

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة محمد البشير الابراهيمي- برج بوعريريج

UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
– BORDJ BOU ARRERIDJ

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

**Filière : Chimie
Spécialité : Chimie analytique**

Intitulé :

**Etude de l'effet inhibiteur de corrosion d'un
hétérocycle par la méthode gravimétrique**

Présenté Par :

BOUNEGAB Hocine & MEDJANI Abdellah

Le : 25/06/2023

Jury de soutenance :

Président	: M. HAMLA	MCB	Université Bordj Bou Arreridj
Encadreur	: F. TENNAH	MCB	Université Bordj Bou Arreridj
Examineur	: M.Y. TABABOUCHET	MAA	Université Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tout, Dieu merci de nous avoir donné la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail. Au terme duquel, on tient à exprimer nos remerciements au Dr. TENNAH Farid, de nous avoir honoré en acceptant de diriger ce travail, et qui nous a accordé le soutien et l'aide durant les différentes étapes, ainsi que pour ces précieuses orientations.

On tient également à remercier vivement Dr M. Hamla et Dr. M.Y. Tababouchet pour avoir consacré leurs temps précieux à lire et à évaluer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement Pr M. R. Khelladi pour les images d'AFM.

Nous voulons également remercier M. Slimane ingénieur de laboratoire Chimie Analytique à l'Université De Bordj Bou Arreridj pour nous avoir permis d'approfondir nos connaissances avec ses critiques minutieuses et ses précieuses orientations.

On tient également à remercier vivement Mme Habiche F. et M. Fouad Ingénieur de laboratoire Chimie Environnement à l'Université De Bordj Bou Arreridj pour avoir consacré leurs temps précieux.

Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

On tient également à associer à ce travail tous nos collègues de promotion nos Enseignants qu'on a le plaisir de côtoyer pendant cette période de formation à l'Université De Bordj Bou Arreridj.

Dédicaces

Nous dédions ce travail à nos parents qui nous ont soutenus, que Dieu les protège et prenne soin d'eux, et à tous les amis et proches qui nous ont soutenus, directement ou indirectement.

Abdellah et Hocine

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Références bibliographiques.....	2
Chapitre I : Recherche Bibliographique	3
I.1 Définition de la corrosion.....	3
I.2 Origine de la corrosion	3
I.3 Importance économique de la corrosion.....	4
I.4 Types de corrosion	4
I.4.1 Corrosion chimique (sèche).....	4
I.4.2 Corrosion électrochimique (humide).....	4
I.4.3 Corrosion biochimique (bactérienne)	5
I.5 Formes de la corrosion	5
I.5.1 Corrosion uniforme (généralisée).....	6
I.5.2 Corrosion localisée	6
I.5.2.1 Corrosion galvanique (corrosion bimétallique).....	7
I.5.2.2 Corrosion par piqûre	8
I.5.2.3 Corrosion sélective	9
I.5.2.4 Corrosion inter granulaire.....	9
I.5.2.5 Corrosion-érosion	9
I.5.2.6 Corrosion sous contrainte	10
I.5.2.7 Corrosion caverneuse	10
I.6 Facteurs influençant la corrosion.....	11
I.6.1 Influence du pH	11
I.6.2 Température.....	12
I.6.3 Effet de salinité.....	12
I.6.4 Influence d'oxygène	12
I.7 Définition d'inhibiteur de corrosion	12
I.8 Propriétés et classifications des inhibiteurs	12
I.8.1 Selon la nature électrochimique du processus.....	13
I.8.1.1 Inhibiteurs anodiques.....	13
I.8.1.2 Inhibiteurs cathodiques.....	13
I.8.1.3 Inhibiteurs mixtes	14
I.9 Nature des molécules de l'inhibiteur	14
I.9.1 Inhibiteurs organiques	14
I.9.2 Inhibiteurs minéraux.....	14
I.10 Moyens de protection de contre la corrosion.....	14
I.10.1 Protection électrochimique	14
I.10.1.1 Protection cathodique	14
I.10.1.2 Protection anodique	15
I.10.2 Protection par revêtements	15
I.10.2.1 Protection par revêtements organiques.....	15
I.10.2.2 Revêtements métalliques	15
I.10.2.2.1 Revêtements anodiques	15
I.10.2.2.2 Revêtements cathodiques	15

I.11	Classement selon les mécanismes d'action	16
I.11.1	Mécanismes d'action électrochimique	16
I.11.2	Mécanismes et principe d'action inter faciale	17
I.12	Adsorption des inhibiteurs	18
I.12.1	Généralités sur l'adsorption	18
I.12.2	Types d'adsorption	18
I.12.2.1	Adsorption physique	18
I.12.2.2	Adsorption chimique	18
I.12.2.3	Isothermes d'adsorption	19
a)	Isotherme de Langmuir	19
b)	Isotherme de Temkin	19
c)	Isotherme de Freundlich	20
d)	Isotherme de Frumkin	20
I.13	Comportement des inhibiteurs dans les milieux acides	20
I.14	Généralités sur les aciers	21
I.14.1	Différents types des aciers	21
a)	Aciers au carbone ordinaires	21
b)	Aciers inoxydables	22
c)	Les principales familles d'aciers inoxydables	23
	Références bibliographiques	24
	Chapitre II Méthodes Expérimentales	28
II.1	Introduction	28
II.2	Préparation des échantillons d'acier XC48	28
II.2.1	Acier XC48	28
II.2.2	Polissage mécanique et rinçage	28
II.3	Préparation des solutions (HCl)	29
II.4	Propriétés physicochimiques des deux inhibiteurs	29
II.5	Préparation des solutions inhibitrices	30
II.6	Méthode de la masse perdue	30
II.7	Efficacité inhibitrice	31
II.8	Matériel utilisé	31
II.8.1	Balance analytique (KERN)	31
II.8.2	Bain thermostat	32
II.9	Analyse de surface	33
II.9.1	Microscope à Force Atomique (AFM)	33
II.9.1.1	Principe de fonctionnement de L'AFM	33
II.9.2	La microscopie électronique à balayage (MEB)	34
II.9.2.1	Principe de fonctionnement de MEB	34
	Références bibliographiques	35
	Chapitre III : Références bibliographiques	36
III.1	Introduction	36
III.2	Effet du temps d'immersion	36

III.3	Effet de la concentration de HCl	37
III.4	Effet de la température	39
III.5	Effet de la concentration des deux inhibiteurs pour 3 h d'immersion.....	40
III.6	Efficacité inhibitrice des deux inhibiteurs pour 3h d'immersion	41
III.7	Effet de la concentration des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion.....	43
III.8	Efficacité inhibitrice des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion	45
III.9	Isothermes d'adsorption de Langmuir des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion	46
III.10	Analyse par microscopie à force atomique (AFM)	48
III.11	Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	50
	Conclusion générale	52

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Paramètres influant sur les phénomènes de la pile de corrosion.	3
Figure I.2: a) Distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [10].	6
Figure I.3: Morphologie de la corrosion [10].	7
Figure I.4 : Processus pris en compte dans le modèle de corrosion	7
Figure I.5: Exemple de corrosion galvanique.	8
Figure I.6: Corrosion par piqûres d'un acier qui se distingue par deux étapes : l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation (a) Amorçage et (b) propagation d'une piqûre[5]	8
Figure I.7: Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton.	9
Figure I.8: Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [16].	10
Figure I.9: Principe de la corrosion sous contrainte (généralités, exemple pour un alliage).	10
Figure I.10: Corrosion caverneuse d'un acier.	11
Figure I.11: Propriétés et classifications des inhibiteurs[44]	13
Figure I.12: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion.	14
Figure I.13: Revêtement cathodique	16
Figure I.14: Formation des couches barrières (a) cathodiques et (b) anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide.	17
Figure I.15: Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique.[34]	17
Figure I.16: Adsorption d'un inhibiteur organique sur une surface métallique en milieu aqueux.	21
Figure II.1: Acier XC48.	28
Figure II.2: polisseuse électrique utilisée et rinçage.	29
Figure II.3 ; Balance analytique utilisée pour l'étude gravimétrique.	32
Figure II.4: Bain thermostat utilisé pour l'étude gravimétrique.	32
Figure II.5: pièces d'acier xc48 trempées dans 9 bécher.	32
Figure II.6: Les principaux éléments d'un microscope à force atomique.	34
Figure II.7: Schéma d'un microscope électronique à balayage.	34
Figure III.1: Effet du temps d'immersion (en heure) sur la perte de masse de l'acier XC48 dans HCl 1M (en mg) à 25 °C.	37
Figure III.2: Effet de la concentration de HCl (en M) sur la perte de masse de l'acier XC48 (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.	38
Figure III.3: Effet de la température sur la perte de masse de l'acier XC48 (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h.	39
Figure III.4: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.	41
Figure III.5: Efficacité inhibitrice EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier dans HCl 1M pour 3h d'immersion à 25°C.	42
Figure III.6: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour 24h d'immersion à 25 °C.	44
Figure III.7: EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1M en fonction de la concentration pour 24 d'immersion à 25 °C.	45
Figure III.8: Isotherme d'adsorption de Langmuir des 2 inhibiteurs sur l'acier XC48 dans HCl 1M pour 24h d'immersion et à 25°C.	47
Figure III.9: : Micrographies (AFM) de l'acier au carbone XC48 : a) avant immersion b) après immersion dans acide HCl 1M, c) après immersion dans acide HCl 1M en présence de bipy 10 ⁻³ M d) après immersion dans acide HCl 1M en présence de phen 10 ⁻³ M.	49

Figure III.10: Micrographies (MEB) de l'acier au carbone XC48 : a) avant immersion b) après immersion dans acide HCl 1M, c) après immersion dans acide HCl 1M en présence de bipy 10^{-3} M d) après immersion dans acide HCl 1M en présence de phen 10^{-3} M.50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Facteurs de la corrosion [19].....	11
Tableau I.2: Les différents moyens de protection contre la corrosion.	16
Tableau I.3: Aciers ordinaires ou aciers au carbone non allié[39].	22
Tableau I.4: Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles.	23
Tableau II.1: Composition chimique en %.....	28
Tableau II.2: Propriétés physicochimiques de l'inhibiteur.....	29
Tableau II.3: La gamme des concentrations utilisées pour les solutions de l'inhibiteur.....	30
Tableau III.1: Effet du temps d'immersion (en heure) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) à 25 °C.	36
Tableau III.2: Effet de la concentration de HCl (en M) sur la perte de masse de l'acier (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C	38
Tableau III.3: Effet de la température sur la perte de masse de l'acier (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.....	39
Tableau III.4: Effet de la concentration des deux inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.....	40
Tableau III.5: Efficacité inhibitrice EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier dans HCl 1M pour 3 h d'immersion à 25 °C.....	42
Tableau III.6: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour 24h d'immersion à 25 °C.....	43
Tableau III.7: Efficacité inhibitrice des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1 M à différentes concentrations pour 24 h d'immersion à 25 °C.....	45
Tableau III.8: Valeurs pour l'adsorption des 2 inhibiteurs sur la surface de l'acier XC48 selon l'isotherme de Langmuir.	46
Tableau III.9: paramètres de régression linéaire et thermodynamiques selon l'isotherme de Langmuir pour la bipy et la phen pour 24h d'immersion a 25 C.	47

LISTE DES ABREVIATIONS

C_{inh}	Concentration d'inhibiteur (M)
EI %	Efficacité inhibitrice (%)
V_{cor}	Vitesse de corrosion (mg/h.cm ²) ou (mm/an)
HCl	Acide chlorhydrique
K_{ads}	Constante d'équilibre de la réaction d'adsorption
Phen	Orthophénanthroline
Bipy	Bipyridine
Δm	Perte de masse (mg)
ΔG^o_{ads}	Energie libre standard d'adsorption (J/mol.K)
θ	Taux de recouvrement
R²	Coefficient de détermination
T	Température (K)
RMS	Rugosité d'un matériau solide (nm)

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, l'acier a pris une place prépondérante dans notre vie. En effet, grâce à son bas coût de fabrication, ses bonnes propriétés mécaniques et thermiques, ce matériau se trouve sous différentes formes et tailles, pour des applications nombreuses et variées : l'industrie du pétrole et du gaz, l'industrie automobile...etc [1].

En termes de protection, Il existe plusieurs méthodes disponibles pour protéger les métaux de la corrosion dans les milieux agressifs, comme l'utilisation d'une barrière de protection, la galvanisation, la protection cathodique, l'utilisation des solutions antirouille ou des inhibiteurs de corrosion. L'utilisation des inhibiteurs pour empêcher le processus de dissolution des métaux reste une application inévitable et très répandue, elle constitue un moyen pratique et économique pour lutter contre la corrosion [2].

Notre objectif dans ce travail est étudier expérimentalement l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC48) dans un milieu d'acide chlorhydrique d'une concentration de 1M par la technique gravimétrique en utilisant deux inhibiteurs : la bipyridine et l'orthophénanthroline Nous avons organisé la présentation de ce travail en trois chapitres.

- **Le premier chapitre** concerne des généralités sur la corrosion, les différents processus de la corrosion ainsi que les types et les facteurs de la corrosion. Nous ajoutons, les différents moyens de protection tout en insistant sur les inhibiteurs de corrosion.
- **Le deuxième chapitre** présente les étapes et explique les techniques expérimentales utilisées : la technique de la masse perdue. Notre étude est complétée par l'analyse de surface par MEB et AFM.
- Nous exposerons dans **Le troisième chapitre**, les différents résultats obtenus et leur interprétation.
- Enfin, le travail réalisé est parachevé par une conclusion générale et quelques perspectives.

- [1] F. Ouali, H. Chemache, N. Brinis. Mémoire de master "Elaboration d'un revêtement à base de polypyrrole dopé par des contre ions. Application à la protection de l'acier contre la corrosion ". P3-60 Université de Bejaia 2019.
- [2] A, Faten. Mémoire de master " Etude de la corrosion pour différents métaux (cuivre + aluminium) en utilisant les inhibiteurs " Université biskra. p11-46,2021.

Chapitre I :
Recherche bibliographique

I.1 Définition de la corrosion

D'une manière générale, la corrosion est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement conduisant à une modification des propriétés du métal, une dégradation significative de la fonction du métal et de son environnement. Cette partie bibliographique est centrée sur la corrosion humide d'un métal. La corrosion en phase aqueuse fait intervenir au moins les quatre phénomènes suivants : une oxydation du métal au niveau des sites anodiques, une réduction d'espèces en solution au niveau des sites cathodiques, une conduction ionique via l'électrolyte entre les deux sites pour l'acheminement des espèces, une conduction électronique au sein du métal pour le transfert des électrons entre les deux sites. Les sites anodiques et cathodiques peuvent être séparés physiquement [1].

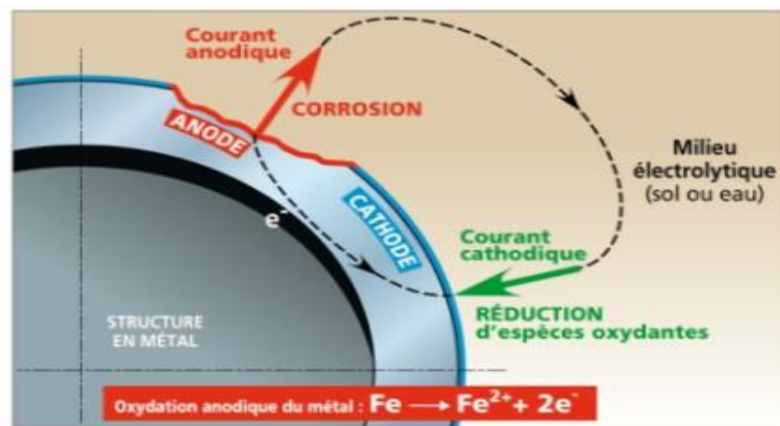


Figure I.1: Paramètres influant sur les phénomènes de la pile de corrosion

I.2 Origine de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. Les différents paramètres qui provoquent la corrosion d'un matériau sont :

- Composition chimique et microstructure du métal,
- Composition chimique de l'environnement,
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, ...etc.)
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, ...etc.)

Donc on peut dire que les phénomènes de corrosion dépendent du matériau et du milieu environnant [2].

I.3 Importance économique de la corrosion

Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants [3] :

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

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

I.4 Types de corrosion

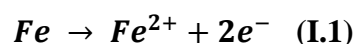
Selon la nature de l'environnement et le comportement du métal, on peut définir le type de corrosion. En général, on peut résumer les différents processus de la corrosion comme suit :

I.4.1 Corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction purement chimique entre la surface d'un matériau et un gaz ou un liquide non électrolyte. Par exemple, l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air est une corrosion chimique [4].

I.4.2 Corrosion électrochimique (humide)

C'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte. Elle est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique [5]. C'est une dégradation des matériaux et de ses propriétés par des réactions chimiques ou électrochimiques avec l'environnement. Elle est causée principalement par des réactions électrochimiques dont la plus élémentaire, pour le Fer est la suivante :



Dans le cas d'un métal en contact avec le milieu aqueux, il se produit une émission d'ions métalliques dans la solution et une modification de l'interface métal/solution, avec formation de produits de corrosion et un dégagement gazeux. Le phénomène de corrosion électrochimique est accéléré par l'hétérogénéité du matériau, le pH, la composition de la solution et par la température.

a) La corrosion en milieu aqueux

Le mécanisme de la corrosion par l'eau se résume à une action d'oxydoréduction représentée par les équations suivantes :



C'est une réaction rapide mais généralement la vitesse de corrosion est contrôlée par la réaction cathodique qui est plus lente.

Aires cathodiques $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (I.2)

Cette réaction qui est lente en milieu aqueux neutre ou basique devient rapide en milieu acide, et peut être accéléré par l'oxygène dissous suivant une réaction de dépolarisation qui est la suivante :

$2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$ (I.3)

Dans cette réaction l'oxygène dissout réagit avec l'hydrogène absorbé à la surface du Fer, si on tient compte de la réaction de dissociation de l'eau, on obtient la réaction globale en milieu aqueux :

• Réaction de dissociation de l'eau : $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ (I.4)

• Réaction globale: $Fe + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Fe(OH)_2$ (I.5)

Hydroxyde ferreux

L'hydroxyde ferreux forme une barrière de diffusion à l'interface métal - solution. Le $Fe(OH)_2$ est de couleur blanche. Le film d'oxyde ou d'hydroxyde va s'oxyder à son tour en contact de l'oxygène dissous pour donner l'oxyde ferrique hydraté ou l'hydroxyde ferrique.

$Fe(OH)_2 + \frac{1}{4}O_2 + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow Fe(OH)_3$ (I.6)

Hydroxyde ferrique

$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$ (I.7)

Fe_2O_3 est de couleur orange brun (rouille), dont la forme minérale est l'hématite. C'est un oxyde paramagnétique stable du fer, dont une forme hydratée constitue la rouille. Ainsi les films de rouille sont constitués de trois (03) couches d'oxyde de Fer par nombre d'oxydation croissant [6].

I.4.3 Corrosion biochimique (bactérienne)

C'est l'attaque bactérienne des métaux, en particulier dans les canalisations enterrées. Elle est du essentiellement aux sécrétions des microorganismes présents dans le milieu, en contact avec le métal [7].

I.5 Formes de la corrosion

Le processus de corrosion des métaux prend de nombreuses formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodée

- Corrosion uniforme
- Corrosion localisée

I.5.1 Corrosion uniforme (généralisée)

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface (Figure I.2). Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif [8]. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques. Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très coûteux [9].

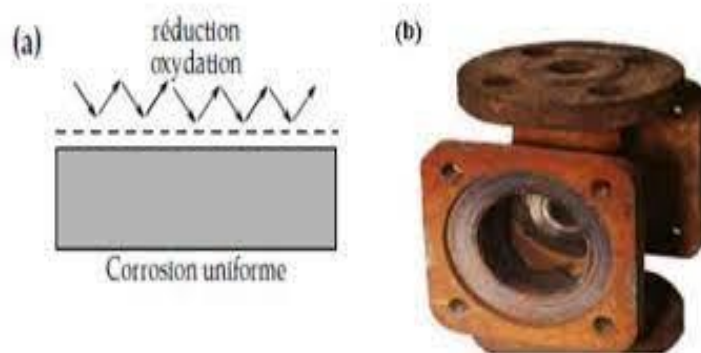


Figure I.2: a) Distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques, b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [10]

I.5.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée découle toujours de la corrosion uniforme, par couplage galvanique entre les zones hétérogènes. Il suffit alors d'une petite anode et d'une grande cathode pour générer des vitesses de pénétration locales très importantes. Ces hétérogénéités locales peuvent être préexistantes dans le métal ou dans le milieu corrosif. Contrairement à la corrosion uniforme [11], on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques (Figure I.3). Ce type de corrosion ne peut être mesuré par perte de poids ou de diminution d'épaisseur. A cet effet, on doit réaliser des observations métallographiques, et des mesures électrochimiques.

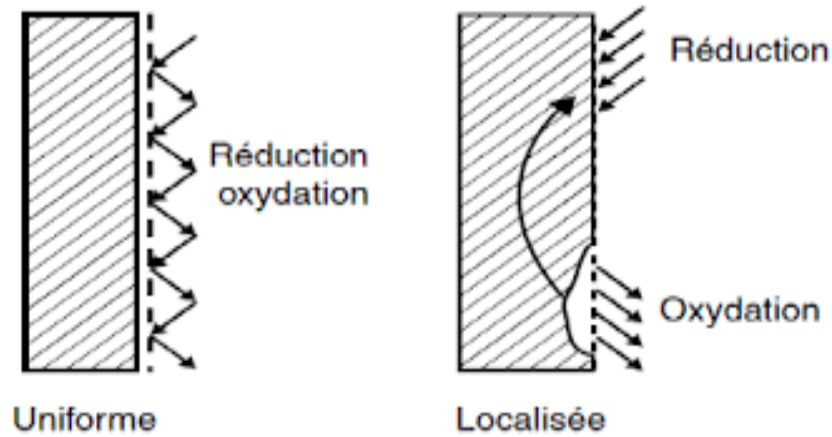


Figure I.3: Morphologie de la corrosion [10]

On distingue plusieurs formes de corrosion localisée, schématisées de la manière suivante:

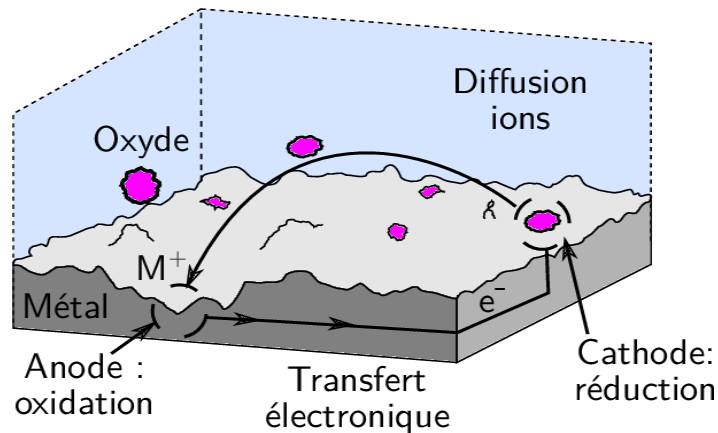


Figure I.4 : Processus pris en compte dans le modèle de corrosion

I.5.2.1 Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)

Une pile électrochimique est créée lorsque deux métaux de natures différentes sont mis en contact. Un des métaux s'oxyde et se dissout (anode), tandis que sur l'autre métal a lieu une réduction (cathode), et éventuellement formation d'une couche de produits de réaction [12]. La corrosion galvanique résulte du contact électrique entre deux métaux différents le métal le moins noble sera plus fortement oxydé que s'il n'était pas en contact avec un métal plus noble.

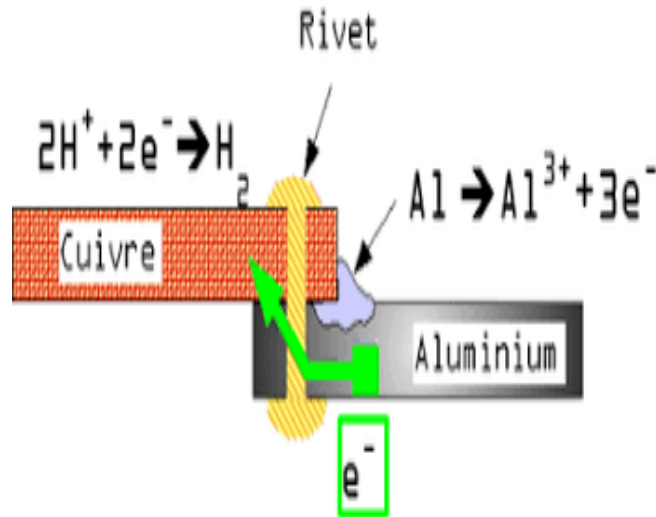


Figure I.5: Exemple de corrosion galvanique

I.5.2.2 Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres peut être assez problématique que la corrosion générale qui est clairement visible à la surface, au contraire la corrosion par piqûres n'apparaît souvent que sous forme de petits trous à la surface et ces derniers sont généralement inconnus, car ils sont cachés et couverts par les produits de corrosion, ce qui rend la corrosion par piqûres plus difficile à détecter et à prévoir. La principale cause des phénomènes de piqûres est la formation d'une cellule de corrosion stable, généralement à la surface d'un métal passif, dans cette cellule, la zone passive joue le rôle d'une cathode et le fond métallique de la piqûre se dissout sous forme d'anode [13].

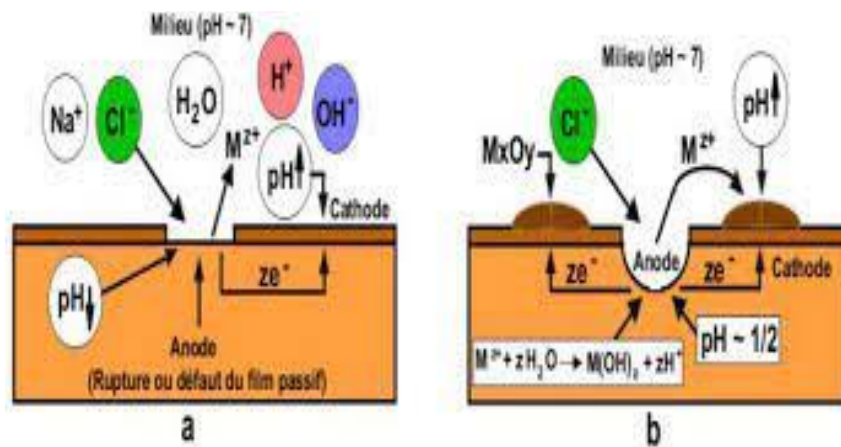


Figure I.6: Corrosion par piqûres d'un acier qui se distingue par deux étapes : l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation (a) Amorçage et (b) propagation d'une piqûre [5].

I.5.2.3 Corrosion sélective

La corrosion sélective avec certains alliages exposés à des ambiances agressives, un des constituants peut subir une attaque préférentielle. L'attaque peut être localisée et conduit à des perforations, ou répartie uniformément et aboutit à une chute des caractéristiques mécaniques. Dans le second cas les dégradations peuvent échapper à l'observation visuelle, la pièce conservant sa forme et son état de surface initial [14].



Figure I.7: Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton

I.5.2.4 Corrosion inter granulaire

Dans les alliages, sous certaines conditions de milieu, les joints de grain peuvent être plus actifs que le reste de la matrice et se corroder préférentiellement en donnant une corrosion intergranulaire ou intercrystalline. Par exemple, dans les aciers inoxydables austénitiques chauffés dans un certain domaine de température (par exemple à cause d'un traitement thermique lié à une soudure), on observe la précipitation de carbures de chrome aux joints de grain. La périphérie des grains est appauvrie localement en chrome, métal dont la présence assure une meilleure résistance à la corrosion. Pour prévenir ce problème, on procède à l'addition d'éléments d'alliage (titane ou niobium) qui forment des carbures préférentiellement au chrome. On peut également utiliser des nuances d'acier pauvres en carbone (moins de 0,03%)[15].

I.5.2.5 Corrosion-érosion

La corrosion-érosion est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide [16].



Figure I.8: Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [16]

I.5.2.6 Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte résulte de l'action commune de la corrosion et d'une contrainte mécanique (déformation du métal sous l'effet de contraintes appliquées ou résiduelles). Ce phénomène concerne un grand nombre de matériaux, notamment passivables, dont le film protecteur se rompt localement sous l'action des contraintes, entraînant alors une corrosion localisée [17].

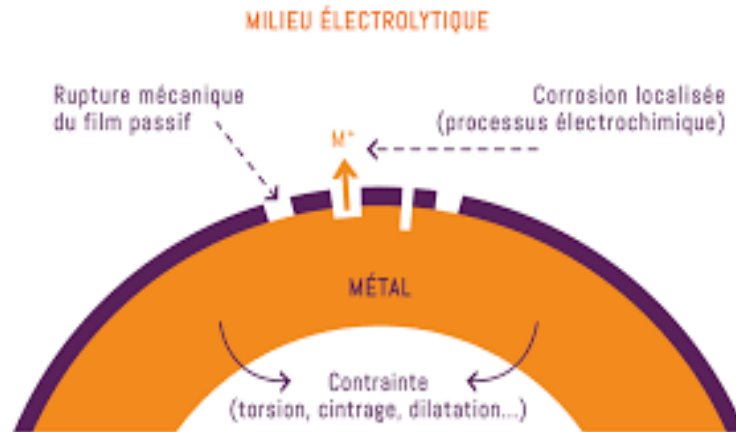


Figure I.9: Principe de la corrosion sous contrainte (exemple pour un alliage)

I.5.2.7 Corrosion caverneuse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [17].

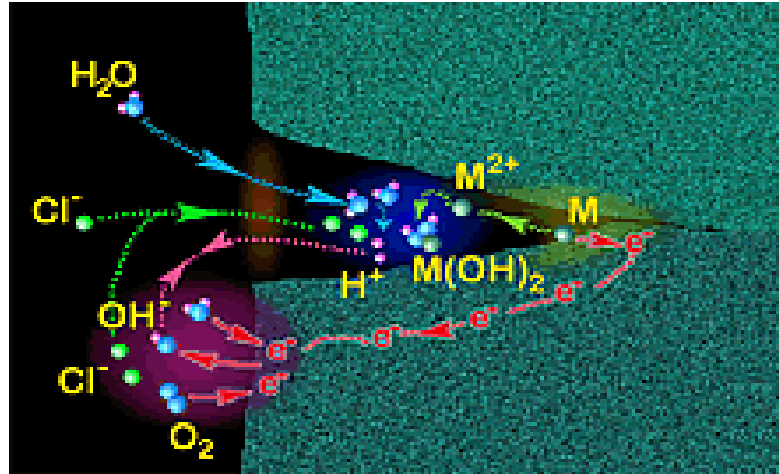


Figure I.10: Corrosion caverneuse d'un acier

I.6 Facteurs influençant la corrosion

La corrosion étant un problème d'interface métal/milieu, il est possible de classer les facteurs qui influencent les processus en deux grandes rubriques: les facteurs liés au milieu et ceux liés au métal [2]. Les principaux facteurs conférant de l'agressivité la corrosion de l'acier sont [18] :

- L'oxygène
- La salinité

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux comme le montre le tableau suivant :

Tableau I.1: Facteurs de la corrosion [19]

Facteurs définissant le mode d'attaque	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-concentration du réactif. -teneur en oxygène - pH du milieu -addition d'inhibiteurs -température -pression	-composition de l'alliage -procédé d'élaboration -impuretés -traitements thermiques -traitements mécaniques -addition protectrice.	-état de surface -forme des pièces -solllicitations mécaniques -emploi d'inhibiteurs -procédés d'assemblage	-vieillessement -température -modification des revêtements protecteurs

I.6.1 Influence du pH

Le pH de la solution est un facteur susceptible d'affecter la stabilité du film passif. L'augmentation de l'acidité et donc la quantité de protons a tendance à déstabiliser ce film. Un milieu très acide freine la déprotonisation à laquelle la formation du film passif conduit et peu

même provoquer la dissolution d'un film déjà formé[2].

I.6.2 Température

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de la corrosion, car elle diminue le domaine de stabilité des métaux et accélère la cinétique des réactions[20].

I.6.3 Effet de salinité

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux[21].

I.6.4 Influence d'oxygène

La présence d'oxygène dissout dans l'électrolyte favorise et accélère la corrosion électrochimique[22]. L'oxygène est introduit dans les canalisations lors des opérations d'arrêt, de vidanges des équipements ou par les pompes. L'oxygène, bien qu'en faible quantité (6 à 8 mg/L dans les conditions normales), agit comme dépolarisant des zones cathodiques. Il est facilement réduit entraînant une alcalinisation locale de l'eau et une augmentation de sa conductance. La combinaison entre l'eau et l'oxygène entraîne une corrosion plus importante : Dans l'eau saturée en oxygène dissous, la vitesse de corrosion initiale peut atteindre une valeur d'environ 100 mg/dm². j. Cette vitesse diminue après une période de quelques jours lorsqu'un film d'oxyde de Fer est formé pour agir comme barrière de diffusion vis-à-vis de l'oxygène. La solubilité de l'oxygène tend à diminuer quand la concentration de la solution en sel et/ou la température augmentent[23].

I.7 Définition d'inhibiteur de corrosion

C'est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration[24]. « Un inhibiteur est une substance qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact du milieu ». Un inhibiteur est donc une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement [25].

I.8 Propriétés et classifications des inhibiteurs

D'après cette définition, un inhibiteur de corrosion doit donc vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales [22] :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physicochimiques de ce dernier.

- Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants et aux températures d'utilisation.
- Être efficace à faible concentration.
- Être compatible avec les normes de non-toxicité.

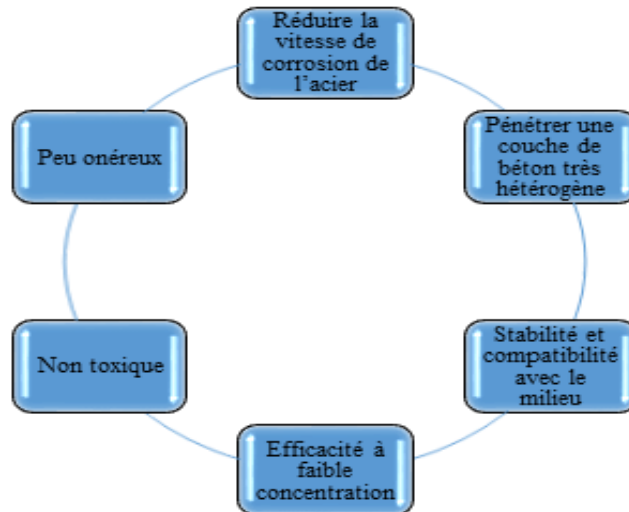


Figure I.11: Propriétés et classifications des inhibiteurs[44]

I.8.1 Selon la nature électrochimique du processus

❖ Mécanisme électrochimique

On différencie trois types d'inhibiteurs :

I.8.1.1 Inhibiteurs anodiques

Ils sont très nombreux. Ce sont des substances inorganiques comme les orthophosphates, silicates, chromates,..... Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur sur l'anode [26].

I.8.1.2 Inhibiteurs cathodiques

L'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles. Ce sont généralement des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où ils précipitent sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts. Les inhibiteurs cathodiques incluent des combinaisons de zinc, de nickel, de magnésium, des phosphates alcalins, des combinaisons d'arsenic. D'après leur mode d'action, on observe qu'ils sont utiles dans les environnements très acides [5].

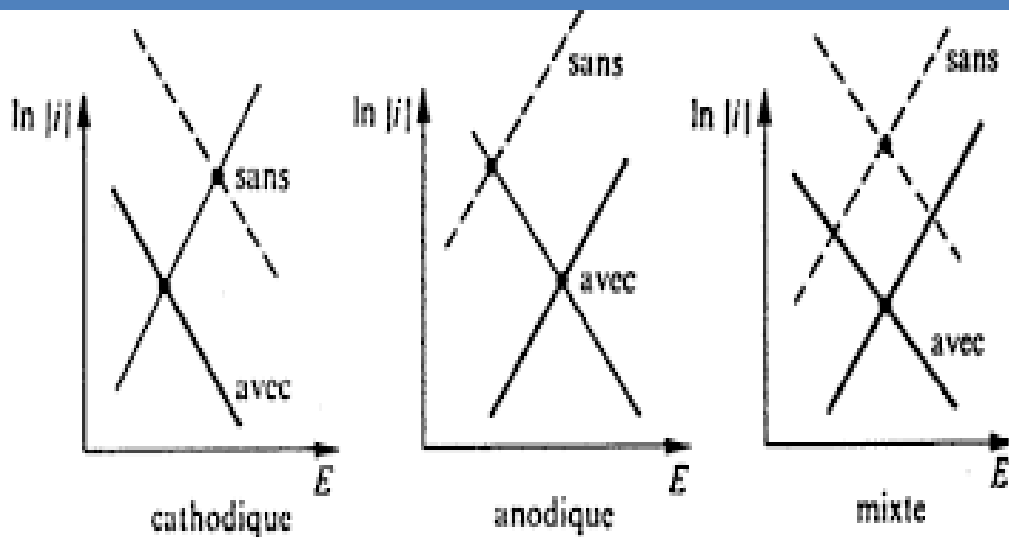


Figure I.12: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion

I.8.1.3 Inhibiteurs mixtes

Ils agissent en même temps sur les surfaces anodiques et cathodiques où ils diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais modifient peu le potentiel de corrosion[27].

I.9 Nature des molécules de l'inhibiteur

I.9.1 Inhibiteurs organiques

Ils sont utilisés en raison de leurs faibles écotoxicités. Ce sont généralement des sous-produits de l'industrie pétrolière.

I.9.2 Inhibiteurs minéraux

Ils sont utilisés dans les milieux alcalins (circuit des eaux de refroidissement). Leur utilisation diminue car ils sont nuisibles pour l'environnement [28].

I.10 Moyens de protection de contre la corrosion

Les inhibiteurs permettent d'isoler le métal de son environnement corrosif, par formation ou application d'une couche barrière à la surface du métal, afin de bloquer les échanges électroniques et/ou les échanges ioniques dans la majorité des cas [26].

I.10.1 Protection électrochimique

I.10.1.1 Protection cathodique

Elle consiste à placer le métal dans son domaine d'immunité. Elle est réalisable soit par anode sacrificielle (réactive) ou bien par courant imposé. La protection par anode sacrificielle consiste à coupler au métal à protéger un métal moins noble qui joue le rôle de l'anode. Dans la protection par courant imposé, un courant passe entre une cathode constituée du métal

à protéger et une anode inerte (graphite, plomb, métal précieux, etc.). L'intensité du courant doit être suffisante pour porter le métal à un potentiel pour lequel la réaction est anodique[29].

I.10.1.2 Protection anodique

Certains métaux tels que le fer et les aciers inoxydables peuvent aussi être protégés efficacement en les plaçant en anode et en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique. La protection anodique a trouvé une application dans la protection des réservoirs contenant en particulier de l'acide sulfurique mais la méthode est applicable à d'autres acides [30].

I.10.2 Protection par revêtements

I.10.2.1 Protection par revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu corrosif, et on les classe en trois familles[31] :

- Revêtements en bitume,
- Revêtements polymériques,
- Peintures et vernis.

I.10.2.2 Revêtements métalliques

On emploie les revêtements métalliques couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques[32] :

I.10.2.2.1 Revêtements anodiques

Dans les revêtements anodiques, le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc) qui consiste à appliquer une couche de zinc sur la surface du métal. 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. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente, donc dans ce type de revêtement l'épaisseur joue un rôle important en général, elle est comprise entre 100 et 200 μm [33].

I.10.2.2.2 Revêtements cathodiques

Dans les revêtements cathodiques, le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial[32].

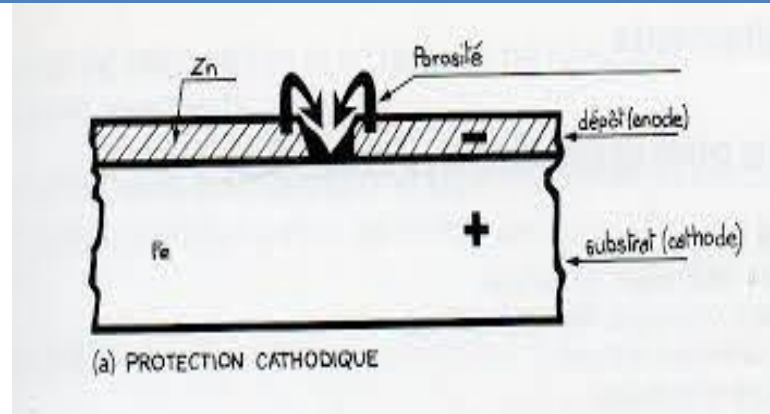


Figure I.13: Revêtement cathodique

Tableau I.2: Les différents moyens de protection contre la corrosion.

Type de protection	Technique	Principe Maintien	Méthode employée	Exemple /application
-Protection électrochimique	-Protection Anodique -Protection cathodique	Maintien du potentiel du métal à une valeur du palier de passivation. Abaissement du potentiel du métal dans son domaine d'immunité		Appl: tous les métaux capables de se passiver dans l'environnement considéré Apple : plates-formes de forage pétrolières, bateaux, conduites enterrées, installations chimiques
-Revêtement métallique	*Protection cathodique par revêtement sacrificiel *Protection anodique Étamage	* Recouvrement du métal par un métal plus réducteur qui se corrode préférentiellement (Zn, Al, Mg)	Immersion dans un bain de métal fondu, méthodes électrolytiques, dépôt physique (PVD)/chimique (CVD) en phase vapeur,	Ex : électro zingage, galvanisation Ex : revêtement par nickel (nickelage), chrome (chromage), cuivre

I.11 Classement selon les mécanismes d'action

I.11.1 Mécanismes d'action électrochimique

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique, on peut distinguer les inhibiteurs anodique, cathodique ou mixte (regroupant alors les deux premières propriétés). L'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal), soit 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), voir les deux (Figure I.14) [29].

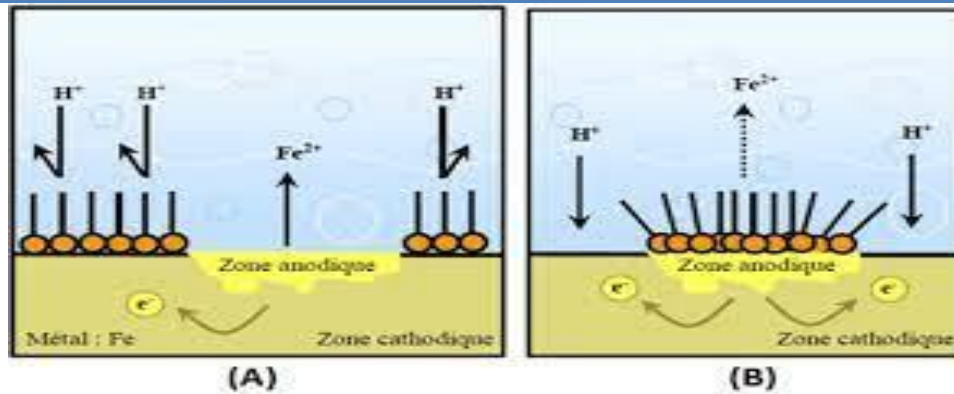


Figure I.14: Formation des couches barrières (a) cathodiques et (b) anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide

I.11.2 Mécanismes et principe d'action interfaciale

Cet autre mode de classement des inhibiteurs, les classe en tenant compte de leur mode de fixation sur le substrat métallique. Ainsi on distingue [30] :

- Les inhibiteurs d'adsorption ou "d'interface" qui apparaissent en milieu acide (film mono ou bidimensionnel).
- Les inhibiteurs dits "d'interphase" qui apparaissent en milieu alcalin (films tridimensionnels).

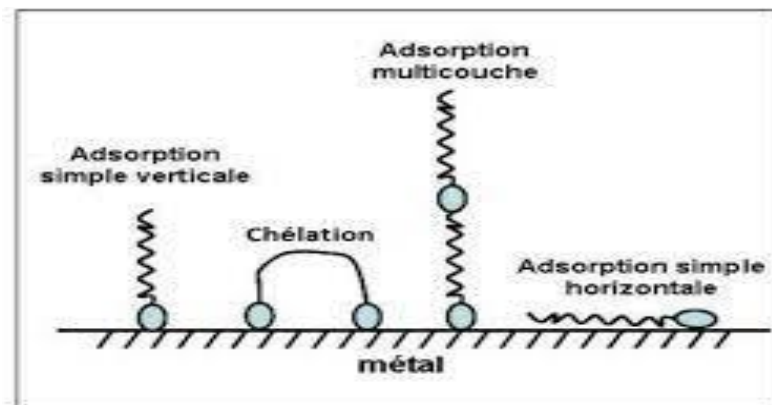


Figure I.15: Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique[34].

Les inhibiteurs de corrosion n'ont pas un mode d'action propre, unique, mais ils sont liés au système de corrosion. Un inhibiteur peut agir comme une barrière entre le métal et le milieu corrosif, et celle-ci peut être préexistante (couche d'oxyde ou d'hydroxyde déjà formée). Dans ce cas, les mécanismes font intervenir le plus souvent des processus d'adsorption et de blocage de surface. Le mode d'action peut aussi être de nature cinétique, l'inhibiteur peut alors ralentir la vitesse de la réaction cathodique ou de la réaction anodique ou agir simultanément sur les deux. L'inhibition peut aussi résulter de la formation d'un composé insoluble qui colmate les zones sensibles et la vitesse de corrosion diminue alors avec le temps[25].

I.12 Adsorption des inhibiteurs

I.12.1 Généralités sur l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface exothermique, qui consiste en l'accumulation d'une substance à l'interface entre deux phases (gaz-solide, gaz-liquide, liquide-solide, liquide-liquide, solide-solide). Son origine se trouve dans les forces d'attraction intermoléculaires, de nature et d'intensité variées, qui sont responsables de la cohésion des phases condensées, liquides ou solides [22] :

- L'adsorption d'un gaz ou liquide diminue l'énergie de la surface adsorbante.
- La chaleur d'adsorption Q_{ads} ($Q_{ads} = -\Delta H_{ads}$) dépend d'énergie des liaisons formées entre les atomes adsorbés et la surface.
- La valeur de ΔH permet de distinguer le type d'adsorption.

I.12.2 Types d'adsorption

L'adsorption des composés organiques peut être décrite par deux principaux types d'interaction à savoir l'adsorption physique et chimique. 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 [35].

I.12.2.1 Adsorption physique

L'adsorption physique est due aux forces de Van Der Waals ou aux forces électrostatiques existantes entre la charge ionique ou les dipôles de l'espèce inhibitrice et la surface du métal électriquement chargée. La charge du métal est définie par la position du potentiel de corrosion de ce métal par rapport à son potentiel de charge nulle (E_0). Lorsque le potentiel de corrosion de ce métal a une valeur inférieure à E_0 , l'adsorption des cations est favorisée ; à contrario les anions sont adsorbés quand le potentiel de corrosion du métal se trouve dans la région de potentiel positif par rapport à E_0 . Dans certains cas, la charge de la surface peut être modifiée par l'adsorption d'une couche d'ions intermédiaires [34].

I.12.2.2 Adsorption chimique

L'adsorption chimique est un mécanisme plus fréquent que le mécanisme de physisorption et conduit à une efficacité de l'inhibiteur plus importante. Il fait intervenir un transfert électronique entre les orbitales du métal et la molécule inhibitrice, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques stables. La chimisorption est un phénomène irréversible et spécifique pour chaque métal. C'est un processus rapide, dépendant de la température et caractérisé par une grande énergie d'activation. La tendance à une forte adsorption augmente quand les électrons sont moins liés à l'atome donneur ; 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 [35]. L'efficacité de l'inhibition augmente dans l'ordre suivant :



I.12.2.3 Isothermes d'adsorption

La relation, à une température donnée, entre la quantité d'une espèce adsorbée à la surface du matériau et l'activité de cette espèce dans la phase liquide ou gazeuse en contact avec le matériau s'appelle l'isotherme d'adsorption. La quantité d'espèce "i" adsorbée sur la surface Σ est exprimée par le taux de recouvrement θ_i de la surface, qui représente le rapport du nombre de sites d'adsorption effectivement occupés N_i au nombre de sites total N_0 [36] :

$$\theta_i = \frac{N_i}{N_0} \dots \dots (I.1)$$

a) Isotherme de Langmuir

Ce modèle repose sur la supposition qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, comme on néglige les interactions entre particules adsorbées, l'énergie d'adsorption est constante. L'isotherme de Langmuir est donnée par la relation (Eq.I.2) [37].

$$\theta = \frac{K.C}{1+K.C} \dots \dots (I.2)$$

θ : Le taux de recouvrement.

C : La concentration en inhibiteur.

K : Le coefficient d'adsorption.

b) Isotherme de Temkin

Dans le modèle de Temkin, l'énergie libre d'adsorption de l'adsorbat est une fonction linéaire du taux de recouvrement θ et les constantes de vitesse chimiques sont fonction de θ . Il y a attraction ou répulsion entre espèces adsorbées à la surface. L'équation de l'isotherme de Temkin est :

$$\theta = \frac{1}{\alpha \log Kc} \dots (I.3)$$

α : est un paramètre qui tient compte l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaires dans la couche adsorbée.

K : La constante d'équilibre du processus d'adsorption. Il est en général très délicat de définir à quel type d'isotherme obéit le comportement d'un inhibiteur dans un système donné. On peut simplement souligner que l'adsorption sur une surface hétérogène correspond le plus

souvent à un isotherme de type Langmuir. Ces remarques doivent conduire à une grande prudence dans le maniement des taux de recouvrement.

c) Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est bien adaptée pour décrire l'équilibre en phase aqueuse. Son équation est :

$$\text{Log } \theta = \text{log K} + \alpha \text{ log C} \dots \text{ (I.4)}$$

La loi de Freundlich convient généralement bien pour définir le comportement des adsorbants vis-à-vis des substances organiques présentes dans l'eau. Les lois sont applicables à l'équilibre. Il est bon de connaître aussi les cinétiques de l'adsorption. Cette cinétique est commandée par: les conditions de transfert des molécules du corps à adsorber au sein du liquide (vitesse de diffusion propre de la molécule, turbulence au voisinage de l'adsorbant), la concentration du soluté adsorbable, la surface offerte (liée à la quantité d'adsorbant et à la surface spécifique de l'adsorbant) et le nombre de composés à adsorber [37].

d) Isotherme de Frumkin

Elle est représentée après réarrangement par l'expression suivante (I.5) : Le paramètre (a) est une constante d'interaction entre particules adsorbées exprimant la manière dont un recouvrement accru modifie l'énergie d'adsorption de l'espèce. Si $a > 0$, les interactions entre deux espèces à la surface sont attractives, si $a < 0$, les interactions sont répulsives, si $a = 0$, l'isotherme de Frumkin se rapproche de l'isotherme de Langmuir [34]

$$\left[\frac{\theta}{1-\theta} \right] e^{2a\theta} = K \times 2a\theta \dots \text{ (I.5)}$$

I.13 Comportement des inhibiteurs dans les milieux acides

Dans les milieux acides, les inhibiteurs les plus fréquemment utilisés sont des molécules de type organique, ces inhibiteurs agissent d'abord par adsorption à la surface des métaux, avant même d'intervenir dans le processus réactionnel de corrosion pour en diminuer la vitesse. De plus, ces inhibiteurs exigent un groupe polaire. La molécule se lie à la surface par son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire, plus volumineuse, bloque partiellement la surface active. L'adsorption de la molécule organique se produit parce que l'énergie d'interaction entre la surface du métal et celle-ci est plus grande que l'énergie d'interaction entre le métal et les molécules d'eau. La liaison entre l'espèce adsorbée et la surface métallique peut être essentiellement de deux types: électrostatique ou chimique. Il faut ajouter la possibilité de liaisons par l'intermédiaire d'électrons de la molécule d'inhibiteur, ainsi que la formation possible de complexes organométalliques de surface [43].

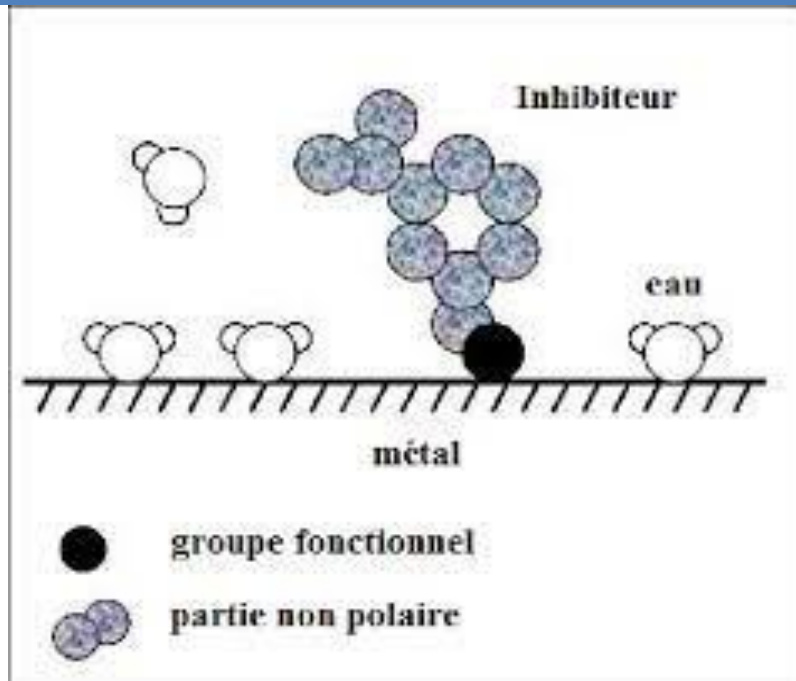


Figure I.16: Adsorption d'un inhibiteur organique sur une surface métallique en milieu aqueux

I.14 Généralités sur les aciers

L'acier est le matériau de prédilection de l'architecture durable, créative et technique. Il cumule de multiples avantages pour la construction neuve, la rénovation ou l'évolution des bâtiments. Avec l'acier, toutes les formes, toutes les dimensions sont permises. Les constructions acier sont modulables, libèrent de vastes espaces sans poteaux intermédiaires, sont faciles à entretenir et à réhabiliter et sont évolutives [38].

I.14.1 Différents types des aciers

Les aciers présentent un très grand nombre de nuance différente. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général,
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non,
- Les aciers à outil,
- Les aciers inoxydables.

a) Aciers au carbone ordinaires

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général. Ils constituent environ 80% de la production des aciers [39].

Tableau I.3: Aciers ordinaires ou aciers au carbone non allié[39]

Extra-doux	$C < 0,15$	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	charpentes métalliques, profilés, constructions mécaniques courantes, boulons, fils ordinaires
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
Dur	$0,40 < C < 0,60$	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées.
Extra-dur	$0,60 < C$	outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

b) Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques contenant du fer et du chrome et sont employés pour leurs propriétés de résistance à la corrosion. Selon la composition chimique, les aciers inoxydables sont classés en quatre catégories offrant un large panel de propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion [40]. Ce type de classification a permis de mettre en évidence quatre grandes familles d'aciers inoxydables [41] :

- **Les aciers inoxydables martensitiques** : ces alliages comprennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone pouvant atteindre environ 1%. Ils ont la particularité d'allier des caractéristiques mécaniques à une bonne résistance à la corrosion.
- **Les aciers inoxydables ferritiques** : la proportion de chrome dans ces alliages varie de 11 à 17 % et peut atteindre jusqu'à 24 à 28 %. On parle alors d'aciers ferritiques à haute teneur en chrome ou encore d'aciers super ferritiques. Ces derniers présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres et par crevasses en milieux riches en chlorures.
- **Les aciers inoxydables austéno-ferritiques** : les principales nuances contiennent 22 à 25 % de chrome et 4 à 7 % de nickel. Les incorporations de molybdène (3 ou 4 %) et d'azote (0,1 à 0,3 %) permettent de limiter les corrosions par piqûres et par crevasses. Ces derniers sont

Chapitre I : Recherche bibliographique

également appelés aciers inoxydables duplex car ils présentent une structure biphasée à température ambiante[41].

- **Les aciers inoxydables austénitiques** : Les aciers inoxydables austénitiques contiennent de l'austénite, une forme de fer qui peut absorber plus de carbone que la ferrite. L'austénite est créée en chauffant de la ferrite à 912 degrés C, moment où elle passe d'une structure cristalline cubique centrée sur le corps à une structure cristalline cubique centrée sur le visage. La ferrite peut absorber jusqu'à 2% de carbone [42].

c) Les principales familles d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont aussi classés en quatre grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure cristallographique :

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée CC),
- Les aciers martensitiques (structure quadratique),
- Les aciers austénitiques (structure cubique centrée CFC),
- Les aciers austéno-ferritiques.

Le tableau I.4 résume les principaux composants chimiques et les fourchettes de composition de ces différentes familles d'aciers inoxydables [43].

Tableau I.4: Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles

Catégories d'aciers	Composition (% pds).				
	C	Cr	NI	MO	Autres
Ferritique	<0,01	13-30	0-5	<5	Ti
Martensitique	0,05-1,2	12-18	<7	-	-
Austénitique	<0,2	16-35	7-26	<6	N, Cu, Ti
Austéno-ferritique	<0,05	18-27	4-7	<4	N (<0.3)

Références bibliographiques

- [1] Henri Joseph Mendy, thèse de doctorat " *processus de corrosion aux interfaces matériaux métalliques-environnement* " Université d'evry val d'essonne, 2008.
- [2] M. S. Nassim Bouamama, mémoire de Fin d'études Ingénieur " *Elaboration d'un revêtement à base d'oxyde de cérium destiné à la protection de la corrosion de l'acier en milieu marin*", Université abderrahmane mira-bejaia, 3, pp. 9-103, 2015.
- [3] Boukhlefa Imane, and Manel Chabira, mémoire master académique " *La protection cathodique des pipes carburant par panneaux photovoltaïque*". Université Kasdi merbah-ouargla. 2018.
- [4] K. Taliouine, mémoire master professionnel " *Effet des Parametres d'électodé position sur les dépôts de chrome*" Université kasdi merbah ouargla. 2015.
- [5] Oulabbas Amel, thèse de doctorat " *Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides*" Université badji mokhtar de annaba, pp 152. 2019.
- [6] N. Abekhti, mémoire de master " *Corrosion dans les installations pétrolières de surface : causes, effets et remèdes*" Université ahmed draia-adrar, , vol. 98,8, pp. 21-54, 2019.
- [7] M. amina and Harrath farida, mémoire de master " *etude du pouvoir inhibiteur de la phénylalanine et de la tyrosine sur la corrosion acide d'un acier doux..-effet de température et de synergie*" Université djilali bounaama à khemis miliana. p. 17_93, 2016.
- [8] G. Bilal, thèse de doctorat " *Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone dans le milieu acide par l'extrait de la plante de haplophyllum tuberculatum* " Université kasdi-merbah Ouargla.
- [9] Kemer Younes, mémoire de master " *Le comportement électrochimique de l'assemblage soudé dans les milieux H_2SO_4 0,5% et NaCl 3,5%*" Ecole nationale supérieure des mines et de la métallurgie. amar laskri. annaba, 2020.
- [10] Madani mostafa Bougherara abdelhalim, mémoire de master " *Etude l'inhibition la Corrosion d'un acier au carbone dans le milieu acide par l'extrait la plante haplophyllum tuberculatum*" Université kasdi merbah - ouergla, pp. 18-59, 2020.
- [11] Benarioua Mokhtar, mémoire de master " *inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates*" Université de batna 2 pp. 4-79, 2014.

Références bibliographiques

- [12] Abdelkrim Farid, mémoire de magistère "*Influence des enzymes sur la corrosion localisée des céramiques biomédicales ; passivité et rupture de passivité des aciers inoxydables*". Université de batna 2, 2008.
- [13] N. Ayoub, mémoire de Master "*Synthèse et étude l'effet inhibiteurs contre la corroion d'un acier au carbone A283 Gr-C par une molécule organique*". Université larbi tebessi - tebessa 2020.
- [14] R. Imane, Magistère en génie mécanique option "*Résistance à la corrosion des dépôts composites Nickel-Alumine en présence d'additifs*" Université de Batna 2 p. 10,vol 4,82. 2010.
- [15] Froment, Michel. Journal de physique "*Corrosion intergranulaire. Sur le mécanisme de la corrosion intergranulaire des matériaux métalliques.*" Université Pierre-et-Marie-Curie 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05, France.pp371-385 vol 36.(1975)..
- [16] Kir Iman, mémoire de master "*Étude de l'influence du traitement thermique sur la dissolution anodique d'un acier au carbone en milieu aqueux*" Université d'el-oued, vol. 78, pp. 22--66, 2014.
- [17] Mohamed el Mokhtar Mansouri, mémoire de master "*Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs*" Université biskra, vol. 80, pp. 19–90, 2018.
- [18] B. Walid, mémoire de master "*Etude comparative du comporte à la corrosion de deux aciers HLE avec l'étude de l'influence de la température dans H₂SO₄*" Université de Batna 2 pp. 31–68.2010.
- [19] Marmi Saida, thèse de doctorat "*Comportement a la corrosion des revetements a base de nickel et de chrome sur des substrats de cuivre*" Université mohamed khider-biskra, 2017.
- [20] Malaoui, Fatma. thèse de doctorat "*L'extrait de plante Cotyldon umbilicus-veneris L. Crassulaceaea comme inhibiteur de corrosion écologique*". Université laarbi tebessi tebessa, 2020.
- [21] Touhami Mohamed Zine, mémoire de Master "*Effet de la phosphatation au zinc sur la résistance à la corroson des aciers type C82D2*". Ecole nationale supérieure des mines et de la métallurgie. amar laskri. annaba vol. 80, pp. 40. 2020.
- [22] Z. M. A. Imane, Seghioeur, mémoire de master en chimie macromoléculaire "*Étude gravimétrique de l'inhibition de la corrosion de l'acier XC 38 par la povidone iodée en milieu HCl 1M*" Centre Universitaire Belhadj Bouchaib Ain Temouchent. pp57, 2020.

Références bibliographiques

- [23] A. Benhammouda and A. hemmal, mémoire de fin d'études ingénieur "*Caractérisations mécaniques électrochimiques d'un Jt. soudé en acier API 5L X70*" Ecole nationale supérieure des mines et métallurgie ensmm-annaba" pp. 21–84, 2016
- [24] P. Bommersbach, thèse de doctorat "*Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques*" PhD, Institute of applied sciences lyon, villeurbanne. pp16–184, 2005.
- [25] Afaf, Youcef azouz, mémoire de magistère "*Effets de la concentration de NaCl sur la corrosion de l'acier doux en présence des cations Zn^{2+} et anions CrO_4^{2-}* ". Université de Batna 2, 2010.
- [26] Labbaci Nour, thèse de doctorat "*Evaluation de l'efficacité d'un Inhibiteurs de corrosion vis-à-vis de la corrosion de l'Aluminium*" Université mohamed seddik benyahia- jijel. pp. 7–51, 2020.
- [27] M. Mouzdalifa and A.challa, mémoire de mastère "*Effet du pH sur la résistance à la Corroion des couches nickel électrodéposés*" Université biskra. pp. 26–91, 2013.
- [28] K. Faiza Gana K. Thèse de doctorat "*Contribution à l'étude des techniques de lutte biotechnologiques appliquées contre la biocorrosion des installations pétrolières*" Université m'hamed bougarade boumerdes, 2021.
- [29] Larabi Oussama, mémoire de Master en Chimie "*Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif soutenu*" Université abou bekr belkaid ". vol 4,2 .pp. 12–50, 2017.
- [30] I. Abacha, thèse de doctorat "*Influence des traitements thermiques sur les couches électrodéposés Ni-Cu-Zn*" Université Ferhat Abbas - Sétif 1. pp 32–120, 2020.
- [31] Amer Mekkaoui, mémoire de Master "*Elaboration et caractérisation des revêtements nickel déposés par voie électrochim*" Université biskra pp. 2–80, 2012.
- [32] G. Zohra, mémoire de master "*L'influence du pH sur les propriétés des revêtement Ni-Co synthétise par électrodéposition*" Université mohamed khider - biskra pp. 4–69, 2019.
- [33] B. Mokhtar, thèse de doctorat "*Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs à base de plantes*" Université de batna 2. vol4. pp104 2019.
- [34] H. Hanane, thèse de doctorat "*Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de schiff*" Université ferhat abbas-setif 1. vol18. pp190 2015.
- [35] G, Khadidja, mémoire de master "*Isothermes d'adsorption d'un polluant de l'industrie textile*" Université abdel hamid ibn badis – mostaganem pp 31-152,2019.

Références bibliographiques

- [36] Saouli Khaoula et laiadhi feriel, mémoire de master "*Etude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier C45 en milieu acide*" Université biskra. pp. 12–13, 2021.
- [37] D. Landolt, "*Corrosion et chimie de surfaces des métaux*", vol. 12. PPUR presses polytechniques, 2003.
- [38] M. Hayat, thèse de doctorat "*Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs*" Université mohamed khider-biskra. 2017.
- [39] S. Relave, thèse de doctorat "*Caractérisation et prédiction de la microstructure obtenue par fabrication additive. Application aux aciers inoxydables*" Université de Lyon, 2020.
- [40] Le Bozec Nathalie, thèse de doctorat "*Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Influence du biofilm sur les processus de corrosion*" Université de Bretagne Occidentale, 2000.
- [41] Zarouri, Koussaila, mémoire de master "*Influence de la déformation sur la cinétique de recristallisation et la structure d'un acier inoxydable austénitique 316L*". École Nationale polytechnique. 2014.
- [42] Sidhoum Zehra, mémoire de master "*Simulation du comportement mécanique d'un acier inoxydable 304L*" Université saad dahleb - blida, vol. 86, pp. 18–56, 2021.
- [43] M. Romaisaa, mémoire de master "*synthèse et caractérisation des inhibiteurs de corrosion du type tensioactif cationique*" Université saad dahleb blida. pp 34-81. 2012
- [43] Magaly Henriquez Gonzalez, thèse de doctorat "*Etude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API5L-X65 en milieu CO₂*", Institut National Polytechnique de Toulouse 2011.

Chapitre II
Méthodes Expérimentales

II.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les procédures expérimentales utilisées dans les essais de corrosion réalisés au laboratoire. Les méthodes gravimétriques sont utilisées pour déterminer la vitesse de corrosion et l'efficacité de l'inhibiteur, dont le principe est basé sur la mesure de la perte de masse effectuée par un échantillon de surface S , pendant la période d'immersion dans une solution de corrosion tout en la maintenant à une température constante.

II.2 Préparation des échantillons d'acier XC48

II.2.1 Acier XC48

Dans nos recherches, nous avons utilisé un acier à faible pourcentage de carbone : XC48. Nous avons utilisé 9 pièces d'acier XC48 de diamètre 30,0 mm et de hauteur 5,0 mm. Le tableau suivant donne la composition chimique de cet acier :

Tableau II.1: Composition chimique du XC48 en %

C	S	Mn	P	Si
0,52-0,50	$\leq 0,035$	0,50-0,80	$\leq 0,035$	0,40

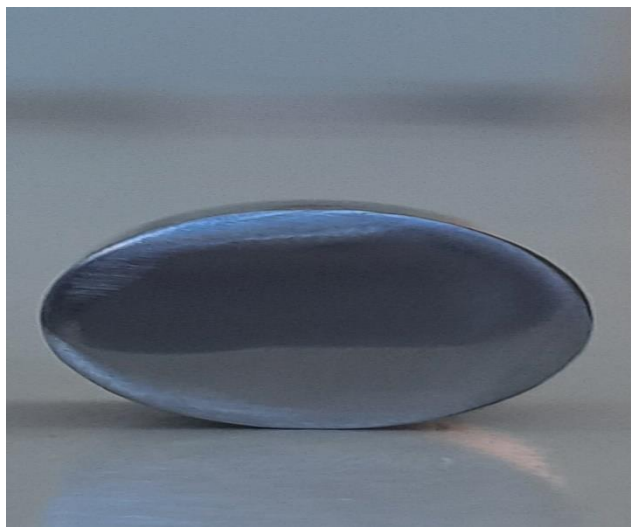


Figure II.1: Acier XC48

II.2.2 Polissage mécanique et rinçage

Pour réaliser le polissage mécanique des échantillons, du papier abrasif au carbure de silicium est utilisé (1200). Le processus de polissage doit être effectué jusqu'à l'obtention d'une surface lisse et uniforme. Il est important de noter qu'un polissage excessif peut entraîner la perte des caractéristiques et de la texture de la surface, ce qui peut nuire aux

Chapitre II : Méthodes expérimentales

performances du granulat de SiC dans certaines applications, Avant et après chaque opération, l'acier XC48 doit être rincé avec de l'eau distillée et de l'éthanol, puis séché pendant quatre minutes.



Figure II.2: polisseuse électrique utilisée et rinçage

II.3 Préparation des solutions (HCl)

Dans une fiole jaugée de 1000 mL, on prépare une solution de HCl de concentration $C=1$ M à partir d'une solution commerciale concentrée de HCl liquide (degré de pureté = 37% ; densité = 1,18 ; $C=11,975$ M) en prenant un volume $V=83,5$ mL et en complétant par l'eau distillée jusqu'à trait de jauge.

II.4 Propriétés physicochimiques des deux inhibiteurs

Tableau II.2: Propriétés physicochimiques des deux inhibiteurs

-Nom du produit	bipyridine	Orto-Phénanthroline chlorhydrate monohydratée
Formule moléculaire	$C_{10}H_8N_2$	$C_{12}H_8N_2 \cdot HCl \cdot H_2O$
Masse moléculaire (g/mol)	156,19	234,6
Point de fusion (°C)	70-72	215 - 220
Densité (kg/m ³)	500	370
Forme physique	Poudre	Poudre
Couleur	Blanc	Blanc à jaune

II.5 Préparation des solutions inhibitrices 10⁻³M

-Dans une fiole de 500 mL, on place une masse de **bipyridine** pesant 0,078g puis on ajoute du HCl 1M.

-Dans une fiole de 500 mL, on place une masse de **Phen (orthophénanthroline)** pesant 0,1173g puis on ajoute du HCl 1M.

-A partir de chaque solution mère, nous avons préparé les solutions diluées suivantes (tableau II.3), en utilisant la relation de dilution :

$$C1 V1 = C2 V2 \dots \dots \text{II. 1}$$

Tableau II.3: La gamme des concentrations utilisées pour les solutions des deux inhibiteurs

Solutions	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Concentrations (M)	10 ⁻⁵	5 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	2.5 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁴	7.5 10 ⁻⁴	10 ⁻³

II.6 Méthode de la masse perdue

La perte de masse est la méthode la plus ancienne de mesure de la corrosion. C'est une méthode simple, elle donne des informations très utiles à des prix relativement bas et sans perturbation des systèmes .Le principe de cette technique a été utilisé pour étudier l'efficacité de chaque inhibiteur[1]. Nous avons étudié les deux inhibiteurs de bipyridine et l'orthophénanthroline comme suit. Avant d'immerger l'acier XC48 dans la solution (inhibiteur + HCl), nous avons poli la surface de l'acier, l'avons rincé à l'eau distillée et à l'éthanol, puis l'avons bien séché, puis pesé l'acier puis l'avons immergé dans la solution étudiée pendant une certaine durée sous une température constante. Ensuite, l'échantillon est retiré de la solution de test et un examen visuel de sa surface a été effectué [2]. Puis l'échantillon a été rincé à l'eau distillée, séché à l'aide d'un séchoir électrique et ensuite repesé Pesez ensuite l'acier puis calculez la différence entre la valeur des masses initiales et les masses finales.

$$\Delta m = m_i - m_f \dots \dots \text{II. 2}$$

-La vitesse de corrosion (V) : est déterminée par l'équation suivante :

$$V = \Delta m / (S \times t) \dots \dots \dots \text{II. 3}$$

Où

m_i : Masse de l'échantillon avant l'essai en (mg).

m_f : Masse de l'échantillon après l'essai en (mg).

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

S : la surface totale exposée en cm².

La vitesse de corrosion s'exprime généralement par l'épaisseur perdue par année, en mm/an, ou par la perte de masse par surface et par jour, qui désigne ici la vitesse de corrosion. C'est une valeur utilisée pour comparer le comportement de différents métaux et l'effet des changements environnementaux. La vitesse de corrosion a été calculée selon l'équation suivante :

$$\theta = \frac{K \cdot \Delta m}{s \cdot t \cdot d} \dots \text{II.5}$$

Où :

K = 8,76 X 10⁴ (pour unités en mm/an) ;

Δm= perte de masse du coupon en gramme ;

t = durée de l'exposition en heures ;

S= surface du coupon en cm²

d= densité de l'acier en g/cm³.

II.7 Efficacité inhibitrice

L'efficacité inhibitrice (EI%) des composés utilisés a été calculée selon la relation suivante :

$$EI\% = \frac{V_{HCl} - V_{inh}}{V_{HCl}} \times 100 \dots \text{II.5}$$

V_{HCl} et V_{inh} représentent respectivement les valeurs de la vitesse de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

II.8 Matériel utilisé

II.8.1 Balance analytique (KERN)

Elle permet une pesée très précise (1/10 mg) de l'échantillon d'acier XC48 avant et après immersion dans une solution de corrosion pour calculer la perte de masse correspondante.



Figure II.3 : Balance analytique utilisée pour l'étude gravimétrique

II.8.2 Bain thermostat (memmert)

C'est un appareil qui fonctionne sur le principe d'un bain liquide, généralement de l'eau, dans lequel un objet est immergé à température constante et contrôlée.



Figure II.4: Bain thermostat utilisé pour l'étude gravimétrique



Figure II.5: pièces d'acier XC48 trempées

II.9 Analyse de surface

II.9.1 Microscope à Force Atomique (AFM)

Le microscope AFM (Atomic Force Microscope) permet la détection des forces d'interaction entre l'extrémité d'une pointe et la surface du matériau. Ces interactions qui dépendent beaucoup de la distance pointe- échantillon sont de type de Van der Waals. Ces forces sont faibles et trouvent leur origine dans les interactions instantanées entre les dipôles électriques des atomes ou des molécules. Si ces derniers ne sont pas polaires, les fluctuations de la densité électronique donnent naissance à des dipôles instantanés, et les forces de Van der Waals apparaissent. Comme dans le cas du STM, la pointe de l'AFM est supposée être terminée par quelques atomes ce qui permet d'étudier l'interaction interatomique. Deux modes d'interaction sont possibles.

-Mode attractif

Lorsque la distance r entre la pointe et la surface est grande (quelques dizaine de nanomètres) par rapport à la distance d'équilibre r_0 .

-Mode répulsif

Lorsque la distance r est inférieure ou égale à la distance d'équilibre r_0 .

II.9.1.1 Principe de fonctionnement de L'AFM

L'AFM permet d'analyser une surface point par point grâce à un balayage par une sonde. Cette dernière est constituée d'une pointe très fine, positionnée à l'extrémité d'un micro-levier flexible. Ce type de microscopie fonctionne en mesurant l'interaction attractive ou répulsive entre les atomes constituant la pointe nanométrique et les atomes surfaciques d'un échantillon. Quand la pointe est à proximité d'une surface, les forces d'interactions entre la pointe et l'échantillon entraînent une déviation du levier qui suit la loi de Hooke.

L'analyse de la déviation du levier, à l'aide d'un laser, permet à la fois de déterminer le parcours exact de la pointe et de mesurer les forces d'interactions entre cette dernière et l'échantillon (Figure II.6).

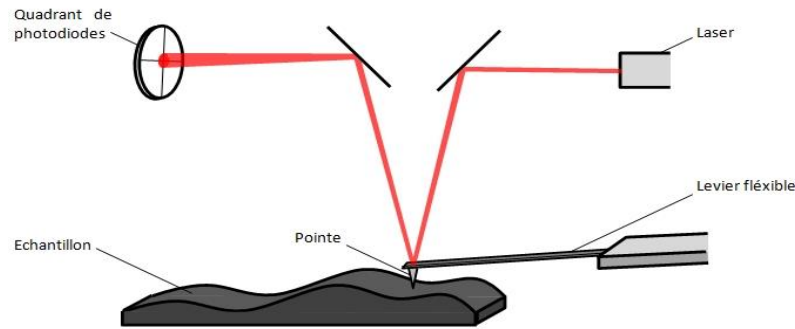


Figure II.6: Les principaux éléments d'un microscope à force atomique

II.9.2 La microscopie électronique à balayage (MEB)

C'est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

II.9.2.1 Principe de fonctionnement de MEB

Le microscope électronique à balayage (MEB) fonctionne selon le principe de réflexion, un faisceau condensé d'électrons est projeté sous vide sur l'échantillon à analyser. Des bobines de balayage permettent de faire balayer le faisceau sur l'échantillon. Les électrons réfléchis par la surface de l'objet sont captés pour reconstruire une image très agrandie ou en trois dimensions de la surface qui sera regardée sur un écran ou enregistrée. La résolution du MEB est de moins de 20 nm.

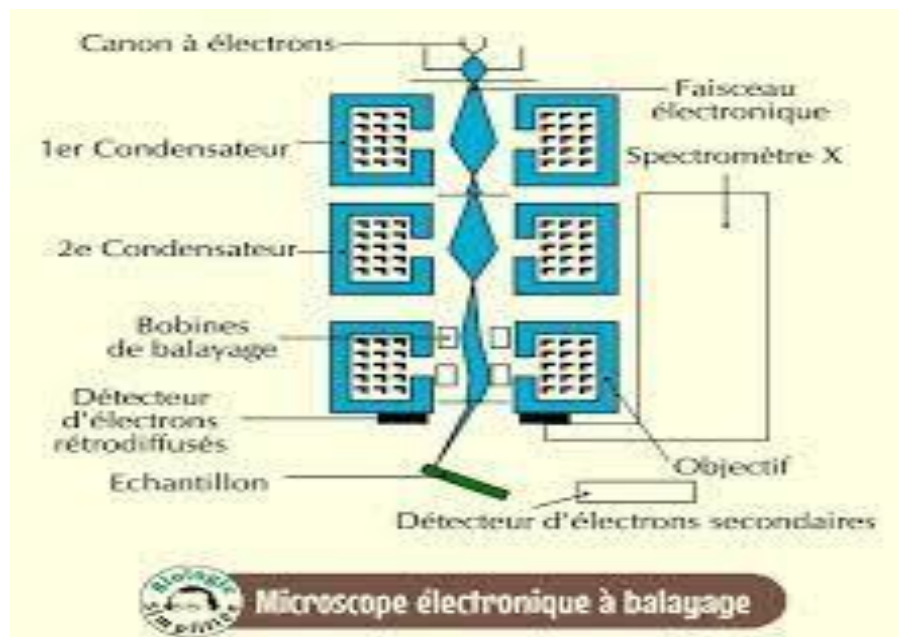


Figure II.7: Schéma d'un microscope électronique à balayage

Références bibliographiques

- [1] A. Y. Azouz, "Effets de la concentration de NaCl sur la corrosion de l'acier doux en présence des cations Zn^{2+} CrO_4^{2-} " pp. 34–65, 2010.
- [2] A, Faten, " Etude de la corrosion pour différents métaux (Cuivre + Aluminium) en utilisant les inhibiteurs " pp 32-46,2021.
- [3] M. Siham , B. Mouna, "Suivi de la corrosion de l'acier par la méthode gravimétrique" pp 55-88 , 2021.

Chapitre III :
Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de deux hétérocycles, à savoir la bipyridine et l'orto-phénanthroline à différentes concentrations sur la corrosion de l'acier au carbone XC48 dans l'acide chlorhydrique HCl (1M) en utilisant la technique de perte de masse pour déterminer leur efficacité d'inhibition. L'adsorption des molécules inhibitrices sur la surface de l'acier XC48 a été examinée par microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie à force atomique (AFM).

III.2 Effet du temps d'immersion

Le temps d'immersion de l'acier dans un milieu acide est un paramètre très important dans l'étude du développement de la corrosion, c'est pourquoi des essais ont été menés pour mesurer la perte de masse (Δm_{moy}) de l'acier XC48 dans HCl 1 M pour différents temps d'immersion (1h _ 2h _ 3h _ 4h _ 5h _ 6h) à la température 25°C .

Les résultats (ΔM) obtenus pour les durées d'immersion étudiées et répétées trois fois ainsi que leur moyenne sont groupés dans le tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1: Effet du temps d'immersion (en heure) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) à 25 °C.

Temps (heure)	$\Delta M1$ (mg)	$\Delta M2$ (mg)	$\Delta M3$ (mg)	ΔM_{moy} (mg)
1.00	6.4	7.6	9.7	7.9
2.00	15.6	15.6	14.8	15.3
3.00	25.7	23.6	23.6	24.3
4.00	40.7	38.1	41.6	40.1
5.00	49.0	47.7	52.8	49.8
6.00	54.7	54.0	51.7	53.5

A partir de ces résultats, nous avons tracé ci-dessous la courbe de la perte de masse par corrosion d'acier XC48 (Δm_{moy}) en fonction de temps d'immersion.

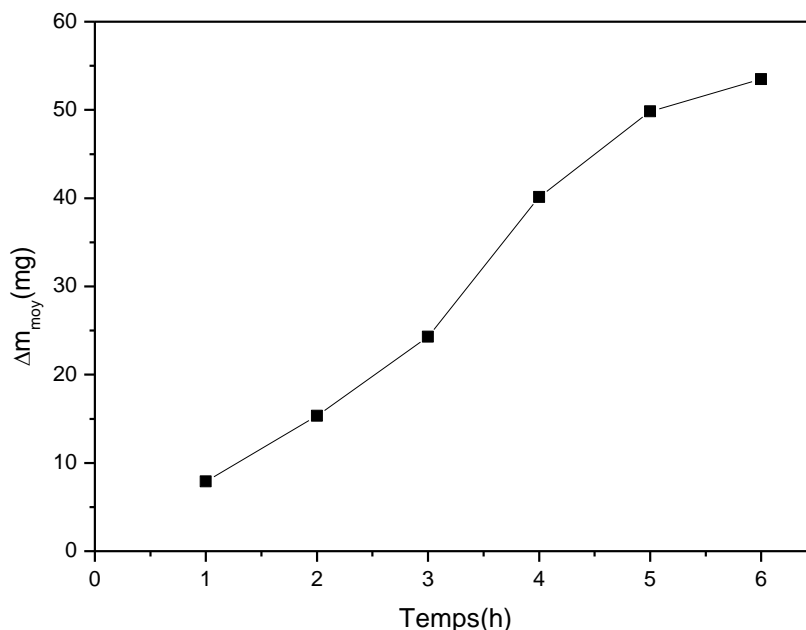


Figure III.1: Effet du temps d'immersion (en heure) sur la perte de masse de l'acier XC48 dans HCl 1M (en mg) à 25 °C

Sur la figure III.1, nous pouvons voir que de perte de masse suit une courbe ascendante. Toute augmentation du temps provoque une augmentation rapide des valeurs de perte de masse : pour un temps d'immersion de 1 heure, la perte de masse prend la valeur la plus petite de 7.9 mg alors que pour un temps d'immersion plus long de 6 heures, la perte de masse prend la plus grande valeur de 53.5 mg.

III.3 Effet de la concentration de HCl

Parmi les facteurs influant sur la corrosion de l'acier XC48 et contrôlant son comportement électrochimique figure l'acidité de la solution. Pour un temps d'immersion de 3 heures, nous avons réalisé des essais pour mesurer la perte de masse après immersion des échantillons d'acier dans une solution d'acide chlorhydrique à différentes concentrations à une température de 25°C.

Les résultats (ΔM) obtenus pour les concentrations d'acide HCl étudiées et répétées trois fois ainsi que leur moyenne sont groupés dans le tableau III.2 ci-dessous :

Table III.2: Effet de la concentration de HCl (en M) sur la perte de masse de l'acier (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.

C_{HCl} (M)	ΔM_1 (mg)	ΔM_2 (mg)	ΔM_3 (mg)	ΔM_{moy} (mg)
0.10	8.6	13.7	10.2	10.8
0.50	18.0	16.7	17.5	17.4
1.00	25.7	23.6	23.6	24.3
1.50	33.5	30.9	34.6	33.0
2.00	53.7	53.1	53.8	53.5
2.50	60.1	62.3	62.4	61.6
3.00	64.7	62.6		63.7

A partir de ces résultats, nous avons tracé ci-dessous la courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la concentration en HCl.

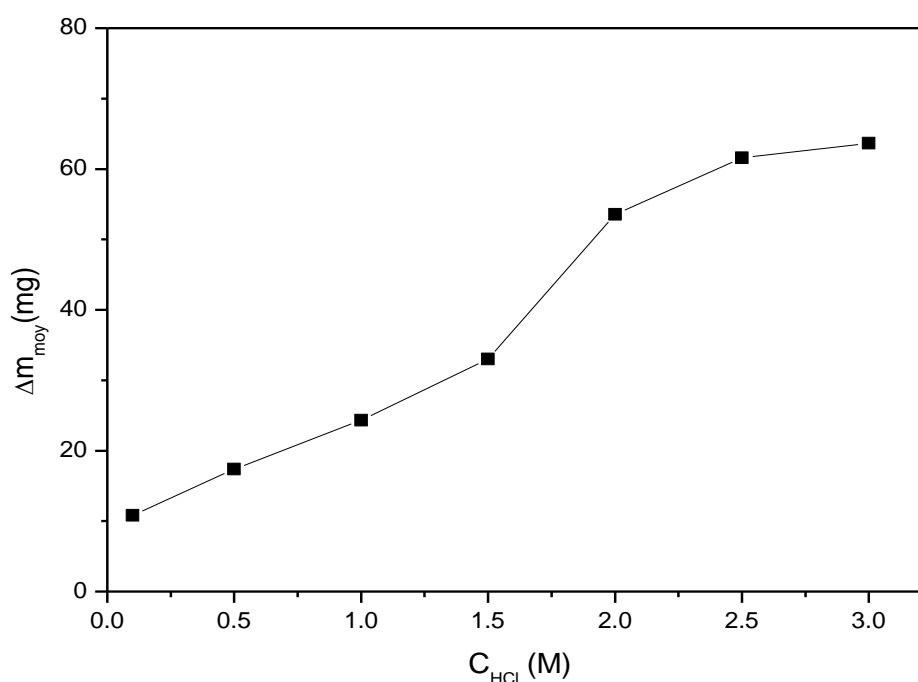


Figure III.1: Effet de la concentration de HCl (en M) sur la perte de masse de l'acier XC48 (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C

D'après le tableau et la figure ci-dessus, on peut remarquer qu'à faible concentration en HCl (0.1M), la perte de masse est faible (10.8 mg) mais lorsque l'acier XC48 est plongé dans des solutions de concentration de plus forte valeur d'acidité HCl (3M), la valeur de la perte de masse est plus grande (63,7 mg). Ces résultats montrent que la perte de masse croît avec l'augmentation des valeurs de la concentration en HCl, ce qui est dû à l'augmentation de la concentration en ions hydrogène, qui est la principale cause de corrosion.

III.4 Effet de la température

La température est un des facteurs expérimentaux qui peut modifier le comportement de la matière dans un environnement corrosif. Pour étudier l'effet de la température, nous avons effectué des tests de perte de masse de l'acier XC48 dans une solution d'acide chlorhydrique 1M à différentes températures (25°C, 35°C, 45°C et 55°C).

Les résultats (ΔM) obtenus pour les températures étudiées et répétées trois fois ainsi que leur moyenne sont groupés dans le tableau III.3 ci-dessous :

Tableau III.3: Effet de la température sur la perte de masse de l'acier (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h.

Température (°C)	ΔM_1 (mg)	ΔM_2 (mg)	ΔM_3 (mg)	ΔM_{moy} (mg)
25	25.7	23.6	23.6	24.3
35	82.0	81.8	80.5	81.4
45	310.9	310.6		310.8
55	724.7	741.7		733.2

A partir des résultats obtenus, nous avons tracé la courbe d'évolution ci-dessous de la perte de masse moyenne de l'acier XC48 aux différentes températures étudiées.

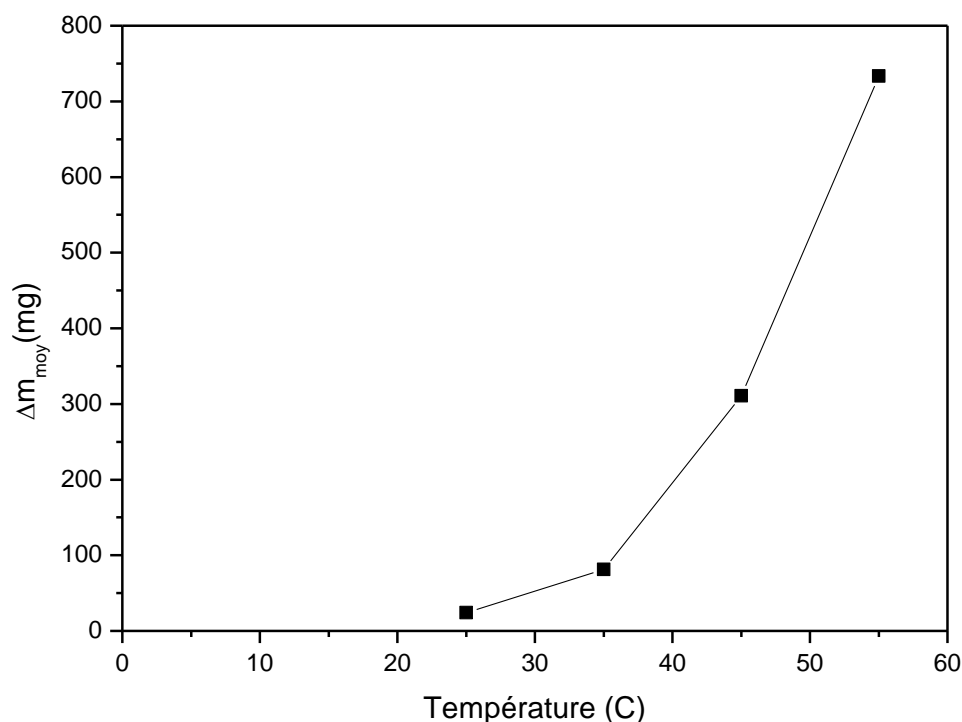


Figure III.2: Effet de la température sur la perte de masse de l'acier XC48 (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après la figure III.3, on peut noter que la perte de masse est faible pour la température 25°C (24,3 mg) mais augmente pour 35°C (81,4 mg) et 45°C (310,8) puis atteint une valeur maximale à 55°C (733,2 mg). L'analyse des résultats ci-dessus montre que la perte de masse de l'acier XC48 en milieu HCl 1M augmente avec la température. Ce comportement peut être attribué à l'augmentation de la vitesse de la réaction de corrosion entre l'acier et les ions oxydants de la solution corrosive avec la température.

III.5 Effet de la concentration des deux inhibiteurs pour 3 h d'immersion

La comparaison des performances de systèmes inhibiteurs comme moyen de protection contre la corrosion permet de quantifier leur efficacité. A cet effet nous avons effectué des tests pour mesurer la perte de masse de l'acier XC48 après immersion à 25°C dans des solutions de bipyridine et phénanthroline étudiées séparément et à différentes concentrations: 10^{-5} M, $5 \cdot 10^{-5}$ M, 10^{-4} M, $2,5 \cdot 10^{-4}$ M, $5 \cdot 10^{-4}$ M, $7,5 \cdot 10^{-4}$ M et 10^{-3} M. Les moyennes des résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.4 qui montre clairement l'effet de la concentration des inhibiteurs sur la vitesse de corrosion.

Tableau III.4: Effet de la concentration des deux inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C.

C_{inh} (M)	ΔM_{moy} (mg) Bipy	ΔM_{moy} (mg) Phen
0	24.3	24.3
0.00001	22.1	21.8
0.00005	19.2	15.4
0.00010	14.6	13.9
0.00025	8.7	11.2
0.00050	4.7	10.2
0.00075	3.5	8.6
0.00100	2.1	7.8

A partir de nos résultats, nous avons tracé ci-dessous la courbe d'évolution de la perte de masse de l'acier à différentes concentrations des 2 inhibiteurs étudiés séparément.

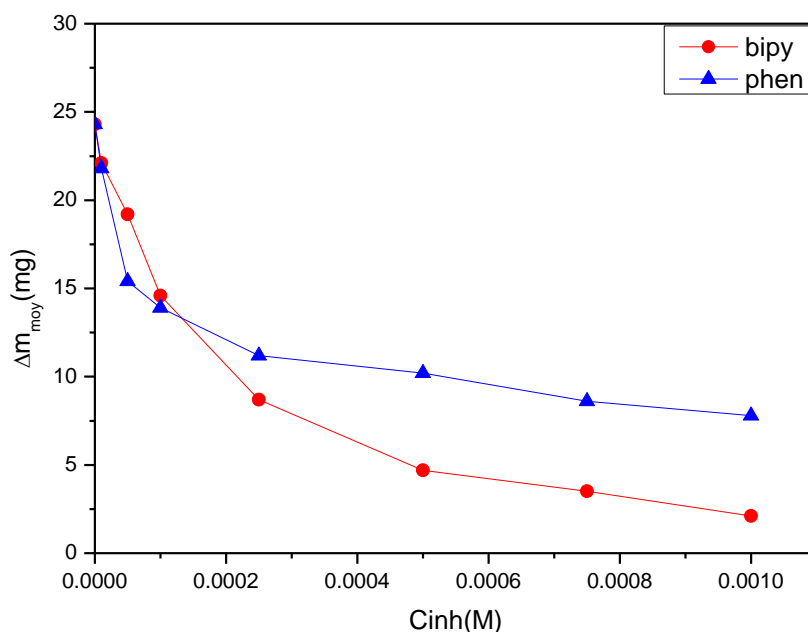


Figure III.3: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse moyenne de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour un temps d'immersion de 3 h à 25 °C

A partir des résultats présentés dans le tableau et la figure précédents, nous pouvons remarquer que la perte de masse par corrosion diminue avec l'augmentation de la concentration pour chaque inhibiteur séparément.

Les concentrations les plus faibles sont associées aux plus grandes valeurs de perte de masse : pour la concentration 10^{-5} M, la perte de masse Δm_{moy} (bipyridine) est (22.1 mg) et Δm_{moy} (phénanthroline) est (21.8 mg). A des concentrations plus grandes, la perte de masse est plus faible: pour la concentration 10^{-3} M, la perte de masse Δm_{moy} (bipyridine) est (2.1 mg) et Δm_{moy} (phénanthroline) est (7.8 mg). Cette diminution indique un taux de corrosion plus faible attribuée à l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface du XC48 et à la formation d'un film protecteur entre l'acier et le milieu corrosif.

Il est à noter aussi que pour la concentration 10^{-3} M, la perte de masse maximale en présence de la bipyridine est inférieure à celle en présence de la phénanthroline indiquant que la bipyridine possède un pouvoir protecteur plus fort que la phénanthroline pour un temps d'immersion de 3 h.

III.6 Efficacité inhibitrice des deux inhibiteurs pour 3h d'immersion

En utilisant les résultats obtenus dans l'étude précédente portant sur l'effet de la concentration de la bipyridine et la phénanthroline étudiés séparément sur la corrosion de

Chapitre III : Résultats et discussions

l'acier XC48 dans HCl 1M à 25°C, nous avons calculé l'efficacité inhibitrice (EI%) correspondante des deux inhibiteurs (Tableau III.5).

L'efficacité inhibitrice est calculée en utilisant l'équation :

$$EI(\%) = \frac{\Delta m_{cor(HCl)} - \Delta m_{cor(HCl+inh)}}{\Delta m_{cor(HCl)}} \times 100 \quad (III.1)$$

Où : $\Delta m_{cor(HCl)}$ et $\Delta m_{cor(HCl+inh)}$ sont respectivement les pertes de masse par corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

Tableau III.5: Efficacité inhibitrice EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier dans HCl 1M pour 3 h d'immersion à 25 °C.

C_{inh} (M)	EI(%) Bipy	EI(%) Phen
0.00001	9.26	10.43
0.00005	21.00	36.49
0.00010	39.92	42.80
0.00025	64.06	53.91
0.00050	80.52	58.16
0.00075	85.60	64.47
0.00100	91.36	68.04

A partir de nos résultats, nous avons tracé ci-dessous la courbe d'évolution de l'EI% à différentes concentrations des 2 inhibiteurs étudiés séparément.

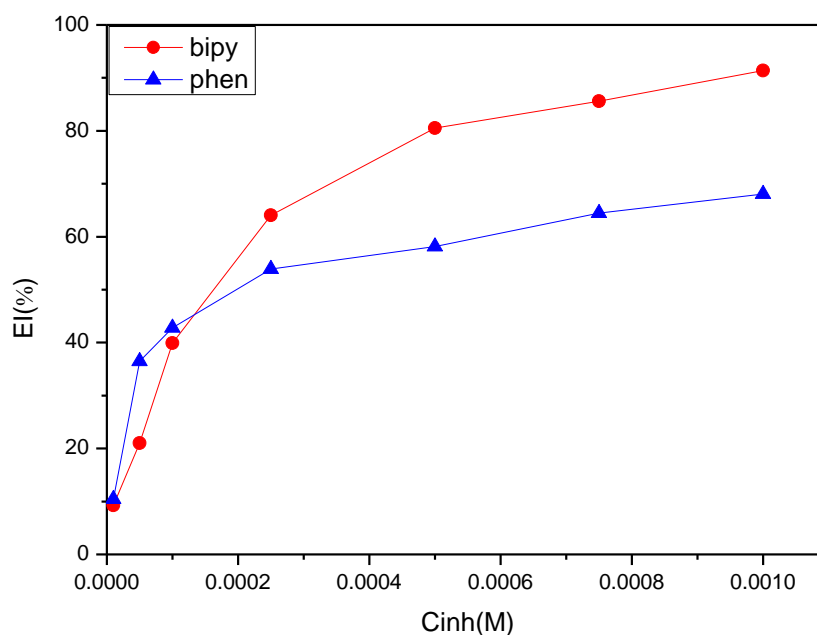


Figure III.4: Efficacité inhibitrice EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier dans HCl 1M pour 3h d'immersion à 25°C

D'après les résultats obtenus et présentés dans le tableau et la figure III.5, on constate que l'efficacité inhibitrice EI% pour chacun des deux inhibiteurs croît avec l'augmentation de la concentration. En effet pour la concentration identique $10^{-3}M$, l'EI% de la bipyridine est 91.36% alors que l'EI% de la phénanthroline est 68.04%. Ce résultat permet de conclure que l'efficacité de la bipyridine est supérieure à celle de la phénanthroline sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1M pour 3 heures d'immersion à 25°C.

III.7 Effet de la concentration des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion

Au cours des essais réalisés, il a été montré que le temps d'immersion est un facteur principal dans la corrosion de l'acier XC48. Afin de mieux comparer les 2 inhibiteurs étudiés, nous avons changé le temps d'immersion de 3 heures à 24 heures pour le test de mesure de perte de masse en présence d'inhibiteurs à différentes concentrations tout en maintenant la température à 25°C. Les résultats obtenus sont groupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.6: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour 24h d'immersion à 25 °C.

C_{inh} (M)	ΔM_{moy} (mg) Bipy	ΔM_{moy} (mg) Phen
0	519.7	519.7
0.00001	479.9	476.1
0.00005	313.4	241.5
0.00010	205.3	169.7
0.00025	166.6	144.6
0.00050	149.0	107.6
0.00075	135.5	96.7
0.00100	110.3	82.0

A partir de nos résultats, nous avons tracé ci-dessous la courbe d'influence de la concentration des 2 inhibiteurs étudiés séparément sur la perte de masse moyenne de l'acier XC48 dans HCl 1M pour un temps d'immersion de 24 heures.

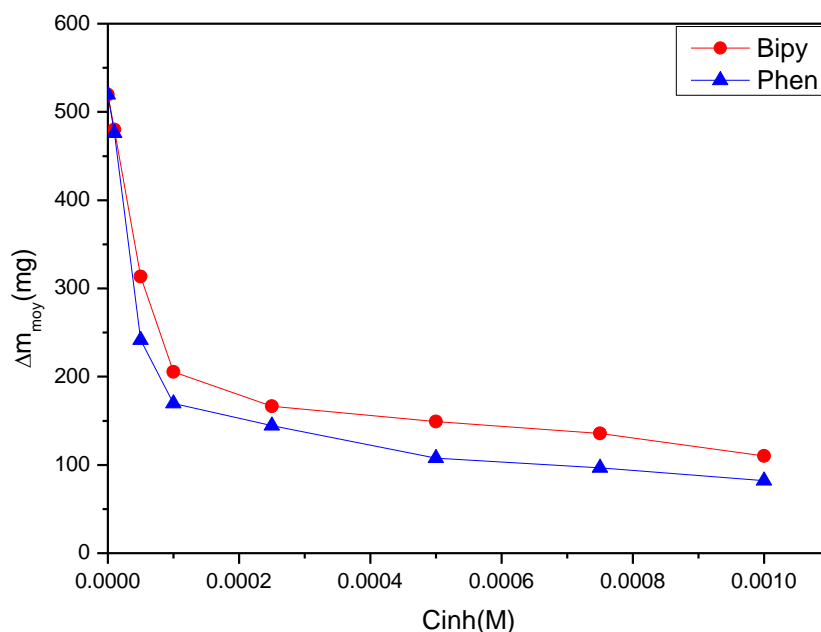


Figure III.5: Effet de la concentration des 2 inhibiteurs (en mol/L) sur la perte de masse de l'acier dans HCl 1M (en mg) pour 24h d'immersion à 25 °C

A travers les résultats présentés dans le tableau et la figure précédents, nous pouvons remarquer que la perte de masse par corrosion diminue avec l'augmentation de la concentration pour chaque inhibiteur.

Les concentrations les plus faibles sont associées aux plus grandes valeurs de perte de masse : pour la concentration 10^{-5} M, la perte de masse Δm_{moy} (bipyridine) est (479.9 mg) et Δm_{moy} (phénanthroline) est (476.1 mg). A des concentrations plus grandes, la perte de masse est plus faible: pour la concentration 10^{-3} M, la perte de masse Δm_{moy} (bipyridine) est (110.3 mg) et Δm_{moy} (phénanthroline) est (82.0 mg). Cette diminution indique un taux de corrosion plus faible attribuée à l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface du XC48 et à la formation d'une couche protectrice entre l'acier et le milieu corrosif.

Il est à noter aussi que pour la concentration identique 10^{-3} M, la perte de masse maximale en présence de phénanthroline est inférieure à celle en présence de bipyridine indiquant que la phénanthroline possède un pouvoir protecteur plus fort que la bipyridine pour un temps d'immersion de 24 heures.

III.8 Efficacité inhibitrice des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion

À partir des résultats de perte de masse du tableau III.6, nous avons calculé l'efficacité inhibitrice des 2 inhibiteurs étudiés selon l'équation III.1. Les résultats calculés sont présentés dans le tableau III.7 ci-dessous.

Tableau III.7: Efficacité inhibitrice des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1 M à différentes concentrations pour 24 h d'immersion à 25 °C.

C_{inh} (M)	EI(%) Bipy	EI(%) Phen
0.00001	7.66	8.39
0.00005	39.70	53.53
0.00010	60.50	67.35
0.00025	67.94	72.18
0.00050	71.33	79.30
0.00075	73.93	81.39
0.00100	78.78	84.22

A partir de nos résultats, nous avons tracé ci-dessous, la courbe d'évolution de l'EI% aux différentes concentrations des 2 inhibiteurs étudiés séparément sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1M pour un temps d'immersion de 24 heures.

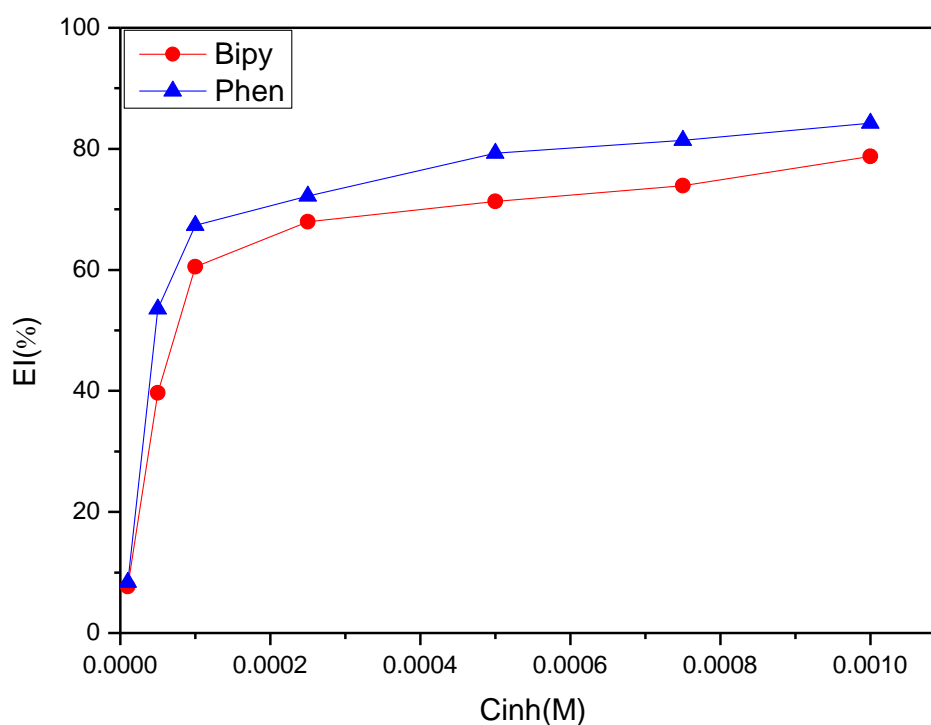


Figure III.6: EI% des 2 inhibiteurs sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1M en fonction de la concentration pour 24 d'immersion à 25 °C

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après les résultats obtenus et présentés dans le tableau et la figure III.5, on constate que l'efficacité inhibitrice EI% des deux inhibiteurs croit avec l'augmentation de la concentration. En effet pour la concentration identique $10^{-3}M$, l'EI% de la bipyridine est 78.78% alors que l'EI% de la phénanthroline est 84.22%. Ce résultat permet de conclure que l'efficacité inhibitrice de la phénanthroline est supérieure à celle de la bipyridine sur la corrosion de l'acier XC48 dans HCl 1M pour 24 heures d'immersion à 25°C.

III.9 Isothermes d'adsorption de Langmuir des deux inhibiteurs pour 24 h d'immersion

Le processus d'adsorption dépend de plusieurs paramètres : des propriétés électroniques de l'inhibiteur, de la nature de surface du métal, de la température, des effets stériques et de l'activité des sites de réaction. Les valeurs du taux de recouvrement (θ) de la surface de l'acier XC48 en présence d'inhibiteurs à différentes concentrations pour le temps d'immersion 24 heures et la température 25C sont calculés à partir des tableaux III.6 et III.7.

Le taux de recouvrement est donné par l'équation:

$$\theta = \frac{EI\%}{100} \quad (\text{III.2})$$

EI% : L'efficacité de l'inhibiteur en (%)

Selon l'isotherme de Langmuir, θ est relié à la concentration en inhibiteur C_{inh} par l'équation:

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (\text{III.3})$$

Avec K_{ads} , la constante d'équilibre du processus d'adsorption.

Tableau III.8: Valeurs pour l'adsorption des 2 inhibiteurs sur la surface de l'acier XC48 selon l'isotherme de Langmuir

C_{inh} (M)	C/ θ Bipy (M)	C/ θ Phen (M)
0.00001	$1.31 \cdot 10^{-04}$	$1.19 \cdot 10^{-04}$
0.00005	$1.26 \cdot 10^{-04}$	$9.34 \cdot 10^{-05}$
0.00010	$1.65 \cdot 10^{-04}$	$1.48 \cdot 10^{-04}$
0.00025	$3.68 \cdot 10^{-04}$	$3.46 \cdot 10^{-04}$
0.00050	$7.01 \cdot 10^{-04}$	$6.31 \cdot 10^{-04}$
0.00075	$1.01 \cdot 10^{-03}$	$9.21 \cdot 10^{-04}$
0.00100	$1.27 \cdot 10^{-03}$	$1.19 \cdot 10^{-03}$

A partir de nos résultats, nous avons tracé ci-dessous l'isotherme d'adsorption de Langmuir des 2 inhibiteurs étudiés séparément sur l'acier XC48 dans HCl 1M pour 24h d'immersion et à 25°C.

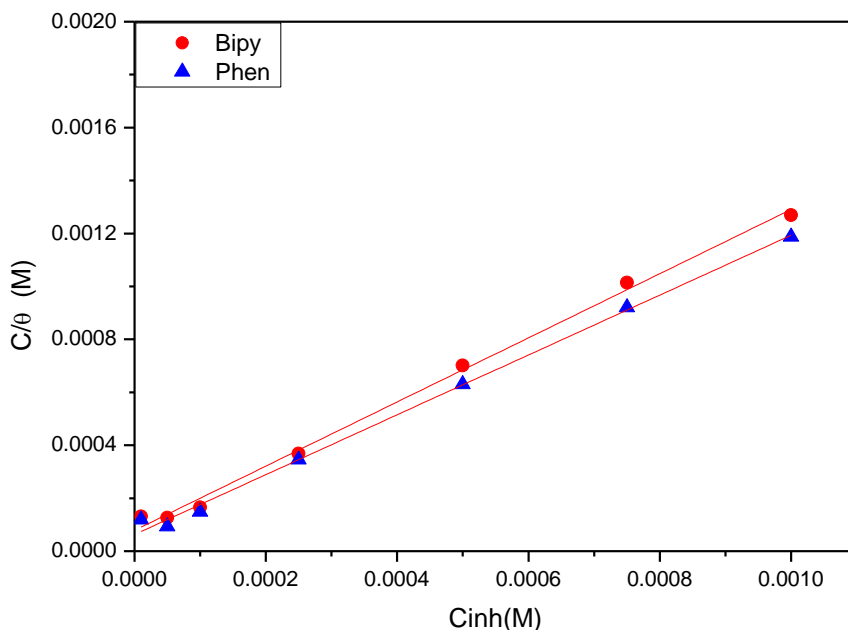


Figure III.7: Isotherme d'adsorption de Langmuir des 2 inhibiteurs sur l'acier XC48 dans HCl 1M pour 24h d'immersion et à 25°C

Pour les 2 inhibiteurs étudiés séparément, les tracés de C_{inh}/θ en fonction de la concentration de l'inhibiteur C_{inh} sont linéaires (Figure III.8). La valeur du coefficient de détermination (R^2) est très proche de 1 pour les deux composés (Tableau III.9). Ceci indique que l'adsorption des 2 inhibiteurs sur la surface de l'acier XC48 en milieu acide HCl 1M obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir.

La constante d'adsorption est calculée par la relation :

$$K_{ads} = 1/ \text{ordonnée à l'origine} \quad (\text{III.4})$$

La valeur de la constante d'équilibre (K_{ads}) est liée à l'énergie libre standard d'adsorption ΔG_{ads} par l'équation :

$$\Delta G_{ads} = -R T \text{Ln} (55,5 K_{ads}) \quad (\text{III.5})$$

Où R est la constante des gaz parfaits, K_{ads} est la constante d'équilibre et T la température en K. La valeur 55,5 est la concentration de l'eau en solution.

Tableau III.9: paramètres de régression linéaire et thermodynamiques selon l'isotherme de Langmuir pour la bipy et la phen pour 24h d'immersion a 25 C.

inhibiteur	R^2	Pente	Ordonnée à l'origine	K_{ads}	ΔG_{ads}° (J/mol.K)
Bipyridine	0.99575	1.21182	$7.87482 \cdot 10^{-5}$	12698,70295	-33363,94094
Phenanthroline	0.99614	1.1305	$6.28099 \cdot 10^{-5}$	15921,05703	-33924,25691

La valeur négative des $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ indique la spontanéité des processus d'adsorption et la stabilité de la couche d'inhibiteur protectrice adsorbée sur la surface l'acier XC48. Par ailleurs, les données de la littérature montrent que des valeurs de $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ voisines a -20 kJ/mol K sont généralement liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et les charges du métal (physisorption). En revanche, des valeurs de $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ voisines a -40 kJ/mole.K correspondent à un transfert de charges entre les molécules de l'inhibiteur et la surface du métal (chimisorption) avec formation de liaisons covalentes ou de coordination. Pour les valeurs intermédiaires, l'adsorption est qualifiée de chimique et physique à la fois. D'après le tableau III.9, les valeurs de $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ sont $-33,37$ et $-33,92 \text{ KJ/mol.K}$ pour la phénanthroline et bipyridine respectivement et correspondent au cas intermédiaire, chimique et physique à la fois.

III.10 Analyse par microscopie à force atomique (AFM)

La surface de l'acier XC48 est analysée par AFM pour déterminer sa morphologie de surface à l'échelle du micromètre et du nanomètre et estimer sa rugosité. L'AFM est souvent utilisée pour étudier l'effet des inhibiteurs de corrosion à l'interface métal-électrolyte. L'analyse de surface de l'acier XC48 par AFM a été réalisée avant immersion et après immersion de l'acier en milieu acide HCl 1M, pendant 24 heures à 25°C , en absence et en présence de phénanthroline et bipyridine étudiés séparément. Les micrographies AFM réalisées sont présentées sur les figures III.9.(a,b,c,d) et notées comme suit:

- a) acier avant immersion : l'acier présente une très faible rugosité ($R=24 \text{ nm}$).
- b) Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures : l'acier présente une rugosité très élevée ($R=508 \text{ nm}$) due à la forte corrosion de sa surface par la solution acide.
- c) Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures en présence de bipyridine a la concentration 10^{-3}M : l'acier présente une rugosité moyenne ($R=234\text{nm}$).
- d) Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures en présence de phénanthroline a la concentration 10^{-3}M : l'acier présente une rugosité faible ($R=50 \text{ nm}$).

Nous remarquons également sur les figures III.9.c et d que l'acier XC48, bien qu'immergé dans une solution HCl 1M, a diminué de rugosité, ce qui indique que les inhibiteurs dissouts ont protégé la surface de l'acier. On note également que la rugosité de surface en présence de bipyridine ($R=234 \text{ nm}$) est supérieure à la rugosité de surface en présence de phénanthroline

Chapitre III : Résultats et discussions

($R=50$ nm). Nous concluons que la phénanthroline a une plus grande efficacité de protection de surface que la bipyridine.

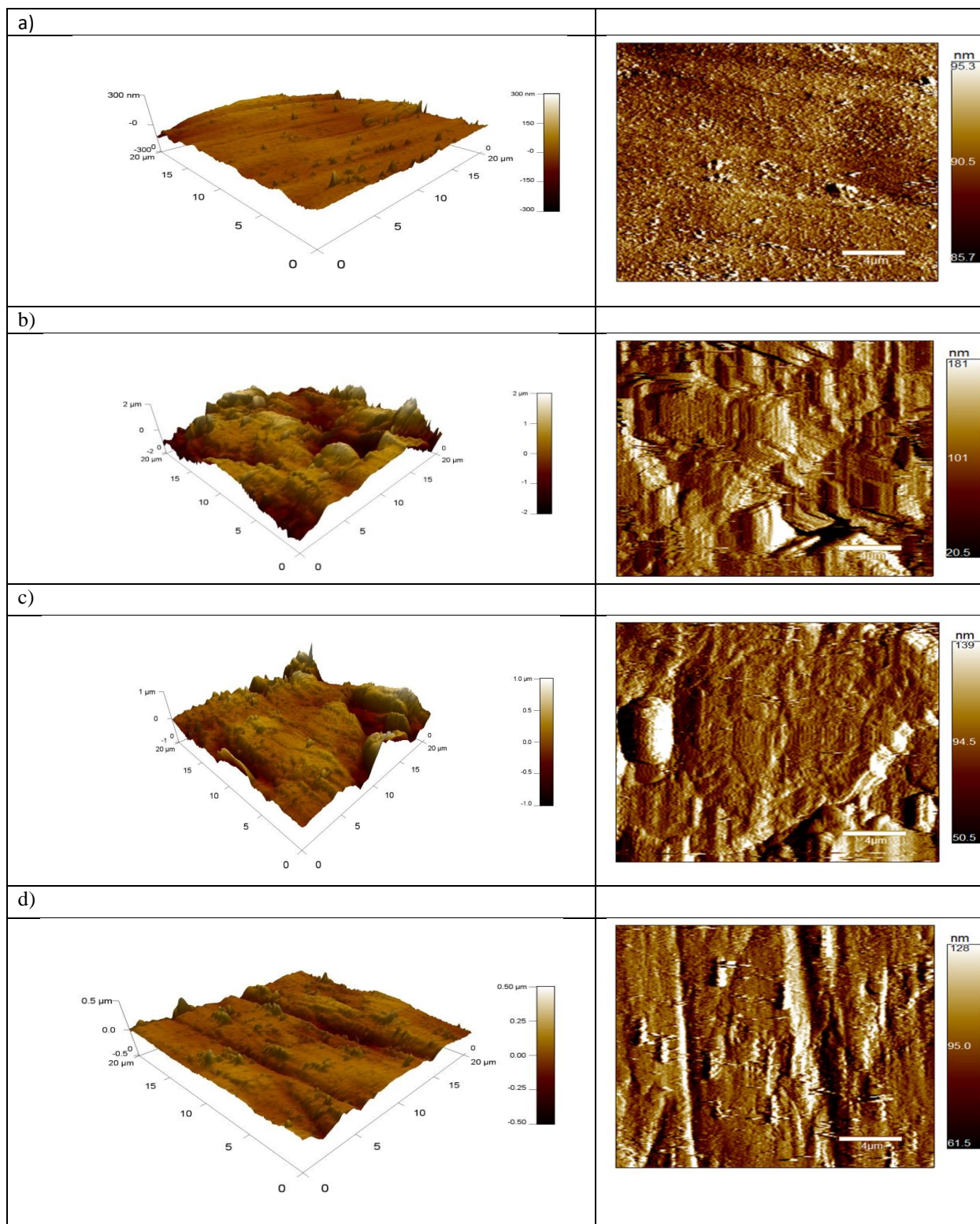


Figure III.8 : Micrographies (AFM) de l'acier au carbone XC48 : a) avant immersion b) après immersion dans acide HCl 1M, c) après immersion dans acide HCl 1M en présence de bipy 10^{-3} M d) après immersion dans acide HCl 1M en présence de phen 10^{-3} M

III.11 Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse de surface de l'acier XC48 par MEB a été réalisée avant immersion et après immersion de l'acier en milieu acide HCl 1M, pendant 24 heures à 25°C en absence et en présence de phenanthroline et bipyridine étudiées séparément. Les micrographies MEB réalisées sont présentées sur les figures III.10.(a,b,c,d) et notées comme suit:

- acier avant immersion.
- Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures.
- Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures en présence de bipyridine a la concentration $10^{-3}M$.
- Acier après immersion dans HCl 1M pendant un temps d'immersion de 24 heures en présence de phénanthroline a la concentration $10^{-3}M$.

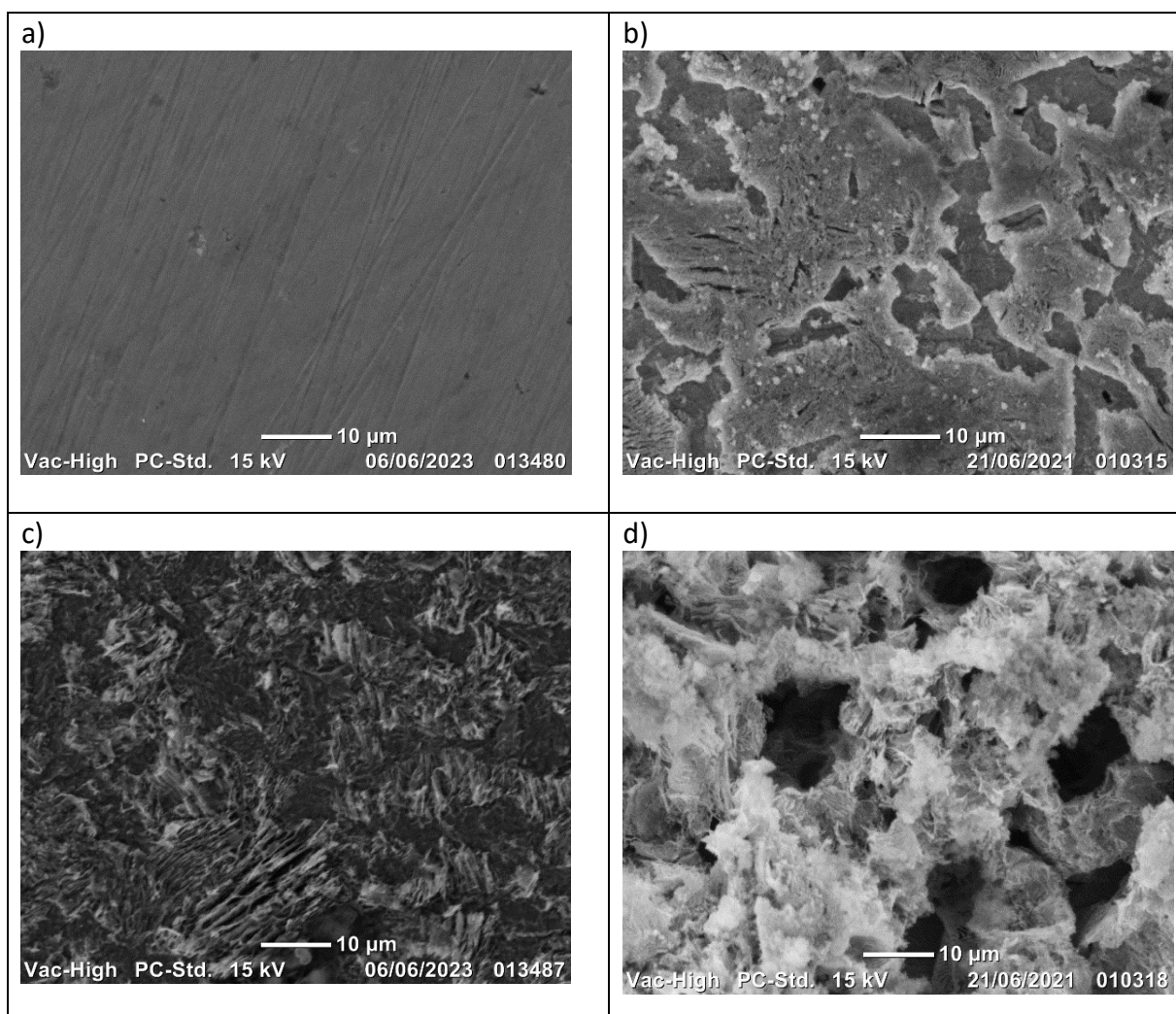


Figure III.9: Micrographies (MEB) de l'acier au carbone XC48 : a) avant immersion b) après immersion dans acide HCl 1M, c) après immersion dans acide HCl 1M en présence de bipy $10^{-3}M$ d) après immersion dans acide HCl 1M en présence de phen $10^{-3}M$

Chapitre III : Résultats et discussions

- La figure (a) montre clairement que l'acier ne se corrode pas en surface en l'absence d'inhibiteur et de HCl.
- La figure (b) montre que ce dernier est soumis à de fortes attaques et dommages, ce qui indique que l'acier a été soumis à une corrosion due à la présence des protons H^+ dans la solution acide HCl 1M.
- En présence de bipyridine et phenanthroline (figures c.d), on remarque que la surface est recouverte d'un produit qui reflète la présence d'une substance organique, et on en conclut que ces inhibiteurs protègent la surface de l'acier de la corrosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif, l'étude de l'effet d'inhibition de la corrosion de l'orthophenanthroline et de la bipyridine sur l'acier XC48 dans l'acide chlorhydrique 1M. Pour mener cette étude, nous avons utilisé la méthode gravimétrique (mesure de masse perdue par corrosion) et les techniques d'analyse de surface par MEB et AFM. Les températures étudiées varient de 25°C à 45°C, le temps d'immersion varie de 1h à 6h. L'acidité du milieu HCl varie de 0,1M à 3M. Les concentrations de chaque inhibiteur varient de 10^{-5} M à 10^{-3} M.

- ✓ Les tracés de la perte de masse en fonction des principaux facteurs affectant la vitesse de corrosion de l'acier a permis de conclure que la perte de masse de l'acier XC48 par corrosion croit avec l'augmentation du temps d'immersion, de l'acidité du milieu et de la température. La masse perdue par corrosion diminue en présence des deux inhibiteurs étudiés séparément, bipyridine et phenanthroline, sur le domaine de concentration 10^{-5} M à 10^{-3} M.
- ✓ L'efficacité inhibitrice maximale de la phenanthroline (84.22%) est meilleure que celle de la bipyridine (78.78%).
- ✓ L'adsorption de la phenanthroline et la bipyridine sur la surface de l'acier XC48 suit l'isotherme de Langmuir. Les valeurs de ΔG°_{ads} sont -33,37 et -33,92 KJ/mol pour la phenanthroline et bipyridine respectivement. L'adsorption des deux inhibiteurs est physique et chimique à la fois.
- ✓ L'analyse par AFM a révélé que la rugosité moyenne de la surface de l'acier a été fortement réduite en présence de phenanthroline (R=50 nm) en comparaison à celle observée en présence de bipyridine (R=234 nm). Ceci confirme la formation d'une couche d'inhibiteur adsorbée sur la surface de l'acier XC48.
- ✓ L'analyse par MEB a permis de vérifier l'existence d'une couche d'inhibiteur de phenanthroline et bipyridine et a confirmé les résultats obtenus par AFM.

Les résultats obtenus permettent de conclure que la phenanthroline possède des propriétés intéressantes d'inhibition de la corrosion de l'acier XC48 en milieu HCl 1M et confirme son efficacité par rapport à la bipyridine.

Dans une perspective de planification pour effectuer les travaux suivants.

- ✓ utilisation de la spectroscopie d'impédance électrochimique.
- ✓ utilisation de la diffraction de rayons X.
- ✓ extension pour différents types de matériaux dans différents environnements de corrosion en tenant compte des conditions hydrodynamiques.

Abstract

This work was devoted to the study of the corrosion inhibition effect of orthophenanthroline and bipyridine on XC48 steel in 1M hydrochloric acid by the gravimetric method (measurement of mass lost by corrosion) and surface analysis techniques by SEM and AFM.

The mass lost increases with the increase in the time of immersion, of the acidity of the environment and the temperature but decreases in the presence of the two inhibitors studied separately.

The inhibitory efficiency EI% of phenanthroline (84.22%) is better than that of bipyridine (78.78%).

The adsorption of phenanthroline and bipyridine follows the Langmuir isotherm and the values of ΔG°_{ads} are -33.37 and -33.92 KJ/mol respectively.

AFM analysis revealed that steel surface roughness was greatly reduced in the presence of phenanthroline (R=50 nm) compared to that in the presence of bipyridine (R=234 nm). SEM analysis verified the existence of adsorbed phenanthroline and bipyridine films. Overall, the results show that phenanthroline has better corrosion-inhibiting properties than bipyridine.

Key words: corrosion, inhibitor, phenanthroline, bipyridine,

Résumé

Ce travail a été consacré à l'étude de l'effet inhibiteur de corrosion de l'orthophénanthroline et de la bipyridine sur l'acier XC48 dans l'acide chlorhydrique 1M par la méthode gravimétrique et par les techniques d'analyse de surface par MEB et AFM.

La masse perdue augmente avec l'augmentation du temps d'immersion, de l'acidité du milieu et de la température mais diminue en présence des deux inhibiteurs étudiés séparément.

L'efficacité inhibitrice EI% de la phénanthroline (84,22%) est meilleure que celle de la bipyridine (78,78%).

L'adsorption de la phénanthroline et de la bipyridine suit l'isotherme de Langmuir et les valeurs de ΔG°_{ads} sont respectivement de -33,37 et -33,92 KJ/mol.

L'analyse AFM a révélé que la rugosité de la surface de l'acier était fortement réduite en présence de phénanthroline (R = 50 nm) par rapport à celle en présence de bipyridine (R = 234 nm). L'analyse MEB a vérifié l'existence de films adsorbés de phénanthroline et de bipyridine. L'ensemble des résultats montrent que la phénanthroline a de meilleures propriétés anticorrosion que la bipyridine.

Mots clés : corrosion, inhibiteur, phénanthroline, bipyridine,

خلاصة

تم تخصيص هذا العمل لدراسة تأثير تثبيط التآكل لكل من أورثوفينانثرولين وبيبيريدين على فولاذ XC48 في حمض الهيدروكلوريك 1 م بالطريقة الجاذبية (قياس الكتلة المفقودة بسبب التآكل) وتقنيات تحليل السطح بواسطة SEM و AFM. تزداد الكتلة المفقودة مع زيادة وقت الغمر ، حموضة البيئة ودرجة الحرارة ولكنها تنخفض في وجود المثبتين اللذين تمت دراستهما بشكل منفصل.

الكفاءة المثبطة EI% من الفينانثرولين (84.22 درجة مئوية) أفضل من بيبيريدين (78.78%). يتبع امتزاز الفينانثرولين والبيبيريدين مقياس لانجموير وقيم إعلانات ΔG° هي -33.37 و -33.92 كيلوجول / مول على التوالي. كشف تحليل AFM أن خشونة سطح الفولاذ قد تقلصت بشكل كبير في وجود الفينانثرولين (R = 50 نانومتر) مقارنة مع وجود البيبيريدين (R = 234 نانومتر). تحقق تحليل SEM من وجود أفلام فينانثرولين وبيبيريدين كثيفة. بشكل عام ، تظهر النتائج أن الفينانثرولين يتمتع بخصائص أفضل لمنع التآكل من البيبيريدين. الكلمات الأساسية: التآكل ، المانع ، الفينانثرولين ، البيبيريدين ،

