية تجمع بين معادلات مختلفة للحصول في النهاية على عدد المصاعد المجرحة. ولتعزيز

هذه المنهجية قمنا بتوضيح تجريبي يتمثل في بعض الأمثلة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الحماية المهبطية، المصاعد المجرحة.