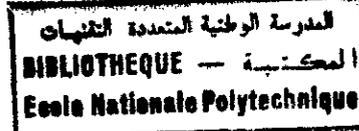


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département De Métallurgie



MEMOIRE DE MAGISTER

Présentée par : Mr **AMARI Djamel**, Ingénieur d'Etat à l'ENP

Thème

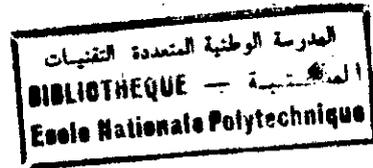
**OPTIMISATION D'UNE PROTECTION
CATHODIQUE A COURANT IMPOSE DE
STRUCTURE EN ACIERS X52 ET E24
CALCULS ET DIMENSIONNEMENT
ETUDE EXPERIMENTALE**

Proposée et dirigée par : M^r **K. ABADLI**, Chargé de Cours à l'ENP

Soutenu devant le jury composé de :

Mr MESRATI Nadir	Professeur Dpt Metallurgie	Président
Mr, KASSER Madjid	Chargé de Cours Dpt Métallurgie	Examineur
Mr SALHI Essaid	Maitre de Conférence Dpt Metallurgie	Examineur
Mr HADDADI Mourad	Professeur Dpt G.Electrique	Examineur
Mr ABADLI Kamel,	Chargé de Cours Dpt Métallurgie	Rapporteur

ENP, 10 Avenue Hassan Badi El-Harrach, Alger



Dédicaces.

Cette thèse, aussi modeste soit elle et plus qu'on le pense encore, n'aurait pas abouti sans l'encouragement et la patience infailibles de ma famille. Aussi, en guise de reconnaissance, je la dédie à :

A mes cher parents pour leur sacrifices toute au long de ma formation ;

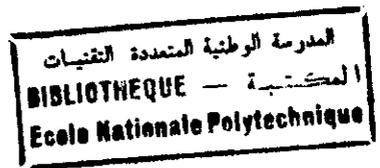
A mes frères et sœurs pour leur aident et leur encouragements afin de mener ce travail à terme ;

Je la dédie aussi en hommage à Mustapha et Nedjima ;

A ma très cher fiancée.

A tous mes amis qui mon aidé de prêt ou de loin.

Djamel.



Remerciements :

La présente étude a été réalisée au Laboratoire de *Structures des Matériaux Métalliques* du département de métallurgie de l'école nationale polytechnique (ENP) sous la direction de M^r ABADLI Kamel. Je tiens à le remercier vivement pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

Je reste très reconnaissant envers M^r MESRATI Nadir pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider à la soutenance de ma thèse et envers les membres du jury pour avoir montré de la disponibilité à juger ce travail.

Que tous les enseignants du département de métallurgie trouvent ici l'expression de mes sincères reconnaissances pour m'avoir formé et permis d'être parmi eux pour mes formations de graduation et de post-graduation.

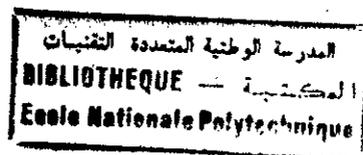
Je tiens à remercier aussi :

- Mr.GUEMAR Said, Directeur de l'unité ANABIB de Réghaia (Gros Tubes) ;
- Mr.MEKKI Daouadji, chef du Département de chimie industriel de l'IAF ;
- Mr. NAOUI, ingénieur au CRD de Boumerdès ;
- Les ingénieurs du laboratoire de Métallurgie du CSC de Chéraga ;
- NASRI Karim et SALEM Mehdi pour leur aide et compréhension ;
- Toufik, Kamel et Djamel de la Bibliothèque.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

SOMMAIRE

Sommaire



Introduction générale.....	1
I- Corrosion des installations immergées et enfouies.....	3
I-1-1 Corrosion dans les eaux de mer.....	4
I-1-1-1 Composition du milieu marin.....	4
I-1-1-2 Propriété de l'eau de mer.....	6
I-1-2 Corrosion dans l'atmosphère marine.....	9
I-1-2-1 Facteurs liés à l'acier.....	9
I-1-2-2 Facteurs météorologiques.....	10
I-1-3 Corrosion dans l'atmosphère industrielle.....	11
I-1-4 Corrosion dans les sols.....	12
I-1-4-1 La porosité.....	13
I-1-4-2 La conductivité électrique.....	13
I-1-4-3 Nature des sels dissous.....	13
I-1-4-4 L'humidité.....	13
I-1-4-5 Acidité alcalinité.....	13
I-2 Mécanisme et caractéristiques de la corrosion des installations enfouie et immergées.....	14
I-2-1 Influence de l'oxygène.....	14
I-2-2 Influence de la température.....	17
I-2-3 Influence du pH.....	18
I-2-4 Influence du couplage galvanique.....	22
I-2-5 Influence de l'agitation sur la corrosion dans les eau naturelles.....	26
I-2-6 Influence des sels dissous.....	27
I-2-7 Influence des facteurs métallurgiques.....	30
I-3 Morphologie de la corrosion des installations immergées et enfouies.....	35
I-3-1 Formes de corrosion.....	35
I-3-1-1 Corrosion uniforme.....	35
I-3-1-2 Corrosion par crevasses.....	35
I-3-1-3 Corrosion par piqûres.....	37
I-3-1-4 Corrosion bactérienne.....	39
II- La protection cathodique.....	40

II-1 Généralités.....	40
II-2 Protection d'une installation enterrées ou immergées.....	40
II-2-1 Revêtements métalliques.....	41
II-2-2 Les revêtements organiques.....	42
II-2-2-1 Les résines synthétiques thermodurcissables.....	43
II-2-2-2 Les polymères thermoplastiques.....	43
II-2-2-3 Les revêtements à liants hydrocarbonés.....	44
II-2-2-4 Exemple d'utilisation d'un système de peinture de base.....	45
II-2-2-5 Caractéristiques des revêtements.....	46
II-3 La protection cathodique par courant imposé.....	48
II-3-1 Principe.....	48
II-3-2 Critères et bases scientifiques.....	49
II-3-2 Calcul des vitesses de corrosion à partir des valeurs de polarisation.....	51
II-3-4 Théorie de la protection cathodique.....	52
II-3-4-1 Le potentiel de protection.....	54
II-3-4-2 La densité de courant de protection.....	54
II-3-5 Les caractéristiques du générateurs.....	55
II-3-6 Réalisation pratique d'un poste de protection cathodique à courant imposé.....	57
II-3-6-1 La source d'énergie.....	57
II-3-6-2 Le déversoirs ou masse anodique.....	57
II-3-6-3 Les câbles de liaison.....	59
II-3-6-4 L'appareillage électrique auxiliaire.....	59
II-3-7 Réalisation des déversoirs.....	61
II-3-7-1 Déversoirs de surface.....	61
II-3-7-2 Déversoirs profond.....	61
II-3-8 Choix de l'emplacement.....	63
II-3-9 Principe de mesure.....	64
III- Calculs et dimensionnement d'une protection cathodique à courant imposé.....	66
III-1 Présentation de l'ouvrage.....	66
III-2 Conception du système protection cathodique.....	66
III-2-1 Le système de protection envisagé.....	66
III-2-2 Calcul du système de protection cathodique.....	67
III-2-2-2 Expression de la portée du transformateur-redresseur.....	67
III-2-2-3 Calcul du courant nominal du transformateur-redresseur.....	68
III-2-2-4 Calcul du déversoir (puits anodique).....	69

III-2-2-5 Calcul du nombres.....	69
III-2-2-6 Calcul de la tension nominale du transformateur-redresseur.....	70
III-3 Spécification du matériels de la protection cathodique.....	71
III-3-1 Le transformateur-redresseur.....	71
III-3-2 L coffret d'alimentation du puits anodique (CAPA).....	72
III-3-3 Le puits anodique.....	72
III-3-4 Le coffret de soutirage de contrôle continu du niveau de potentiel et de défaut de courant.....	73
III-3-5 Prises de mesures.....	73
III-3-6 Raccordements fonctionnels.....	73
III-3-7 Raccordements de sécurité.....	74
III-4 Vérifications préliminaires.....	74
III-4-1 Mesure du potentiel naturel.....	74
III-4-2 Mise en marche et premier réglage.....	74
III-4-2-1 Mise en marche du poste de soutirage.....	75
III-4-2-2 Mise en marche du système de protection cathodique.....	75
III-4-2-3 Réglage définitif.....	75
III-5 Conception et exploitation d'un programme de calcul d'une protection cathodique à courant imposé.....	76
IV- Techniques expérimentales.....	79
IV-1 Etude du comportement électrochimique.....	79
IV-1-1 Méthode de polarisation à potentiel contrôlé.....	79
IV-1-2 Chaîne électrochimique.....	79
IV-1-2-1 Cellule de mesure.....	80
IV-1-2-2 Electrode de travail.....	80
IV-1-2-3 Electrode de référence.....	80
IV-1-2-5 Le potentiostat.....	80
IV-1-2-5 Schéma de la cellule utilisé.....	80
IV-1-3 Préparation de la solution.....	81
IV-1-4 Mesure du pH et de la conductivité électrique de la solution.....	82
IV-1-5 Préparation des électrodes de travail.....	82
IV-2 Montage du dispositif de la protection cathodique.....	83
IV-2-1 Matériels utilisés.....	83
IV-2-2 Préparation des électrodes de travail (cathodes).....	83
IV-2-3 Préparation des électrodes en graphite (anodes).....	84

IV-2-4 Montage du dispositif électrique de la protection cathodique à courant imposé.	84
V- Résultats et interprétations.....	86
V-1-2 Essai de dureté.....	87
V-1-3 Caractérisation micrographique.....	87
V-1-4 Caractérisation électrochimique.....	88
V-2 Dimensionnement de la protection cathodique pour le X52 et E24.....	90
V-2-1 Cas de l'acier X52.....	90
V-2-2 Cas de l'acier E24.....	91
V-2-3 Calcul de la résistance de l'anode.....	91
V-2-4 Détermination de la tension du transformateur-redresseur.....	92
V-3 Interprétation des résultats.....	95
Conclusion générale.....	98
Références bibliographiques.....	100
Annexes.....	103

ملخص

الاهداف المرجوة من اعمالنا

- دراسة انجاز واختيار ابعاد لنظام الحماية الكاثودية تحت تيار كهروباى مفروض لهيكل متواجد تحت الأرض
- دراسة تجريبية لحماية كاثودية لنوعين من حديد الصلب E24 و X52 فى محلول H_2SO_4 1N النتائج المحصل عليها بينت من جهة فعالية دراسة الإنجاز و من جهة أخرى تطابق النتائج التجريبية.

Résumé

Les objectifs de nos travaux consistent en :

- Une étude de conception et dimensionnement d'un système de protection cathodique à courant imposé d'une structure enterrée ;
- Une étude expérimentale de la protection cathodique de deux nuances X52 et E24 dans une solution de H_2SO_4 1N ;

Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de l'étude de conception d'une part et la conformité des résultats expérimentaux d'autre part.

Abstract

The objectives of our works are:

- Conception and dimensioning of cathodic protection system with impressed current of underground structure;
- Experimental study of cathodic protection of two grade steels X52 and E24 in H_2SO_4 1N solution ;

The obtained results shows the efficiency of this study in one hand and the conformity of the experimental results in other hand.

Les mots clés

Acier, protection cathodique, corrosion, courant imposé, structure enterrée et immergée, courbes de polarisation, cathode, anode, potentiel de protection.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE



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

Les évaluations du coût des dégâts, directs et indirects causés par la corrosion varient entre 2 à 4% du PNB (produit national brut) dans les pays industrialisés. Ceci comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection. Aux Etats-Unis, ce coût a été évalué entre 5 à 8 milliards de dollars, soit 1,5 à 2% du PNB. En France l'évaluation du CEFRACOR a été de 4% du PNB, ce qui est considérable et reflète l'importance du problème.

Cette statistique spéculative peut paraître déconcertante si l'on ne réalise pas à quelles conditions extrêmes peuvent être soumis les métaux et leurs alliages dans notre civilisation industrielle. Il importe donc de développer notre connaissance de lutte contre la corrosion au même rythme que celui du développement des industries de pointe. Selon certaines estimations, on pense qu'une économie de l'ordre de 15% du coût de la corrosion pourrait être réalisée par une observation plus systématique des bonnes règles d'anticorrosion connues.

les hommes ont essayé de se prémunir contre la corrosion, sans toute fois en connaître les processus. C'est vraisemblablement vers la fin du 18^e siècle que l'on a constaté scientifiquement une modification de l'eau au contact d'un métal qui, lui, se corrode.

Dès 1820 furent mise en place sur les coques de navires des pièces en zinc pour protéger les plaques de renfort en cuivre, ou les blindages. L'anglais Davy créa ainsi la première protection cathodique connue. Faraday découvrira un peu plus tard que, dans une corrosion électrochimique, un courant de 1 ampère déplace 9 Kg en une année.

A la suite de ses constatations, des études plus scientifiques des problèmes de corrosion ont été entamées. Nous citerons au passage le nom de l'anglais Evans qui eut le mérite de faire une synthèse de toutes les découvertes du passé, dont la théorie d'aération différentielle, a permis d'expliquer certaines des difficultés rencontrées.

Le développement des réseaux de pipeline a permis de précipiter les études et les mises en place de la protection cathodique.

Enfin, l'essor considérable de l'industrie après la dernière guerre mondiale a donné une impulsion nouvelle à la recherche des procédés de lutte contre la corrosion.

Lorsque apparurent les redresseurs, à semi-conducteur et les anodes de magnésium, on vit la protection cathodique démarrer à pas de géant et les résultats obtenus furent d'autant meilleurs que, parallèlement, se sont développés les matériaux et les techniques de revêtement. Ces procédés sont la plus part du temps utilisés de façon complémentaire: ainsi, les conduites sont généralement revêtues, et, en même temps, protégées cathodiquement.

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

Les travaux proposés dans le cadre de cette étude comporte trois parties.

- Une étude bibliographique du sujet ;
- Une partie expérimentale qui permet d'étudier les conditions d'une protection cathodique de deux aciers pétroliers X52 et E24 dans une solution acide H_2SO_4 ;
- Une partie consacrée aux calculs et dimensionnement d'un système de protection cathodique d'un tronçon de pipe enterré de 30 Km et situé dans la zone de Hassi Berkine.

Les aciers sont aimablement fournis par l'entreprise ANABIB de Réghaia.

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

Corrosion des installations pétrolières enfouies et immergées

Introduction

Les installations pétrolières sont classées en deux groupes selon leur fonction :

- Installations de stockage de carburant (fuel, gaz, pétrole, ...)
- Installations de transport de carburant.

Les installations de stockage sont les bacs et les réservoirs qui sont réalisés en acier mais fixés dans le sol par un maçonnerie en béton et en charpente métallique.

Les bacs et les réservoirs peuvent être placés totalement au dessus du niveau du sol, peuvent être particulièrement enterrés (bacs de stockage de Naphtal au niveau des stations de Dar-el-Beida et du port d'Alger), ou complètement enfouies (cas des réservoirs des stations d'essence).

Les installations de transport de carburant sont les citernes (placées sur wagons de train, sur camions et sur les bateaux) et les pipelines. Ces derniers peuvent être complètement enfouies dans le sol, immergés dans l'eau de mer ou exposés à l'atmosphère selon la configuration géographique de la zone traversée.

Les milieux dans lesquelles fonctionnent les installations pétrolières sont :

- Eau de mer ;
- Sol ;
- Atmosphère marine ;
- Atmosphère industrielle ;
- Atmosphère rurale (sud Algérien).

Ces milieux sont corrosifs à des degrés différents et l'endommagement causé présente une morphologie et une cinétique qui dépendent des conditions locales.

I-1-1 Corrosion dans les eaux de mer

Parmi les différents milieux de corrosion, l'environnement marin est considéré comme particulièrement agressif pour les installations et les ouvrages maritimes.

I-1-1-1 Composition du milieu marin

Le milieu marin est composé de trois parties, L'atmosphère (milieu gazeux), l'eau de mer (milieu liquide) et le sous-sol marin (milieu solide), la séparation physique de ces trois milieux n'est pas évidente car l'atmosphère est saturée d'eau de l'humidité et le sol est imprégné d'eau de mer. Afin de faciliter l'étude et l'interprétation des phénomènes dans cet environnement, on considère cinq zones de réaction, figure I-1. Ces zones sont définies du haut vers le bas de la manière suivante :

1. Zone atmosphérique : située au dessus du niveau de la mer. En l'absence de tempêtes, la zone n'est pas soumise aux vagues et aux éclaboussures. La teneur en chlore décroît avec l'altitude ;
2. Zone de transition (eau de mer-air) : appelée aussi zone des éclaboussures, elle subit l'action violente des marées hautes et des vagues. Cette zone présente le maximum de corrosion ;
3. Zone immergée : située au dessous du niveau de la mer et limitée par la zone de transition eau de mer-sol. Les propriétés physico-chimiques varient avec l'altitude ;
4. Zone de transition eau de mer-sol : cette zone dépend de la nature du fond (sableux ou vaseux) et des courants marins éventuels en profondeur. Dans cette zone, les sables de fond exercent sur les ouvrage immergés une abrasion ;
5. Zone enfouie ou de sous-sol marin : un ouvrage en acier au carbone dont une partie est immergée jusqu'en sous-sol subit une attaque sur toute sa hauteur.

Dans la zone atmosphérique, la corrosion est relativement faible, et elle diminue avec l'altitude. au dessus du niveau de la mer dans la zone des éclaboussures, la corrosion est importante et passe par un maximum. Le taux de corrosion est généralement supérieur à 0,3mm/an et peut atteindre 1mm/an dans certaines régions. Cette sévérité s'explique par la présence d'une fine couche d'eau due à l'humidité toujours supérieure à 90%.

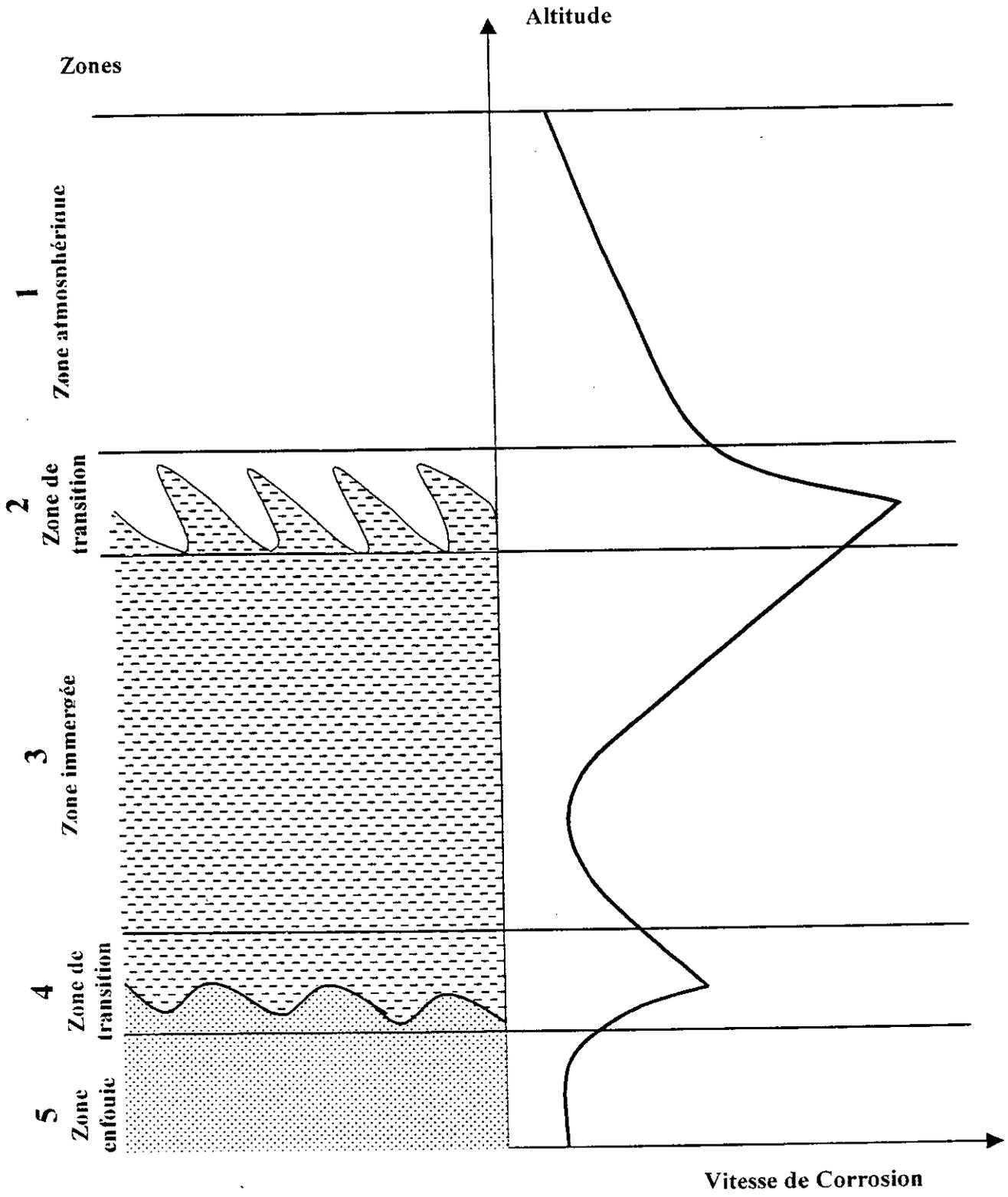


Figure I-1 : Profil de corrosion marine[10]

De même, l'action de la marée des vagues et leur éclaboussures sur la surface de l'acier engendre une accélération de la corrosion. Parmi ces actions on peut citer :

- Séchage et mouillage alternés ;
- Actions mécaniques violentes des vagues et marées ;
- Aération différentielle ;
- Abrasion par les débris et salissures flottant.

L'attaque de l'ouvrage est très faible dans la zone immergée (0,05 à 0,2 mm/an). Le profil de corrosion passe par un maximum.

Plus bas, dans la zone de transition eau de mer-sol la vitesse de corrosion augmente et passe par un maximum pour diminuer jusqu'à une valeur très faible. On explique l'importance de la corrosion dans cette zone par l'oxydation différentielle (partie immergée dans l'eau riche et enfouie dans le sable pauvre en oxygène), par l'action abrasive des sables et par la corrosion bactériologique. Au niveau du sous-sol la corrosion devient négligeable.

Le profil de corrosion dans l'environnement marin varie en forme et en niveau d'un endroit à l'autre et au cours du temps.

I-1-1-2 Propriétés de l'eau de mer

1. Composition chimique

L'eau de mer contient la quasi-totalité des éléments chimiques. Les constituants minéraux et leur concentration varient d'un endroit à l'autre et dans le temps. Une composition chimique type est donnée dans le tableau I-1.

Tableau I-1: Composition type d'une eau de mer de densité 1.023 g/Cm³[6].
Ces constituants sont classés en deux catégories :

Ions	Concentration (g/Kg d'eau)
Na ⁺	10.77
K ⁺	0.399
Mg ⁺⁺	1.290
Ca ⁺⁺	0.412
Sr ⁺⁺	0.008
Cl ⁻	19.354
Br ⁻	0.067
F ⁻	0.0013
HCO ⁻³	0.140
SO ⁻⁴	2.712
B(OH) ₃	0.0257

▪ Ions majeurs

Leur concentration est supérieure à 1mg/l et ne sont pas affectés pour les processus biologiques. Le comportement de ces ions est dit conservatif car leur concentration demeure constante.

▪ Ions mineurs

Leur concentration est inférieure à 1g/l et leur rôle en corrosion dépend de trois facteurs ; température, pH, et gaz dissous. Parmi les ions présents, l'ion Cl⁻ joue un rôle important dans le processus de corrosion.

L'eau de mer contient environ 3.4% de NaCl et est légèrement alcaline avec un pH égal à 8. Les résultats de J.A Beavers et all[10], montre qu'une concentration de l'eau de mer en NaCl égale à 3.5% provoque une vitesse de corrosion maximale.

2. La salinité

La salinité est définie par le poids total en gramme des sels minéraux dans un 1Kg de l'eau de mer. Lorsque la solution contient plusieurs types de sels, on ramène les bromures, les iodures, à une quantité équivalente de chlorure, les carbonates sont remplacées par une quantité équivalente en oxyde. La salinité varie avec la concentration en Cl selon une loi linéaire :

$$S = 1.080655 \text{ Cl } (‰)$$

La salinité a un lien directe avec la vitesse de corrosion, plus la salinité est importante plus la vitesse de corrosion est élevée et plus la tendance à la corrosion localisée par piqûre est grande.

3. Les gaz dissous

Les deux gaz dissous dans l'eau de mer qui agissent dans la corrosion, des installations immergées sont l'oxygène et le dioxyde de carbone. Cependant l'oxygène est considéré comme le principal facteur de corrosion.

L'oxygène provient de la photosynthèse des organismes microscopiques, et de l'air.

La concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer dépend de la température T et de la salinité S selon la loi :

$$\ln(O_2) = A_1 + A_2\left(\frac{100}{T}\right) + A_3 \ln\left(\frac{T}{100}\right) + A_4\left(\frac{T}{100}\right) + S[B_1 + B_2\left(\frac{T}{100}\right) + B_3\left(\frac{T}{100}\right)]^2$$

Ai et Bi sont des coefficient leur valeur sont :

$$A_1 = -173.43$$

$$B_1 = -0.0331$$

$$A_2 = 249.64$$

$$B_2 = -0.0142$$

$$A_3 = 143.348$$

$$B_3 = -0.0017$$

$$A_4 = -21.85$$

La vitesse de corrosion des aciers dans l'eau de mer varie linéairement avec la concentration en oxygène, figure I-2. Une concentration élevée en O₂ peut provoquer une corrosion par piqûre ou par crevasse.

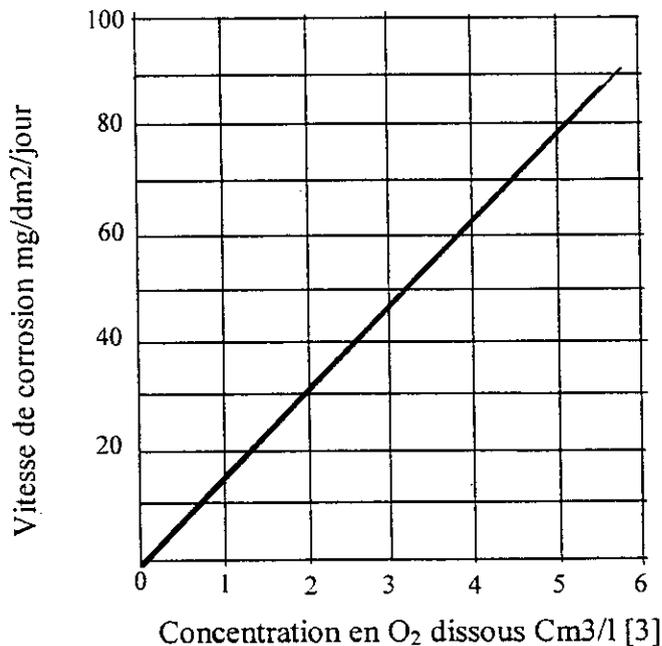
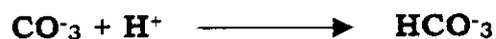
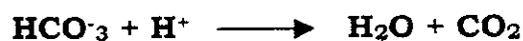


Figure I-2: Influence de la concentration en O₂ sur la corrosion d'un acier doux dans l'eau faiblement agitée contenant 165ppm de CaCl₂. essai 48 h, T= 25°C [3].

La concentration du gaz CO₂ dans l'eau de mer dépend de la présence des ions bicarbonates et carbonates.



Ces réaction engendrent un abaissement du pH et la production du CO₂. Ce composé réagi avec la surface de l'acier et provoque des corrosions localisées par piqûres.

I-1-2 Corrosion dans l'atmosphère marine

La corrosion atmosphérique procède selon un modèle électrochimique. L'électrolyte étant constitué par de l'eau plus au moins salée (sels de chlorures) et polluée, déposée sous forme d'un film sur la surface de l'acier. le comportement de l'acier dans l'atmosphère est identique à son comportement dans l'eau de mer. Les facteurs de corrosion sont liés à l'acier, à l'atmosphère et aux agents météorologiques.

I-1-2-1 Facteurs liés à l'acier

La composition de l'acier est un facteur important, l'addition de 0.2% de Cu aux aciers au carbone améliore la tenue de l'acier par la formation d'une couche de rouille très serrée plus imperméable, de faible addition de Ni (2 à 5%) et de chrome (3 à 5%) donnent les mêmes résultats.

La composition des aciers ci-dessous étant des exemples pour résister à l'atmosphère marine.

- Acier au carbone + 0.24% de Cu ;
- Acier + 2% de Ni ;
- Acier + 5% de Ni ;
- Acier + 3% de Cr ;
- Acier + 5% de Cr ;
- Acier + 1.7% Ni + 0.9% Cu.

L'état de surface à un rôle moins important qu'à l'état immergé car la formation de micropiles est plus difficile

La forme et la géométrie de l'ouvrage ont une grande influence sur la corrosion. En effet, les structures verticales sont généralement moins corrodées que les structures horizontales surtout si celles ci sont planes. La constitution des saumures agressives est favorisée par les phénomènes de condensation et de vaporisation[10].

I-1-2-2 Les facteurs liés à l'atmosphère

Les facteurs liés à l'atmosphère sont l'humidité, la salinité et la température.

1. L'humidité

La formation et la stabilité du film d'eau dépend de l'humidité relative, et le taux de corrosion augmente avec la durée d'existence de ce film.

Une humidité relative de 100% (saturation) conduit à la formation du film d'eau sur la surface de l'acier. si l'humidité relative est inférieure à 100%, le film d'eau ne se dépose que par adsorption dans les crevasses et les produits de corrosion.

La présence de sels (chlorures) engendre un abaissement de l'humidité relative. Ainsi une eau saturée de NaCl correspond à une humidité relative de 70% et une eau saturée de MgCl₂ correspond à une humidité relative de 34%. Pour l'acier la formation de la rouille dans l'atmosphère marine commence à partir d'une humidité relative de 60%[10].

2. La salinité

Comme la salinité croît avec la concentration en ion Cl⁻ dans le film d'humidité, elle a un effet directe sur le taux de corrosion, la salinité est maximale dans la zone des éclaboussures juste au dessus du niveau de l'eau. elle décroît avec l'altitude, à 20m elle atteint le niveau des salinités des côtes, la vitesse de corrosion croît avec la salinité[10].

3. Température

La température accélère la corrosion des aciers dans l'atmosphère marine du fait que l'évaporation de l'eau augmente et la concentration des agents agressifs augmente aussi.

I-1-2-3 Facteurs météorologiques

- **Vent** : la corrosion dépend nettement de l'exposition par rapport aux vents ;
- **Pluies** : ont un effet contradictoire, le lavage des sels déposés est une action bénéfique, mais l'élimination des produits de corrosion affaiblit l'acier ;
- **Soleil** : son action a un effet négatif sur la résistance de l'acier (évaporation de l'humidité et effet de la température) ;
- **Contamination** : ce sont les gaz H₂S et SO₂ qui affectent le plus les aciers, ces composés proviennent de la combustion des hydrocarbures (essences, pétrole, fuel...). Le SO₂ se transforme en partie en H₂SO₄ qui agit sur les installations.

I-1-3 Corrosion dans les atmosphères industrielles

L'atmosphère industrielle est moins corrosive que l'atmosphère marine, mais plus corrosive que l'atmosphère urbaine. La corrosion est due principalement à l'humidité et à l'oxygène mais elle est accentuée par des agents contaminants tel que les composés sulfurés, les nitrates, et l'ammoniac.

La comparaison de l'atmosphère industrielle à celle de l'eau de mer permet de signaler les observations suivantes :

- Le taux d'humidité est plus faible dans l'atmosphère industrielle, le film déposé est plus mince ou discontinu ;
- La salinité est plus faible l'attaque par les chlorures est moins importante ;
- Le taux des contaminants sulfurés est plus élevés donc la concentration de l'eau est plus élevées.

On peut considéré que l'acier dans une atmosphère industrielle est soumis à une corrosion électrolytique et l'électrolyte est constitué d'une fine couche d'eau contaminée par SO_2 , H_2S , HCl , NO_2 ,...

Même si la concentration des composés SO_2 , HCl et NO_2 sont faibles dans l'air, leur concentration dans les gouttelettes du brouillard, du fait de leur grande solubilité, peuvent atteindre des valeurs importantes. SO_2 se transforme en SO_3 puis en acide sulfurique H_2SO_4 qui est un produit très corrosif pour les aciers. En plus des contaminants, les poussières jouent un rôle important sur la tenue des aciers dans l'atmosphère industrielle. Les effets de SO_2 et des fumées sur la corrosion de l'acier sont révélés par les figures 3 et 4.

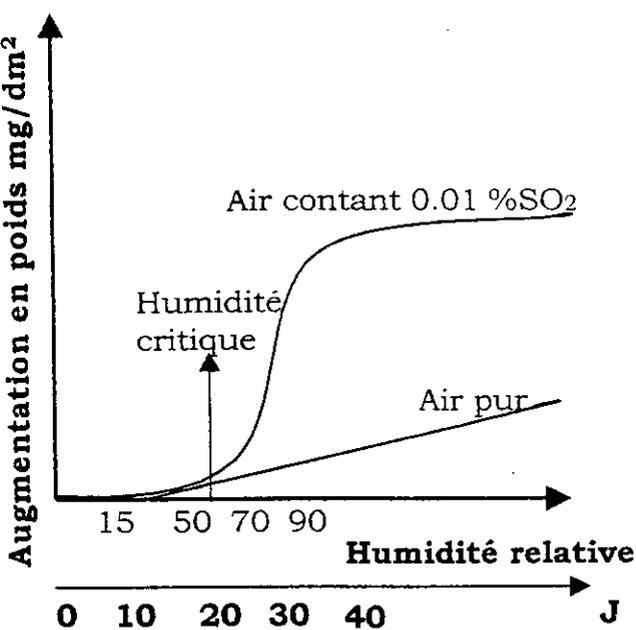


Figure I-3 : Rôle de SO_2 [10]

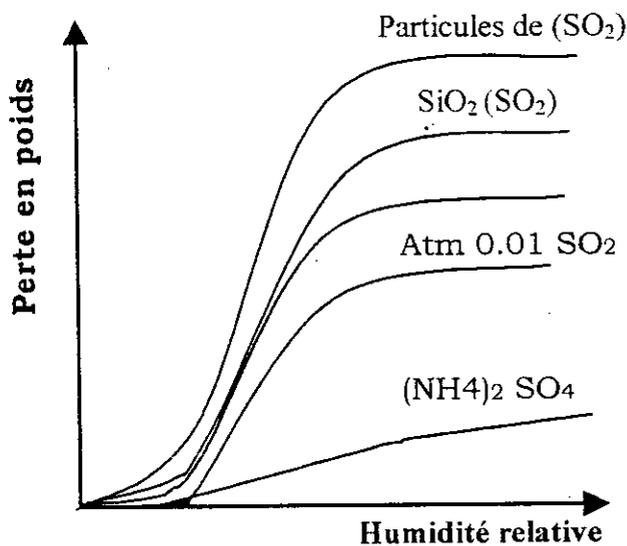


Figure I-4 : Effet des composés sulfates et nitrates [10]

La composition chimique de l'acier est un paramètre important dans la corrosion atmosphérique, l'addition de 0.2% de Cu aux aciers au carbone comme dans le cas de la corrosion marine améliore sensiblement la résistance de l'acier à la corrosion. Le nickel et le chrome sous forme de faibles additions produisent les mêmes effets. La couche de rouille formée est moins poreuse et plus adhérente.

I-1-4 Corrosion dans les sols

La corrosion dans le sol agit par un mécanisme électrolytique mais les propriétés du sol diffèrent d'un électrolyte classique.

Le sol est un milieu hétérogène du point de vue minéralogique et du point de vue chimique. La caractérisation d'un sol est réalisée par la détermination des paramètres suivants :

- La composition chimique et la nature des sels dissous ;
- Le pH ;
- Le taux d'humidité ;
- L'hétérogénéité physico-chimique ;
- La conductivité électrique.

Le comportement de l'acier enterré dans un sol ne diffère pas beaucoup de la corrosion dans l'eau. la corrosion est du type galvanique par la création de micropiles et de macropiles. Les facteurs de corrosion dans le sol sont :

I-1-4-1 La porosité (aération)

Un sol poreux facilite beaucoup l'aération, la vitesse de corrosion augmente rapidement puis devient de plus en plus faible par la suite à cause de la formation de la couche de rouille protectrice.

Dans les sols non aérés, la corrosion par piqûre profonde a été plusieurs fois constatée. La dégradation des installations est accélérée par l'action des bactéries réductrices des sulfates.

I-1-4-2 La conductivité électrique

Un sol présentant une résistance électrique élevée ne se corrode pas. Par contre lorsqu'un sol a une grande porosité (taux d'humidité élevée), des hétérogénéités chimiques et physiques élevées, un pH élevé, des sels dissous (NaCl , MgCl_2 , Na_2SO_4) et la présence des organismes biologiques, présente une faible résistance électrique et l'agressivité du sol augmente. Le degré d'agressivité du sol est d'autant plus grand que la résistance électrique est faible. La mesure de la résistivité ou la résistance électrique est un moyen efficace de prévention contre la corrosion du sol.

I-1-4-3 Nature des sels dissous

L'agressivité du sol dépend de la nature des sels contenus en particulier les chlorures et les sulfates (NaCl , MgCl_2 , Na_2SO_4 , ...).

I-1-4-4 L'humidité

Elle permet la formation d'une couche ou de gouttelettes d'eau sur la surface de l'acier. le processus est le même que celui décrit pour la corrosion atmosphérique.

I-1-4-5 Acidité ou alcalinité

La présence des acides organiques n'est pas souhaitée.

Enfin, la présence de cendres et de matériaux étrangers et de nature différentes (bois, plastiques, ...) affectent sensiblement les aciers.

Généralement, les aciers au carbone et les fontes protégés par un revêtement organique ou par une protection cathodique semble avoir une bonne résistance à la corrosion des sols. Les traitements thermiques et l'écrouissage ne semble pas avoir d'effet sur le comportement de ces alliages.

L'addition du chrome jusqu'à 6% a donner des résultats favorables. L'acier inoxydable 18-8 présente: une bonne résistance au piqûres.

Les dépôts de goudron et de houille contenant des pigments pour les renforcer ou des fibres inorganiques pour réduire le fluage, sont beaucoup utilisés car le procédé est efficace et peu coûteux.

I-2 Mécanisme et caractéristiques de la corrosion des installations enfouies et immergées.

Introduction

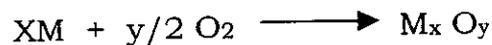
D'après la nature et les propriétés des milieux (sol et eau de mer), on peut cerner et étudier l'influence des différents facteurs et paramètres sur la corrosion d'une installation.

I-2-1 Influence de l'oxygène

L'oxygène provient essentiellement de l'air, il se dissout partiellement dans l'eau de mer et dans la vapeur d'eau de l'atmosphère.

L'action de l'oxygène est prépondérante dans les réactions de corrosion. Aussi bien dans le sol que dans l'environnement marin. Les deux mécanismes de corrosion par l'oxygène sont :

- Attaque directe par oxydation et formation d'oxydes ;



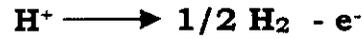
- Attaque par aération différentielle.

1. Oxygène dissout

A température ambiante, dans l'eau neutre ou presque neutre, L'O₂ dissout est nécessaire pour obtenir une corrosion appréciable du fer. Dans l'eau saturée d'air, la vitesse de corrosion initiale peut atteindre une valeur d'environ 100 mg/dm².jr[3]. Cette vitesse diminue après une période de quelques jours, lorsqu'un film d'oxyde de fer (rouille) est formé et qu'il agit comme barrière de diffusion vis-à-vis de l'oxygène. La vitesse de corrosion dans cet état stable peut être de 10 à 25 mg/dm².jr, elle est d'autant plus élevée que l'eau se déplace rapidement par rapport au fer[3]. Puisque la vitesse de

diffusion à l'état d'équilibre est proportionnelle à la concentration en oxygène.

La réaction cathodique:



Peut être accélérée par l'oxygène dissout selon la réaction suivante; processus appelé dépolérisation.



L'augmentation de la concentration en oxygène accélère tout d'abord la corrosion de l'acier. il a été montré qu'au delà d'une concentration critique, la vitesse de corrosion tombe à nouveau à une faible valeur [3].

Dans l'eau distillée, la concentration critique en oxygène au-dessus de laquelle la corrosion décroît est d'environ 12 cm³ d'O₂ par litre, figure 2. Cette valeur augmente avec les sels dissous et avec la température et décroît avec l'augmentation de l'agitation et du pH. Pour un pH voisin de 10, la concentration critique d'O₂ atteint la valeur de l'eau saturée d'air (6cm³/l).

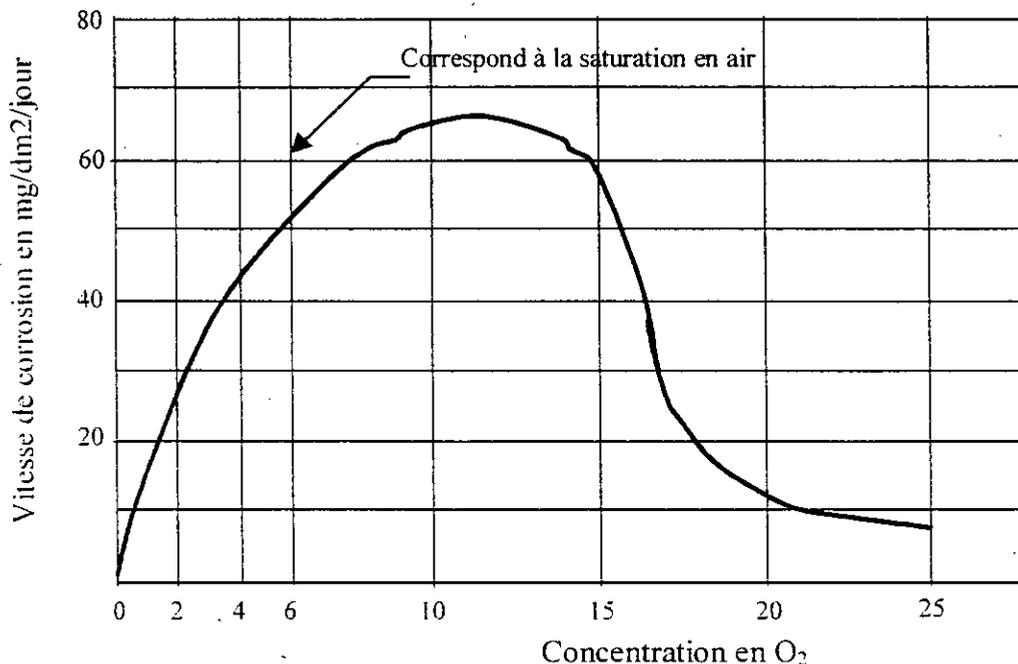


Figure I-5: Influence de la concentration en oxygène sur la corrosion d'un acier doux dans l'eau distillée faiblement agitée. Essai 48h, T = 25°C [3].

La diminution de la vitesse de corrosion est due à la passivation du fer par l'oxygène. Apparemment, pour les hautes pressions partielles, tout l'oxygène qui atteint la surface du métal ne peut être réduit par la réaction de la corrosion, l'excès est alors disponible pour former le film passif. D'après la théorie de la passivité basée sur la formation d'un film d'oxyde, l'excès d'oxygène transforme le film d'oxyde ferreux en un état ayant une plus grande valeur protectrice comme barrière de diffusion. D'après la théorie de l'adsorption, l'excès d'oxygène s'adsorbe chimiquement à la surface du fer et forme un film passif adsorbé.

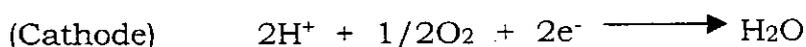
2. Aération différentielle

le mécanisme de l'aération différentielle se produit dans le cas des installations enfouies et des installations immergées dans l'eau.

Lorsqu'une installation est enfouie en partie dans le sol, ou travers une région souterraine de porosité variable, l'attaque de l'oxygène se produit de façon sélective : la zone la plus exposée (non enfouie au milieu plus poreux) subit une diffusion plus facile de l'oxygène et se comporte comme cathode.

La zone la moins exposée (enfouie au milieu dense) où l'oxygène diffuse difficilement se produit comme anode et subit la corrosion par formation d'une pile d'aération différentielle.

Le processus de la corrosion par aération différentielle qui se produit dans l'eau se produit de la manière suivante :



le potentiel du métal E est fonction du pH et de l'aération différentielle.

$$E = - 0.06 \text{ pH} + 0.03rH$$

Appliqué à la surface anodique

$$rH = \frac{E}{0.03} + 2pH$$

$$K = 2rH - \frac{E}{0.03} = 2pH + rH$$

La corrosion de l'acier se produit si $K \leq 48$ (cas particulier de l'eau de mer).

I-2-2 Influence de la température

Quand la corrosion est contrôlée par la diffusion de l'oxygène, la vitesse de corrosion, pour une concentration en O_2 donnée, double approximativement pour chaque augmentation de $30^\circ C$ de la température [3].

Dans un récipient ouvert, laissons l'oxygène s'échapper, la vitesse de corrosion augmente avec la température jusqu'à $80^\circ C$ et tombe ensuite à une très faible valeur vers le point d'ébullition figure I-6.

La chute de la vitesse de corrosion au-dessus de $80^\circ C$ est liée à une diminution marquée de la solubilité de l'oxygène dans l'eau quand la température s'élève, cet effet peut éventuellement atténuer l'effet d'accélération dû à la température seule.

Dans un système clos, l'oxygène ne peut pas s'échapper et la vitesse de corrosion continue à augmenter avec la température jusqu'à ce que tout l'oxygène soit consommé.

Quand la corrosion est contrôlée par le dégagement d'hydrogène, l'augmentation de la vitesse est plus du double chaque $30^\circ C$ d'augmentation de la température. la vitesse de corrosion du fer dans l'acide chlorhydrique, par exemple, double approximativement pour $10^\circ C$ d'augmentation de la température.

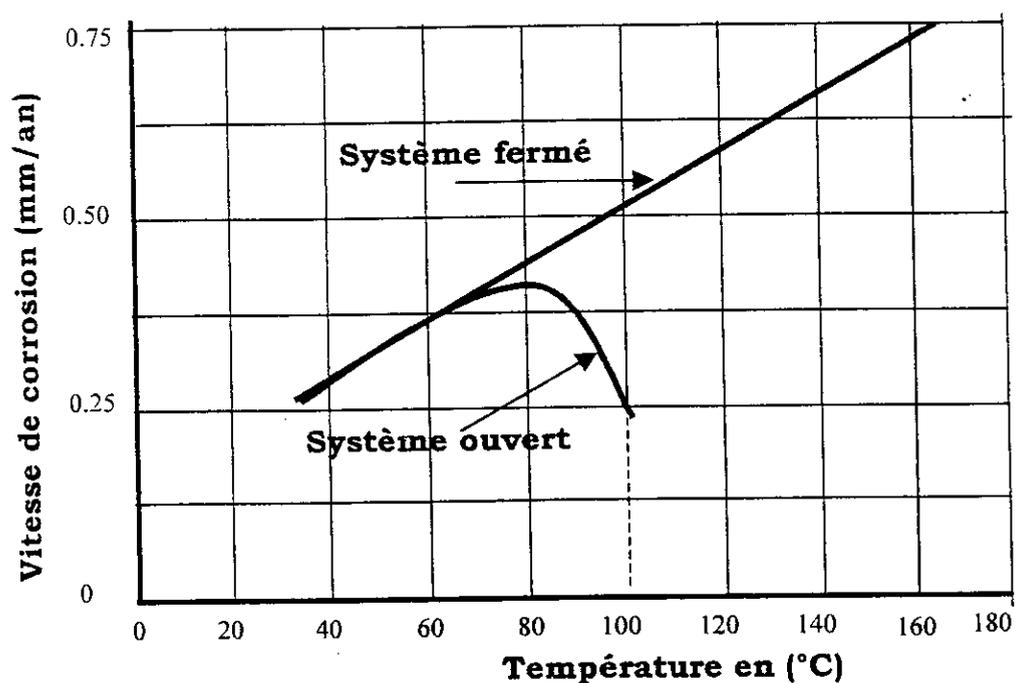


Figure I-6: Influence de la température sur la corrosion du fer dans l'eau contenant de l'oxygène dissous [3].

I-2-3 Influence du pH

L'influence du pH de l'eau aérée sur la corrosion du fer à température ambiante est représentée dans la figure ci-dessous.

Pour un pH compris entre 4 et 10, la vitesse de corrosion est indépendante du pH et dépend seulement de la vitesse à laquelle l'oxygène diffuse vers la surface du métal. La principale barrière de diffusion que représente l'hydroxyde ferreux est continuellement renouvelée par le processus de corrosion.

Dans le domaine acide ($\text{pH} < 4$), le film d'oxyde ferreux est dissout, le pH de la surface diminue, et le fer est plus au moins en contact direct avec le milieu aqueux.

L'augmentation de la vitesse de réaction résulte, à la fois, d'une vitesse appréciable de dégagement d'hydrogène et de dépolarisation par l'oxygène.

Pour un ($\text{pH} < 10$), l'augmentation de l'alcalinité du milieu accroît le pH à la surface du fer. La vitesse de corrosion correspondante diminue car le fer devient très rapidement passif en présence d'alcali et d'oxygène dissous.

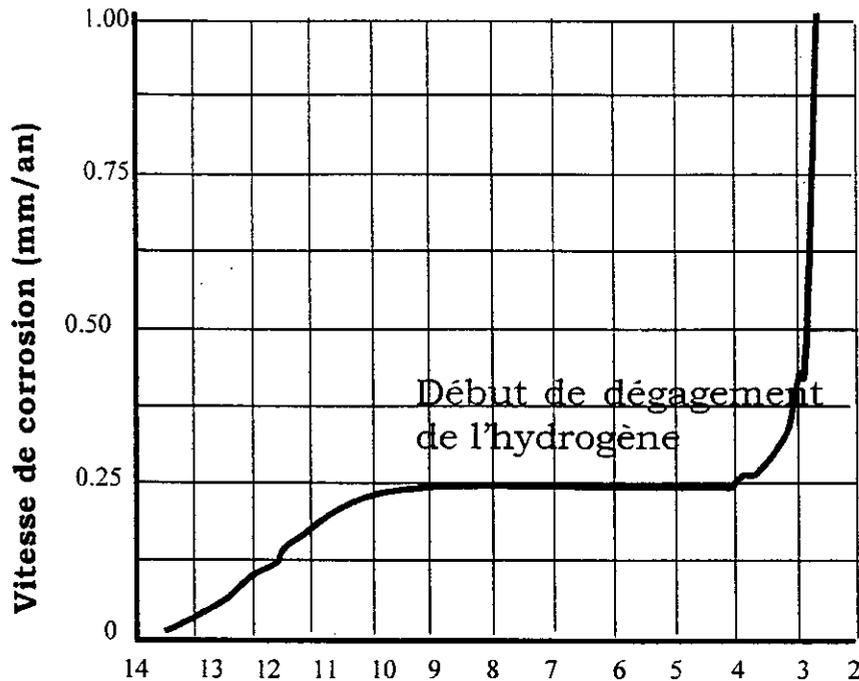


Figure I-7: Influence du pH sur la corrosion du fer dans l'eau aérée à température ambiante [3].

- HCl est employé pour ajuster le pH dans le domaine acide ;
- NaOH est employé pour ajuster le pH dans le domaine alcalin.

Si on augmente fortement l'alcalinité, par exemple, à 16N (NaOH 43%) , la passivité est détruite et le potentiel atteint la valeur très active de -0.86 V . la vitesse de corrosion correspondante augmente faiblement de 0.0025 à 0.01 mm/an (0.5 à $20 \text{ mg/dm}^2 \cdot \text{j}$) [3], mais c'est encore une vitesse relativement lente. Dans cette région, le fer se corrode avec formation de ferrite de sodium soluble (NaFeO_2). En absence d'oxygène dissous, la réaction se produit avec de le dégagement de l'hydrogène formant de l'hypo-ferrite de sodium (NaFeO_2).

Le fait que Fe^{2+} soit complexé par OH^- dans les bases fortes pour former FeO^- avec réduction simultanée de l'activité de Fe^{2+} , influe sur le potentiel actif du fer observé. Quoique la vitesse de formation de FeO^- dans les bases

concentrées, à température ambiante, soit lente, la vitesse devient extrêmement importante aux températures d'ébullition.

Dans le domaine de pH compris entre 4 et 10, comme nous l'avons vu précédemment, la vitesse de corrosion dépend seulement de la vitesse de diffusion de l'oxygène vers la surface cathodique. Ce fait fut mis en évidence par les travaux de Witman et Russell[3], qui ont abouti à conclure, qu'aussi longtemps que la diffusion de l'oxygène contrôle le phénomène (pH compris entre 4 et 10), toute variation de la composition de l'acier, de son traitement thermique que le métal soit travaillé à froid ou recuit, n'a pas d'effet sur la corrosion. La concentration de l'oxygène, la température et l'agitation de l'eau seules déterminent la vitesse de la réaction. Ces facteurs sont importants car pratiquement toutes les eaux naturelles ont un pH compris entre 4 et 10. Ceci signifie que les vitesses de corrosion observée dans un milieu donné (eau ordinaire ou eau de mer) sont toutes essentiellement les mêmes, qu'il s'agisse d'acier à fort ou faible carbone ou d'aciers faiblement alliés (par exemple: 1 à 2% de Ni, Mn ou Cr etc.) ou de fer forgé ou de fonte, ou d'acier doux laminé à froid. De nombreux laboratoires qui ont effectué des mesures en service obtenu avec différents types de fer et d'acier confirme la validité de cette conclusion[3]. Quelques valeurs typiques sont données dans le tableau suivant.

Tableau I-3: Vitesse de corrosion de différents aciers contrôlée par diffusion de l'oxygène [3].

C%	Milieu	Traitement	T(°C) de l'essai	Vcorr (mm/an)
<u>Influence du traitement thermique</u>				
0,39	Eau distillée	♦ Etiré à froid recuit à 500°C	65	0.091
0,39	Eau distillée	♦ Normalisé 20 mn à 900°C et trempé depuis 850°C	65	0.086
0,39	Eau distillée	♦ Différents échantillons revenus entre 300 et 800°C	65	0.084
<u>Influence du carbone</u>				
0,05	NaCl 3%	Non établi	Ambiante	0,036
0,11	NaCl 3%	Non établi	Ambiante	0,038
0,32	NaCl 3%	Non établi	Ambiante	0,038
<u>Influence des éléments d'alliages</u>				
0,13	Eau de mer	Non établi	Ambiante	0,1
0.1-0.34% Cu	Eau de mer	Non établi	Ambiante	0.125
0.06 - 2.2 %Ni	Eau de mer	Non établi	Ambiante	0.125
Fer forgé	Eau de mer	Non établi	Ambiante	0.125

I-2-4 Influence du couplage galvanique

Les expériences de Whitman et Russel[3], établissent que la perte de poids couplé au cuivre est la même que si toute la surface avait été du fer, montraient aussi que la pénétration réelle dans le fer augmente quand celui-ci est couplé à un métal plus noble. Ces essais montrent donc l'influence d'un couplage sur la vitesse de corrosion du composant le moins noble d'un couple.

Dans le cas où la diffusion d'un dépolarisant contrôle la réaction, la relation générale entre la pénétration P (proportionnelle à la vitesse de corrosion) d'un métal ayant une surface A , couplé à un métal plus noble de surface B , est donnée par:

$$P = P_0 \left(\frac{1+B}{A} \right)$$

P_0 est la pénétration du métal de surface A non-couplé.

Dans le cas de métaux couplés exposés à des solutions désaérées dans lesquelles la corrosion est accompagnée de dégagement d'hydrogène, le fait d'augmenter la surface du métal le plus noble accroît également la corrosion du métal le moins noble. La figure ci-dessous montre les courbes de polarisation d'une anode qui se polarise peu par rapport à une cathode sur laquelle l'hydrogène se dégage (contrôle cathodique).

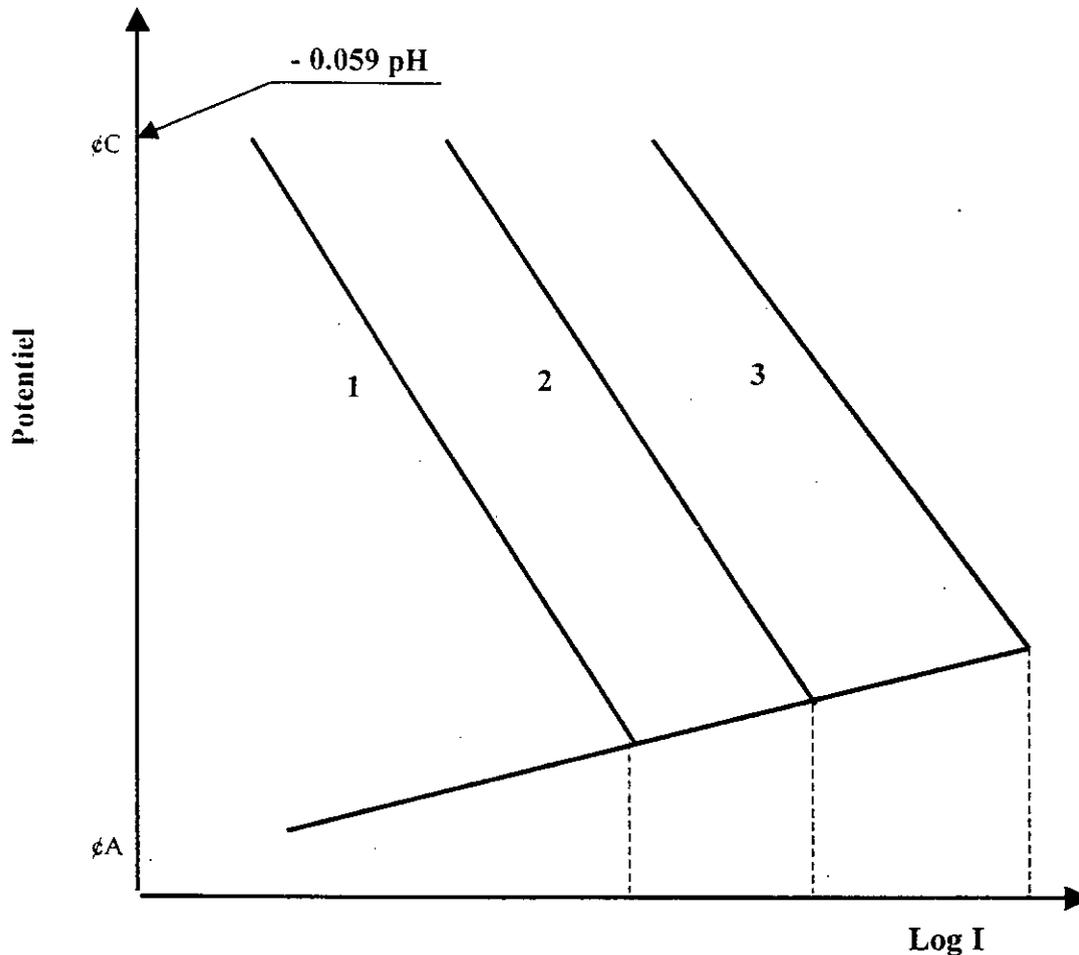


Figure I-8: Influence de la surtension cathodique d'hydrogène sur la corrosion galvanique dans les acides non-oxydants désaérés[3].

- La courbe (1) représente la polarisation de la surface d'un métal noble ayant une forte surtension d'hydrogène;
- Les courbes (2) et (3) représentent la polarisation de métaux ayant une surtension d'hydrogène plus faible.

En général, tout métal sur lequel se dégage l'hydrogène se comporte comme une électrode à hydrogène dont le potentiel est $-0,059\text{pH}$ pour une pression d' H_2 de 1 atmosphère.

Quand un métal qui se corrode est couplé à un métal plus noble, de surface variable, la situation est schématisée à la figure ci-dessous. Si une

anode de surface A est couplée à un métal plus noble de surface B, on peut considérer que la densité de courant est égale à :

$$\text{Log} i_{\text{galv}} = -\phi_{\text{corr}} - 0,059 \frac{pH}{\beta} + \log \frac{B}{A i_0}$$

ϕ_{corr} est le potentiel de corrosion (mesuré par rapport à l' H_2) du couple, β est la Constante de Tafel et i_0 est la densité de courant d'échange.

L'augmentation de la pénétration à l'anode est donnée par :

$$P - P_0 = \frac{i_{\text{galv}}}{K}$$

k est une constante.

Nous pouvons écrire, si l'anode est très faiblement polarisée.

$$\frac{-\phi_{\text{corr}} - 0.059 pH}{\beta} = \log i_{\text{galv}} - \log \frac{B}{A i_0} = \log K$$

on pose :

$$K = \frac{i_{\text{galv}} \cdot A}{B \cdot i_0}$$

Cela nous donne :

$$P - P_0 = \frac{K \cdot B \cdot i_0}{A \cdot k} = \frac{K \cdot B}{A \cdot k} i_0$$

On remarque que la pénétration de corrosion est en fonction du rapport de surface B/A et que la vitesse de corrosion du métal le moins noble d'un couple augmente avec la densité de courant d'échange i_0 et diminue avec la surface B correspondant à la faible surtension d' H_2 .

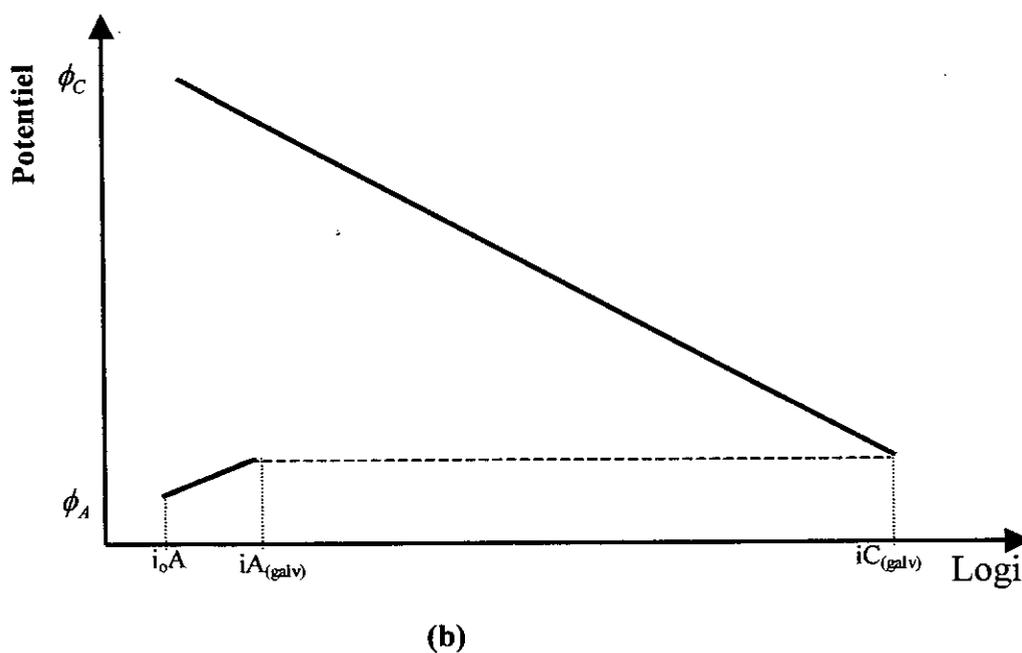
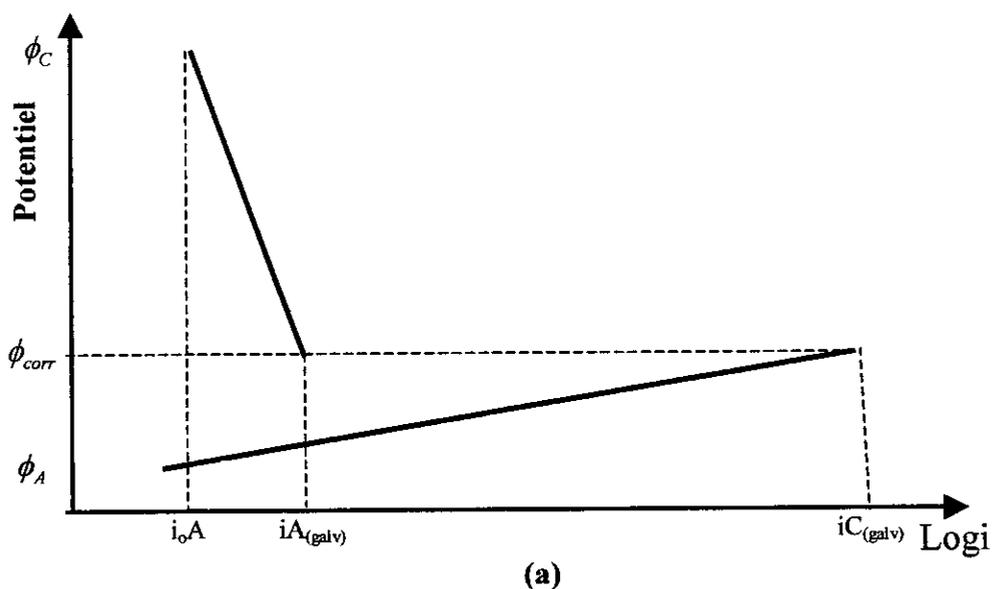


Figure I-9: Influence du rapport des aires anode - cathode sur la corrosion de couples galvaniques dans les acides non oxydants désaérés[3].

- a) Grande cathode couplée à une petite anode;
- b) Grande anode couplée à une petite cathode.

I-2-5 Influence de l'agitation sur la corrosion dans les eaux naturelles

L'agitation de l'eau augmente tout d'abord la vitesse de corrosion en apportant plus d'O₂ à la surface du métal. Pour les agitations assez fortes, de l'oxygène en quantité suffisante peut atteindre la surface et créer une passivité partielle. Si cela se produit, la vitesse de corrosion décroît à nouveau après une première augmentation.

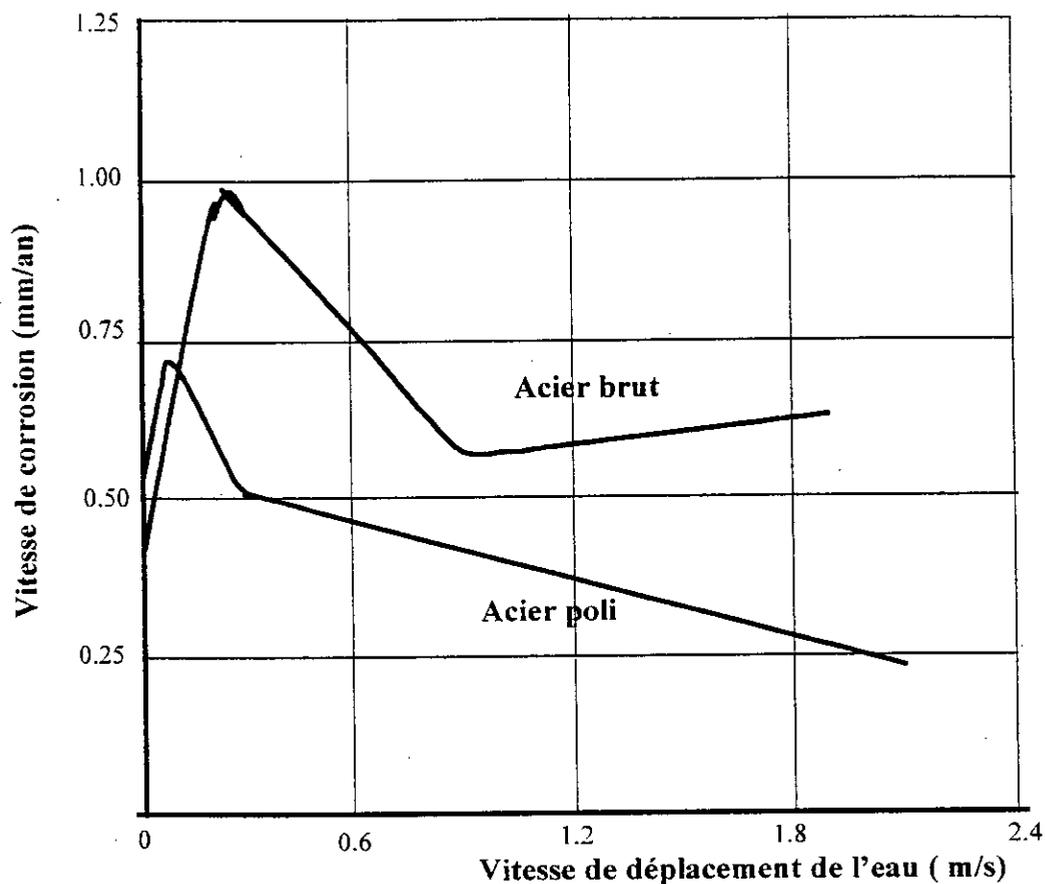


Figure I-10: Influence de l'agitation sur la corrosion de canalisation en acier doux, $T=21^{\circ}\text{C}$. essais 48h[3].

Si l'agitation augmente encore, un phénomène d'érosion de la surface augmente à nouveau la vitesse de corrosion. Le premier maximum de la vitesse de corrosion qui précède la passivité se produit pour une agitation qui varie avec la rugosité de la surface du métal et avec les impuretés contenu dans l'eau. en présence d'une forte concentration en Cl⁻, comme c'est le cas dans l'eau de mer, la passivité ne s'établit pas quelle que soit l'agitation et la vitesse

de corrosion augmente sans que l'on observe de décroissance pour une vitesse d'agitation intermédiaire.

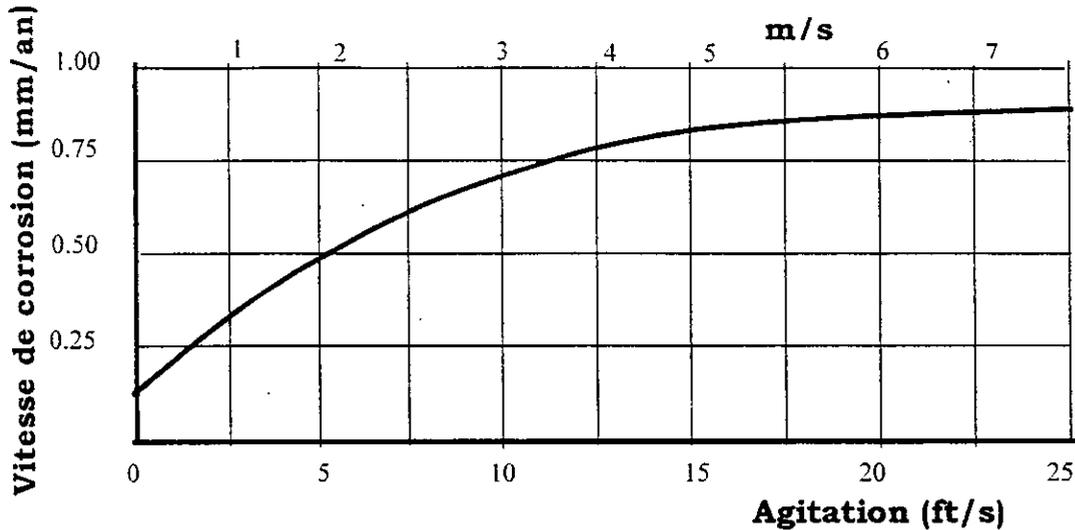


Figure I-11: Influence de l'agitation sur la corrosion dans l'eau de mer[3,10].

I-2-6 Influence des sels dissous

L'influence de la concentration de NaCl par exemple sur la corrosion du fer et de l'acier dans l'eau saturée d'air à température ambiante est montrée ci-dessous.

La vitesse de corrosion augmente tout d'abord avec la concentration en NaCl, puis elle décroît, la vitesse de corrosion devenant inférieure à celle mesuré dans l'eau distillée quand la saturation est atteinte (26%NaCl).

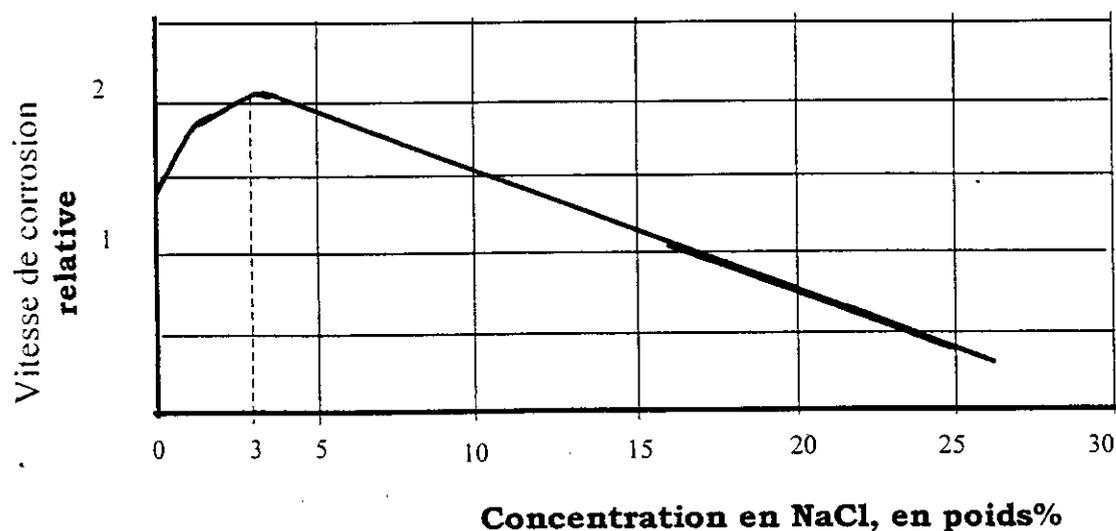


Figure I-12: Influence de la concentration en NaCl sur la corrosion du fer et d'acier dans des solutions aérées, à température ambiante[3].

Cette figure nous montre la diminution de la vitesse de corrosion pour les plus hautes concentrations en NaCl, qui est du, en fait, à la solubilité de l' O_2 qui décroît continuellement avec la concentration en NaCl. Mais l'augmentation initiale de la vitesse de corrosion n'est pas expliquée puisque la solubilité de l' O_2 décroît dès les premières additions de NaCl. On peut penser qu'un changement dans la nature de la barrière de diffusion que forme le film d'oxyde se produit à la surface du métal.

Nous savons que dans les solutions de NaCl, la conductivité est considérable. De ce fait les anodes et les cathodes peuvent-elles être éloignées les unes des autres et NaOH ne réagit pas instantanément avec $FeCl_2$ formé aux anodes; au contraire, ces substances diffusent dans la solution et réagissent pour former $Fe(OH)_2$ loin de la surface du métal. Le $Fe(OH)_2$ ainsi formé ne fournit évidemment pas une barrière protectrice à la surface du métal, ce qui explique la corrosion du fer et de l'acier dans NaCl d'une manière rapide au-dessous de 3% de NaCl car une grande quantité de l' O_2 dissous peut atteindre les aires cathodiques.

Les sels des métaux alcalins comme KCl, LiCl, Na_2SO_4 , KI, NaB_2 , affectent la vitesse de corrosion de la même manière que NaCl.

Les sels des alcalino-terreux comme CaCl_2 , SrCl_2 sont un peu moins corrosifs que les sels des métaux alcalins. Les nitrates sont moins corrosifs que les chlorures ou les sulfates à faible concentration (0,1 à 0,25N) mais ne le sont pas nécessairement pour de plus hautes concentrations[3].

Les sels acides, qui s'hydrolysent pour donner des solutions acides, provoquent une corrosion avec dégagement d'hydrogène et dépolarisation par l'oxygène, avec des vitesses identiques aux vitesses de corrosion observées dans des acides de même pH. AlCl_3 , NiSO_4 , MnCl_2 et FeCl_2 sont des exemples de tels sels.

Les sels d'ammonium, comme NH_4Cl , sont également acides mais provoquent une vitesse de corrosion plus grande que celle qui devrait correspondre à leur pH (pour des concentrations en NH_4Cl > à 0,05N)[3]. Ceci est dû au fait que les ions NH_4^+ sont susceptibles de complexer les ions Fe^{2+} , ce qui diminue leur activité et augmente la tendance à la corrosion du fer ou de l'acier.

Les sels alcalins qui s'hydrolysent et donnent des solutions basiques $\text{pH} > 10$ agissent comme des inhibiteurs de corrosion. Ils passivent le fer en présence d' O_2 dissous. Parmi ces sels on trouve le phosphate trisodique Na_3PO_4 , le tétraborate de sodium $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, le silicate de sodium Na_2SiO_3 et le carbonate de sodium Na_2CO_3 .

Les sels oxydants sont soit de bons dépolarisateurs donc augmentent la vitesse de corrosion de l'acier, soit des passivateurs et des inhibiteurs efficaces. FeCl_3 , CuCl_2 , HgCl_2 et l'hypochlorite de sodium sont des bons dépolarisateurs. Na_2CrO_4 , NaNO_2 , KMnO_4 et FeO_4 sont des bons passivateurs.

I-2-7 Influence des facteurs métallurgiques

1. Influence de la composition

Comme nous l'avons indiqué, la composition du fer ou de l'acier en ce qui concerne les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés commerciaux, n'a pratiquement aucun effet sur la vitesse de corrosion dans les eaux naturelles et les sols (eau de mer compris), voir tableau 4.

La corrosion est fortement réduite dans le seul cas d'acier allié de type inoxydable (>12%Cr) ou de ferro-silicium riche en silicium et de ferro-nickel riche en Ni pour lesquels la diffusion de l'oxygène ne contrôle jamais la vitesse de corrosion. La figure suivante nous montre l'influence de certains éléments sur la vitesse de corrosion.

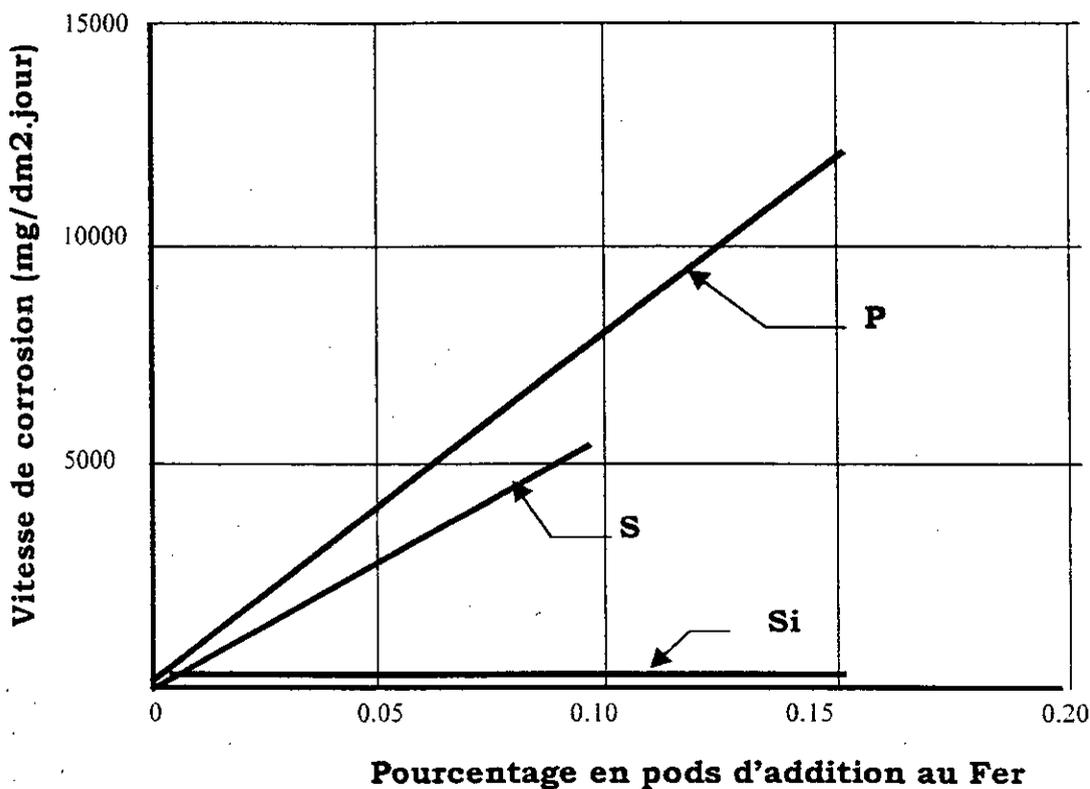


Figure I-13: Influence du Phosphore, du Soufre et du silicium contenus dans le fer sur la corrosion dans HCl 0.1N(acier recuit, T = 25°C) [3].

Bien que, le carbone contenu dans l'acier n'a pas d'effet sur la vitesse de corrosion dans l'eau douce, une faible augmentation de la vitesse de corrosion

(20% maximum) a été observée dans l'eau de mer lorsque le pourcentage en carbone passait de 0.1 à 0.8%[3].

La cause de cette augmentation est probablement due à l'importance accrue de la réaction de dégagement de l'hydrogène en solutions de chlorure (avec complexation de Fe^{2+} par Cl^-), en plus de la dépolarisation par l'oxygène, lorsque les surfaces cathodiques de cémentite (Fe_3C) augmentent.

Dans les acides, la vitesse de corrosion augmente au même temps que la teneur en carbone et en azote des aciers. L'importance de cette augmentation dépend principalement du traitement thermique et elle est plus grande pour les aciers travaillés à froid.

Le soufre et le phosphore augmentent fortement la vitesse d'attaque dans les acides. Ces éléments forment des composés qui apparemment ont une faible surtension d'hydrogène; de plus, ils diminuent la polarisation anodique, si bien que la vitesse de corrosion est stimulée à la fois par le site cathodique et anodique.

Tableau I-4: Effet des éléments d'élaborations et d'alliages de l'acier sur la vitesse de corrosion[3].

	Teneur (%)	Effet sur la vitesse de corrosion.
Arsenic	Petite quantité	Il augmente la vitesse de corrosion dans les acides de façon semblable au Soufre.
Arsenic	0.2%	Il diminue la vitesse de corrosion.
Manganèse	1%	Il n'a pratiquement pas d'influence sur la vitesse de corrosion dans les aciers commerciaux.
Cuivre	quelques 1/10	Neutralise l'effet des éléments S et P, qui sont des composants normaux des aciers commerciaux. Ce type d'aciers qui contiennent quelques 1/10 % de Cu sont plus résistants à l'atmosphère mais ne sont plus résistants que les aciers sans Cuivre dans les eaux douces, ou quand ils sont enterrés dans le sol où la diffusion de l'O ₂ contrôle la vitesse de corrosion.
Chrome	3%	Diminue faiblement la perte de poids de l'acier dans l'eau douce ou dans l'eau de mer, et pour cette teneur la profondeur des piqûres est minimale. C'est-à-dire que pour des plus faibles ou de plus fortes teneurs en Chrome, la corrosion localisée devient plus prononcée. Résistance améliorée à la fatigue-corrosion dans les eaux salées des puits pétrolifères exempts de H ₂ S. Meilleure résistance vis-à-vis des eaux salées contenant du H ₂ S.
Nickel	<5%	le Nickel diminue la vitesse de corrosion des aciers exposés aux alcalis, l'effet augmente avec la teneur en Ni de l'acier.

2. Influence des effets galvaniques dus au couplage d'aciers de compositions différentes

La composition de l'acier n'a pas d'effets déterminants sur la vitesse de corrosion dans les eaux naturelles ou les sols mais elle a une importance capitale sur les relations galvaniques et en conséquence sur la corrosion des aciers couplés entre eux. Par exemple, un acier faiblement allié au Ni ou au Cr est cathodique vis-à-vis d'un acier ordinaire dans la plus part des milieux naturels. Ainsi les vis et les écrous en acier utilisés pour assembler des canalisations en acier ordinaire enterrées, ou un cordon de soudure utilisé pour assembler des plaques d'acier sur la coque d'un navire, devront toujours être en acier faiblement allié au Ni ou Cr, ou avoir une composition telle qu'ils soient cathodique vis-à-vis du reste de la structure (petite cathode, grande anode). Si un changement de polarité se produit, de sérieux dégâts seront rapidement causés soit aux boulons, soit aux zones critiques soudées du métal.

3. Influence du traitement thermique

L'influence du traitement thermique sur la vitesse de corrosion d'un acier au carbone dans l'acide sulfurique dilué est caractérisé par les résultats de Heyn et Bauer[3], figure ci-dessous.

Un acier au carbone trempé à partir d'une température élevée a une structure martensitique. la distribution au hasard des atomes de carbone accompagnée de l'interaction électronique des atomes de carbone avec les atomes voisins du fer, limite leur efficacité comme cathodes des piles locales, de ce fait, la vitesse de corrosion de la martensite est relativement faible dans l'acide dilué.

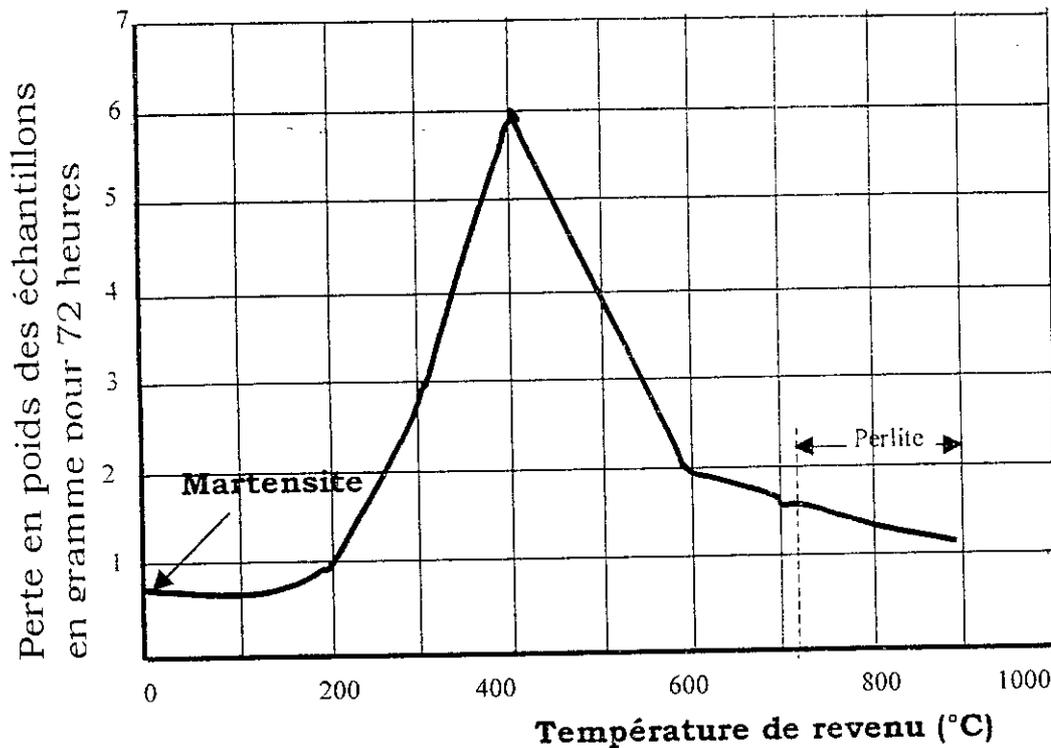


Figure I-14: Influence du traitement thermique sur la corrosion d'un acier à 0.95% de carbone dans H_2SO_4 à 1%, (temps de revenu de 2 heures)[3].

En chauffant une martensite à basse température puis en la refroidissant à l'air (revenu), il se produit une décomposition conduisant à un carbure ϵ de composition inconnue. Cette structure biphasée produit des piles qui accélèrent la réaction de corrosion. De la cémentite finement divisée (Fe_3C) apparaît aussi par décomposition de la phase epsilon, dont la quantité formée est maximale aux environs de 400°C pour une durée de traitement de 2 heures.

Au-dessus de cette température, la cémentite coalesce en particules de grandes dimensions et la vitesse de corrosion décroît. En refroidissant lentement l'acier à partir de la région austénitique au-dessus de 723°C, la cémentite prend une forme lamellaire appelée perlite (réseau cubique à faces centrées). Cette structure se corrode à une vitesse relativement lente à cause de la forme massive de la cémentite formée par décomposition de l'austénite

comparée aux particules de cémentite de faibles dimensions résultant de la décomposition de la martensite.

En pratique, une influence du traitement thermique sur la corrosion est rarement observée à cause du contrôle de la vitesse par diffusion de l'O₂ dans les milieux courants.

I-3 Morphologie de la corrosion des installations enfouies et immergées

Introduction

La morphologie de la corrosion et les sites de sa formation sont inhérentes à la nature du matériau (composition, état structural et mécanique), à la nature du milieu (composition, concentration, pH, conductivité électrique) et aux conditions de température et de contraintes. Un acier présentant des hétérogénéités physico-chimiques et de surface peut subir simultanément plusieurs formes de corrosion.

I-3-1 Formes de corrosion

I-3-1-1 Corrosion uniforme

C'est la forme la plus commune de la corrosion. La réaction chimique ou électrochimique se produit de manière uniforme sur toute la surface. Cette forme se développe dans une surface homogène exempte de défauts.

La corrosion uniforme, comparées aux autres formes, ne présente pas un grand danger car elle peut être contrôlée par le suivi de la diminution de l'épaisseur au cours du temps. De même, les caractéristiques mécaniques du métal rapportées à l'unité de longueur et de surface ne sont pas modifiées. La vitesse de corrosion s'exprime par :

- La pénétration annuelle en mm/an ;
- La perte de poids calculée en mg/dm²/j.

On peut citer la rouille de l'acier qui forme une barrière aux attaques de l'oxygène et des électrolytes.

I-3-1-2 Corrosion par crevasse (caverneuse)

Contrairement à la corrosion uniforme, la corrosion peut se produire dans certains sites préférentiels de la surface qui peuvent être soit des zones de rupture du film protecteur, des dépôts divers ou des défauts liés à la surface du métal, figure I-15.

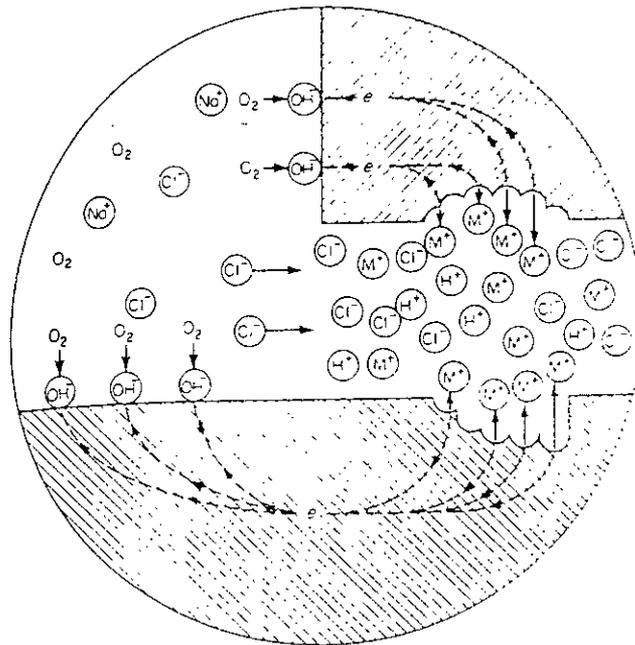


Figure I-15: Corrosion par crevasse, stade final[26].

L'existence de dépôts et d'interstice entre deux pièces métalliques ou entre une pièce métallique et une partie non métallique, permet à des solutions électrolytiques de stagner.

Cette région est moins aérée que le reste de la structure, elle subit une corrosion. La forme du défaut est une cavité ou crevasse. Celle-ci doit être suffisamment large pour permettre la pénétration des liquides et assez étroite pour constituer une zone de stagnation. Le mécanisme de corrosion est classique :

- Dissolution du fer dans l'interstice ;



- réduction de l'oxygène dans le voisinage des régions cathodiques ;

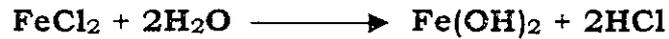


après un certain temps se produit l'épuisement en oxygène dans la cavité, et une baisse de la concentration en ions OH⁻.

Les ions chlorures Cl⁻ migrent vers la cavité et réagissent avec les ions Fe²⁺.



➤ le chlorure de fer formé s'hydrolyse :



Le pH décroît dans la crevasse ce qui accélère l'attaque. en réalité, la corrosion commence à partir d'une certaine valeur du pH (pH de passivation).

La corrosion par crevasse est très dangereuse, en particulier, dans les eaux de mer. Pour diminuer le risque de corrosion par crevasse, il faut éviter l'utilisation des boulons et des rivets pour les assemblages, en les remplaçant par la soudure.

I-3-1-3 Corrosion par piqûres

C'est une attaque très localisée qui se développe sous forme de cavités profondes ou trous. Ces cavités ont un diamètre en surface inférieur à leur profondeur. Ce type de corrosion est favorisé par l'existence, à la surface, d'un certain type de défauts :

- points de rupture dans le film ;
- présence de dépôts très fins ;
- présence de défauts de surface sous formes de fine cavités dans lesquelles stagnent des gouttelettes d'un électrolyte.

Les piqûres sont de faible taille et difficiles à détecter, car elles sont remplies de débris de corrosion. Ce n'est qu'après un stade de leur croissance qu'elles deviennent visibles.

Les mécanismes de la croissance par piqûres sont semblables à ceux des crevasses mais, la croissance se fait plutôt en profondeur, contrairement aux crevasses, figure a et b.

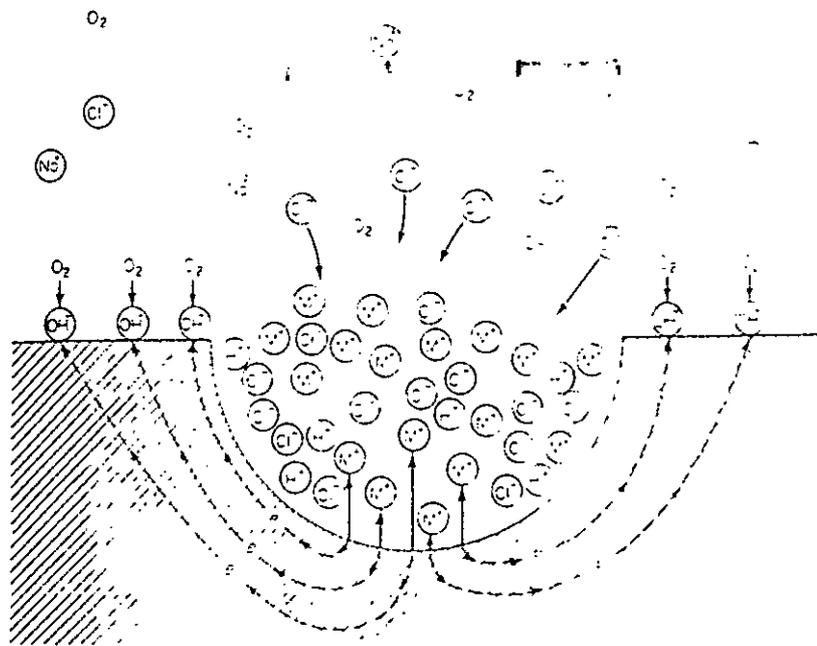


Figure I-16-a: Processus autocatalytique d'une piqûre[10,26].

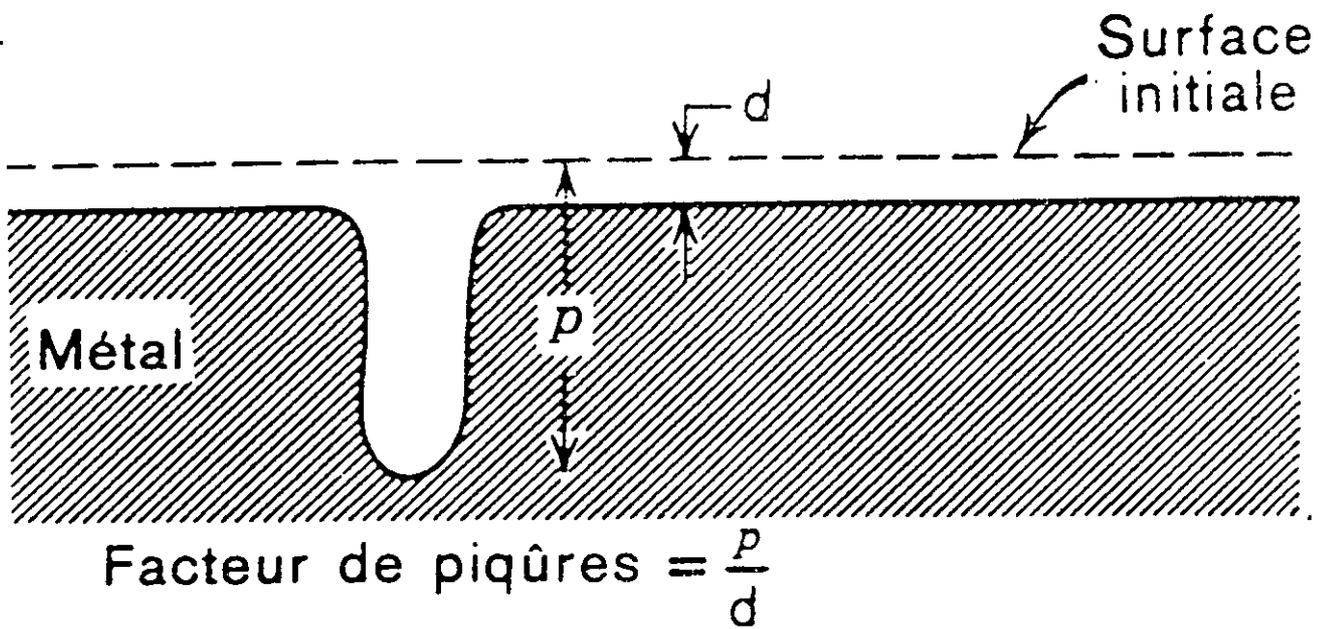


Figure I-16-b: Schéma illustrant le facteur de piqûre[10].

Les facteurs de la corrosion par piqûre sont :

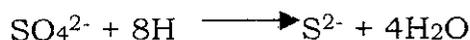
- la composition de l'acier, les éléments Cr, Ni, Mo, et N améliorent la résistance à la corrosion par piqûre. Par contre C, Si l'affaiblissent;
- le soufre et les composés sulfures (H₂S, SO₂) ont un effet néfaste ;
- les ions chlorures et halogénures favorisent ce type de corrosion ;
- la température et la présence de débris ont un effet négatif ;
- l'agitation et l'écoulement du milieu liquide a un effet positif sur la résistance des aciers.

I-3-1-5 Corrosion bactérienne

Il convient de tenir compte des effets bactériens dans toute étude de la corrosion ou de protection. Trois classes de bactéries sont à retenir.

➤ **Les ferrobactéries:** Elles prélèvent l'énergie pour leur métabolisme par l'oxydation des ions ferreux en ions ferriques. Elles sont aérobies et le mécanisme de la corrosion est ici l'aération différentielle d'Evans, car les résidus de la colonie empêchent la diffusion de l'oxygène dans certaines zones.

➤ **Les bactéries sulfato-réductrices:** Elles sont généralement anaérobies. Au niveau des plages cathodiques, ces bactéries consomment l'hydrogène et transforment les sulfates présents en sulfures selon la réaction suivante:



Globalement, du sulfure de fer est formé:



Les bactéries sont détruites si le pH du milieu atteint 9.5[7]. Il s'ensuit qu'une protection cathodique convenable peut en venir à bout.

Les thiobacilles: Ces bactéries sont aérobies et peuvent se développer en absence de matière organique. Leur métabolisme aboutit à l'apparition d'acide sulfurique et la corrosion survient par abaissement du pH

LA PROTECTION CATHODIQUE

II-1 Généralités

La protection contre la corrosion des métaux comporte plusieurs démarches auxquelles on a recours séparément ou conjointement. Les principes généraux sont les suivants :

- choisir le matériau métallique le plus adapté et résistant dans le milieu considéré ;
- isoler la surface métallique du milieu corrosif par l'application d'un revêtement protecteur (métallique ou organique : peinture, matière plastique) ou par une modification de la surface du matériau (phosphatation, chromatisation, oxydation) ;
- agir sur le milieu par l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion (organiques ou minéraux) ;
- utiliser des méthodes électriques consistant à imposer un courant électrique (anodique ou cathodique, selon le cas) au système, ce qui empêche ou atténue considérablement la vitesse de corrosion du métal. Dans la protection anodique, le courant crée un film d'oxyde superficiel et rend passif le métal à protéger. Dans la protection cathodique, on utilise un générateur ou des anodes solubles, dites sacrificielles, à base de zinc, magnésium et aluminium, pour porter le métal à protéger à un potentiel où la réaction de dissolution de ce dernier ne se produit pas.

II-2 Protection d'une installation enterrée ou immergée

Pour protéger une installation enterrée dans le sol ou immergée dans l'eau contre la corrosion, un programme complet de protection est appliqué. Ce programme comprend les procédés suivants :

- revêtement métallique (galvanisation, électrozingage ou peinture au zinc) ;
- revêtements non métalliques : peintures à base de polymères, sur des surfaces intérieurs et extérieurs ;
- revêtement des surfaces extérieurs avec du brai de houille ;
- protection cathodique ou anodique ;
- utilisation des inhibiteurs de corrosion.

II-2-1 Revêtements métalliques

La plus part des revêtements métalliques s'obtiennent soit par immersion rapide dans un bain de métal fondu (immersion à chaud), soit par électrodéposition à partir d'un électrolyte aqueux.

Les revêtements de zinc, sont obtenus par immersion à chaud (galvanisation) ou par électrodéposition (électrozingage).

Les revêtements de zinc résistent relativement bien aux atmosphères rurales ainsi qu'aux atmosphères marines sauf lorsque des embruns viennent en contact direct avec la surface. Des essais effectués aux U.S.A ont montré qu'un revêtement de faible épaisseur 0.030 mm (1 μ de zinc=17,5g/cm²) durait environ 11ans dans les régions rurales ou suburbaines et environ 8 ans dans les régions côtières[3]. Dans les atmosphères industrielles, d'autre part la moyenne de vie n'est que 4ans, ce qui indique que le zinc s'attaque facilement au contact de l'acide sulfurique provenant des atmosphères polluées.

Dans les milieux aqueux, à température ambiante, la vitesse de corrosion totale, pour des essais de courtes durée est plus basse pour un pH compris entre 7 et 12. Dans les milieux acides ou très alcalins, l'attaque la plus importante est celle produite par le dégagement d'hydrogène. Au-dessus d'un pH d'environ 12,5 le zinc réagit rapidement pour former des zincates solubles selon la réaction:



La relation de la pénétration de corrosion en fonction du pH est représentée sur la figure ci-dessous.

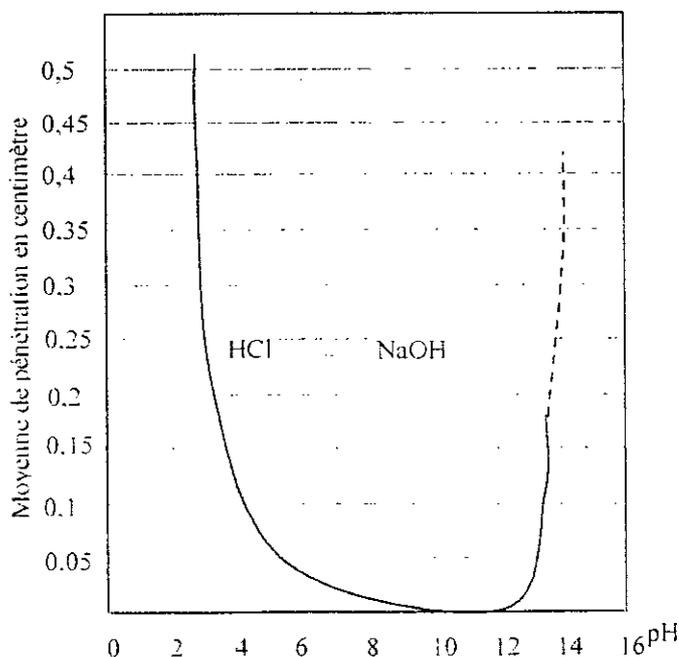


figure II-1: Influence de pH sur la corrosion du zinc, en solutions aérées, à 30°C[3].

Le procédé de galvanisation exige une préparation de la surface des pièces et des structures. La préparation de surface consiste à la pratique des opérations suivantes :

1. dégraissage par des solutions alcalines pour enlever les graisses et les salissures ;
2. un décapage à l'acide (HCl , H_2SO_4) pour enlever la peinture ;
3. un fluxage au sel double (NH_4 , NH_4OH) pour améliorer l'adhérence. L'épaisseur du dépôt doit être théoriquement calculée pour la durée de vie prévue ; en eau de mer on se base généralement sur la corrosion linéaire dans le temps de $25\mu/\text{an}$. Pour les superstructures de plates-formes on adopte généralement pour épaisseur des parties galvanisées 70 à 80μ [20]. Habituellement le procédé permet d'obtenir des épaisseurs couramment comprises entre 50 et 125μ . On utilise généralement 120μ pour les caillebotis pour l'offshore. Certains considèrent possible de réaliser pour l'offshore des galvanisations plus épaisses (150 à 300μ), aucun problème de soudage ne se posant si l'épaisseur de l'acier est inférieure à 15mm.

Le zinc est un revêtement sacrificiel donc le courant galvanique à travers l'électrolyte va du revêtement vers le métal de base l'acier ce qui provoque une protection cathodique du métal d'où la corrosion du métal de base ne se produit pas. C'est pourquoi le degré de porosité des revêtements sacrificiels, n'a pas une grande importance[3]. Par conséquent, plus le revêtement est épais, plus la protection cathodique est de longue durée.

II-2-2 Les revêtements organiques

Les peintures sont des mélanges de pigments insolubles en suspension dans un véhicule organique continu. Les pigments se composent généralement d'oxydes métalliques, par exemple TiO_2 , Pb_3O_4 , Fe_2O_3 ou d'autres composés tels que ZnCrO_4 , PbCO_3 , BaSO_4 , les argiles etc. Le véhicule peut être une huile naturelle comme l'huile de lin ou l'huile de bois de chine.

Les résines vinyliques résistent très bien à l'eau. Leur résistance aux alcalis permet de les utiliser pour peindre des structures à protéger cathodiquement. En général, les peintures ne sont pas utilisables pour la protection des structures enterrées car la destruction mécanique des dépôts finis au contact du sol est difficile à éviter. Des essais en montrèrent que pour cette utilisation leur durée de vie est relativement courte. On a trouvé que les revêtements de goudron de houille épais étaient moins chers et beaucoup plus pratique.

De manière analogue, les peintures à huile de lin ne sont pas de longue durée pour les structures métalliques totalement immergées dans l'eau. Par contre la plupart des peintures conviennent mieux pour la

protection des bacs de stockage ou des pipes contre la corrosion atmosphérique et c'est là leur principale utilisation. On peut citer :

II-2-2-1 Les résines synthétiques thermodurcissables

1. Les peintures époxydiques

Les liants époxydiques sont utilisés industriellement compte tenu de leurs caractéristiques physico-chimiques et des propriétés intrinsèques des revêtements filmogènes après durcissement. Ils sont employés dans la formulation de peintures anticorrosion pour la protection des intérieurs de canalisation, des citernes et se présentent sous forme liquide ou sous forme de poudre. La dégradation du polymère sous l'action du rayonnement ultraviolet fait que, pour des épaisseurs inférieures à 100 μ , on préférera les utiliser comme peinture primaire. Néanmoins, pour protéger des installations métalliques dans des atmosphères agressives ces liants peuvent ne pas être recouverts par une peinture de finition. Dans ce cas des épaisseurs des feuillets secs doivent au moins être égales voir supérieures à 500 μ m.

Les résines époxy résistent également aux alcalis et à beaucoup d'autres milieux chimiques, elles ont la propriété marquée de très bien adhérer aux surfaces métalliques. Cette dernière propriété provient probablement de la présence d'une certaine quantité de groupe polaire disponible dans la molécule. Ces résines sont à la base de mélanges plastiques qui, par l'action de catalyseurs appropriés, se solidifient en un temps court. Cette propriété est utilisée pour le colmatage des fuites dans des canalisations ferreuses ou non ferreuses.

2. Les peintures polyuréthanes

Les peintures polyuréthanes à deux composants sont des préparations qui, après application et séchage; donnent des films renfermant, pour l'essentiel, des fonctions uréthane.

Ces fonctions chimiques ont le résultat de la réaction d'un durcisseur (polyisocyanate) sur une base (polyhydroxydé) qui est un composé organique, c'est-à-dire des polymères renfermant des hydrogènes labiles. Ces peintures sont principalement utilisées dans le domaine des peintures industrielles dont la spécificité dépend de la nature chimique des composants.

II-2-2-2 Les polymères thermoplastiques

Ces produits de revêtements sont dits thermoplastiques car une élévation de la température a pour effet de les ramollir et de les faire passer de l'état solide à l'état liquide visqueux. Ils reprennent leur état premier lorsque la température est revenue à sa valeur initiale.

Ces résines sont obtenues par synthèse à partir de corps chimiques simples appelés monomères, qui par polymérisation donnent les polymères à

longues chaînes. Les principales résines utilisées en revêtement de canalisations sont:

- ⇒ Le chlorure de polyvinyle;
- ⇒ Le polyéthylène;
- ⇒ Les polyamides.

Elles se caractérisent par de très intéressantes propriétés mécaniques et chimiques. Le tableau N° en annexe résume les principales.

II-2-2-3 Les revêtements à liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont des produits utilisés le plus couramment pour la réalisation des revêtements. On distingue deux grandes classes:

- ⇒ Les dérivés des goudrons de houille;
- ⇒ Les dérivés du pétrole.

1. Liants dérivés des goudrons de houille

Les goudrons de houille utilisés sont obtenus par pyrogénéation à haute température vers 1200°C. Le goudron brut ainsi obtenu donne par distillation une série de produit.

A partir de ces différents produits on prépare les liants hydrocarbonés utilisés pour la confection des revêtements, essentiellement par deux procédés:

Le plus ancien, consiste à chauffer à haute température un mélange de brai de l'huile plastifiante avec de la poudre de charbone gras[4].

Le plus récent, consiste à mélanger en proportions définies de brai avec des constituants cristallins et des huiles plastifiantes[4].

Pratiquement tous les éléments présentent dans leur constitution des noyaux aromatiques, seule structure stable aux températures très élevées de leur formation. Cette structure confère à ces liants leur principales qualités d'imperméabilité, d'inertie chimique et surtout de résistance aux bactéries et aux micro-organismes présents habituellement dans les eaux et les sols.

Ces liants hydrocarbonés sont habituellement associés avec des charges minérales (filler) nécessaire pour obtenir les qualités recherchées.

Il faut que les caractéristiques du revêtement soient adoptées aux conditions de température de service de celui-ci. Les principales caractéristiques des revêtements hydrocarbonés dérivés des goudrons de houille sont résumées en annexes.

2. Les liants dérivés du pétrole

Ils sont appelés généralement bitumes et ils peuvent avoir deux origines:

- ⇒ **Les bitumes naturels ou asphaltes:** Ils résultent de la transformation du pétrole au cours des âges.
- ⇒ **Les bitumes de synthèse:** Ce sont les plus utilisés et ils sont produits en usine par oxydation à haute température des fractions lourdes résultants de la distillation des pétroles. Ce traitement confère au produit des caractéristiques mécaniques satisfaisantes d'élasticités et de souplesse.

Les principales caractéristiques des revêtements hydrocarbonés dérivés des pétroles sont résumées en annexes.

II-2-2-4 Exemple d'utilisation d'un système de peinture de base

A la suite développement des peintures réalisé au cours des années cinquante et soixante et en particulier de la mise au point des primaires de zinc inorganique et de la généralisation des peintures thixotropiques permettant d'obtenir des couches épaisses de (100 à 125 μ au lieu de 30 à 40 μ en général), une pratique courante s'est dégagée pour la protection des structures du golf du Mexique en atmosphère marine. Ainsi 90% des nouvelles constructions américaines réalisées entre 1967 et 1973 ont eu pour spécification: primaire au silicate de zinc de 75 μ plus une couche de 125 μ vinylique H.B ou époxy H.B plus une couche 50 μ environ de vinyl-acrylique[20]. De plus on peut dire que le système silicate de zinc plus époxy-polyamide est le plus utilisé sur ce site géographique où il est généralement reconnu comme le plus efficace. Une variante est d'utiliser un primaire type Zn-epoxy à la place du silicate de zinc (très généralement un éthylsilicate), ce qui semble préférer EXXON actuellement[20]. H.B, signifie "high-build", c'est-à-dire couche épaisse obtenue à l'aide d'une peinture thixotropique.

Au Brésil les bacs et équipements divers reçoivent 120 μ de silicate de zinc plus 100 μ d'epoxy-polyamide. Bien que certains, comme SHELL, ne spécifient en mer du Nord que des systèmes epoxy, des systèmes silicate Zn plus caoutchouc chloré se sont développés et sont parfois préférés, d'autant plus qu'ils sont très facilement entretenus. Ces systèmes sont assez utilisés sur les plates-formes mobiles, et British petroleum (B.P) les utilise avec une épaisseur totale de 250 μ à 300 μ . Par contre certains considèrent que le système vinyliques se sont mal comportés en mer du nord.

Un autre type de système, préconisé par SHELL, consiste à la formulation : shop-primer epoxy-Zn plus brai-epoxy plus finition caoutchouc chloré. Au Brésil ce systèmes utilisé en concurrence du système silicate de zinc-epoxy sous la forme 100 μ epoxy-zinc plus 300 μ brai-epoxy plus 50 μ caoutchouc chloré[20].

II-2-2-5 Caractéristiques des revêtements

les caractéristiques à rechercher pour obtenir un bon revêtement sont :

1. Isolement électrique: Evans en 1923 a montré que la corrosion est le résultat de phénomènes électrochimiques entre le métal et le milieu ambiant. Le revêtement, pour s'opposer à ces phénomènes, doit donc constituer un bon isolant électrique.

Pour les conduites sous protection cathodique, le revêtement isolant maintient aux moindres frais le potentiel négatif nécessaire à la protection. Il permet ainsi des économies de courant, d'entretien ou d'anodes solubles, ainsi que la réduction du nombre de postes en augmentant la portée efficace de ce-ci. Il évite également les interactions entre la conduite protégée et les ouvrages métalliques enterrés au voisinage.

Avec un revêtement d'une bonne isolation l'intensité moyenne de protection est $0,01\text{mA/m}^2$, alors qu'un revêtement médiocre nécessite une intensité pouvant atteindre 10mA/m^2 , et plus [4].

Les matériaux utilisés ont, en général, une résistivité aux environs de 10^{14}Ohm.cm . C'est une excellente valeur qui se traduirait théoriquement pour un revêtement de 3mm d'épaisseur par une résistance moyenne de $3 \times 10^9 \Omega/\text{m}^2$.

2. Perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau: La perméabilité d'un revêtement varie avec, la nature du liant utilisé, la teneur en charge minérales incorporées et la nature de celui-ci. Les matériaux bitumineux, dérivés des goudrons de houille ou du pétrole, se placent parmi les meilleurs sur le plan imperméabilité.

Nous donnons ci-après les valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau mesurés sur différents matériaux utilisés pour les revêtements, les mesures étant effectuées sur les films de 0,6mm d'épaisseur [4].

Tableau II-1: Perméabilité à 20°C en $\text{g/m}^2/24\text{h}$ [4]:

Un liant bitumineux dérivé de Houille.....	0,2
Un liant bitumineux dérivé de pétrole.....	1,0
Un polyéthylène.....	1,5
Un chlorure de vinyle plastifié.....	10

3. Résistance chimique : Le revêtement doit présenter une inertie totale en présence des produits chimiques pouvant exister dans les eaux ou dans les sols, nappes salées, milieu humide acide, fond marécageux, tourbières ou sols pollués par des effluents d'usine.

Le revêtement ne doit manifester aucune tendance à l'émulsification. Ce phénomène peut être favorisé par l'action d'éléments tensioactifs tels les acides naphthéniques qu'il est susceptible de renfermer.

Enfin, en raison des risques de pollution accidentelle du terrain, il faut souligner l'importance de l'insolubilité du revêtement dans les hydrocarbures dans le cas des revêtements extérieurs des conduites véhiculant des produits pétroliers.

4. Résistance biologique : On a pu déceler dans les eaux et dans les sols la présence de nombreuses variétés de micro-organismes, quelle que soit le milieu, aérobie ou anaérobie. Ces micro-organismes peuvent provoquer la dégradation de divers matériaux. Les revêtements mis à leur contact doivent donc présenter une résistance à l'action de ces micro-organismes. L'attaque des revêtements bitumineux est si lente qu'on ne peut s'en apercevoir à la diminution de l'épaisseur.

D'une façon générale les asphaltes de distillation directe sont plus biodégradables que les asphaltes soufflés et on peut dire aussi que les revêtements à base de brai de houille résistent mieux que les revêtements pétroliers dont les constituants huileux sont toujours attaqués en premier.

5. Résistance mécanique : Parmi les principales qualités qu'ils devront présenter nous citerons:

- **La dureté et la cohésion:** Pour un revêtement extérieur, la dureté doit être suffisante pour résister aux effets d'écrasement des matériaux de remblayage de la tranchée. On est souvent amené à renforcer le revêtement par une protection mécanique extérieure (feutre d'amiante). Pour un revêtement intérieur la dureté doit permettre de résister aux effets d'abrasion et d'entraînement provoqué par le fluide véhiculé.
- **La fragilité aux chocs:** Les canalisations sont souvent enrobées en usine. Le revêtement est ainsi soumis à de nombreux chocs pendant leur acheminement vers le chantier au cours des manutentions, transport, stockage ou mise en place. Aussi bien le revêtement extérieur soumis à des chocs directs que le revêtement intérieur soumis à des chocs indirects, doivent résister et ne pas s'écailler.
- **Insensibilité aux variations de la température :** La plupart des matériaux utilisés pour la confection des revêtements voient leurs propriétés mécaniques modifiées suivant la température. Pour les revêtements usuels une élévation de la température rend le

revêtement plus souple. Au contraire le froid augmente la fragilité. Il est donc nécessaire de vérifier le comportement du revêtement dans la gamme de température qu'il peut être ramené à subir soit au cours des transports, soit pendant son service.

- **Adhérence:** C'est une propriété fondamentale aussi bien qu'au revêtement intérieur qu'extérieur. Elle garantit la valeur d'isolement du revêtement et évite le cheminement éventuel de la corrosion sous celui-ci en cas de blessures locales. Pour les revêtements extérieurs il est important de vérifier que l'adhérence n'est pas compromise par la polarisation due à la protection cathodique. Pour les revêtements intérieurs l'adhérence est la condition indispensable permettant d'éviter les décollements favorisés par la vitesse du fluide ou par les variations importantes de pression. L'adhérence d'un revêtement dépend de plusieurs facteurs, de l'état de surface du métal et Les propriétés intrinsèques du matériau de revêtement, et en particulier, la tension interfaciales entre le support et le revêtement..

II-3 La protection cathodique par courant imposé

II-3-1 Principe

Il s'agit d'une modification dans le comportement électrochimique du métal dans le milieu corrosif par l'intermédiaire d'un courant électrique c'est-à-dire de mettre à profit l'effet d'un courant électrique injecté dans l'électrolyte à partir d'une anode-déversoir. On utilise pour cela une source de courant continu dont le pôle positif est relié à l'anode et le pôle négatif à structure à protéger. Le système est dit aussi "énergisé" ou à soutirage de courant. La figure II-2 ci-dessous nous donne le principe.

On peut aussi établir un graphique potentiel-pH, connu par le diagramme de Pourbaix dont lequel on constate trois régions particulières, figure II-1.

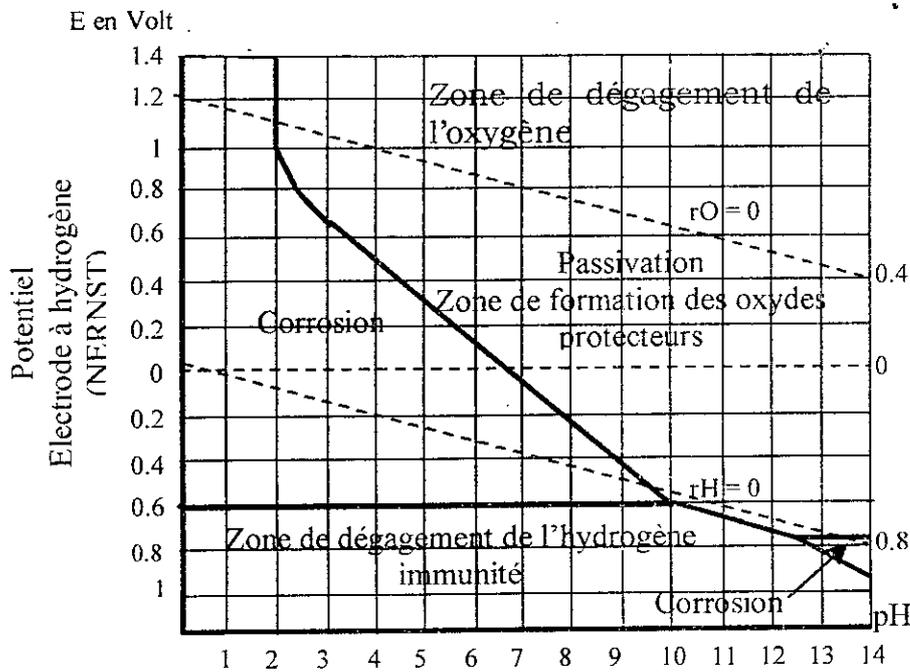


Figure II-1 : Diagramme de Pourbaix[14]

- Une région où la corrosion du fer se produit, domaine de corrosion ;
- Une région où la corrosion du fer ne peut se produire théoriquement en raison du dépôt d'oxyde Fe_2O_3 qui constitue un revêtement protecteur, domaine de passivation ;
- Une région où la corrosion du fer est impossible, celui-ci étant suffisamment cathodique pour rester à l'état métallique, domaine d'immunité. c'est ce dernier cas qui constitue la protection cathodique par courant imposé.

La passivation n'offre, en ce qui concerne les canalisation enterrées, aucun intérêt particulier. Par contre on voit que le fer nu plongé dans une solution, porté et maintenu à un potentiel de $-600mV$ par rapport à l'électrode d'hydrogène restera dans la région d'immunité et ne se corrodera pas.

On remarque aussi que la limite supérieur du potentiel limitant cette région est sensiblement parallèle à l'axe de pH de sorte que celui-ci intervient peu dans le phénomène.

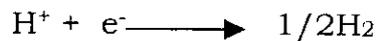
Donc le critère de protection cathodique est la valeur du potentiel au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder.

Les valeurs du potentiel les plus généralement admises sont :

- -0,600 volts par rapport à l'électrode d'hydrogène ;
- -0,770 volts par rapport à l'électrode au calomel,
- -0,850 volts par rapport à l'électrode de cuivre, sulfate de cuivre ; en pratique on peut aller jusqu'à -0,900 à -1 volts pour des raisons de sécurité, présence de bactéries par exemple et la variation de la conductivité de l'électrolyte en fonction du temps.

II-3-3 Calcul des vitesses de corrosion à partir des valeurs de polarisation

Dans le cas de la corrosion des métaux actifs dans les acides désaérés, par exemple, la surface du métal est généralement recouverte d'atomes d'hydrogène adsorbé et peut être considérée de ce fait comme étant principalement la cathode. Le potentiel en circuit ouvert est $-0,059\text{pH}$ et si i_{cor} est suffisamment grand par rapport à i_0 , pour la réaction



l'équation de Tafel exprime le comportement de polarisation cathodique :

$$E_{\text{corr}} = -[0,059\text{pH} + \beta \log\left(\frac{i_{\text{corr}}}{i_0}\right)]$$

β est la constante de Tafel, i_0 le courant d'échange à circuit ouvert et i_{cor} le courant de corrosion du métal.

Par la suite, Stern et Geary donnèrent l'équation :

$$I_{\text{corr}} = I_{\text{app}}/2.3 \Delta E \left[\frac{\beta_c \times \beta_a}{\beta_a + \beta_c} \right]$$

Où β_c et β_a correspondent aux constantes de Tafel pour les réactions cathodique et anodique et $\Delta E = E_{\text{corr}} - E_{\text{prot}}$ est la variation de potentiel que prend le métal lors d'une application d'un courant extérieur I_{app} .

II-3-4 Théorie de la protection cathodique

La protection cathodique est obtenue donc en appliquant un courant extérieur à un métal qui se corrode et à la surface duquel se forme des piles locales comme cela est représenté schématiquement à la figure suivant :

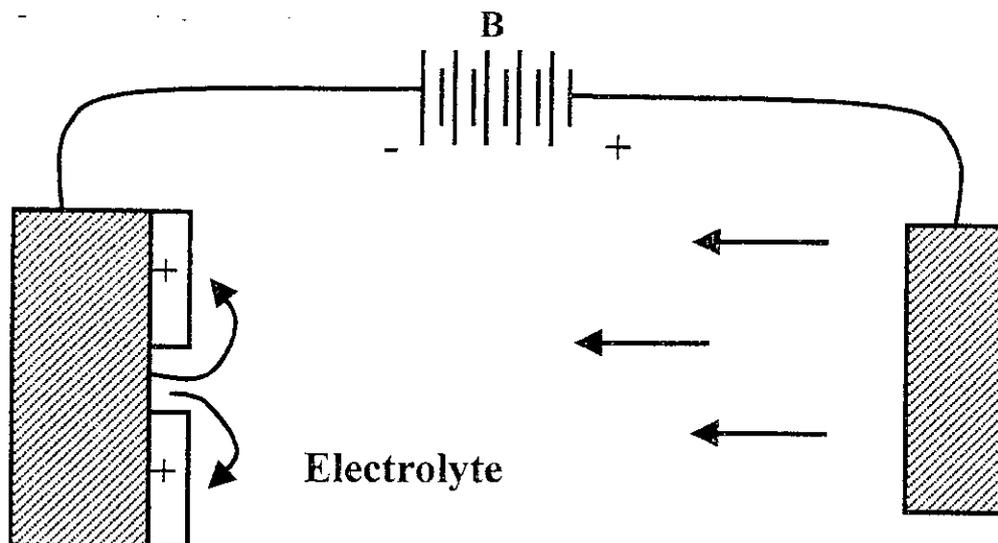


Figure II-4: Protection cathodique par superposition d'un courant appliqué aux courants locaux[3].

Le courant quitte l'anode auxiliaire (composé de conducteur métallique ou non métallique) et entre en même temps par les surfaces cathodique et anodique des piles de corrosion pour retourner à la source de courant continue. Quand les surfaces cathodiques sont polarisées par le courant extérieur jusqu'au potentiel en circuit ouvert des anodes, toute la surface du métal est au même potentiel et les piles ne peuvent plus fonctionner. De ce fait, le métal ne se corrode plus tant que le courant extérieur est maintenu. Le diagramme de polarisation suivant nous montre ce mécanisme où I_{app} est le courant nécessaire pour une protection cathodique totale.

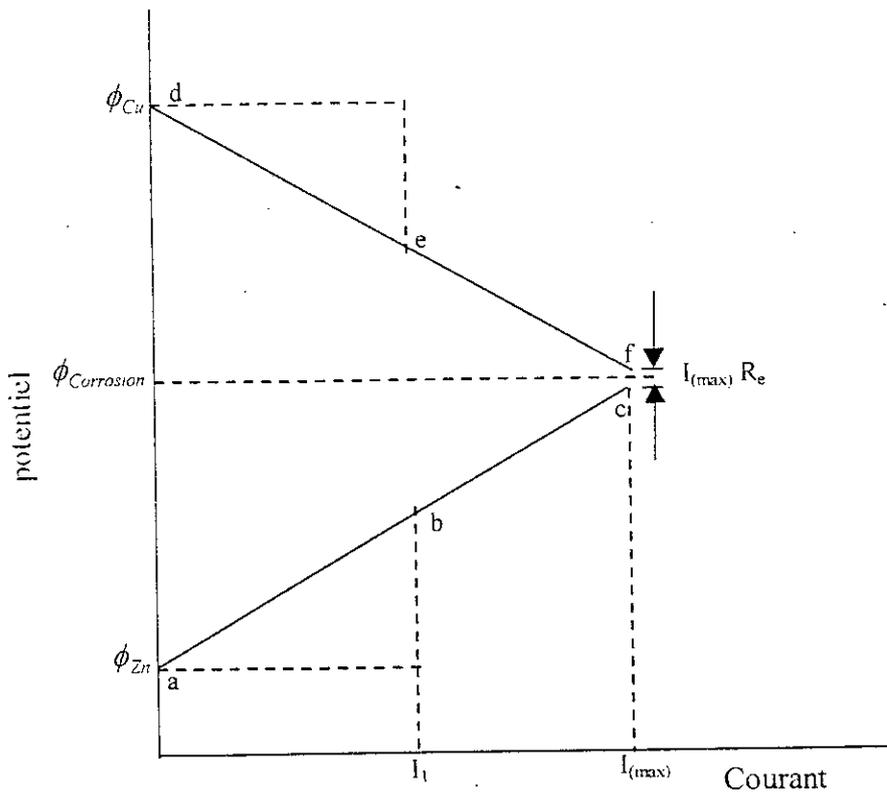


Figure II-5 : Diagramme de polarisation illustrant le principe de la protection cathodique[3].

Si le métal est faiblement polarisé au-delà du potentiel de l'anode en circuit ouvert ϕ_a , la vitesse de corrosion reste nulle. Tout le courant à l'aire anodique provient de l'électrolyte et pénètre dans le métal, les ions métalliques ne peuvent ainsi entrer en solution. Un courant supérieur à celui qui est nécessaire pour protéger n'est pas bon et nuire aux dépôts ou aux métaux amphotères. En pratique, le courant appliqué est donc voisin du minimum théorique. Si le courant tombe au-dessous du minimum requis, il subsiste néanmoins une certaine protection.

Par exemple, si le potentiel de corrosion est déplacé de c à e par un courant appliqué (b - e), le courant de corrosion décroît de I_{corr} à (a - b). le courant cathodique total (courant de corrosion + courant appliqué) est (a - e). lorsque le courant appliqué (b - e) augmente, le potentiel a se déplace vers les valeurs plus actives et le courant de corrosion (a - b) devient plus petit. A la limite, quand a coïncide avec ϕ_a , le courant de corrosion (a - b) devient nul et le courant appliqué, pour une protection cathodique total, est égale à I_{app} .

Nous remarquons que si le potentiel du fer dans l'eau peut être abaissé au-dessous de ϕ_a , les ions Fe^{2+} ne peuvent plus passer en solution. Le seuil de protection cathodique peut aussi être déterminé thermodynamiquement ; il correspond en effet à un état à partir duquel la réaction de corrosion devient impossible, on entre dans le domaine d'immunité.

Donc deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique : la densité de courant de protection et le potentiel de protection.

II-3-4-1 le potentiel de protection

Si le potentiel d'un métal est égal ou inférieur au potentiel de protection E_{prot} , la vitesse de corrosion ne peut, pour des raisons thermodynamiques, dépasser une certaine valeur que l'on suppose négligeable. On peut donc protéger un métal contre la corrosion en lui imposant un potentiel tel que :

$$E \leq E_{prot}$$

On définit le potentiel de protection E_{prot} par l'équation suivante [15] :

$$E_{prot} = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln 10^{-6}$$

10^{-6} mol/l est la concentration en ion Mn^{+} admise à l'interface métal solution pour que la vitesse de corrosion soit négligeable voir nulle et la protection du métal est ainsi réalisée.

Pour la température ambiante $25^{\circ}C$, cette expression devient :

$$E_{prot} = E^{\circ} - \frac{0.354}{n}$$

Il découle de cette équation que le potentiel de protection de l'acier vaut $-0,62V$, celui du cuivre $0,16V$ et celui du plomb $0,30V$, réalisé par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH), avec E° le potentiel standard et n le nombre d'électrons échangés.

II-3-4-2 La densité de courant de protection

La densité de courant de protection, qui est l'intensité par unité de surface, dépend essentiellement de la surface à protéger S ; de la qualité d'isolement du revêtement, et de l'agressivité du milieu environnant.

La densité de courant partiel anodique étant négligeable au potentiel de protection, i_{prot} équivaut donc à la densité de courant partiel cathodique i_c au potentiel $E = E_{prot}$. La relation suivante donne i_{prot} pour une réaction dont la cinétique obéit à l'équation de Butler-Volmer.

$$I_{prot} = i_c = - i_{corr} \exp\left(\frac{-E_{prot} - E_{corr}}{\beta_{cH}}\right)$$

β_{cH} est la constante de Tafel cathodique

Le plus souvent on estime par le calcul, le besoin en courant de protection cathodique de la structure, c'est-à-dire le courant qu'elle doit

recevoir pour que le seuil de protection soit atteint. Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience. le tableau suivant donne les valeurs de densité de courant cathodique couramment utilisées dans les sols ou dans certaines eaux de mer, pour l'acier au carbone non revêtu.

Tableau II-2 : Densités de courant de protection recommandées[1].

Milieus ou sites	Densité (mA/m ²)	Milieus ou sites	Densité (mA/m ²)
Sols ou eau douce	5 à 50	Golf du Mexique	50 à 80
Mer Méditerranée	60 à 80	Alaska	200 à 500
Mer du Nord	100 à 180	Fonds marins	20 à 30
Golf de Guinée	60 à 100	Solution ammoniacale	300
Golf Persique	65 à 130	Eau de ville	10

Quand la structure est revêtue, un coefficient de mise à nu de l'acier par dégradation doit être pris en compte. Pour les revêtements de pipeline, il est généralement compris entre 2 et 10 %[1], en fonction de la qualité présumée du revêtement.

II-3-5 Les caractéristiques du générateur

Le débit de l'appareille est défini par la loi d'ohm :

$$I = \frac{U}{R}$$

U est la tension de la source de courant continu et R est la résistance du circuit.

La tension U se situe habituellement dans la catégorie de très basse tension, inférieur à 50V. la résistance du circuit est généralement conditionnée par la résistance de la masse anodique. Il y a donc intérêt à obtenir pour cette masse anodique une valeur aussi faible que possible. Cependant, dans certains cas particulier (revêtement à forte valeur d'isolement), la résistance de contact avec le sol de la structure n'est pas négligeable et doit être prise en compte dans la valeur de la résistance du circuit. Le tableau ci-dessous nous donne les formules le plus souvent utilisées pour le calcul de la résistance d'anode.

Tableau II-3 : Résistance d’anode souvent utilisée dans le dimensionnement du système de protection[1].

Géométries	Formules	Auteurs
Anode cylindrique ou assimilée.		
➤ verticale (près de la surface)	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$	Dwight
➤ horizontale ou verticale (profondément enfouie)	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} - 1 \right)$	Dwight
➤ horizontale, enterrée à une profondeur h	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2 + L\sqrt{4h^2 + L^2}}{r.h} + \frac{2h}{r} - \sqrt{\frac{4h^2 + L^2}{L}} \right)$	Dwight
➤ enterrée à faible profondeur	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{D}$	Dwight
Anode massive de surface exposée S(Cm2) utilisée en off-shore	$R = \frac{0.315.\rho}{\sqrt{S}}$ $R = 1.66 \rho . S^{-0.727}$	Mac coy Peterson

ρ est la résistivité de l'électrolyte et L, r, D sont la longueur, rayon et diamètre de l'anode respectivement.

Dans le cas où la structure est longiligne telle que les pipelines, et que les points de connexion avec les anodes ou les soutirage de courant sont espacés, il faut tenir compte de la résistance électrique de la structure elle-même, qui provoque un effet d'atténuation du courant.

Si par exemple un poste redresseur débitant 10A protège 10 Km de conduite, ce même poste débitant 20A ne protégera pas 20 Km mais une longueur inférieure du fait justement de l'atténuation exponentielle du courant de protection.

Le traitement mathématique du problème d'atténuation du courant électrique est représenté en annexes.

II-3-6 Réalisation pratique d'un poste de protection cathodique à courant imposé

Il comprend les parties suivantes :

- la source d'énergie ;
- le déversoir anodique ;
- les câbles de liaison ;
- l'appareillage électrique auxiliaire.

II-3-6-1 La source d'énergie

La source d'énergie peut être constituée par :

- ◆ le réseau local de distribution ;
- ◆ l'énergie électrique d'origine solaire ;
- ◆ les groupes électrogènes et les turbogénérateurs ;
- ◆ les turbines entraînées par le fluide. Ce dispositif est intéressant lorsqu'il y a une perte de charge disponible (poste de détente de gaz par exemple).
- ◆ Les générateurs thermoélectriques ;
- ◆ Les éoliennes .

Les développements de la technologie laissent prévoir, pour l'avenir, l'utilisation des piles à combustibles, dont le prix est encore très élevé et les piles au lithium, avec un débit de quelques ampères.

II-3-6-2 Le déversoir ou masse anodique

C'est une masse en matériau conducteur de l'électricité dont le rôle est d'injecter le courant de protection dans le milieu où se trouve la structure à protéger. Sa résistance de contact avec le sol doit être la plus faible possible. Une bonne prise de terre pour la protection cathodique ne doit pas avoir une résistance supérieure à 1Ω [4], $1,5$ à 2Ω reste acceptable[2]. Il y a plusieurs matériaux utilisés comme déversoir anodique, on peut citer :

1. les ferrailles (rails, tubes en acier)

L'utilisation des ferrailles peut être intéressante, notamment lorsqu'elles sont enterrées à proximité de la structure à protéger. Les caractéristiques techniques sont :

- Milieu d'utilisation : convient à tous les milieux ;
- Consommation : 9 Kg/A.an ;

- Densité de courant admissible : pas limitée ;
- Masse spécifique : 7,8 g/Cm³.

Le prix de revient est notablement augmenté lorsque l'on doit transporter les rails ou les tubes, les raccorder par soudure et les enterrer.

2. Ferro - silicium

Ces anodes sont de mise en œuvre plus facile que les précédentes du fait qu'elles peuvent être livrées prêtes à l'emploi. Leur caractéristique sont :

- Milieu : convient à tous les milieux, mais dans le cas de milieu riche en chlorure, on utilise des anodes en Ferro - silicium additionné de chrome et éventuellement de molybdène ;
- consommation : 0,3 Kg/A.an ;
- densité de courant admissible: 0,2 A/dm² ;
- masse spécifique : 6,8 à 7 g/Cm³.

3. Graphite

Ces anodes sont d'un emploi courant pour la protection cathodique des ouvrages enterrés. Leur prix relativement faible (fourniture et pose). Par contre, elles ne sont pas recommandées pour l'utilisation en eau de mer. Enfin, leur point faible est constitué par la jonction câble - anode.

- milieu : tous les milieux, avec la présence d'un backfill ; qui est un mélange régulateur (voir sa composition en annexe), assure l'évacuation des gaz dans les milieux imperméables ;
- consommation : 1 Kg/A.an ;
- densité de courant : 0,08 A/dm³ ;
- masse spécifique : 1,6 g/Cm³.

En cas d'utilisation dans l'eau, prévoir des anodes imprégnées (imprégnation réalisées avec l'huile cokéfiée).

3. Titane platiné

Ces anodes résiste parfaitement à l'immersion en eau salée ou douce. Par contre, elles n'admettent pas en eau de mer, de potentiel supérieur à 7 V alors qu'on peut atteindre 15 à 20 V dans certaines eaux douces. Un taux d'ondulation du courant redressé inférieur à 5 % est recommandé et l'épaisseur du platine est de 2,5 μ minimum.

- milieu : eau de mer ou eau douce brassée, intérieur de réservoirs métalliques ou de conduites à usage alimentaire, etc ;

- consommation du platine : 9 mg/A.an ;
- densité de courant : 5 à 7 A/dm² ;
- masse spécifique du Titane: 4,5 g/Cm³.

La consommation ne concerne que le platine, l'autre métal (Titane) sert uniquement de support.

La masse spécifique du Platine est 21,3 g/Cm³ n'intervenant pratiquement pas en raison de la faible épaisseur, on considère seulement la masse spécifique du métal support le Titane. leur prix de revient reste relativement élevé.

II-3-6-3 Les câbles de liaison

La section des câbles est déterminée en fonction de la chute de tension admissible et de l'échauffement. Pour des raisons de tenue mécanique une section minimale de 25 mm² est recommandée[1].

La nature de l'isolant des câbles est déterminée en fonction du milieu (tenue aux hydrocarbures, à l'eau de mer, au chlore naissant, aux sols, etc...).

Dans beaucoup de cas un câble isolé au PVC est suffisant. Enfin, et surtout, une attention particulière doit être apportée aux conditions de pose afin d'éviter toute blessure accidentelle de l'isolant.

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

Pour cela, on doit marquer sur l'appareil :

DEVERSOIR +

STRUCTURE -

II-3-6-4 L'appareillage électrique auxiliaire

- ❖ **Appareils de coupure** : il s'agit de simple interrupteurs qui permette d'établir ou d'interrompre l'alimentation du poste de soutirage.
- ❖ **Appareils de protection** : Lorsque le posta est raccordé à un réseau de distribution, un disjoncteur doit être installé. cet appareil joue le double rôle, d'appareil de coupure et de protection contre les surcharges et surintensités.

En aval du poste, sur le circuit d'utilisation, on prévoit des fusibles calibrés.

Dans les zones orageuses, ou à proximité de lignes électriques à haute tension, on peut être amené à installer, en amont et en aval du poste, des limiteurs de tension.

❖ **Appareils de mesure** : les appareils de mesure installés à poste fixe ont pour but d'indiquer :

- ✓ la tension d'alimentation ;
- ✓ la tension d'utilisation ;
- ✓ l'intensité débitée ;
- ✓ le potentiel de la structure ;
- ✓ le temps de fonctionnement.

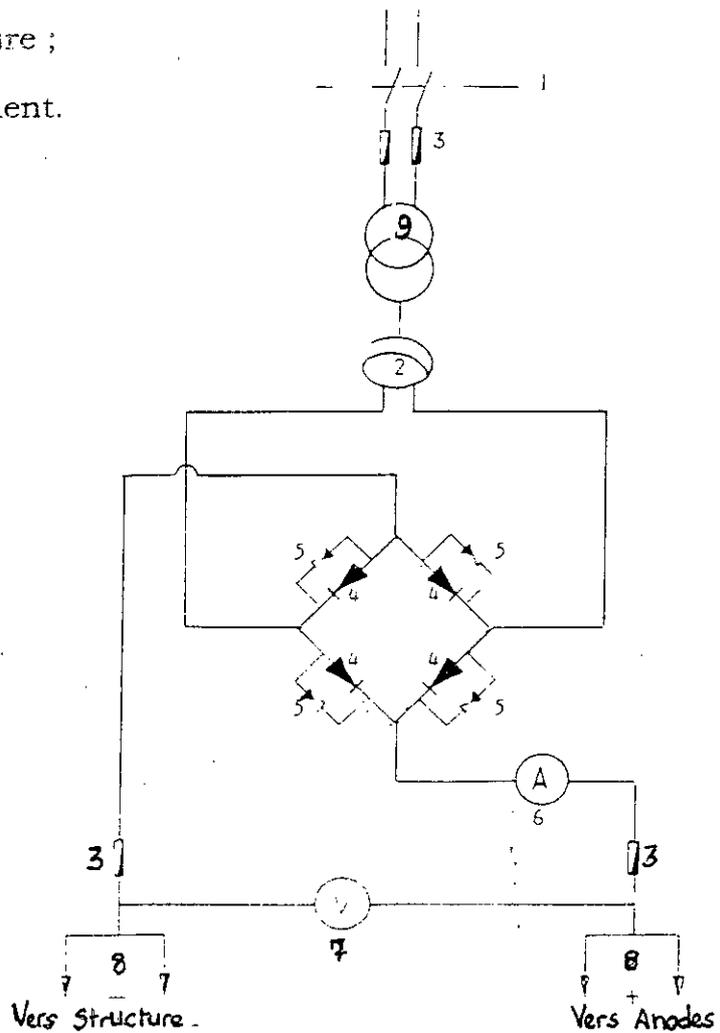


Figure II-6: Schéma de principe d'un poste redresseur.

Légendes :

- 1- Interrupteur calibré
- 2- Autotransformateur, primaire 220/280V, monophasé 50Hz - secondaire 80V/50A
- 3- Fusible
- 4- Pont de diodes (tension inverse 1.200V)
- 5- Protection parasurtension (cellule à effet Zener - tension inverse 400V)
- 6- Ampèremètre à courant continu 0 à 50A
- 7- Voltmètre à courant continu 0 à 100V
- 8- Borne de raccordement prévues pour câbles de 1× 50 mm
- 9- transformateur d'isolement

II-3-7 Réalisation des déversoirs

II-3-7-1 déversoirs de surface

1. anodes posées horizontalement : il est utilisé lorsque la résistivité du sol en surface est faible et lorsqu'on dispose de place sur le terrain. Il est recommandé, par exemple, lorsqu'on utilise de vieux rails ou autre ferraille de forme similaires ;

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

II-3-7-2 Déversoirs profonds

la technique d'utilisation consiste à forer un trou dont le cuvelage en acier est réalisé en tube de diamètre intérieur généralement compris entre 120 et 200 mm. Il est recommandé de mesurer la résistance de contact sol-cuvelage tous les 5 mètres par exemple. On arrête le forage à partir de laquelle la résistance mesurée décroît nettement. Ensuite de forer au dessous de cette profondeur pour recevoir la totalité des anodes prévues et les introduites dans le forage et les maintenir à l'aide d'un cordage imputrescible et non pas les câbles électriques, et constitué ainsi, des chapelets électriquement indépendants. Enfin de remplir l'espace entre anodes et tubage avec du graphite.

On utilise ce type de déversoirs lorsque

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

Les schémas des déversoirs de surface et profond pour la protection cathodique des installations en acier sont représentés dans les figures suivantes :

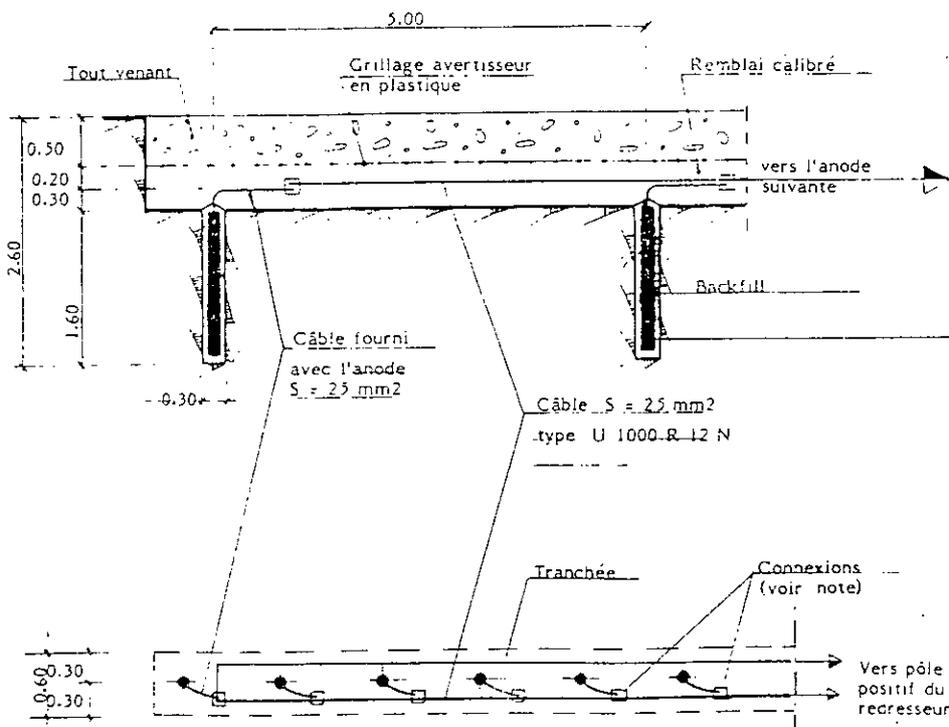


Figure II-7: Schéma du déversoir de surface avec anodes disposées en file unique[1].

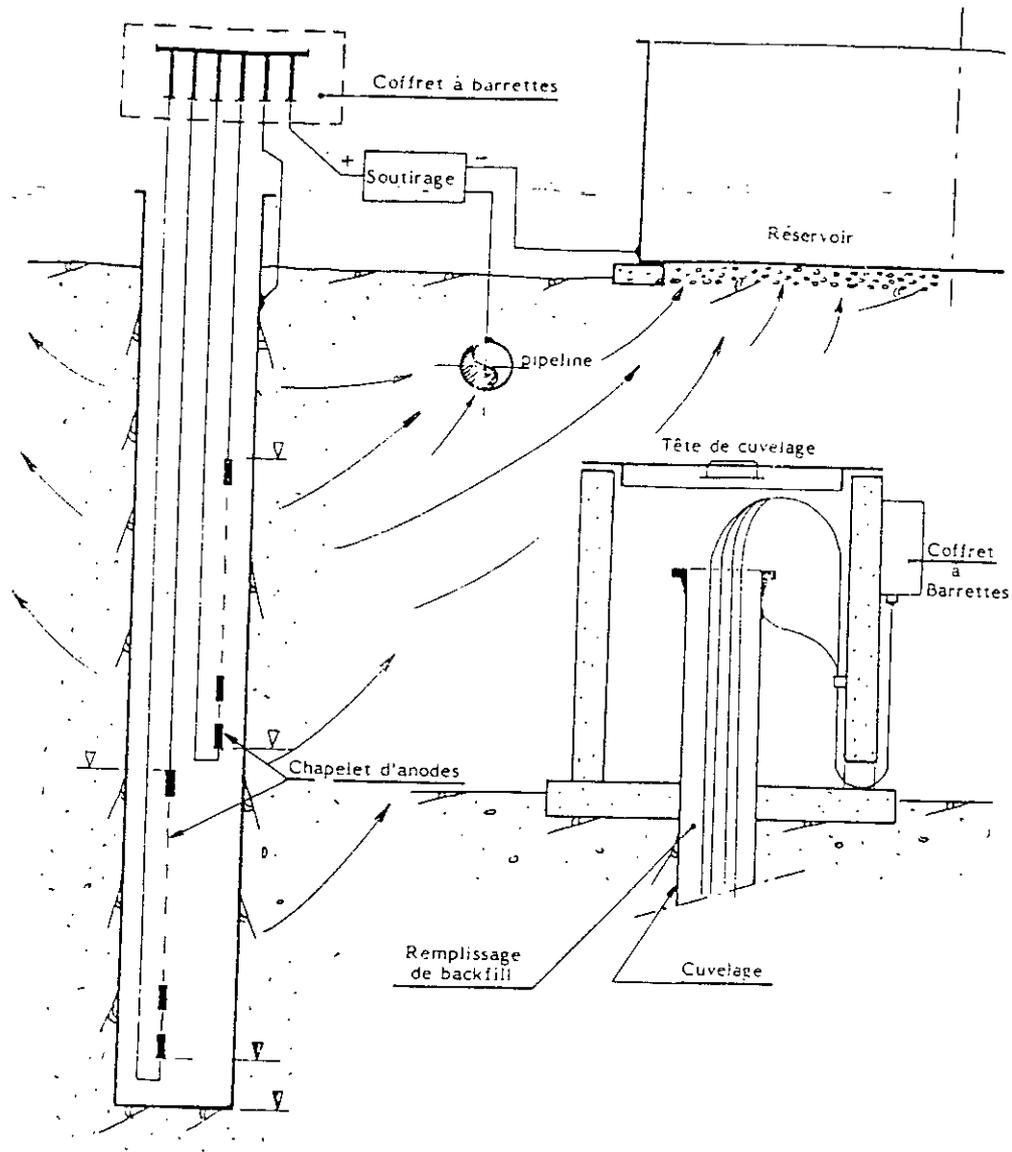


Figure II-8: Schéma du déversoir profond avec anodes disposées en cuvelage[1].

II-3-8 Choix de l'emplacement

L'emplacement du poste de soutirage est déterminé en tenant en compte des considérations pratiques suivantes :

1. possibilité d'occupation du sol ;
2. terrain de faible résistivité ;
3. disponibilité et coût de l'alimentation en énergie électrique ;
4. facilité d'accès.

On évite, dans la mesure du possible, de mettre un poste de soutirage à l'extrémité d'une conduite, ce qui donnerait une mauvaise répartition des potentiels et, donc, une mauvaise utilisation du poste. -

II-3-9 Principe de mesure de la résistivité

Parmi les méthodes utilisées sur le terrain, on peut citer :

1. méthode des deux terre ;
2. méthode sheppard ;
3. méthode des quatre terre.

La méthode des quatre terres est très utilisée dans l'exploration géophysique des sols. On place sur le sol quatre électrodes métalliques équidistantes en ligne à une distance « a » arbitraire. On alimente les électrodes extrêmes à l'aide d'un générateur. On mesure l'intensité I du courant et la différence de potentiel V entre les piquets intermédiaires.

La distance « a » est souvent prise égale à 1 mètre. La théorie, basée sur celle des images électriques, permet d'établir la relation qui donne ρ :

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

ρ est la résistivité du sol, ΔV est la différence de potentiel mesurée entre les fiches M et N et I est le courant mesuré entre les fiches A et B.

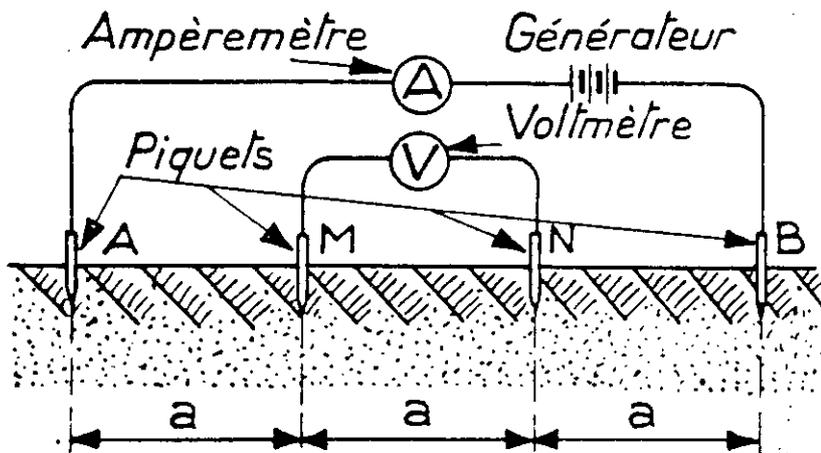


Figure II-9: Méthode des quatre terres[4].

Il s'agit encore d'une méthode d'exploration du sous sol. Plus la distance « a » des électrodes est grande, plus la profondeur d'exploration du sou sol est importante. On atteint la résistivité moyenne dans un certain volume du terrain.

La résistivité varie au cours des saisons sous l'influence de l'humidité et de la sécheresse[9]. Elle augmente quand la température baisse et inversement.

Pour faciliter la comparaison, il sera bon de ramener les valeurs trouvées à 18°C. on peut appliquer pour cela la formule approximative suivante, pour des températures normales :

$$\rho_{18} = \frac{\rho_{mesuré}}{1 + \alpha(18 - \theta)}$$

$\alpha = 0.03$ au-dessous de 18°C, $\alpha = 0.02$ au-dessus de 18°C et θ est la température du sol au cours de la mesure en degré centigrades.

Des courbes ont été tracées de la résistivité du sol en fonction des volumes constants d'eau ajoutée autour de la sonde. Les résultats tirés de ces courbes, figure ci-dessous, montre que :

- la résistivité du sol sec est infini, l'addition d'eau provoque une décroissance toujours rapide de la résistivité qui passe par un minimum pour augmenter ensuite ;
- la forme de la courbe dépend de la nature du terrain et de sa salinité ;
- les courbes nous donne des renseignements sur la nature des sels solubles, sur leur concentration dans le sol et sur la porosité du sol étudié.

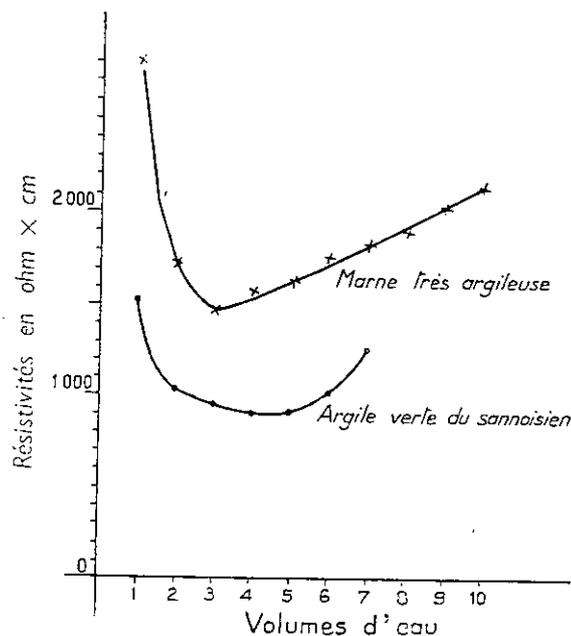


Figure II-5 : Résistivité en fonction de l'eau ajoutée[9]

ETUDE D'UN CAS

PRATIQUE

CALCULS ET DIMENSIONNEMENT D'UNE PROTECTION CATHODIQUE A COURANT IMPOSE

III-1 Présentation de l'ouvrage à protéger

L'ouvrage à protéger est une canalisation (pipe) d'une longueur de 30 Km et de diamètre égal à 30 pouces. Elle est constituée de tube en acier API.5L.X60 soudés en spirale, et est enterrée sur toute sa longueur dans une tranchée de profondeur minimum de 2 m. La conduite sera enrobée sur site avec un revêtement à chaud à base de brai de houille et de laine de verre.

Le tronçon démarre d'un terminal départ d'une gare racleur de lancement située à Hassi Berkine correspondant au point kilométrique (PK 00) et se termine au terminal d'arrivée située à Haoud-el-Hamra correspondant au point kilométrique (PK 30). Les paramètres de l'ouvrage sont les suivants :

- Matériau : Acier X60 (norme API);
- Longueur : $L = 30000$ m ;
- Diamètre : $D = 30$ pouces = 0.762 m ;
- Epaisseur : $e = 10.31$ mm (zone 2) ; 12.7 mm (zone 1) ;
- Surface à protéger : $S = 71817$ m² ;
- Résistance d'isolement (20 ans de service) : $R_i = 8000$ $\Omega \cdot m^2$;
- Résistance d'isolement au mètre linéaire : $R = 3340$ $\Omega \cdot m$;
- Disponibilité d'une source d'énergie à proximité de CPF de Hassi Berkine ;
- Existence d'une nappe phréatique située à une profondeur variable au cours du trajet.

Les installations de transport de pétrole subissent en réalité une attaque par les constituants du sol (sable, roches,...) et une attaque par aération différentielle. Les conditions climatiques de la région sont : le vent de sable et les variations de température (de -25°C à 50°C).

Les traversés de piste par le pipe s'effectue sous dalle. Il ne sera pas prévu de traversées sous gaine pour cet ouvrage.

III-2 Conception du système de protection cathodique

III-2-1 Le système de protection envisagé

Le système de protection cathodique envisagé pour cet ouvrage est du type soutirage de courant, qui consiste à amener la totalité de la surface à protéger en dessous d'un seuil de potentiel (-850 mV/Cu/CuSO₄) à l'aide d'une source de courant extérieur. Pour assurer l'immunité du matériau, la structure est reliée au pôle négatif du

transformateur-redresseur et le pôle positif au déversoir constitué d'un puits d'anodes enterrées. Les données de base sur lesquelles repose la conception de ce système sont :

- La nature du sol et du sous-sol des zones traversées par l'ouvrage à protéger ;
- L'emplacement des sources d'énergie ;
- Le niveau statique et la profondeur de la nappe phréatique.

Compte tenu de la disponibilité de l'énergie électrique à proximité du CPF, cette dernière alimentera le système de protection cathodique de cet ouvrage. Il sera prévu un poste de soutirage avec transformateur-redresseur et sera conçu pour avoir une portée égale à la longueur totale de l'ouvrage à protéger, soit de 30 Km. Le point d'injection sera localisé au point Kilométrique PK 00. Un puits anodique sera utilisé en guise de déversoir.

La profondeur du puits sera de telle sorte que toute la colonne d'anodes baigne dans nappe phréatique. Le puits sera implanté à un endroit tel que :

- La distance qui le sépare de l'axe du pipe soit de 200 m au minimum ;
- La distance qui le sépare de tout autre puits de terre sera de 300 m au minimum.

III-2-2 Calcul du système de protection cathodique

III-2-2-1 Calcul des caractéristiques électriques du pipe

- Résistance longitudinale : $r = \frac{4 \times \delta \times L}{\pi \times D^2} = 7.49 \times 10^{-6} \Omega / m$;
- Résistivité de l'acier X60 : $\delta = 11.4 \times 10^{-9} \Omega .m$
- Affaiblissement linéique : $a = \left(\frac{r}{R}\right)^{1/2} = 47.35 \times 10^{-6} / m$;
- Résistance caractéristique : $R_c = \sqrt{r \times R} = 158.16 \times 10^{-3} \Omega$.

III-2-2-2 Expression de la portée du tranfo-redresseur

La longueur du pipe à protégée L (bras de protection) est donnée par la formule suivante[4].

$$L = \frac{1}{a} \operatorname{Ar} \cosh\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U_x}\right)$$

ΔU_0 : Potentiel de la conduite par rapport au sol (maximal au point de l'injection) et ΔU_x Potentiel de la conduit par rapport au sol (minimal à l'extrémité du bras de protection).

III-2-2-3 Calcul du courant nominal du transfo-redresseur

Pour la protection du bras L (longueur du tronçon), le courant nécessaire est donné par la formule suivante[4].

$$I = \frac{\Delta U_x}{R_c} \times \sinh (a \times L)$$

avec $\Delta U_x = 0.30V$, $L = 30000$ m, $a = 47.35 \times 10^{-6}/m$ et $R_c = 158.16 \times 10^{-3} \Omega$

On trouve un courant I du transformateur redresseur égal à :

$$I = 3.7A$$

Une majoration de 30% est prévue pour une éventuelle extension future du réseau, le besoin en courant protecteur sera :

$$I_{\text{majoré}} = 1,3 \times 3.7$$

$$I_{\text{majoré}} = 4.81A$$

Le transfo-redresseur sera dimensionné de manière à fonctionner au tiers de son courant nominal, sans arrêt, pour une durée de vie de 20 ans.

$$I_{\text{nominal}} = 14.43A$$

Le calcul de la densité de courant moyenne de protection s'effectue :

➤ La surface à protéger est :

$$S = \pi \times D \times L = 71817m^2$$

➤ La densité moyenne de protection est donc :

$$i = \frac{I}{S} = 0.51 \text{ mA}/m^2$$

III-2-2-4 Calcul du déversoir (puits anodique)

Le déversoir de courant sera un puits anodique profond, comportant des anodes fer-Silicium-chrome. La résistance du déversoir ne devrait pas excéder 1Ω [1,4].

Pour une meilleure protection en cet endroit et pour minimiser les interférences, nous devons aller en profondeur et chercher la nappe phréatique afin de réaliser un puits dont la colonne d'anode sera plantée comme un clou dans la nappe. Par mesure de sécurité nous considérons que la résistivité à ce niveau est de :

$$\rho = 80 \Omega \cdot m$$

la résistance de terre d'une tige verticale de rayon r et de longueur L , enfouie à une profondeur suffisante pour négliger l'effet de l'interaction du sol, est donnée par la formule de Dwight :

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right]$$

Pour une résistance de terre $R_t = 0.8 \Omega$ et un diamètre ordinaire de casing de 12 pouces ($r = 0.1524m$), la longueur de la colonne d'anode sera donc de :

$$L_c = 110m$$

Nous fixerons la longueur de la colonne L_c à 100m, qui correspond à une résistance de terre suffisante de $R_t = 0.87 \Omega$.

Le niveau statique de la nappe estimé à ce niveau est de P_s égal à 30 m, avec $L_c = 100 m$

$$P = L_c + P_s + 10 = 140 m$$

III-2-2-5 Calcul du nombre d'anodes

Le type d'anode utilisé dans ce système est en alliage fer-silicium-chrome dont la consommation réelle est de :

$$C_s = 0.6 \text{ Kg/A.an}$$

La masse d'anode nécessaire pour un courant de I_{nominal} égal à 14.43A et une durée de vie de 20 ans est :

$$M_a = I_{\text{nominal}} \times C_s \times 20 = 173.16 \text{ Kg}$$

Les anodes choisies ont les caractéristiques suivantes :

- Longueur : $L_a = 1525$ mm ;
- Diamètre : $D_a = 50.8$ mm
- Masse volumique : $M_v = 7441$ Kg / m³

Le poids d'une anode sera :

$$P_{\text{anode}} = M_v \times L_a \times S_a = M_v \times L_a \times \pi r^2$$

$$P_{\text{anode}} = M_v \times L_a \times \pi \cdot \left(\frac{D_a}{2}\right)^2$$

$$P_{\text{anode}} = 7441 \times 1.525 \times \pi \cdot (50.8 \cdot 10^{-3})^2$$

$$P_{\text{anode}} = 23 \text{ Kg}$$

Le nombre d'anode sera :

$$N_{\text{anode}} = \frac{173.16}{23 \times 0.4}$$

$$N_{\text{anode}} = 19 \text{ anodes}$$

avec un coefficient de correction de 0.4 qui tient compte de la forme de l'anode et de la surface de contact anode-sol[1,4].

L'espacement tête-à-tête entre les anodes dans la colonne d'anodes sera donc de :

$$\text{Esp} = \frac{L_c}{19} = 5.30 \text{ m}$$

III-2-2-6 Calcul de la tension nominale du transfo-redresseur

En considérant un coefficient de sécurité de 0.8 sur la tension anodique et en limitant la tension cathodique et les chutes ohmiques à 2 V, la tension du générateur sera de[1,4] :

$$U_{\text{gene}} = \frac{R_t \times I_{\text{majoré}}}{0.8} + 2$$

Si la résistance de terre du puits est $R_t = 0.87$ Ohms et le courant majoré de 30% égal à 4.81 A, la tension du générateur sera :

$$U_{\text{gene}} = 7.23 \text{ V}$$

Le transfo redresseur devra fonctionner au tiers de sa tension nominale, pour ne pas être surchargé, sans arrêt pendant 20 ans. Sa tension nominale sera donc :

$$U_{\text{nominale}} = 7,23 \times 3 = 22 \text{ V}$$

Les paramètres nominaux du transfo redresseur seront donc :

$$U_{\text{nominal}} = 22 \text{ V} ; I_{\text{nominal}} = 15 \text{ A}$$

III-3 Spécification du matériels de la protection cathodique

L'ensemble du matériel prévu au niveau du point de soutirage est composé des éléments suivants, figure III-1.

III-3-1 Le Transformateur-redresseur (TR)

Il devra répondre aux exigences de la norme CEI-76 et devra assurer une tension de sortie continue nominale de 22V et un courant nominal de 15 A.

Le transformateur-redresseur devra fonctionner dans des conditions climatiques ; (température -25°C à 50°C pluie vent de sable...) et sa protection ' armoire) devra répondre aux exigences de protection, pour l'étanchéité, pour les vents de sable et les poussières.

Le transformateur sera du type à primaire et secondaire séparé avec des sorties à réglage fin et grossier conformément aux recommandations CEI-76 et BS 9720. La tension primaire nominale est de 380 V triphasée / 50 Hz avec une efficacité minimale de 95%.

Le redresseur sera un pont de diodes au silicium conformément aux recommandations BS 2709 et BS 4417, conçu à travailler dans les conditions décrites ci-dessus.

Le transformateur-redresseur contient un voltmètre et un ampèremètre pour la lecture de la tension et du courant continu en sortie. Les connexions de sortie (courant de sortie) est identifiés par un label de couleur noir pour le positif avec l'identification (+) et un label de couleur blanche pour le négatif (-).

Un dispositif de coupure (disjoncteur) protégera l'entrée primaire des surcharges. Un système de protection contre les surtensions est

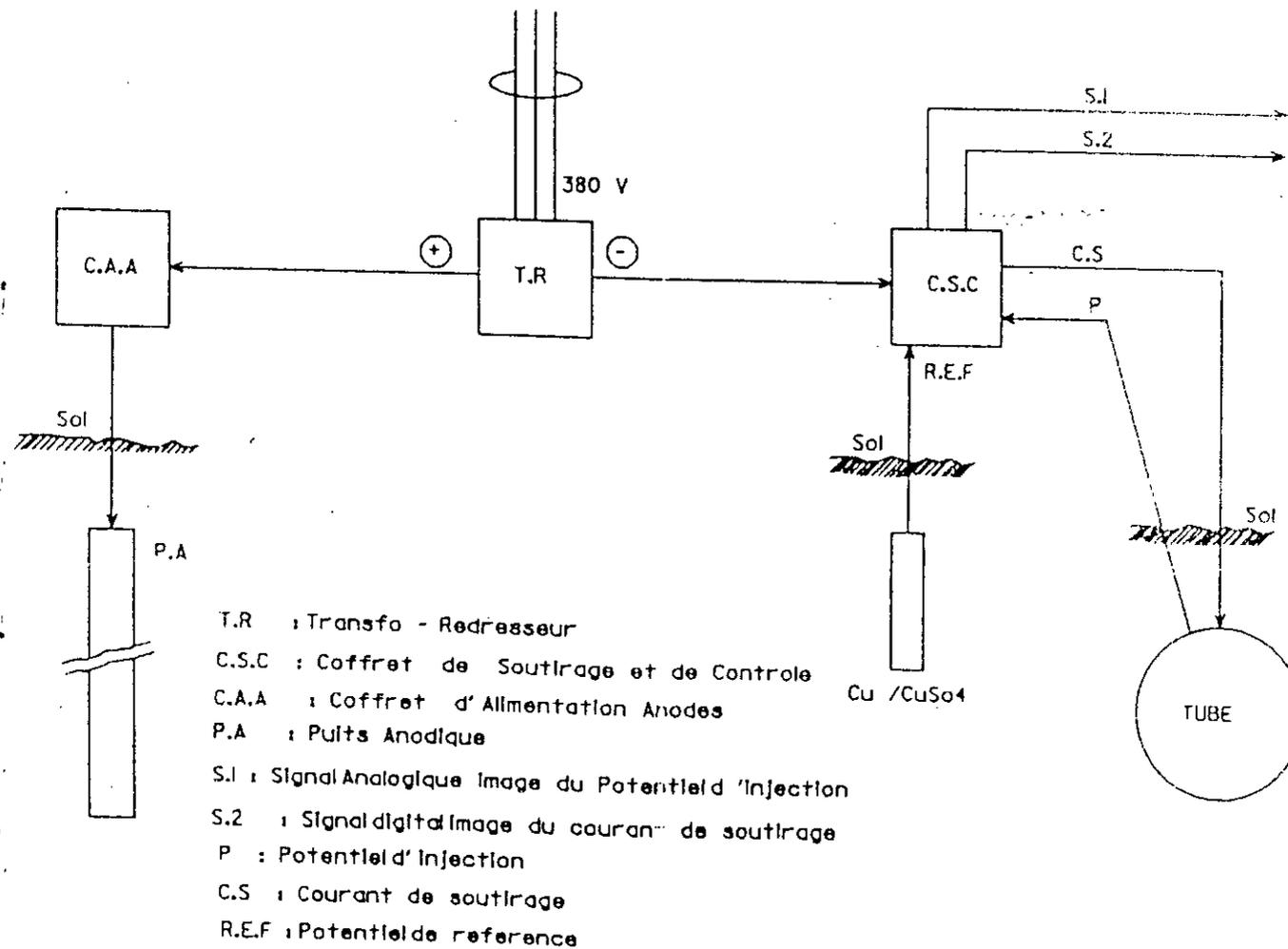


Figure III-1 : Schéma de l'ensemble de l'installation de la protection cathodique à courant imposé.

placé en amont et en aval du redresseur (partie alternative et partie continue) et doit protéger les diodes au silicium.

III-3-2 Le coffret d'alimentation du puits anodique (CAPA)

Le coffret d'alimentation des anodes est en aluminium et doit répondre aux exigences d'utilisation climatiques pénibles pour l'étanchéité, pour les vents de sable et les poussières. Il est dimensionné par le fournisseur de manière à contenir tous les éléments nécessaires. Le câble positif relie le coffret d'alimentation à la borne positive du transformateur-redresseur et le câble négatif relié la structure au transformateur-redresseur, sont de type U1000R02V.

III-3-3 Les puits anodiques

Le puits anodique est composé d'une colonne d'anodes de 100 m comportant 19 anodes et d'une profondeur estimée de 140 m. Il reçoit de la surface jusqu'au fond un casing en tube en acier ordinaire de longueur 141 m qui dépasse de 1 m le niveau du sol, figure III-2.

Les anodes en nombre de 19, ont une composition chimique suivante :

Si	= 14.5%
Mn	= 0.75%
C	= 0.95%
Cr	= 4.5%
Fe	= le reste

Les anodes du puits anodique sont alimentées individuellement à l'aide d'un câble de 6 mm² de section. Le courant traversant chaque anode est régulé de façon à répartir uniformément le courant sur toutes les anodes et ainsi obtenir une usure similaire des anodes.

Le back-fill du puits anodique sera réalisé à l'aide de 8760 Kg de coke fluide calciné devant contenir des lubrifiants de carbone à basse résistivité et des agents de mouillabilité spécifiques au coke du puits anodique. La composition du coke sera la suivante :

- Substances volatiles = 0.7%
- Cendres = 2.23%
- Silicium = 0.06%
- Fer = 0.02%
- Souffre = 5.85%
- Carbone = 91.77%

Les propriétés physiques du coke seront les suivantes :

- Densité apparente = 1.1 à 1.2 Kg/dm³

- Densité réelle = $2\text{Kg}/\text{dm}^3$
- Porosité = 40%

III-3-4 Le coffret de soutirage de contrôle continu de niveau de potentiel et de défaut de courant

Le coffret sera en aluminium et devra répondre aux exigences des normes de construction qui tiennent compte des conditions d'utilisation climatiques, pour l'étanchéité, pour les vents de sable, pour la température et de poussières. Les câbles sont de même type que précédemment.

Le raccordement du pôle négatif du générateur au tube à protéger se fera à travers un coffret de soutirage doté d'un système qui convertit les paramètres de protection cathodique en signaux digital et analogique.

III-3-5 Prise de mesure

- **Prise de mesure ampèremétriques (PMA) :** le projet compte 4 prises de mesures ampèremétriques simple, réalisées chacune à l'aide d'un coffret en aluminium de dimensions $310 \times 262 \times 100$ mm, adapté aux conditions climatiques (les prises de mesures ampèremétrique seront distancées de 8 Km) ;
- **Prises de potentiel simple (PPS) :** le projet compte 15 prises de potentiel simple réalisées chacune à l'aide d'un coffret en aluminium de dimension $130 \times 80 \times 80$ mm, adapté aux conditions climatiques pénibles (c'est-à-dire les prises doivent être distancées de 2 Km) ;
- **Prise de shuntage de joint isolant (SJI) :** le projet compte 01 prise de shuntage de joint isolant réalisée à l'aide d'un coffret en aluminium de dimensions $310 \times 265 \times 100$ mm, adapté aux conditions d'utilisations climatiques.

III-3-6 Raccordements fonctionnels

Le raccordement du pôle négatif du transformateur-redresseur à l'ouvrage à protéger s'effectue à travers un coffret de soutirage et de contrôle de niveau de potentiel et de défaut de courant. Ce coffret permet le prélèvement de deux signaux de contrôle disponibles au niveau d'un bornier de sortie. La variation du premier signal analogique de 0 à 20 mA correspond à une variation du potentiel d'injection de 0 à 3V. le deuxième signal logique 0-24 V informe sur la présence ou non de courant de protection.

Le raccordement du pôle positif du transformateur-redresseur au déversoir anodique s'effectue à travers un coffret d'alimentation des anodes comportant des résistances variables et des shunts de mesure au départ de chaque câble d'anode permettant ainsi l'uniformisation des

courants et de la consommation des anodes, de manière à maintenir une valeur basse de la résistance de terre du déversoir.

III-3-7 Raccordements de sécurité

L'étude prévoit des raccordements de sécurité avec les ouvrages tiers aux croisements de ces derniers. La connexion s'effectue au moyen de résistances variables dans les coffrets de croisement de tubes existants, afin de permettre l'équilibrage de la balance des potentiels entre les deux ouvrages.

III-4 Vérifications préliminaires

Les essais de pré-démarrage et la mise en marche du système devront être effectués par un ingénieur en protection cathodique. Tout le matériel installé doit faire l'objet de vérifications minutieuses, le transformateur-redresseur, les coffrets de raccordements et de mesures, toutes les connexions et les têtes de câblage ainsi que les différentes sorties.

III-4-1 Mesure du potentiel naturel

Avant la mise en marche du système de protection une mesure du potentiel naturel atteint par la structure sera effectuée au niveau des coffrets de soutirage, au niveau des prises de potentiel simple et des prises amperemétriques et au niveau des prises de shuntage des joint isolant.

Il est important de toujours noter, à l'aide d'un croquis, l'emplacement exact de l'électrode de référence de manière à ce que celle-ci soit placée à cet endroit précis lors de mesures postérieures. Il est conseillé de verser de l'eau à l'endroit où en place l'électrode de référence afin d'améliorer le contact avec le sol. La résistance interne du voltmètre sera variée de manière à pouvoir évaluer les résistances parasites.

III-4-2 Mise en marche et premiers réglages

En raison de la durée de polarisation de l'ouvrage qui est principalement fonction de la quantité du revêtement, le réglage définitif du système ne pourra se faire qu'au bout de quelques semaines voir quelques mois après la mise en service de l'installation de protection. Dans l'immédiat, cette mise en service sera cependant accompagnée des mesures et vérification selon le programme suivant :

III-4-2-1 Mise en marche du poste de soutirage

Après avoir vérifier toutes les barrettes amovibles au niveau de la prise de shuntage du joint isolant sont en position de circuit ouvert et en agissant sur l'interrupteur marche-arrêt du transformateur-redresseur, on met sous tension du système de protection cathodique en veillant à ce

que le potentiel conduite par rapport au sol en marche (ON) soit inférieur à -1000 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄ au niveau de la prise de shuntage du joint isolant. Le réglage des potentiels se fait en agissant sur les réglages grossiers et fins du transformateur.

On procède à la mesure du courant de protection au niveau des prises ampèremétriques entre le point kilométrique de départ et d'arrivée. Les densités moyenne de courant sont calculées entre les prises ampèremétriques. Ensuite l'ingénieur contrôle le joint isolant par la méthode de variation de potentiel en mesurant les potentiels par rapport au sol des deux cotés du joint. Sous régime ON/OFF, on procède à la mesure des potentiels au niveau des prises de potentiel simple et au niveau de prise de shuntage du joint isolant.

Ces vérifications mette en évidence les défauts des équipements non décelés en cours de réalisation et les erreurs éventuelles de montage, de raccordement ou de réalisation au niveau du poste de soutirage.

4-2-2 Mise en marche du système de protection cathodique

Une fois que toutes les vérifications énumérées ont été effectuées et que toutes les corrections nécessaires ont été portées aux installations, on met en service le système de protection cathodique. Cette mise en marche doit être suivie d'une nouvelle campagne de mesure des potentiels et des courants de protection. L'interprétation des mesures doit tenir compte de la polarisation du pipeline qui n'est pas immédiate.

On doit donc procéder à la mesure des courants au niveau du coffret de soutirage et au niveau des prises ampèremétriques. On doit procéder également au calculs des densités de courant entre les prises ampèremétriques ainsi qu'au potentiel simple au niveau des coffret de soutirage.

III-4-2-3 Réglage définitif

Le réglage définitif des paramètres de protection cathodique ne pourra se faire qu'au bout de quelques semaines ou de quelques mois après la mise en service de l'installation en raison de la durée de polarisation de l'ouvrage qui est fonction de la qualité du revêtement. Des campagnes de mesure seront faites tous les deux mois au cours desquels des réglages seront effectués en fonction de l'évolution des phénomènes.

III-5 Conception et exploitation d'un programme de calcul d'une protection cathodique à courant imposé

Introduction

A partir de la formulation mathématique, et des considérations physico-chimiques de la protection cathodique des installations enfouies et immergées, nous avons réalisé un programme de calcul informatique qui permet de dimensionner le système de protection.

La conception du programme a été réalisée en utilisant le logiciel MATLAB. Ce programme est présenté en annexes.

III-5-1 Exploitation du programme

- Un tronçon de 30 Km avec la résistivité du sol égale à 80 Ωm et une résistance de terre R_t égale à 0.8 Ω , avec le casing anodique de diamètre 12 pouces ($r = 0.1524$ m).

La longueur de la colonne d'anode calculée par le programme numérique on utilisant la formule de Dwight dans le cas des anodes cylindriques :

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L_c} \times \left[\ln\left(\frac{4L_c}{r}\right) - 1 \right]$$

donne L_c égale à 110m

Si nous fixons la longueur de la colonne d'anode à 100 m seulement, la résistance de terre R_t reste toujours dans la fourchette admise qui est égale à 0.87 Ω (les valeurs conseillées pour la résistance de terre doivent être inférieurs à 1.5 Ω).

Le courant du transformateur redresseur I est égale à 3.7 A pour un potentiel minimal à l'extrémité du bras de protection $\Delta U_x = 0.30\text{V}$, un affaiblissement linéique de 47.35/m et une résistance caractéristique de $158.16 \times 10^{-3}\Omega$.

La majoration de 30% sur le courant du transformateur redresseur et le fonctionnement de ce dernier à 1/3 de son courant majoré donne le courant nominal $I_{\text{nominal}} = 15$ A

Le calcul de la masse anodique M_a pour une consommation de 0.6 Kg/A.an et une durée de vie de 20 ans est égale à 173.2 Kg.

Le poids d'une anode caractérisée par sa masse volumique de 7441 Kg/m³, de longueur 1525 mm et de diamètre égale à 50.8 mm est $P_a = 23$ Kg

Le nombre d'anode utilisé pour la protection du bras de 30 Km est égal à 19 anodes.

Le calcul de la tension du transformateur redresseur pour un courant majoré de 4.81 A et une résistance de terre de 0.87Ω est égal à 7.23 V. Son fonctionnement à 1/3 de sa tension nominale qui évite la surcharge donne une tension nominale $U_{\text{nominale}} = 22 \text{ V}$.

Pour un tronçon de 90 Km, on le partage en 2 parties de 45 Km. Le pipe a les mêmes propriétés et caractéristiques mais la nature du sol est différente par sa résistivité.

Le partage du tronçon en deux parties de 45 Km est justifié par :

- L'atténuation du courant électrique en fonction de sa longueur ;
- Des considérations économiques, grandes distances entraînent un coût élevé et des surcharges importantes sur les transformateurs redresseurs ;
- Maintenance praticable ;
- Sécurité assurée.

III-5-2 Exploitation des résultats

Pour ce cas de situation, le pipeline traverse une région comporte deux zones de résistivité différentes ρ_1, ρ_2 et la longueur du bras de protection pour chaque zone est égal à 45 Km. On prévoit pour cet exemple 2 casings anodiques de longueur égale à 70 m et 0.2 m de rayon, pour éviter les forages de grandes profondeurs et la surcharge en anodes.

➤ Zone 1

1. La résistance de terre R_1 est égale à 0.28Ω pour une résistivité du sol $\rho_1 = 20 \Omega\text{m}$;
2. Le courant de protection débité par le transformateur redresseur est

$$I_1 = \frac{\Delta U_x}{R_c} \sinh(a.L_1)$$

avec $L_1 = 45 \text{ Km}$, $\Delta U_x = 0.3 \text{ V}$ (à l'extrémité de la conduite) et
 $R_c = 158.16 \times 10^{-3}$

qui donne $I_1 = 7.87 \text{ A}$

3. les anodes utilisées ont les mêmes caractéristiques que précédemment, qui donne une masse anodique totale égale à 94.44 Kg pour un courant de 7.87 A et 23 Kg pour chaque anode ;
4. le nombre d'anodes qu'il faut utiliser dans cette zone égal à 10 anodes avec un espacement de 7 m ;
5. la tension que le générateur doit débité $U_{\text{Nominale}} = 16.74 \text{ V}$.

➤ Zone 2

1. la résistance de terre R_2 égale à 0.5Ω pour une résistivité du sol $\rho_2 = 35 \Omega\text{m}$;
2. le courant de protection débité par le transformateur redresseur est $I_2 = 9.18 \text{ A}$, pour un $\Delta U_x = 0.35 \text{ V}$;
3. la masse anodique totale qu'il faut utiliser dans cette zone est de 110.6 Kg de 23 Kg chaque anode ;
4. le nombre d'anode nécessaire est de 12 anodes espacées de 5.83 m ;
5. la tension du transformateur redresseur est de $U_{2\text{ nominale}} = 28.37 \text{ V}$

Conclusion

L'utilisation de un ou deux transformateurs redresseurs pour la protection du pipeline de longueur de 90 Km est conditionnée par des considérations économiques et par le problème d'atténuation électrique.

ETUDE

EXPERIMENTALE

Techniques Expérimentales

Introduction

Nous présentons les méthodes et techniques utilisées dans nos travaux expérimentaux. l'étude du comportement de deux nuances d'acier X52 et E24 vis-à-vis d'une solution d'acide sulfurique de normalité 1N par méthode potentiodynamique qui permet de tracer les courbes de polarisation correspondantes. Cette étude a été réalisée aux laboratoires de l'I.A.P. et du C.R.D. de Boumerdes. Les essais de corrosion et de protection cathodique ont été réalisés au laboratoire de Sciences et Genie des Matériaux de l'E.N.P. Enfin les caractérisations structurales et mécaniques ont été réalisées au CSC de Chéraga.

IV-1 Etude du comportement électrochimique

Le comportement électrochimique des deux aciers X52 et E24 dans la solution d'acide H_2SO_4 est révélé par le tracé des courbes de polarisation $E=f(i)$, qui permettent de déterminer des paramètres quantitatifs importants tel que : le potentiel de corrosion, le courant de corrosion ainsi que les constantes de Tafel β_a et β_c .

La méthode utilisée pour le tracé des courbes de polarisation est la méthode de polarisation à potentiel contrôlé qui est réalisée selon le mode de polarisation dynamique. cette partie a été réalisée au CRD de Boumerdès.

IV-1-1 Méthode de polarisation à potentiel contrôlé

cette méthode consiste à appliquer un potentiel constant à une électrode indicatrice et de mesurer l'intensité du courant générée par la réaction d'électrode. cette technique permet d'étudier des réaction d'échanges électroniques avec une grande sélectivité.

Le mode dynamique consiste à faire un balayage continu de la variable contrôlée, c'est-à-dire le potentiel, selon un programme préétabli au moyen d'un pilote électronique. Ce mode à l'avantage de permettre un enregistrement automatique de courbes intensité/potentiel.

IV-1-2 Chaîne électrochimique

pour tracer une courbe de polarisation intensité/potentiel, il faut réaliser un montage électrique comprenant, en série, un potentiostat, et une cellule de mesure, figure IV-1.

IV-1-2-1 Cellule de mesure

C'est un récipient en verre de volume 1 litre dans lequel a lieu la réaction de transfert électronique étudiée. Il est muni d'un couvercle percé de plusieurs orifices par lesquels les électrodes sont introduites.

IV-1-2-2 Electrode de travail

C'est l'électrode à la surface de laquelle s'effectue la réaction d'échange électronique étudiée (l'échantillon de l'acier étudié). Les caractéristiques géométriques de l'électrode sont :

- Longueur = 2 Cm
- Largeur = 1.4 Cm
- Epaisseur = 0.5 Cm
- Surface = 2.8 Cm²

IV-1-2-3 Electrode de référence

Le potentiel de l'électrode de travail est toujours mesuré par rapport à une électrode de référence, dans notre étude, il s'agit d'une électrode de référence au calomel saturée (KCl en solution saturée). Afin de minimiser la chute ohmique entre l'électrode de travail et l'électrode de référence, cette dernière doit être placée le plus près possible de l'électrode de travail sans causer un blindage de notre échantillon. La distance conseillée est 3d (d est le diamètre intérieur de l'électrode de référence au calomel).

IV-1-2-4 Electrode auxiliaire

C'est une électrode de forme cylindrique constituée de graphite. Elle est de préférence inerte vis-à-vis de la solution d'acide et utilisée uniquement pour fermer le circuit électrique de la chaîne électrochimique.

IV-1-2-5 Le potentiostat

C'est un générateur de signaux électriques qui permet à la fois :

- ◆ D'appliquer une tension suffisante entre l'électrode de travail et la contre électrode de manière à vaincre l'inertie de la cellule ;
- ◆ De contrôler la variable électrique selon un programme préétabli.

IV-1-2-6 Schéma de la chaîne utilisée

La chaîne électrochimique que nous avons utilisée pour le tracé des courbes de polarisation anodique et cathodique des deux échantillons est schématisée ci-dessous.

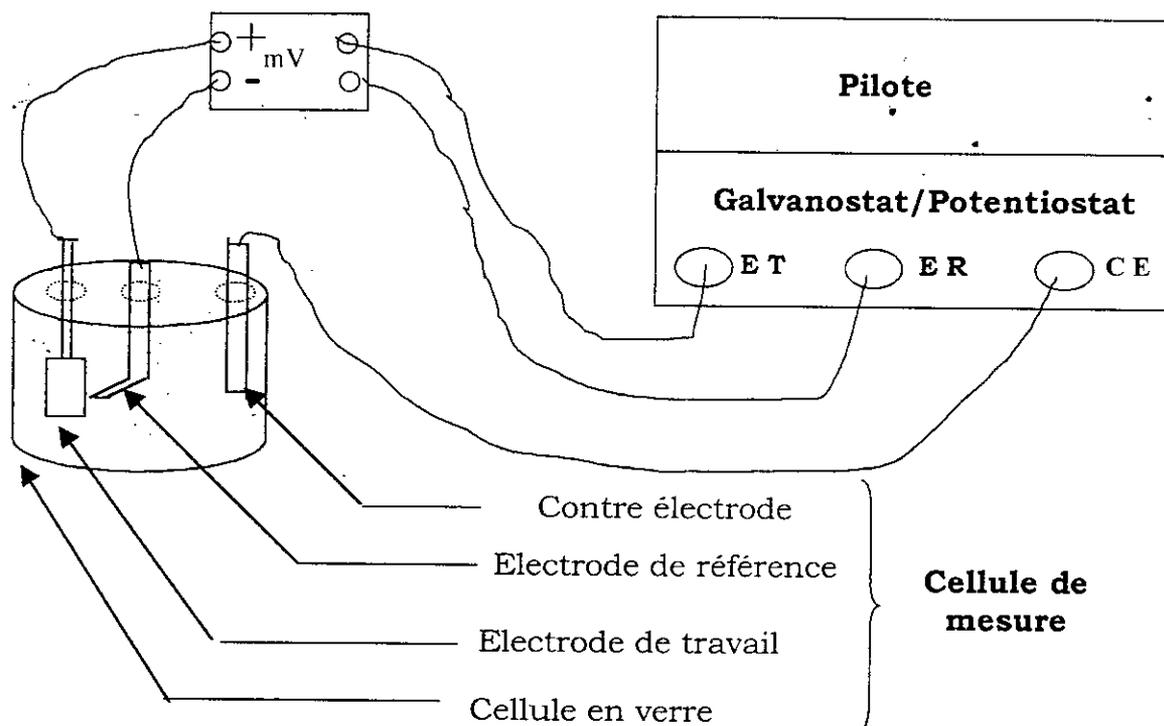


Figure IV-1: Schéma de principe de la chaîne électrochimique.

IV-1-3 Préparation de la solution

Le choix de l'acide sulfurique est basé sur le fait que dans la majorité des atmosphères industrielles, on trouve du SO_2 en quantité appréciable qui se transforme en acide sulfurique H_2SO_4 avec l'évaporation de l'eau et de faible quantité de H_2S , NH_3 , NO_2 et différentes sels en suspension.

L'acide sulfurique ainsi produit est parmi les causes principales de la corrosion des différents bacs de stockage, d'une part et d'autre part, des structures enterrées tels que les pipelines.

La présence de certaines bactéries anaérobies dites sulfobactéries, réduisent les sulfates et libèrent H_2S qui est très corrosif et d'autres bactéries oxydent le soufre élémentaire d'où la formation de H_2SO_4 , qui cause la corrosion des pipelines.

La concentration 1N est choisie pour créer des conditions d'une corrosion accélérée pendant nos essais, afin de permettre une vérification rapide de la protection cathodique.

La solution utilisée dans notre étude est l'acide sulfurique de normalité 1N. Il est utile donc de rappeler comment préparer une solution

électrolytique H_2SO_4 1N de volume total V_T . L'acide sulfurique a les caractéristiques suivantes :

- ❖ Pureté 96% ;
- ❖ Densité : $d=1.84\text{g}/\text{Cm}^3$
- ❖ Normalité $\text{H}_2\text{SO}_4 = 36,02$ équivalent gramme.

Nous avons la formule :

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

$V_2 = V_T$: volume total de la solution H_2SO_4 1N que nous désirons préparer.

V_1 : volume de H_2SO_4 pur qu'il faut prélever.

N_1 : normalité de H_2SO_4 pur à 96%

N_2 : normalité de la solution H_2SO_4 fixée à 1.

$$V_1 = \frac{N_2V_2}{N_1}$$

IV-1-4 Mesure du pH et de la conductivité électrique de la solution

A l'aide d'un conductimètre à différentes sensibilités, nous avons mesurer la conductivité électrique K de la solution à température ambiante (25°C). les résultats obtenus sont présentés de la manière suivante :

- PH de la solution est égal à 0.88
- $K = 380 \text{ ms}/\text{Cm}$
- Donc la résistivité est, $\rho = \frac{1}{K} = 2.63 \Omega.\text{Cm}$.

IV-1-5 Préparation des électrodes de travail

Les électrodes de travail sont des échantillons découpés sous forme de parallélépipèdes de même dimension ($2 \times 1.4 \times 0.5 \text{ Cm}^3$). Ensuite, nous avons effectuer une rainure dans la surface de l'échantillon à l'aide d'une scie à métaux qui servira pour le positionnement d'un fil électrique en cuivre et souder ce dernier avec l'échantillon. l'ensemble, échantillon et fil électrique sont enrobés à froid avec une résine acrylique. Le schéma ci-dessous nous montre cette opération, figure V-2.

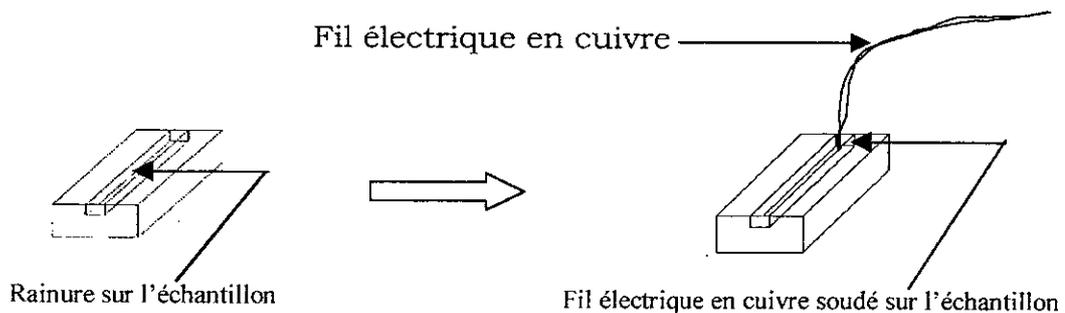


Figure IV-2 : Etapes de préparation des électrodes de travail.

Avant chaque essai électrochimique, l'électrode de travail est polie avec du papier abrasif de granulométrie décroissante (120, 180, 220, 400, 600, 1000), sous lubrification d'eau puis lavée et séchée.

IV-2 Montage du dispositif de protection cathodique

IV-2-1 Matériels utilisés

afin de réaliser le montage du dispositif électrique de la protection cathodique figure IV-5, nous avons utiliser le matériels suivant :

- ◆ Anodes en graphite ;
- ◆ Electrode de travail, acier X52 et E24 (la cathode, $2 \times 1.4 \times 0.5 \text{ Cm}^3$) ;
- ◆ Electrode de référence au calomel saturée (KCl en solution saturée) ;
- ◆ Un récipient en verre (dessiccateur) utilisé comme cellule ;
- ◆ Un transformateur-redresseur de courant qui nous permet de transformer le courant alternatif en courant continu ;
- ◆ Un millivoltmètre digital pour mesurer le potentiel de l'électrode de travail par rapport à l'électrode de référence au calomel ;
- ◆ Un milliampèremètre pour contrôler le courant débité par le transformateur-redresseur ;

IV-2-2 Préparation des électrodes de travail (cathodes)

Après avoir enrobé les échantillons à froid à l'aide de la résine acrylique, nous avons effectuer un pré-polissage pour enlever la couche d'oxyde formée et souder un fil électrique en cuivre à l'aide de l'étain à la surface de l'échantillon (électrode de travail).

Pour éviter toute réaction électrochimique et contact entre la soudure et l'électrolyte, nous avons enrober le point de soudure avec de la résine acrylique. L'ensemble de l'opération est schématisée ci-dessous.

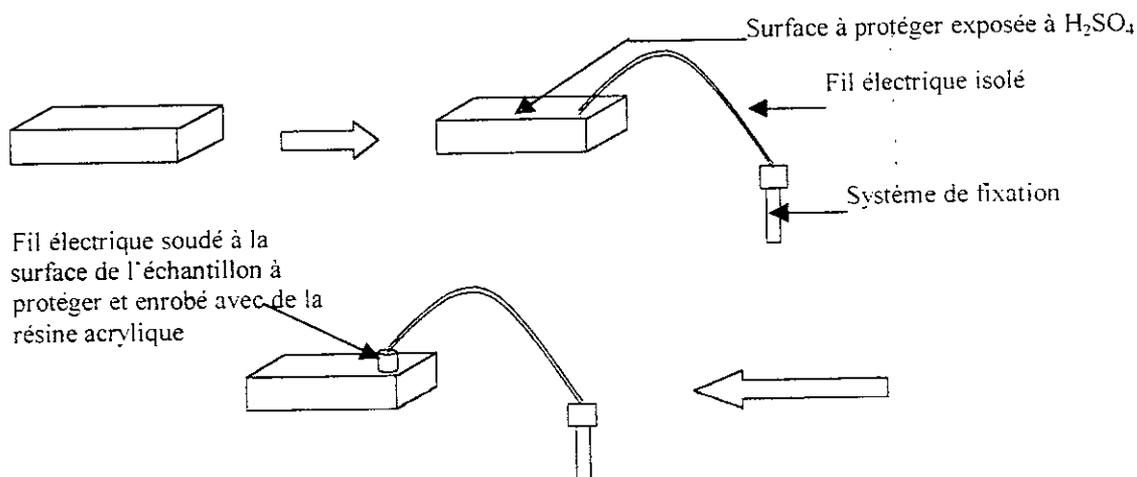


Figure V-3 : Schéma de préparation des électrodes de travail (cathodes).

IV-2-3 Préparation des électrodes en graphite (anodes)

Les anodes en graphite que nous avons utilisées sont de forme parallélépipédique dont un fil conducteur en cuivre est introduit à l'intérieur. Les dimensions des anodes sont :

- Longueur = 3.5 Cm ;
- Largeur = 2 Cm ;
- Epaisseur = 1 Cm.

Pour éviter toute réaction électrochimique entre le fil électrique et la solution, nous avons enrobé ce dernier à l'aide de la résine acrylique. Le schéma ci-dessous nous montre l'ensemble de l'opération, figure V-4.

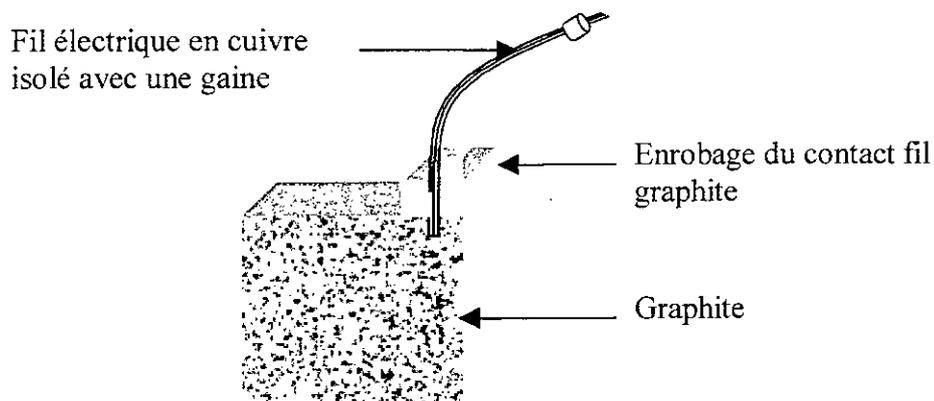


Figure IV-4 : Schéma de préparation de l'électrode en graphite.

IV-2-4 Montage du dispositif électrique de protection cathodique à courant imposé

Le schéma du montage de la protection cathodique à courant imposé que nous avons réalisé est présenté dans la figure IV-5. La photographie de ce montage est présentée dans la figure IV-6

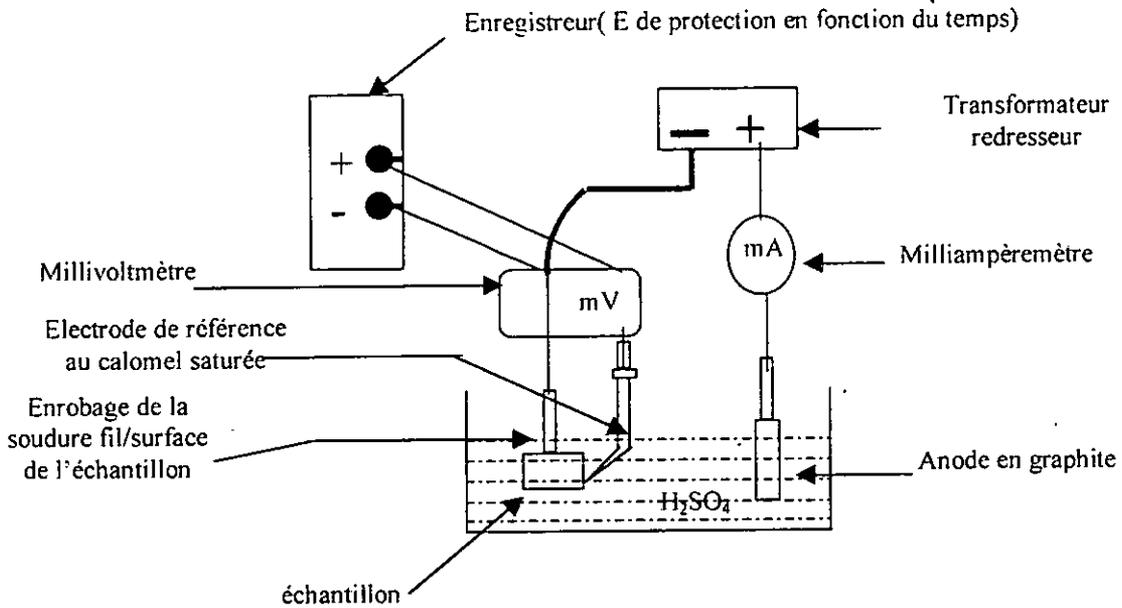


Figure IV-5 : Schéma de montage du dispositif électrique de protection cathodique à courant imposé utilisé.

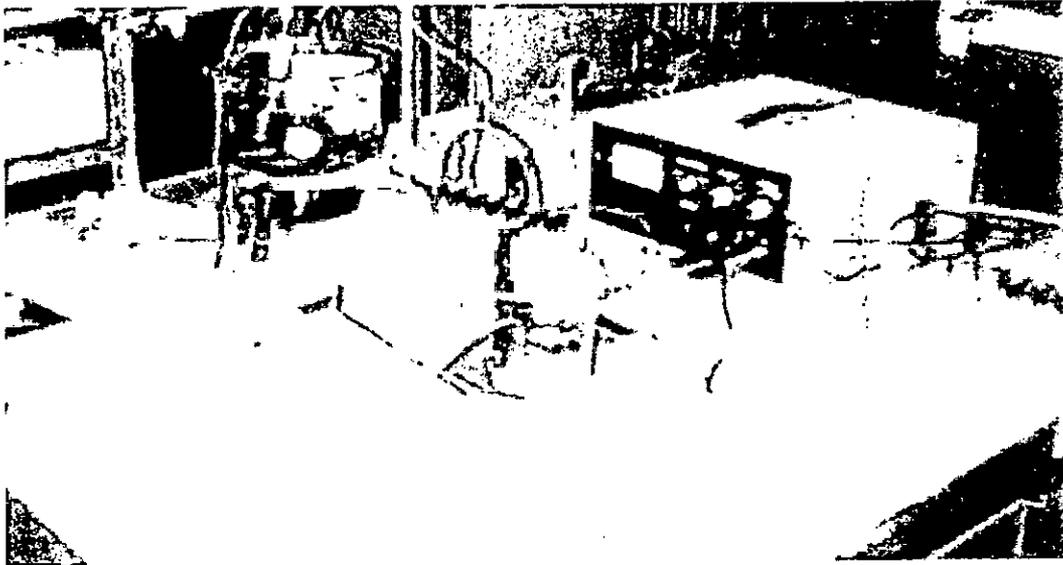


Figure IV-6 : le montage expérimental utilisé Pour les essais de la protection cathodique

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Introduction

Les aciers étudiés de nuance respectives X 52 et E 24 sont utilisés dans la fabrication des tubes de transport de produits pétroliers. La fabrication est réalisée par l'entreprise ANABIB de Réghaia pour le compte des entreprises SONATRACH, SONELGAZ, NAFTAL et NAFTEC.

V-1-1 Composition chimique des deux nuances

Tableau V-1: Composition chimique en pourcentage massique de l'acier E24.

Eléments	C	Mn	Si	S	P	Al
% massique	0.225	0.930	0.180	0.047	0.041	0.029

TableauV-2 : Composition chimique en pourcentage massique de l'acier X52

Eléments	C	Mn	Si	S	P	Al	V
% massique	0.213	0.97	0.26	0.034	0.038	0.032	0.065

Nous remarquons à travers cette composition chimique un pourcentage relativement élevé du manganèse pour les deux aciers (environ 1%). Cette teneur est une caractéristique des aciers au carbone utilisés pour la fabrication des pipelines. Pour le soufre et le phosphore, leur teneur est très faible car ces deux éléments sont nocifs pour l'acier et leur présence en grande quantité peut provoqué des effets indésirables. Les teneurs en carbone 0.225% pour l'acier E24 et 0.213% pour l'acier X52 sont proches et sont relativement faibles. Elle rentrent dans la fourchette des aciers destinés à la fabrication des pipelines car la présence du carbone en pourcentage élevé accélère la corrosion.

La différence entre les deux aciers est la présence d'une faible quantité de vanadium dans l'acier X52. la faible présence du Vanadium dans l'acier X52 permet de réduire le taux de cémentite et améliore la tenue de l'acier en captant une certaine quantité de carbone.

V-1-2 Dureté des aciers

Les duretés des deux aciers sont respectivement :

- Acier X52, dureté HB = 203.2
- Acier E24, dureté HB = 182.8

Ces valeurs sont les moyennes de 06 mesures. On constate que l'acier X52 présente une dureté plus élevée que celle de l'acier E24.

V-1-3 Caractérisation micrographique

Les structures micrographiques des aciers E24 et X52 sont présentées dans les figures V-1 et V-2.

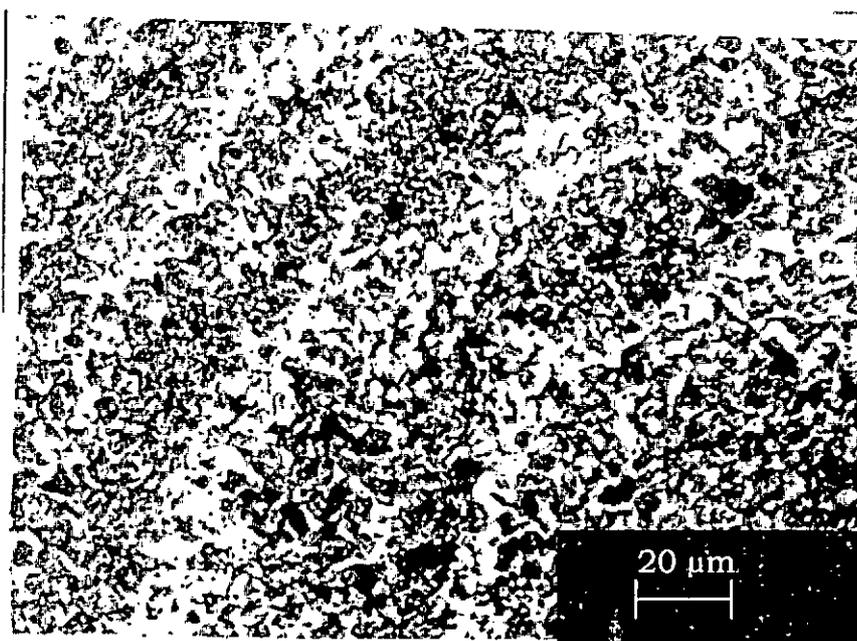


Figure V-1 : Microstructure de l'échantillon X52



Figure V-2 : Microstructure de l'échantillon E24

Nous constatons que les deux aciers ont une structure ferritoperlitique. La morphologie présente une structure en bande typique du laminage.

La structure de l'acier E24 apparaît plus grossière que celle de l'acier X52, ceci explique le niveau plus faible de la dureté de l'acier E24.

La structure grossière de l'acier E24 est due au traitement thermique appliqué.

V-1-4 Caractérisation électrochimique des deux nuances

Cette caractérisation consiste à tracer les courbes de polarisation anodique et cathodique des deux aciers dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 1N, qui nous permettra de déterminer un ensemble de paramètres électrochimiques à savoir le courant de corrosion, le potentiel de corrosion, la vitesse de courant et les paramètres de Tafel anodique et cathodique. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau V-3.

N.B : Ce travail a été réalisé au laboratoire du CRD de Boumerdès dans des conditions normales: température $25^\circ C$, sans barbotage d'azote ni agitation.

Les résultats obtenus sont représentés par les figures V-9 et V-10

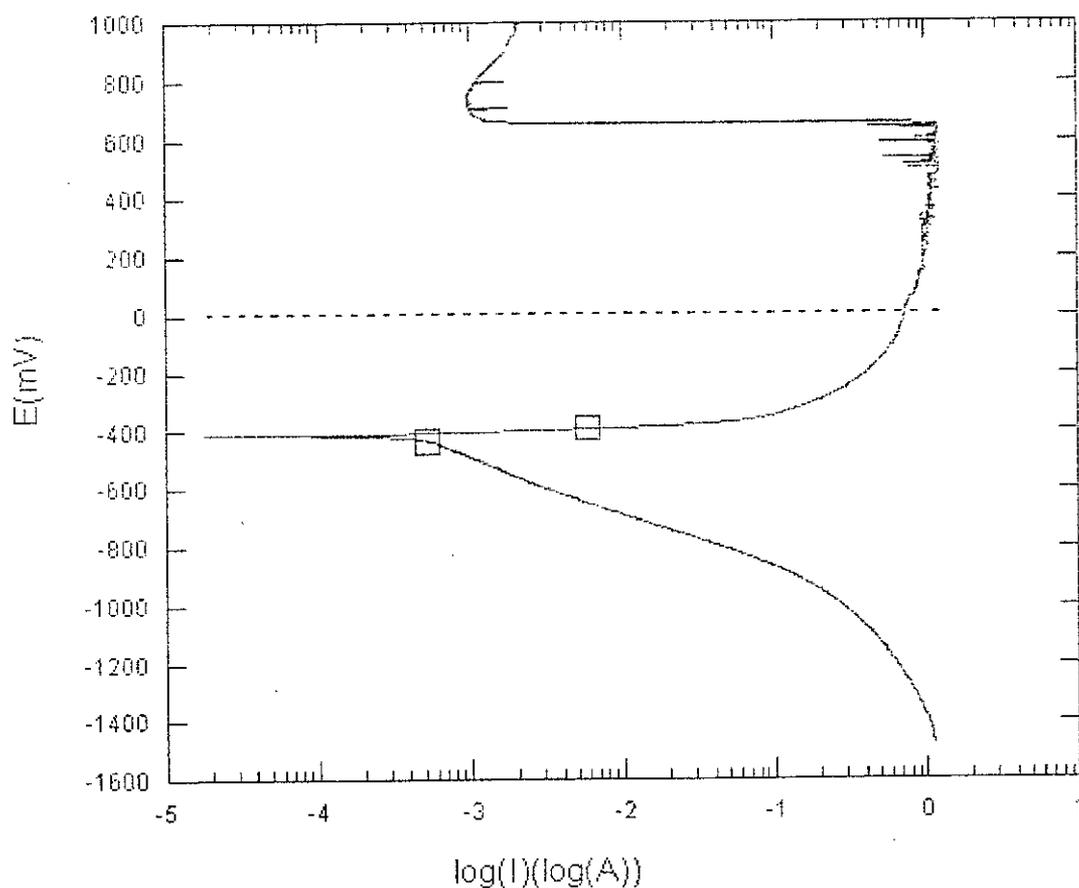


Figure V-9: Courbe de polarisation $E = f(I)$ de l'acier X52.

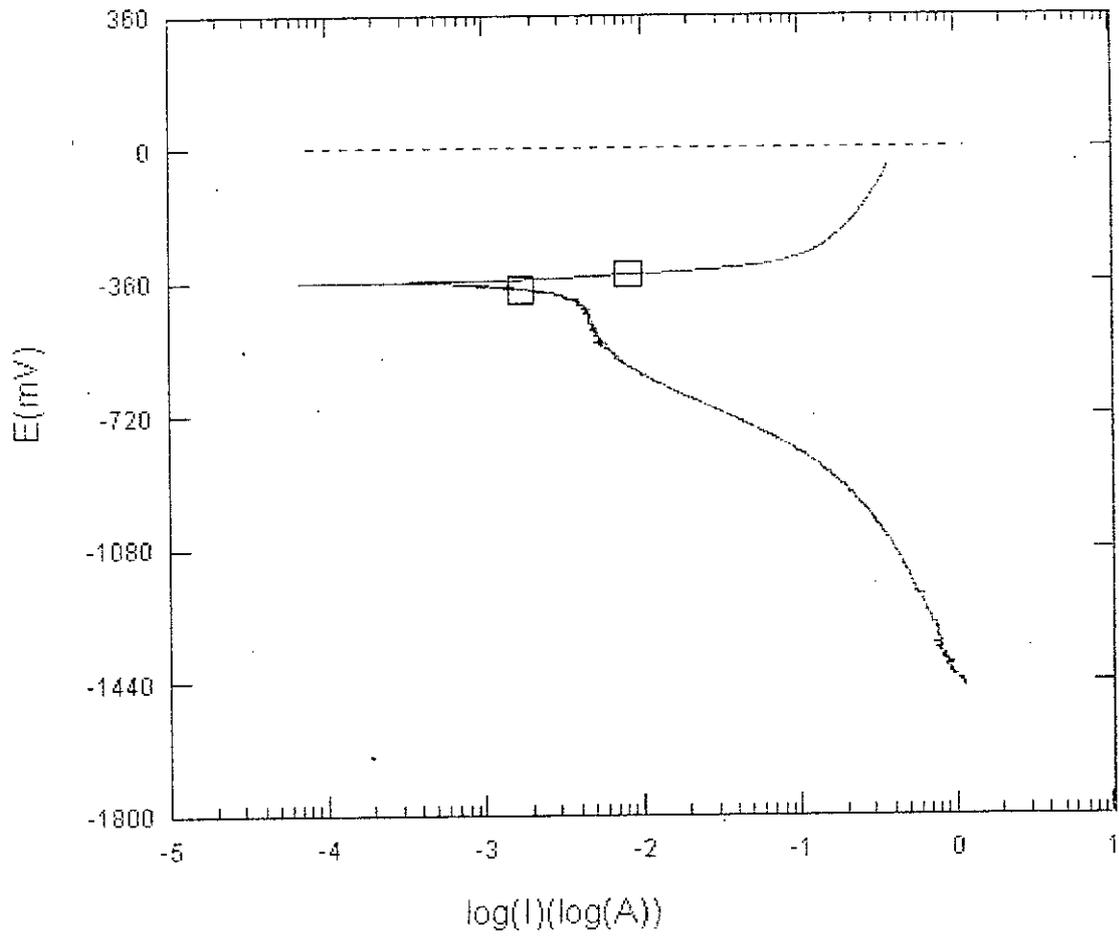


Figure V-10: Courbe de polarisation $E = f(I)$ de l'acier E24.

Les caractéristiques électrochimiques des deux aciers sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau V-3 : Paramètres électrochimiques des deux nuances E24 et X52 dans une solution H_2SO_4 1N, mesuré par rapport à une électrode de référence au calomel saturée.

	ACIERS	
	X52	E24
Vitesse de corrosion V_{corr} (mm/an)	13.73	22.76
Potentiel de corrosion E_{corr} (mV/CSC)	-419.7	-365.3
Courant de corrosion I_{corr} (mA)	3.457	5.43
Résistance de polarisation R_p (Ω)	6.281	3.992
β_a (V/dec)	0.1	0.1
β_c (V/dec)	0.1	0.1

Nous remarquons d'après ces valeurs que l'acier E24 se corrode rapidement par rapport à X52, cela est due à sa structure micrographique qui apparaît plus grossière par rapport à X52 et donne une faible résistance à la corrosion qui est caractérisée par sa faible résistance à la polarisation.

V-2 Dimensionnement de la Protection cathodique pour le X52 et E24

D'après l'équation de Stern et Geary qui donne le courant appliqué I_{app} qu'il faut appliquer à la protection de l'échantillon en fonction du courant de corrosion I_{corr} est :

$$I_{app} = 2.3 \Delta E \cdot I_{corr} \cdot \left(\frac{\beta_c + \beta_a}{\beta_c \times \beta_a} \right)$$

Avec ΔE surtension cathodique, $\Delta E = E_{corrosion} - E_{protection}$

$E_{protection}$ est le potentiel de protection de X52 ou E24. D'après le diagramme de Pourbaix le potentiel de protection E_{prot} pour les aciers au carbone est égal à $-0,77V/ECS$ (ECS électrode de référence au calomel saturée).

V-2-1 Cas de l'acier X52

La surtension cathodique vaut :

$$\Delta E = E_{corr} - E_{prot} = (-419.7) - (-770) = 350.3 \text{ mV}$$

$$\text{avec } I_{corr} = 3.457 \text{ mA et } \beta_a = \beta_c = 0.1 \text{ V/dec}$$

Nous pouvons calculer $I_{app} = 2.3 \times (0.3503) \times 0.003457 \times \frac{0.2}{0.01}$

$$I_{app} = 55.70 \text{ mA}$$

$$I_{\text{prot}} = \frac{I_{\text{app}}}{S} ; S \text{ est la surface totale de l'échantillon à protéger.}$$

$$i_{\text{prot}} = \frac{55.70}{2.8} = 19.89 \text{ mA/Cm}^2$$

V-2-2 Cas de l'acier E24

$$E_{\text{corr}} = -365.3 \text{ mV}$$

La surtension cathodique vaut :

$$\Delta E = (-365.3) - (-770) = 404.7 \text{ mV}$$

$$\text{avec } I_{\text{corr}} = 5.439 \text{ mA et } \beta_a = \beta_c = 0.1 \text{ V/dec}$$

$$I_{\text{app}} = 101.25 \text{ mA}$$

La densité de courant de protection est :

$$I_{\text{prot}} = \frac{101.25}{2.8} = 36.16 \text{ mA/cm}^2$$

V-2-3 Calcul de la résistance de l'anode

Plusieurs formules ont été établies pour le calcul de la résistance de l'anode, selon sa géométrie, son mode d'utilisation (horizontale ou verticale) et sont milieu d'utilisation. Dans notre travail, nous avons utiliser l'équation de Mac Coy, qui donne R en fonction de la surface totale de l'anode exposée à l'électrolyte.

$$R = \frac{0.315 \times \rho}{\sqrt{S}}$$

avec ρ résistivité de la solution électrolytique H_2SO_4 1N ($\rho = 1/\text{K} = 2.63 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$) et S la surface totale de l'anode exposée dans l'électrolyte ($S = 28.3 \text{ Cm}^2$).

donc la résistance de l'anode est :

$$R = \frac{0.315 \times 2.63}{\sqrt{28.3}} = 0.155 \Omega$$

V-2-4 Détermination de la tension du Transformateur-redresseur

La détermination de la tension du transformateur-redresseur est un peu délicate car sa tension dépend de certains paramètres qui sont déterminés expérimentalement par les spécialistes de la protection cathodique.

La formule générale de l'expression de la tension du transformateur-redresseur est donnée par :

$$U_{T.R} = \frac{R.I}{\alpha} + v$$

α est un coefficient de sécurité sur la tension anodique et v est la chute Ohmique, causée par l'ensemble des composante du système de protection.

Dans notre travail nous ne pouvons pas estimer ces deux paramètres, pour cela, la méthode que nous avons suivi pour la détermination de la tension appliquée, débitée par le transfo-redresseur est de chercher la tension $U_{T.R}$ qui nous donne les valeurs des courants I_{app} ou proche calculées précédemment pour chaque échantillon. Durant l'essai il faut vérifier que le potentiel de protection pour chaque échantillon est bien dans le domaine d'immunité $E_{prot} \leq -0.77V$ mesuré par rapport à l'électrode au calomel saturée.

Cette démarche nous a permis de déterminer les valeurs de $U_{T.R}$ suivantes pour chaque échantillon.

- Pour l'acier X52 ; $U_{T.R} = 2.88 V$
- Pour l'acier E24 ; $U_{T.R} = 3.10 V$

L'ensemble des valeurs sont données dans les tableaux 1 et 2 en l'annexe.

Les variations du potentiel de protection et de la densité de courant de protection des deux aciers sont représentées dans les figures V-5, V-6, V-7 et V-8.

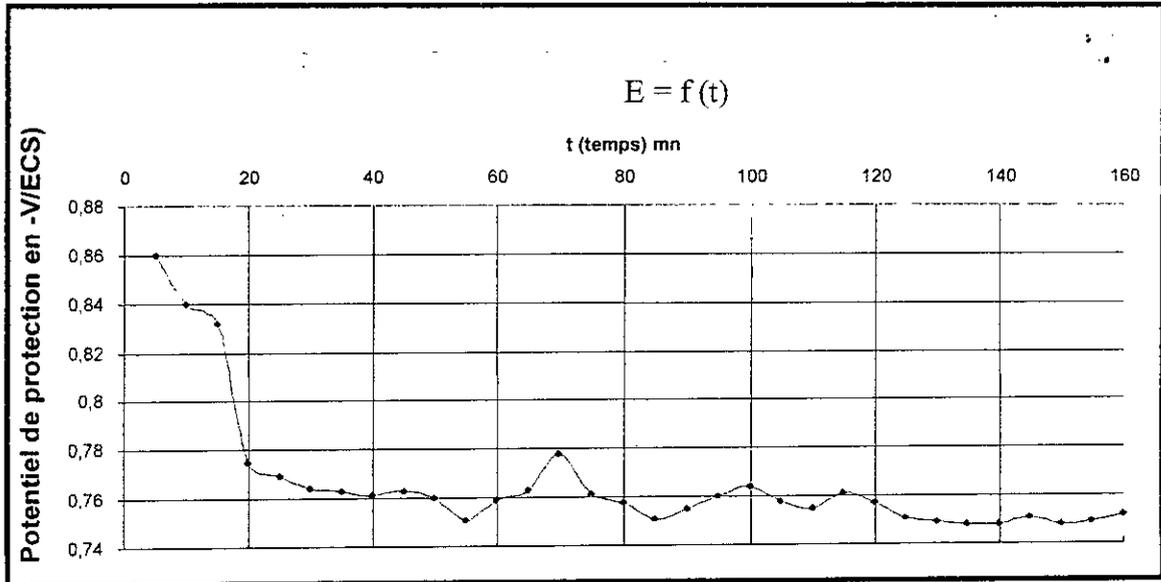


Figure V-5 : Variation du potentiel de protection du E24 en fonction du temps, mesuré avec un pas de 5 minutes.

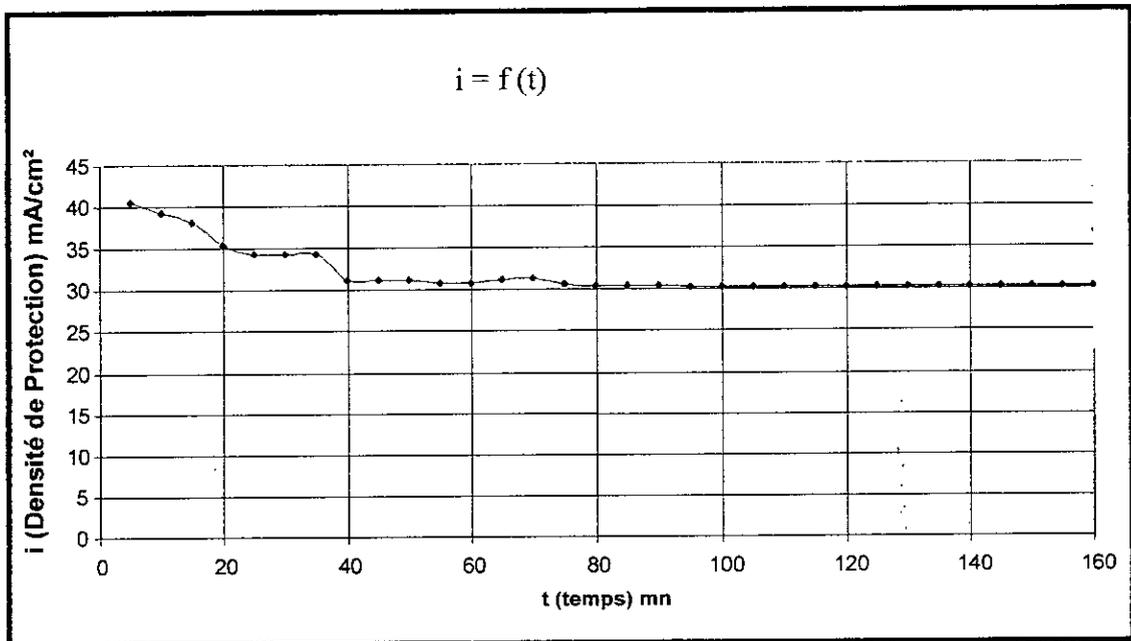


Figure V-6 : Variation de la densité de courant de protection du E24 en fonction du temps

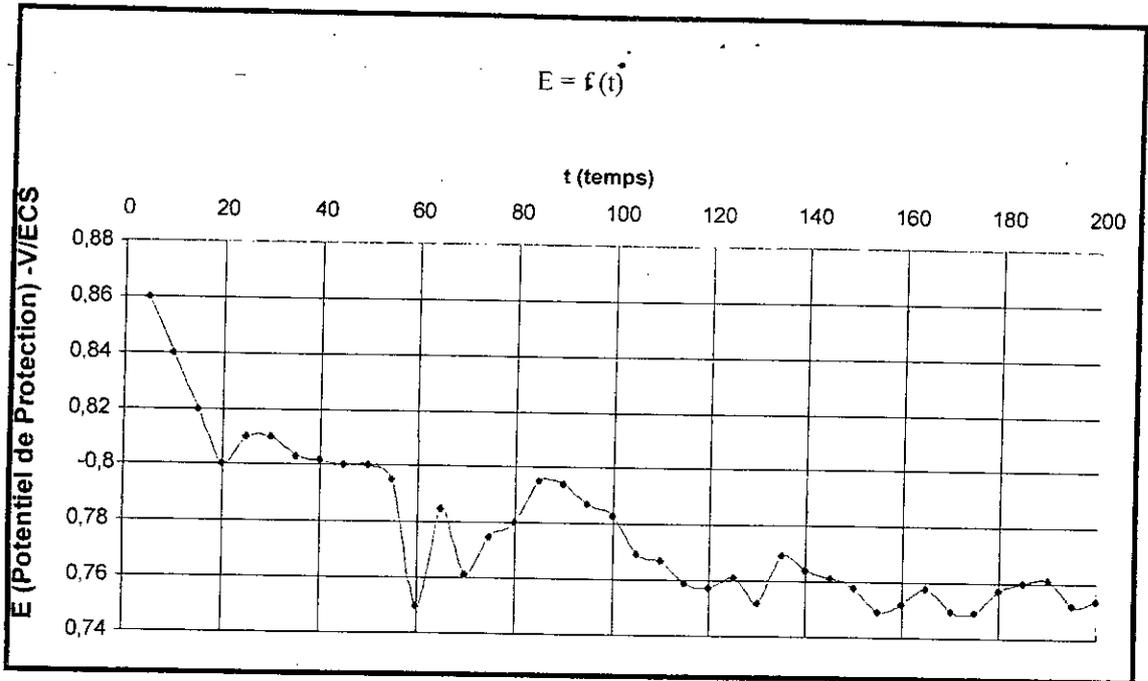


Figure V-7 : Variation du potentiel de protection du X52 en fonction du temps, mesuré avec un pas de 5 minutes.

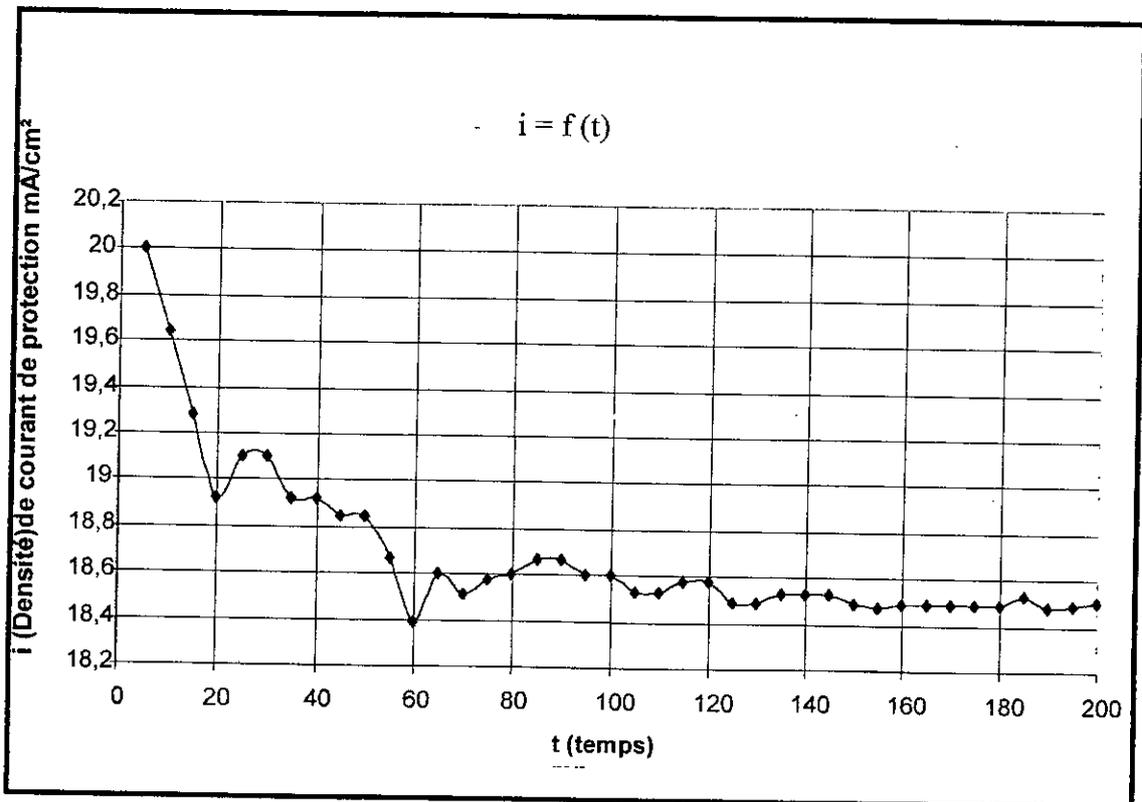


Figure V-8 : Variation de la densité de courant de protection du X52 en fonction du temps, mesurée avec un pas de 5 minutes.

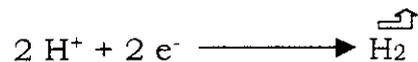
l'enregistrement en continu du potentiel de protection en fonction du temps pour les deux aciers est représenté dans les figures V-9 et V-10.

V-3 Interprétation des résultats

La stabilité du potentiel de protection pour le E24 ait lieu à partir de $t = 80$ minute par contre celle de X52 à partir de 105 minute car la résistance à la polarisation de l'acier E24 est ($R_p = 3.992 \Omega$) est inférieure à celle de l'acier X52 ($R_p = 6.281 \Omega$) et aussi d'après la microstructure du X52 (structure très fine), contient donc un nombre important de micropiles par rapport à E24 qui demande un temps plus grand pour que ces micropiles soient polarisées (deviennent inactives) et que le potentiel de protection de l'acier soit stable.

A la fin de l'essai de protection, nous avons observé à l'œil nu et à l'aide d'une loupe, l'état de surface des deux aciers E24 et X52. Les résultats obtenus révèlent que les surfaces des deux aciers E24 et X52 est lisse et brillant (état de polissage, non attaqué).

Pendant l'essai de la protection nous avons remarquer une forte dégagement d'hydrogène pour le E24 par rapport à X52, qui se traduit par la réaction suivante :



Cette forte dégagement des bulles d'hydrogène est du au fait que les valeurs du courant appliqué à la protection de l'acier E24 est supérieur à celui de l'acier X52, qui se traduit dans la solution H_2SO_4 par une forte mobilité des ions H^+ , et donc un processus de dégagement d'hydrogène très rapide par rapport à X52.

Pour être plus rigoureux dans nos résultats et optimiser bien le domaine de protection, nous avons abaissé la tension du transfo-redresseur $U_{T.R}$ et par conséquence, le potentiel de protection des deux aciers à des valeurs comprises entre -0.40 et -0.50 V/ECS. L'état de surface des deux échantillons obtenu est sombre de couleur grise. Ce changement de l'état de surface est du à une attaque de la surface de l'échantillon par l'électrolyte dans cet intervalle de tension.

L'enregistrement en continu du potentiel de protection en fonction du temps relève deux stades différents. Le premier stade correspond aux fortes variations du potentiel de protection, cela est du au micropiles que contient l'échantillon et un deuxième stade qui correspond à la stabilité du potentiel de protection.

Nous avons appliqué une protection prolongée pendant 64 heures et 32 minutes pour l'acier E24, l'état de surface obtenu est lisse non corrodé (état de polissage).

Pour pouvoir comparer l'état corrodé et l'état protégé de nos échantillons, nous avons plongé les deux aciers dans l'électrolyte pendant une durée de 1 heures et 30 minutes, l'état de surface des deux aciers sont représentées dans les figures V-11 et V-12.

Nous remarquons que la corrosion atteint toute la surface de l'acier (corrosion uniforme) et aussi la couleur de la surface a changée (de couleur grise).

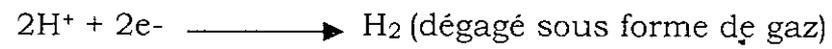
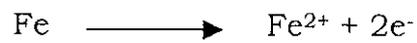


Figure V-11: Etat de surface du E24 après une corrosion de 1 heures et 30 minutes.

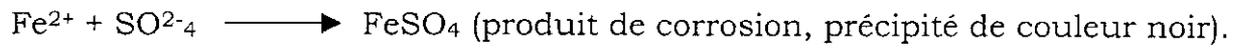


Figure V-12: Etat de surface du X52 après une corrosion de 1 heures et 30 minutes.

La corrosion des ces deux aciers E24 et X52 est représentée selon les réaction suivantes :



La réaction globale est donnée par :



CONCLUSION

GENERALE

Conclusion Générale

Les phénomènes de corrosion sont très complexes par leur mécanismes, par leur multiples causes et par leur morphologies.

Cette corrosion qui détruit de grandes structures et installations métalliques comme les pipelines, les bacs de stockage de carburant et les stations off-shore chaque année, engendre des pertes économiques énormes et pose de sérieux problèmes de sécurité à l'environnement. Les spécialistes dans le domaine ont tiré la sonnette d'alarme pour faire barrière à ce fléau ou au moins de minimiser les dégâts, en appliquant les différentes techniques de protection.

Dans notre travail, nous sommes intéressés à une des techniques de protection de l'acier contre la corrosion : La protection cathodique à courant imposé, vu son large utilisation et les différentes avantages quelle présente par rapport à d'autre techniques comme la protection par anodes sacrificielles ou drainage des courant vagabonds.

Cette technique est simple en son principe mais la maîtrise de ses paramètres électriques est un peu délicate.

L'inconvénient majeur de cette technique, c'est qu'elle nécessite un contrôle permanent du potentiel de protection et du courant électrique débité par le transformateur-redresseur ainsi que sa répartition uniforme dans la structure à protéger. Un incident comme la coupure de l'électricité par exemple, provoque le phénomène inverse c'est-à-dire la corrosion de la structure. Elle présente aussi une difficulté qui réside dans le réglage du potentiel de protection de la structure qui demande parfois plusieurs mois à le stabilisé.

L'application de cette technique à des aciers au carbone X52 et E24 nous a permis d'obtenir les résultats suivants:

1. Suivre l'état de surface des échantillons en fonction du temps dans des conditions précises (concentration, pH du bain, intensité et potentiel électrique);
2. Un dégagement de l'hydrogène pendant l'expérience qui caractérise le domaine d'immunité du métal ;
3. La dissolution de l'anode en graphite en fonction du temps ;
4. Suivre l'évolution de la densité de courant de protection en fonction du temps ;

5. Suivre l'évolution du potentiel de protection de l'acier en fonction du temps et en fonction des paramètres électriques du transformateur-redresseur.

Ces deux derniers paramètres, potentiel de protection et densité de courant de protection sont des caractéristiques importantes qui demande beaucoup de soins dans leur déterminations avant d'entamer toute étude et dimensionnement d'une protection cathodique par courant imposé. Parfois l'ajustement du potentiel de protection est difficile car il dépend de la nature du matériau et des caractéristiques physico-chimiques de l'électrolyte (la composition de l'électrolyte change en fonction du temps).

6. L'étude expérimentale nous a permis de fixer les paramètres de protection des deux aciers. Nous avons constaté que les aciers traversent plusieurs phases de variation du potentiel avant de se stabiliser à une valeur de -0.759 V/ECS et de -0.75 V/ECS pour l'acier E24.

7. La durée de première phase est de 115 minutes pour l'acier X52 et de 80 minutes pour l'acier E24.

8. Le calcul et le dimensionnement d'une protection cathodique d'un tronçon de pipe de 30 Km, a permis de déterminer les paramètres et les conditions de la protection cathodique.

Nous avons réalisé un programme de calcul qui permet de réaliser les objectifs suivants :

- ❖ Rapidité dans les calculs;
- ❖ Extrapolation, longueur du tronçon et durée de vie ;
- ❖ Variation des paramètres et des conditions de l'ouvrage à protéger.

Nous estimons que ce modeste travail, permet de réaliser une étude technique de dimensionnement d'une protection cathodique d'un pipeline.

Ce travail pourra être complété par l'utilisation de moyens plus adéquats pour l'étude expérimentale et par le développement du programme de calcul. On doit s'intéresser en particulier aux question suivantes :

- Si le phénomène de polarisation débute correctement sur la structure ;
- A quelle date la structure est complètement protégée ;
- Le débit des anodes en fonction du temps.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] **Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel** : Guide de Protection Cathodique, ed. Technip, 1996.
- [2] **C. S. R. P. P. G. N.** : Manuel de Protection Cathodique, ed. Technip, 1981.
- [3] **H. H. UHLIG** : Corrosion et Protection, ed. Dunod, 1970.
- [4] **M. NEUVEUX** : La Corrosion des Conduites d'eau et de Gaz, ed. Eyrolles, 1968.
- [5] **A. J. MAURIN** : Introduction à l'esprit de la Technique d'anticorrosion, ed. Eyrolles, T1.T2, 1964.
- [6] **D. PETROCOKINO** : Protection Anodique, Protection Cathodique, Technique de L'ingénieur, M156, pp. 1-21, 1979.
- [7] **P. ORLOWSKI** : Comment Vaincre la Corrosion Métallique, ed. Eyrolles, 1973.
- [8] **J. J. CROLET, G. BERANGER** : Corrosion en Milieu Aqueux des Métaux et Alliages, Technique de L'ingénieur, M150, PP.1-18, 1979.
- [9] **W. SHEFERD** : Corrosion Prevention and Control. Protection of Pipelines from Corrosion by Cathodique Protection, V.10, N°4, PP. 90-93, Août 1987.
- [10] **L. J. Korb, D. L. Olson** : Metals Handbook. Corrosion, 9^e.ed, V.13.1990.
- [11] **N. FROST** : Corrosion Pevention and Control. Pipeline Coating Faults Evaluated, V.10, N°4, PP.35-37, Avril 1987.
- [12] **A. F. GARNER** : Corrosion Prevention and Control, Offshore Pipeline Bracelet Anodes, V.10, N°2, PP. 37-39, April 1987.
- [13] **D. A. WHITING, M.A. NAGI, J.P BROOMFIELD** : Laboratory Evaluation of Sacrifial anode Materials for Cathodic Protection, V.52, No6, PP.472-479, june 1996.
- [14] **STECTA** : La protection cathodique des canalisations souterraines en acier, ed. Busson, 1957.
- [15] **J. M. WEST** : Electrode function and corrosion process, 1977.

- [16] **Commission Française pour l'étude de la corrosion des canalisations souterraines** : les canalisations d'eau et de gaz, Corrosion, dégradation et protection, ed. Lavoisier, 1987.
- [17] **I. N. T** : Introduction à l'étude de la corrosion métallique dans les industries pétrolières et chimique, ed. technip, 1977.
- [18] **J. ROBIN** : Introduction aux Méthodes électrochimiques, ed. Masson, 1967.
- [19] **J. M. WEST** : Basic corrosion and oxidation, 2^e.ed, 1986.
- [20] **M. ROCHE** : Protection Contre La Corrosion des Ouvrages Maritimes Pétroliers, ed. technip, T1, 1978.
- [21] **Y. NAKAMURA, F. KAJIYAMA** : Corrosion engineering. AC Corrosion of Carbon Steel in Soils and it's Control, V.46, N°12, PP. 991-1000, 1997.
- [22] **M. PERIASSAMY, P.R. KRISHNASWAMY** : Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Corrosion rate and Tafel Slopes from Polarisation curves V.61, PP.349-352, 1975.
- [23] **B. GOSSE** : Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Etude Expérimentale de la Polarisation d'une Electrode en Milieu Résistant, V.61, PP. 265-279, 1975.
- [24] **D. L. PIRON** : Electrochemistry of Corrosion, ed. NACE, 1991.
- [25] **D. LANDOLT** : Corrosion et Chimie de Surfaces des Matériaux, 1^{ère}.ed, 1993.
- [26] **M. G. FONTANA** : Corrosion engineering, 3.ed, 1988.
- [27] **J. M. DORLOT, J.P. BAILON J. MASOUNANE** : Des Matériaux, 2^{ème}. Ed, PP. 201-226, 1986.
- [28] **A.J.SEDRIUS** : Corrosion of stainless steel, 1979.
- [29] **H. H. UHLIG** : Corrosion and corrosion control, 3^e.ed, 1985.
- [30] **J. POKORNY** : Album de métallographie, ed.IRSID, 1971.
- [31] **ORLOWSKI** : Comment Vaincre la Corrosion Métallique, ed. eyrolles, 1973.
- [32] **CHAMPION** : Corrosion Testing Procedure, 2^e. Ed, 1964.
- [33] **Association** : Dégradation Microbienne des Matériaux, ed. technip, 1974

- [34] **J. BESSON, J. GUITTON** : Manipulation d'électrochimie, Introduction à la théorie et à la pratique de la cinétique électrochimique, ed. Masson, 1972.
- [35] **I. N. S. A** : La lutte contre la corrosion et l'usure, ed. Masson, 1970.
- [36] **Centre de recherche d'unieux**: Les problèmes Industriels de Corrosion, 1970.
- [37] **LACOURCELLE** : Protection contre la Corrosion, ed. presse universitaire, 1976.
- [38] **G. V. AKIMOV** : Théorie et Méthode d'essai de la corrosion des Métaux, ed. Dunod, 1957.
- [39] **U. R. EVANS** : The corrosion and Oxydation of Metals, 3^e.ed, 1967.
- [40] **N. D. THOMASHOV** : Theory of corrosion and protection of metals, 1966.

ANNEXES

ANNEXE 1

DEVELOPPEMENT DE L'EQUATION DE STERN-GEARY POUR LE CALCUL DES VITESSES DE CORROSION A PARTIR DES COURBES DE POLARISATION OBTENUES A DE FAIBLES DENSITES DE COURANT

Supposons que le courant de corrosion I_{corr} se situe pour une certaine valeur dans la région de Tafel à la fois pour les réactions anodique et cathodique. Supposons aussi que la polarisation de concentration et que la chute de IR soient négligeables.

Si le métal se corrode est polarisé comme cathode au moyen d'un courant externe à un potentiel ϕ' ne différent que légèrement de ϕ_{corr} , la polarisation suit la droite ϕ_cOA . Un courant cathodique I_c plus important se produit, en même temps que diminue automatiquement le courant anodique I_a , en raison de la relation :

$$I_c = I_a + I_{appliqué}$$

Il en est de même pour la polarisation anodique où $I_{appliqué}$ change de signe :

$$I_a = I_c - I_{appliqué}$$

$$\phi_{corr} - \phi' = \Delta\phi = -\beta_c \lg \frac{I_{corr}}{I_c^0} + \beta_c \lg \frac{I_c}{I_c^0} = \beta_c \lg \frac{I_c}{I_{corr}}$$

la figure suivante nous montre un diagramme de polarisation pour un métal polarisé cathodiquement.

Où I_{oc} est le courant d'échange de la réaction cathodique. De même, si le métal est polarisé en quantité égale dans la direction anodique :

$$\Delta\phi = -\beta_a \lg \frac{I_a}{I_{corr}}$$

On peut tirer :

$$I_c = I_{corr} 10^{\Delta\phi/\beta_c} \quad \text{et} \quad I_a = I_{corr} 10^{-(\Delta\phi/\beta_a)}$$

Et donc :

$$I_{appliqué} = I_{corr} [10^{\Delta\phi/\beta_c} - 10^{-(\Delta\phi/\beta_a)}] \dots\dots\dots (*)$$

Le développement en série de $10^x = 1 + 2,3x + (2,3x)^2/2! + \text{etc.}$

Ainsi, si $\Delta\phi/\beta_c$ et $\Delta\phi/\beta_a$ sont petits, les termes plus élevés peuvent être négligés et l'équation (*) se rapproche de :

$$I_{\text{appliqué}} = 2,3 I_{\text{corr}} \Delta\phi \left[\frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right]$$

Ou bien :

$$I_{\text{corr}} = \frac{1}{2,3 \cdot \Delta\phi} I_{\text{appliqué}} \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c}$$

ANNEXE 2

TRAITEMENT MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME D'ATTÉNUATION DU COURANT ÉLECTRIQUE DANS LE CAS DE STRUCTURES LONGILIGNES

Dans le cas où la structure est longiligne tel que les pipelines, et que les points de connexion avec les anodes ou les soutirage de courant sont espacés, il faut tenir compte de la résistance électrique de la structure elle-même, qui provoque un effet d'atténuation du courant. Les calculs se font alors en utilisant la notion de résistance d'isolement de la structure.

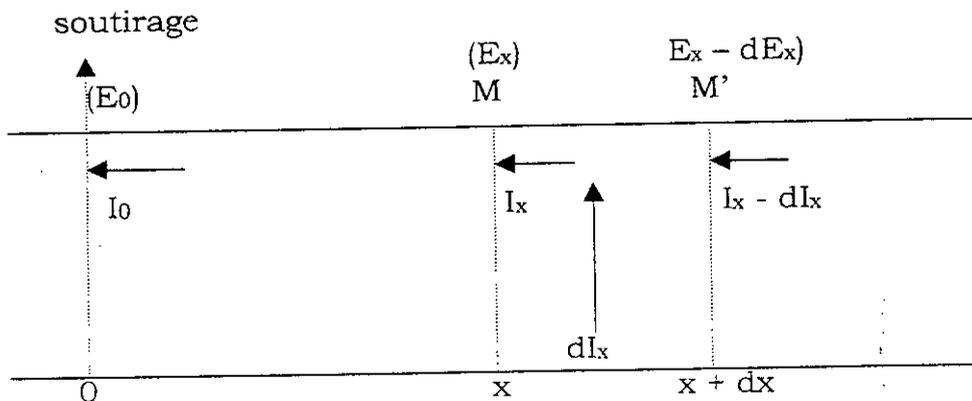


figure 1 : Situation électrique sur une structure longiligne homogène[1].

1) EQUATION DE BASE :

$$dI_x = \frac{E_x}{R} dx \quad (\text{hypothèse polarisation cathodique linéaire})$$

$$dE_x = r \cdot I_x \cdot dx$$

$$I_x = 0 \quad \text{au bout de la structure}$$

2) RESOLUTION GENERALE :

$$E_x = E_0 \operatorname{ch}(ax) - R_c \cdot I_0 \operatorname{sh}(ax)$$

$$I_x = I_0 \operatorname{ch}(ax) - \frac{E_0}{R_c} \operatorname{sh}(ax)$$

3) CAS D'UNE STRUCTURE DEMI-INFINI :

$$E_x = E_0 \cdot e^{-ax}$$

$$I_x = I_0 \cdot e^{-ax}$$

$$R_{eqx} = R_{eq0} = R_c$$

4) CAS D'UNE STRUCTURE FINI DE LONGUEUR L (en m) :**a) en 0**

$$E_0 = E_L \cdot \operatorname{ch}(aL)$$

$$I_0 = E_L / R_c \cdot \operatorname{sh}(aL)$$

$$R_{eq0} = R_c \cdot \operatorname{coth}(ax)$$

b) en x (en fonction de E_L)

$$E_x = E_L \operatorname{cha}(L-x)$$

$$I_x = E_L / R_c \cdot \operatorname{sha}(L-x)$$

$$R_{eqx} = R_c \cdot \operatorname{cotha}(L-x)$$

c) en x (en fonction de E_0)

$$E_x = E_0 \cdot \operatorname{cha}(L-x) / \operatorname{cha} \cdot L$$

$$I_x = E_0 / R_c \cdot \operatorname{Sha}(L-x) / \operatorname{cha}$$

d) en x (en fonction de I_0)

$$E_x = R_c \cdot I_0 \cdot \operatorname{cha}(L-x) / \operatorname{sha} \cdot L$$

$$I_x = I_0 \cdot \operatorname{sha}(L-x) / \operatorname{sha} \cdot L$$

Nomenclature des symboles :

0 : point de soutirage du courant et origine des abscisses ;

I_x : intensité circulant au point x en Ampère ;

E_x : abaissement de potentiel par rapport au potentiel naturel de la structure créée au point x en volts ;

dI_x : intensité entrant dans la structure entre les points x et x+dx en Ampère ;

dE_x : abaissement de potentiel créée entre les points x et x+dx en volts ;

R_{eqx} : résistance équivalente E_x / I_x de la structure au delà du point x ;

r : résistance longitudinale de la structure en $\Omega \cdot m^{-1}$;

R : résistance transversale de la structure en $\Omega \cdot m$;

a : coefficient d'atténuation $a = r/R$ de la structure en m^{-1} ;

R_c : résistance caractéristique $r \cdot R$ de la structure en Ω ;

On remarque d'après ces formules que l'effet du soutirage se fait sentir d'autant plus loin sur une conduite que le rapport r/R est plus petit.

Il est donc économique d'avoir :

- r faible (très bonne conductivité longitudinale, pour cela en utilise des structures en acier et en préfère utilisé des assemblages soudés[9];
- R très grande (excellent revêtement), pour cela en utilise des revêtement en soie de verre et en carboplast[9]. Le tableau suivant nous donne quelques valeurs de ces résistances.

Tableau 1 : valeurs moyennes des résistances d'isolement[1].

Différents cas	R (Ωm^2)
Structure nue enfouie dans le sol	5 à 20
Structure nue en eau de mer sous protection cathodique	10
Conduite revêtue de jute et bitume enfouie depuis une trentaine d'année	30 à 200
Canalisation dans la traversée de marais ou fleuves	100 à 1500
Conduite revêtue carboplaste qualité C dans de bonnes conditions	5000 à 10000 ou plus
Conduite revêtue polyéthylène (sans points d'accroc)	10^{11}

ANNEXE 3

Valeurs du potentiel et de la Densité de courant de protection des deux aciers E24 et X52

Tableau-2 : Différentes valeurs du potentiel E et de la densité de protection i en fonction du temps pour le X52 mesurées avec un pas de 5 minutes.

X52								
Temps (min)	5	10	15	20	25	30	35	40
E_{prot} (V/CSC)	-0.86	-0.84	-0.82	-0.80	-0.81	-0.81	0.803	-0.802
i_{prot} (mA/Cm ²)	20	19.64	19.28	18.92	19.10	19.10	18.92	18.92
Temps (min)	45	50	55	60	65	70	75	80
E_{prot} (V/CSC)	-0.80	-0.80	-0.795	-0.75	-0.785	-0.761	-0.775	-0.780
I_{prot} (mV/Cm ²)	18.85	18.85	18.67	18.39	18.60	18.51	18.58	18.60
Temps (min)	85	90	95	100	105	110	115	120
E_{prot} (V/CSC)	-0.795	-0.794	-0.787	-0.783	-0.769	-0.767	-0.759	-0.757
I_{prot} (mA/Cm ²)	18.67	18.67	18.60	18.60	18.53	18.53	18.58	18.58
Temps (min)	125	130	135	143	145	150	155	160
E_{prot} (V/CSC)	-0.761	-0.752	-0.769	-0.764	-0.761	-0.758	-0.749	-0.752
I_{prot} (mA/Cm ²)	18.49	18.49	18.53	18.53	18.53	18.49	18.47	18.49
Temps (min)	165	170	175	180	185	190	195	200
E_{prot} (V/CSC)	-0.758	-0.750	-0.749	-0.757	-0.760	-0.761	-0.752	-0.754
I_{prot} (mA/Cm ²)	18.49	18.49	18.49	18.49	18.53	18.48	18.49	18.50

❖ $U_{T.R} = 2.88$ V

❖ Courant appliqué : $I_{app} = 55.7$ mA

❖ Densité de courant de protection appliquée $i_{prot} = 20$ mA/Cm²

L'affichage du millivoltmètre digital nous donne une variation de potentiel entre l'électrode de référence et l'échantillon, et cette variation est positive.

$$\Delta E = E_{\text{réf}} - E_{\text{prot}} > 0$$

Puisque nous travaillons avec l'électrode de référence au calomel et le potentiel de protection est mesuré par rapport à cette même électrode, donc le potentiel de protection de l'acier est égal à la variation du potentiel ΔE avec un signe (-), car le potentiel de protection E_{prot} est négatif.

Tableau V-3 : Différentes valeurs du potentiel E et de la densité de protection i du E24 en fonction du temps mesurées avec un pas de 5 minutes.

E24								
Temps (min)	5	10	15	20	25	30	35	40
E_{prot} (V/CSC)	-0.860	-0.84	-0.832	0.775	-0.769	-0.764	-0.763	-0.761
I_{prot} (mA/Cm ²)	40.50	39.21	38.14	35.42	34.25	34.25	34.25	31.25
Temps (min)	45	50	55	60	65	70	75	80
E_{prot} (V/CSC)	-0.763	-0.76	-0.751	-0.759	-0.763	-0.778	-0.761	-0.758
i_{prot} (mA/cm ²)	31.25	31.10	30.84	30.84	31.25	31.40	30.57	30.50
Temps (min)	85	90	95	100	105	110	115	120
E_{prot} (V/CSC)	-0.751	-0.755	-0.760	-0.764	-0.758	-0.755	-0.761	-0.757
i_{prot} (mA/Cm ²)	30.48	30.50	30.33	30.30	30.25	30.25	30.33	30.25
Temps (min)	125	130	135	140	145	150	155	160
E_{prot} (V/CSC)	-0.751	-0.749	-0.748	-0.748	-0.751	-0.748	-0.749	-0.752
I_{prot} (mA/Cm ²)	30.25	30.25	30.21	30.19	30.25	30.20	30.20	30.20

❖ $U_{T,R} = 3.1 \text{ V}$;

❖ Courant cathodique appliqué, $I_{\text{app}} = 101.25 \text{ mA}$;

❖ Densité de protection, $i_{\text{prot}} = \frac{I_{\text{app}}}{S} = 36.16 \text{ mA/cm}^2$.

Table 2 Typical compositions of ASTM and API pipe steels

Grade	Composition, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Nb	V	Ti	Al
60, Grade A	0.25 max	0.27-0.93	0.10 min	0.048 max	0.058 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade B	0.30 max	0.29-1.06	0.10 min	0.048 max	0.058 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade P2	0.10-0.20	0.30-0.61	0.10-0.30	0.045 max	0.058 max	0.010-0.81	0.010-0.81	0.010-0.65	0.010-0.65	0.010-0.65	0.010-0.65
60, Grade P5	0.15 max	0.30-0.60	0.050 max	0.030 max	0.030 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade P7	0.15 max	0.30-0.60	0.050-1	0.030 max	0.030 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade P11	0.15 max	0.30-0.60	0.050-1	0.030 max	0.030 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade P22	0.15 max	0.30-0.60	0.050 max	0.030 max	0.030 max	1.90-2.60	0.87-1.13	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade Y52	0.26 max	1.40 max	0.40 max	0.050 max	0.050 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade X46	0.26 max	1.35 max	0.35 max	0.050 max	0.050 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade X60	0.26 max	1.35 max	0.35 max	0.050 max	0.050 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade X52	0.21 max	0.90 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade X65	0.21 max	0.90 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade K-55	0.21 max	0.90 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade N-80	0.28 max	1.30 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade P-110	0.28 max	1.48 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade C-90	0.29 max	1.50 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade A-100	0.17 max	0.50 max	0.26 max	0.015 max	0.015 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
60, Grade X60	0.05 max	1.11 max	0.017 max	0.007 max	0.006 max	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

Table 7 Corrosion of low-alloy steels in a marine atmosphere

collected over 15.5 years at 250-m (800-ft) lot, Kure Beach, NC

Description	Temperature, °C										
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Approximate total alloy content, %	Weight loss, mg/dm ² (in ²)	
High-purity iron plus copper	0.020	0.020	0.003	0.03	0.006	0.05	0.020	0.010	0.010	0.1	43
High-purity iron plus copper	0.020	0.020	0.003	0.03	0.006	0.05	0.020	0.010	0.010	0.1	29.8
Low-phosphorus steel plus copper	0.040	0.040	0.005	0.02	0.007	0.04	0.006	0.010	0.010	1.5	17.3
High-phosphorus steel plus copper	0.095	0.43	0.005	0.05	0.058	0.24	0.36	0.06	0.06	1.2	16.9
High-manganese and silicon steels plus copper	0.17	0.67	0.23	0.03	0.012	0.05	0.29	0.14	0.14	1.4	16.6
Copper steel plus silicon and chromium	0.17	0.89	0.05	0.03	0.075	0.16	0.47	0.19	0.19	2.9	6.3
Copper steel plus nickel	0.16	0.57	0.020	0.02	0.015	0.20	0.24	0.010	0.010	3.0	9.4
Nickel steel	0.16	0.57	0.020	0.02	0.015	0.20	0.24	0.010	0.010	3.0	9.4
Nickel steel plus nickel	0.16	0.53	0.009	0.02	0.016	0.23	0.07	0.06	0.06	3.9	9.2
Nickel steel plus nickel	0.13	0.45	0.007	0.01	0.007	0.09	0.053	0.05	0.05	4.4	9.2
Nickel steel plus nickel	0.13	0.23	0.007	0.01	0.007	0.09	0.053	0.05	0.05	5.9	6.1
Nickel steel plus nickel	0.13	0.23	0.007	0.01	0.007	0.09	0.053	0.05	0.05	5.4	7.3
Nickel steel plus nickel	0.13	0.45	0.009	0.02	0.016	0.23	0.07	0.06	0.06	2.6	10.5
Nickel steel plus nickel	0.16	0.53	0.009	0.02	0.016	0.23	0.07	0.06	0.06	3.0	9.8
Nickel steel plus nickel	0.10	0.59	0.049	0.01	0.013	1.02	0.09	1.01	1.01	3.4	6.5
Nickel steel plus nickel	0.10	0.59	0.049	0.01	0.013	1.02	0.09	1.01	1.01	3.4	6.5
Nickel steel plus nickel	0.08	0.57	0.33	0.01	0.015	1.34	0.19	0.74	0.74	3.4	7.6
Nickel-copper steel	0.12	0.57	0.17	0.02	0.01	1.00	1.05	0.010	0.010	2.8	10.6
Nickel-copper steel	0.09	0.48	1.00	0.03	0.03	1.14	1.06	0.010	0.010	3.8	5.6
Nickel-copper steel	0.11	0.43	0.18	0.02	0.012	1.52	1.09	0.010	0.010	3.2	10.0
Nickel-copper steel	0.11	0.65	0.13	0.02	0.02	0.86	0.29	0.57	0.66	2.4	10.5
Nickel-copper steel	0.11	0.25	0.25	0.04	0.020	0.65	0.33	0.74	0.74	2.9	9.3
Nickel-copper steel	0.08	0.16	0.03	0.03	0.009	0.29	0.33	0.08	0.08	1.1	18.2
Nickel-copper steel	0.13	0.03	0.16	0.01	0.02	0.73	0.33	0.087	0.087	2.0	11.2

Table 2 Corrosion of structural steels in various environments

Type of atmosphere	Time, years	Average reduction in thickness										
		Structural carbon steel	Structural copper steel	1.75% Ni-1.50% Cr								
Industrial (Newark, NJ)	3.5	84	3.3	66	2.6	33	1.3	46	1.8	36	1.4	36
Industrial (Newark, NJ)	7.5	104	4.1	81	3.2	36	1.5	53	2.1	43	1.7	43
Industrial (Newark, NJ)	15.5	135	5.3	102	4.0	46	1.8	61	2.4	46	1.8	46
Semi-industrial (Monroeville, PA)	1.5	56	2.2	43	1.4	28	1.1	36	1.4	30	1.2	41
Semi-industrial (Monroeville, PA)	3.5	94	3.7	64	2.5	30	1.2	53	2.1	36	1.4	41
Semi-industrial (Monroeville, PA)	7.5	130	5.1	81	3.2	36	1.5	61	2.4	46	1.8	46
Semi-industrial (Monroeville, PA)	15.5	185	7.3	119	4.7	46	1.8	61	2.4	46	1.8	46
Semi-industrial (South Bend, PA)	1.5	46	1.8	36	1.4	28	1.1	36	1.4	30	1.2	38
Semi-industrial (South Bend, PA)	3.5	74	2.9	56	2.2	33	1.3	48	1.9	38	1.5	61
Semi-industrial (South Bend, PA)	7.5	117	4.6	81	3.2	46	1.8	69	2.7	48	1.9	61
Semi-industrial (South Bend, PA)	15.5	178	7.0	122	4.8	56	2.2	94	3.7	56	2.2	61
Rural (Potter County, PA)	2.5	51	2.0	43	1.7	28	1.1	36	1.4	30	1.2	46
Rural (Potter County, PA)	7.5	76	3.0	64	2.5	33	1.3	48	1.9	38	1.5	46
Rural (Potter County, PA)	15.5	119	4.7	97	3.8	36	1.4	53	2.1	43	1.7	46
Moderate marine (Kure Beach, NC, 250 m or 800 ft. from ocean)	0.5	23	0.9	20	0.8	15	0.6	20	0.8	18	0.7	25
Moderate marine (Kure Beach, NC, 250 m or 800 ft. from ocean)	1.5	58	2.3	48	1.9	28	1.1	43	1.7	30	1.2	43
Moderate marine (Kure Beach, NC, 250 m or 800 ft. from ocean)	3.5	124	4.9	84	3.3	46	1.8	64	2.5	48	1.9	56
Moderate marine (Kure Beach, NC, 250 m or 800 ft. from ocean)	7.5	142	5.6	114	4.5	61	2.5	94	3.7	56	2.2	56
Severe marine (Kure Beach, NC, 25 m or 80 ft. from ocean)	0.5	23	0.9	20	0.8	15	0.6	20	0.8	18	0.7	25
Severe marine (Kure Beach, NC, 25 m or 80 ft. from ocean)	1.5	58	2.3	48	1.9	28	1.1	43	1.7	30	1.2	43
Severe marine (Kure Beach, NC, 25 m or 80 ft. from ocean)	3.5	124	4.9	84	3.3	46	1.8	64	2.5	48	1.9	56
Severe marine (Kure Beach, NC, 25 m or 80 ft. from ocean)	7.5	142	5.6	114	4.5	61	2.5	94	3.7	56	2.2	56

III-5 Conception d'un programme de calcul pour une protection cathodique à courant imposé

```

pack;
format long e;
input('<<<<<<< LIRE ATTENTIVEMENT LE CONTENU DES LIGNES. Pour CONTINUER TAPEZ à chaque fois sur "ENTREE" >>>>>>>');
input(' ****. CALCUL DE LA RESISTANCE DE L"ANODE PAR RAPPORT à L"ELECTROLYTE SUIVANT DIFFERENTS CAS: ****');
input(' 1° CAS DE D"UNE ANODE CYLINDRIQUE =====> A=1');
input(' 2° CAS D"UNE ANODE MASSIVE DE SURFACE EXPOSÉE UTILISÉE EN OFF-SHORE =====> A=2');
input(' !! CHOIX DU CAS DE L"ANODE !!');
A=input('ENTRER LA VALEUR DE "" A "" (1 OU 2) =====> A =');
rho=input('ENTRER LA VALEUR DE "" LA RESISTIVITÉ DE L"ELECTROLYTE ""(en ohm.Cm)=====> rho=');
L=input('ENTRER LA VALEUR DE "" LA LONGUEUR DE L"ANODE "" (en Cm) =====> L =');
D=input('ENTRER LA VALEUR DU "" DIAMETRE DE L"ANODE "" (en Cm) =====> D =');
r=D/2;
if A==1
    input(' DIFFERENTS CAS DE POSITIONNEMENT DE L"ANODE :');
    input(' 1°CAS DE L"ANODE VERTICALE PRÉS DE LA SURFACE =====> B=1');
    input(' 2°CAS DE L"ANODE HORIZONTALE OU VERTICALE PROFONDEMENT EN FOUIE =====> B=2');
    input(' 3°CAS DE L"ANODE HORIZONTALE ENTERÉE à UNE PROFONDEUR "" h "" =====> B=3');
    input(' 4°CAS DE L"ANODE ENTERÉE à FAIBLE PROFONDEUR =====> B=4');
    input(' !! CHOIX DU CAS DE POSITIONNEMENT !!');
    B=input('ENTRER LA VALEUR DE "" B "" (1;2;3 OU 4) =====> B =');
    %% trouver la commande qui fait afficher la valeur du calcul fait "r"
    input(' LA VALEUR DE LA RESISTANCE "" R "" ( en ohm )EST :');
    if B==1
        R=(rho/(2*pi*L))*(log(4*L/r)-1)
    end
    if B==2
        R=(rho/(2*pi*L))*(log(2*L/r)-1)
    end;
    if B==3
        R=(rho/(2*pi*L))*log(((L**2+L*sqrt(4*h**2+L**2))/(r*h))+(2*h/r)-sqrt((4*h**2+L**2)/L))
    end;
    if B==4
        R=(rho/(2*pi*L))*log(4*L/D)
    end;
end;
if A==2
    rho=input('ENTRER LA VALEUR DE "" LA RESISTIVITÉ DE L"ELECTROLYTE ""(en ohm.Cm)=====> rho=');

```



```
input('*****TAPER SUR ENTRER POUR CONTINUER*****');
```

```
input('**** CALCUL DU POIDS DE L'ANODE "" Pa "" (en kg) ****');  
Mv=input('ENTRER LA VALEUR DE LA MASSE VOLUMIQUE DE L'ANODE CHOISIE (en kg/m3) =====> Mv=');  
input(' LA VALEUR DU POIDS DE L'ANODE "" Pa "" EST EGALE à :');  
Pa=Mv*0.01*L*pi*(0.01*D/2)**2
```

```
input('*****TAPER SUR ENTRER POUR CONTINUER*****');
```

```
input('**** CALCUL DU NOMBRE D'ANODES "" Na "" ****');  
input(' LA VALEUR DU NOMBRE D'ANODES "" Na "" EST EGALE à :');  
Na=Ma/Pa
```

```
input('*****TAPER SUR ENTRER POUR CONTINUER*****');
```

```
input('**** CALCUL DE LA TENSION DU GENERATEUR DEBITée "" U "" (en Volts) ****');  
ALPHA=input('ENTRER LA VALEUR DU COEFFICIENT DE SECURITE SUR LA TENSION ANODIQUE===== >ALPHA=');  
GAMMA=input('ENTRER LA VALEUR DE LA CHUTE DE TENSION OHMIQUE =====>GAMMA=');  
input(' LA VALEUR DE LA TENSION DU GENERATEUR DEBITée "" U "" EST EGALE à :');  
U=(R*I/ALPHA)+GAMMA
```