

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABBES LAGHROUR - KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT SCIENCES DE LA MATIERE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: Physique

Option: Physique Des Matériaux

Thème :

**L'influence des inhibiteurs de corrosion sur les
revêtements Ni-P déposés par voie
électrochimique.**

Présenté par :

M^{elle} AOUAIDJIA Chaima

M^{elle} BOUTI Dounia

Encadré par :

Mr LEKMINE Farid

Soutenu le: 27 août 2020

Jury de soutenance :

Président :	Mr GUENOUCHE Mourad	(MCB)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Encadreur :	Mr LEKMINE Farid	(MAA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Examineur :	Mr HAMAM Zoubir	(MAA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Promotion : août 2020

Travail réalisé au niveau des Laboratoires Physique, Université de Khenchela.

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la force et la patience pour mener ce travail à bout.

Nous exprimons nos profonds remerciements et nos vives reconnaissances à Monsieur **LEKMINE Farid**, Maître-assistante à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, d'avoir dirigée ce travail avec une grande rigueur scientifique ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils.

Une très grande reconnaissance va à Monsieur, **GUENOUCHE Mourad** Maître- assistant à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur, **HAMAM Zoubir** Maître-assistant à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Un grand merci à toute l'équipe de Laboratoires Physique de la Faculté des Sciences de la matière, en particulier Mr **Zin Eddine**, qui a mis à notre disposition tout le matériel nécessaire pour la réalisation de ce travail.

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donnée la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience

d'aller jusqu'au mon but . Je dédie ce travail à

Mes très chers parents Abdelmadjid et Halima

Pour leur amour, leur encouragement, leur patience et leur soutien sans faille

Je les remercie de m'avoir accompagnée tout au long de mon parcours à ceux qui

m'ont tout donné sans rien en retour

Pour mon encadreur LEKMINE Farid

Pour mon frère Abdelhalim et mes sœurs Asma et Bouthaina

Pour mes chères cousines

Zineb, Nadhira, Imen, Asma, Nabila, Leila et Dalila

Pour les petites fleurs Rahma, Hanin et Hiba

Pour les bourgeons Macine, Kossai et Ranime

Pour toute la famille AOUAIDJIA

Pour tous mes amis et mes proches sans exception

Pour mon fiancé Ala Eddine

Chaima

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la

force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au but du rêve.

A mes très chers parents pour leur amour et leur support continu,

Je vous dois tous mes succès, tous mes bonheurs et

toutes mes joies. Je suis très heureuse et fière de votre

présence à mes côtés.

A mes chers frères

Que Dieu le tout puissant vous procure continuellement santé, bonheur et tranquillité.

Pour mon encadreur LEKMIE Farid

Pour toute la famille Bouti

Pour tous mes amis et mes camarades de promotion sans exception

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus

difficiles.

Dounia

Table des matières

Liste des tableaux	I
Liste des figures	II
Liste des abréviations.....	III
Liste des symboles.....	IV
Référence bibliographique.....	V,VI,VII

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralité Sur La Corrosion

I- Notions de corrosion des métaux.....	2
I-1/ Introduction.....	2
I-2/ Définition de la corrosion.....	2
I-3/ Aspect économique de la corrosion.....	3
I-4/ Différentes modes de corrosion.....	3
I-4.1/ Corrosion chimique ou corrosion sèche.....	3
I-4.2/ Corrosion biochimique.....	4
I-4.3/ Corrosion électrochimique.....	4
I-5/ Processus de corrosion.....	6
I-6/ Morphologie de la corrosion.....	6
I-6.1/Corrosion uniforme (généralisée)	6
I-6.2/Corrosion localisée.....	7
I-6.2.1/Corrosion galvanique	8
I-6.2.2/Corrosion par piqûre.....	8
I-6.2.3/Corrosion sélective.....	9
I-6.2.4/Corrosion inter granulaire	10
I-6.2.5/Corrosion-érosion	10
I-6.2.6/Corrosion sous contrainte.....	11
I-6.2.7/La fatigue-corrosion.....	12
I-6.2.8/La corrosion cavernueuse ou corrosion par crevasse.....	12
I-7/Mécanisme de la corrosion des alliages Ni-P.....	13

I-8/Réaction et facteurs de corrosion des revêtements Ni-P	14
I-8.1/Réaction de corrosion.....	14
I-8.2/Facteurs de corrosion	14
I-8.2.1/Facteurs du milieu corrosif.....	15
I-8.2.2/Facteurs métallurgiques	15
I-8.2.3/Facteurs définissant les conditions d'emploi.....	15
I-8.2.4/Facteurs dépendant du temps.....	15
I-9/Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion.....	15
I-9.1/Effet de la température	15
I-9.2/Effet de l'acidité.....	15
I-9.3/Régime hydrodynamique	16
I-9.4/La salinité.....	16
I-10/Aspect thermodynamique de corrosion.....	16
I-10.1/ Potentiel normal d'électrode.....	16
I-10.2/Potentiel d'équilibre (E).....	17
I-10.3/ Equation de Nernst.....	17
I-10.4. Diagrammes de Pourbaix	18
I-11/Aspect cinétique de la corrosion	19
I-11.1/Equation de Butler-Volmer	19
I-11.2/Courbes de polarisation.....	20
I-11.3/Droites de Tafel.....	20
I-11.4/Loi de Faraday.....	22
I- 2/Les essais de corrosion.....	23
I-12.1/Essais Electrochimiques.....	23
I-12.1.1/Principe Des Mesures Electrochimiques.....	23
A. Electrode de travail	23
B. Electrode de référence.....	24
C. Electrode auxiliaire (ou contre électrode)	24
D. Potentiostat	24
E. Potentiostat-galvanostat.....	25
I-12.2/Essai De La Masse Perdue.....	25
I-12.3/Impédances électrochimiques	26
I- 3/Méthode de protection contre la corrosion.....	27
I-13.1/Les revêtements métalliques	27

I-13.1.1/Les revêtements anodiques (ou les sacrificielles)	27
I-13.1.2/Les revêtements cathodiques (ou les nobles).....	27
I-13.2/Les revêtements non métalliques	27
I-	
13.2.1 /Peintures	28
I-13.2.2/Matières plastiques.....	28
I-13.3/Protection électrochimique	28
I-13.3.1/Protection cathodique.....	28
A. Par anodes sacrificielle.....	28
B. Par courant imposé.....	28
I-13.3.2/Protection anodique.....	29
I-13.4/Protection par inhibiteurs	29
II/Aperçu sur les inhibiteurs de corrosion.....	29
II-1/Historique.....	29
II-2/Définition.....	30
II-3/ Propriétés de l'inhibition	30
II-4/Conditions et domaine d'utilisation.....	31
II-5/Les classes d'inhibiteurs	32
II-5.1/Classification par domaine d'application	32
II-5.1.1/Inhibition en milieu acide.....	32
II-5.1.2/Inhibition en milieu neutre.....	33
II-5.1.2.1/Inhibition par passivation.....	33
II-5.1.2.2/Inhibition par précipitation	33
II-5.1.3/Inhibition en phase gazeuse	33
II-5.1.4/Inhibiteurs pour peintures	33
II-5.2/Classement selon la nature de la molécule inhibitrice.....	33
II-5.2.1/ Les inhibiteurs organiques.....	33
II-5.2.2/Les inhibiteurs minéraux.....	34
II-5.3/Classement selon le mode d'action.....	35
II-5.3.1/ Mécanisme d'action électrochimique	35
II-5.3.1.1/ Les inhibiteurs anodiques.....	36
II-5.3.1.2/ Les inhibiteurs cathodiques.....	36
II-5.3.1.3/Les inhibiteurs mixtes.....	36
II-5.3.2/Classification par mécanisme réactionnel.....	37

II-5.3.2.1/ Inhibition par passivation.....	37
II-5.3.2.2/ Inhibition par précipitation.....	37
II-5.3.2.3/ Inhibition par élimination de l'agent corrosif.....	37
II-5.3.2.4/Inhibition par adsorption.....	38
II-5.3.2.4.1/ Adsorption physique.....	38
II-5.3.2.4.2/ Adsorption chimique.....	39

Chapitre II : Généralité Sur L'électrodéposition

II/L'électrodéposition	40
II-1/ Introduction	40
II-1.1/ Définition.....	40
II-2/ Cinétique d'électrodéposition.....	40
II-3/ Principe général de l'électrodéposition	41
II-4/ Mécanismes d'électrodéposition	42
II-4.1/ Transfert de masse.....	42
II-4.1.1/ La migration.....	42
II-4.1.2/ La diffusion.....	42
II-4.1.3/ La convection.....	43
II-4.2/Transfert de charge	43
II-4.3/ L'électro-cristallisation	43
II-5/Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique.....	44
II-5.1/La température.....	44
II-5.2/ Agitation de l'électrolyte	44
II-5.3/ PH du bain.....	45
II-5.4/ La densité de courant.....	45
II-5.5/ Conductibilité de l'électrolyte.....	45
II-5.6/ Nature de l'électrolyte	46
II-5.7/ Concentration de l'électrolyte.....	46
II-5.8/ Métal de base.....	46
II-6/Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P.....	46
II-6.1/ Propriétés et structure des dépôts	46
II-6.2/ Propriétés de Nickel.....	47
II-6.3/ Caractéristiques spécifiques de phosphore	47
II-6.3.1/Propriétés physiques	47
II-6.3.2/Propriétés thermochimique.....	48
II-7/ Contrôle des revêtements par dépôt électrolytique.....	48

II-7.1/ Mesure de l'adhérence au substrat.....	48
II-7.2/ Mesure de l'épaisseur.....	49
II-8 / Etude de la tenue à la corrosion.....	49
II-8.1/ Méthode de la masse perdue.....	49

Chapitre III : Etude Expérimentales, Résultats Et Discussion

III- 1/ Introduction.....	51
III-2/ Description de montage expérimentale.....	51
III-2.1/ les produits chimiques.....	51
III-2.2/ Matériels utilisés.....	52
III-2.3/ Matériaux.....	54
III-2.3.1/Substrat utilisé (métal de base).....	54
III-2.3.2/ Plaque de Nickel.....	54
III-3 Les étapes expérimentales de travail.....	54
III-3.1/ Préparation des substrats.....	54
III-3.1.1/ Polissage mécanique.....	54
III-3.1.2/ Dégraissage électrolytique.....	55
III-3.1.3/ Décapage chimique.....	56
III-3.1.4/ Rinçage.....	56
III-3.2/ Réalisation des dépôts.....	57
III-3.2.1/ L'électrodéposition Ni-P.....	57
III-3.2.2 / Bain d'électrodéposition.....	58
III-3.2.3/ Les conditions opératoires.....	58
III-4/ Méthode d'évaluation de la corrosion.....	59
III-4.1/ Méthode de la masse perdue.....	59
III-4.2/ Dispositifs de la masse perdue.....	59
III- 4.3/ Protocole de la masse perdue.....	59
III -4.4/ Inhibiteur utilisé.....	60
III-5/ Milieux expérimentaux.....	60
III-5.1/ Solution acide (1MH Cl).....	60
III-5.2/ Solution acide (1M H Cl+ inhibiteur).....	60
III-6/Résultats et Discussions.....	60
III-6.1/ Détermination l'épaisseur des dépôts.....	60
III-6.2/ Mesure de la vitesse de corrosion.....	62
III-6.3/ L'efficacité inhibitrice.....	62
III-6.3/ Le taux de corrosion.....	62

III-6.4/ Le taux de recouvrement.....	63
II.6.5 Isotherme d'adsorption.	64
Conclusion générale.....	67
Résumé	

LISTE DES TABLEAUX

Tab(II.1) : les propriétés physiques de nickel	48
Tab(II.2) : propriétés physiques de phosphores	50
Tab (III-1) : les produits chimiques utilisés	52
Tab (III-2) : les matériaux utilisés	54
Tab(III.3) : Compositions du bain électrolytique	58
Tab(III.4) : Compositions de l'électrolyte (H Cl +inhibiteur)	60
Tab(III.5) : Les épaisseurs des revêtements Ni-P	61
Tab(III.6) : Les résultats des calculs des revêtements de Ni	63
Tab(III.7) : Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes	67

LISTE DES FIGURES

Fig (I.1): Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement	4
Fig(I.2): Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire	4
Fig (I.3): corrosion électrochimique	5
Fig (I.4) : Corrosion uniforme (générale)	7
Fig (I.5) : Corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal	8
Fig (I.6) : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents: robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.....	8
Fig (I.7) : Corrosion par piqûre de l'aluminium	9
Fig (I.8): Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc)	10
Fig (I. 9) : Représentation schématique et Métallographie de la Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique	10
Fig (I.10) : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion.....	11
Fig (I.11): la corrosion sous contrainte.....	12
Fig (I.12): Défaillance par la fatigue-corrosion d'un tube d'économiseur à basse pression.....	12
Fig (I.13): Mécanisme et Aspect d'attaque de la corrosion caverneuse	13
Fig (I.14): les valeurs du potentiel normal d'électrode pour quelques métaux	17
Fig (I.15): Diagramme d'équilibre potentiel- pH du système Nickel- eau, à 25°C	19
Fig (I.16) : Courbe de polarisation $I=f(E)$	20
Fig (I.17): Evolution de densité de courant en fonction du potentiel	21
Fig (I.18): Densité de courants anodiques et cathodiques d'une réaction d'électrode	22
Fig(I.19) : Représentation schématique d'une cellule à trois électrodes	23
Fig (I.20) : Electrode de travail (échantillon)	23
Fig (I.21): Electrode de référence	24
Fig (I.22): Le contre électrode	24
Fig (I.23): Représentation schématique d'un potentiostat.....	25
Fig (I.24): représentation schématique d'essais électrochimique	25

Fig (I.25): Diagramme de Nyquist-Warburg pour l'impédance du circuit équivalent (b) contrôlé par la diffusion des espèces réductibles	27
Fig (I.26): Protection cathodique : a : anode sacrificielle ; b : en utilisant le redresseur (courant imposé)	29
Fig (I.27): Propriétés des inhibiteurs	31
Fig (I.28): Classement des inhibiteurs de corrosion	32
Fig (I.29): Formation des couches barrières en milieu acide (A) blocage des sites cathodiques et (B) blocage des sites anodiques.....	36
Fig (I.30): Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur cathodique, anodique ou mixte.....	37
Fig (I.31) : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique	39
Fig (II.1) : Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse	40
Fig (II.2) : cellule d'électrolyse	42
Fig (II.3) : transfert de masse et de charge au cours d'une électrolyse	43
Fig (II.4) : stades initiaux intervenant lors de l'électro-cristallisation	44
Fig(II.5) : Dispositif expérimental de la technique de la masse perdue	50
Fig(III.1) : Photo d'une polisseuse utilisée dans le polissage mécanique	55
Fig (III.2) : Schéma de montage de dégraissage électrolytique	56
Fig (III.3) : Schéma de décapage chimique.....	56
Fig (III.4) : Dispositif expérimental de l'électrodéposition Ni-P	58
Fig (III.5): Dispositif expérimental de la méthode de la masse perdue.....	59
Fig (III.6): Isothermes d'adsorption de Langmuir de l'inhibiteur A sur l'alliage Ni-P dans 1M HCl à différentes concentrations	65
Fig (III.7) : Isothermes d'adsorption de Temkin pour l'inhibiteur A sur l'alliage dans 1M HCl à différentes concentrations.....	65
Fig(III.8) : Isotherme d'adsorption de Frumkin pour l'inhibiteur A de corrosion sur l'alliage Ni-P dans 1M HCl à différentes concentrations.....	66

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviatiion	Signification
ECS	Electrode au Calomel Saturée
ET	Electrode de Travail
ER	Electrode de Référence

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS

Symbole	Signification	Unité
I_x	intensité de courant anodique.	[A]
I_c	intensité de courant cathodique.	[A]
E	potentiel d'équilibre au couple Ox/Red	[v]
E°	potentiel standard de l'électrode	[v]
R	constante des gaz parfaits	8,314 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
T	température absolue	[K]
F	Constante de Faraday	96500 C/mol
n	nombre d'électrons transférés dans la réaction	–
C_{ox}, C_{red}	concentrations d'oxydant et de réducteur en solution	mol.L ⁻¹ .
I	Densité de courant global.	A
i°	Densité de courant de corrosion.	A
α	Coefficient de transfert de charge anodique.	–
β	Coefficient de transfert de charge cathodique.	–
T	Température	[k]
n	Nombre d'électrons échangés.	–
η_a	Surtension ;anodique.	–
η_c	Surtension ;cathodique.	–
A	masse atomique du métal	–
i_{corr}	intensité du courant de corrosion	[A]
t	Temps d'électrolyse	[s]
n	Valence du métal.	–
T_{corr}	Taux de corrosion	[g/cm ² .an]
m_1	masse de l'échantillon avant test	[g]
m_2	masse de l'échantillon après test	[g]
S	surface de l'échantillon exposé au milieu corrosif	[Cm ²]
t	temps de l'exposition	[J]
J	densités de courant [A/ dm ²].	[A/ dm ²]
I	Intensité de courant	[A]
m_{dipot}	masse de dépôt.	[g]
m_f	masse de l'échantillon après revêtement.	[g]
m_i	masse de l'échantillon avant revêtement	[g]
e_{th}	l'épaisseur théorique du dépôt	mm
e	l'épaisseur réelle du dépôt	Mm
η	rendement du bain de Nickel	–
Δm	masse de dépôt	[g]
Z	nombre des électrons.	–
A	masse atomique.	–
ρ	masse volumique de dépôt	[g/ Cm ³]
S	surface immergée dans le bain	[dm ²]
V_{corr}	vitesse de corrosion	[g/cm ² .h]

Δ	Différence	–
Vcorr	vitesse de corrosion en absence d'inhibiteur.	[g/cm ² .h]
Vcorr(inh)	vitesse de corrosion en présence d'inhibiteur	[g/cm ² .h]
m0	masse de l'échantillon avant l'essai.	[g]
m1	masse de l'échantillon après l'essai	[g]
S	surface active	[cm ²]
E	L'efficacité inhibitrice	–
θ	Le taux de recouvrement	–



*Introduction
Générale*

INTRODUCTION GENERALE

Le cuivre et ses alliages possèdent de grandes applications dans notre environnement à cause de sa résistance naturelle à la corrosion, de bonnes propriétés mécaniques, une haute conductivité thermique et électrique, une bonne capacité à souder, c'est pourquoi ces matériaux sont largement utilisés dans des applications industrielles telles que les échangeurs thermiques, les appareils électroniques, les constructions et les applications marines.

Les métaux sont largement utilisés dans l'industrie, ils sont sensibles à différents types de corrosion (corrosion uniforme, corrosion galvanique, corrosion par piqure, corrosion intergranulaire, ...etc. Cependant la lutte contre la corrosion des matériaux et des structures repose sur la réalisation des traitements de surface. Ces dernières années, l'électrodéposition est de plus en plus utilisée car elle présente certains avantages. Elle est plus économique de point de vue matériaux et équipement. Elle est aussi simple à utiliser et permet de réaliser de grandes surfaces de formes géométriques complexes. C'est aussi une technique adaptable à l'industrie. L'électrodéposition des métaux sur différents substrats a été largement étudiée.

Notre étude consiste à une élaboration et caractérisation d'un alliage Nickel-phosphore électro déposé sur des substrats cuivre préalablement traité pour étudier l'influence d'inhibiteurs de corrosion sur les dépôts élaborés. Le comportement électrochimique des dépôts Ni-P élaborés dans un milieu agressif H Cl avec et sans inhibiteur a été étudiée par la méthode de la masse perdue. Pour étudier le comportement électrochimique des différents dépôts élaborés.

Le manuscrit présenté est donc subdivisé en trois chapitres précédés d'une introduction générale. Le premier chapitre est divisé en deux parties dans la première, nous avons décrit les notions de base de la corrosion des métaux. La seconde est présentée la généralité sur les inhibiteurs.

Le deuxième chapitre est présenté un rappel théorique sur l'électrodéposition et les facteurs qui influencent à l'électrodéposition enfin la méthode de la masse perdue fait l'objet du troisième chapitre. Le troisième chapitre de ce mémoire est donc consacré à l'interprétation et à la discussion de l'ensemble des résultats obtenus.

Finalement, on arrive à une conclusion générale qui rappelle les différents points décrits dans le mémoire et les principaux résultats obtenus.



Chapitre I:
Généralité Sur La Corrosion

I- Notions de corrosion des métaux:

I-1/Introduction :

La corrosion des métaux est un phénomène de dégradation de ces derniers sous l'effet oxydant de leur environnement. Cette corrosion touche toutes les installations qui contiennent des éléments métalliques en contact avec des effluents. [1] La corrosion a pris de nos jours une importance mondiale considérable qui affecte beaucoup les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes aux plus petites : production d'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, ...etc.

Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion résident non seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, d'énergie et temps) mais aussi dans les accidents pouvant être à l'origine (problèmes de sécurité) ainsi qu'un impact négatif sur la protection environnementale. [2]

Le but de ce chapitre consiste à rappeler les données bibliographiques relatives aux phénomènes de corrosion, nécessaires pour positionner le contexte de cette étude. Nous décrirons dans ce chapitre, les différentes notions intervenant dans le domaine (définition, types, formes, processus de corrosion, et les moyens de protection existants.), ainsi que le concept d'électrochimie au moyen des mécanismes cela conduit à une réaction électrochimique pour étudier la thermodynamique et la cinétique du phénomène. Afin d'exposer la présentation générale de la corrosion des métaux on introduira ensuite les inhibiteurs de corrosion.

I-2/Définition de la corrosion :

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est à dire la dégradation physique significative fonctionnelle du métal ou de ses propriétés par interaction chimique avec son milieu ambiant [3]. Dans ce cas, ils sont soumis à une perte de matière progressive aux points de contact avec le milieu environnant. Cette définition reconnaît que la corrosion est un phénomène nocif : elle détruit le métal et réduit ses propriétés, le rendant impropre à l'application envisagée. [4]

Du point de vue étymologique le terme « corrosion » vient du mot latin « corroder » qui signifie ronger, attaquer. Elle a été définie de plusieurs façons en raison de la diversité des environnements rencontrés comme l'atmosphère, les milieux liquides (solution aqueuse organique, métaux fondus, etc....), les gaz.

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et alliages ont tendance, sous l'action de réactifs chimiques ou d'agents atmosphériques, à retourner vers leur état originel d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le temps et plus fiable [5].

On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde. [6]

Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux dans l'air urbain et l'air salin (avec ou sans accélérateur) tels la rouille du fer et le vert de grise sur le cuivre.

I-3/Aspect économique de la corrosion :

La corrosion est un domaine vaste qui touche toutes sortes de matériaux dans des environnements variables. Ce phénomène cause de grands dégâts dans tous les secteurs: bâtiment, génie civil, transport, industries chimique et pétrolière [7]. Elle concerne de nombreuses installations : Tubes, bacs de stockage, échangeurs de chaleur, ...etc.

Dans l'impact de la corrosion on distingue les pertes directes et les pertes indirectes sont résumés ci-après:

- ❖ Coût des pièces à remplacer, des réparations à effectuer,
- ❖ Coût de l'entretien et du contrôle (mise en peinture, protection cathodique),
- ❖ Coût dû à l'utilisation de matériaux plus nobles,
- ❖ Augmentation des coefficients de sécurité,
- ❖ Contamination du produit par les produits de corrosion,
- ❖ Arrêt de production.[8]

I-4/Différentes modes de corrosion :

Suivant la nature du milieu environnant et les réactions hétérogènes liée à la surface de séparation métal- milieu ambiant La corrosion d'un métal ou d'un alliage pouvant être de différentes formes: uniforme, localisée et peut se développer selon différents processus, qui caractérisent chacun un type de corrosion. On peut distinguer trois types de corrosion: chimique, électrochimique ou biochimique.

II-4.1/Corrosion chimique ou corrosion sèche :

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non aqueuse ou être due à l'action de gaz (O_2 , H_2S et CO_2). Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase liquide ou gazeuse.

Lorsque le réactif est gazeux ou que cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : corrosion sèche [9,10].

La réaction qui se produit est de la forme :

A solide + B gaz → AB solide (I. 1)

L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non électrolyte (Al dans CCl₄) peut être considérée comme une corrosion chimique.

Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [11].

Elle consiste généralement en la transformation des métaux en oxydes en formant des couches superficielles. La corrosion chimique ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique.

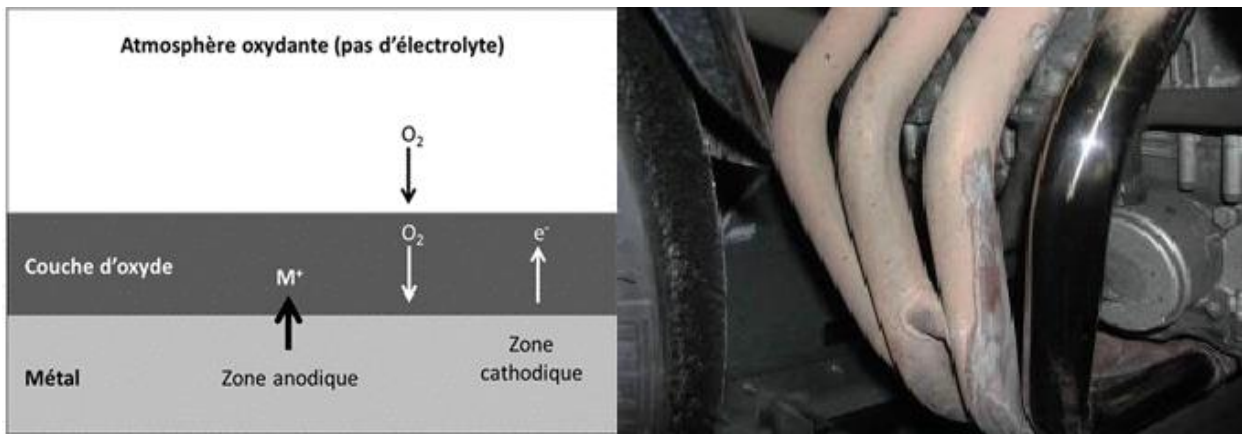


Figure I.1: Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement. [13]

I-4.2/Corrosion biochimique :

Il caractérise généralement les matériaux entrés tels que les canalisations. Il se résume dans l'attaque de telles structures métalliques immergées dans l'eau de mer par un certain type de bactéries utilisant quelques éléments chimiques se trouvant dans le matériau pour leurs transformations métaboliques ou sécrètent des produits chimiques de nature agressive et qui attaquent les zones du voisinage [12].



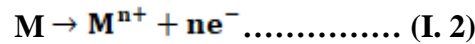
Figure I.2: Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire. [13]

I-4.3/Corrosion électrochimique :

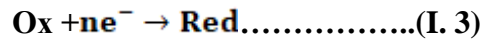
Ce genre de cette attaque est la plus répandue, se caractérise plus particulièrement la corrosion

GENERALITE SUR LA CORROSION

des métaux et alliages au contact d'une solution contenant un électrolyte dissous. Peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons entre deux zones anodiques et cathodiques par une présence simultanée en surface du métal (circulation d'un courant électrique). Elle nécessite la présence d'un réducteur; H₂O, H₂ Sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut se produire [13]. Dans ce cas, Ces zones peuvent subir des réactions d'oxydoréduction :



Et la réaction cathodique ou réaction de réduction :



Ces réactions d'oxydoréduction engendrent un courant anodique d'intensité I_x caractérisé à l'oxydation du métal et un courant cathodique d'intensité I_c correspondant à la réduction de l'espèce en solution. À l'équilibre ces deux intensités de courant sont égales en valeur absolue ($I_x = I_c$) 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.

Ce genre de corrosion peut être causé par l'hétérogénéité dans l'un des constituants du couple formé par le métal et le réactif qui détermine la création d'une pile électrique à l'intérieur du métal lui-même. Et de ce fait, un courant électrique circule de l'anode vers la cathode dans le réactif. L'anode est attaquée. [13,14,15]

Alors Il existe deux types de réaction électrochimique :

- Réaction chimique directe : métal plongé dans une solution.
- Pile électrochimique : apparition d'un courant entre deux électrodes lorsqu'on les réunit.

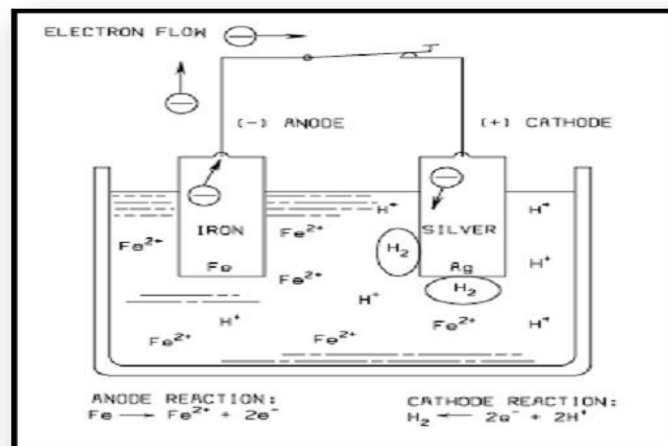


Figure I.3: corrosion électrochimique. [13]

I-5/ Processus de corrosion :

La corrosion des métaux est impliquée à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre un métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant suivant la réaction:



Toute réaction d'oxydoréduction se consiste de deux demi réactions : la réaction partielle de réduction ou réaction partielle cathodique et la réaction d'oxydation ou réaction partielle anodique:



I-6/Morphologie de la corrosion :

La corrosion peut se produire sous plusieurs formes. L'aspect morphologique que prend la corrosion dépend de plusieurs facteurs entre autres de la composition du métal, des propriétés du film protecteur et des conditions hydrauliques du milieu.

Chaque forme de corrosion peut être identifiée par une simple observation visuelle.

Selon la nature de l'attaque, la corrosion peut présenter des aspects très divers regroupés en deux grandes familles :

- La corrosion uniforme ou généralisée
- La corrosion localisée. [18]

I-6.1. Corrosion uniforme (généralisée):

C'est la plus simple et la plus courante, elle se développe sur toute la surface du métal et à une vitesse presque identique en tous points. Elle se traduit par la dissolution uniforme due à une réaction électrochimique. L'attaque s'effectue sur des sites discrets de la surface du métal exposé à un environnement agressif, les zones anodiques et cathodiques se déplacent de telle sorte que la corrosion se propage plus au moins régulièrement sur toute la surface en contact avec l'agent agressif [19]. Cette forme de corrosion est la plus facile à prévoir, peut s'exprimer avec deux critères soit par une diminution d'épaisseur par unité de temps, ou par une perte en poids par unité de surface et par unité de temps. La littérature scientifique montre bien que la plupart des métaux sont susceptibles à divers degrés à la corrosion généralisée. Ainsi, pour mesurer la corrosion, de faire intervenir les modifications de l'état de surface.

Un matériau affichant une vitesse de corrosion inférieure à 0,1 mm par an sera jugé possédant une excellente résistance à cette forme de corrosion. [20]

Elle peut se produire sur une surface "nue" et l'on parle alors de surface active ou de métal actif. La dégradation peut alors être rapide.

Elle se produit souvent sur une surface protégée par une couche superficielle d'oxydes (film passif). La vitesse de dégradation du matériau est alors faible voire négligeable c'est à dire pratiquement pas attaqué. [21]

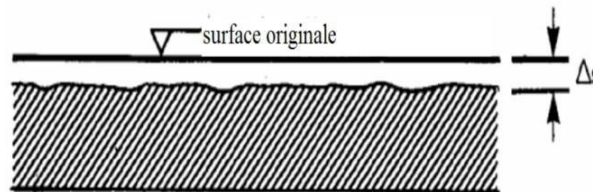


Figure I.4 : Corrosion uniforme (générale). [13]

I-6.2/Corrosion localisée :

Ce terme implique que les parties spécifiques d'une superficie exposée corrode dans un électrolyte approprié. Il est plus difficile de commander cette forme de corrosion que la corrosion générale.

D'une façon générale, on peut dire qu'une corrosion localisée intervient chaque fois qu'il existe, dans le système de corrosion considéré, une hétérogénéité soit du métal, soit du milieu, soit des conditions physico-chimiques existant à l'interface. La première approche de la corrosion étant généralement visuelle, on forme de l'attaque, on distingue traditionnellement les corrosions localisées, soit par la forme de l'attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques. [22]

Soit par la localisation (par exemple, corrosion intergranulaire)

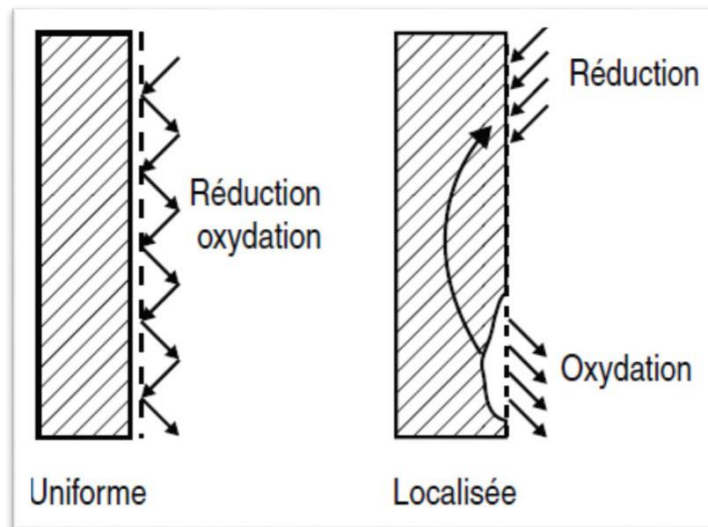


Figure I.5 : Corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal. [9]

Ainsi les chercheurs ont subdivisé ce type de corrosion en huit catégories les plus courants en pratique. [17]

I-6.2.1/La corrosion galvanique :

Elle est due à un contact entre deux métaux de nature différente exposés au même milieu, Cette situation est appelée couplage galvanique, la corrosion d'un matériau peut ainsi se trouver accélérée par le contact avec un autre matériau plus noble dont la corrosion se trouve au contraire ralentie, cette forme de corrosion est souvent liée à une mauvaise conception des installations. [23]

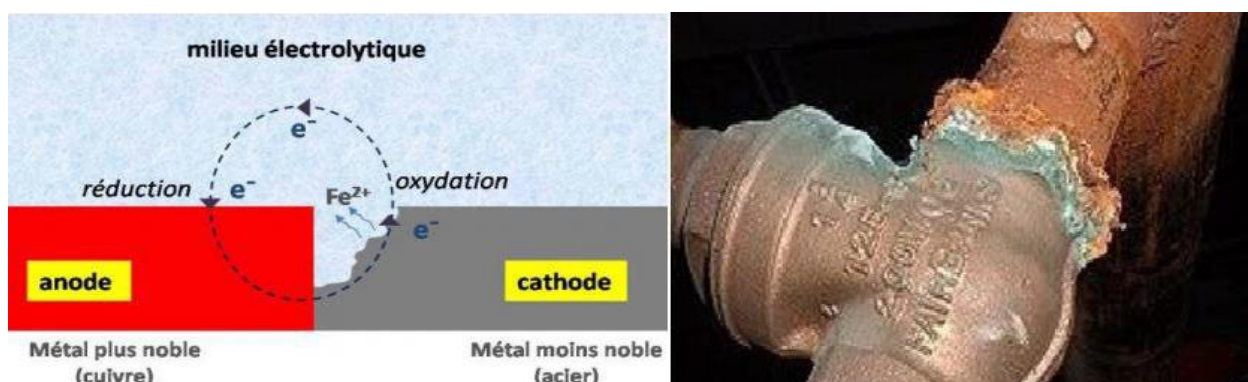


Figure I.6 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents: robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé. [13]

I-6.2.2/La corrosion par piqûres :

C'est une forme de corrosion qui se produit par certains anions, notamment les ions chlorures, sur les métaux dit « passivables » (aluminium, chrome, cobalt, titane, nickel, cuivre, acier inoxydable, acier dans le béton, etc.) qui sont protégés par un film d'oxyde passif qui est généralement associée à une rupture locale du film passif qui se produit souvent en présence de chlorures, ou à une passivation incomplète (quantité insuffisante d'inhibiteur de corrosion par exemple).

Tout défaut superficiel du métal peut constituer une parfaite amorce de piqûres; les impuretés, les limites des grains métalliques et les entailles constituent des exemples de différences métallurgiques ou mécaniques dans le métal lui-même. Les piqûres sont considérées comme un phénomène auto catalytique. Une fois qu'elles débutent ; elles pénètrent d'attaquer très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse. [13]

Les piqûres des aluminiums apparaissent dans des solutions basiques en présence de chlorures.

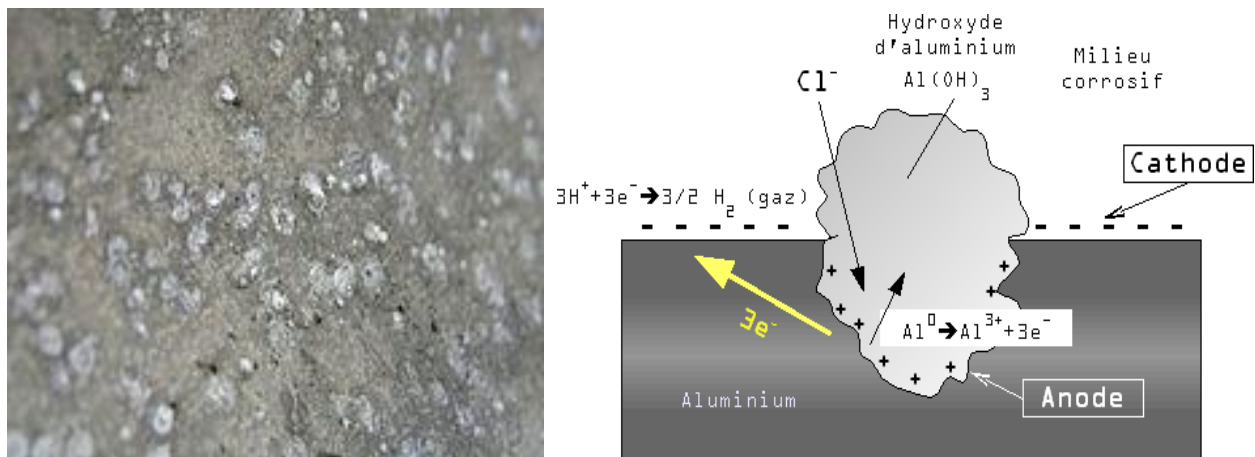


Figure I.7 : Corrosion par piqûre de l'aluminium. [13]

I-6.2.3/La corrosion sélective :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé, conduisant ainsi à la formation d'une structure métallique poreuse et très fragile.

Les exemples les plus connus sont l'attaque des laitons par dézincification (attaque sélective du zinc) qui se traduit par l'existence de 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.

Pour prévenir ce mode de corrosion, il faut choisir des matériaux plus résistants comme le

cupronickel riche en cuivre. [13]

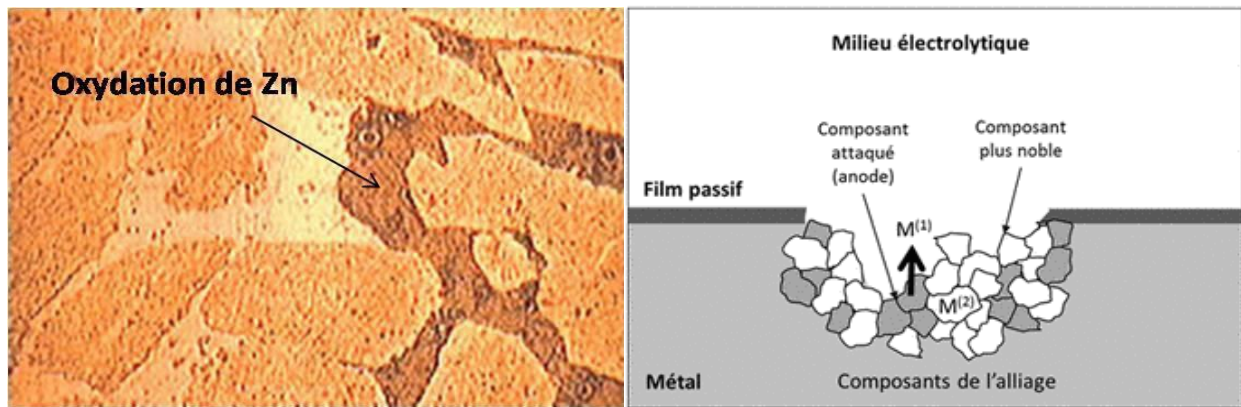


Figure I.8: Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc). [13]

I-6.2.4/La corrosion inter granulaire :

La corrosion inter granulaire est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion est due soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants ou bien à la précipitation des phases et combinaisons chimiques lors d'un traitement thermique (martensite, nitrures, carbures, etc.) [24]. L'hétérogénéité au niveau du joint de grain et l'existence d'un milieu corrosif jouant le rôle d'électrolyte représentent deux conditions pour développer cette forme de corrosion [25,26]. Cette forme d'attaque peut conduire à la ruine d'une installation avec une perte de métal relativement faible. De plus, sa mise en évidence par contrôle non destructif est parfois difficile.

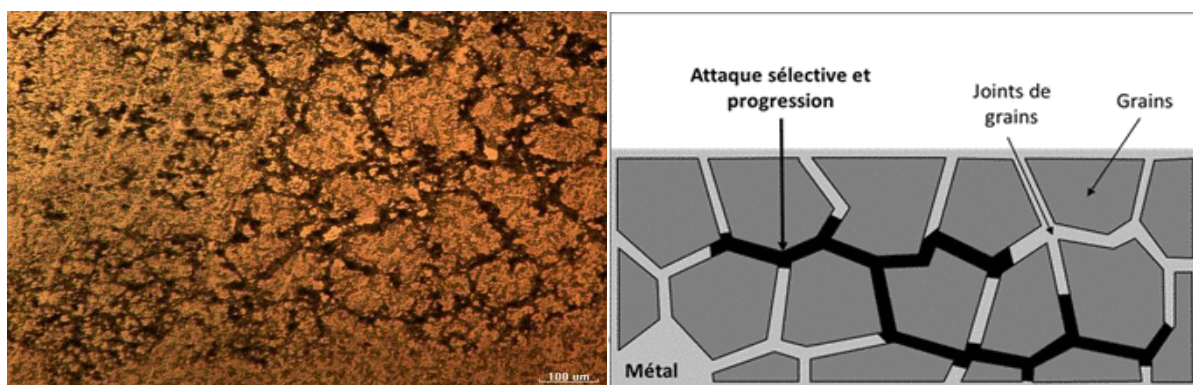


Figure I.9 : Représentation schématique et Métallographie de la Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique. [24]

I-6.2.5/La corrosion-érosion :

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement

mécanique de matière. Elle a lieu, souvent, sur des métaux exposés à un écoulement rapide d'un fluide (air, eau, ...etc.). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb, etc.) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables). [27]

Il est généralement admis que l'amorçage se produit au voisinage d'un défaut de surface (aspérité, rayure). La turbulence locale ainsi créée contribue à éroder le film protecteur.

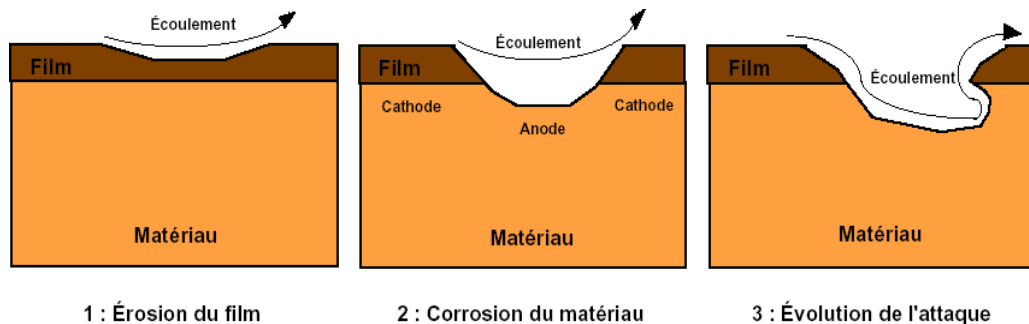


Figure I.10 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion. [25]

La cavitation est produite par l'impact d'un liquide sur un métal à la vitesse élevée. Elle est en particulier associée aux pièces rapidement en mouvement en métal dans l'eau, tels que des propulseurs et des roues à aubes de pompe. Le mouvement relatif induit un état hydrodynamique qui crée des jets des petites cavités dans le liquide qui s'effondrent, livrant les coups pointus multiples sur la surface en métal. La perturbation perturbe les films protecteurs, menant à une surface corrodée avec un aspect approximatif et piqué caractéristique.

Les propriétés matérielles qui militent contre la cavitation et également l'érosion- corrosion sont en bonne résistance à la corrosion générale, caractéristiques de passivation fortes et du métal.

I-6.2.6/La corrosion sous contrainte :

Ce type de corrosion correspond à une fissuration du métal qui résulte d'une action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. Elle se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif.

Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion, qui sont dangereuses. Les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice. [13]

Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter ou trans granulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte.

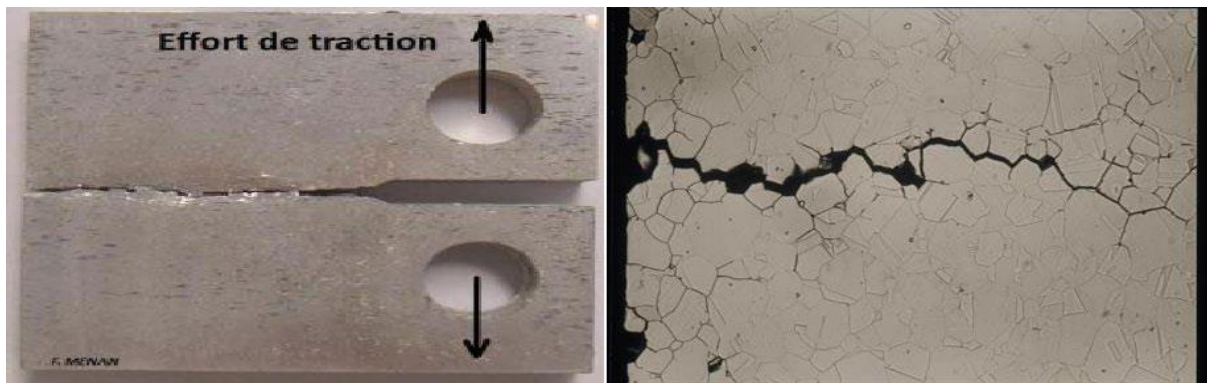


Figure I.11: la corrosion sous contrainte. [13]

I-6.2.7/La fatigue-corrosion :

Très comparable à la corrosion sous contrainte, ce phénomène apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique (efforts périodiques alternés). Elle se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau et par conséquent l'attaque est en général trans granulaire. [28]

Le plus souvent, et compte tenu des cinétiques de dissolution et de repassivation assez lentes comparées aux phénomènes mécaniques, ce type d'endommagement survient pour des pièces sollicitées à basse fréquence (fatigue cyclique), par exemple lors de cycles de chauffage refroidissement de structures. [29]



Figure I.12: Défaillance par la fatigue-corrosion d'un tube d'économiseur à basse pression. [29]

I.6.2.8/La corrosion caverneuse ou corrosion par crevasse :

Ce type de corrosion est dû à la présence d'une solution corrosive confinées dans le voisinage d'un trou, dans des interstices entre plaques sous des dépôts, ou n'importe quelle forme géométrique qui peut former une crevasse. Cela s'appelle également corrosion caverneuse ou la corrosion sous le dépôt. Il résulte d'une cellule de concentration formée entre l'électrolyte dans la crevasse, qui est généralement l'oxygène mort de faim, et l'électrolyte en dehors de la crevasse,

où l'oxygène est plus abondant. Le matériel dans la crevasse agit en tant qu'anode, et le matériel extérieur devient la cathode.

Le développement de la corrosion cavernueuse est généralement précédé d'une période d'incubation plus ou moins longue au cours de laquelle aucun symptôme ne permet de prévoir l'amorçage d'une corrosion rapide. [30]



Figure I.13: Mécanisme et Aspect d'attaque de la corrosion cavernueuse. [13]

I.1/Mécanisme de la corrosion des alliages Ni-p:

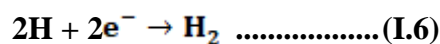
Le phénomène de corrosion débute avec la création d'une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de métal est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de métal peut être décrit de manière simplifiée par deux réactions électrochimiques élémentaires simultanées.

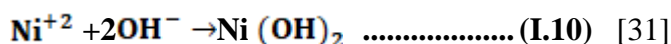
Dans la zone anodique, on a par exemple:



Les ions Ni⁺² passent dans la solution et peuvent s'oxyder ultérieurement en ions. Dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réduction de l'oxygène dissout dans l'eau (8) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (9):



Les ions hydroxyde OH^- formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions Ni^{2+} et précipiter en hydroxyde nickel à la surface de métal, lorsque les concentrations des ions et hydroxyde le permettent :



Ce composé peut ensuite s'oxyder pour former d'autres oxydes en recouvrant la surface métallique, d'une couche de passivation d'oxyde, n'est pas oxydable à froid dans l'oxygène. Il résiste bien à la corrosion par l'eau distillée.

Le nickelage au phosphore est le procédé de revêtement électrolytique le plus répandu tant par les quantités utilisées que par le grand nombre d'applications liées à sa relative facilité de dépôt à des épaisseurs très variables, à ses propriétés mécaniques satisfaisantes, et à la variété des substrats ainsi couverts.

L'application la plus fréquente du nickelage reste le revêtement mince pour sa résistance à la corrosion et son aspect décoratif. [32]

I-8/Réaction et facteurs de corrosion des revêtements Ni-P :

I-8.1/Réaction de corrosion :

On peut exprimer les réactions de corrosion de nickel comme suit :

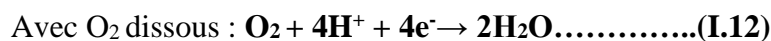
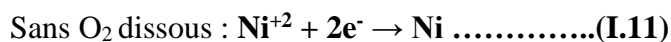
- La réaction d'oxydation : la perte des électrons par le nickel. [33]



- La réaction de réduction : le nickel gagne des électrons.

On peut marquer deux cas dépendent du milieu : [34]

- Milieu acide:



- Milieu neutre ou basique:



I-8.2/Facteurs de corrosion :

Le phénomène de corrosion dépend de plusieurs facteurs généralement en relation entre eux de manière complexe. Ces facteurs sont de deux modes : externe et interne et sont classés en quatre groupes principaux [35] :

I-8.2.1/Facteurs du milieu corrosif [36] :

- ❖ Concentration du réactif
- ❖ Teneur en oxygène
- ❖ PH du milieu
- ❖ Température
- ❖ Pression

I-8.2.2/Facteurs métallurgiques [37] :

- ❖ Composition d'alliage, hétérogénéités cristallines.
- ❖ Procédés d'élaboration.
- ❖ Impuretés dans l'alliage, inclusions.
- ❖ Traitements thermiques, mécaniques.
- ❖ Additions protectrices.

I-8.2.3/Facteurs définissant les conditions d'emploi [38] :

- ❖ Etat de surface, défaut de fabrication
- ❖ Forme de pièces
- ❖ Sollicitations mécaniques
- ❖ Emploi d'inhibiteurs
- ❖ Procédés d'assemblage (couple galvaniques, soudures, ...)
- ❖ Croûtes d'oxydes superficielles
- ❖ Force électromotrice extérieure(électrolyse)

I-8.2.4/Facteurs dépendant du temps [39] :

- ❖ Vieillessement.
- ❖ Tensions mécaniques.
- ❖ Modification des revêtements protecteurs.

I-9/Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion :

La vitesse de corrosion des métaux dépend de plusieurs caractéristiques de la température et le PH, ces deux paramètres ont un effet direct sur la vitesse de corrosion, et un effet indirect à travers la phase aqueuse. [40]

I-9.1/Effet de la température :

Ordinairement, l'augmentation de la température précipite les phénomènes de la corrosion, parce que elle abaissé les domaines de stabilité des métaux et précipite la cinétique de réaction et de transport de charge. Son effet varie selon le milieu corrosif où se trouve le matériau. [41]

I-9.2/Effet de l'acidité :

La capacité de corrosion du matériau dépend du PH de l'électrolyte. La croissance de l'acidité

et donc la quantité de protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui change les Equilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion diminue avec l'augmentation du pH du milieu. [42]

I-9.3/Régime hydrodynamique :

Le déplacement des produits de réaction vers l'électrolyte et des réactifs vers l'interface peut changer la cinétique des réactions électrochimiques en modifiant la concentration des espèces par conséquent le potentiel d'équilibre. Les vitesses de réactions sont fixées par les conditions hydrodynamiques en contrôlant le déplacement de matière par la création d'une couche limite de diffusion des espèces, nommée couche de Nernst, Cela explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte pendant les essais de corrosion en laboratoire. [43]

I-9.4/La salinité :

La présence des chlorures dans une solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'un côté, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre côté, la salinité a un effet sur la conductivité du milieu aqueux, puisqu'ils sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées. [44]

I-10/Aspect thermodynamique de corrosion :

I-10.1/ Potentiel normal d'électrode :

La réaction électrochimique est un échange d'électrons entre ions. La notion d'oxydation a été définie comme une perte d'électrons et la réduction, comme un gain d'électrons :



Où :

Ox et Red sont respectivement la forme oxydée et la forme réduite.

Alors, lorsqu'un métal (Ni) est mis en contact avec une solution liquide conductrice, il se trouve porté à un potentiel correspondant à l'équilibre de dissolution:



Ce potentiel dépend de :

- La nature du métal (son état métallurgique et de surface).
- La nature de la solution (la concentration du soluté).
- La température. [45]

Il est impossible de mesurer directement le potentiel normale d'électrode par ce que cette mesure implique l'utilisation d'une sonde métallique, c'est-à-dire un potentiel inconnu. Donc il est mesuré en valeur relative par rapport à une référence généralement constituée par une électrode au calomel saturé ECS ou Hydrogène EH. [46]

I-10.2/Potentiel d'équilibre (E) :

Le potentiel réversible ou potentiel d'équilibre d'électrode exprime la différence de potentiel entre le métal et la solution à l'équilibre. [47]

Les valeurs du Figure.I.1 sont valables pour une température de 25°C (298.15K) et une concentration normale. À partir de la Connaissance du potentiel normal E^0 , on peut calculer le potentiel d'équilibre pour une concentration et une température quelconques à l'aide de la formule de Nernst. [45]

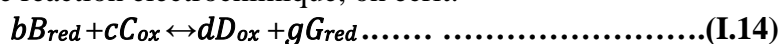
Oxydant	Réducteur	E^0 (V)
F ₂	F ⁻	2,87
S ₂ O ₈ ²⁻	SO ₄ ²⁻	2,01
H ₂ O ₂	H ₂ O	1,77
MnO ₄ ⁻	MnO ₂	1,69
MnO ₄ ⁻	Mn ²⁺	1,51
Au ³⁺	Au	1,50
PbO ₂	Pb ²⁺	1,45
Cl ₂ (g)	Cl ⁻	1,36
Cr ₂ O ₇ ²⁻	Cr ³⁺	1,33
MnO ₂	Mn ²⁺	1,23
O ₂ (g)	H ₂ O	1,23
Br ₂ (aq)	Br ⁻	1,08
NO ₃ ⁻	NO(g)	0,96
Hg ²⁺	Hg	0,85
NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	0,84
Ag ⁺	Ag	0,80
Fe ³⁺	Fe ²⁺	0,77
O ₂ (g)	H ₂ O ₂	0,68
I ₂ (aq)	I ⁻	0,62
Cu ²⁺	Cu	0,34
CH ₃ CHO	C ₂ H ₅ OH	0,19
SO ₄ ²⁻	SO ₂ (aq)	0,17
S ₄ O ₆ ²⁻	S ₂ O ₃ ²⁻	0,09
H ⁺	H ₂ (g)	0,00
CH ₃ COOH	CH ₃ CHO	-0,12
Pb ²⁺	Pb	-0,13
Sn ²⁺	Sn	-0,14
Ni ²⁺	Ni	-0,23
Co ²⁺	Co	-0,29
Cd ²⁺	Cd	-0,40
Fe ²⁺	Fe	-0,44
Zn ²⁺	Zn	-0,76
Al ³⁺	Al	-1,66
Mg ²⁺	Mg	-2,37
Na ⁺	Na	-2,71
K ⁺	K	-2,92

Figure I.14: les valeurs du potentiel normal d'électrode pour quelques métaux. [45]

I-10.3/Equation de Nernst :

L'équation de Nernst s'applique à une réaction d'électrode en équilibre. Elle sert à calculer son potentiel d'oxydoréduction en utilisant les activités chimiques des produits et de la température. [48]

➤ Pour une réaction électrochimique, on écrit:



$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \times \ln\{[D_{ox}]^d [G_{red}]^g / [B_{red}]^b [C_{ox}]^c\} \dots \dots \dots \text{(I.15)}$$

➤ Pour un seul couple redox, on écrit:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \times \ln\{[C_{ox}] / [C_{red}]\} \dots \dots \dots \text{(I.16)}$$

Avec :

E : potentiel d'équilibre au couple Ox/Red en (V).

E° : potentiel standard de l'électrode en (V).

R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹).

T : température absolue en (K).

F : nombre de Faraday (96500 C/mol).

n : le nombre d'électrons transférés dans la réaction (charge électrique de l'ion)

C_{ox} et C_{red} sont les concentrations d'oxydant et de réducteur en solution en mol.L⁻¹. [48]

❖ Pour des espèces ioniques, T = 298.15K, R = 8.314 J.mol⁻¹ K⁻¹ et ln = 2.3 log, généralement l'équation de Nernst est écrite sous sa forme numérique suivante [45] :

$$E = E^0 + \frac{0,0592}{n} \times \ln\{[C_{ox}] / [C_{red}]\} \dots \dots \dots \text{(I.17)}$$

I-10.4/ Diagrammes de Pourbaix :

On trace le diagramme de Pourbaix pour étudier les équilibres des réactions avec le métal. Ces diagrammes représentent, le potentiel réversible des réactions d'électrodes calculé par l'équation de Nernst, en fonction du pH. [49]

Les droites E=f (pH), définissent le domaine de stabilité des différentes espèces dans le solvant considéré. [50]

Dans tous les cas, on distingue trois principaux domaines [51]:

- ✓ Immunité du métal : le métal est stable et toute la possibilité de corrosion est écartée.
- ✓ Passivation du métal: la naissance d'un produit de corrosion stable joue un rôle protecteur. Quand cette protection est efficace, ce domaine sera considéré comme zone de passivité.
- ✓ Domaine de corrosion : acide ou basique les ions métalliques ou complexes sont stables.

La figure suivante montre un exemple de diagramme d'équilibre potentiel-pH du système

Nickel- eau, à 25°C.

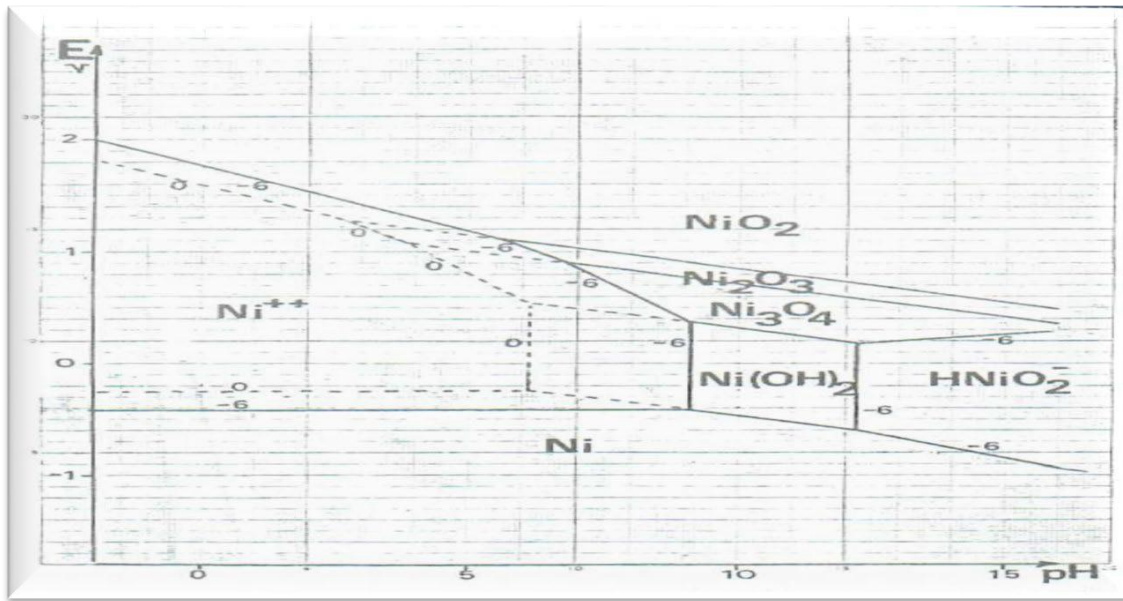


Figure I.15: Diagramme d'équilibre potentiel- pH du système Nickel- eau, à 25°C [51]

I-11/Aspect cinétique de la corrosion :

I-11.1/Equation de Butler-Volmer : loi fondamentale de la cinétique électrochimique

La vitesse de la réaction chimique est un nombre de moles d'atomes réagissant par unité de temps et de surface d'électrode. [52]

Alors que la vitesse d'une réaction électrochimique est reliée au courant i , qui met en jeu un transfert de charge, on peut l'exprimer en termes d'équivalent de courant:

$$I = zFV \dots \dots \dots (I.18)$$

Où :

I: la densité de courant de transfert de charges ($A.m^{-2}$).

z : la valence du métal.

F : la constante de Faraday ($96500 C.mol^{-1}$)

V : la vitesse de réaction ($mol.s^{-1}m^{-2}$).[53]

On peut évaluer la vitesse d'une réaction électrochimique à partir de la densité de courant et des cinétiques de chacune des réactions anodiques et cathodiques.

Soit la réaction traduisant la réaction d'oxydo-réduction représentative de la corrosion d'un métal :



Le courant électrique i s'exprime :

$$i = i_0 [\exp (anF\eta/RT) - \exp (-\beta nF\eta/RT)] \dots \dots (I.20)$$

Cette équation est nommée l'équation de Butler-Volmer simplifiée. Elle démontre la relation entre le courant de la cellule et le potentiel du système.

Avec :

i : Densité de courant global.

i_c : Densité de courant de corrosion.

α : Coefficient de transfert de charge anodique.

β : Coefficient de transfert de charge cathodique.

R : Constante des gaz, (8.314 J.K⁻¹.mol⁻¹).

T : Température (K).

n : Nombre d'électrons échangés.

F : Constante de Faraday (96500 C.mol⁻¹). [54]

I-11.2/Courbes de polarisation :

L'évolution de l'intensité de courant I de l'électrode de travail (WT) soumise à une différence de potentiel (E) est représentée par une courbe intensités-potential $I = f(E)$, qui représente la somme des courants des réactions électrochimiques se produisant sur la surface de l'électrode (Figure I.15). [55]

Par un potentiostat on impose, une différence de potentiel entre l'électrode de travail (WE) et l'électrode de référence (RE) et nous mesurons la densité de courant traversant la contre électrode (CE) et l'électrode de travail (WE). [56]

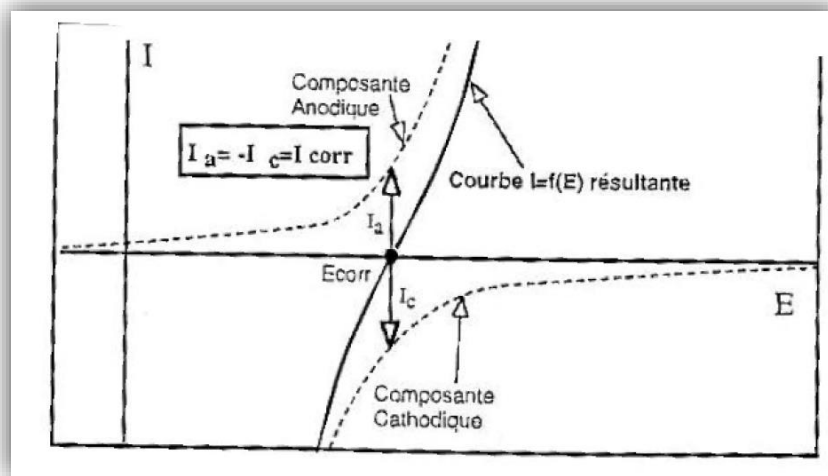


Figure I.16 : Courbe de polarisation $I=f(E)$. [56]

I-11.3/ Droites de Tafel : notion de cinétique électrochimique :

Pour une différence entre le potentiel E et E_0 nommée surtension (η) appliquée est suffisamment élevée, l'une ou l'autre des réactions anodiques et cathodiques de la relation de Butler-Volmer devient négligeable. Ceci est illustré à la figure I.4 qui représente l'évolution des densités de courant I , I_a et I_c en fonction du potentiel E . [57]

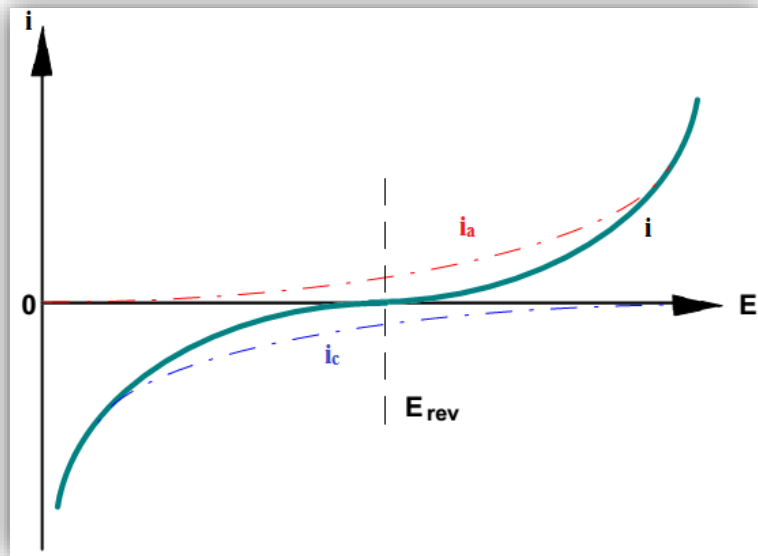


Figure I.17: Evolution de densité de courant en fonction du potentiel [57]

Dans le cas d'une surtension anodique η_a , on a :

$$i = i_a = i_0 \exp(\alpha nF \eta_a/RT) \dots\dots (I.21)$$

Et pour une surtension η_c cathodique, nous avons :

$$i = i_c = i_0 \exp(-(1-\alpha) nF \eta_c/RT) \dots\dots (I.22)$$

Dans ces relations, on peut définir les coefficients de Tafel anodique et cathodique respectivement par :

$$\beta_a = RT/\alpha nF \dots\dots (I.23)$$

Et :

$$\beta_c = RT/(1-\alpha)nF \dots\dots (I.24)$$

Dans ce cas on a :

$$\eta_a = \beta_a \text{Ln} (i_a/i_0) \dots\dots(I.25)$$

Et :

$$\eta_c = - \beta_c \text{Ln} (i_c/i_0) \dots\dots(I.26)$$

Donc, le traitement de l'équation de Butler-Volmer aux surtensions élevées nous donne :

Pour la branche anodique :

$$\text{Log}_{10} (i_a) = \eta_a / (2,3 \beta_a) + \text{Log}_{10} (i_0) \dots\dots (I.27)$$

Et pour la branche cathodique :

$$\text{Log}_{10} (i_c) = - \eta_c / (2,3 \beta_c) + \text{Log}_{10} (i_0) \dots\dots (I.28)$$

Ces relations sont les droites de Tafel anodique et cathodiques respectivement qui décrivent les limites anodiques et cathodiques de l'équation générale de Butler-Volmer. La représentation

de $\text{Log}_{10}(i)$ en fonction de E est utilisée pour la détermination des paramètres cinétiques i_0 , β_a, β_c .

L'équation de Butler-Volmer de la densité de courant globale peut s'écrire sous la forme suivante :

$$i = i_a + i_c = i_0 \exp(\eta_a/\beta_a) - i_0 \exp(\eta_c/\beta_c) \dots\dots (I.29)$$

L'intersection des droites anodique et cathodique qui correspond à $|i_a| = |i_c| = |i_0|$ et à des surtension η_a et η_c nulles donne une représentation du type de celle de la figure I.5, une détermination graphique de la valeur de la densité de courant d'échange ou courant de corrosion i_{corr} (A.cm^{-2}) à l'équilibre. [58]

Les domaines de potentiels pour lesquels la courbe rejoint les droites de Tafel sont les domaines de Tafel anodique et cathodique respectivement (figure I.5). L'inverse de la pente de ces droites donne les coefficients de Tafel β_a et β_c . [57]

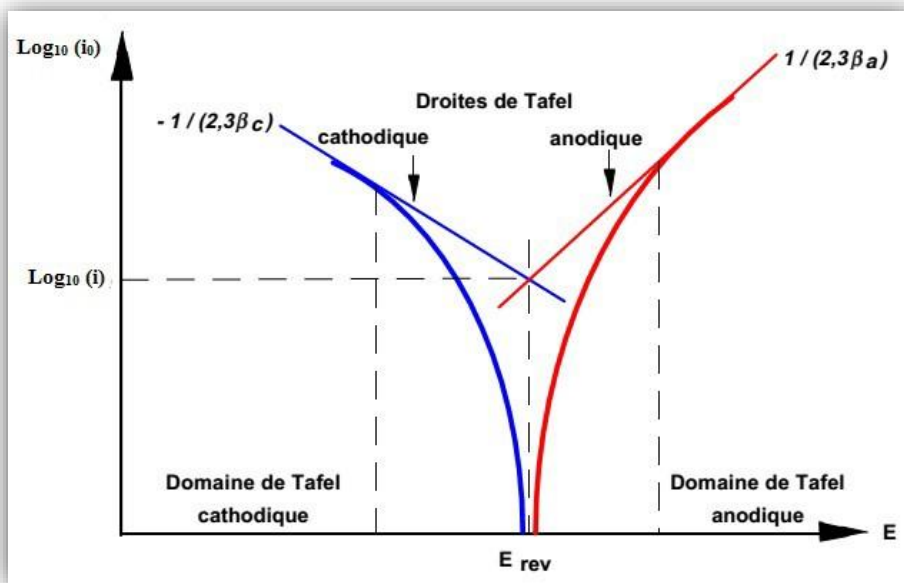


Figure I.18: Densité de courants anodiques et cathodiques d'une réaction d'électrode [59]

I-11.4/ Loi de Faraday : étude quantitative (cinétique de corrosion) :

La corrosion de métal se traduit par la perte de masse. Pour la détermination de la durée de vie d'un métal soumis à une attaque électrochimique, il faut évaluer la quantité de métal passé en solution en fonction du temps.

Cette perte de masse m (g) est donnée par la loi de Faraday [60]:

$$m = \frac{A i_{\text{corr}} t}{n F} \dots\dots\dots (I.30)$$

Où :

A : masse atomique du métal en (g)

i_{corr} : intensité du courant de corrosion en (Ampère),

t : Temps d'électrolyse en (s).

n : Valence du métal.

F : la constante de Faraday égale à 96500C/mole

Nous concluons d'après cette relation que pour un métal donné, la perte de masse est proportionnelle au courant de corrosion.

I-12/ Les essais de corrosion :

I-12.1/ Essais Electrochimiques :

I-12.1.1/ Principe Des Mesures Electrochimiques :

Les études des phénomènes électrochimiques de la corrosion ont été faites grâce à un appareillage capable de contrôler et mesurer les potentiels et les courants électriques au-dessus d'une interface électrochimique. En utilisant une cellule électrochimique à trois électrodes: électrode de travail, électrode de référence et contre électrode dans les conditions standards de pression et température. [61]

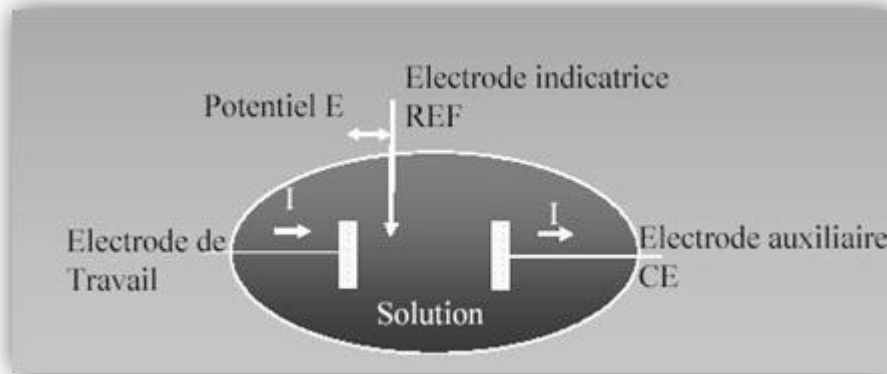


Figure I.19 : Représentation schématique d'une cellule à trois électrodes. [62]

A. Electrode de travail: (l'échantillon)

Sur laquelle se déroule la transformation électrochimique étudiée et constitue donc le cœur de tous les systèmes électrochimiques. [61]



Figure I.20 : Electrode de travail (échantillon). [61]

B. Electrode de référence:

Une électrode au calomel saturé (ECS), et le deuxième composant-clé de la cellule électrochimique, permet la mesure de potentiel de l'électrode de travail. [61]



Figure I.21: Electrode de référence. [61]

C. Electrode auxiliaire (ou contre électrode):

Une électrode en platine ou en carbone assure le passage du courant dans la cellule électrochimique. Elle est l'instrument qui pilote la cellule électrochimique est le potentiostat. [62]



Figure I.22: Le contre électrode. [62]

D. Potentiostat:

Est un appareil utilisé pour imposer une différence de potentiel constante entre l'électrode de Travail (WE) et l'électrode de référence (RE) et pour fournir la puissance nécessaire à la cellule et mesurer le courant traversant CE et WE. [62]

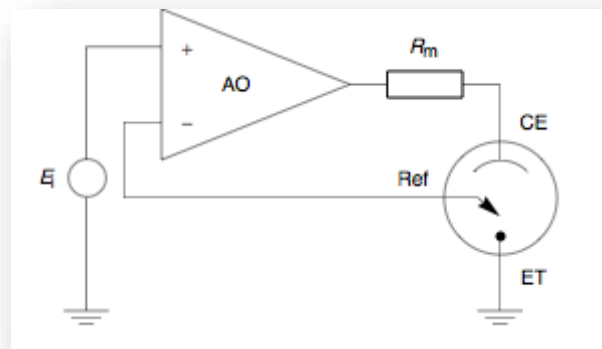


Figure I.23: Représentation schématique d'un potentiostat [62].

Généralement, le potentiostat peut aussi fonctionner en galvanostat, au lieu d'imposer un potentiel, il impose un courant I entre le contre électrode (CE) et l'électrode de travail (WE) et mesure le potentiel E entre (RE) et (WE).

E. potentiostat-galvanostat:

L'étude électrochimique a été réalisée à l'aide d'un potentiostat-galvanostat piloté par un micro-ordinateur, connecté à une cellule à trois électrodes sont immergées dans une solution électrolytique. [63]

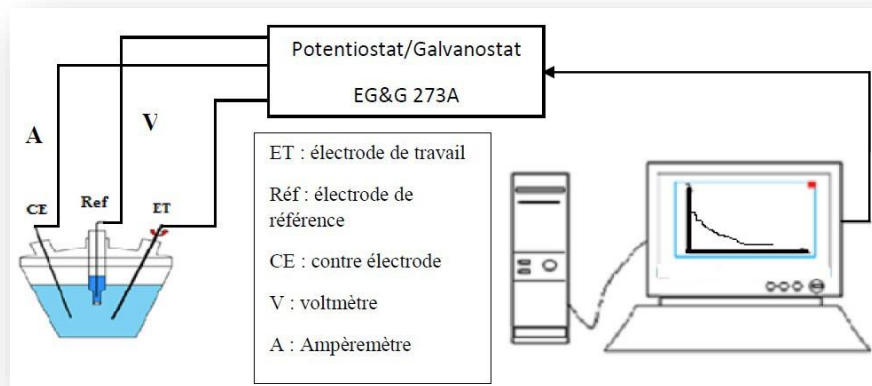


Figure I.24: représentation schématique d'essais électrochimique. [63]

I-12.2/Essai De La Masse Perdue :

La perte de masse est la plus ancienne technique quantitative de mesure de la corrosion, qui est basé sur la construction réelle du système. C'est une technique simple donne des informations très utiles à des prix bas et sans perturbation des systèmes. Son principe est l'immersion de l'échantillon à étudier à l'intérieur du milieu corrosif considéré (après sa pesé) pendant une durée bien définie.

Le but de cette technique est l'évaluation du taux de corrosion qui est défini comme une perte de poids par unité de surface et de temps et qui s'exprime en (g/cm /an).

Le taux de corrosion est exprimé par la formule suivante:

$$T = 365 \times \Delta m / (S \times t) \dots\dots (I.31)$$

Avec :

$$\Delta m = m_1 - m_2 \dots\dots (I.32)$$

Où :

m_1 : masse de l'échantillon avant test en (g)

m_2 : masse de l'échantillon après test en (g)

S : surface de l'échantillon exposé au milieu corrosif en (cm²)

t : temps d'immersion en (jour).[64]

I-12.3/Impédances électrochimiques :

La spectroscopie d'impédance électrochimique nous permet d'analyser les résultats d'impédance du courant alternatif, ce qui se base sur la modélisation de la corrosion par un circuit électrique. Ainsi, les propriétés électrochimiques de la cellule peuvent être assimilées à un composant électrique. Cette méthode est très utile pour la caractérisation du comportement d'une électrode face à la corrosion. Cette caractérisation détermine la résistance de polarisation, qui nommée résistance au transfert de charge R_{tc} , le taux de corrosion CR et les mécanismes électrochimiques. A partir des mesures de la résistance électrochimique pour un métal dans une solution inhibitrice, et une comparaison avec la résistance relative à la solution sans inhibiteur. [65]

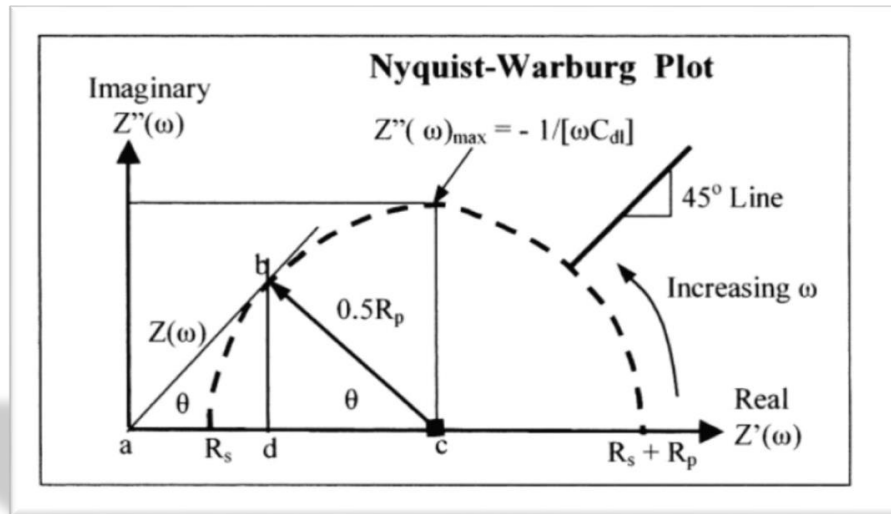


Figure I.25: Diagramme de Nyquist-Warburg pour l'impédance du circuit équivalent (b) – contrôlé par la diffusion des espèces réductibles. [65]

I-13/Méthode de protection contre la corrosion :

I-13.1/Les revêtements métalliques :

Ils sont utilisés pour protéger les substrats métalliques contre la corrosion comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets, on distingue deux types de revêtements métalliques: [66]

I-13.1.1/Les revêtements anodiques : (les sacrificielles)

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. Tel que le revêtement d'acier par le zinc (la galvanisation). 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. Donc la protection reste assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Dans ce type de revêtement l'épaisseur est un élément important généralement, elle est comprise entre 100 et 200 μm . [67]

I-13.1.2. Les revêtements cathodiques (ou les nobles) :

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas le revêtement possède des défauts structurels, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base. Dans ce cas, la continuité du revêtement doit être parfaite sans défaut. [67]

I-13.2. Les revêtements non métalliques :

Principalement, Il s'agit des peintures et matières plastiques. Elles doivent posséder un nombre

de qualités comme l'imperméabilité à l'eau et aux gaz, la grande adhérence, la stabilité chimique, l'élasticité élevées et la bonne résistance à l'usure. [68]

I-13.2.1/Peintures :

Une méthode de protection très ancienne, elle est semblable au revêtement métallique. Elle compose à un matériau liquide (liant, solvant, pigments, charges minérales) qu'on l'appose sur une surface métallique donnant à cette dernière une durabilité et des propriétés isolantes. [69]

I-13.2.2/Matières plastiques :

Ils ont beaucoup d'avantages par rapport aux peintures. Le revêtement plastique s'adapte bien à la protection contre corrosion (l'épaisseur 100-500 μm , isolateur). L'opération compose à un préchauffage du matériau à revêtir après une pulvérisation par les grains de matière plastiques ou immersion dans le lit fluidisé de la poudre. [68]

I-13.3/Protection électrochimique

Pour l'élimination du phénomène de la corrosion électrochimique, à cause des courants anodiques dans les piles locales, il est essentiel d'apposer au métal un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction anodique est nulle ou très faible. [68]

On à la protection cathodique et la protection anodique.

I-13.3.1/Protection cathodique :

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel bas, suffisamment pour que la vitesse de corrosion devienne négligée. Elle est utilisée pour protéger les structures lourdes en acier, il y a deux méthodes dans cette protection

A. Par anodes sacrificielle:

Formation d'une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. Donc l'anode sacrificielle doit avoir un potentiel réversible inférieur à celui du métal que l'on veut protéger. [70]

B. Par courant imposé:

Elle implique l'utilisation d'un redresseur qui offre la possibilité de pouvoir régler la tension ou le courant selon le besoin, pour contrôler et protéger des grandes surfaces. [70]

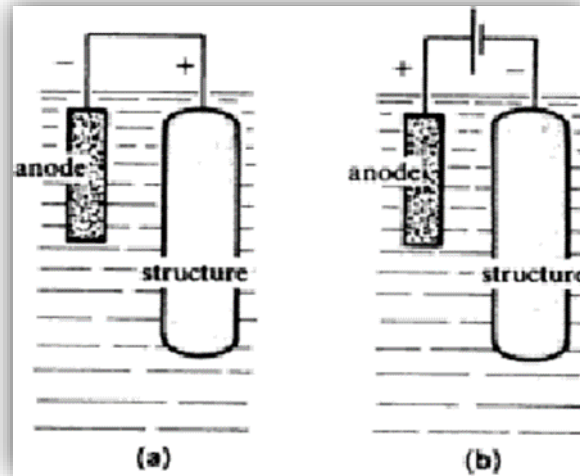


Figure I.26: Protection cathodique : a : anode sacrificielle ; b : en utilisant le redresseur (courant imposé) [70]

I-13.3.2/Protection anodique :

On applique la protection anodique aux métaux passivables, dont leur potentiel de corrosion est situé dans le domaine actif $E_{\text{corr}} < E_p$. Ce type de protection consiste à réduire la vitesse de dissolution du métal par la diminution de la valeur du potentiel de corrosion mixte du spécimen jusqu'à ce qu'il atteigne le potentiel réversible de la réaction anodique. Même dans ce cas, il y aura corrosion mais à faible vitesse, c'est acceptable par ce qu'il s'agit d'une corrosion uniforme. Le déplacement de l'état passif à l'état actif implique la baisse de la densité de courant jusqu'à une très petite valeur. [71-72]

I-13.4/Protection par inhibiteurs

L'inhibiteur est une substance utilisée pour ralentir ou stopper le contact métal/électrolyte (la cause de corrosion) sans changer le milieu. Donc ces inhibiteurs vont protéger le métal soit par la création d'un film autour de ce dernier soit par l'adsorption sur sa surface [73]. Leur utilisation est possible dans tous les cas de corrosion sauf les grands circuits et les volumes trop importants du milieu corrosif. [74]

II/Aperçu sur les inhibiteurs de corrosion:

II-1/Historique :

Il n'est pas facile de déterminer l'origine exacte de l'inhibition de la corrosion qui est considérée comme une technologie à part. Cependant, Depuis quelques décennies, il a été observé que le dépôt calcaire formé à l'intérieur des conduites transportant l'eau naturelle protégeait cette conduite.

Plutôt que d'améliorer sans cesse la résistance à la corrosion des conduites en agissant directement sur ces dernières, il est plus pratique d'ajuster les concentrations minérales des solutions transportées, qui sont à l'origine des dépôts calcaires « protecteurs ». En 1945, on comptait moins de 30 références traitant de l'inhibition de la corrosion. Dans un article en 1948, Waldrip se référait à un rapport datant de 1943, portant sur la protection contre la corrosion des puits de pétrole. [75]

De nombreux articles sur l'inhibition de la corrosion ont été rédigés pendant la période couvrant 1945 à 1954 : ceux-ci couvrent cela entre autres l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers...etc.

Les articles publiés pendant cette période manifestent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition. En 1970, 647 articles traitant de l'inhibition de la corrosion sont dénombrés. [76]

II-2/Définition :

Généralement, l'inhibiteur de corrosion est une espèce chimique ajoutée au milieu agressif pour baisser la vitesse de corrosion des métaux qui s'y trouvent. La définition retenue par la National Association of Corrosion Engineers (NACE) est la suivante : un inhibiteur est une substance chimique qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration. [77]

II-3/Propriétés de l'inhibition :

Généralement, un inhibiteur doit vérifier un certain nombre de propriétés :

- ❖ Doit abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier, en particulier la résistance mécanique.
- ❖ Doit être stable en présence d'autres constituants, en particulier vis-à-vis des Oxydants.
- ❖ Doit être stable dans le domaine de différentes températures utilisé.
- ❖ Doit être efficace à faible concentration.
- ❖ Doit être compatible avec les normes de non-toxicité, et de protection de l'environnement.
- ❖ Doit être peu onéreux par rapport aux économies qu'il permet de réaliser. [78]

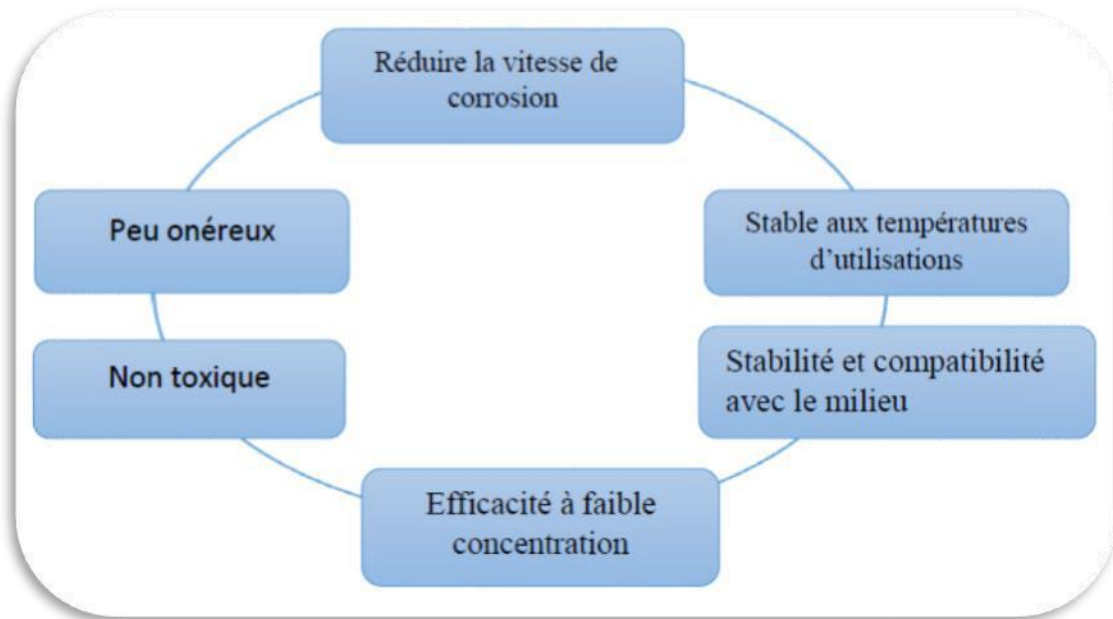


Figure I.27: Propriétés des inhibiteurs. [79]

II-4/Conditions et domaine d'utilisation :

Les inhibiteurs peuvent être utilisés comme unique outil de protection :

- Soit comme protection permanente : l'inhibiteur de corrosion permet l'utilisation de matériau métallique dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion. [80]
- Soit comme protection temporaire durant une période où la pièce est sensible à la corrosion. Dans ce cas, le contrôle du système est plus simple, la prévision du comportement de l'inhibiteur de corrosion dans le temps étant plus facile à réaliser.
- Les inhibiteurs peuvent être combinés à un autre moyen de protection comme : la protection supplémentaire d'un alliage à haute résistance à la corrosion, En plus d'un revêtement de surface tel que peinture, graisse, huile, ...etc.

L'inhibiteur de corrosion a beaucoup domaines traditionnels d'application :

- ✓ Le traitement des eaux.
- ✓ L'industrie du pétrole et de gaz : A tous les étapes de cette industrie, l'utilisation d'inhibiteurs est essentiel pour la sauvegarde des installations.
- ✓ Les peintures: les inhibiteurs sont des additifs Assurant la protection anti corrosion des métaux.
- ✓ La protection temporaire des métaux : soit durant le décapage acide, le nettoyage des installations, les tockage à l'atmosphère ou pour le traitement des huiles de coupe.

[81]

II-5/Les classes d'inhibiteurs :

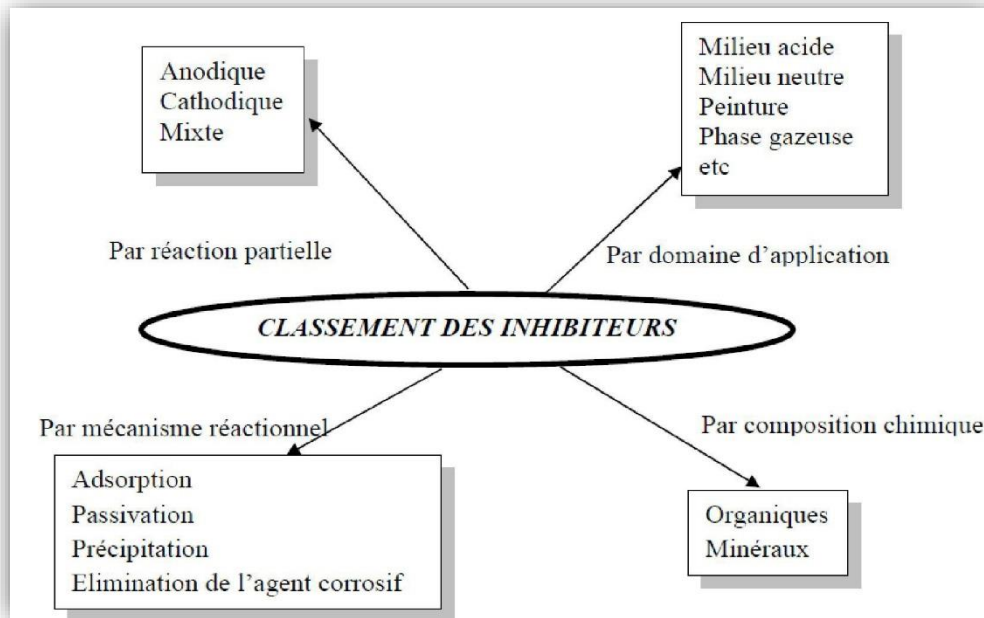


Figure I.28: Classement des inhibiteurs de corrosion. [82]

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés de plusieurs façons :

II-5.1/Classification par domaine d'application :

II-5.1.1/Inhibition en milieu acide :

Les inhibiteurs dans ce type de milieu sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage acide. Dans l'industrie pétrolière, on les ajoute aux fluides de forage. Les inhibiteurs les plus souvent utilisés sont des molécules de type organique. Ces molécules agissent d'abord par adsorption à la surface des métaux et ralentissent ainsi la corrosion. Elles comprennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, assemblée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire hydrophile, assemblée d'un ou beaucoup groupes fonctionnels, tels $-NH_2$ (amine), $-SH$ (mercapto), $-OH$ (hydroxyle), $-COOH$ (carboxyle), $-PO_3$ (phosphate), et leurs dérivés. La molécule se lie (par adsorption) à la surface du métal avec son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire bloque partiellement la surface active. [83]

Autres inhibiteurs créent des complexes peu solubles avec les ions métalliques précipitent à la surface et forment des couches superficielles ralentissant la dissolution du métal.

II-5.1.2/Inhibition en milieu neutre :

La corrosion en milieu neutre provient essentiellement d'une attaque par l'oxygène dissous. Les risques d'une attaque abaissent si l'on empêche l'oxygène d'accéder à la surface. Comme alternatif, on peut abaisser la vitesse de la réaction partielle anodique en rendant le métal passif. On peut aussi inhiber la corrosion par des substances, comme les benzoates, les tartrates ou les salicylates etc. qui s'adsorbent sur la surface et bloquent les sites de réaction.

II-5.1.2.1/Inhibition par passivation :

Elle sert spécialement pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. On peut obtenir ce type d'inhibition par les inhibiteurs oxydants et les agents tampons qui conservent le pH élevé proche de la surface du métal. [84]

II-5.1.2.2/Inhibition par précipitation :

Beaucoup d'inhibiteurs forment des couches superficielles par précipitation dans les milieux neutres, comme les polyphosphates (NaPO_3) et les organophosphates. Agissant principalement sur la réaction cathodique, ils diminuent la vitesse de corrosion en présence d'oxygène. [85]

II-5.1.3/Inhibition en phase gazeuse :

En générale, ce type d'inhibiteurs est employé pour la protection temporaire de différents objets emballés durant le transport et le stockage comme les instruments de précision, les composants électroniques, les machines, etc. Il s'agit le plus souvent de composés organiques ayant une pression de vapeur élevée, Surtout certaines amines. Ces composés s'adsorbent à la surface métallique et la protègent contre la corrosion atmosphérique. [86]

II-5.1.4/Inhibiteurs pour peintures :

On utilise ce type d'inhibiteurs pour la provision d'une barrière physique entre le métal à protéger et le milieu corrosif. Les peintures contiennent des composants organiques qui travaillent comme des inhibiteurs de corrosion, comme le tannin.

Par exemple pour les inhibiteurs en milieu organique, on peut citer :

- L'oxyde de plomb Pb_3O_4 .
- Le chromate de zinc ZnCrO_4 . [87]

II.5.2 /Classement selon la nature de la molécule inhibitrice:

II.5.2.1 /Les inhibiteurs organiques:

Les molécules organiques sont destinées à un développement plus que certain en tant qu'inhibiteurs de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée à celle des inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement.

Dans les milieux acides les composés organiques utilisés comme inhibiteurs doivent posséder au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont:

- Le radical amine (-NH₂),
- Le radical mercapto (-SH),
- Le radical hydroxyle (-OH),
- Le radical carboxyle (-COOH).

Ces inhibiteurs agissent d'abord par adsorption du composé à la surface des métaux, avant même d'intervenir dans les processus réactionnels de corrosion pour en diminuer la vitesse. L'action inhibitrice de ces composés organiques, qui est généralement indépendante des processus anodiques et cathodiques de corrosion, est liée à la formation (par adsorption) d'une barrière plus ou moins continue, mais d'épaisseur finie, qui empêche l'accès de la solution au métal. Ce mécanisme d'action sera développé plus en détail par la suite. L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à haute température. [88]

II.5.2.2 /Les inhibiteurs minéraux:

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu neutre/alcalin et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation (anions et cations) qui sont efficaces en tant qu'inhibiteurs de corrosion. Parmi les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO₄^{m-}—tels que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates, les nitrites et parmi les cations inhibiteurs on trouve essentiellement les ions Ca^{+2} et Zn^{+2} . [89]

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté nocif pour l'environnement. Cependant, de nouveaux complexes organiques de chrome III et d'autres cations (Zn^{+2} , Ca^{+2} , Mn^{+2} , Sr^{+2} , Al^{+2} , Zr^{+2} , Fe^{+2}) efficaces contre la corrosion et non toxiques ont été développés. [90]

II.5.3 /Classement selon le mode d'action:

Il n'existe pas un mode d'action unique pour les inhibiteurs de corrosion. Un même composé, peut avoir différents mécanismes d'action. Ces derniers sont imposés par le milieu corrosif et la nature du métal à protéger.

Quel que soit le mécanisme exact par lequel chaque inhibiteur agit dans les conditions dans lesquelles il est placé, il existe un certain nombre de considérations de base valables pour tous les inhibiteurs :

- La corrosion étant un processus essentiellement électrochimique, l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'au niveau d'une des étapes des réactions élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, adsorption des espèces à la surface des phases solides, transfert de charge électronique).
- L'intervention de l'inhibiteur dans le processus de transport des espèces électro actives (oxygène, protons, produits de réaction) au sein de la solution étant peu probable, le mécanisme d'action d'un inhibiteur est le plus souvent à rechercher au voisinage immédiat de la surface (au contact du métal ou dans la zone contiguë à celle-ci).

On peut concevoir l'action de l'inhibiteur comme :

- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif. Dans le cas, des milieux acides, le rôle de l'adsorption du composé à la surface sera primordial;
- Le renforcement d'une barrière préexistante : en général la couche d'oxyde ou d'hydroxyde formée naturellement en milieu neutre ou alcalin. Ce renforcement pourra consister en une extension de l'oxyde à la surface, ou en la précipitation de sels aux endroits faibles de l'oxyde : ces sels étant des produits de corrosion;
- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur et une ou plusieurs espèces du milieu corrosif : ce type de mécanisme étant également spécifique des milieux neutres ou alcalins. [91]

II.5.3.1 Mécanisme d'action électrochimique (réaction partielle):

Ce classement des inhibiteurs tient compte de la nature électrochimique de la corrosion en phase liquide, qui met en jeu au moins deux réactions :

- ✓ Une réaction anodique de dissolution du métal (réaction d'oxydation)
- ✓ Une réaction cathodique de réduction d'un oxydant de la solution

Le rôle de l'inhibiteur est diminuer la vitesse de l'une des deux réactions et dans certains cas les deux à la fois aussi forment une couche barrière sur la surface métallique (Fig.II.2), qui modifie les réactions électrochimiques soit ralentit la réaction d'oxydation en bloquant les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit ralentit la réaction de réduction en bloquant les sites cathodiques (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide). [92]

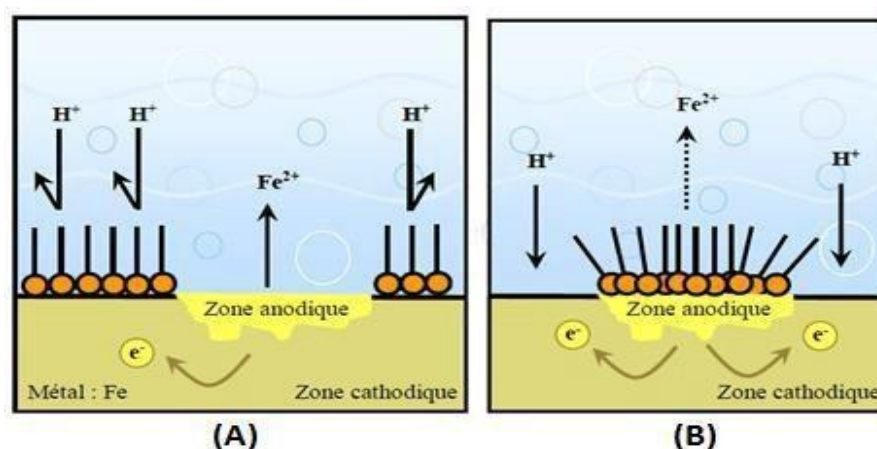


Figure I.29: Formation des couches barrières en milieu acide (A) blocage des sites cathodiques et (B) blocage des sites anodiques. [93]

II.5.3.1.1 /Les inhibiteurs anodiques:

Ils agissent au niveau des sites anodiques microscopiques en diminuant la densité du courant partiel anodique et lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Ils doivent être utilisés avec précaution. En effet, La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la surface du métal, si le film protecteur est altéré par une rayure ou par une dissolution, ou si la quantité d'inhibiteur est insuffisante pour restaurer le film, la partie exposée se corrodé en piqûres profondes. Ainsi, ils sont classés parmi les inhibiteurs dangereux tels que: l'ortho phosphate, les nitrites et les silicates.

II.5.3.1.2 /Les inhibiteurs cathodiques:

Ils agissent au niveau des sites cathodiques microscopiques en diminuant la densité du courant partiel cathodique et lorsque le film est déposé à la surface, le potentiel de corrosion balance vers des valeurs négatives. Ceci se produit par la précipitation des espèces insolubles sur les sites cathodiques. Des ions du cuivre sont utilisés en tant qu'inhibiteurs cathodiques en raison de la précipitation de $Cu(OH)_2$ aux sites cathodiques. [93]

II.5.3.1.3 /Les inhibiteurs mixtes:

Ils agissent à la fois sur l'anode et la cathode, par la combinaison d'agent oxydant (les nitrates ou les chromates) et non oxydant qui précipitent tels que les ortho-phosphates ou les silicates. Quelle que soit la réaction électrochimique contrôlant la corrosion, un inhibiteur cathodique n'est

Jamais dangereux, même en grande quantité. En revanche, dans le cas de contrôle de corrosion par la réaction anodique (cas le plus général), une quantité très faible d'inhibiteurs anodiques favorise la corrosion par piqûres [94,95].

Les trois types d'inhibiteurs (cathodique, anodique, mixte) selon le déplacement de potentiel sont montré dans la Figure I.17.

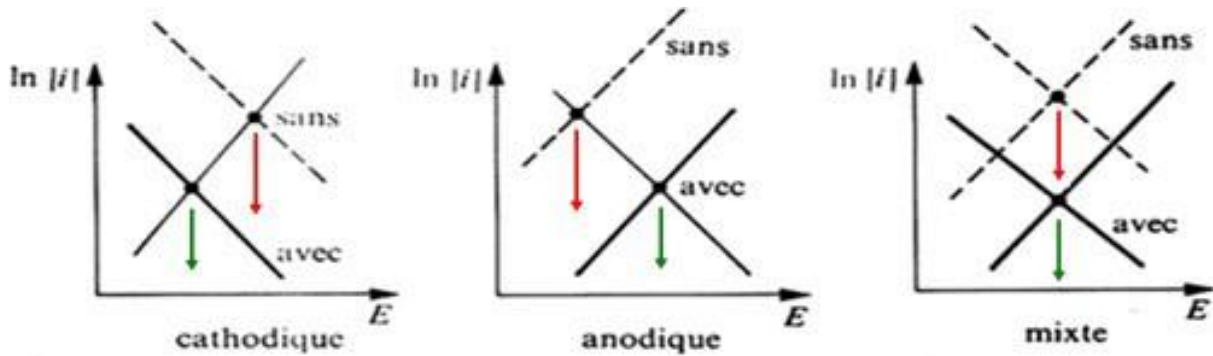


Figure I.30: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur cathodique, anodique ou mixte. [96]

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être considéré sous deux aspects :

- Un aspect mécanistique (intervention dans les processus fondamentaux de la corrosion).
- Un aspect morphologique (intervention de la molécule de l'inhibiteur de corrosion dans la structure inter faciale). Il est clair que le mécanisme d'action va se différencier fortement en fonction du pH des milieux. [97]

II.5.3.2 /Classification par mécanisme réactionnel:

II.5.3.2.1 /Inhibition par passivation:

Les inhibiteurs agissant par passivation sont en général les inhibiteurs minéraux. Certains inhibiteurs oxydants provoquent une passivation spontanée du métal en renforçant la couche d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal ce qui fait diminuer la vitesse de corrosion. [98]

II.5.3.2.2 /Inhibition 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. [99]

II.5.3.2.3 /Inhibition 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 d'ionisée, supprime-les

dernières traces d'oxygène et élimine ainsi la corrosion. [99]

II.5.3.2.4 /Inhibition par adsorption:

Selon le mode de fixation sur la surface métallique, on distingue les inhibiteurs d'adsorption ou "d'interface" sont plutôt observés en milieu acide et agissent en formant des films mono ou bidimensionnels des molécules par adsorption à la surface du métal

L'adsorption est un phénomène de surface universel car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant atomes et molécules se trouvant à proximité. L'adsorption des composés organiques peut être décrite par deux principaux types d'interaction à savoir :

- ✓ L'adsorption physique.
- ✓ La chemisorption.

Ces deux types d'adsorption sont influencés par la nature et la charge du métal, la structure chimique du produit organique et le type d'électrolyte. [100]

II.5.3.2.4.1 /Adsorption physique:

L'adsorption physique est due aux forces de Van Der Waals qui se caractérisent par des énergies de liaisons faibles, inférieures à -20 kJ.mol^{-1} ou aux forces électrostatiques existant entre la charge ionique ou les dipôles de l'espèce inhibitrice et la surface du métal électriquement chargée. [101]

La force de l'adsorption électrostatique sera fonction de la différence entre les charges portées par l'inhibiteur d'une part et par la surface métallique d'autre part (q_{Me}). Cette dernière est elle-même fonction de la différence entre le potentiel de corrosion du métal (E_{corr}) et son potentiel de charge nulle dans le milieu corrosif considéré (E_{zc}). La charge du métal est définie par la position du potentiel de corrosion de ce métal par rapport à son potentiel de charge nulle. Lorsque le potentiel de corrosion de ce métal a une valeur inférieure au potentiel de charge nulle, l'adsorption des cations est favorisée ; à l'inverse les anions sont adsorbés quand le potentiel de corrosion du métal se trouve dans la région de potentiel positif par rapport à potentiel de charge nulle. Dans certains cas, la charge de la surface peut être modifiée par l'adsorption d'une couche d'ions intermédiaire. [102]

Les molécules organiques utilisées comme inhibiteurs, contiennent une partie non polaire, hydrophobe, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels que $-NH_2$ (amine), $-SH$ (mercapto), $-OH$ (hydroxyle), $-PO_3$ (phosphate)... La molécule se lie à la surface par son groupe fonctionnel, les espèces adsorbées entrent en contact direct avec la surface du métal. Ce sont des réactions qui font intervenir un transfert électronique entre la partie polaire de la molécule et les orbitales du métal ce qui engendre la formation de liaisons chimiques plus stable car basées sur des énergies de liaison plus élevées. Alors que sa partie non polaire, plus volumineuse, bloque partiellement la surface active, ainsi les chélates peuvent être formés à la surface du métal lorsque le composé organique contient plus d'un groupement fonctionnel (Figure I.3). Cette adsorption s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées, les forces mises en jeu sont de même type que celles qui sont impliquées, lors de la formation des liaisons chimiques spécifique pour chaque métal et engendre une couche mono moléculaire. La tendance à une forte adsorption augmente quand les électrons sont moins liés à l'atome donneur (la partie non polaire de la molécule); en effet plus les atomes fonctionnels ont tendance à former des liaisons avec le métal en donnant facilement des électrons, plus les inhibiteurs sont efficaces. Pour une série de molécules organiques qui ne diffèrent que par leurs atomes fonctionnels, l'adsorption et donc l'efficacité de l'inhibition augmente avec la diminution de l'électronégativité de ces atomes fonctionnels. [103,104]

I-5.3.2.4.2/Adsorption chimique:

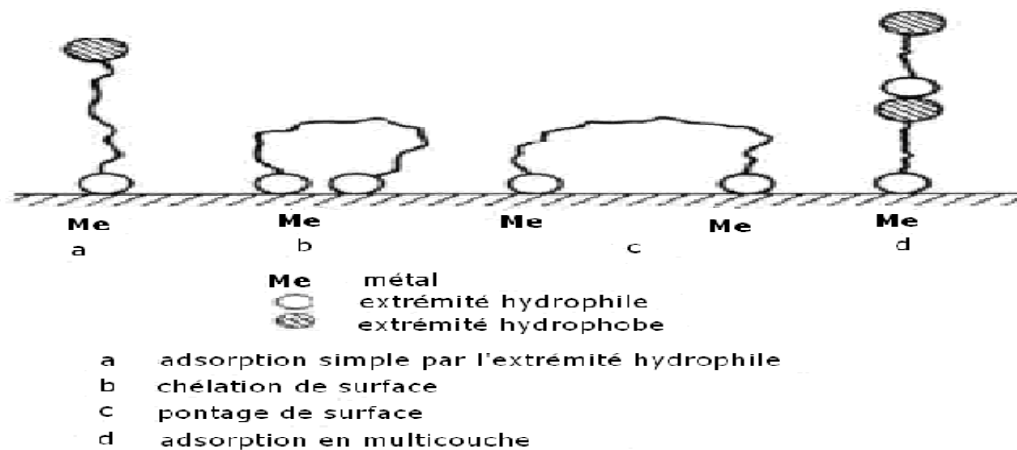


Figure I.31 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique. [105]

- [1] F. Abd el ali. (2007), thèse de doctorat, université mentouri Constantine.
- [2] Dieter LANDOLT, Corrosion et chimie de surfaces des matériaux, Presse polytechniques et universitaires Romandes, première édition (1993).
- [3] Wayne W.F, Sonald G.H; Corrosion, (2004) 04407.
- [4] T. H Rogers « Marine Corrosion », London: Newnes (1968) p.307.
- [5] J. Vosta, J. Elia'sek, *corros.Sci.* 11(1971) 223.
- [6] Corrosion des métaux, ENSPM formation Land Olt D; Edition Alden Press., (1993) 495.
- [7] industrie - IFP training, France,2005.
- [8]. ENSPM formation industrie. Corrosion des métaux, s.l: IFP training, France, 2005.
- [9] R. Mehibil. Mémoire de Magister ; « Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium », Université de Skikda.
- [10] D. Nadir, R. Rabah ; « Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs de corrosion »; Livre Edition: 1.03.4278 (2004) Pages (6-7).
- [11] A. Habchi.Masteracadémique; « Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier xc52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondant dans un milieu H2SO420% » Université Kasdi Merbah Ouargla (2013).
- [12] CC, FUVELLE, “ introduction à la corrosion, forme et prévention ”ED CETIM, 1989;
- [13] H. BENSABRA, ”Cours de corrosion et protection des métaux”. Département de génie de procédés. Université Jijel 2016.
- [14] <http://thesis.univ-biskra.dz/3476/2/Chapitre%20I.pdf>
- [15] J. Benard, A. " Michel, *Métallurgie Générale* ", Ed. Masson, Paris, (1991).
- [16] Hicham E., Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique, Mémoire d'Etudes Supérieures Approfondies, Université de Oujda (Maroc),2000.
- [17] Francois R., Corrosion and deposits course, Master of Science in oil and gas production engineering, France, 2005.
- [18] Said, BENSAAIDA « Cours de corrosion ». Biskra : L'OPU, 2015.
- [19] Nesic S, T.Solvi G, Skjerve S; *British corrosion journal*, 32 (1997) 269.
- [20] Fontana M.G; *Corrosion Engineering* 18 (1986)143.
- [21] Corrosion et moyens de protection préparation et caractérisation de dépôts composites électro déposés en présence d'inhibiteurs organiques
- [22] Gérard B, Henri M., *Corrosion des métaux et alliages*, Hermès science publications,

Paris,2002.

[23]. Vignes, Alain, et al. Livre Métallurgie: du minerai au matériau. s.l: DUNOD, 2013.

[24]. LECONTE, Jaques. Tuyauteries, Protection contre la corrosion. France : Techniques de l'ingénieur , 1990.

[25] A.Col,M.Colombie,MatériauxMétalliques,«PhénomènesdeCorrosion,4ièmepartie.Les différentes formes de corrosion aqueuse ». Dunod, 2010.

[26] C. Defontaine, «Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré », Journée thématique (2011).

[27]. Toufik, CHOIRA Samira. Mémoire Ingénieur d'état "Etude de phénomène de Corrosion de tuyauterie de la pompe de recyclage de l'unité de déshuilage de Haoud Berkaoui".Mémoire Ingénieur d'état s.l. : Univ. OURGLA, 2003.

[28] H. Elbakouri. Mémoire de DES ; « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique»,Université Mohammed 1 Oujda (Maroc) (2000).

[29] J. Melnyk, M. Marcone, S. Wang —Chemical and biological properties of the world'smost expensive spice: Saffron. Food Research International 43 (8), (2010) PP. 1981-1989.

[30]. GROSGOGÉAT, B. et P.COLON. Support de cours Société Francophone de Biomatériaux Dentaires . 2009-2010.

[31] A. Zakaria Cheikh, " Études chimiques et biologiques d'Aframomum sceptrum (Zingibéracée) et de la curcumine ", thèse de doctorat de l'université paris-sud ,(2012).

[32] M. Missaoui, Effet du PH sur la Résistance à la Corrosion des Couches de Nickel Electrodepositées, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra,2014.

[33] Lahcène SAOU, (2015), Mémoire master (Le procédé de fabrication des pipes(X52) pour transport hydrocarbures (à El-Hadjar)), Université MohamedKheider.

[34] KHALFAOUI INES,(Mercredi 26 Juin 2019), MÉMOIRE DE MASTER(Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion organique en milieu HCl), Université Mohamed Khider de Biskra.

[35] L. Dong, L. Yuanhua, D. Yigang, Z. Dezhi, (2011), Anti-corrosion Methods and Materials, 58,205p.

[36] K. H. Reddy, P. Sambasiva Reddy and P. Ravindra Babu, J.Inorg .Biochem. 77, 169,1999.

[37] Landolt, D. (2003). Corrosion et Chimie de Surfaces des métaux, Traité des Matériaux 12, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

- [38] H. BOULEMCHE, Mémoire de Magister, Etude de l'efficacité d'un revêtement de machine du secteur humide de la Tannerie de Jijel, Univ. Skikda (2006).
- [39] Said, BENSAAIDA. « Cours de corrosion ». Biskra : L'OPU, 2015.p.
- [40] H. Uhlig, « corrosion et protection ». Ed. DUNOD, Paris 1970.
- [41] P. Boumersbach, C. Dumont, J. P. Millet, "electrochemical characterization of a corrosion inhibitor: influence of temperature on the inhibition mechanism." 207th meeting of the electrochemical society, Quebec City (Canada), 2005.
- [42] R.D. Kane, S. Srinivasan, "experience survey on corrosion monitoring and mitigation techniques for sweet well production." CLI International, INC, HOUSTON, TX, <<http://www.corrosionsource.com/InterCorr/96>>, 1996.
- [43] P. Olav Gartland, "Choosing the right positions for corrosion monitoring on oil and gas pipelines", Corr Ocean USA, Paper, Nace, Houston, 1998.
- [44] P. Boumersbach, C. Dumont, J. P. Millet, "electrochemical characterization of a corrosion inhibitor: influence of temperature on the inhibition mechanism." 207th meeting of the electrochemical society, Quebec City (Canada), 2005.
- [45] LÉCONTE, Jaques. Tuyauteries, Protection contre la corrosion. France : Techniques de l'ingénieur, 1990.
- [46] Coll, Michel colombié. « Matériaux métallique » 2^{ème} ed. Paris : Dunod, 2008.
- [47] Landolt, Diet. Corrosion et chimie des surfaces des métaux . Lausanne : Aldenpress Oxford, 2003.
- [48] Heagle D.J., Jackson R.E. (2017) Incorporating dissolved oxygen contamination into redox assessment frameworks, GeoOttawa 2017, 70th Canadian Geotechnical Conference – 12th CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, October 1-4, 2017, Ottawa, Ontario, Canada.
- [49] F. Khoukhi, Mémoire de magister ; « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (Eau, huile et gaz) », Université M'Hamed Bougara-Boumerdes (2008).
- [50] S. BRIOUA, Mémoire de Magister, Etude du comportement de l'acier au carbone X52 par la mesure de la résistance de polarisation « influence des paramètres expérimentaux », Univ. Skikda (2003).
- [51] POURBAIX M. Atlas d'équilibres électrochimiques à 25 °C. Paris : Gauthier Villars, 1963, 644 p.

- [52] D. Desjardins, R. Oltra, Corrosion Sous Contrainte, Phénoménologie et Mécanisme, Les édition de physique, (1992), 26.
- [53] L. L. Shreir. Corrosion, Corrosion control, George newness, Great Britain,(1963).
- [54] A.Col,M.Colombié,«MatériauxMétalliquesPhénomènesdeCorrosion,3^{ème}partie.Aspects électrochimiques de la corrosion ».Dunod,2010.
- [55] F. Khoukhi, Mémoire de magister ; « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (Eau, huile et gaz) »,Université M'Hamed Bougara-Boumerdes(2008).
- [56] O. Dob, Mémoire de magister ;« Formation d'une solution aqueuse anti-corrosive pour le refroidissement des moteurs à combustion interne »,Université de Skikda(2008).
- [57] Ropital, François. Corrosion et dégradation des matériaux métalliques. Paris : TECHNIP, 2009.
- [58] MORIANDE « Electrochimie ». Editions Dunod,2005.
- [59] S, bourdreux. Notion d'électrode. s.l. : Université Blaise Pascal - Clermont -Ferrand, 2003. Agrégation physique.
- [60] A. Mekkaoui, Élaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electrochimique, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra,2013.
- [61] F. Gouin, A. Moreau, J. Guicheux, N. Passuti, D. Heymann, Physiopathologie de l'ostéolyse tumorale, Masson Paris208(1999).
- [62] M. Castel, partage d'expérience, Université de Montpellier 2(2005).
- [63] B. GROSGOGEAT, P. COLONSociete Francophone de BiomateriauxDentaires.
- [64] A.Fouchet,„croissanceetcaractérisationsdefilmsmincesdeznodopécobaltpréparés par ablation laser pulsé.., thèse de doctorat, université de Caen,(2006).
- [65] Perez, N (2004). The Electrochemistry of Corrosion Science. (2e Ed). Boston: Kluwer Academicpublishers.
- [66] H.Uhlig. Corrosion et protection. Paris : DUNOD,1970.
- [67] L.Ghilani. Memoire magister , Tenue à la corrosion d'un depot de chrome électrolytique sur un substrat en acier XC45. Batna : Université de Batna,2008.

- [68] Said, BENSAAIDA.« Cours de corrosion ». Biskra : L'OPU, 2015.p.
- [69] Nuytten, Simon. Mémoire master professionnel "Durabilité de la protection anticorrosion par galvanisation des structures métalliques ". s.l. : Ecole polytech de Lausanne ,2013.
- [70] Landolt,Diet.Corrosionetchimiedessurfacesdesmétaux.Lausanne:AldenpressOxford, 2003.
- [71] J. C. Scully, Corrosion Protection, principes fondamentaux, Masson, 125 (1995)121-123.
- [72] L.L.Shreir,C.Chem,R.A.Jarman,G.T.Burstein,CorrosionVolume2,CorrosionControl, Planta Tree(1995).
- [73] Toufik, CHOHRA Samira. Memoire Ingenieur d'état "Etude de phénomène de corrosion de tyauterie de la pompe de recyclage de l'unité de déshuilage de Haoud Berkaoui". Memoire Ingenieur d'état. s.l. : Univ. OURGLA,2003.
- [74] Institut Marocain de l'information Scientifique et technologique. Document "Bulletin de l'information technologique", chimie/parachimie. Rabat : CNRST,2013.
- [75] H.E. Waldrip, Present Day Aspects of Condensate Well Corrosion. Corr,1948.
- [76] N.E.HAMNER, Scope and importance of inhibitor technology. In : Ed. By C.C. Nathan, Houston, NACE Corrosion Inhibitors. USA: National Association of Corrosion Engineers,1973.
- [77] NACE, (1965). Glossary of corrosion Terms, Materials Protection, 4, 1,79-80.
- [78] K. Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. Déc(2005).
- [79] MagalyHenriquezGonzalez,2011,thèsededoctorat:Etuded'untraitementmultifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO2 » l'Institut National Polytechnique deToulouse.
- [80] E.P.Heitz,4thEuropeanSymposiumonCorrosionInhibitors,Ann,Univ.Ferrara,Italy, N.S., Sez. V, Suppl. 6 (1975) PP. 432.
- [81] I. Ichchou, " Étude électrochimique de l'inhibition classique ou par des monocouches auto-assemblées d'un dérivé de la thiourée, vis-à-vis de la corrosion en milieu acide de l'acier au carbone XC38", mémoire magister, universite de tlemcen algerie.(2011).
- [82] D. Landolt, – Corrosion et chimie de surfaces des métaux (Traité des matériaux), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 165-205pp, ISBN 2-88074-245-5,(1993).
- [83] G. Trabanelli, Y. Marcel Dekker, F. Mansfield, Corrosion Mechanism, (1987), PP.119.

- [84] D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des Métaux, Presses polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Vol. 12(1997).
- [85] D. Landolt, (1993), Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, 1st Edn, Alden Press, Oxford, 488.
- [86] J.C. Scully, ||The Fundamentals of Corrosion, International Series of Monographs on Materials Science and Technology||, 2nd Ed. Pergamon International, Oxford, Vol. 17, (1975) [87] T.R. Thomas. (1982). Rough Surfaces, Longman, New York.
- [88] L. Cui ,et al, —Cytotoxic Effect of Curcumin on Malaria Parasite Plasmodium falciparum: Inhibition of Histone Acetylation and Generation of Reactive Oxygen Species — , Antimicrob Agents Chemother.(Feb 2007); 51(2): PP.488–494.
- [89] Rahmouni K, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. Déc(2005).
- [29] Trabanelli G, Carassiti V, Corrosion Science and Technology., (1970) 147.
- [90]. B.B. Aggarwal, et al —Curcumin: the Indian solid gold—. AdvExp Med Biol.(2007) PP. 1-75.
- [91] J. Melnyk, M. Marcone, S. Wang —Chemical and biological properties of the world's most expensive spice: Saffron. Food Research International —, 43 (8), (2010) PP.1981-1989.
- [92] S.Bathaie, A. Bolhassani, A. Khavari—Saffron and natural carotenoids: Biochemical activities and anti-tumor effects—. Biochimica et Biophysica Acta. (2013), PP. 20-30.
- [93] S. B. Christensen, U. Rasmussen — Thapsigargin, constitution of a sesquiterpene lactone histamine liberator from thapsia garganica ||Tetrahedron Letters, Volume 21, Issue 39, (1980), PP. 3829-3830.
- [94] Le grand G Manuel préparateur en pharmacie. Edition Masson. Paris
- [95] S. Broegger Christensen, et al " Thapsigargin and thapsigargin, two histamine liberating sesquiterpene lactones from Thapsia garganica. X-ray analysis of the 7,11-epoxide of thapsigargin " Org. Chem. February 1, Volume 47, Issue 4(1982) PP649–652.
- [96] S. B. Christensen, A, et al Prog. Chem. Natl. Prod., 71, (1997) PP.131-167.
- [97] R. G. Pearson, Hard and Soft Acids and Bases, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa, 1973.

- [98] :H.El bakouri. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique. Mémoire pour du DESA. Université Mohammed 1 – oujde.
- [99]. H. Ali, et al —The ability of thapsigargin and thapsigarginin to activate cells involved in the inflammatory response. Br. J. Pharmac. Vol 85(1985),PP. 705-712.
- [100] J.G.N. Thomas, 5th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ. Ferrara, Italy, (1980) 453.44
- [101] L. Antropov, 1st International Congress on Metallic Corrosion, Butterworths, London(1962) 147.
- [102] B. A. Trine, et al "Thapsigargin From Thapsia L. to Mipsagargin" Molecules , Vol20 N 4, (2015) PP. 6113-6127.
- [103] E. Mc Cafferty, Corrosion Control by Coatings, H. Leidheiser editor, Science Press, Princeton, N.J., (1979) 279.
- [104] G. Trabanelli, Corrosion Mechanisms, F. Mansfeld editor, Marcel Dekker, New York, (1987) 119.
- [105] Christian Fiaude, Inhibiteurs de corrosion, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 160.



Chapitre II:
Généralité Sur
L'électrodéposition

II/L'électrodéposition:

I- 1/Introduction:

Dans ce travail, on va présenter quelques informations sur les différents phénomènes mis en jeu lors de l'électrodéposition. Ces phénomènes qui influencent la microstructure, sont liés à des paramètres comme la surtension, le mode utilisé pour l'électrodéposition, et la vitesse d'approvisionnement en ions...etc. Après nous allons étudier une technique d'évaluation de la corrosion (Méthode de la masse perdue).

II-1.1/Définition :

L'électrodéposition est une technique électrochimique de formation de revêtements (métalliques ou sous forme d'oxydes), et un processus très utilisé dans l'industrie [1]. Qui permet l'obtention des dépôts ont des propriétés spécifique, difficile à obtenir avec d'autre technique, elle consiste à élaborer par voie électrolytique des dépôts métalliques sur une surface conductrice [2].

II-2/ Cinétique d'électrodéposition:

L'électrodéposition est utilisée pour déposer une ou beaucoup couches métalliques sur une surface métallique. Pour réaliser un dépôt électrolytique on place l'électrode à recouvrir (le substrat) à la cathode d'une cellule d'électrolyse qui contienne un électrolyte contenant les ions du métal à déposer. On choisit l'électrolyte en fonction du dépôt désiré. Le générateur permet la circulation du courant entre les deux électrodes dont le potentiel est différent de leur potentiel d'équilibre. On obtient une couche a des caractéristiques précises qui dépendent des différents paramètres du mécanisme électrolytique [3].

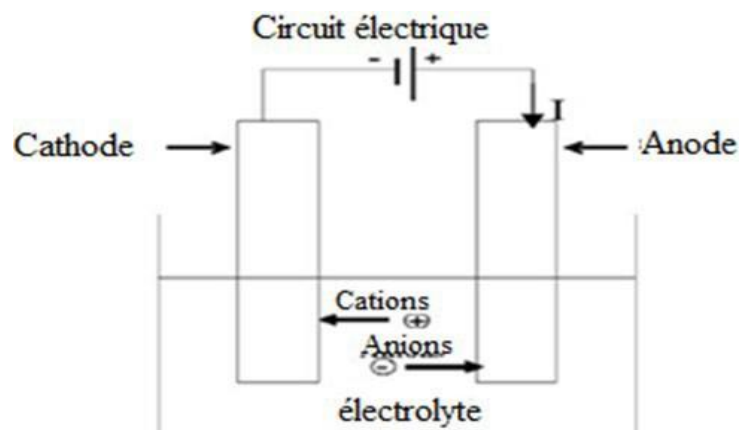


Figure II.1 : Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse [3].

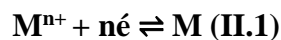
Le but de cette opération est conférer au métal certaines propriétés de surface comme :

- La résistance à la corrosion.
- L'aspect (mat, semi-brillant, brillant...).
- Les propriétés optiques.
- La soudabilité ; conductibilité, résistance de contact.
- La dureté.
- La ductilité.
- La résistance à l'usure, à l'abrasion et au frottement.

II-3 / Principe général de l'électrodeposition:

L'électrodeposition est une réaction d'oxydoréduction qui est déclenchée par un générateur (source de courant). Elle est utilisée pour appliquer une couche superficielle sur un métal pour donner à cette surface les différentes propriétés désirées. [4]

- ✓ On dissout la matière à déposer ou a transféré dans un solvant approprié, telle que ses ions constitutifs soient disponibles dans la solution.
- ✓ Le substrat est placé à la cathode d'une cellule d'électrolyse.
- ✓ On applique Une différence de potentiel électrique entre les deux électrodes immergées dans cette solution.
- ✓ L'anode est le siège d'une oxydation (la borne positive) et, la cathode est le siège d'une réduction (la borne négative). On peut dire que le potentiel de l'anode étant supérieur à celle de la cathode.
- ✓ Quand le courant électrique continu est passé dans la cellule, les électrodes attirent à elles les ions à charge opposés. [2]
- ✓ La polarisation des électrodes va provoquer une migration des ions M^{n+} vers la cathode.
- ✓ L'ion métallique est neutralisé par les électrons fournis par la cathode et se dépose sur celle-ci sous forme de métal M suivant la réaction:



- ✓ La réduction de l'ion M^{n+} et l'oxydation de l'atome métallique M se produisent simultanément. [4]

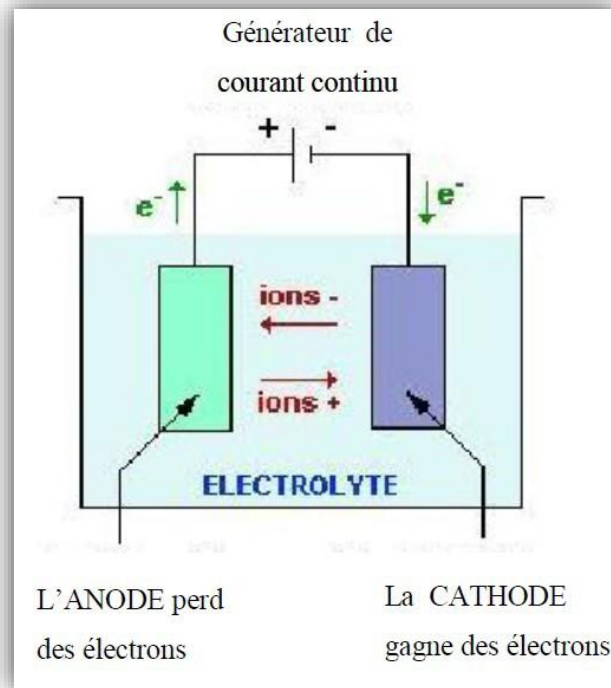


Figure II.2 : cellule d'électrolyse. [2]

II-4/ Mécanismes d'électrodéposition :

On peut décrire le processus d'électro-cristallisation de manière simplifiée par les étapes suivantes :

II-4.1/ Transfert de masse :

Le transport de masse vers l'électrode a un rôle important dans le processus de dépôt parce que le réactif présent sur l'interface métal/électrolyte est constamment consommé par la réaction de réduction de l'espèce métallique. Ce transport de masse s'effectue par plusieurs phénomènes qu'ils sont [5]:

I.4.1.1 / La migration:

On appelle migration le déplacement des ions sous l'effet d'un champ électrique résultant de la différence de potentiel entre l'anode et la cathode engendré par le gradient de potentiel existant entre les électrodes. [6]

I.4.1.2 /La diffusion:

Le mouvement des ions à cause du gradient de concentration entre l'interface électrode-électrolyte et le sein de la solution. Qui résulte de la consommation de l'espèce ionique métallique (espèce électro active à la cathode). [7]

I.4.1.3 /La convection:

C'est le transport hydrodynamique du fluide engendré par une agitation mécanique, thermique...), il dépend de la viscosité du milieu. [8]

II-4.2/ Transfert de charge :

On schématise le mécanisme de transfert de charge dans le cas d'un dépôt métallique réalisé par voie électrochimique comme suit : Le métal se dépose sur la cathode selon la réaction simplifiée [8]:



Telle que :

M^{n+} : Ion métallique.

n : Charge de l'ion métallique.

e^- : Électron.

M: ne représente peut-être pas un atome, on le désigne sous le nom d'adion, par abréviation d'ion adsorbé.

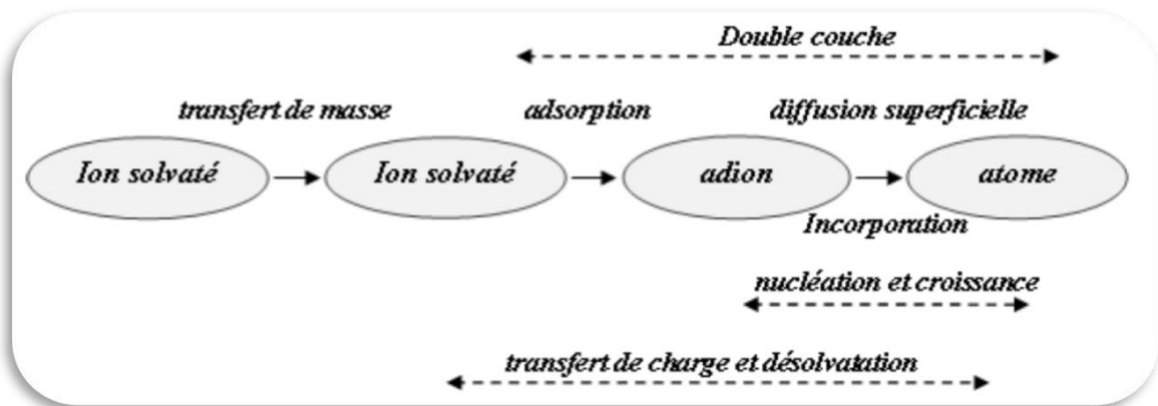


Figure II.3 : transfert de masse et de charge au cours d'une électrolyse. [9]

II-4.3/ L'électro-cristallisation :

En générale, les ions métalliques existant dans la solution sont hydratés ou complexés. Qu'ils sont transportés vers la cathode à travers la couche de diffusion et la double couche d'Helmholtz. Quand ils se rapprochent de la cathode, les ions métalliques se déshydratent ou se décomplexent. Après, ceux-ci se déchargent en combinant leurs électrons avec ceux de la cathode pour former des atomes métalliques à la surface de la cathode (formation des adatoms). Par conséquent, les

adatoms diffusent à la surface pour trouver des sites stables (marches, coin, émergence de dislocations, ...). [5]

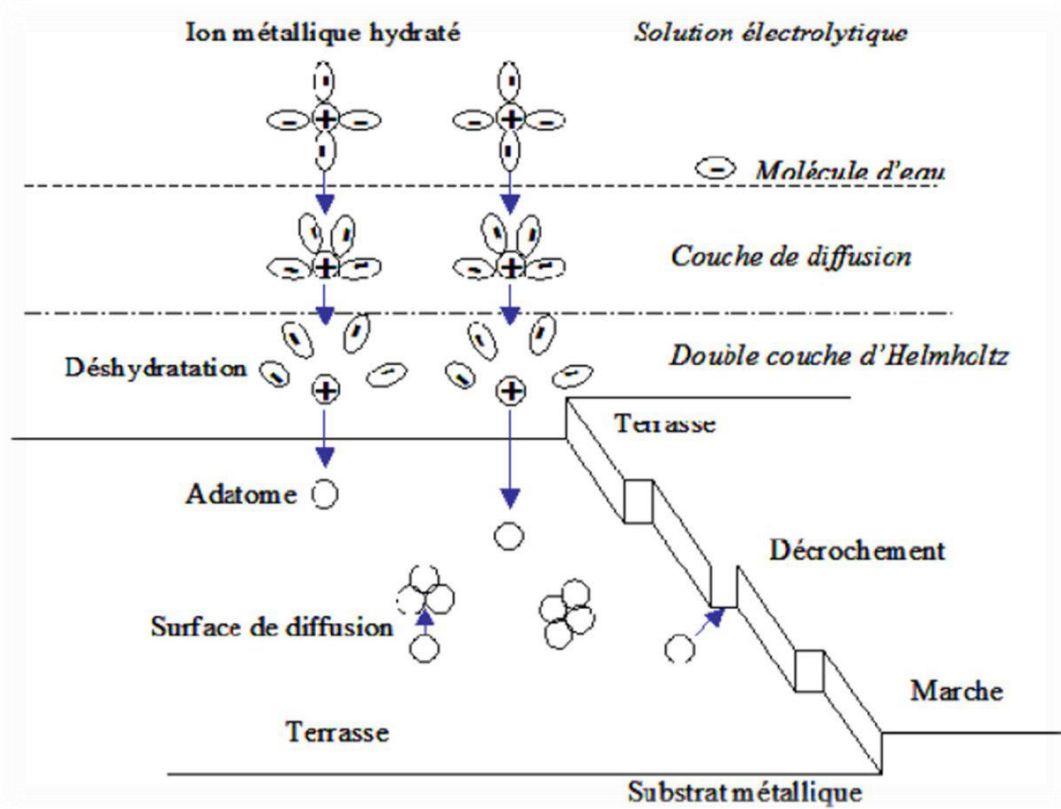


Figure II.4 : stades initiaux intervenant lors de l'électro-cristallisation. [10]

II-5/ Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique:

Les différents facteurs influents sur les caractéristiques de dépôts sont :

II-5.1/ La température :

On peut être prévus deux effets opposés. Quand la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain augmentent aussi accélèrent le processus de micro-cristallisation. Toutefois, au même temps, les surtensions baissent et cela renforce la croissance des grains. En effet, la température croît la mobilité latérale des atomes métalliques dans la couche de croissance et les atomes peuvent arriver plus facilement aux centres actifs de croissance, ils renforcent une croissance de petits cristaux. [3]

Aussi elle permet la préparation des solutions plus concentrées par l'augmentation de la solubilité des sels. [11]

II-5.2/Agitation de l'électrolyte :

Les buts de l'agitation du bain sont :

- ✓ Causer le départ des bulles de gaz qui se forment sur le dépôt et qui sont la source de piqûre.

- ✓ L'augmentation d'intensité limite anodique ou cathodique, pour faciliter la diffusion des espèces électro actives vers les électrodes et alors, éliminer le gradient de concentration et standardiser la polarisation des électrodes dans le bain.

On peut être assurée l'agitation par:

- La voie mécanique.
- L'insufflation d'air comprimé (N₂, Ar...) exempt d'huile.
- L'utilisation des électrodes tournantes.
- La circulation du bain à cause des jets d'électrolyte.

L'agitation a un grand inconvénient dans le cas de présence des boues au fond du bain. Lors de l'agitation, ces boues seront fixées à la surface des dépôts, et donc leurs aspects deviennent mats.

[12]

II-5.3/ PH du bain :

Le PH joue également un rôle très important sur la structure des dépôts, parce que les protons causent l'élévation de la surtension et posent un problème pour les métaux qui ont une surtension plus négative que l'hydrogène. L'accroissement du pH au niveau de la cathode conduit la formation d'hydroxydes qui nuisent la qualité du dépôt (un dépôt mat). Pour éviter ces inconvénients, il faut utiliser des solutions tampons pour maintenir le pH constant et d'avoir une meilleure qualité de dépôt. [13]

II-5.4/ La densité de courant :

La densité de courant dépend du volume de la pièce à revêtir, elle a une influence très marquée sur la qualité du dépôt dont :

- ✓ L'augmentation de la densité de courant favorise le phénomène de germination au détriment de phénomène de croissance ce qui entraîne à une structure plus fine de l'élément à déposer.
- ✓ Si la densité de courant devient trop grande, la croissance des cristaux est irrégulière. Les dépôts deviennent spongieux ou capiteux et même il peut y avoir des dépôts brûlés.
- ✓ Si la densité de courant devient trop faible, On obtient des dépôts mats à cause de la présence des gros cristaux. [12]

II-5.5/ Conductibilité de l'électrolyte :

L'addition d'électrolytes qui ne participent pas au processus électrolytique (électrolytes indifférents) mais permettant de baisser la résistance de l'électrolyte, est souvent très intéressante.

Dans ce cas la tension appliquée à la cellule peut être plus petite, donc l'énergie consommée est plus faible. [3]

II-5.6/ Nature de l'électrolyte :

Lorsqu'on utilise des sels complexes, on obtient des dépôts très cohérents et qui adhèrent bien au métal.

L'expérience a prouvé que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de bonne qualité que ceux obtenus à partir des sels simples. L'expérience a prouvé que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de bonne qualité que ceux obtenus à partir des sels simples. Et donc, le dépôt d'argent réalisé par l'électrolyse du solution d'un sel simple est formé de longues aiguilles et est peu consistant pendant qu'avec des solutions cyanurées, le dépôt est très compact et très adhérent. Alors les cristaux sont petits. [3]

II-5.7/ Concentration de l'électrolyte :

L'accroissement de concentration de la solution entraîne à une meilleure micro-cristallisation, pendant qu'un abaissement de celle-ci donne des dépôts incohérents. En réalité, si la concentration croît, le nombre des ions devient plus grand, la vitesse de leur décharge augmente et cela favorise le dépôt des grains fins. [14]

II-5.8/ Métal de base:

Fréquemment la structure du dépôt est ressemblance à la structure de la surface métallique à recouvrir. Les propriétés de la couche dépendent largement de celles de la surface métallique qui doit être très propre et parfaitement polie. [11]

II-6 / Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P:

II-6.1 /Propriétés et structure des dépôts :

La formation d'un dépôt de nickel dépend de très nombreux paramètres, composition d'électrolyte, présence d'additifs spécifiques ou d'impuretés, conditions d'électrolyte (agitation, et parfois après traitement : Thermiques, usinages, etc.).

La qualité et la stabilité d'un bain de dépôt chimique ne peut être obtenues que par un ajustage précis d'un certain nombre de paramètres.

II-6.2/ Propriétés de Nickel :

Les propriétés physiques :

Symbole	Ni
Masse volumique	8,9 g / Cm ³ (dépôts électrolytiques : variant de 8,85 à 8,93)
Température de fusion	1 455°C
Coefficient de dilatation	13,6 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ à 20 °C
Conductivité thermique	6.85μΩ. cm (de 6,8 à 11,5 pour les dépôts électrolytiques)
Résistivité électrique	>350 MPa
Résistance à la rupture	150 MPa
Limite élasticité	Cubique faces centrées (a = 0,3524 nm)
Cristallisation	359°C
Température de Curie	280 à 400 A/m
Champ coercitif	0,61 T
Aimantation à saturation	>350 MPa

Tableau II.1 les propriétés physiques de nickel [15].

II-6.3 / Caractéristiques spécifiques de phosphore :

II-6.3.1 /Propriétés physiques :

GÉNÉRALITÉ SUR L'ÉLECTRODEPOSITION

Point de fusion	Blanc Noir	44.15 °C 610 °C
Point d'ébullition	Blanc	280.5 °C
sublimation point	Rouge	431 °C
Triple point	Rouge	590 °C
Point critique	Rouge Blanc	721°C 721°C
Densité	Rouge Blanc	2.16 g / Cm ³ 1.823 g / Cm ³

Tableau II.2 propriétés physiques de phosphores [16].

II-6.3.2/Propriétés thermochimique :

- Chaleur spécifique : $0.769 \text{ J / g } ^\circ\text{C} = 12 \text{ cal/ g } ^\circ\text{C} = 0.184 \text{ cal/ g } ^\circ\text{C} = 5.693 \text{ cal/mol}^\circ\text{C}$
- Conductivité thermique : $0.235 \text{ (w / m) / K, } 27^\circ\text{C}$
- Température de fusion : $0.657 \text{ kJ / mol } 14 = 21.2 \text{ J/g}$
- Chaleur de vaporisation : $12.129 \text{ kJ / mol } /15 = 391.6 \text{ J/g.}$

II- 7/ Contrôle des revêtements par dépôt électrolytique:

La caractérisation et le contrôle des revêtements et traitements de surface dépendent du domaine d'application visé. Ils vont porter sur leurs différentes propriétés caractéristiques : aspect, rugosité, adhérence, épaisseur, tenue à la corrosion, dureté superficielle.

II-7.1/ Mesure de l'adhérence au substrat:

Les dépôts électrolytiques de nickel adhèrent correctement aux substrats, des lors que les surfaces soient au préalable correctement préparées ils dépendent également de la nature du substrat, de son état de surface.

II-7.2/ Mesure de l'épaisseur :

La caractéristique la plus importante et celle de la régularité des épaisseurs pour autant que toutes les parties des pièces soient en contact avec la solution et que celle-ci soit correctement renouvelées. [17]

II-8 / Etude de la tenue à la corrosion :

L'amélioration de la résistance des dépôts électro déposés est l'un des objectifs les plus importants en galvanoplastie. [18]

II-8.1/ Méthode de la masse perdue :

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple, de ne pas nécessiter un appareillage important, son principe repose sur de la mesure de la masse perdue de chaque échantillon ayant une surface S, après immersion dans un milieu corrosif pour une période de 15 jours à une température ambiante. Les échantillons ont été pesés avant immersion, La partie nue de chaque échantillon est délimitée d'une couche de vernis pour ne pas être attaquée par le milieu agressif. A la fin de chaque test l'échantillon est nettoyé à l'aide d'une brosse en nylon souple pour éliminer les produits de corrosion, en suite rincé à l'eau distillée et puis séché et finalement repesée.

L'utilité de mesurer la masse perdue consiste en l'évaluation du taux de corrosion qui se définit comme une perte de poids par unité de surface et de temps. Il est exprimé en [g. cm⁻² .an⁻¹]. [19]

Le taux de corrosion est calculé à partir de la formule suivante :

$$T_{\text{corro}} = \left(\frac{\Delta m}{s_{\text{imm}} \cdot t} \right) \times 365 \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

Avec :

Δm : Différence de masse en [g];

m_i : la masse de l'échantillon avant l'immersion.

m_f : la masse de l'échantillon après l'immersion.

S : la surface active [dm²].

GÉNÉRALITÉ SUR L'ÉLECTRODEPOSITION

t: temps de l'exposition [jours].

Pour cette technique, l'échantillon est suspendu, à l'aide d'un fil de nylon, dans une coupelle contenant v_{ml} de la solution d'essai. Il est également important d'effectuer un test de certification (à blanc) pour prendre des mesures de référence, et c'est pour chaque ensemble de conditions de fonctionnement à définir, car cela doit être fait de manière empirique. Les différences de concentration de l'inhibiteur dans différents modes, le changement du temps d'immersion, la variation de la température expérimentale et l'effet pH sont quelques-uns des tests qui peuvent être considérés. [20]

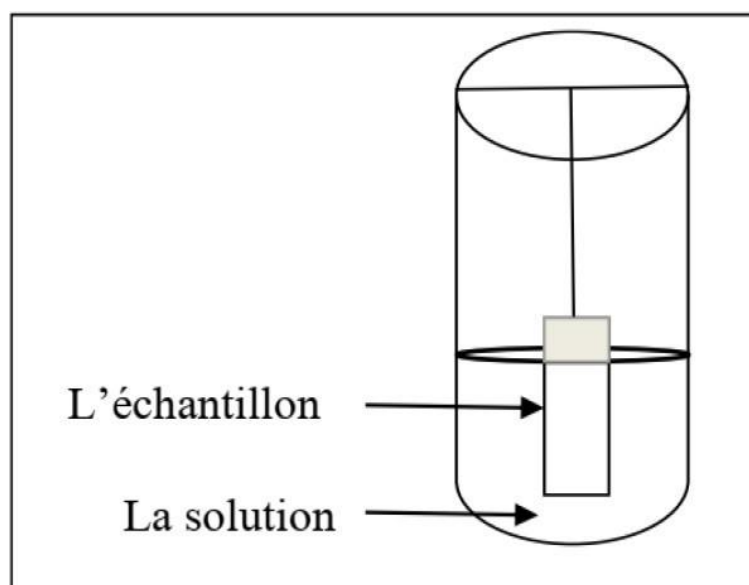


Figure II.5 : Dispositif expérimental de la technique de la masse perdue [21].

- [1] Jeremy Mallet "Électrodéposition et Propriétés magnétiques de nano-fils d'alliage Co_x-Pt_{1-x}". Thèse de doctorat, université de Reims Champagne – Ardenne, 2004.
- [2] J. Bernard, A. Michel et J. Philibert et al, cour d'électrochimie, -notion fondamentale.
- [3] A. Mekkaoui, Élaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electrochimique, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [4] S. Derbal "Électrodéposition et Caractérisation de couches minces métalliques ternaires CuZnSn", Mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Sétif (2014).
- [5] B. Bouzidi « dépôt par électrodéposition et caractérisation de matériaux destinés à la fabrication de cellules photovoltaïques à base de couches minces ». Mémoire de Magister de l'université de Ferhat Abbas. Sétif
- [6] Amirat Samia. Thèse de doctorat. Département de Chimie, Université BADJIMOKHTAR-Annaba, 2012.
- [7] Vasile Heresanu. « Electrodeposition sous champ magnétique de zinc et de fer. Propriétés magnétiques des arborescences de fer ». Thèse de doctorat, Université JOSEPH FOURIER-Grenoble 1, 2003. Version 1 - 8 Jan 2004.
- [8] Jeremy Mallet. « Electrodeposition et propriétés magnétiques de nano-fils d'alliage Co_xPt_{1-x} ». Thèse de doctorat, Université de REIMS CHAMP AGNE- ARDENNE, 2004.
- [9] F. Lenoir and R. Wiart ; Extrait de « Métaux, Corrosion et Industrie », (1972), p557.
- [10] T. Watanabe; Nano-plating-Microstructure Control theory of plated film and Database of plated film Microstructure, Elsevier (2004), p697.
- [11] L. Lacourcelle technique de l'ingénieur. Du nord, (1979)
- [12] T. Derabla "Etude de l'effet de différents Paramètres physico-chimiques d'électrolyse en vue de la Préparation de revêtements électrolytiques de chrome à Partir des bains de chrome trivalent ", Mémoire de Magister de l'université de 8 Mai 1945, Guelma (2012).
- [13] Salima Zidane, thèse de magister, université de Guelma, Guelma 2006.
- [14] B. Trémillon, Electrochimie Analytique et Réaction en Solution, Tome 2, édition Masson, Paris (1993).
- [15]. M. Missaoui, Effet du PH sur la Résistance à la Corrosion des Couches de Nickel Electro déposés, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [16]. http://chemistry-reference.com/q_elements.asp?Symbol=P&language=fr
- [17]. S.A. RECHIM, "Le nickelage chimique Kanigen". Paris. 1997. vol. 458.

[18]. W. Harzallah, Préparation et Caractérisation de Dépôts Composites Electrodeposés en Présence d’Inhibiteurs Organiques, Mémoire Magistère, Université Mohamed Khider Biskra, 2006.

[19] Patrick Benaben, Frédéric DURUT, Nickelage électrolytique "Caractéristiques ", technique de l'ingénieur, M 1 610.2002.

[20] O.K.Abiol , N.C.Ofork , E.E.Ebens , N.M.Nwinuka, (2007). Anti – Corrosion Methods Mater, , 54,219

[21] Allen Bai, Chi-Chang Hu, Effects of electroplating variables on the composition and morphology of nickel_ cobalt deposits plated through means of cyclic voltammetry, Electrochimica Acta 47 (2002) 3447_ 3456







Chapitre III:
Etude Expérimentales,
Résultats Et Discussion

III- 1/ Introduction:

Le but de ce chapitre est pour présenter les techniques expérimentales d'électrodéposition et électrochimique utilisées dans ce mémoire, une description des matériaux, de l'électrolyte, des montages effectués, et l'évaluation de la corrosion par la masse perdue.

III-2/ Description de montage expérimentale :

III-2.1/ les produits chimiques :

Les produits	Leur composition chimique	Leur image
Sulfate de nickel	$(Ni\ SO_4 , 6H_2O)$	
Hypophosphite de sodium	(NaH_2PO_2)	
Acide borique	(H_3BO_3)	
Saccharine	$C_7H_5NO_3S$	


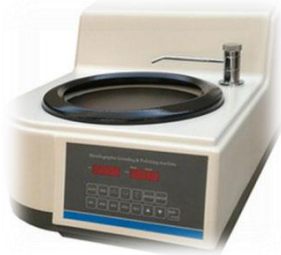








Chlorure de sodium	Na Cl	
---------------------------	-------	--

Tableau III-1 les produits chimiques utilisés.

III-2.2/ Matériels utilisés :

Matériels	Modèle	Image
Polisseuse	MECAPOL-P260	
Générateur de courant continu	Frederken	
Agitateur mécanique	LMS-1003	
Balance électronique	sertorius BL 60S	

ETUDE EXPERIMENTALES, RESULTATS ET DISCUSSION

pH- mètre	Model 903	 A digital pH meter with a white body and a blue LCD screen displaying '4.65'. It has a glass electrode and a reference electrode attached. The text 'PH METER' and 'Range: 0-14.00 pH' is visible on the front panel.
Thermomètre	/	 A digital thermometer with a black and blue casing. It features two red LED displays, both showing '0.00'. The top display is labeled '°C' and the bottom '°K'. It has several control buttons and input ports on the front.
Multimètre	/	 A digital multimeter with a black face and a green LCD display showing '0.00'. It has a rotary selector dial and various input ports. The text 'DIGITAL MULTIMETER' is printed at the bottom. Red and black test leads are attached to the right side.
Bêcher	/	 A clear glass beaker with a white scale on the side. The scale ranges from 0 to 1800 ml, with major markings every 200 ml and minor markings every 100 ml. The text '2000ml' and 'PYREX' are visible on the beaker.
Eprouvette	/	 A clear glass graduated cylinder with a white scale on the side. The scale ranges from 0 to 100 ml, with major markings every 20 ml and minor markings every 10 ml. It has a circular base and a narrow neck.




Chronomètre	/	
Spatule	/	
Pied à coulisse	/	

Tableau III-2 les matériaux utilisés.

III-2.3/ Matériaux :

III-2.3.1/Substrat utilisé (métal de base) :

On utilise 5 échantillons du cuivre (substrat) une par une de forme rectangulaire comme cathode.

III-2.3.2/ Plaque de Nickel :

Comme anode, nous avons utilisé deux plaques de nickel rectangulaire d'une part et d'autre de la cathode, 99.7% environ de pureté.

III-3/ Les étapes expérimentales de travail:

II-3.1/ Préparation des substrats :

Les substrats ont subi à un traitement de surface Avant toute déposition

III-3.1.1/ Polissage mécanique :

Principalement le polissage est une opération de finition pour diminuer la rugosité ou pour modifier la topologie de surface. La vitesse tangentielle de l'outil à polir est un paramètre principal pour que l'opération se passe dans bonnes conditions [1]. Le polissage mécanique de cuivre a été réalisé par papier abrasif sur une polisseuse rotative, en utilisant un disque abrasif de différentes granulométries (120,240,320,600,800,1000,1200), pour supprimer les fissures, les

aspérités et toutes les impuretés, puis l'électrode est nettoyée à chaque fois par l'acétone ou bien avec l'eau distillée.



Figure III.1 : Photo d'une polisseuse utilisée dans le polissage mécanique.

III-3.1.2/ Dégraissage électrolytique :

Cette opération de préparation de surface a été réalisée à une température de **35C°** et une densité de courant **$J=2[A/dm^2]$** pendant **2 minutes** en utilisant l'électrolyte d'une solution alcaline dont la composition est la suivante :

- **Phosphate tri sodique ($Na_3PO_4 \cdot H_2O$)** : de quantité (**5g/l**) pour complexer les impuretés métalliques
- **Carbonate de sodium (Na_2CO_3)**: de quantité (**10g/l**) pour abaisser la tension interfaciale de la pièce, assurer son mouillage et faciliter le découlement des salissures (tensioactif).
- **Soude caustique ($NaOH$)** : de quantité (**30g/l**) pour décomposer l'ensemble des graisses saponifiables à chaud.
- **Méta silicate de sodium (Na_3SiO_3)** : de quantité (**10g/l**) pour émulsionner les huiles et graisses saponifiables (l'agent émulsifiant).



Figure III.2 : Schéma de montage de dégraissage électrolytique.

III-3.1.3/ Décapage :

Cette étape a pour but l'activation et élimination des couches d'oxydes de la surface de substrat. Elle est réalisée dans une solution d'acide chlorhydrique (**10%, d=1cm**) d'une concentration **340 mol/l** pendant **2 minutes** et une température **ambiante**.

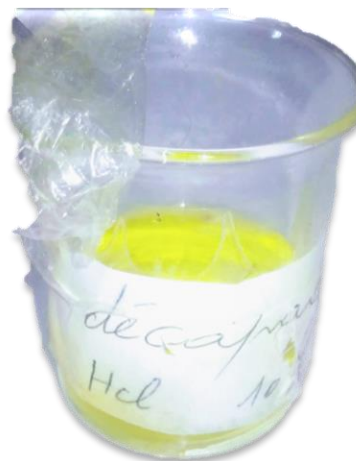


Figure III.3 : Schéma de décapage chimique.

III-3.1.4/ Rinçage :

Une fois, les échantillons polis, on les rince immédiatement avec l'eau distillée.

Une fois le processus de préparation des surfaces des pièces terminées, on procède à leurs Revêtements anticorrosifs de nickel.

III-3.2/ Réalisation des dépôts :

III-3.2.1/ L'électrodéposition Ni-P :

Un montage électrochimique a été réalisé pour toutes les opérations présentées sur la (FigureIII.4).

On utilise cinq échantillons du cuivre (substrat) de forme rectangulaire une par une comme cathode, alors que pour l'anode nous avons utilisé deux plaques de nickel de géométrie rectangulaire.

Ces électrodes sont plongées dans un bain d'électrolyte avec un thermomètre, le bain est soumis à une agitation magnétique au cours de toutes les opérations d'électrodéposition.

L'électrodéposition s'effectue à densité de courant constante $j=3$ [A/dm²]. Et à une température d'environ de (70) °C et un $ph=2,5$.

Pour déterminer les courants qui il faut imposée on utilise la relation suivant :

$$J = I / S.....(III.1)$$

Alors:

$$I= J \times S(III.2)$$

Avec:

J : densités de courant (A/dm²).

I : le courant (A).

S : la surface de l'échantillon (dm²).

L'électrodéposition se fait pendant 30 min pour chaque dépôt.



Figure III.4 : Dispositif expérimental de l'électrodéposition Ni-P.

III-3.2.2/ Bain d'électrodéposition :

Le bain électrolytique utilisé est un mélange d'espèces solubles du métal à déposer dans **200 ml** d'eau désilé, qu'il est agité par un agitateur magnétique pendant **3 jours**. Sa composition est donnée dans le tableau ci-dessous :

Composition	Masse (g)
Sulfate de nickel ($\text{Ni SO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$)	10.5
Hypophosphite de sodium ($\text{Na H}_2\text{p o}_2$)	3.51
Acide borique (H_3BO_3)	4.94
Saccharine	0.18
Chlorure de sodium (Na Cl)	8.17

Tableau III.3 : Compositions du bain électrolytique.

III-3.2.3/ Les conditions opératoires:

- ✓ $T=70^{\circ}\text{C}$,
- ✓ $J=3$ (A/dm²)
- ✓ $t=30$ min.

III-4/ Méthode d'évaluation de la corrosion:

III-4.1/ Méthode de la masse perdue :

Cette méthode consiste à exposer des échantillons à un milieu corrosif au cours d'un temps déterminé et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après chaque essai.

III-4.2/ Dispositifs de la masse perdue:

- Un bain marie a été utilisé pour le maintien l'électrolyte à la température désirée.
- Des béchers de 300ml.
- Des pinces en plastique utilisés pour maintenir les échantillons.
- Une balance de précision.

III-4.3/ Protocole de la masse perdue :

Cette technique ne nécessite pas un appareillage compliqué. Son principe consiste à mesurer la masse des échantillons avant et après immersion dans le milieu agressif (H Cl) en présence et en absence de l'inhibiteur (A) pendant 15 jours. Les dimensions des échantillons utilisés sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Les éprouvettes sont des parallélépipèdes de dimensions (x*y*z) Cm. Les pièces métallique, fixées avec des pinces en plastique, sont introduites dans des béchers de 300 ml contenant une solution agressive de H Cl, sans et avec l'inhibiteur (A) dans différentes conditions. La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la moyenne de 3 essais effectuées les mêmes conduction.



Figure III.5 : Dispositif expérimental de la méthode de la masse perdue.

III-4.4/Inhibiteur utilisé :

L'inhibiteur de corrosion est :

- L'inhibiteur (A)

III-5/ Milieux expérimentaux :

III-5.1/ Solution acide (1M H Cl):

L'électrolyte est de 300ml, on prend (24.84ml H Cl +275ml d'eau distillée).

III-5.2/ Solution acide (1M H Cl + inhibiteur) :

L'électrolyte est de 300ml, on prend (24.84ml H Cl + différentes concentrations d'inhibiteur + 250ml d'eau distillée).

Concentrations d'inhibiteur (10^{-5} mol/l)	HCl (ml)	H ₂ O (ml)
2	24.84	250
4	24.84	250
6	24.84	250
8	24.84	250

Tableau III.4 : Compositions de l'électrolyte (H Cl +inhibiteur).

III-6/Résultats et Discussions :

III-6.1/ Détermination l'épaisseur des dépôts :

Pour calculer l'épaisseur des dépôts on utilise la loi de Faraday stipule que la masse(g). On a pesé les échantillons avant (m_i), et après électrodéposition (m_f), avec une balance électronique et les résultats donnés dans le tableau avec :

$$m_{\text{dipot}} = \Delta m = m_f - m_i \dots\dots (III.3)$$

Où :

m_{dipot} : masse de dépôt.

m_f : la masse de l'échantillon après revêtement.

m_i : la masse de l'échantillon avant revêtement.

Du dépôt est proportionnelle ou courant $I(A)$ qui a traversé la cuve électrolytique au cours d'un temps de 30 minutes :

$$\Delta m = (A.I.t)/(F.Z) = \rho.s.e_{\text{th}} \dots\dots\dots(III.4)$$

$$e = \eta.e_{\text{th}} = 1/F.(A.I)/(Z.S.\rho).t = \Delta m/(\rho.s) \dots\dots (III.5)$$

Donc :

$$e = \Delta m/(\rho.s) \dots\dots\dots(III.6)$$

Avec :

e_{th} : l'épaisseur théorique du dépôt (mm).

e : l'épaisseur réelle du dépôt (mm).

η : rendement du bain de Nickel (0.98).

Δm : masse de dépôt (g).

F : constante de Faraday.

Z : nombre des électrons.

I : le courant (A).

A : masse atomique.

ρ : masse volumique de dépôt ($\rho_{\text{Ni}} = 8.9 \text{ g/ Cm}^3$).

S : la surface immergée dans le bain (dm²).

Les résultats des revêtements Nickel phosphore sont présentées dans le tableau suivant :

J(A/dm ²)	I (A)	m _i (g)	m _f (g)	Δm (g)	S (10 ⁻² dm ²)	e (μm)
3	0.06	0,705	0,7358	0. 0308	2	17.3
3	0.06	0,5046	0,5377	0.0331	1.98	18.7
3	0.06	0.7209	0,7527	0.0318	2.16	16.5
3	0.06	0.7987	0,8289	0.0302	2	16.9
3	0.06	0,3835	0,4153	0.0318	1.9	18.8

Tableau III.5: Les épaisseurs des revêtements Ni-P.

Exemple de calcul :

L'échantillon 1 :

$$e = 0.0308 \text{ (g)} / 8.9 \text{ (g/cm}^3\text{)} \cdot 2 \text{ (cm}^2\text{)} = 0.00173 \text{ (cm)} = 0.0173 \text{ (mm)} = 17.3(\mu\text{m}).$$

Remarque :

A partir de ces résultats nous remarquons que l'épaisseur augmentée avec l'augmentation de la masse des dépôts (relation proportionnelle entre l'épaisseur et la masse) et démunie avec la surface des dépôts.

III-6.2/ Mesure de la vitesse de corrosion :

Par la méthode de perte de masse la vitesse de corrosion, est déterminée par la formule suivante:

$$V_{\text{corr}} = \Delta m / S \cdot t \dots\dots\dots \text{(III.7)}$$

Avec :

V_{corr} : la vitesse de corrosion (g/cm².h)

Δm : la perte de masse en g (Δm = m₀ - m₁)

m₀(g): la masse de l'échantillon avant l'essai.

m₁(g) : la masse de l'échantillon après l'essai.

S : la surface exposée en cm².

t : le temps d'exposition dans la solution en heure.

III-6.3/ L'efficacité inhibitrice :

L'efficacité inhibitrice (E%) des composés étudiés est calculée en utilisant la relation suivante:

$$E\% = \frac{V_{corr} - V_{corr(inh)}}{V_{corr}} \cdot 100 \dots \dots \dots (III.8)$$

Tel que :

V_{corr} : la vitesse de corrosion en absence d'inhibiteur.

$V_{corr(inh)}$: la vitesse de corrosion en présence d'inhibiteur.

III-6.3/ Le taux de corrosion :

Le taux de corrosion est calculé par la formule suivante :

$$T_{corr} = (\Delta m / S.t) \times 365(g/cm^2.an) \dots \dots \dots (III.9)$$

T_{corr} : Taux de corrosion en (g/cm².an)

Δm : Différence de masse en (g); $\Delta m = m_1 - m_2$

m_1 : la masse de l'échantillon avant l'immersion.

m_2 : la masse de l'échantillon après l'immersion.

S : la surface active (cm²).

t : temps de l'exposition (jours).

III-6.4/ Le taux de recouvrement :

La valeur du taux de recouvrement de la surface du métal par l'inhibiteur adsorbé (θ) dans le domaine de température étudiée est définie par la relation suivante [2] :

$$\theta = \frac{E(\%)}{100} \dots \dots \dots (III.10)$$

Avec :

$E(\%)$: L'efficacité inhibitrice

Les résultats des calculs des revêtements Nickel phosphore sont présentés dans le tableau suivant :

	Concentration (mol/l)	m_i (g)	m_f (g)	$\Delta m''$ (g)	T_{corr} $g/cm^2.an).10^{-2}$	θ	$E(\%)$
H Cl	00	0,7358	0,7285	0. 0073	0.0592	--	--
InhiA	2.10^{-5}	0,5377	0,5369	0.0008	0, 0065	0,8832	88,32 %
	4.10^{-5}	0,7527	0,7521	0.0006	0,0050	0,9167	91,67 %
	6.10^{-5}	0,8289	0,8286	0.0003	0,0024	0,9505	95,05 %
	8.10^{-5}	0,4153	0,4143	0.0010	0,0081	0,8588	85,88 %

Tableau III.6 : Les résultats des calculs des revêtements de Ni-P.

Interprétation :

L'analyse des résultats montre clairement qu'en présence d'inhibiteur, la vitesse de

corrosion diminue, et à une augmentation du taux de recouvrement (θ), d'autre part l'efficacité inhibitrice croît avec la concentration en inhibiteur A, et atteint une valeur maximale de 95,05% en présence d'inhibiteur A, et à une concentration faible (6.10-5 mol/l). Ce comportement est dû à l'adsorption d'inhibiteur de corrosion sur les sites les plus actifs, formant ainsi une couche protectrice.

II.6.5 Isotherme d'adsorption.

Tous les métaux à un certain nombre de centres actifs sur sa surface, ce qui donne la quantité θ , qui représente les centres donnés aux particules par adsorption, L'efficacité des inhibiteurs de corrosion résident dans la capacité à être adsorbées sur la surface du métal [3]. Où, l'adsorption de molécules organiques fournit des informations sur l'interaction entre les molécules adsorbées elles-mêmes ainsi que leur interaction avec la surface de l'électrode, et cette quantité représente le taux de couverture, qui est lié aux différentes concentrations de l'inhibiteur à T (C°), et à faire le lien entre la concentration de l'inhibiteur C (inh) et le rapport Couverture θ .

Les valeurs du taux de recouvrement (θ) ont été calculées à partir de l'équation suivante [4]

$$\theta = \frac{R_{tc(inh)} - R_0}{R_{tc(inh)}} \dots \dots \dots \text{(III.11)}$$

Où

$$\theta = \frac{E}{100} \dots \dots \dots \text{(III.10)}$$

Pour connaître le type d'isotherme correspondant à l'absorption de l'inhibiteur sur la surface de l'alliage. Pour connaître le type d'isotherme correspondant à l'absorption de l'inhibiteur sur la surface de l'alliage. Nous avons essayé de corrélérer les résultats expérimentaux avec le tracé des isothermes d'adsorption. En effet, différentes isothermes d'adsorption (Langmuir, Temkin et Frumkin) ont été testées afin de trouver l'isotherme d'adsorption convenable, qui est donnée par les équations suivantes [5]

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = C_{inh} + \frac{1}{K_{ads}} \dots \dots \dots \text{(III.12) Langmuir}$$

$$C \cdot K_{ads} = \exp(-2a\theta) \dots \dots \dots \text{(III.13) Temkin}$$

$$C \cdot K_{ads} = \frac{\theta}{1-\theta} \exp^{2a\theta} \dots \dots \dots \text{(III.14) Frumkin}$$

Où (θ) est le taux de recouvrement fractionnaire; C_{inh} la concentration d'inhibiteur; K_{ads} est la constante d'équilibre du processus d'adsorption-désorption. Nous avons donné les résultats sous forme graphiques par ajustement avec l'isotherme de Langmuir, Temkin et Frumkin correspondantes aux Figures (III. 6,7,8). Afin de connaître la nature du modèle d'adsorption, nous avons calculé le coefficient de corrélation R2 pour chaque adsorption. Les résultats obtenus sont représentés sur le Tableau (III.7)

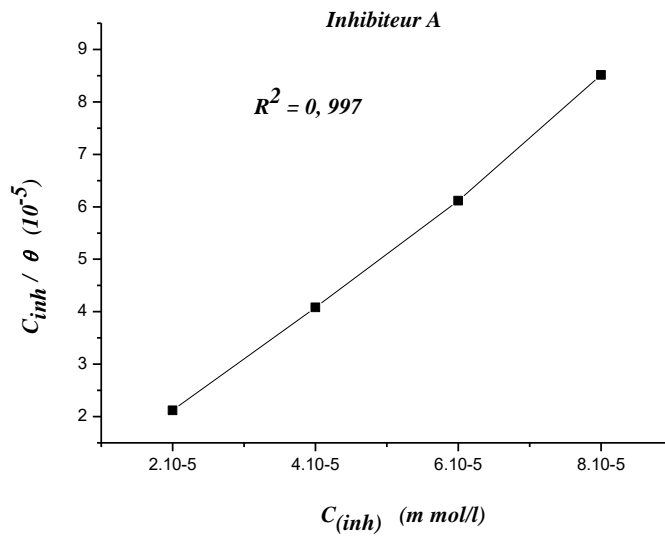


Figure III. 6: Isothermes d'adsorption de Langmuir de l'inhibiteur A sur l'alliage Ni-P dans 1M HCl à différentes concentrations.

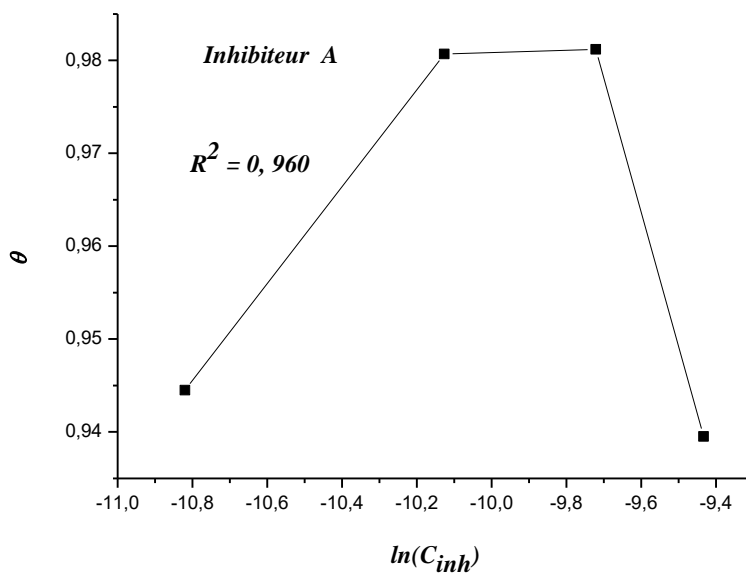


Figure III.7 : Isothermes d'adsorption de Temkin pour l'inhibiteur A sur l'alliage Ni-P dans 1M HCl à différentes concentrations.

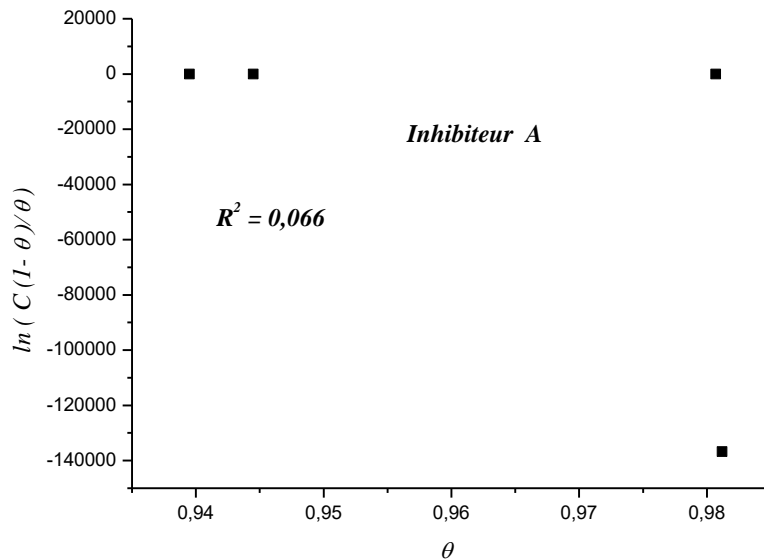


Figure III.8 : Isotherme d'adsorption de Frumkin pour l'inhibiteur A de corrosion sur l'alliage Ni-P dans 1M HCl à différentes concentrations.

Inhibiteur \ R ²	Langmuir	Temkin	Frumkin
	Inhibiteur A	0,997	0,960

Tableau III. 7 : Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes

Interprétation :

D'après les résultats de la figure (III.7), représente l'isotherme de Temkin qui est une courbe non linéaire avec des coefficients de corrélation 0.960 pour l'inhibiteur A (tableau III.7). c.-à-d. l'inhibiteur forme une couche protectrice du métal avec des réactions chimiques avec la solution.

D'après les résultats de la figure (III.8), représente l'isotherme de Frumkin avec des coefficients de corrélation 0.66 pour l'inhibiteur A (tableau III.7). c.-à-d. l'inhibiteur isoler le métal.

D'après les résultats de la figure (III.6), représente l'isotherme de Langmuir qui est une courbe linéaire avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.997 pour l'inhibiteur A (tableau III.7). La valeur de la pente est proche de 1 confirmant que l'adsorption de l'inhibiteurs obéit à l'isotherme de Langmuir.

- [1] Liping Wang, Yan Gao, Qunji Xue, Huiwen Liu, Tao Xu, Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni–Co alloy deposits, *Applied Surface Science* 242 (2005)326–332.
- [2] Rahim,A. Ahmed Zaid,T. et Chitour,C.E Essais en continu d'une charge commerciale d'Alkyl benzènes dans un réacteur a film a paroi ondulée .Tome II ,Alger, 10-13 1998.
- [3] M. T.Salah, —Corrosion inhibition efficiency and adsorption behavior of N,N-dimethyl-4-(((1-methyl-2-phenyl-2,3-dihydro-1H-pyrazol-4-yl)imino)methyl)-N-alkylbenzenaminium bro-mide surfactant at carbon steel/hydrochloric acid, *interface Journal of Molecular Liquids*, vol. 207, (2015) PP. 185–194.
- [4] Q. Qing, L. Lei, B. Wei, J. Shuan, D. Zhongtao, ‖Sodium tungstate as a corrosion inhibitor of cold rolled steel in peracetic acid solution‖ *Cor. Sci.* vol .51, N. 10, (2009),PP.2423–2428.
- [5] M. Yadav, S. Kumar, N. Tiwari, I. Bahadur, E.E. Ebenso, —Experimental and quantum chemical studies of synthesized triazine derivatives as an efficient corrosion inhibitor for N80 steel in acidic medium‖, *Journal of Molecular Liquids* ,vol. 212, (December (2015), PP. 151–167.



*Conclusion
Générale*

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail a été consacré à l'étude de comportement électrochimique et la résistance de cuivre en milieu agressif.

Nous avons commencé notre manuscrit avec un rappel sur la corrosion et les différentes méthodes de protection qui peuvent affecter, ainsi que l'électrodéposition de nickel phosphore et la technique d'évaluation de corrosion.

L'ensemble des travaux réalisés et présentés dans ce mémoire vise d'une part élaboration par voie électrochimique des dépôts nickel phosphore, Les revêtements, qui ont été réalisés par électrodéposition sur des pièces rectangulaires en cuivre à cet effet, le procédé pratiqué avec l'utilisation de source extérieur de courant ,et permet la réalisation des dépôts d'alliage nickel phosphore, d'autre part nous avons suivi leurs comportements électrochimiques dans milieu agressif (HCL) les mesures ont été réalisés par une technique gravimétrie (test de la masse perdue).

Sur la lumière des résultats et des discussions ci-dessus, on peut tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Les revêtements composites de Nickel phosphore par la méthode d'électrodéposition dépendent d'un grand nombre de paramètres tels que le pH du bain, la densité de courant, la température, le temps de l'expérience, le métal de base, etc. L'optimisation des conditions d'élaboration nous a permis d'obtenir les meilleurs dépôts à une durée de 30min, un pH=5.4 (acide), une densité de courant $J=3A/dm^2$ et à unetempérature70°C.
- ✓ En présence d'inhibiteur, la vitesse de corrosion diminue.
- ✓ L'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration d'inhibiteur.
- ✓ L'inhibiteur A est efficace pour diminuer la vitesse de corrosion.

Résumé:

Ce travail se concentre essentiellement sur l'élaboration et la caractérisation des revêtements Ni-P, ces revêtements ont été réalisés par l'électrodéposition à partir du bain électrolytique à $[J=3A/dm^2]$, et une température de $[70^{\circ}C]$ pour une durée de **30 min**, sur des substrats de cuivre, préalablement traités, dans le but d'améliorer ces propriétés. L'ensemble des travaux réalisés et présentés dans ce mémoire vise d'une part élaboration des revêtements Ni-P par voie électrochimique, d'autre part nous avons suivi leurs comportements électrochimiques ces revêtements dans milieu agressif (HCL) les mesures ont été réalisés par une technique gravimétrie (test de la masse perdue). En suite la protection des revêtements contre les effets néfastes de la corrosion par; l'ajoute de l'inhibiteur avec différentes concentrations.

A partir de ces études, plusieurs résultats, ont été obtenues.

- les revêtements sont une très bonne adhérence.
- L'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration d'inhibiteur.
- L'inhibiteur A est efficace pour diminuer la vitesse de corrosion

Abstract :

This work mainly focuses on the development and characterization of Ni-P coatings, these coatings were produced by electroplating from the electrolytic bath at $[J = 3A/dm^2]$, and a temperature of $[70^{\circ}C]$ for a period of **30 min**, on copper substrates, previously treated, in order to improve these properties. All the work carried out and presented in this thesis aims on the one hand to develop Ni-P coatings by electrochemical means, on the other hand we have followed their electrochemical behavior these coatings in aggressive medium (HCL,) the measurements have been carried out by a gravimetric technique (test of the lost mass). then the protection of the coatings against the harmful effects of corrosion by; adding the inhibitor with different concentrations.

From these studies, several results were obtained.

- the coatings is very good adhesion.
- Inhibitory efficacy increases with increasing concentration of inhibitor.
- Inhibitor A is effective in reducing the rate of corrosion

ملخص:

يركز هذا العمل بشكل أساسي على تطوير وتوصيف طلاءات Ni-P ، وقد تم إنتاج هذه الطلاءات عن طريق الطلاء الكهربائي من حمام التحليل الكهربائي عند $[J = 3A/dm^2]$ ، ودرجة حرارة $[70^{\circ}C]$ لمدة **30 دقيقة** على ركائز نحاسية سبق معالجتها لتحسين هذه الخواص. تهدف جميع الأعمال التي تم تنفيذها وتقديمها في هذه الأطروحة من جهة إلى تطوير طلاءات Ni-P بالوسائل الكهروكيميائية، ومن ناحية أخرى، فقد تابعنا سلوكهم الكهروكيميائي في هذه الطلاءات في وسط عدواني (HCL) تم إجراء القياسات بتقنية قياس الجاذبية (اختبار الكتلة المفقودة) ثم حماية الطلاء من الآثار الضارة للتآكل بفعل ؛ إضافة المانع بتركيزات مختلفة.

من هذه الدراسات، تم الحصول على العديد من النتائج:

- الطلاءات التصاق جيد جدا.
- تزداد الفعالية التثبيطية مع زيادة تركيز المثبط.
- المانع أ فعال في تقليل معدل التآكل.