

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Stratégie de maintenance face à la
corrosion des équipements industriels

Préparé par :

ZERARKA Younes et Medereg Benchohra

Soutenu publiquement le : 14 / 07 / 2022, devant le jury composé de :

SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
MAKHFI Souad	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
BENARBIA Djamilia	Maître Assistant "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
SASSI Ahmed	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

Remerciements

Au nom de Dieu Le Clément et Le Miséricordieux, le grand merci Lui revient de nous avoir à élaborer Ce mémoire, et de passer à tous les épreuves

« Allah soubhanahou wa taala ».

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudees à notre encadreur Le professeur Mr SASSI , qui a suivi et dirigé ce travail avec ses précieux commentaires, et ses conseils pertinents qui nous a grandement aidé au cours de la préparation de ce mémoire. Nous le remercions pour sa gentillesse et sa patience.

Nous remercions aussi les membres du jury. Enfin, que toutes les personnes qui nous a aidé d'une manière ou d'une autre au cours de notre travail qui ne sont pas citées dans ces lignes, trouvent ici l'exception de nos sincères remerciements

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

Nos chers parents

A nos familles

A tous ceux qui nous sont chers

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Table d'abréviation	
Introduction générale	07

Chapitre I : Théorie de La Corrosion

I-1. Définition de la corrosion	09
I-2. Les facteurs qui interviennent dans les différents phénomènes de corrosion	09
I-3. Importance économique de la corrosion	09
I-4. Nature de la corrosion	10
I-4.1. Corrosion humide	10
I-4.2. Corrosion sèche	12
I-4.3. Corrosion bactérienne (corrosion biochimique)	13
I-5. Les types de corrosion.....	13
I-5.1. Corrosion chimique	13
I-5.2. Corrosion électrochimique	14
I-5.3. Corrosion accompagnée d'usure	14
I-6. Les formes de corrosion	14
I-6.1. Corrosion uniforme	14
I-6.2. Corrosion galvanique.....	15
I-6.3. Corrosion intergranulaire.....	16
I-6.4. La corrosion sélective	16
I-6.5. Corrosion cavernueuse	17
I-6.6. Corrosion filiforme.....	18
I-6.7. Corrosion-cavitation	18
I-6.8. Corrosion sous contraintes.....	19
I-6.9. Corrosion par piqûres.....	20
I-6.10. La corrosion avec érosion.....	20
I-6.11. La corrosion frottement	21
I-7 Facteurs de corrosion.....	22

Chapitre II : corrosion et protection des métaux ferreux

II. Introduction	24
II.1. Définition.....	24
II.2. La corrosion du fer	25
II.2.1. La corrosion du fer en milieu aqueux :.....	25

II.2.2. La corrosion du fer en milieu atmosphérique :	27
II.3. L'acier.....	30
II.3.1. Définition de l'acier.....	30
II.3.2. Corrosion de l'acier	30
II.4. Potentiel d'électrode.....	32
II.5. Diagramme de Pourbaix du fer.....	33
II.6. Protection Des Métaux Ferreux.....	35
II.6.1. Corrosion uniforme	35
II.6.2. Corrosion localisée	35
II.6.3. Corrosion par piqûres fines	35
II.6.4. Corrosion fissurant.	36
II.7. Moyens de protection	37
II.7.1. Protection par revêtements	37
II.7.1.1. Revêtements métalliques	37
II.7.1.1.1 Revêtements nobles ou cathodiques :	38
II.7.1.1.2. Revêtements anodiques ou sacrificiels :	38
II.7.1.2. Revêtements non métalliques :	38
II.7.1.2.1. Revêtements organiques	38
II.7.1.2.2. Revêtements inorganiques :	38
II.7.2. Protection électrochimique :	40
II.7.2.1. La protection cathodique :	40
II.7.2.1.1. Protection par anode sacrificielle :	40
II.7.2.1.2. Protection par courant imposé :	40
II.7.2.2. La protection anodique :	41
II.7.3. Protection par inhibiteurs :	41
II.7.3.1. Définition d'inhibiteur :	41
II.7.3.2. Conditions d'utilisations et propriétés :	41
II.7.3.3. Nature de l'inhibiteur :	42
II.7.3.3.1. Les inhibiteurs organiques :	42
II.7.3.3.2. Les inhibiteurs minéraux :	42
II.7.3.4. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :	42
II.7.3.5. Classification des inhibiteurs de corrosion :	43
II.7.3.6.1. Classification selon la réaction partielle	43
II. 7.3.6.1.1. Inhibiteurs anodiques :	44
II. 7.3.6.1.2. Inhibiteurs cathodiques :	44
II. 7.3.6.1.3. Inhibiteurs mixtes :	44
II.7.3.6.2. Classification selon le mécanisme réactionnel :	45
II.7.3.6.2.1. Inhibition de corrosion par adsorption :	45
II.7.3.6.2.2. Inhibition de corrosion par passivation :	45
II.7.3.6.2.3. Inhibition de corrosion par précipitation :	45
II.7.3.6.2.4. Inhibition de corrosion par élimination de l'agent corrosif :	46
II.7.3.6.3. Classification selon le domaine d'application :	46
II.7.3.6.3.1. Inhibition en milieu acide :	46
II.7.3.6.3.2. Inhibition en milieu neutre :	46
II.7.3.6.3.3. Inhibition en phase gazeuse :	47

II.7.3.6.3.4. Inhibiteurs pour le milieu organique :	47
II.7.3.6.3.5. Inhibiteurs naturels de corrosion :	47
II.8. Domaines d'application :	47

Chapitre 03 Etude de cas: maintenance des équipements face à la corrosion

III -1. Corrosion localisée d'une citerne métallique enterrée.....	49
III -2. Cas d'étude.....	50
III -3. Gestion des inspections et des réparations.....	51
III -4. L'fiction sur le milieu	52
III -4.1 La conception et le tracé des assemblages	52
III -4.2 Le choix des matériaux	53
III -4.3 La protection électrochimique	53
III -4.3.1 la protection cathodique par anodes sacrificielles.....	53
III -4.4. La protection par revêtement et traitement de surface	55
III -5. Les traitements de surfaces	55
III -5.1. Dégraissage	55
III -5.2. Décapage	56
III -5.3. Passivation	57
III -6. Les revêtements	58
III -6.1. Composition	58
III -7. Les peintures dans la lutte contre la corrosion.....	59
III -7.1. Les revêtements métalliques	59
III -7.2. Les revêtements anodiques	59
III -7.3. Les revêtements cathodiques	59
III -7.4. Les revêtements organiques	60
III -8. Mode de séchage.....	60
III -9. Choix du revêtement	61
III -10. Etablissement d'un calendrier	61
III -10.1. Pour les actions curatives :.....	61
III -10.2. Actions préventives :.....	61
III -11. Méthode d'archivage	61
Conclusion	65
Références bibliographiques	
Résumé	

Table des abréviations

<i>Symbol</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
C_{dc}	Capacité de double	F/c
R_{tc}	Résistance de transfert de	$m\Omega$
i_{corr}	Densité de courant	/cm
i_{inh}	de corrosion	A/cm^2
E	Densité de courant de corrosion en présence de	cm^2
E_{corr}	l'inhibiteur	Potentiel
I	Potentiel de	A.c
I_a	corrosion	Courant global de la
I_c	réaction	Courant cathodique de la
T	réaction	Température
n	Courant anodique de la	A
R	réaction	A
K_a	Constante des gaz parfaits	A
K_c	Constante de dépendance des vitesses de réactions	k
C_{red}	élémentaire	/
C_{ox}	Concentration de l'espèce réductrice à un niveau de la surface de l'électrode	$8.32.J.mol^{-1}.k^{-1}$
C_{ox}	Concentration de l'espèce oxydante à un niveau de la surface de l'électrode	/
F	Nombre de Faraday	mol
i_o	Densité de courant	$.t^{-1}$
i_a	d'échange	Densité de courant
i_c	anodique	Densité de courant
B_-	cathodique	Pente de
B_+	Tafel	anodique
B_c	Pente de Tafel	ole
I_o	cathodique	Surtension
ΔE	Courant d'électrons d'échanges	$A.cm^{-2}$
ΔIR	Différence du	$A.cm^{-2}$
pR_e	potentiel	Différence du
R_{pore}	courant	Résistance de
R_c	polarisation	Résistance de l'électrolyte
R_{rev}	Résistance de transfert ionique à travers les	AVA
E_0	pores	Résistance électrique intrinsèque du
W	revêtement	Temps
f	Potentiel	standard
φ	Pulsation	Fr
Z	équence	Déphasage
$Re(Z)$	impédance	Partie réelle de l'impédance
$Im(Z)$	Partie imaginaire de	l'impédance
Z_w	Impédance de Warburg	Unité
$j\sigma$	imaginaire	Coefficient de
C_{rev}	Capacité du	Warburg
ζ_0	Capacité du	revêtement
ζ_r	Permittivité du	vide
S	Permittivité relative du	revêtement
e	Surface exposée	Epaisseur du revêtement

Liste des tableaux

Tableaux I-1 Principaux facteurs qui intervenant dans les différents Phénomènes de corrosion.	03
Tableaux I-2 : Principaux facteurs de corrosion.....	16
Tableau 2.1 : Oxydes et hydroxydes présents dans la couche de rouille.....	23
Tableau 1. Différents types de corrosion.....	26
Le tableau 2.2 : montre une série galvanique où les métaux sont classés du métal le moins noble	27
Tableau 2.3 : Types de revêtements.....	31

Liste des figures

Figure I.1 : Corrosion électrochimique.....	05
Figure I.2 : Corrosion sèche	06
Figure I.3 : Corrosion uniform	09
Figure I.4. Conditions requises à la corrosion galvanique.....	10
Figure I.5 : Corrosion inter granulaire	10
Figure I-6. Coupe métallographique Montrant une corrosion sélective d'un laiton	11
Figure I.8. Corrosion Caverneuse	12
Figure I.7. Corrosion caverneuse d'un acier Allié sous un joint.....	12
Figure I.9. Corrosion filiforme d'un support d'aluminium	13
Figure I.10. Cavitation dans une chambre de moteur diesel.....	13
Figure I.11. Corrosion sous contraintes d'un Alliage cuivreux	14
Figure I.12. Corrosion par piqûres (Amorçage (a) et propagation (b) d'une piqûre).....	15
Figure I-12. Corrosion érosion /abrasion/cavitation	15
Figure I.14. Corrosion par frottement d'une pièce.	18
Figure 2.1: photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion	19
Figure 2.2 : Les étapes réactionnelles d'une réaction électrochimique.....	21
Figure 2.3 : Diagramme (E, pH) simplifié du fer	22
Figure 2.4 : Schéma du processus de corrosion atmosphérique à la surfac noble	23
Figure 2.6 : Diagramme de Pourbaix fer	28
Figure 2.7 : Corrosion uniforme	29
Figure 2.8 : Corrosion localisée.....	29
Figure 2.9 : Corrosion par piqûres fines	30
Figure 2.10 : Corrosion fissurant.	30
Figure 2.11 : Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer) [32].....	32
Figure 2.12 : Revêtement anodique (cas du zinc sur fer)	32
Figure 2.13 : Les différents processus se déroulant à l'interface lors de la corrosion d'un métal en milieu liquide	37
Figure 2.14 : Classement des inhibiteurs de corrosion.	38
Figure III-1 : Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles	47
Figure III-2 Principe de la protection cathodique à courant imposé.....	48
Figure III-3 : Diagramme potentiel - pH simplifié du fer.....	49
Figure III-4 : Opération nécessaire pour éliminer les traces de saleté ou de graisse.....	50
Figure III-5. avant et après décapage passivation.....	52
Figure III-6. Présentation des revêtements métalliques.....	54

Introduction générale

La corrosion est un fléau industriel qui jusqu'à nos jours pose de graves problèmes qui ne sont pas complètement résolus, et cause beaucoup de pertes.

L'acier est l'un des matériaux les plus caractéristiques mécaniques et physicochimiques, mais qui malheureusement vu sa grande réactivité avec le milieu extérieur se détériore rapidement par attaque corrosive du milieu s'il n'est pas protégé. Son utilisation est surtout dictée par des raisons économiques.

Les méthodes utilisées pour la protection de l'acier contre la corrosion, il existe des méthodes électrochimiques telles que la protection cathodique ou anodique dans certains cas et les méthodes de protection par de revêtements. Ces derniers peuvent être organiques comme les revêtements de peintures et de résines, ou minéraux comme les revêtements métalliques. Il existe plusieurs procédés d'application des revêtements métallique ; le procédé électrochimique en engendre deux types, à savoir les dépôts chimiques et les dépôts par électrolyte.

Les revêtements composites électrodéposés connaissent un développement industriel croissant grâce aux propriétés particulières qui leur sont conférées par l'incorporation de particules solides.

Particules solides sont utilisées par différents constructeurs comme Revêtements anti-usure ou comme dépôt résistant à l'oxydation à hautes températures. Les particules solides les plus utilisées sont : des oxydes, des carbures et des polymères référence. Les revêtements électrodéposés de nickel- cobalt ont de par leur faible coût et la relative simplicité du procédé, de multiples applications industrielles.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre traite des théories de la corrosion et de ses types.
- Dans le deuxième chapitre, nous parlons de la corrosion et de la protection des métaux.
- au troisième chapitre, nous avons traité de la stratégie de maintenance contre la corrosion.

Chapitre I : Théorie de La Corrosion

I-1. Définition de la corrosion :

Le terme "corrosion" du latin corroder, signifie ronger, attaquer La corrosion peut être définie d'une manière simple, comme étant la dégradation du métal par action du milieu environnant (l'environnement : soit un milieu agressif, liquide ou gazeux), est par contre un phénomène très complexe, lié au milieu d'attaque, à la nature du métal, aux conditions d'emploi et au temps d'exposition [1].

I-2. Les facteurs qui intervenant dans les différents phénomènes de corrosion

➤ Milieu d'attaque	➤ Nature du métal
<ul style="list-style-type: none"> • Concentration du réactif • Impuretés • PH,température, pression • Présence des bactéries 	<ul style="list-style-type: none"> • Composition chimique du métal • Procédés d'élaboration • Impuretés • Éléments d'addition <p>Traitement thermiques</p>
➤ Conditions d'emploi	➤ Temps d'expositions
<ul style="list-style-type: none"> • Etat de surface • Moyens de protection • Condition d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement des matériaux • Variations des conditions Opératoires (température) • Formation de dépôts de corrosion

Tableaux I-1 Principaux facteurs qui intervenant dans les différents Phénomènes de corrosion.

Donc d'une manière plus générale on peut définir la corrosion comme étant une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement [2].

I-3. Importance économique de la corrosion :

Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants :

- Pertes directes: remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés,
- Pertes indirectes : couts des réparations et pertes de production (temps),
- Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

La diversité des coûts rend toute estimation des charges économiques dues à la corrosion difficile et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés. [3]

I-4. Nature de la corrosion :

Suivant la nature du milieu environnant et de la température, la corrosion est dite humide ou sèche. Dans le premier cas, le milieu est constitué par un liquide généralement électrolytique ; la température est modérée. Dans le second cas, il est constitué par des vapeurs et des gaz au-dessus de leur point de rosée ; la température est souvent élevée ($> 200^{\circ}\text{C}$).

Signalons finalement l'existence d'une corrosion particulière appelée corrosion Bactérienne au cours de laquelle interviennent des organismes vivants de différentes espèces.

Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés ainsi que les structures métalliques immergés dans l'eau de mer. [4]

I-4.1. Corrosion humide :

La corrosion humide est la plus rencontrée dans l'industrie du gaz et du pétrole ainsi que dans l'industrie pétrochimique. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau.

La corrosion humide fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir

Simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher :

- ✓ **Une anode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant Une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux,
- ✓ **Une cathode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par réduction de l'oxygène en milieu basique, dépôt d'un métal par réduction d'un de ses cations...),
- ✓ **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même,
- ✓ **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et fermer le circuit électrique. Ce rôle est joué par le milieu électrolytique lui-même. [5]

Si l'on prend la précaution d'utiliser une solution d'un sel du métal à une concentration et une température définies la valeur obtenue est caractéristique du métal. Si la solution à une concentration normale, le potentiel est appelé potentiel normal d'électrode. [6]

I-4.2. Corrosion sèche :

À température élevée, par contre, sous conditions de corrosion sèche, les cations et les anions diffusent plus facilement à travers un film compact. Le film croît progressivement, avec une vitesse égale à la vitesse de corrosion. La figure ci-dessous schématise la réaction d'un métal avec l'oxygène, dans cette situation, le métal s'oxyde à l'interface métal-oxyde et les cations diffusent vers l'extérieur du film.

À la surface extérieure, l'oxygène se réduit en anions O^{2-} qui diffusent vers l'interface métal-oxyde. Les électrons libérés à l'interface métal-oxyde doivent traverser le film d'oxyde avant de réagir à la surface extérieure. On peut considérer la surface extérieure du film comme cathode, la surface intérieure comme anode. Contrairement aux piles électrochimiques classiques, l'oxyde est ici simultanément électrolyte et conducteur électronique. [7]

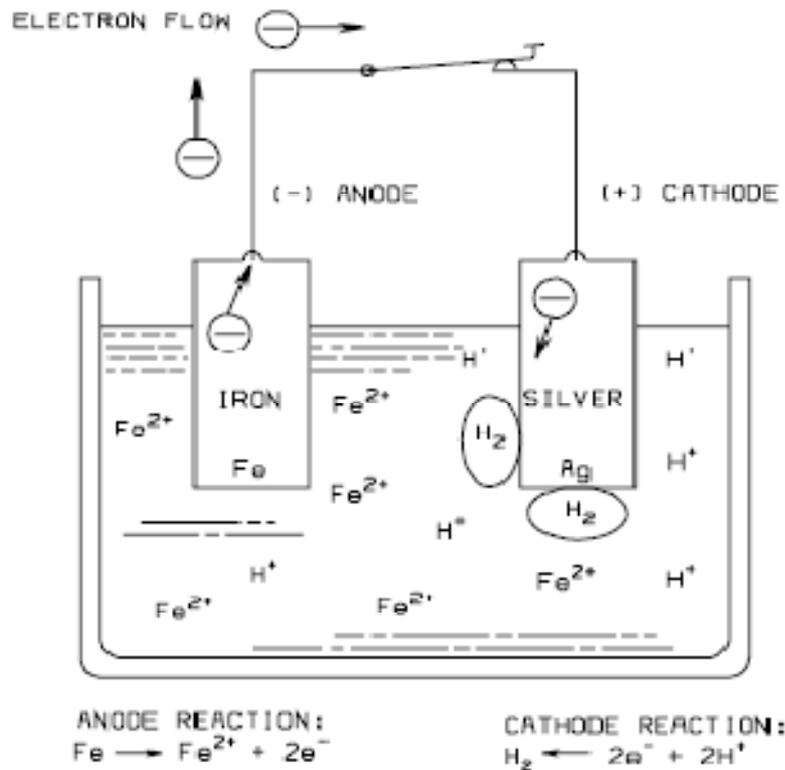


Figure I.2 : Corrosion sèche

I-4.3. Corrosion bactérienne (corrosion biochimique) :

Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés : ces bactéries utilisent quelques éléments chimiques se trouvant dans le matériau pour le transformer en ion métallique ou sécrètent Des produits chimique qui sont agressifs vis à vis du métal. [8]

Deux types de bactéries sont particulièrement bien connus :

Bactéries Sulfate-réductrices : Ces sont des bactéries anaérobies réductrices de sulfates, qui donnent des sulfures suivant la réaction :



(Production de sulfures et d'hydrogène sulfuré)

L'hydrogène est fourni par des plages cathodiques ou les composés organiques de l'environnement,

Bactéries oxydant le soufre : Ces bactéries aérobies sont capables d'oxyder le soufre

Des composés soufrés suivant la réaction :



On les retrouve dans les gisements de pétrole et dans les égouts où elles attaquent rapidement le ciment.

Le développement de ce type de corrosion dépend :

- Du pH,
- De la température,
- De la teneur en oxygène dissous. [7]

I-5. Les types de corrosion :

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion. [9]

I-5.1. Corrosion chimique :

Il s'agit d'une réaction purement chimique entre la surface d'un matériau et un gaz ou un liquide non électrolyte. Par exemple, l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air est une corrosion chimique.

Il s'agit d'une réaction purement chimique entre la surface d'un matériau et un gaz ou un liquide non électrolyte. Par exemple, l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air est une corrosion chimique.

I- 5.2. Corrosion électrochimique :

C'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte. Cette réaction est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique. La dégradation de l'aluminium par l'acide sulfurique dilué appartient à ce type de corrosion.

I-5.3. Corrosion accompagnée d'usure :

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu sur la surface du métal, ils ralentissent la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par usure, abrasive ou érosive. Il y a alors accélération de la corrosion parce que la surface du métal est mise à nu.

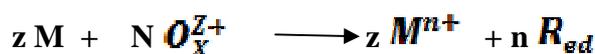
I-6. Les formes de corrosion :

Plusieurs formes de corrosion peuvent être dénombrées, caractérisées par des modifications de propriétés physiques du métal. [10]

I-6.1. Corrosion uniforme :

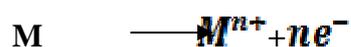
La corrosion uniforme est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Le métal dans ce cas est dans l'état actif. Elle est aisément contrôlable par des mesures de perte de poids ou la diminution d'épaisseur du métal.

D'un point de vue pratique, le couplage d'une ou plusieurs réactions d'oxydation d'un métal ou alliage, avec une ou plusieurs réactions de réduction d'espèces en solution, conduit à l'obtention d'un potentiel « mixte » de corrosion, appelé aussi potentiel libre. La totalité de la surface du métal prend cette valeur du potentiel qui est le siège d'une corrosion généralisée (hypothèse de Wagner Taurde), décrite par la réaction suivante :

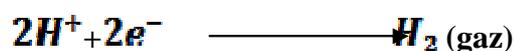


M désigne le métal et M^{n+} l'ion correspondant ; O_X^{Z+} l'oxydant et R_{ed} désigne l'espèce réductrice associé.

La réaction anodique correspond à la dissolution du métal :

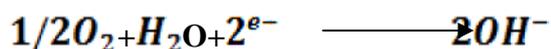


Le cation dissout peut ensuite se présenter sous différentes formes ou encore former des liaisons plus complexes. La réaction cathodique, quant à elle, varie suivant la nature des espèces oxydantes présentes en solution. Le phénomène cathodique le plus fréquemment rencontré est la réaction de réduction du proton H^+ (ou H_3O^+) en milieu acide :

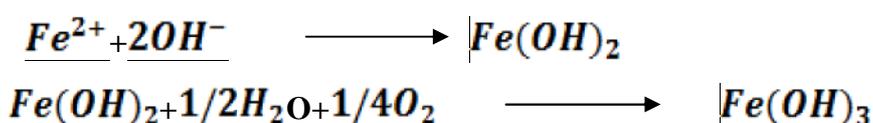


La corrosion se développe infiniment tant qu'elle n'est pas limitée par l'appauvrissement en protons aux pH élevés, ou par la saturation du milieu au voisinage de la surface, en ions Fe^{2+} , qui entraîne la formation d'un dépôt protecteur par précipitation d'hydroxyde ferreux aux pH basiques et limite en général la corrosion

Dans les solutions aqueuses aérées peu acides, neutres ou basiques, la réaction cathodique la plus importante est la réduction de l'oxygène dissous :



Les ions Fe^{2+} de la réaction anodique s'hydrolysent pour former de l'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ selon



Le composé $Fe(OH)_3$ qui se forme est alors très peu soluble et les produits de corrosion peuvent s'accumuler à la surface des métaux. A la suite de la formation de ces dépôts de produits de corrosion, les conditions locales sont considérablement modifiées et le mécanisme d'endommagement peu évalué.



Figure I.3: Corrosion uniforme

I-6.2. Corrosion galvanique:

Contrairement à certains types de corrosion tels que la corrosion intergranulaire, la corrosion par piquûre, la corrosion galvanique est largement indépendante des données métalliques des matériaux. Ce type de corrosion résulte du couplage électrique de deux métaux différents et immergés dans la solution. La polarisation des surfaces métalliques par couplage galvanique a pour conséquence d'accroître la résistance à la corrosion de l'alliage le plus noble (la cathode) et de réduire la résistance à la corrosion de l'alliage le moins noble (l'anode). Elle résulte de la formation d'une pile (Figure I.3) qui conduit à une hétérogénéité de l'attaque. [11]

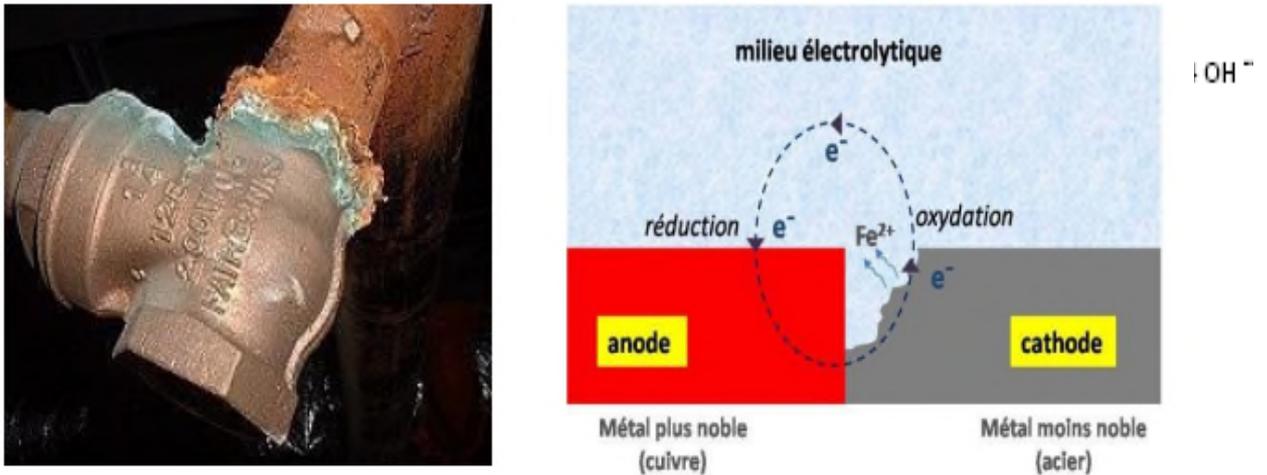


Figure I.4. Conditions requises à la corrosion galvanique

I-6.3. Corrosion intergranulaire :

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit de façon catastrophique leur résistance mécanique. Ce type de corrosion est un phénomène microscopique (invisible dans les étapes initiales). [12]

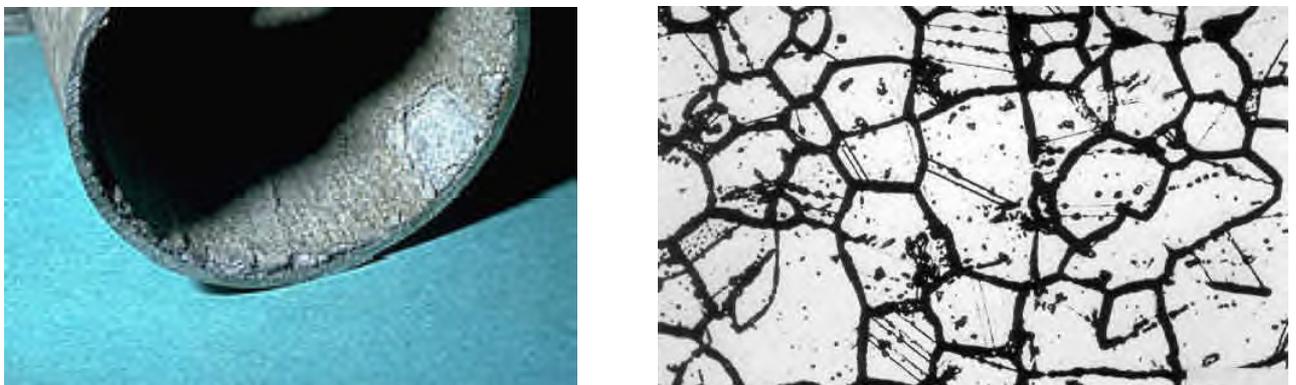


Figure I.5 : Corrosion inter granulaire

I-6.4. La corrosion sélective :

Pour certains alliages, l'attaque intervient sélectivement sur l'un des constituants (qu'il s'agisse d'une solution solide ou d'un mélange de phase). Les exemples les plus connus sont l'attaque des laitons par la dézincification (attaque sélective du zinc) qui se traduit par l'existence des zones poreuses de cuivre. Cette attaque peut être très localisée (taches) et se propager alors dans l'épaisseur de l'alliage plutôt que latéralement. L'addition d'arsenic, d'antimoine ou de phosphore dans le laiton permet d'éviter le phénomène. Les fontes grises peuvent être le siège d'une dissolution sélective du fer qui conduit à laisser en place une structure poreuse de graphite, d'où le

nom corrosion graphitique ou graphitisation donné à cette forme d'attaque qui est favorisée par les sulfates. Dans tous les cas ces attaques sélectives conduisent à modifier profondément les caractéristiques mécaniques du matériau [13].

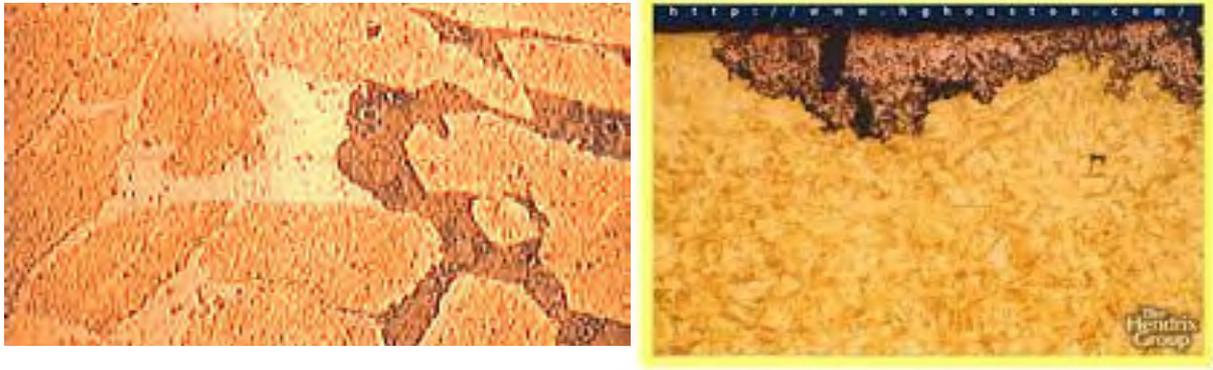


Figure I-6. Coupe métallographique Montrant une corrosion sélective d'un laiton

I-6.5. Corrosion caverneuse :

La corrosion par crevasses ou corrosion caverneuse est due, au moins au départ, à la formation d'une cellule d'aération différentielle. Elle se caractérise par une attaque intense qui varie depuis la corrosion presque uniforme à l'attaque par piqûres, à l'intérieur des crevasses et fissures fermées par :

- ❖ La géométrie des structures (rivetage, filetage etc.)
- ❖ Le contact du métal avec des parties non métalliques.
- ❖ Le dépôt de particules en suspension dans la solution.

Bien que la corrosion caverneuse puisse se produire dans la majorité des solutions corrosives, ce type de corrosion se rencontre surtout dans les solutions neutres. Par ailleurs dans les alliages de cuivre (bronze en particulier), la corrosion caverneuse paraît principalement liée aux différences de concentration d'ions cuivriques. Elle se produit, alors dans la région, où la concentration d'ion cuivre est plus faible : la partie extérieure de l'interstice se corrode. Comme ce type de corrosion est très général, la meilleure méthode pour l'éviter consiste généralement à intervenir au niveau de la conception des structures. Il s'agit d'éviter les conditions géométriques susceptibles de favoriser cette corrosion [14].



Figure I.8. Corrosion Caverneuse **Figure I.7.** Corrosion caverneuse d'un acier

Allié sous un joint

I-6.6. Corrosion filiforme :

La corrosion filiforme est avant tout associée à la présence, à la surface du métal, d'un revêtement protecteur (vernis, peinture...) semi perméable à l'oxygène et à l'eau. L'attaque se manifeste par l'apparition de filaments, en relief (soulèvement du vernis), de 0.1 à 1 mm de largeur et de plusieurs centimètres de longueur. Ce phénomène peut affecter divers matériaux (fer, aluminium, magnésium) lorsqu'ils sont placés dans des atmosphères humides (60 à 95 % d'humidité) entre 20°C et 35°C. Ici encore il s'agit d'un phénomène d'aération différentielle entre la tête anodique (acidité importante, teneur en oxygène faible) et la queue plus riche en oxygène, où l'on observe une précipitation des produits de corrosion du fait d'un pH alcalin. La prévention de ce phénomène, qui se rencontre en particulier dans les industries aéronautiques et de l'emballage métallique, consiste à intervenir sur la cause (diminution de l'humidité) ou à utiliser des gammes de revêtements plus résistantes et étanches (primaires au zinc, systèmes multicouches) [13].

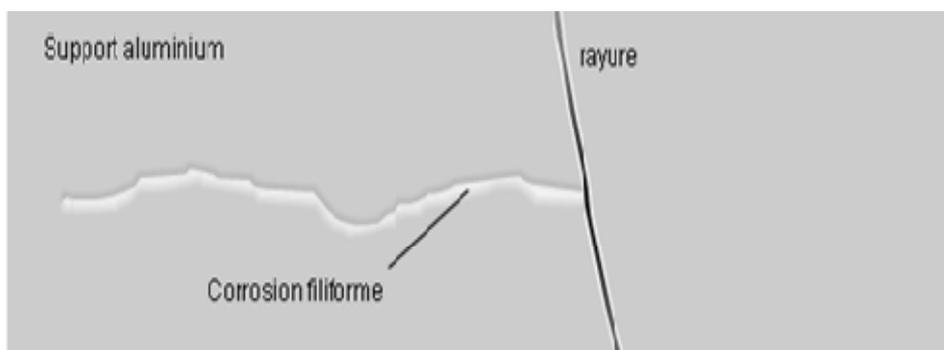


Figure I.9. Corrosion filiforme d'un support d'aluminium

I-6.7. Corrosion-cavitation :

La cavitation est un processus mécanique de dégradation : en présence de turbulence, on peut localement créer une chute de pression au sein du liquide qui conduit à la formation de bulles de

vapeur. L'implosion de ces bulles provoque des chocs mécaniques répétés sous ses pressions très élevées qui entraînent une fatigue du métal et sa dégradation. On conçoit, lorsque le métal est recouvert d'un film passif, que ce dernier soit rapidement détruit et que par suite de depassivations-repassivations successives, on aboutisse à une attaque localisée, la figure suivante présente un exemple de corrosion cavitation [13].

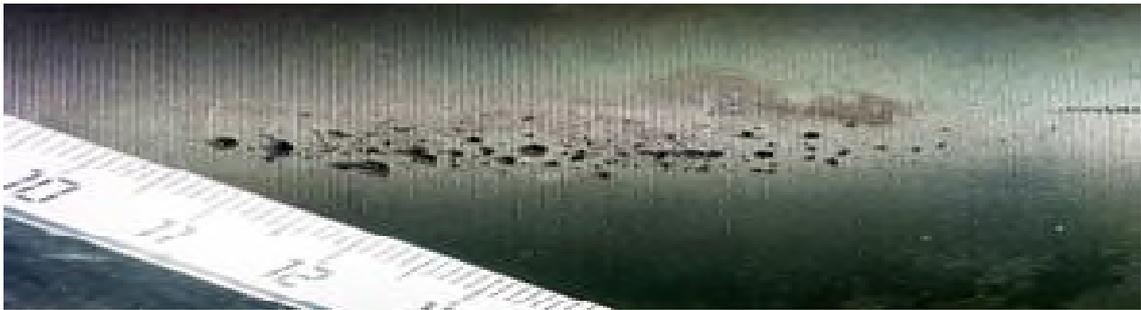


Figure I.10. Cavitation dans une chambre de moteur diesel

I-6.8. Corrosion sous contraintes :

Beaucoup d'alliages, soumis à des contraintes externes ou internes présentent des fissures intergranulaires ou Trans granulaires, Lorsqu'ils sont dans un environnement corrosif, il y a une action conjointe de l'environnement et des contraintes mécaniques. La fissuration par corrosion sous contrainte est essentiellement étudiée sur des alliages ; il faut toutefois noter qu'elle a été observée sur des métaux purs (Fe et Cr) où elle semble être associée à des impuretés aux joints de grains [15].

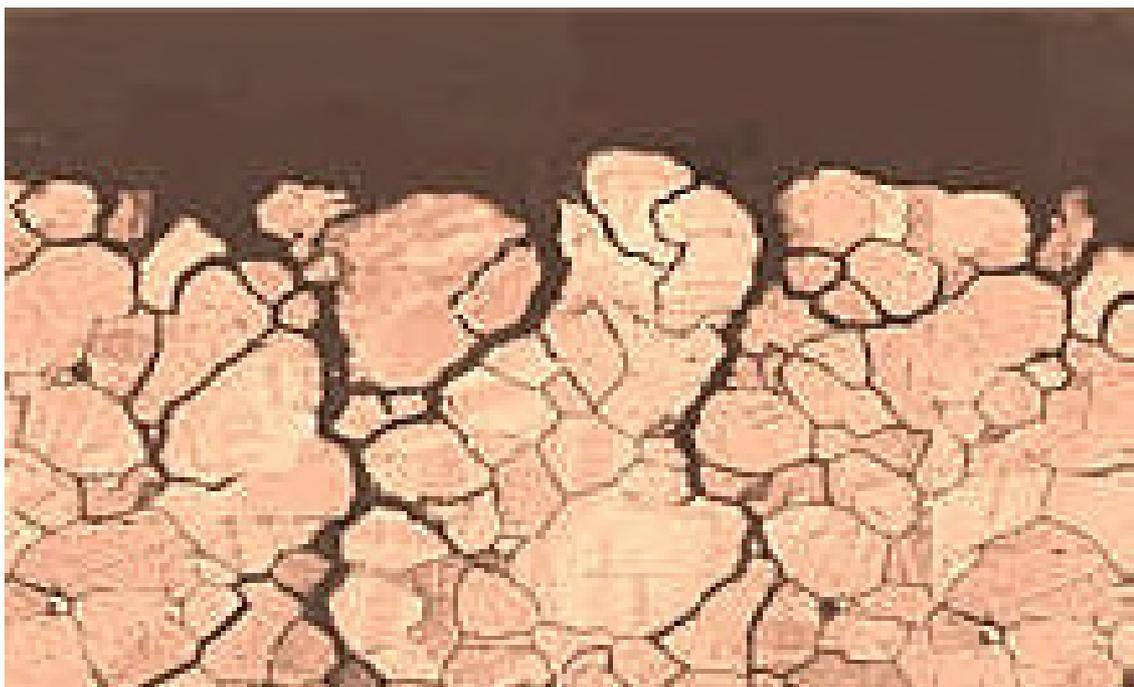


Figure I.11. Corrosion sous contraintes d'un Alliage cuivreux

I-6.9. Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûre ou piqûration (Pitting) est une forme de corrosion des plus insidieuses et des plus destructives. L'attaque se limite à des trous localisés qui pourront progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface demeure intact. L'installation peut être perforée en quelques jours sans perte de masse appréciable [16].

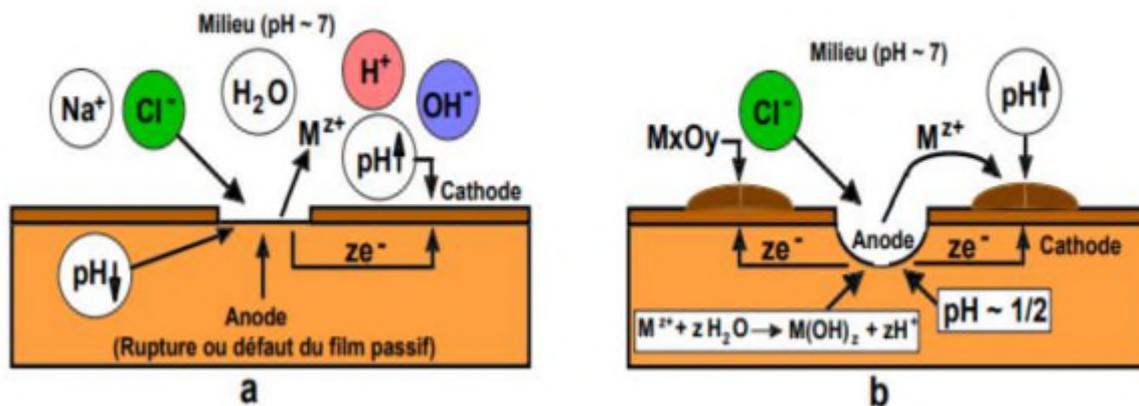


Figure I.12.Corrosion par piqûres (Amorçage (a) et propagation (b) d'une piqûre)

I-6.10. La corrosion avec érosion :

Peut se produire lorsqu'une couche de produits de corrosion adhérente et continue à la surface du métal est détruite localement par abrasion consécutive au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient. On observe alors une accélération de la corrosion. Ces divers types de corrosion interviennent rarement indépendamment les uns des autres ce qui a pour effet de rendre plus complexe l'interprétation des phénomènes de corrosion (figure I-5) [17].



Figure I-12. Corrosion érosion /abrasion/cavitation

I-6.11. La corrosion frottement :

Lorsque deux surfaces métalliques sont en contact et qu'elles se déplacent l'une par rapport à l'autre, leurs surfaces peuvent se détériorer rapidement et devenir impropres aux mouvements ultérieurs.

Pour que la corrosion par frottement puisse apparaître, il faut simultanément :

- L'existence d'une pression de contact entre les deux métaux ;
- La présence de vibrations ;
- L'existence d'un glissement entre les deux surfaces ;
- La présence d'oxygène.

Il semble que le phénomène soit dû à l'arrachement et à l'oxydation des particules métalliques sous l'effet du frottement et de l'élévation de température qui en résulte. Les conséquences sont : l'augmentation des jeux, le grippage, l'apparition de défauts pouvant provoquer des ruptures de fatigue [18].



Figure I.14. Corrosion par frottement d'une pièce.

I-7 Facteurs de corrosion.

La résistance à la corrosion d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque. Elle dépend à la fois des caractéristiques du matériau et de celles du milieu. En plus de ces facteurs, les conditions d'emploi et la durée d'exploitation ont un rôle prépondérant sur les phénomènes de corrosion.

Le tableau I.2 résume les principaux facteurs de corrosion [19]

<p>Facteurs relatifs Au milieu et Définissant le Mode d'attaque</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif ; -Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, H₂S) ; -Acidité (pH) du milieu, salinité, température, pression ; -Présence de bactéries.
<p>Facteurs métallure- piques</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines ; - Impuretés dans l'alliage, inclusions ; - Traitements thermiques, mécaniques ; - Additions protectrices.
<p>Facteurs définissant les conditions d'emploi</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défaut de fabrication ; -Emploi d'inhibiteurs ; -Croûtes d'oxydes superficielles ; - Force électromotrice extérieure (électrolyse).
<p>Facteurs dépendants Du temps</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement ; - Température ; - Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous ; - Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre).

Tableaux I-2 : Principaux facteurs de corrosion

***Chapitre II : corrosion et
protection des métaux ferreux***

II. Introduction

La corrosion est connue depuis longtemps, mais son étude scientifique a dû attendre les essais de La Rive à l'Université de Grenoble, et ceux de Faraday (1791-1864) sur l'électricité et la pile de courant en 1830. Ces chercheurs ont alors découvert que la corrosion des métaux était un phénomène électrochimique. Cependant, cette explication ne s'applique pas à toutes les formes de corrosion [20].

La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides.

La corrosion humide est certainement la plus répandue ; elle fait intervenir soit de l'eau ou de l'humidité, soit un acide ou une base.

La corrosion peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons à l'interface métal-environnement. C'est un phénomène naturel qui tend à faire retourner les métaux à leur état d'oxyde par une attaque plus ou moins rapide du milieu corrosif.

II.1. Définition :

La corrosion est l'interaction physicochimique entre un métal et son environnement, ce qui entraîne des changements dans les propriétés du métal et qui peut conduire à une insuffisance fonctionnelle significative du métal, de l'environnement ou du système technique dont ils font partie. Techniquement, nous parlons seulement de corrosion lorsqu'il y a un changement dans les propriétés du métal ou du système qui peut conduire à un résultat indésirable. Cela peut aller tout simplement d'une déficience visuelle à la rupture complète d'un système, engendrant des pertes économiques importantes voir même un danger pour les personnes [21].

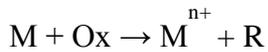


Figure 2.1: photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion

II.2. La corrosion du fer

II.2.1. La corrosion du fer en milieu aqueux :

La corrosion est le phénomène pour lequel les métaux et alliages subissent de leur environnement une attaque qui les fait retourner à l'état d'ion métallique, état qu'ils avaient sous leur forme originelle dans les minerais. Il s'agit de réactions d'oxydoréduction :



Où M est le métal, Ox l'oxydant, M^{n+} un ion métallique et R le réducteur.

Les différents types d'étape qui peuvent intervenir au cours d'une réaction électrochimique sont rassemblés sur le schéma de la figure 2-2.

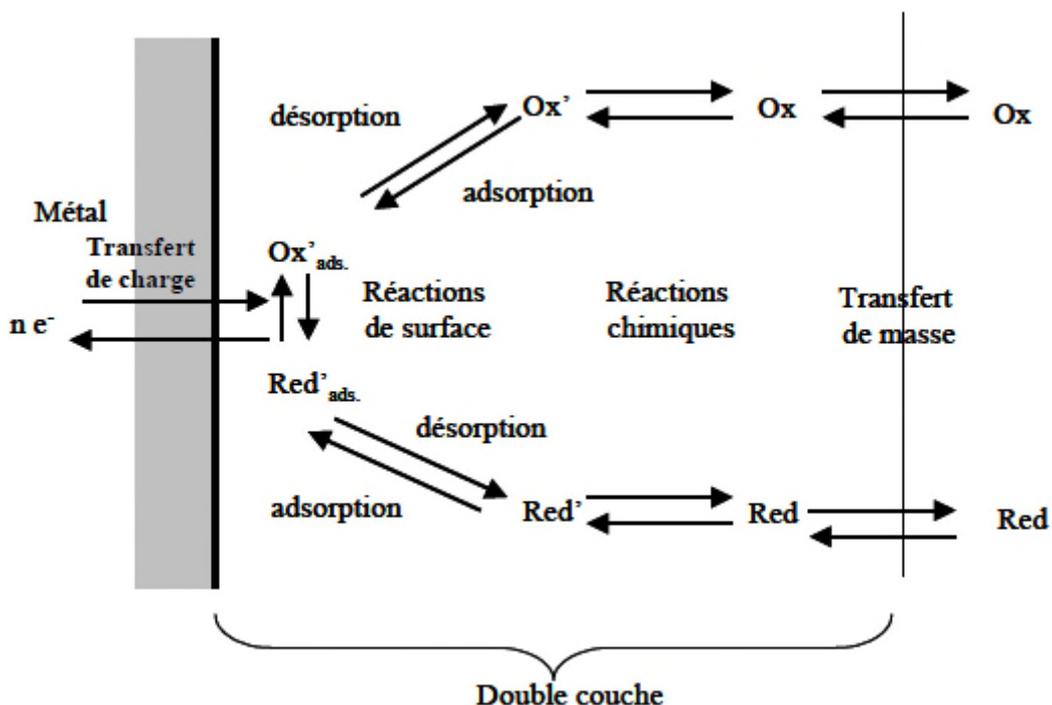


Figure 2.2 : Les étapes réactionnelles d'une réaction électrochimique [4]

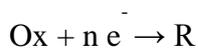
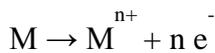
Les processus d'une réaction d'oxydoréduction sont [22] :

- Le transfert de masse ; c'est le transport de matière entre le sein de la solution et la surface de l'électrode. Les modes de transports sont la migration, la diffusion et la convection,
- Le transfert de charge ; il se produit à la surface du métal dans la double couche,
- Des réactions chimiques ; elles peuvent intervenir avant ou après le transfert des électrons. Ces réactions peuvent être par exemple des déshydratations, des complexations ou des échanges de protons,

- Des réactions de surface telles que l'adsorption et la désorption.

La double couche est la zone à partir de laquelle l'espèce est réactive vis à vis du métal. C'est une zone préférentielle des ions et des molécules de solvant autour du métal. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre du nanomètre.

Les phénomènes de corrosion sont importants lorsque le métal est placé au contact de solutions aqueuses. Cette corrosion humide est dans la plupart des cas de nature électrochimique : elle se manifeste lorsque le métal et l'électrolyte sont en présence. Elle résulte de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes :



En solution aqueuse, un équilibre électrochimique peut mettre en jeu des protons H^{+} . Le potentiel électrochimique d'un tel système va donc dépendre de la concentration en H^{+} , c'est à dire du pH. On représente cette dépendance à travers des diagrammes potentiel-pH ou diagrammes de Pour Baix.

Sur ces diagrammes, on regroupe un ensemble d'informations relatives aux équilibres thermodynamiques qui peuvent se manifester entre différentes espèces chimiques comportant un même élément à différents degrés d'oxydation. Ils permettent de déterminer les domaines de stabilité des différentes espèces en fonction du pH. La figure 2-2 présente le diagramme potentiel-pH du fer.

En première approximation, on admet que les conditions de potentiel redox et d'acide-basicité des domaines de prédominance de Fe^{2+} et Fe^{3+} correspondent à une possible corrosion du fer, que les conditions de prédominance du domaine du fer correspondent à l'immunité et que celles des domaines des hydroxydes correspondent à une possible passivation.

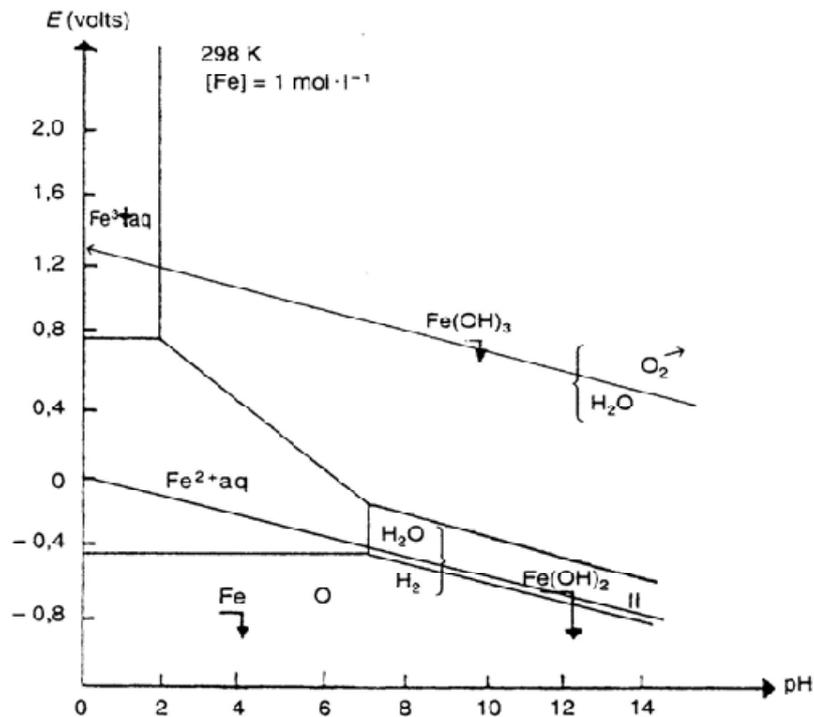
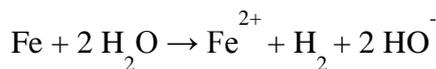


Figure 2.3 : Diagramme (E, pH) simplifié du fer [23]

Lors de nos expériences, le pH de l'eau en équilibre avec l'air est de 6,5 à température ambiante. On se trouve donc dans le domaine où il y a possible corrosion du fer et où il y a formation de Fe²⁺. Le couple mis en jeu, dans nos conditions, est donc Fe/Fe²⁺. Les équations mises en jeu dans ces conditions sont :



L'oxydant le plus fort réagit avec le réducteur le plus fort. Le fer va donc réagir avec l'eau. A partir des demi-équations électroniques, nous obtenons l'équation bilan :

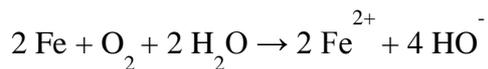


II.2.2. La corrosion du fer en milieu atmosphérique :

Lorsque le fer est exposé à de l'air humide, c'est l'oxygène de l'air qui provoque l'oxydation du fer. Les deux demi équations électroniques mises en jeu sont :



L'équation bilan est :



La figure 2.4 représente le processus de corrosion atmosphérique à la surface du fer.

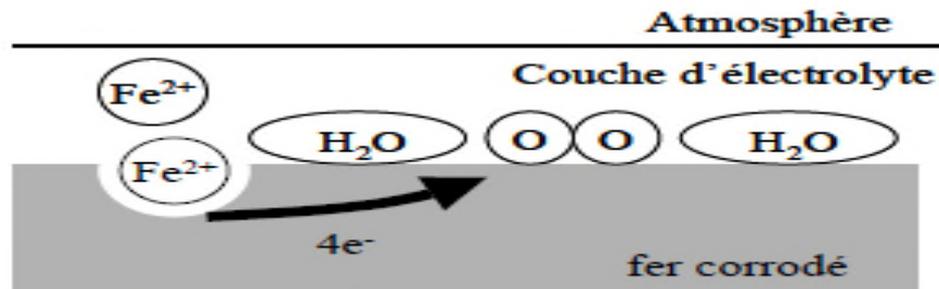


Figure 2.4 : Schéma du processus de corrosion atmosphérique à la surface

L'oxyde formé Fe(OH)_2 n'est pas stable et s'oxyde en FeOOH . La corrosion atmosphérique peut alors se résumer par l'équation à l'équilibre :



La corrosion atmosphérique est un processus électrochimique qui nécessite la présence à la fois d'oxygène et d'eau (électrolyte). Un film mince d'électrolyte se forme sur les surfaces métalliques sous certaines conditions de corrosion atmosphérique, notamment lorsqu'un certain taux critique d'humidité est atteint. L'humidité dans l'air sera exprimée par la suite en humidité relative notée HR. L'humidité relative est le rapport entre la pression d'eau à une certaine température et la pression de vapeur saturante à cette même température. La corrosion atmosphérique du fer commence lorsque le taux d'humidité relative est supérieur à 60% [29]. Elle est très importante pour un HR compris entre 80 et 100%. En effet, quand HR vaut 100%, une couche de 100 μm d'épaisseur peut être observée à la surface du fer.

Bien que l'équation (2.44) semble montrer la présence d'un seul oxyde de fer dans la rouille plusieurs oxydes et hydroxydes sont observés liés notamment aux cycles d'humidification et de séchage. Ceux-ci sont reportés dans le tableau 2-5.

Composition	Nom	Structure cristallographique
Fe_3O_4	Magnétite	Cubique (spinal)
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Maghémite	Cubique (spinal)
$\alpha\text{-Fe OOH}$	Goethite	Orthorhombique
$\gamma\text{-Fe OOH}$	Lépidocrocite	Orthorhombique
$\beta\text{-Fe OOH}$	Akaganéite	Tétragonal
$\gamma\text{-Fe. OH. OH}$	Lépidocrocite réduit	Orthorhombique
Fe (OH)_2	Hydroxyde ferreux	Hexagonal

Tableau 2.1 : Oxydes et hydroxydes présents dans la couche de rouille [24]

A titre d'illustration, les structures de deux hydroxydes de fer présents dans la couche de rouille sont présentées sur la figure 2-5 [25] :

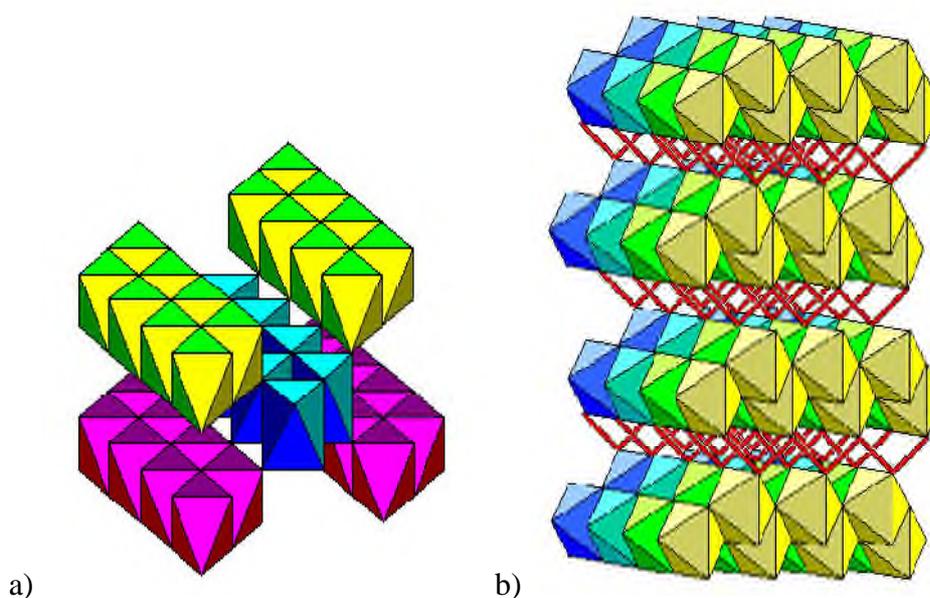


Figure 2.5 : Structure cristalllographique de (a la goethite et de bla lépidocrocite)

Sur la figure 2.5, chaque site est un site octaédrique. Les traits en rouge représentent les liaisons hydrogène. Concernant la structure cristalllographique de la goethite (figure 2-4 a), nous pouvons observer la présence de canaux entre les sites octaédriques. Les sites jaunes sont en haut et les sites bleus et roses en dessous. Alors que sur la structure cristalllographique de la lépidocrocite (figure 2-4 b), il y a des liaisons hydrogène. Les sites en jaune sont en avant et les sites bleus à l'arrière.

Les variations de l'humidité relative et de la température mènent à des cycles de périodes humides et de périodes sèches. L'alternance de périodes humides et sèches change complètement les mécanismes de corrosion par rapport à celles de la corrosion en milieu aqueux. Il a été montré que durant ces cycles, la corrosion atmosphérique peut être divisée en trois étapes [26] :

- Pendant la première étape (correspondant à une humidification), la dissolution anodique du fer se réalise. Elle est partagée entre la réduction des espèces ferriques et la réduction faible de l'oxygène.
- Après la réduction de ces espèces, la seconde étape commence, caractérisée par la réduction de l'oxygène par réactions cathodiques.
- Eventuellement, à la troisième étape (correspondant au séchage), les espèces réduites dans la première étape et les composés ferreux produits par le processus de corrosion sont re-oxydés par l'oxygène. Finalement, le film d'électrolyte s'évapore, ce qui ralentit la corrosion électrochimique. Le taux de corrosion et les modifications de la couche de rouille sont corrélés au nombre et à la fréquence des cycles.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principaux processus de la corrosion du fer en milieu aqueux et en milieu atmosphérique sans irradiation. Ces données vont nous servir de base pour notre étude sur les effets de l'irradiation sur les mécanismes de corrosion dans ces deux milieux.

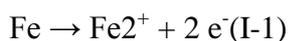
II.3.L'acier

II.3.1.Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié [27].

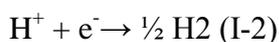
II.3.2. Corrosion de l'acier :

La corrosion électrochimique de l'acier peut être décrite de manière simplifiée, l'acier se dissout selon la réaction suivante :



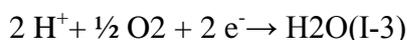
Quand le fer se corrode, la vitesse est généralement contrôlée par la réaction cathodique, qui en principe est beaucoup plus lente (contrôle cathodique).

En solution désaérée, la réaction cathodique est la suivante :

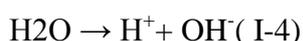


Cette réaction est assez rapide dans les acides mais elle est lente dans les milieux aqueux neutres ou basiques.

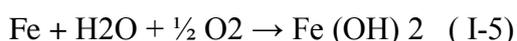
La réaction cathodique peut être accélérée par l’oxygène dissous suivant la réaction suivante :
(Processus appelé dépolariation)



En ajoutant les équations (I-1) et (I-3) qui font intervenir la réaction :



On obtient equation (I-5)



L’hydroxyde ferreux, $Fe(OH)_2$ compose la barrière de diffusion à l’interface métal solution à travers laquelle l’ O_2 doit diffuser. Le pH de $Fe(OH)_2$ saturé est d’environ 9.5. La couleur de $Fe(OH)_2$ bien que blanche quand il est pur, et normalement verte ou noir-vert à cause d’un début d’oxydation à l’air. La surface extérieure du film d’oxyde exposée à l’oxygène dissous, se transforme d’hydroxyde ferreux en hydroxyde ferrique hydraté ou en hydroxyde ferrique :



L’hydroxyde ferrique hydraté de couleur orange à brun-rouge compose la plus grande partie de la rouille ordinaire. Le $Fe(OH)_3$ saturé a un pH presque neutre [28].

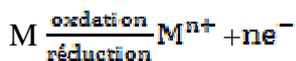
Types	Caractéristiques	Exemples
 <p>1. uniforme</p>	<p>Attaque de toute la surface du métal.</p> <p>C’est la forme la plus courante.</p>	<p>Oxydation; dissolution active dans l’acide; oxydation et passivité anodiques; polissage chimique et électrochimique; corrosion atmosphérique.</p>
 <p>2. localisée</p>	<p>Certains secteurs de la surface du métal se corrodent à des taux plus élevés que d’autres dus à l’hétérogénéité de surface dans le métal, l’environnement ou dans la géométrie de la structure dans l’ensemble.</p>	<p>Corrosion par crevasse; corrosion bimétallique ; corrosion inter granulaire.</p>

 <p>3. corrosion par piqûres</p>	<p>Attaque fortement localisée aux secteurs spécifiques ayant pour résultat des petits puits qui pénètrent dans le métal et peuvent mener à la perforation.</p>	<p>Corrosion par Piqûre des métaux passifs tels que les aciers inoxydables, alliages d'aluminium, etc., en présence des ions spécifiques, par exemple ions Cl⁻.</p>
 <p>4. dissolution sélective</p>	<p>Un composant d'un alliage (habituellement les plus actifs) est sélectivement enlevé d'un alliage</p>	<p>Délignification des laitons (Cu- Zn)</p>
<p>5. Corrosion sous contrainte</p>	<p>Attaque ou rupture localisée due à l'effet d'un facteur mécanique et d'une corrosion. Action conjointe de la corrosion et d'un facteur mécanique</p>	<p>Corrosion- Érosion, corrosion sous tension, corrosion par fatigue.</p>

Tableau 1. Différents types de corrosion [28]

II.4. Potentiel d'électrode

La double couche électrique formée à la dace du métal correspond à une différence de potentiel entre le métal et la solution que l'on désigne sous le nom de "potentiel d'électrode". La valeur de ce potentiel d'électrode est caractéristique du métal utilisé et dépend également d'autres paramètres tels que la composition et la température de la solution envieront. Selon Soyinka et Wagner (1 996), cette valeur réfute l'étendue du déséquilibre de la réaction d'oxydoréduction qui s'établit à 15nterface métal/liquide c.à.d. la tendance du métal à se dissocier ou à rester sous forme atomique, selon la réaction réversible suivante [29] :



Le potentiel d'électrode ne peut pas être mesuré en terme absolu. Il est mesuré par rapport à une autre électrode dont le potentiel propre est fixe par convention. Cette électrode de référence *est* généralement l'électrode d'hydrogène. Le potentiel d'équilibre d'un métal plongé dans un milieu aqueux est calculé par l'équation de Nernst suivante :

$$E_{H,M} = E_{M/M}^0 - \frac{RT}{nf} \ln \frac{(M^{n+})}{(M)}$$

Où :

EH = potentiel par rapport à l'électrode de référence d'hydrogène ;

EO = potentiel standard d'oxydation (table des constantes électrochimiques) ;

R = constante des gaz parfaits ;

T = température en K ;

n = nombre d'électrons transférés;

F = constante de Faraday ;

(Mnⁿ) = activité de la forme oxydée Mⁿ⁺ ;

(M) = activité de la forme réduite M.

La série de classification des métaux selon leur potentiel d'équilibre est dénommée par série galvanique. Le tableau 2.2 montre une série galvanique où les métaux sont classés du métal le moins noble (le plus électronégatif donc le plus corrosif) au métal le plus noble (le plus électropositif donc le moins corrosif). La liste présentée au tableau 1 s'applique aux métaux et alliages de métaux exposés dans des eaux naturelles

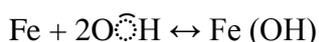
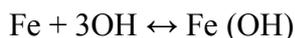
Extrémité anodique (plus corrosif)	Extrémité cathodique (plus noble)
Magnésium	Alliages de magnésium
Zinc	Aluminium
<i>Cadmium</i>	Acier ou fer
Étain	Plomb
Laiton	Nickel
Bronze	Cuivre
Monel (70% Ni et 30% Cu)	Tatum
Argent	Soudure en argent
Or	Graphite

Le tableau 2.2 : montre une série galvanique où les métaux sont classés du métal le moins noble

II.5. Diagramme de Pourbaix du fer :

Sur un diagramme d'E-pH, On regroupe, Sous forme graphique. Un ensemble d'information est aux équilibres qui peuvent se manifester entre différentes espèces chimiques comportant un même élément à différentes espèces d'oxydations. Ces espèces ne peuvent être formées les unes des autres que par des réactions acido-basiques ou des réactions d'oxydoréductions. On fait apparaître graphiquement les conditions (potentiel et pH) de stabilité des espèces considérées. Ces

diagrammes de potentiel –pH appelés diagrammes de Pourbaix permettent de localiser des zones de corrosion. D’immunité et de passivité d’un métal en fonction du pH du milieu et du potentiel pris par un métal ou imposé. Pour étudier la corrosion du fer. Il est intéressant de considérer son diagramme de Pourbaix a inventorié toutes les réactions chimiques et électrochimiques pouvant se produire entre un métal et l’eau. Et a définies domaines de stabilité des espèces chimiques en fonction du potentiel de l’électrode et le pH En étudiant un tel diagramme. Il est nécessaire de prendre en compte d’autres types des réactions qui dépendent du pH. Par exemple :



Donc, d’après les réactions, sur les diagrammes d’E-pH sont présentés trois types d’équilibres :

- Entre espèces solides
- Entre deux espèces en solution
- Entre une espèce solide et une espèce en solution

Le diagramme de Pourbaix du fer est représenté sur la Figure 2.6 (pour des activités de 10⁻⁶M)

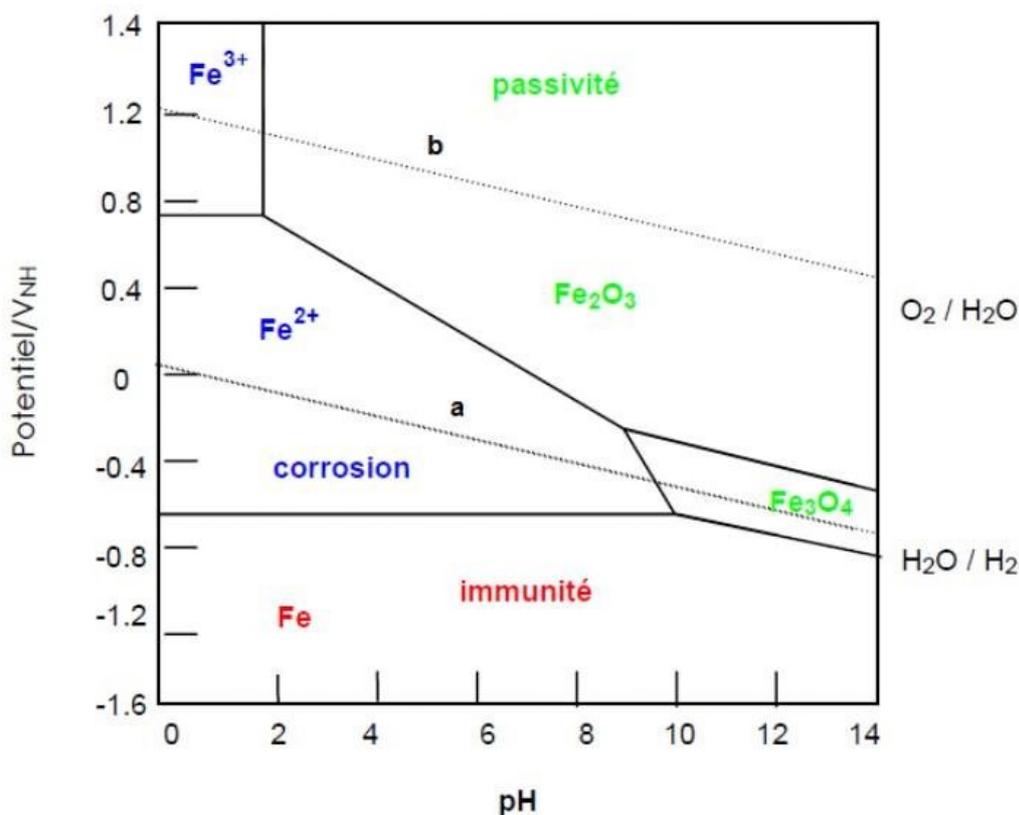


Figure 2.6 : Diagramme de Pourbaix fer

Le diagramme Pourbaix du fer montre clairement les trois zones différentes. Un produit soluble se forme dans certaines conditions d’activités et en milieu acide. Ce sont des domaines de

corrosion. Entre ces domaines, un film insoluble se forme. Il a une grande importance car il peut empêcher la corrosion, on appelle ce domaine le domaine de passivation. Le troisième correspond à la phase thermodynamiquement stable du métal où aucune corrosion ne peut apparaître. Ces trois domaines sont décrits généralement comme les domaines de corrosion, passivation, immunité. [30]

II.6. PROTECTION DES METAUX FERREUX :

La corrosion métallique est un phénomène d'attaque progressive de la matière placée dans un milieu favorable à cette attaque. La corrosion peut apparaître sous quatre formes [13] :

II.6.1. Corrosion uniforme :

Se produit par attaque à peu près uniforme amincissant le métal sur toute son étendue. Ceci correspond à l'attaque des métaux ferreux par la rouille

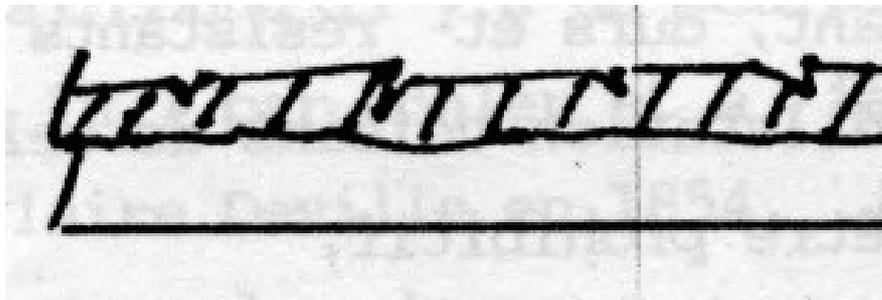


Figure 2.7 :Corrosion uniforme

II.6.2. Corrosion localisée :

En un certain nombre de plages qui vont en s'étalant et en se creusant avec ou sans accroissement du nombre des points d'attaque.

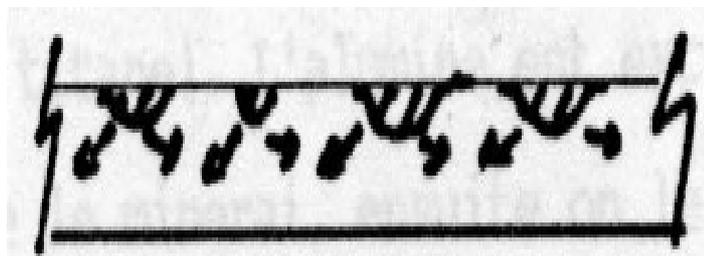


Figure 2.8 :Corrosion localisée

II.6.3. Corrosion par piqûres fines :

Qui vont en s'approfondissant et en se multipliant en certaines parties d'une pièce métallique.

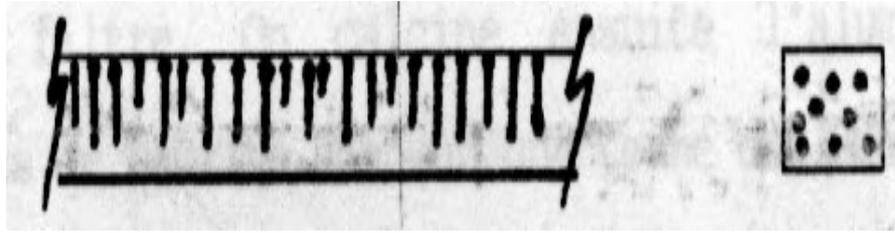


Figure 2.9 :Corrosion par piqûres fines :

II.6.4. Corrosion fissurant.

Corrosion qui chemine dans tous les sens et détruit toute résistance, elle croît sans altération sensible du poids de la pièce

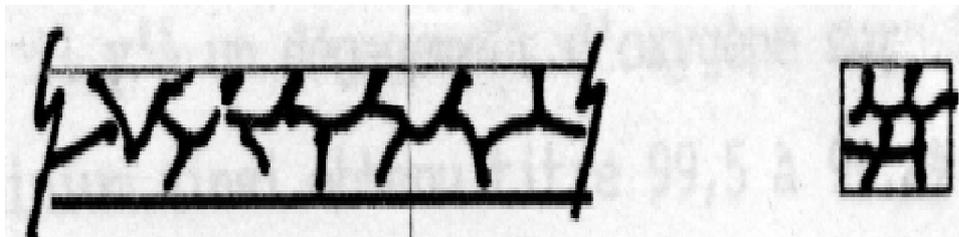


Figure 2.10 :Corrosion fissurant.

La résistance d'un métal à la corrosion doit être examinée en fonction de l'ambiance dans laquelle il se trouve placé en service : air sec ou humide et chaud, brouillard dans les régions à climat maritime, air pollué et acides des villes industrielles, air salin, eau douce, eaux industrielles, températures élevées, ...etc.

En effet, en milieu humide et sans aucun apport chimique, les gaz CO_2 ou O_2 de l'air sont nocifs à l'acier :

- Le premier sous forme d'acide carbonique 'CO', dépassiez l'acier,
- Le second entretient un courant de micro pile entre zones de la pièce de métal à des potentiels différents. En effet, la présence de calamine adhérente augmente quelque peu le potentiel électrique naturel du fer.

Les zones calaminées forment des cathodes et les zones voisines deviennent des anodes ; les atomes de fer passent lentement de l'anode à la cathode, véhiculés par l'eau et l'oxygène sous forme d'hydroxydes, tandis que la barre d'acier constitue le conducteur extérieur de la pile. L'attaque est ainsi continue dans les zones anodiques, tandis que la

rouille se dépose dans les zones cathodiques et rien ne peut arrêter le phénomène tant que s’entretient la présence d’O₂ et d’H₂O.

Pour lutter contre la corrosion métallique, on emploie des enduits, isolants la surface du métal de l'air ou du milieu ambiant (dépôts électrolytiques, procédés chimiques, peintures et vernis).

Ces revêtements doivent présenter une adhérence sans discontinuités ni fissures, imperméables au milieu corrodant, durs et résistants aux détériorations mécaniques, de coefficients de dilatation voisins de celui du métal sous-jacent et d'un prix qui ne doit pas être prohibitif [31].

II.7. Moyens de protection :

Donné que la corrosion résulte de l’action de deux partenaires, le métal ou l’alliage d’une part, la solution d’autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par [32]

- Protection par revêtements
- Protection électrochimique
- Protection par inhibiteurs de corrosion.

II.7.1. Protection par revêtements :

La structure à protéger est isolée de l’agressivité du milieu corrosif en utilisant des revêtements. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques (voir le tableau 1) [32]

Revêtements métalliques	Revêtements non métalliques	
	Organiques	Inorganiques
Chrome	Peintures	Couches de conversion
Aluminium	Vernis	Couches étrangères au substrat
Plomb	Laques	
Etain	Résine	
Cadmium	Graisses	
Cuivre	Cires	
Nickel, Argent		

Tableau 2.3 : Types de revêtements.

II.7.1.1.Revêtements métalliques :

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l’acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, on peut aussi les appliquer sur d’autres substrats comme le cuivre et ou le laiton, outre leurs effets anti – corrosion ils remplissent souvent une fonction décorative [32].

Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques :

A. Revêtements nobles ou cathodiques :

Le métal à protéger est moins noble que le revêtement. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile qui se forme peut conduire à la perforation rapide du métal de base, celui-ci se corrode localement et joue un rôle d'anode. Les revêtements plus nobles que le substrat ne doivent donc contenir aucun défaut (figure 17).

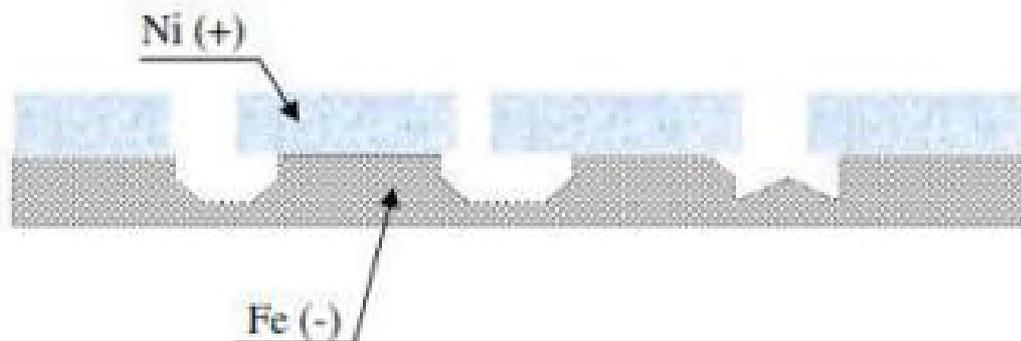


Figure 2.11 : Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer) [32]

B. Revêtements anodiques ou sacrificiels :

Le substrat est plus noble que le revêtement, c'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). Le phénomène s'inverse, le dépôt joue le rôle de l'anode et se détériore, alors que le substrat (cathode) reste protégé. Dans ce cas, la durée de vie du revêtement est proportionnelle à son épaisseur ce qui implique très souvent l'augmentation de l'épaisseur du revêtement (figure 18).

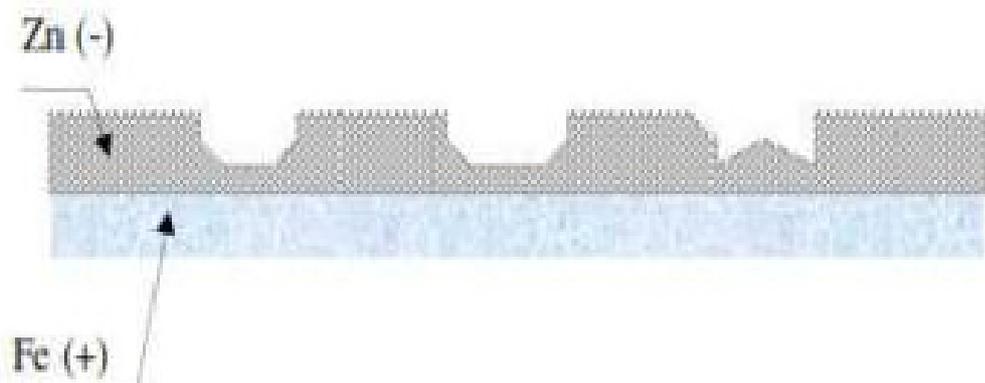


Figure 2.12 : Revêtement anodique (cas du zinc sur fer) [32]

II.7.1.2. Revêtements non métalliques :

II.7.1.2.1. Revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, ils se divisent en trois familles [33] :

A. Les revêtements en bitume

On utilise ces revêtements pour protéger les structures enterrées en acier ou en fonte. Ils se présentent en général sous forme d'un revêtement épais (de l'ordre de 5mm), dont la plasticité réduit considérablement les risques des endommagements mécaniques

B. Les revêtements polymériques

Il existe une grande variété de revêtements polymériques pour la protection des métaux contre le milieu agressif :

- Les thermoplastes (PVC, propylène, etc.)
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques)
- Les thermodurcissables (époxydes, polyesters, etc.).

L'efficacité de la protection polymérique dépend de la résistance chimique intrinsèque dans le milieu et de l'absence de défauts. Son épaisseur est de l'ordre 100 à 500 μm , mais elle varie selon les cas.

C. Les peintures et les vernis :

Ils sont distingués par des couches très minces ($<100 \mu\text{m}$), leurs principaux constituants sont [33]

1. le liant qui assure la cohésion du film et son adhérence au substrat ;
2. le solvant qui permet d'appliquer la peinture à l'état liquide ;
3. les pigments qui sont des composés qu'on ajoute aux peintures pour donner une couleur ;
4. les additifs et les charges ont différentes fonctions :

Les additifs modifient certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface ;

- Les charges qui sont des substances bon marché, elles peuvent également améliorer certaines propriétés des films comme la résistance à l'abrasion.

Les métaux peints comportent en général plusieurs couches, ils peuvent avoir :

- Une couche d'accrochage fabriquée par phosphatation, c'est une couche de peinture primaire appliquée par électrophorèse (immersion de l'objet dans une émulsion de polymère en présence d'un champ électrique)
- Une couche polymérique qui permet d'améliorer la résistance mécanique du revêtement ;
- Une ou deux couches de finition appliquées au pistolet, suivi d'un recuit au four.

II.7.1.2.2. Revêtements inorganiques :

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques [33] :

Les couches de conversion.

Elles sont distinguées selon leur procédé de fabrication, à savoir [33] :

L'anodisation

- La phosphatation
- La chromisation.
- Les couches étrangères aux substrats
- Ce type de couches inclut les revêtements inorganiques non métalliques suivants [32] :
- Les émaux
- Le ciment
- La céramique réfractaire.

II.7.2. Protection électrochimique :

Elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet cette méthode consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable, voire nulle. On distingue deux méthodes de protection [33] :

- La protection cathodique
- La protection anodique.

II.7.2.1. La protection cathodique :

Elle consiste à abaisser le potentiel (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone d'immunité ($E \leq E_{\text{port}}$). Cette dernière doit être maintenue durant toute la durée de service. Deux possibilités sont pratiquement utilisées :

- La protection par anode sacrificielle
- La protection par courant imposé

II.7.2.1.1. Protection par anode sacrificielle :

L'anode forme une pile électrochimique avec la structure à protéger qui joue alors un rôle de cathode, donc l'anode sacrificielle doit posséder un potentiel réversible inférieur à celui du métal que l'on veut préserver. La f.é.m. nécessaire est obtenue à partir de la différence entre le potentiel moyen du couple de corrosion et le potentiel propre d'une anode (plus négatif) dite sacrificielle.

II.7.2.1.2. Protection par courant imposé :

Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la f.é.m. ou le courant en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces (implique l'utilisation d'un redresseur) [33].

II.7.2.2. La protection anodique :

Elle consiste à élever la tension (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone de passivation. Elle s'applique aux métaux passivés, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{corr} < E_{passiv}$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif où la densité du courant passif est très faible. En revanche pour atteindre l'état passif, il faut appliquer une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation. Donc avant d'exercer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondante à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c.à.d. l'étendue du palier de passivité.

La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés [34].

II.7.3. Protection par inhibiteurs : [35]**II.7.3.1. Définition d'inhibiteur :**

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger par formation couche superficielle sur le métal soit direct ou bien indirect.

Il ne modifie donc pratiquement pas la nature, ni la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissent en créant une barrière entre le métal et le réactif.

Les inhibiteurs sont utilisés dans les ateliers de décapage, dans l'industrie mécanique et électronique (inhibiteurs volatils), l'industrie de pétrole (dans les huiles et carburants), les canalisations, l'industrie alimentaire...

II.7.3.2. Conditions d'utilisations et propriétés :

Le choix de l'inhibiteur de corrosion à utiliser, en pratique, exige qu'on s'oriente vers un solution-type optimale, l'évaluation duquel se fait selon plusieurs critères essentiels relatifs au cas particulier.

Puisque l'idéale ne s'accorde pas toujours avec les moyens disponibles ou les propriétés techniques des matériaux mises en œuvre, le choix résulte souvent d'un compromis en fonction des paramètres clés d'évaluation des inhibiteurs dans et hors la matrice opérationnelle.

Une propriété très importante des inhibiteurs, à part le fait d'abaisser le taux de corrosion, est la stabilité (thermique et chimique).

Vue qu'un inhibiteur peut être utilisée pour une protection permanente ou temporaire (celui-ci pendant une période critique où le métal est plus vulnérable à la corrosion, par exemple durant le

stockage ou nettoyage, ou lorsque le métal subit un traitement sévère), le choix de l'inhibiteur peut se faire ainsi en fonction d'une gamme cible de stabilité. Au-delà des essais préliminaires et avant sa sélection comme un candidat apte aux essais en situ, un inhibiteur doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans affecter ses caractéristiques physiques être efficace à faible concentration être stable en présence des autres constituants du milieu être stable aux différentes températures d'utilisation être d'un comportement d'influence zéro sur la stabilité d'autres espèces du milieu être conforme aux normes relatives à la toxicité avoir un bon rapport performance-cout

II.7.3.3. Nature de l'inhibiteur :

II.7.3.3.1. Les inhibiteurs organiques :

Les molécules organiques sont promises à un développement plus que certain en termes d'inhibiteur de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée à celles d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière.

Ils possèdent au moins un atome servant de centre actif pour leur fixation sur le métal tel que l'azote (amines, ammoniums quaternaires, amides, imidazoles, thiazoles...), l'oxygène (alcools acétyléniques, carboxylates, oxadiazon les...), le soufre (dérivé des thio-urées, mercaptans, Sul oxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphorâtes). L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à chaud.

II.7.3.3.2. Les inhibiteurs minéraux :

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions et cations).

Les cations inhibiteurs sont essentiellement Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH^- . Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO_n^- tels que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates, ...

Mercaptans, Sul oxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphorâtes). L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à chaud

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement. Cependant, de nouveaux

complexes organiques de chrome (III) et d'autres cations (Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Al^{2+} , Zr^{2+} , Fe^{2+} .) efficaces contre la corrosion et non toxiques ont été développés.

II.7.3.4. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :

Il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion. Un même composé aura d'ailleurs souvent un mécanisme d'action qui sera fonction du système de corrosion (métal + solution) en présence duquel il se trouvera.

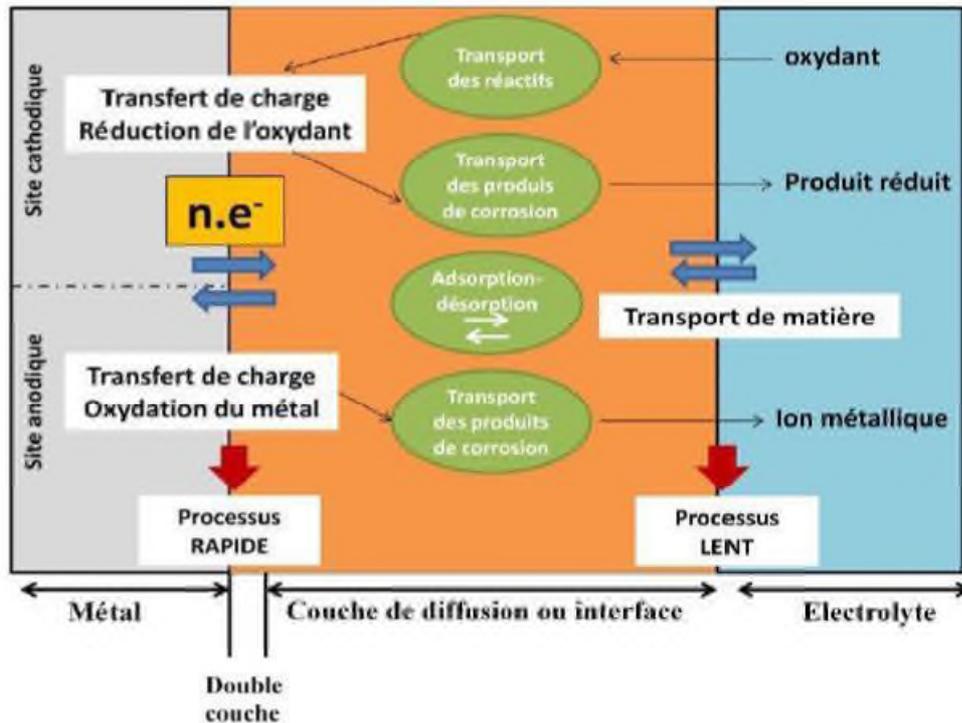


Figure 2.13 : Les différents processus se déroulant à l'interface lors de la corrosion d'un métal en milieu liquide

II.7.3.5. Classification des inhibiteurs de corrosion :

De manière générale, le mécanisme d'action d'un inhibiteur est l'un ou plus de ces trois sites ci-dessous :

- ❖ L'inhibiteur est adsorbé sur la surface du métal, formant une couche protectrice qui inhibe la corrosion, ou par une attraction électrostatique entre les groupes fonctionnels polaires des molécules de l'inhibiteur et la surface métallique.
- ❖ L'inhibiteur oxyde les atomes métalliques à la surface, formant ainsi une couche d'oxyde qui protège le métal par passivation
- ❖ L'inhibiteur réagit avec une espèce corrosive dans le milieu agressif, formant ainsi un complexe, ce qui diminue le pouvoir oxydant de l'électrolyte

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classifiés selon trois critères suivants :

- Selon la réaction partielle

Selon le mécanisme réactionnel

Selon le domaine d'application

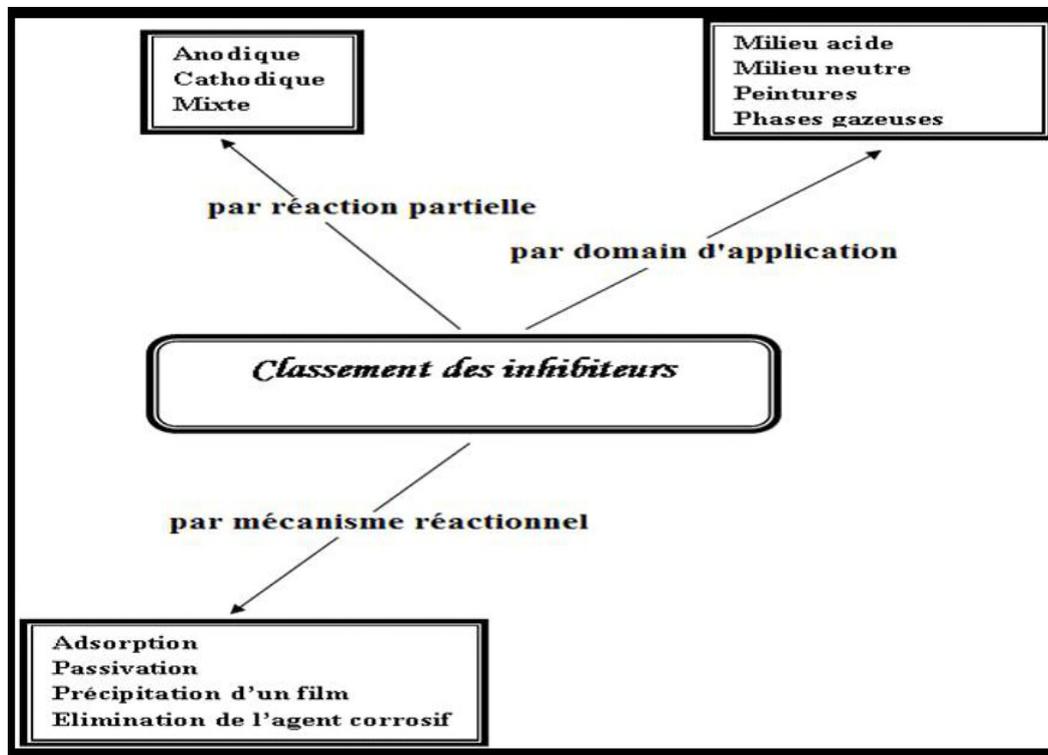


Figure 2.14 : Classement des inhibiteurs de corrosion.

II.7.3.6.1. Classification selon la réaction partielle

II. 7.3.6.1.1. Inhibiteurs anodiques :

Les inhibiteurs anodiques (également appelé inhibiteurs de passivation) sont tous inorganiques, et ils agissent par un ralentissement de la réaction partielle anodique. Ils bloquent la réaction anodique en favorisant la réaction naturelle de passivation de la surface métallique. L'adsorption intervient aussi dans l'action des inhibiteurs anodiques. En générale, ces inhibiteurs réagissent avec les produits de corrosion initialement formés, et il en résulte la création d'une film cohésive et insoluble sur la surface métallique .

II. 7.3.6.1.2. Inhibiteurs cathodiques :

Pendant le processus de corrosion, inhibiteurs cathodiques prévient l'occurrence de la réaction cathodique du métal. Ces inhibiteurs sont tous inorganiques, et ils ont des ions métalliques capable de produire une réaction cathodique due à l'alcalinité, ainsi produisant des composés insolubles qui se précipite d'une manière sélective sur les sites cathodiques. En plus, ils agissent en déposant par adsorption une couche compacte et adhérent sur la surface métallique. Ceci augmente l'impédance

de la surface métallique, et ça limite la diffusion des espèces réductible. Ces inhibiteurs mènent à une grande inhibition cathodique.

II. 7.3.6.1.3. Inhibiteurs mixtes :

En générale, les inhibiteurs organiques (y compris les extraits des plantes) sont des inhibiteurs mixtes. Les inhibiteurs mixtes agissent en même temps sur les surfaces anodiques et cathodiques, ils diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais modifient peu le potentiel de corrosion. Pour les inhibiteurs mixtes, le potentiel de corrosion pour un essai avec l'inhibiteur n'est pas fortement différent du potentiel sans l'inhibiteur, et théoriquement ils doivent être le même.

II.7.3.6.2. Classification selon le mécanisme réactionnel :**II.7.3.6.2.1. Inhibition de corrosion par adsorption :**

Suite à l'adsorption d'une espèce inhibitrice à la surface du métal, la corrosion peut ralentir. En général, ce sont les inhibiteurs organiques qui agissent par adsorption. Cela empêche l'action du milieu agressif par la fixation de ces espèces sur la surface métallique. Cette fixation s'effectue principalement par la fonction active de l'inhibiteur ; mais d'autres parties polaires peuvent aussi être adsorbées. Les inhibiteurs agissant par la chimisorption s'avèrent souvent plus efficaces que ceux agissant par la physisorption, car le partage des électrons renforce la liaison entre le substrat métallique et l'espèce inhibitrice. Pour la chimisorption, la molécule inhibitrice se comporte comme donneur d'électrons et le métal se comporte comme un récepteur de ces mêmes.

II.7.3.6.2.2. Inhibition de corrosion par passivation :

La passivation est le fait de rendre un métal non-réactif suite à l'application d'un revêtement ou au moyen d'une modification plus spécialisée de sa surface. Certains inhibiteurs oxydants agissent en provoquant une passivation spontanée du métal, ce qui diminue la vitesse de corrosion. La passivation peut être favorisée également par des agents tampons qui augmentent le pH près de la surface métallique.

Ce sont les inhibiteurs minéraux en générale qui agissent par passivation. Ils provoquent la passivation spontanée du substrat métallique en renforçant la couche protectrice d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal. Ils se réduisent sur les pores de la couche d'oxyde/hydroxyde plus ou moins protectrice qui se forme naturellement sur la surface du métal. L'ion chromate est l'un des inhibiteurs passivant par excellence mais son usage est limité à cause de son caractère cancérigène et sa forte toxicité.

II.7.3.6.2.3. Inhibition de corrosion par précipitation :

Certains inhibiteurs provoquent la formation de films superficiels par précipitation de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles. Ces films réduisent l'accessibilité de l'oxygène à la surface et, en plus, ils bloquent partiellement la dissolution anodique.

Les inhibiteurs agissant par précipitation provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formés lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, les silicates, les phosphates, les poly-phosphates et les sels de zinc.

II.7.3.6.2.4 Inhibition de corrosion par élimination de l'agent corrosif :

Ce type d'inhibition n'est applicable que dans les systèmes fermés. Il se pratique notamment dans les circuits d'eau chaude des centrales thermiques. Une faible quantité de sulfite de sodium (Na_2SO_3) ou d'hydrazine (N_2H_4) ajoutée à l'eau, préalablement dégazée et dé-ionisée, supprime les dernières traces d'oxygène et élimine ainsi la corrosion

II.7.3.6.3. Classification selon le domaine d'application :

Pour la classification relative au domaine d'usage, on peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, gazeux ou organiques (pour les peintures, lubrifiants et pour l'essence). Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH. Le classement se fait donc comme suit :

II.7.3.6.3.1. Inhibition en milieu acide :

Les inhibiteurs en milieu acide sont utilisés pour éviter l'attaque chimique de l'acier durant l'opération de décapage ou de détartrage, qui se font tous en milieu acide. Ils sont employés dans l'industrie pétrolière en les ajoutant aux fluides de forage. Pour le milieu acide, ce sont les inhibiteurs organiques qui sont souvent utilisés, et ceci a cause de leur capacité exceptionnelle à s'adsorbé sur les surfaces métalliques, ce qui bloque les sites électro-actives. Elles contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, qui est essentiellement une chaîne de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels.

II.7.3.6.3.2. Inhibition en milieu neutre :

Les inhibiteurs de corrosion en milieu neutre ou alcalin sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. Puisque l'oxydation en milieu neutre provient essentiellement d'une attaque par l'oxygène dissous, le métal peut être protégé en réduisant la cinétique de transfert de l'oxygène vers la surface, et ceci diminuera ensuite la cinétique de la réduction cathodique. Il existe d'autres manières pour diminuer le taux de corrosion en jouant sur la passivation du métal ou bien par des molécules aptes à l'adsorption. L'inhibition par précipitation en milieux neutres, se fait par la création des films superficielles qui présentent une barrière de diffusion aux espèces électro-actives migrant vers les sites cathodiques. Exemples de ces inhibiteurs sont les poly-phosphates et les organon-phosphates En ce qui concerne l'inhibition

par passivation, son intérêt pratique réside dans la protection de l'acier ou d'autres métaux employés dans un système de refroidissement. Les inhibiteurs oxydants et les agents tampons (assurant le maintien d'un pH élevé) favorisent la formation des oxydes / hydroxydes peu soluble sont des exemples pour ce cas.

II.7.3.6.3.3. Inhibition en phase gazeuse :

Ces inhibiteurs sont appliqués pour une protection temporaire des pièces métalliques durant leur transport et stockage. Exemples de telles pièces métalliques sont les machines et les pièces électroniques.

Pour les applications en phase gazeuse, des composés organiques avec des pressions de vapeur élevées sont souvent utilisés.

II.7.3.6.3.4. Inhibiteurs pour le milieu organique :

De manière générale, les inhibiteurs employés en milieu organique sont incorporés dans l'essence, dans les lubrifiants pour moteurs, et aussi dans les peintures. Les peintures sont principalement appliquées en deux étapes successives : la première étape est l'application des peintures primaire, et ceci est suivi ensuite par l'application des peintures de finition. La peinture primaire est précédée par l'application d'une couche d'apprêt, qui sert comme un liant. Le volume de matière à proximité de l'interface peinture/surface métallique est appelé une interphase, ayant des propriétés particulières comme la diffusion entre phases des espèces mutuellement solubles et des réactions chimiques entre espèces réactives. Une approche efficace pour l'amélioration de la stabilité et de la robustesse interraciale est l'intégration d'une région interphase ayant des propriétés bien-spécialisé.

II.7.3.6.3.5. Inhibiteurs naturels de corrosion:

En général, les inhibiteurs naturels sont des inhibiteurs organiques, agissant donc par adsorption. Ce sont toujours des extraits des plantes qui ne demande ni purification ni prétraitement, et ils sont éco-compatibles également, n'étant pas toxique. Leur adsorption sur les surfaces métalliques empêche l'action du milieu agressif par la fixation de ces espèces sur la surface métallique. Cette fixation s'effectue principalement par la fonction active de l'inhibiteur; mais d'autres parties polaires peuvent aussi être adsorbées.

II.8. Domaines d'application :

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application :

Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de procédés industriels, etc.) ;

L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport.

L'industrie des peintures sur métaux où les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux.

*Etude de cas : maintenance des
équipements face à la corrosion*

III Généralités :

Il s'agit de réaliser toutes les opérations nécessaires permettant de garder un produit en bon état. Il faut prévoir un plan de maintenance ; il existe des méthodes de protection afin de supprimer ou de ralentir la corrosion, certains facteurs qui favorisent la corrosion seront envisagés.

- le milieu dans lequel se trouve le produit afin de diminuer le pouvoir oxydant ou par addition d'inhibiteurs de corrosion
- le choix des matériaux surtout lors du changement des pièces
- une protection cathodique surtout pour les équipements en acier ; pour les citernes enterrées on utilise généralement des anodes sacrificielles
- le traitement de surface et les revêtements sont toujours applicables
- la passivation qui consiste à créer sur la surface du métal une couche protectrice

Des protocoles de diagnostic de corrosion assisté par ordinateur (DCAO) sont conçus et éprouvés sur des ouvrages métalliques enterrées (cas d'étude réel). Sa force réside dans le développement d'un jumeau numérique de la structure réelle, alimenté par de vrais paramètres de terrain obtenus au cours d'une campagne expérimentale (en laboratoire et sur site). Cette démarche innovante a notamment permis de mettre en évidence expérimentalement et numériquement un risque significatif de corrosion galvanique due à l'hétérogénéité de la structure géologique ainsi que l'existence d'une dissolution localisée induite par la circulation de courants vagabonds générés par un système de protection cathodique avoisinant. Une étude américaine a estimé à 3,1% du PIB le coût directement imputable à la corrosion des métaux aux États-Unis [36].

La maintenance d'un ouvrage consiste à réaliser toutes les opérations nécessaires pour qu'en toute circonstance celui-ci puisse rendre les services pour lesquels il a été conçu tout en le maintenant en Bon état. La maintenance doit être pensée dès le début de la conception de l'équipement, afin que celui-ci soit facile à entretenir à un coût modéré et en toute sécurité

III -1. Corrosion localisée d'une citerne métallique enterrée

Cette partie vise à identifier les principaux mécanismes à l'origine d'une corrosion localisée d'une structure métallique. La corrosion localisée correspond à la séparation spatiale des cellules anodiques et cathodiques. Ce mode de corrosion est associé à un champ de potentiel non uniforme dans le volume de sol (existence d'un gradient de potentiel à l'échelle macroscopique) et à la formation d'un courant de corrosion galvanique ; la perte locale de matière sur les zones anodiques conduit à un accroissement du niveau de contrainte, on parle alors de "corrosion sous contraintes", associé à une moindre ductilité pouvant entraîner à terme la ruine fragile de l'ouvrage métallique [37]. Dans le cas des pipelines, la dissolution locale et complète de la paroi externe d'une conduite

provoque la fuite du liquide transporté dont les conséquences peuvent être dramatiques (pollution des sols, explosion...).

La protection cathodique des conduites métalliques enterrées est largement répandue pour prévenir le risque de corrosion localisée au droit des défauts de revêtement. Elle est même rendue obligatoire pour les pipelines transportant des hydrocarbures (pétrole et gaz) ou des produits chimiques (arrêté du 4 août 2006). Le courant de protection peut résulter du couplage galvanique naturel entre des anodes sacrificielles (zinc, aluminium ou magnésium) et la structure à protéger, qui présentent un potentiel plus élevé ; les anodes galvaniques, moins nobles que l'acier à protéger, fournissent des électrons par dissolution du métal. Il peut également être imposé par l'intermédiaire d'un générateur de courant continu qui catalyse la réaction d'oxydation de l'eau à la surface d'anodes inertes (titane recouvert d'oxydes de métaux mixtes ou alliage fer/silicium) et délivre les électrons collectés à la structure métallique. Cependant, quel que soit le système de protection cathodique utilisé, le courant continu protégeant la canalisation peut être à l'origine de courants vagabonds et entraîner indirectement la corrosion d'une autre structure enterrée avoisinante, intercalée entre le défaut à traiter sur la canalisation protégée et le réseau d'anodes [38]. En effet, le sol étant un milieu électriquement résistant, toute structure métallique (palplanches par exemple), située sur le trajet électrique entre le déversoir (système anodique) et le défaut et facilitant le transport du courant de protection, sera traversée par une partie du courant de protection. L'entrée du courant vagabond correspond aux zones de la structure les plus proches du déversoir et les sorties de courant correspondent aux zones les plus proches du défaut de revêtement de la canalisation. Les zones d'entrée sont de fait protégées cathodiquement alors que les zones de sortie de courant subissent une corrosion accélérée. Si la structure concernée est également sous protection cathodique, l'existence de courants vagabonds réduit l'efficacité de cette protection électrochimique, car le courant censé protéger la structure est amoindri au niveau des sorties de courant [39]. Il y a donc une interaction complexe entre les systèmes de protection cathodique et les autres structures métalliques voisines [40].

III -2. Cas d'étude

Alors que les courants vagabonds induits par une protection cathodique externe sont des courants continus (DC), la corrosion peut également être initiée ou accélérée sous l'influence d'un courant alternatif (AC). Cet autre mécanisme de corrosion résulte notamment de tensions alternatives induites dans les pipelines enterrés à proximité de lignes électriques à haute tension. La corrosion sous courant alternatif engendre une corrosion localisée de l'acier sous un défaut de revêtement ; elle se manifeste par un dépôt métallique sphéroïdal recouvrant une piqure hémisphérique peu profonde ; ce faciès de corrosion s'explique par la succession des phases de polarisation anodiques

et cathodiques imposée par la sollicitation alternative [41]. Les dégradations induites par ces interférences alternatives sont cependant beaucoup moins dangereuses et fréquentes que celles causées par les courants vagabonds continus. Certains auteurs ont énoncé qu'une sollicitation alternative entraînait une cinétique de corrosion 100 fois plus faible qu'un courant continue à intensité équivalente [42].

L'identification des risques de dégradation est un processus qui doit être effectué pendant toute la durée de vie de l'équipement : depuis la conception jusqu'au moment où l'équipement est mis hors service définitivement. L'identification des risques de dégradation pour un équipement déterminé commence par la détermination des conditions dégradantes auxquelles l'équipement est exposé. Sur base de ces informations, un choix de matériaux de construction peut être fait en vue d'éviter ou de limiter la dégradation. En se basant sur la connaissance des conditions de dégradation et des détails de construction de l'équipement, on peut faire un pronostic des phénomènes de dégradation attendus et de la nature de l'attaque. Les techniques d'inspection doivent être choisies pour pouvoir détecter les formes d'attaque attendues. Ensuite l'analyse des phénomènes de dégradation doit être confrontée aux observations faites au cours des inspections et si nécessaire être adaptée. L'exécution des inspections fait donc intégralement partie de l'identification des risques de dégradation.

Des actions possibles sont : la mise hors service définitive de l'équipement

- Le remplacement de l'équipement
- Le passage à une surveillance continue de l'équipement
- L'adaptation des conditions de fonctionnement (par exemple, réduction de la pression opérationnelle)
- La réduction de l'intervalle entre les inspections.

III -3. Gestion des inspections et des réparations

La gestion des inspections et des réparations est entre autres liée à l'existence et au maintien de systèmes organisationnels afin d'assurer que :

Les personnes qui réalisent des inspections et des réparations, disposent des qualifications nécessaires

Les inspections et les réparations à réaliser soient planifiées à temps (y compris les systèmes pour allonger un délai planifié, sur base des évaluations nécessaires)

Les inspections et les réparations planifiées soient réalisées à temps (y compris un suivi et un rapportage actif à la direction) en cas de modifications à l'installation, il soit examiné si cela a un impact sur les phénomènes de dégradation et sur les inspections à réaliser

Des modifications au niveau du personnel et des ressources associées à l'exécution des inspections et réparations n'ont pas d'influence négative sur la maîtrise des risques de dégradation.

- A-t-on analysé quels réservoirs enterrés ou sous terre sont susceptibles de subir de la corrosion ?
- Le caractère corrosif du sol a-t-il été analysé ?
- Les réservoirs souterrains sont-ils équipés d'un casting externe, d'une autre couche protectrice ou d'une protection cathodique ?
- La protection cathodique est-elle contrôlée périodiquement ?
- Les réservoirs enterrés ou sous terre sont-ils contrôlés périodiquement à l'aide d'une technique adaptée ?
- Existe-t-il un programme d'inspection pour les zones des réservoirs situées à hauteur de la transition entre l'aérien et le souterrain ?

Des problèmes avec des réservoirs enterrés peuvent être identifiés en contrôlant les modifications de la surface du sol (décolorations, affaissements, ramollissement de l'asphalte, formation de flaque, odeur perceptible, cloches d'eau,). Cela peut se faire par exemple à l'aide d'une tournée journalière/hebdomadaire. Lorsqu'au niveau de la transition sol-air, on constate visuellement de la corrosion externe, il peut être recommandé de réaliser des mesures d'épaisseur, voire même des excavations afin de constater si la corrosion reste limitée à la zone de transition, ou si par contre, elle s'est infiltrée plus loin dans la partie enterrée du réservoir de procédé. Une méthode complémentaire ou alternative est un test de fuite des réservoirs enterrés avec un liquide à une pression au moins 10% au-dessus de la pression de fonctionnement, et ceci à des intervalles fixés. Le test de fuite doit être maintenu pendant 8 heures. Des tests de fuite peuvent aussi être réalisés à l'aide de la technique d'émission acoustique [].

III -4. L'fiction sur le milieu

On exerce une action sur le milieu essentiellement par la modification de la cinétique de Corrosion en diminuant le pouvoir oxydant de l'électrolyte, en additionnant des inhibiteurs ou en ajoutant des passivâtes.

Etant donné que nous ne travaillons pas dans un milieu clos aucune action directe ne pourra être entreprise par contre il est évident que toute action pouvant mener à des émanations corrosives devra être évitée [43]

III -4.1 La conception et le tracé des assemblages

La question de la conception ne se pose plus puisque les équipements sont au stade d'exploitation. Par contre les interventions de soudure peuvent s'avérer nécessaires et dans ces cas faire attention à respecter les règles de soudage pour éviter les infiltrations de fluides qui peuvent accélérer la corrosion [44]

III -4.2 Le choix des matériaux

Le choix des matériaux interviendra surtout dans le renouvellement des pièces tels que les brides où il sera important d'éviter les associations de matériaux nobles avec des matériaux moins nobles ce qui entraînerait la dégradation rapide de ce dernier [44]

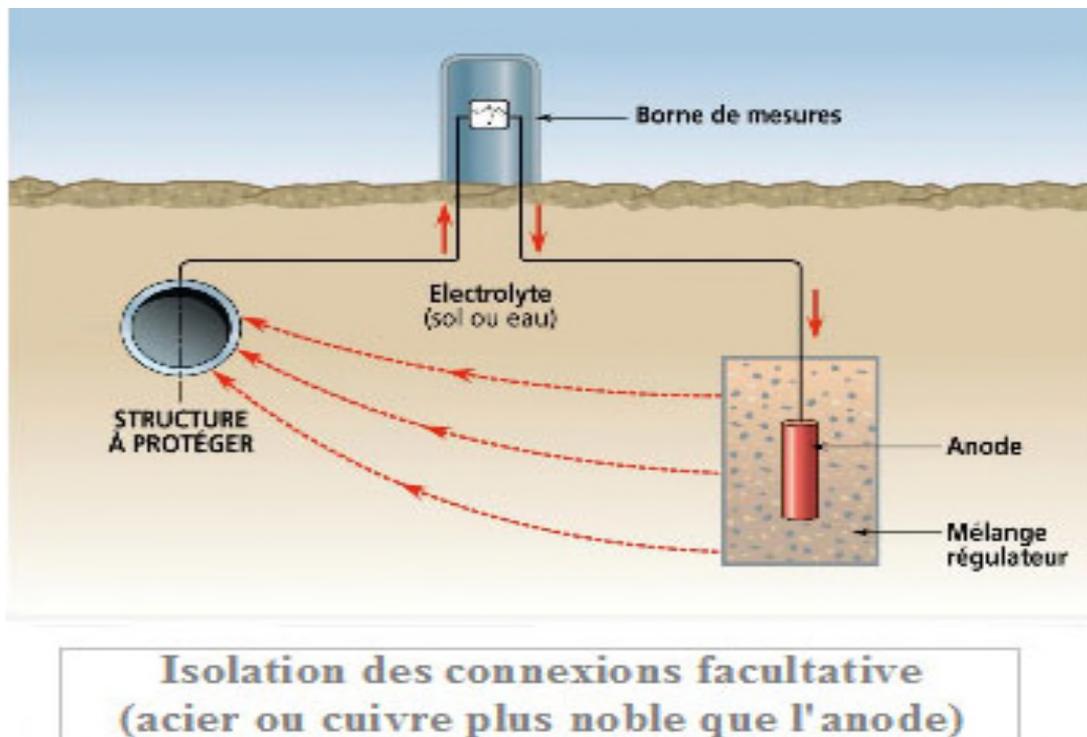
III -4.3 La protection électrochimique

Ici, il s'agit surtout de la protection cathodique qui est très utilisée pour protéger les structures et les équipements en acier. On soumet l'installation à un potentiel extérieur par application soit d'un courant imposé, soit par adjonction de masses métalliques jouant le rôle d'anodes sacrificielles à base de Zn, Mg ou Al. Elle peut être utilisée dans le cas de canalisations enterrées ou des réservoirs d'eau. La densité de courant dans ces cas est de 5 à 30mA/m², dans un sol anaérobie quelques mois s'écoulent avant une pleine polarisation [43]

III -4.3.1 la protection cathodique par anodes sacrificielles

Protection par anode réactive ou sacrificielle [...]

La protection du métal s'obtient en mettant en liaison un métal plus électro-négatif qui jouera le rôle d'anode, et sera attaqué de façon continue. Ainsi on protège les canalisations en Fer enterrées (destinées au transport d'eau, gaz, de pétrole) en les reliant à des blocs d'un métal fortement anodique (zinc ou mieux alliage riche en magnésium (fig.1))



Système de protection par anode galvanique

Figure III-1 : Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles

III -4.3.2 la protection cathodique à courant imposé

Pour la protection des réservoirs en acier inoxydable de 2m^3 . Il suffit de faire passer un courant de quelques ampères pendant une fraction de seconde pour obtenir la passivation. L'intensité du courant d'entretien n'est ensuite que de 150mA environ.

Le diagramme potentiel-pH de Pour Baix permet de comprendre facilement le principe des protections cathodique et anodique. Par exemple, à pH voisin de 7, le fer a un potentiel de Corrosion de -0.6V . Si on le porte à un potentiel de -0.8V , le fer se trouve dans le domaine d'immunité [38], la réaction d'oxydation est impossible. C'est la protection cathodique.

La protection cathodique s'obtient aussi en utilisant une source électrique (redresseurs, dynamo, accumulateurs) qui fait circuler un courant continu entre le métal à protéger fonctionnant comme cathode et anode auxiliaire (vieille ferraille dans le cas des canalisations enterrées ou anodes peu solubles en graphite Ferro-silicium, plomb à 2% Ag, pour les réservoirs à eau, ou les coques des bateaux). On conçoit que ce courant électrique I puisse annuler un courant i qui provenait de la corrosion en l'absence de protection, l'acier jouant alors le rôle d'anode (fig.2)

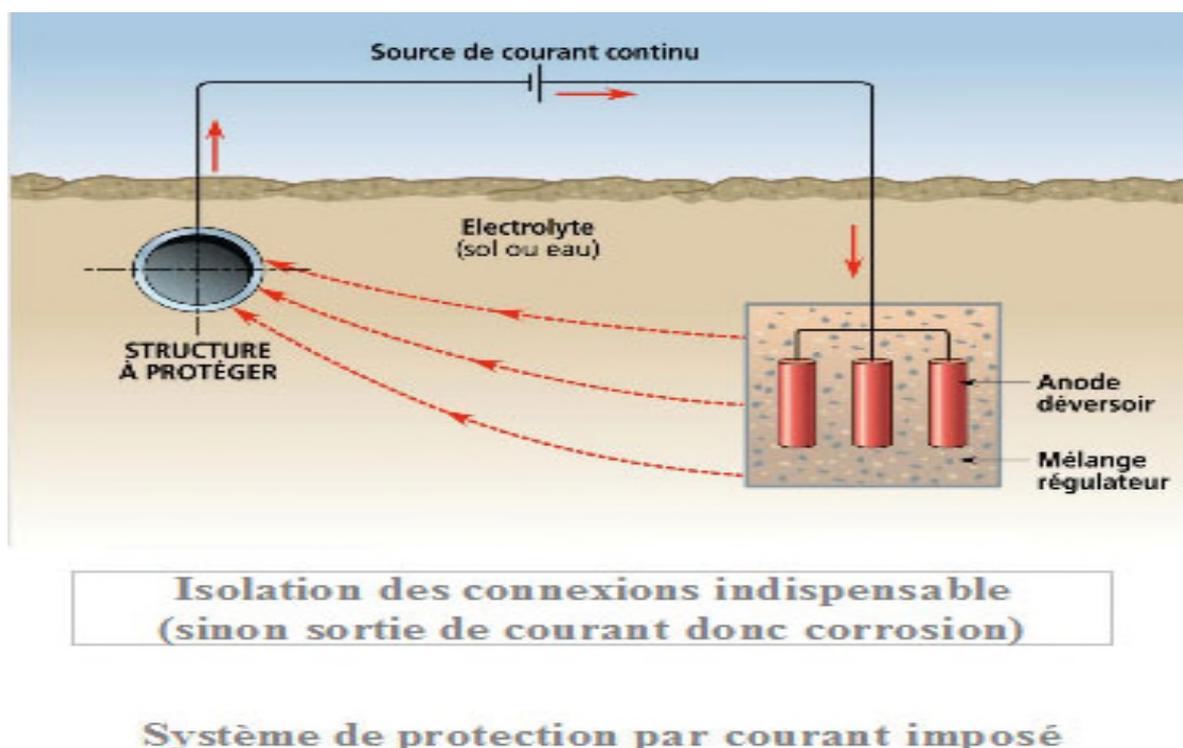


Figure III-2 Principe de la protection cathodique à courant imposé

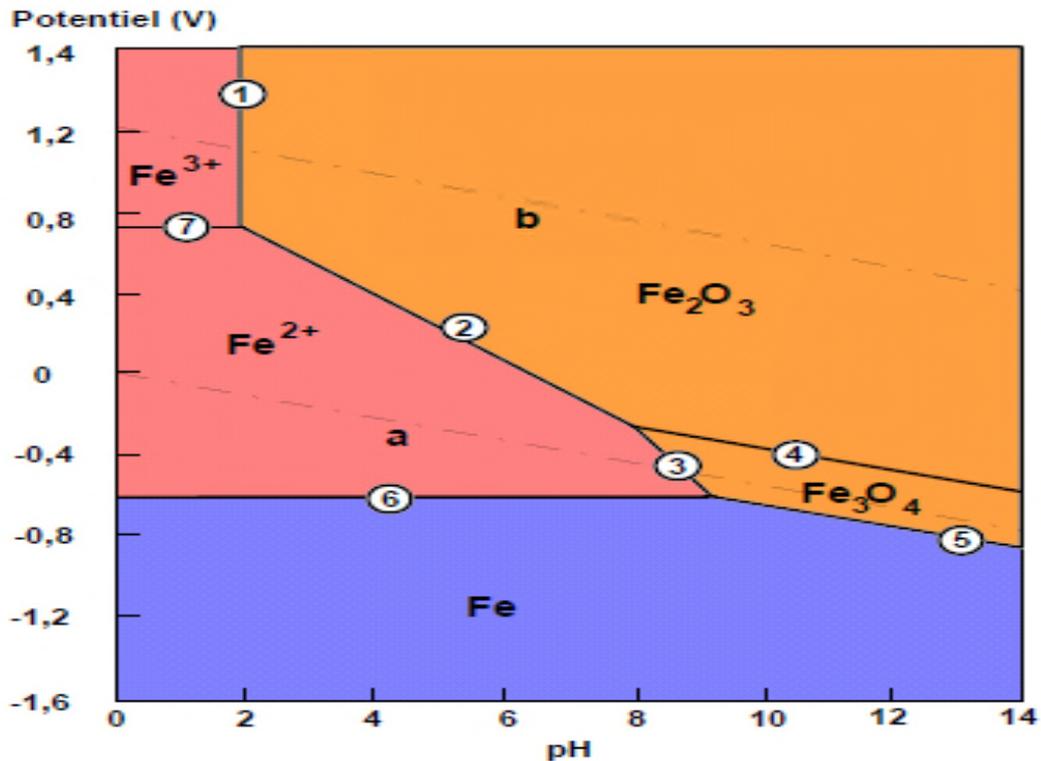


Figure III-3 : Diagramme potentiel - pH simplifié du fer

III -4.4. La protection par revêtement et traitement de surface

C'est la méthode qui sera appliquée dans l'ensemble des équipements parce qu'elle ne rencontre aucune contrainte ou de sélectivité quant à son adoption. Nous allons donc l'approfondir dans les sous-chapitres à venir

III -5. Les traitements de surfaces

III -5.1. Dégraissage

C'est une opération nécessaire pour éliminer les traces de saleté ou de graisse (Molécules organiques, carbone essentiellement) de la surface de la pièce en acier avant de la soumettre à quelque traitement thermique que ce soit (soudure par exemple) ou de finition superficielle (satinage, polissage électrolytique, etc.).

Le carbone présent sur la surface de la pièce, risque en effet de pénétrer à l'intérieur de celle-ci durant le traitement thermique, et ainsi de provoquer des dommages esthétiques et de compromettre sur certains points les caractéristiques du matériau, rendant les pièces plus dures, plus fragiles et moins résistantes à la corrosion.

L'opération de dégraissage peut s'effectuer par l'intermédiaire des méthodes suivantes :

1. lavage à l'aide de solutions alcalines,

2. lavage à l'aide de solvants organiques,
3. application de détergents à base d'acides dilués,
4. jets de vapeur, d'eau chaude sous pression,
5. application d'ultrasons.

Toutes ces méthodes pourront être appliquées ; elles seront départagées par le temps de l'application et par les facilités qu'offrent chacune d'elles [44]

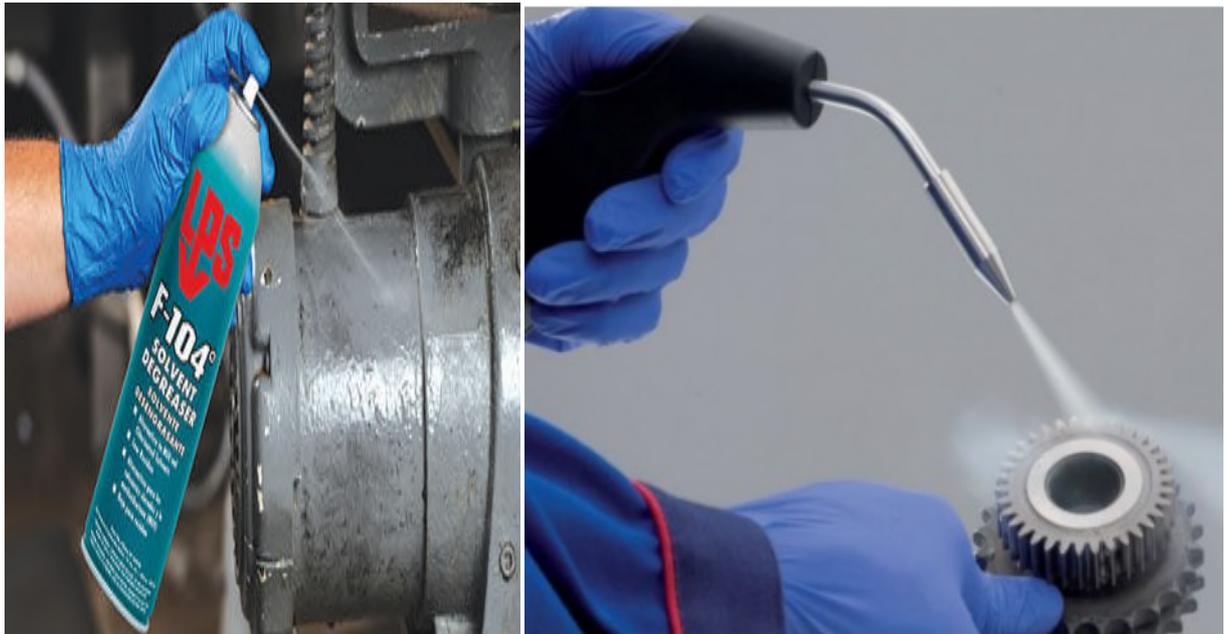


Figure III-4 : Opération nécessaire pour éliminer les traces de saleté ou de graisse

III -5.2. Décapage

A cause des altérations chromiques provoquées par les différentes opérations, de soudure par exemple, la teneur en chrome sur la zone d'acier subissant l'opération en question, descend sous le seuil de 12%. La couche atteinte perd ainsi ses caractéristiques anticorrosives, aussi doit-elle être éliminée

Le décapage est l'opération servant à éliminer complètement la couche très mince d'acier appauvri en chrome ainsi que les écailles à oxydation présente à la surface de la pièce ayant subi l'opération en question, ceci afin d'éviter que ne s'enclenche un processus de corrosion ;

Il y a trois techniques de décapage : le décapage chimique, le décapage par sablage et le décapage thermique. Ce dernier étant avec l'usage de la chaleur ne saurait nous convenir du fait de la nature des produits qui sont stockés, de plus c'est une technique qui est assez lente puisqu'on agit sur une petite surface, la flamme brûle la peinture et des gouttes enflammées peuvent tomber sur le sol.

Le décapage chimique est réalisé avec des décapants à peinture et vernis sous forme de liquides épais ou même de gels. Les décapants les plus courants sont à base de solvants qui ramollissent le film de peinture. On applique le décapant sur la peinture et on le laisse agir quelques minutes jusqu'à ce que celle-ci se boursoufle. Il suffit alors de gratter avec une spatule ou avec une brosse pour enlever la peinture. Lorsqu'il y a plusieurs couches de peinture successives, il peut être nécessaire de procéder à une seconde application de décapant

D'autres types de décapants, à base de soude ou de potassium, agissent en décomposant la couche de peinture. Plus lents, ils pénètrent plus profondément et peuvent décapier plusieurs couches successives.

Le décapage par sablage est à la fois rapide et efficace, notamment pour les pièces comportant des endroits difficiles d'accès. Sur les pièces en acier on projette à l'air comprimé une poudre abrasive très dure, aux grains anguleux qui décolle la peinture

C'est un procédé déjà utilisé à Jetée Nord sauf que le sable est remplacé par un composant

Appelé « grid » pour ses caractéristiques moins polluantes que celles du sable ; ce procédé pourra donc être conservé d'autant plus qu'elle offre l'avantage de la rapidité par rapport aux autres méthodes. [44]

III -5.3. Passivation

La passivation est un traitement de surface important qui permet d'assurer aux aciers une résistance à la corrosion. C'est en fait le processus de formation d'une couche d'oxyde protectrice sur la superficie de l'acier. La barrière d'oxyde qui isole le métal empêche la réaction naturelle d'oxydation de se produire. L'activité chimique du métal est inhibée et le

Métal est dit passif ; c'est donc le processus qui rend un métal plutôt inerte VIS à VIS de l'attaque de son environnement. La passivation peut être réalisée de plusieurs manières :

Par voie électrochimique : polarisation anodique,

Par voie chimique : addition d'agents oxydants tels que les chromates dans l'électrolyte,

Par Ant passivation, qui est le cas des aciers inoxydables.

. Les aciers peuvent également être protégés à l'aide d'une couche passive obtenue au contact de l'oxygène atmosphérique ; toutefois dans ce cas la protection n'est que relative. La passivation à l'air est un processus lent et non homogène ; ceci en raison de la non-homogénéité des conditions atmosphériques et environnementales auxquelles est soumis l'équipement (température, pourcentage d'oxygène dans l'air, humidité atmosphérique).

La seconde méthode de passivation sera la mieux indiquée dans le cadre de notre plan de maintenance du point de vue de la durabilité. [44]



Figure III-5. avant et après décapage passivation

III -6. Les revêtements

Les revêtements de protection sont d'une grande importance pour diverses raisons, y compris l'esthétique. D'une part, des performances notables, une durée de vie longue et sûre sont nécessaires ; d'autre part, des prix abordables et des composants écologiques sont nécessaires. Les systèmes de protection contre la corrosion sont conçus pour garantir que la valeur et la fonction des bâtiments et des structures à structure métallique sont préservées pendant longtemps.

III -6.1. Composition

Il existe quatre grandes familles de constituants :

- Le liant qui apporte ses principales propriétés au revêtement. Généralement les peintures sont classées d'après la nature chimique de leur liant qui en est le constituant le plus important
- Les solvants sa fluidité à la peinture pour permettre l'application. Leur élimination totale permet la formation du film.
- Les additifs modifient certaines propriétés de la peinture on en apporte de nouvelles.
- Les matières pulvérulentes qui comprennent :

Les pigments qui apportent des propriétés optiques (opacité, couleur) ainsi que d'autres propriétés spécifiques (anticorrosion, résistance au feu ...).

Les matières de charge qui jouent souvent le rôle de renforcement mécanique ou de contrôle du brillant [43].

III -7. Les peintures dans la lutte contre la corrosion

En matière de lutte anti corrosion, il existe à l'heure actuelle, un nombre important de techniques bien ciblées, mais les dégâts occasionnés par la corrosion sont toujours considérables.

La protection contre la corrosion comprend les méthodes suivantes:[45]

- Choix judicieux des matériaux: utilisation des métaux nobles,
- Utilisation des inhibiteurs de corrosion,
- Protection électro chimique : protection cathodique ou anodique,
- Utilisation des revêtements (revêtement organique ou inorganique).

III -7.1. Les revêtements métalliques

Il existe deux types de revêtements métalliques suivant les places occupées dans la classification électrochimique, le métal qui constitue le revêtement et le métal à protéger :(Figure I.4). [46.47]

III -7.2. Les revêtements anodiques

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base

III -7.3. Les revêtements cathodiques

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas, par exemple, d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial.

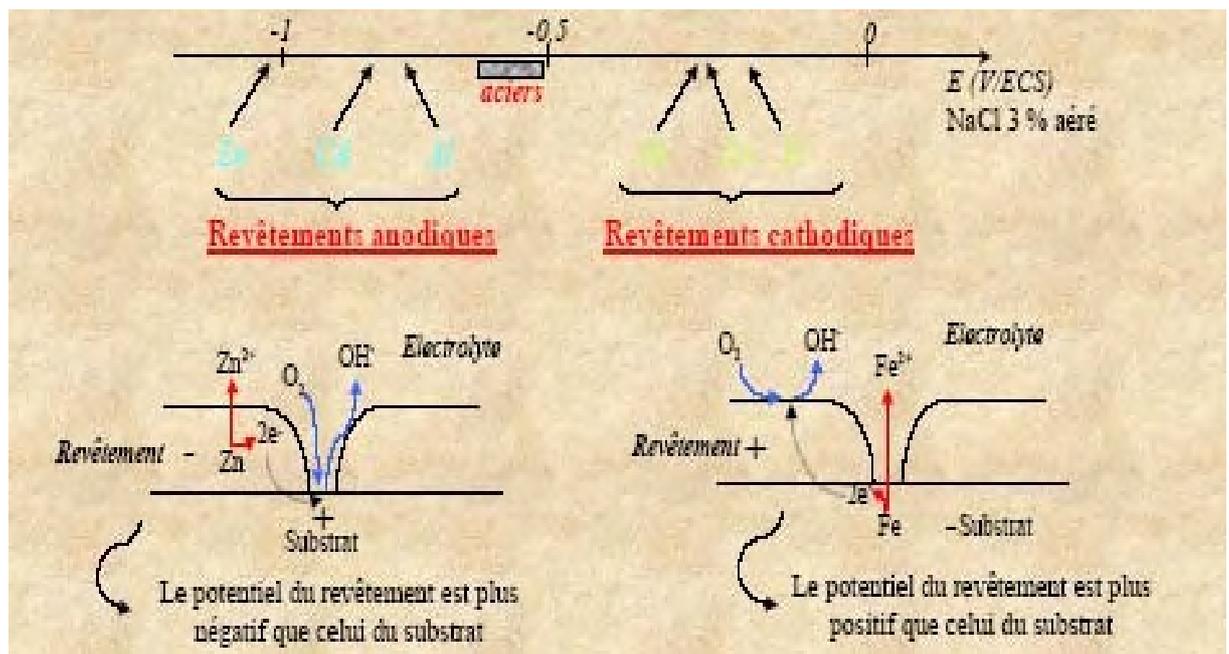


Figure III-6. Présentation des revêtements métalliques

Un potentiel inférieur ou proche de celui du matériau à protéger semble le meilleur choix car, en cas de défaut ou de dégradation de la couche métallique, la corrosion galvanique se développera sur le revêtement qui aura le rôle anodique dans le couple formé avec le matériau. À l'inverse, un revêtement de potentiel plus élevé conduira à une forte dégradation du matériau, qui aura le rôle cathodique du couple, la corrosion galvanique sera aggravée par la nature très localisée des défauts sur la surface métallique. [48]

III -7.4. Les revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils se divisent en trois familles :

- les bitumes,
- les revêtements polymériques,
- les peintures et les vernis.

III -8. Mode de séchage

Après application, la peinture va subir une transformation qui donnera un film de Peinture sèche. Il existe deux modes de séchage : le séchage chimique dont nous ne parlerons pas ici et le séchage physique par évaporation à l'air à température ambiante. Pour ce dernier cas au niveau des liants en solution, l'élimination du solvant laisse un enchevêtrement de

Macromolécules assurant la cohésion du film et son adhérence au support. Le film formé reste sensible aux solvants

III -9. Choix du revêtement

Nous avons porté notre choix sur le revêtement anticorrosion à l'époxy modifié qui présente la particularité de pouvoir être utilisé à la fois comme couche primaire, comme couche intermédiaire et comme couche de finition. En cas d'indisponibilité du produit, les autres produits pourront être utilisés en faisant cependant attention sur la compatibilité des peintures les unes avec les autres.

III -10. Etablissement d'un calendrier

Une action préliminaire à l'établissement d'un programme périodique est une mesure d'épaisseur exhaustive de tous les équipements sensibles, sujets à corrosion, avec un relevé dans un registre. Ensuite, vient le plan d'intervention proprement dit où nous recommandons d'adopter la démarche suivante : [43]

III -10.1. Pour les actions curatives :

Pour les relevés > 50% de l'épaisseur nominale, procéder à un remplacement.

Pour les relevés compris entre 20 et 50%, faire un traitement de surface, pose de l'anticorrosif, prévision d'échange l'année suivante.

Pour les relevés < 20%, faire un traitement de surface, pose de l'anticorrosif, contrôle trimestriel

III -10.2. Actions préventives :

Inscrire dans les procédures de maintenance préventive, le relevé des mesures d'épaisseurs, le nettoyage des surfaces et la pose des anticorrosifs tous les 6 mois.

L'utilisation de logiciels de planification tels que Microsoft Project, déjà adoptée au niveau de Jeteé Nord permettra de faire le planning avec beaucoup plus de précision et de facilités. Ils offrent la possibilité d'introduire la périodicité des actions à mener, le nom de la personne qui en est responsable, et des rappels, chose très importante pour éviter les oublis[43]

III -11. Méthode d'archivage

Il devient impératif de prendre en compte les questions de stockage de données dans la conception des projets. Les supports techniques seront mis à profit. Par ailleurs, le stockage des données doit être fait de manière à fonctionner de façon « vivante », Une véritable politique d'archivage n'est efficace que si l'importance d'une telle action est clairement reconnue comme profitable pour le bon suivi du programme de maintenance.

Les informations d'origine spécifiques aux équipements doivent être accessibles à tout moment, les données non-accessibles devront être répertoriées puis mise à jour. En outre, les personnes chargées de la maintenance devront procéder à une mise jour systématique de toutes les nouvelles

informations qui pourront s'avérer utiles pour les interventions à venir. Il faudra ensuite organiser les observations collectées en vue de leur utilisation future même par une personne étrangère à son élaboration.

Dans les archives, devra figurer une description contenant des informations sur le type d'équipement, sa date de fabrication ou d'installation, pour les activités techniques, le rattachement aux fournisseurs, produits, contrôleurs, etc. On peut voir ci-après le modèle de la fiche proposée. D'autres informations nécessaires à la maintenance pourront éventuellement être ajoutées. [43]

Shell Sénégal

Fiche - corrosion

Equipement concerne

Contrôle []

Autres (il spécifier)

[]

Référence ou Numéro	
Dure de fabrication ou d'installation	
Capacité	
Hauteur	
Longueur	
Epaisseur	
Aérien []	Semi-enterré
	Enterre []

Traitements de surface	
Date du dernier revêtement	Primaire
	Intermédiaire
	FINITION

Remorqués :

Mesures à prendre :

Conclusion

Conclusion

La corrosion est une réaction que subit un métal au contact de son environnement et qui pourrait être chimique, physico-chimique ou électrochimique. Dans ce sens, et en dehors d'une bonne protection passive il existe plusieurs techniques actives pour augmenter la durée d'exploitation des ouvrages dont la plus répandue reste la protection cathodique, qui consiste à abaisser le potentiel de la structure à protéger au-dessous d'un certain seuil fixé pour un métal donné dans un milieu donné pour atteindre la zone d'immunité selon le diagramme de Pourbaix et rendre la corrosion thermodynamiquement impossible

Les plans de prévention face à la corrosion ont été rapportés dans ce travail ; il existe plusieurs méthodes de protection afin de supprimer ou de ralentir la corrosion, certains facteurs qui favorisent la corrosion sont envisagés. Dans le cas des ouvrages enterrés un risque significatif de corrosion galvanique due à l'hétérogénéité de la structure géologique ainsi que l'existence d'une dissolution localisée induite par la circulation de courants vagabonds générés par les systèmes de protection cathodiques avoisinant. Dans le cas des citernes enterrées, il est primordial d'identifier les principaux mécanismes à l'origine d'une corrosion localisée de la structure métallique. La corrosion localisée correspond à la séparation spatiale des cellules anodiques et cathodiques ; Ce mode de corrosion est associé à un champ de potentiel non uniforme dans le volume de sol (existence d'un gradient de potentiel à l'échelle macroscopique) et à la formation d'un courant de corrosion galvanique ; la perte locale de matière sur les zones anodiques conduit à un accroissement du niveau de contrainte, on parle alors de "corrosion sous contraintes", associé à une moindre ductilité pouvant entraîner à terme la ruine fragile de l'ouvrage métallique . Dans le cas des pipelines, la dissolution locale et complète de la paroi externe d'une conduite provoque la fuite du liquide transporté dont les conséquences peuvent être dramatiques (pollution des sols, explosion...).

En se basant sur la connaissance des conditions de dégradation et des détails de construction de l'équipement, on peut faire un pronostic des phénomènes de dégradation attendus et de la nature de l'attaque. Les techniques d'inspection doivent être choisies pour pouvoir détecter les formes d'attaque attendues. Ensuite l'analyse des phénomènes de dégradation doit être confrontée aux observations faites au cours des inspections et si nécessaire être adaptée. L'exécution des inspections fait donc intégralement partie de l'identification des risques de dégradation.

L'identification des risques de dégradation est un processus qui doit être effectué pendant toute la durée de vie de l'équipement depuis la conception jusqu'au moment où l'équipement est mis hors service définitivement. L'utilisation de la protection cathodique par courant imposé, alimenté en photovoltaïque joue actuellement un rôle non négligeable pour la protection des ouvrages métalliques enterrés.

Références
bibliographiques

- [1]: T. Ianez , cours électrochimique 3eme année génie de procédé (2009).
- [2]: N. Arbaoui (2004). Effet du gradient de température sur la corrosion des concentriques, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, p 14,15,.....p 40.
- [3] Coombs J., Fundamentals of corrosion mechanisms, Chevron corporation, New york 1999.
- [4] Corrosion et prevention, Institut algerien du pétrole-corporate university, Algérie, 2006.
- [5] Einar B., Corrosion and protection, Norway, 2003
- [5] Francois R., Corrosion and deposits course, Master of science in oil and gas production engineering, France, 2005.
- [6] Jacques L., Protection contre la corrosion, Techniques de l'ingénieur, France, 1990.
- [7] Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie - IFP training, France, 2005.
- [8] Radhia Y., Synthèse de nouveaux composés de l'acide phosphonique et mise en évidence de leur acidité affinité de chélation et de leurs propriétés inhibitrices de corrosion, Mémoire de Magister, Université de Setif (Algérie), 2012.
- [9]. A. ZEGHLOUL. Mécanismes d'endommagement des structures métalliques, disponible sur : [www.mim.univ-metz.fr/formations/documents/1/cours DM-Luno.pdf](http://www.mim.univ-metz.fr/formations/documents/1/cours_DM-Luno.pdf). PP.5-39.
- [10]. CEFRACOR. Matériaux métalliques : phénomènes de corrosion, quatrième partie : les différentes formes de corrosion aqueuse. CEFRACOR 2003, PP.75-86, disponible sur : <http://www.cefracor.org/doc/cours-04/pdf>
- [11]. Corrosion et protection, disponible sur: <http://www.motorsstor.com/PDF/docdf>
- [12]. G P. ROTHWELL. Corrosion phenomena in introduction, NPL ,2003 PP.1-9, disponiblesur: http://www.npl.co.uk/Imm/docs/introduction_to_corrosion_phenomena.pdf
- [13] F. Dabosi et al, Corrosion localisée, Ed. Physiques, 1994.
- [14] Corrosion par piqûre et par crevasse. Eléments sur les mécanismes, appliqués à la sélection et l'utilisation des aciers inoxydables. Matériaux & Techniques 99, 81–91 (2011)
- [15] SCULLEY J. The fundamentals of corrosion. Pergamon press. Oxford. (1975).
- [16] SHREIR L.J. Corrosion newness. Butter & Othsed. Vol1. London. (1977).
- [17] G. Daufin, J. Talbotn , « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière ». Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. INRA Editions, 51 (507). (1971).
- [18] J.Leconte, "Tuyauterie: protection contre la corrosion", Technique de l'ingénieur, traité Génie mécanique, A830, (1981).
- [19] Sidhu, et al, — Enhancement of wound healing by curcumin in animals. — Wound Repair Regen. (1998), 6, PP. 167–177.

- [20] Mohamed Chaouki NEBBAR « Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion » diplôme de Magistère Spécialité : Métallurgie Université Mohamed Kher - Biskra 08/04/2010
- [21] Hilti H. G, Manuel Corrosion, Hilti France 11 rue Jean Mermoz 178778 Magny-les-Hameaux, Juillet 2015.
- [22] Jean Sarrazin et Michel Verdaguer, « L'oxydoréduction, Concepts et expériences », Edition Ellipses (1997)
- [23] Maurice Bernard, « Cours de chimie minérale », Edition Dunod.
- [24] T.E.Graedel, R.P.Frankenthal, « Corrosion mechanisms for iron and low alloy steels exposed to atmosphere », Journal Electrochemical Society, vol.137, p.2395, (1990)
- [25] S.Hoerlé, F.Mazaudier, Ph.Dillmann, G.Santarini, « Avances in understanding atmospheric corrosion of iron. II Mechanistic modelling of wet-dry cycles », Corrosion science vol.46, pp.1431-1465, (2004)
- [26] <http://www.uwgb.edu/dutchs/PETROLOGY/LepidocrStruc.HTM>
- [27] MAROUF.H, Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier ordinaire E36/Acier anti -usure NAXTRA70 utilisé par l'unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou , 2012.
- [28] SAADOUNE SOUHILA -Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi- fonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction- MAGISTER Option : Electrochimie UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES Soutenu le : 22 / 06 / 2010
- [29] National Library of Canada Acquisitions and Bibliographie Services 395 Wellington Street Ottawa ON K1A 0N4 Canada
- [30] BENSABA Abdeljalil SABROU Abdel basset «Etude d'inhibition de la corrosion de fer en milieu acide par l'extrait de periploca » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER Spécialité : génie chimie Université de Ghardaïa le:17/09/2020
- [31] Dr. GHOMARI Fouad" SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION" UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
- [32] Catonné .I.I.J, les Revêtements Protecteurs dans l'Industrie, Principe - choix, CAST LYON, 1977.
- [33] Campa. A, Protection des Surfaces Métalliques Contre la Corrosion, Technologie Professionnelle pour les Mécaniciens, Tome 2, Professionnelle pour les Mécaniciens, paris, 1971.
- [34] Fiaud.C Inhibiteurs de Corrosion, m160, Technique de l'Ingénieur, 2000.

- [35] BENSABA Abdeljalil SABROU Abdel basset « Etude d'inhibition de la corrosion du fer en milieu acide par l'extrait de periploca » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER Université de Ghardaïa le:17/09/2020
- [36] G. Koch, M. Brongers, N. Thompson, Y. Virmani, and J. Payer, "Corrosion cost and preventive strategies in the United States," 2002.
- [37] B. Y. Fang, A. Atrens, J. Q. Wang, E. H. Han, Z. Y. Zhu, and W. Ke, "Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in ' low ' and ' high ' pH solutions," J. Mater. Sci., vol. 8, pp. 127–132, 2003.
- [38] A. . Peabody, Peabody's control of pipeline corrosion. Houston, Texas, 2001.
- [39] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion 2nd ed. New York, 1996.
- [40] Z. Chen, D. Koleva, and K. Van Breugel, "A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure," Corros. Rev., vol. 35(6), pp. 397–423, 2017.
- [41] I. Ibrahim, "La corrosion induite par courant alternatif sur les canalisations enterrées sous protection cathodique," UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 2008.
- [42] R. . Revie, Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 4th Edition. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [43] Denny A. Jones. Principles and Prevention of Corrosion I. , 2c ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 1996
- [44] Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot. Des matériaux, chapitre 8 pages 323-391
- [45]. SUZANNE JOIRET, CLAUDE DESLOUIS, MICHEL KEDDAM. Les polymères conducteurs dans la lutte anti-corrosion. Lettre des sciences chimiques, N° 69. Février- Juillet, 1999. PP.1-4.
- [46]. J. BERER, A. MICHEL, J. PHILIBERT et J. TALBOT. Métallurgie générale, 2ème édition, Ed, MASSON, 1984, Paris. PP.389-400.
- [47]. A. ZEGHLOUL, M. TOUATI. Dégradation du matériel : Action correctives et préventives. PP.90-145. Disponible sur : www.luno-edu.net/offre/index.php?mode=impression&idmodule=209 -
- [48]. S. PAYAN. Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut module. Thèse de doctorat .Université de Bordeaux I, 2002. N° d'ordre : 242. PP.34-48.

ملخص

لقد قمنا في هذا العمل بدراسة خطط الوقاية المتعلقة بتآكل المعدات المدفونة تتكون المنهجية المدروسة من تحديد الاستراتيجيات التي تسمح بحماية الهياكل لأن قابلية المعدن للتحلل والتكلفة الناتجة من بين التحديات الرئيسية للصناعة والإقتصاد بشكل عام دراسة التآكل هي دراسة حالة تتطلب مساهمة المعرفة العلمية الأساسية من أجل تلبية الاحتياجات بشكل أفضل دون وقف الانتاج وبأقل التكاليف يجب ان تكون الارض التي يجب العمل فيها غير قابلة للأختراق بشكل مثالي لتجنب التعديلا و تعد المراقبة جزءا أساسيا يجب دمجها في برنامج الصيانة من اجل تحديد انضمة الحماية المناسبة مع مراعاة الاماكن التي يلزم فيها التطبيق والوقت توفر الطلاءات مقاومة ذاتية للتآكل وتجنب الانقطاعات في استمرارية السطح ويوفر حماية للمعدن

Résumé

Nous avons présenté dans ce travail des plans de prévention relatifs à la corrosion d'un équipement enterré ; la méthodologie consiste à définir des stratégies permettant la protection des ouvrages car la dégradabilité du métal et le coût qui en résulte font partie des principaux enjeux de l'industrie et de l'économie. En général, les études de corrosion sont des études de cas qui nécessitent l'apport de connaissances scientifiques fondamentales afin de mieux répondre à des besoins sans arrêter la production et avec des coûts minimums. Le terrain où doit être enterré l'ouvrage doit être idéale non perméable pour éviter les altérations ; la surveillance est une partie essentielle et doit être intégrée dans un programme de maintenance afin de définir des systèmes de protection adaptés en tenant compte des endroits où il faut appliquer et le temps. Les revêtements apportent une résistance intrinsèque à la corrosion, éviter les ruptures de continuité de la surface ; le revêtement lorsqu'il se consomme, il présente une protection du métal.

Abstract

We have presented in this work prevention plans relating to the corrosion of buried equipment; the methodology consists in defining strategies allowing the protection of the structures because the degradability of the metal and the resulting cost are among the main challenges of the industry and the economy. In general, corrosion studies are case studies that require the contribution of fundamental scientific knowledge in order to better meet needs without stopping production and with minimum costs. The ground where the work must be buried must be ideally non-permeable to avoid alterations; monitoring is an essential part and must be integrated into a maintenance program in order to define suitable protection systems taking into account the places where it is necessary to apply and the time. The coatings provide intrinsic resistance to corrosion, avoid breaks in the continuity of the surface; the coating when it is consumed, it presents a protection of the metal.