

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés
Laboratoire d'Electrochimie, Corrosion et de Valorisation Energétique

Mémoire EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Présenté par

Haddad Terbah & Sait Afaf

Thème

Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans un milieu HCl avec une nouvelle molécule CYN3

Soutenue le 26/ 06 /2024

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Affiliation	Qualité
BRINIS Naima	MCA	Université de Bejaia	Présidente
ISAADI Hamida	MCA	Université de Bejaia	Examineur
Mme ALIOUANE Nabila	Professeur	Université de Bejaia	Encadrant
Mme CHIBANE Amina	Doctorante	Université de Bejaia	Co- Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

On tient tout d'abord à remercier le bon dieu de nous avoir accordé la capacité et la volonté d'accomplir nos études et de réaliser tous nos projets.

Par ailleurs, on souhaite remercier chaleureusement notre encadrant de recherche, **Mme ALIOUANE Nabila**, pour ses conseils avisés, son soutien constant et sa patience tout au long de ce projet. Ses précieuses suggestions et son expertise ont grandement enrichi ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres de jury **Mme BRINIS Naima** et **Mme ISAADI Hamida** pour avoir expertisé notre travail et nous avoir honorés par leurs présences.

Nous sommes reconnaissantes envers **Mme CHIBANE Amina**, pour leur aide précieuse et de nous avoir donné accès aux ressources nécessaires pour mener à bien cette recherche.

Dédicace

Je tiens à dédier, en signe de reconnaissance et de respect, ce travail modeste :

*A mes chers **parents**, qui ont été toujours un pilier sur lequel je m'appuyais, qui m'ont toujours offert ce qui y'a de mieux pour moi, qui ont sacrifié beaucoup de choses pour ma réussite.*

*A ma Sœur **Meriem** en particulier, et mes frères **Zoubir**, **Yahia** et **Younes** qui ont été toujours derrière moi pour m'épauler, toujours là pour me montrer le droit chemin, et qui n'ont jamais cessé de croire en moi.*

*A mon fiancé **Salim** qui m'a toujours encouragé à avancer sans hésitation, sans lui je n'aurais pas accompli tant de choses.*

Je remercie tous membre de famille et amis qui attendait voir toujours ma réussite.

*A ma binôme **Afaf** ainsi que sa famille.*

Terbah

Dédicaces

Je Dédie Ce Modeste Travail :

*A mes Chers parents **Rachid** et **Saida** qui ont été toujours là pour moi, un grand soutien plein de confiance tout au long de mes études que dieu vous préserve des malheurs de la vie. J'aimerais pouvoir vous rendre tout l'amour et la dévotion que vous m'avez offerts.*

*A mon chère frère **Imad** et mes jolies sœurs **Marwa** Et **Taymā**.*

*A ma chère grand-mère **Rahma**.*

*A mon chère partenaire de vie **Youcef** qui m'a soutenu et encouragé à terminer mon parcours universitaire.*

*A ma très chère fille **Zina** que Dieu la protège.*

*A ma belle-mère **Fatma** et mon beau père **Abdelkader**.*

Je dédie ce travail. A tous ceux qui sont chers.

*A ma binôme **Terbah** ainsi que sa famille*

Afaf

Liste des abréviations

Al : Aluminium

N : Azote

B : Bore

β_a : Coefficient de Tafel anodique

β_c : Coefficient de Tafel cathodique

C : Carbone

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

C_{dl} : Capacité de la double couche

CME : Concentration minimale efficace

CPE : Élément à phase constante

ΔH°_{ads} : Enthalpie d'activation

ΔS°_{ads} : Entropie d'activation

ΔG°_{ads} : Energie libre standard d'adsorption

Δm : Perte de masse

E_a : Energie d'activation

EI : Efficacité inhibitrice

E_{corr} : Potentiel de corrosion

f_c : Fréquence au sommet du demi-cercle

h : Constante de Plank

HCl : Acide chlorhydrique

Hg : Mercure

i : Densité de courant

$i_{corr\ blanc}$: Courant de corrosion sans inhibiteur

$i_{corr\ inh}$: Courant de corrosion avec inhibiteur

KCl : Chlorure de potassium

K_{ads} : Constante d'adsorption

m_i : Masse initiale

m_f : Masse finale

Liste des abréviations et

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

N : Nombre d'Avogadro

Nb : Niobium

Ni : Nickel

n : Paramètre d'écart

OCP : Potentiel en circuit ouvert

P : Phosphore

R : Constante universelle des gaz parfaits

R² : Coefficient de corrélation moyen

Rs : Résistance de l'électrolyte

R_{tc} : Résistance de transfert de charge

S : Soufre

S : Surface

Si : Silicium

ECS : Electrode au calomel saturé

SIE : Spectroscopie d'impédance électrochimique

t : Temps

T : Taux d'inhibition

Ti : Titane

θ : Taux de recouvrement

U : Mesure de la corrosion

V : Vanadium

V_{corr} : Vitesse de corrosion

V_{inh corr} : Vitesse de corrosion de l'échantillon avec inhibiteur

x² : Erreur

Zr : Zirconium

Liste des abréviations et

Chapitre I

Figure I.1 : Images sur le phénomène de la corrosion.....	3
Figure. I.2 : Corrosion électrochimique en milieu aéré ; influence de l’oxygène dissous sur la cinétique de la réaction cathodique.....	4
Figure I.3 : Exemple de corrosion par piqûre sur un produit en acier inoxydable.....	5
Figure I.4: Cas typique de corrosion de contact. Acier au carbone zingué (rondelle) et acier inoxydable.....	6
Figure I.5 : Image d’une attaque sélective, faite à l’aide d’un microscope électronique à Balayage (zone soudée) d’une nuance 1.4401 (A4 316).....	7
Figure I.6: fissuration par corrosion sous contrainte d’une platine de nuance 1.4301 (A2304), après environ 4 ans d’utilisation dans une piscine couverte.....	7
Figure I.7 : Acier.....	10
Figure I.8: Diagrammes d’Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d’un inhibiteur de corrosion.....	17
Figure I.9: Représentation schématique des modes d’adsorption des molécules organiques inhibitrice.....	18

Chapitre II

Figure II.1 : Polisseuse.....	23
Figure II.2 : Surface avant et après polissage.....	23
Figure II.3 : Cellule électrochimique à trois électrodes.....	25
Figure II.4 : Montage utilise pour les mesures gravimétriques.....	26
Figure II.5 : Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique.....	28
Figure II.6: Evaluation du potentiel en fonction du temps d’immersion.....	28
Figure II.7: Courbe de polarisation : principe de construction.....	29
Figure II.8 : Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel..	30
Figure II.9: Dispositif expérimentale AUTOLAB de mesure d’impédance Electrochimique.....	31
Figure II.10: Représentation de l’impédance électrochimique dans le plan complexe (A) de Bode et (B) de Nyquist pour un système faradique.....	32

Chapitre III

Figure III.1 : Variation de la vitesse de corrosion (a) et l'efficacité inhibitrice (b) de l'acier dans 0,5M HCl en fonction de la température et à différentes concentrations de CYN3.....	40
Figure III.2 : Courbe de chronopotentiométrie de l'acier immergé dans une solution de 0,5 M HCl en absence et en présence des différentes concentrations en inhibiteur à températures.....	41
Figure III.3 : Courbes de polarisation de l'acier dans 0,5 M HCl sans et avec addition de différentes concentrations de CYN3 à différentes températures.....	43
Figure III.4: variation de l'efficacité inhibitrice (a) et de la densité de corrosion (b) de l'acier dans 0,5M HCl en fonction de différentes concentrations de CYN3 à différentes températures.....	45
Figure III.5: Diagrammes de Nyquist de l'acier dans 0,5 M HCl à différentes concentrations d'inhibiteur et à différentes températures.....	47
Figure III.6 : Diagrammes de Bode de l'acier dans 0,5 M HCl à différentes concentrations d'inhibiteur et à différentes températures.....	48
Figure III.7: Circuit équivalent utilisé pour adapter les données expérimentales d'impédance en absence et en présence d'inhibiteur dans 0,5 MHCl.....	49
Figure III.8: Variation de l'efficacité inhibitrice pour différentes concentrations de l'inhibiteur, déterminée par impédance en milieu 0,5M HCl.....	50
Figure III.9: Modèles des isothermes d'adsorption : (a) Langmuir, (b) Temkin, (c) Freundlich, (d) Alwaday, (e) Freumkin, (f) Flory Hugging de l'acier dans 0,5 M HCl à différentes concentrations en inhibiteur à température ambiante.....	53
Figure III.10 : Les isothermes d'adsorption Langmuir de CYN3 dans HCl 0.5M correspondantes à différentes températures.....	54
Figure III.11 : Variation de $\ln(i_{corr})$ en fonction de $1/T$ pour la solution de HCl à 0,5M sans et avec inhibiteur CYN3 pour $10^{-3}M$	55
Figure III.12 : Variation de $\ln(i_{corr}/T)$ en fonction de $1/T$ pour la solution HCl à 0,5M sans et avec inhibiteur CYN3 pour $10^{-3}M$	57
Figure III.13: Variation de l'efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier dans 0,5M HCl en fonction de la concentration en inhibiteur obtenue par les trois méthodes expérimentales à différentes températures.....	59

Chapitre I

Tableau I.1 : Délimitations entre aciers non alliés et aciers alliés.....	11
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Variation de la vitesse de corrosion, l'efficacité inhibitrice et le taux de recouvrement de l'acier dans 0,5 M HCl en absence et en présence de CYN3 à différentes concentrations et températures après immersion de 24 h.	39
---	----

Tableau III.2 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier dans 0,5 M HCl sans et avec addition de différentes concentrations de CYN3 à différentes températures.	44
---	----

Tableau III.3 : Paramètres électrochimiques obtenus par les diagrammes d'impédance de la corrosion de l'acier dans 0,5 M HCl sans et avec addition de différentes concentrations de composé inhibiteur à différentes températures.	49
--	----

Tableau III.4 : Valeurs des énergies d'activation en absence et en présence de la concentration optimale en inhibiteur 10 ⁻³ M à différentes températures.	56
---	----

Tableau III.5 : Paramètres d'activation pour la dissolution de l'acier dans 0,5M HCl en absence et en présence de la concentration optimale de l'inhibiteur CYN3.	57
--	----

Sommaire

Introduction générale	1
Références bibliographiques.....	2
Chapitre I : Étude bibliographique	
Partie A : Généralités sur la corrosion	3
I.A.1. Définition de la corrosion.....	3
I.A.2. Types de la corrosion.....	3
I.A.2. 1. Corrosion chimique.....	3
I.A.2. 2. Corrosion électrochimique	4
I.A.2. 3. Corrosion biochimique.....	4
I.A.3. Formes de la corrosion.....	5
I.A.3.1. Corrosion généralisée.....	5
I.A.3.2. Corrosion localisée.....	5
I.A.4. Facteurs de la corrosion.....	8
I.A.5. Mécanismes de la corrosion.....	8
I.A.6. Vitesse de corrosion.....	9
I.A.7. Les moyens de lutte contre la corrosion.....	9
Partie B : Généralités sur les aciers.....	10
I.B.1. Définition de l'acier.....	10
I.B.2. Les différentes classes des aciers.....	10
I.B.2.1. Les aciers non alliés.....	11
I.B.2.2. Les aciers inoxydables.....	11
I.B.2.3. Autres aciers alliés.....	12
I.B.2.4. Caractérisation des aciers.....	12
I.B.2.5. Composition chimique des aciers.....	13
Partie C. Généralités sur les inhibiteurs.....	15
I.C.1. Définition des inhibiteurs de corrosion.....	15
I.C.2. Propriétés des inhibiteurs.....	15
I.C.3. Classes des inhibiteurs.....	15
I.C.3.1. Formulation des produits	15
I.C.3.2. Mécanismes d'action électrochimique.....	16
I.C.3.3. Mécanismes d'interface et principes d'action.....	17
I.C.3.4. Domaines d'application.....	19

Références bibliographiques.....	20
Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales	
II.1.Introduction.....	23
II.2. Préparation de l'échantillon en acier.....	23
II.3. Préparation des solutions.....	23
II.3.1. Préparation de la solution acide chlorhydrique	23
II.3.2. Préparation des solutions inhibitrices.....	24
II.4. Montage expérimental et méthodes utilisées.....	24
II.4.1.Cellule électrochimique.....	24
II.4.2. Méthodes d'étude de l'inhibition de la corrosion.....	25
II.4.2.1. Méthode gravimétrique.....	25
II.4.2.2. Méthodes électrochimiques.....	26
II.4.2.2.1. Méthode stationnaire (Polarisation potentiodynamique)	27
II.4.2.2.2. Méthode stationnaire : La spectroscopie d'impédance électrochimique	30
II.5. Les isothermes d'adsorption.....	33
II.5.1. Isotherme de Langmuir.....	33
II.5.2. Isotherme de Temkin.....	33
II.5.3. Isotherme de Frumkin.....	33
II.5.4. Isotherme de Freundlich.....	34
II.5.5. Isotherme de El-Awady.....	34
Références bibliographiques.....	35
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1. Introduction.....	38
III.2. Mesure gravimétrique.....	38
III.3. Étude électrochimique.....	40
III.3.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert de l'acier au cours du temps (OCP)....	40
III.3.2. Courbes de polarisation potentiodynamique.....	42
III.3.3. Mesures des impédances électrochimiques.....	46
III.4. Isotherme d'adsorption.....	51
III.5. Paramètre d'activation du processus d'inhibition.....	55
Références bibliographiques.....	60
Conclusion générale	62

Introduction

Introduction

Introduction

La corrosion est un phénomène naturel qui touche plus largement la détérioration de toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans des environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures). Ce processus est causé par la présence d'agents corrosifs tels que l'humidité, l'oxygène, les acides ou les sels ; les réactions électrochimiques entre le métal et son environnement, la présence d'impuretés ou de défauts dans le matériau métallique, et enfin les conditions environnementales telles que la température, le pH et la concentration des agents corrosifs.

Les conséquences de la corrosion peuvent être significatives, notamment la réduction de la durabilité et de la fiabilité des équipements et des structures métalliques, les pertes économiques dues à la réparation ou au remplacement des pièces endommagées, les risques pour la sécurité, en particulier dans les industries telles que le pétrole et le gaz où la corrosion peut entraîner des fuites ou des défaillances structurelles [1].

La corrosion nécessite une étude qui consiste à comprendre les processus par lesquels les matériaux métalliques se détériorent lorsqu'ils sont exposés à des environnements corrosifs, comme l'eau, l'air ou certains produits chimiques. Des techniques telles que la modélisation, les essais en laboratoire et l'analyse des produits de corrosion sont utilisées pour prévenir et atténuer les effets néfastes de la corrosion sur les infrastructures et les équipements [2].

L'inhibition de la corrosion fait référence à l'utilisation de substances chimiques appelées inhibiteurs de corrosion, incite à s'affronter contre cette dernière et à réduire ou empêcher la corrosion des métaux. Ces inhibiteurs agissent en interférant avec les réactions électrochimiques responsables de la corrosion, en formant une couche protectrice sur la surface du métal ou en modifiant les conditions de l'environnement pour rendre le métal moins réactif. L'inhibition de la corrosion est largement utilisée dans diverses industries pour protéger les équipements métalliques contre les dommages causés par la corrosion, ce qui permet d'augmenter la durée de vie et la fiabilité des infrastructures et des installations [3].

Dans cette étude, nous avons examiné l'influence de la température et de la concentration d'une nouvelle molécule nommée CYN3 sur la corrosion de l'acier dans 0,5 M HCl à l'aide de la méthode gravimétrique, de la technique stationnaire (potentiodynamique) et transitoire (spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)).

Introduction

Ce mémoire est constitué d'une introduction, de trois chapitres et d'une conclusion.

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale relative à la corrosion et aux classes d'acier. Ensuite, nous avons effectué une revue bibliographique sur les inhibiteurs de corrosion utilisés pour la protection de l'acier.

Le second chapitre décrit le matériau étudié et le milieu d'essai utilisés dans notre travail. Le dispositif expérimental et le protocole adopté pour les mesures électrochimiques sont également précisés.

Le troisième chapitre concerne la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations.

Une conclusion générale résume l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives d'étude.

Références bibliographiques

[1] P. Roberge (2008). Livre Corrosion Engineering. Principe and Practice.

[2] P. Roberge(1999) Livre « Principe de la corrosion et de la protection des métaux ».

[3] R. Winston Revie et Herbert H. Uhlig (2008) Livre Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering.

Chapitre I

Étude bibliographique

Chapitre I : Étude bibliographique

Partie A : Généralités sur la corrosion

I.A.1. Définition de la corrosion

Le terme « corrosion » dérive du latin « corroder », qui signifie « ronger en morceaux ». En termes généraux, la corrosion (Figure I.1) désigne la détérioration d'un matériau ou la dissolution de l'un de ses composants à la suite d'interactions physico-chimiques avec l'environnement extérieur, tel que l'air, l'eau ou l'humidité [1].

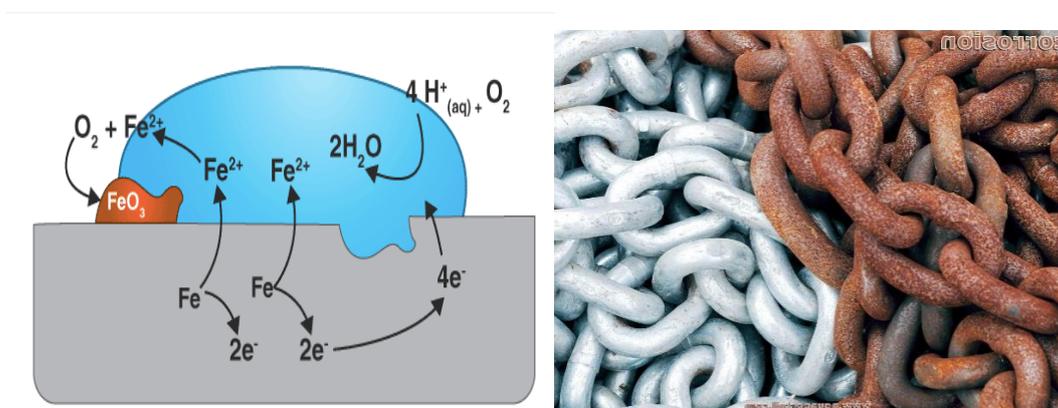


Figure I.1 : Images sur le phénomène de la corrosion.

I.A.2. Types de la corrosion

La corrosion peut prendre différentes formes selon les conditions environnementales et les matériaux impliqués, ce qui nous permet de distinguer trois types de corrosion les plus courants :

I.A.2. 1. Corrosion chimique

La corrosion chimique se définit comme l'attaque directe du métal par son environnement. Elle se produit dans une solution non électrolytique ou sous l'action de gaz (tels que le gaz d' O_2 , $H_2 S$, CO_2). Lorsque cette corrosion survient en présence de gaz ou à des températures élevées, elle est qualifiée de « corrosion sèche » ou de « corrosion à haute température ». La corrosion chimique peut également se produire lorsque le métal est attaqué par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (par exemple, Al dans le CCl_4). Elle est couramment observée dans les industries qui produisent ou utilisent des acides. Pendant le processus de corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de

l'oxydant se produisent simultanément, où les atomes métalliques établissent directement des liaisons chimiques avec l'oxydant, entraînant le transfert d'électrons de valence [2].

I.A.2. 2. Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique (Figure I.2) se produit principalement lorsque les métaux et les alliages entrent en contact avec une solution contenant un électrolyte. Elle survient lorsqu'il y a une différence de composition entre les matériaux impliqués dans le couple métallique-réactif, ce qui conduit à la formation de piles ou de micro-piles. Ces piles ou micro-piles comportent à la fois des anodes et des cathodes sur la même partie de la structure métallique. La corrosion se produit sur la partie anodique, entraînant un flux de courant à travers l'électrolyte, du côté de l'anode vers la cathode [3].

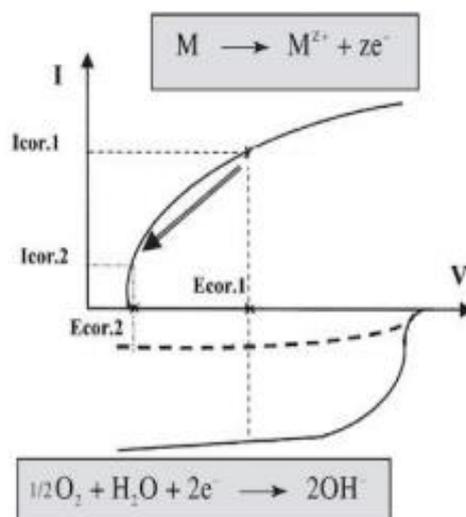


Figure I.2 : Corrosion électrochimique en milieu aéré, influence de l'oxygène dissous sur la cinétique de la réaction cathodique [4].

I.A.2. 3. Corrosion biochimique

Cette méthode d'attaque est identifiable grâce à certaines caractéristiques, où les microorganismes interviennent dans le processus de corrosion de diverses manières [5] :

- En influençant directement le taux de réaction anodique ou cathodique.
- En générant des environnements corrosifs.
- En proliférant et en se multipliant, les micro-organismes favorisent la formation de cellules électrolytiques à la surface.

I.A.3. Formes de la corrosion

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal, entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration [6].

I.A.3.1. Corrosion généralisée

La corrosion généralisée est un processus de dégradation uniforme qui affecte la totalité ou une grande partie de la surface d'un matériau métallique exposé à des conditions corrosives telles que l'humidité, l'oxygène et d'autres agents corrosifs [7]. Cette étude examine les mécanismes de la corrosion généralisée des alliages d'aluminium, en se concentrant sur les facteurs qui influent sur sa vitesse et son intensité. Elle aborde également les méthodes de prévention et de protection contre ce type de corrosion.

I.A.3.2. Corrosion localisée

- **Corrosion par piqûre**

Dans certaines conditions d'environnement, les métaux et alliages protégés par un film passif peuvent subir une attaque par piqûration lorsqu'il se produit une rupture localisée du film (Figure I.3). Ces piqûres se localisent en certains points de la surface métallique, elles se développent de façon insidieuse et s'auto propagent : au fond de la cavité créée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous entraîne une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion [6].



Figure I.3 : Exemple de corrosion par piqûres sur un produit en acier inoxydable [8].

- **Corrosion intergranulaire**

C'est une attaque sélective aux joints de grains, par suite d'hétérogénéités locales : appauvrissement de l'un des constituants ou, au contraire, enrichissement par suite de précipitation lors d'un traitement thermique, par exemple. Il y a alors création de piles locales avec dissolution des zones anodiques [6].

- **Corrosion par crevasse**

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène [6].

- **Corrosion galvanique**

Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux phases ou de la corrosion pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques placés dans le même environnement. Il y a formation d'une pile. En cas de couplage, plus les métaux en présence sont éloignés sur l'échelle galvanique, plus la pile formée dispose d'énergie pour provoquer les transformations. Les phénomènes de corrosion sont amplifiés à la fois dans la cinétique de dégradation et dans la génération d'ions dans le milieu biologique. La partie la moins noble est l'anode et la plus noble est la cathode. Le rapport de surface anode/cathode joue un rôle très important. Il faut retenir que, plus l'anode est de petite taille, plus la vitesse de dissolution est élevée. Ce fait a une grande importance dans la pratique clinique en Odontologie, en particulier lors du choix des alliages utilisés pour les réalisations prothétiques [6].



Figure I.4: Cas typique de corrosion de contact. Acier au carbone zingué (rondelle) et acier inoxydable (vis et pièce fixée) [8].

- **Corrosion et dissolution sélective**

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [6].



Figure I.5 : Image d'une attaque sélective, faite à l'aide d'un microscope électronique à Balayage [8]

- **Corrosion par frottement**

C'est la détérioration qui se produit à l'interface entre des surfaces en contact, suite à la conjugaison de la corrosion et d'un faible glissement réciproque des deux surfaces [6].

- **Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion**

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (force de traction) et d'une réaction électrochimique. La corrosion sous l'effet de la fatigue est due à l'application répétée des contraintes [6].



Figure I.6 : Fissuration par corrosion sous contrainte d'une plaque en acier, après environ 4 ans d'utilisation dans une piscine couverte [8].

I.A.4. Facteurs influençant la corrosion

Les phénomènes de corrosion sont influencés par une multitude de facteurs :

- Les caractéristiques du milieu corrosif, notamment la concentration des réactifs, la présence d'oxygène et le pH.
- Les aspects métallurgiques, tels que la composition de l'alliage, les traitements thermiques et mécaniques subis par le matériau.
- Les conditions d'utilisation, comprenant l'état de surface du métal, la géométrie des pièces, l'utilisation d'inhibiteurs et les méthodes d'assemblage.
- Les facteurs temporels, incluant le vieillissement du matériau, les contraintes mécaniques et les altérations des revêtements protecteurs [9 ;10].

I.A.5. Mécanismes de la corrosion

La corrosion est un processus électrochimique complexe qui implique plusieurs réactions chimiques. Le mécanisme de la corrosion peut varier en fonction du type de corrosion, mais voici une explication générale du processus de corrosion métallique, qui est le plus courant :

- Formation de la pile électrochimique : La corrosion métallique commence généralement par la formation d'une pile électrochimique sur la surface du métal. Cette pile se compose de deux régions : l'anode et la cathode. À l'anode, le métal subit une oxydation, libérant des électrons et formant des ions métalliques. À la cathode, les électrons sont consommés lors de réactions de réduction, généralement impliquant des agents oxydants tels que l'oxygène ou les ions hydrogènes.
- Transport des ions métalliques: Les ions métalliques libérés à l'anode migrent à travers l'électrolyte (par exemple, une solution aqueuse) vers la cathode. Pendant ce processus, le métal perd de la masse sous forme d'ions dissous.
- Réactions à la cathode : À la cathode, les ions métalliques réagissent avec des électrons et des agents réducteurs pour former des composés solides ou des produits de corrosion, qui peuvent être des oxydes, des hydroxydes ou d'autres composés, selon le métal et l'environnement.
- Réactions à l'anode: À l'anode, des réactions d'oxydation se produisent, impliquant la libération d'électrons et la dissolution du métal sous forme d'ions métalliques dans l'électrolyte.

- Cycle continu : Ce processus se poursuit de manière cyclique, avec des ions métalliques continuant à être libérés à l'anode, tandis que des réactions de réduction se produisent à la cathode, favorisant ainsi la corrosion continue du métal.

I.A.6. Vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion est la mesure de la perte de matériau métallique au fil du temps due à des réactions chimiques dans un environnement corrosif. Elle indique à quelle vitesse le métal se détériore et est généralement exprimée en millimètres ou micromètres par an. Cette mesure est cruciale pour évaluer la durée de vie des structures métalliques et pour mettre en place des mesures de protection adéquates. Son expression s'écrit :

$$V_{\text{corr}} = \frac{\Delta m}{S \times t} \text{ (mg/cm}^2\text{h)} \quad (\text{I.1})$$

Où :

V_{corr} : vitesse de corrosion

$\Delta m = m_i - m_f$: différence de masse de matériau avant et après sa détérioration dans le milieu corrosif (mg)

S : la surface de l'échantillon exposé (cm^2)

t : le temps d'immersion

I.A.7. Les moyens de lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion englobe toutes les actions visant à préserver les matériaux métalliques des dommages causés par leur environnement. Une première mesure de protection consiste à choisir des métaux ou des alliages résistants aux agents corrosifs. Dès la phase de conception d'une installation, il est crucial de prendre en compte la prévention de la corrosion afin d'éviter de nombreux problèmes et d'assurer une durabilité optimale. La solution retenue doit être conforme aux normes environnementales, permettant le recyclage ou l'élimination appropriée des composants une fois leur utilisation terminée.

Plusieurs techniques de protection existent que l'on peut classer comme ci-après :

- Prévention par une forme adaptée des pièces [11] ;
- Prévention par un choix judicieux des matériaux ;
- Protection électrochimique;
- Protection par inhibiteur.

Partie B : Généralités sur les aciers

I.B.1. Définition:

L'acier (Figure I.7) est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. L'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes révolutions scientifiques et industrielles grâce à leurs propriétés [12].

Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0,005 % et 1,5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 %. Plus la teneur en carbone d'un acier est importante (dans les limites indiquées ci-dessus), plus l'acier est dur.



Figure I.7 : Acier

I.B.2. Les différentes classes des aciers

Sur la base de leur composition chimique, on distingue trois classes d'aciers : les aciers non alliés et deux catégories d'aciers alliés, les aciers inoxydables et les autres aciers alliés.

- Les aciers non alliés sont des aciers pour lesquels les teneurs en un certain nombre d'éléments ne dépassent pas les valeurs limites fixées dans la norme NFEN 10020 pour l'analyse de coulée.
- Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone.
- Les autres aciers alliés sont des aciers ne répondant à aucune des deux définitions précédentes.

Parmi les trois grandes classes d'aciers indiquées ci-avant, une distinction supplémentaire est introduite par classe de qualité.

Tableau I.1: Délimitations entre aciers non alliés et aciers alliés [13].

Eléments spécifiés	Limite (%)	Eléments spécifiés	Limite (%)
Al	0,30	Ni	0,30
B	0,0008	Si	0,60
Cr	0,30	Ti	0,05
Cu	0,40	V	0,10
Mn	1,65	W	0,30
Mo	0,08	Zr	0,05
Nb	0,06	Autres (exceptés C, P, S, N)	0,10

I.B.2.1. Les aciers non alliés

Pour les aciers non alliés, on distingue :

- Les aciers de qualité non alliés pour lesquels il existe par exemple des exigences de propriétés spécifiées de ténacité (résilience), de grosseur de grain et/ou de formabilité. On trouve par exemple parmi eux les aciers magnétiques, les aciers de décolletage ne satisfaisant pas à au moins une des prescriptions spécifiées dans la norme pour définir les aciers non alliés spéciaux.
- Les aciers spéciaux non alliés qui présentent par rapport aux aciers de qualité non alliés une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. La plupart du temps, ces aciers sont destinés à un traitement de trempe et de revenu ou à un traitement de trempe superficielle. Ces aciers permettent de répondre à des exigences sévères. On trouve par exemple, parmi ces produits, les aciers pour armatures de précontrainte.

I.B.2.2. Aciers inoxydables

Ils sont subdivisés suivant les critères suivants :

- Teneur en nickel : inférieure ou supérieure ou égale à 2,5 %
- Caractéristique principale : résistance à la corrosion, résistance à l'oxydation à chaud, résistance au fluage.

I.B.2.3. Autres aciers alliés

On distingue :

- Les aciers de qualité alliée pour lesquels il existe par exemple des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité ; ces aciers ne sont pas destinés à un traitement de trempe et revenu ou à un traitement de trempe superficielle. Des caractéristiques spécifiques, notamment pour les aciers à grains fins soudables, définissent les cas retenus dans cette classe. On trouve également les aciers magnétiques, les aciers pour rails ou palplanches et des aciers alliés pour formage à froid ou d'autres applications.
- Les aciers spéciaux alliés qui sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition chimique et de leurs conditions particulières d'élaboration et de contrôle qui leur confèrent des propriétés améliorées qui sont fréquemment spécifiées en combinaison et dans des limites étroites. On trouve les aciers alliés non définis comme aciers de qualité, dont la totalité des aciers à outils et des aciers pour roulement.

I.B.2.4. Caractérisation des aciers

Pour permettre la caractérisation des aciers, les trois critères principaux sont les caractères physiques, mécaniques et chimiques [14].

- **Caractéristiques physiques**

La dilatation est une caractéristique physique forte importante pour le constructeur métallique. Le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est $12 \times 10^{-6}/K$ [14].

- **Caractéristiques mécaniques**

Parmi les caractéristiques mécaniques des aciers les plus fréquemment exploitées pour des applications dans la construction métallique, on retrouve :

Limite d'élasticité (R_e) en N/mm^2 ou MPa : La limite d'élasticité est la charge maximale au-delà de laquelle le métal subit une déformation permanente, ne retrouvant plus sa forme initiale. Cette déformation irréversible est dite plastique et la limite d'élasticité est utilisée pour calculer les contraintes sur les éléments soumis à la flexion, au cisaillement et au flambement [14].

Résistance à la traction (R_m) en N/mm^2 ou MPa : La résistance à la traction est la force maximale que le métal peut supporter avant de se rompre. Elle est utilisée pour le calcul de la fatigue du matériau [14].

Allongement à rupture (A) en % : L'allongement à rupture est la déformation maximale que le métal peut subir avant de se rompre [14].

Module d'élasticité (E) en N/mm^2 : Le module d'élasticité exprime la rigidité du métal. C'est le rapport proportionnel entre une contrainte appliquée à une barre et l'allongement relatif de cette barre dans le domaine élastique [14].

Résilience (KCV) en J/cm^2 : La résilience mesure la capacité d'un métal à résister à une rupture brutale. Le test consiste à casser une section métallique entaillée en son milieu par un choc unique, avec la section reposant sur deux appuis et sollicitée en flexion. La résilience est un critère clé pour le choix des aciers destinés aux constructions soudées [14].

Dureté : La dureté est la résistance du métal à la déformation. Elle permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'un métal, avec des correspondances établies entre les mesures de dureté et le niveau de résistance, notamment à la traction, en fonction de la nature du métal de base [14].

- **Caractéristiques chimiques**

Les métaux peuvent réagir chimiquement lorsqu'ils entrent en contact avec d'autres éléments. Cette réaction, appelée corrosion, entraîne une altération. La composition des éléments métalliques est spécifiée par des normes ou des catalogues fournis par les producteurs.

La réactivité des aciers avec leur environnement est importante. La corrosion atmosphérique dépend de l'humidité relative et de la pollution de l'air. Elle engendre une dégradation du matériau en termes d'épaisseur, de poids et, par conséquent, de performances [14].

I.B.2.5. Composition chimique des aciers

La composition chimique des aciers peut varier considérablement en fonction de leur grade, de leur classification et de leur utilisation spécifique. Cependant, voici une vue d'ensemble générale des éléments couramment présents dans les aciers :

- **Fer (Fe)** : constituant principal de l'acier, présent à des niveaux élevés.
- **Carbone (C)** : Un élément essentiel qui influe sur les propriétés mécaniques de l'acier. Les aciers peuvent contenir différentes quantités de carbone, généralement entre 0,02 % et 2,1 %.
- **Manganèse (Mn)** : souvent ajouté pour améliorer la résistance et la dureté de l'acier, ainsi que pour faciliter la formation de précipités.
- **Silicium (Si)** : Utilisé comme désoxydant et pour améliorer la résistance à la corrosion et la résistance à la traction.
- **Soufre (S)** : parfois présent en petites quantités pour améliorer l'usinabilité de l'acier, bien que des niveaux élevés de soufre puissent affecter négativement les propriétés mécaniques.
- **Phosphore (P)** : Présent en petites quantités, le phosphore peut améliorer la résistance et la ductilité de l'acier, mais des niveaux élevés peuvent causer une fragilité à froid.
- **Nickel (Ni)** : Souvent ajouté pour améliorer la ténacité, la résistance à la corrosion et la ductilité de l'acier.
- **Chrome (Cr)** : utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'oxydation, en particulier dans les aciers inoxydables.
- **Molybdène (Mo)** : Ajouté pour améliorer la résistance à la chaleur, la résistance à la corrosion et la dureté des aciers alliés.
- **Vanadium (V)** : Utilisé pour améliorer la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure des aciers alliés.

Il est important de noter que la composition exacte des aciers peut varier selon les normes de fabrication, les exigences spécifiques de l'application et les préférences du fabricant. Les informations détaillées sur la composition chimique des aciers sont généralement fournies dans les spécifications techniques ou les fiches de données matériaux fournis par les fabricants ou les organismes de normalisation.

Partie C. Généralités sur les inhibiteurs

I.C.1. Définition des inhibiteurs de corrosion

En règle générale, les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques intégrés dans un environnement corrosif pour ralentir le processus de détérioration des métaux qui y sont exposés. Selon l'Association Nationale des Ingénieurs en Corrosion (A.N.I.C), « un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration » [15].

I.C.2. Propriétés des inhibiteurs

Les agents de protection contre la corrosion d'origine organique comprennent généralement des éléments tels que le phosphore (P), le soufre (S) ou l'oxygène (O), qui se lient au substrat métallique pour former des liaisons [16,17]. Les effets recherchés d'un inhibiteur [18] sont :

- Diminution de la vitesse de corrosion d'un métal sans altérer ses caractéristiques physicochimiques (évitant la fragilisation par l'hydrogène en milieu acide).
- Stabilité en présence des constituants du milieu, notamment des oxydants et de la température d'utilisation.
- Efficacité à faible concentration.
- Conformité aux normes de non-toxicité.
- Coût abordable.

I.C.3. Classes des inhibiteurs

Les agents anti-corrosion peuvent être catégorisés de diverses manières distinctes [19] : selon leur formulation en tant qu'inhibiteurs organiques ou minéraux, selon leurs mécanismes d'action électrochimique en tant qu'inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes, et selon leurs mécanismes d'interface et principes d'action, tels que l'adsorption et/ou la formation d'un film.

I.C.3.1. Formulation des produits :

- **Formulation organique :**

Les molécules organiques sont en cours d'étude pour leur utilisation comme inhibiteurs de corrosion, remplaçant ainsi les inhibiteurs inorganiques, principalement en raison de leur

impact écologique moindre. Ces inhibiteurs sont souvent dérivés de sous-produits de l'industrie pétrolière [20]. Ils comportent généralement au moins un groupe fonctionnel actif tel que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre, qui peut échanger des électrons avec le métal. Les groupes fonctionnels courants permettant leur fixation sur le métal incluent la radicale amine (-NH₂), Le radical mercapto (-SH), le radical hydroxyle (-OH), Le radical carboxyle (-COOH)

- **Inhibiteur minéral :**

Les composés minéraux sont généralement employés dans des milieux neutres à alcalins, et moins fréquemment dans des milieux acides. En solution, ces substances se dissocient, laissant leurs produits de dissociation jouer un rôle dans l'inhibition de la corrosion (sous forme d'anions ou de cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions tels que XO₄ⁿ⁻, comme les chromates, molybdates, phosphates, silicates, etc. Les cations les plus courants incluent Ca²⁺ et Zn²⁺, ainsi que ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions, comme l'hydroxyde OH⁻. Le nombre de composés minéraux utilisés tend à diminuer, car la plupart des produits efficaces ont des effets néfastes sur l'environnement [21].

I.C.3.2. Mécanismes d'action électrochimique

- **Inhibiteur cathodique**

L'effet de ces inhibiteurs (Figure I.8) se manifeste par une diminution de la densité du courant de réduction du solvant et par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus négatives. Les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques, car ils n'encouragent pas la corrosion localisée. Généralement, ce sont des cations qui migrent vers la surface cathodique, où ils se précipitent sous forme de sels basiques ou d'hydroxydes, formant ainsi des films adhérents et compacts.

- **Inhibiteur anodique**

Il existe une variété d'inhibiteurs anodiques (Figure I.8) dont le mode d'action consiste à réduire la densité du courant anodique et à déplacer le potentiel de corrosion vers des valeurs plus positives. Bien qu'efficaces et largement utilisés, ces inhibiteurs présentent généralement une caractéristique indésirable: si leur concentration diminue progressivement, la surface métallique n'est plus entièrement protégée et peut agir comme une anode, favorisant ainsi la corrosion par piqûres. Dans de telles circonstances, l'inhibiteur peut provoquer plus de dommages que de biens, d'où leur réputation de substances potentiellement dangereuses.

- **Inhibiteur mixte**

Les inhibiteurs mixtes (Figure I.8) interviennent à la fois sur les processus anodiques et cathodiques. Leur action consiste à réduire la vitesse des deux réactions partielles tout en modifiant peu le potentiel de corrosion [22 ; 23].

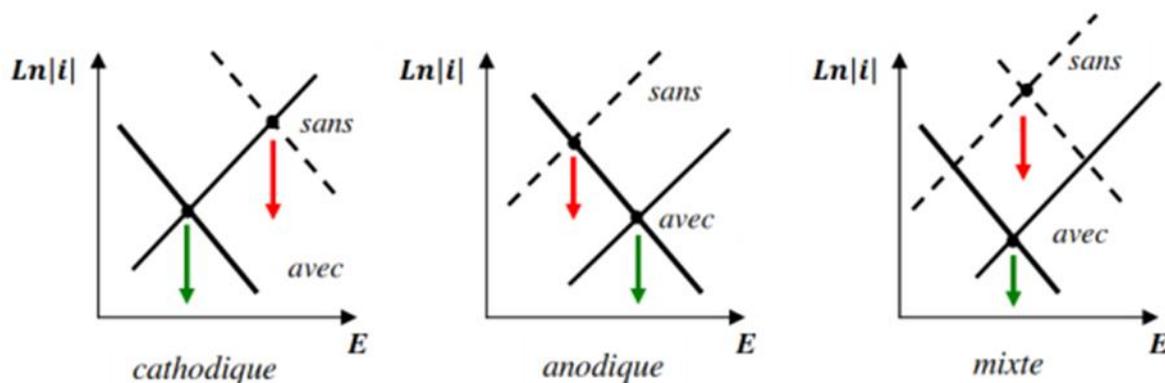


Figure I.8: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion.

I.C.3.3. Mécanismes d'interface et principes d'action

Les inhibiteurs de cette catégorie se distinguent des précédents par leur mode de liaison à la surface métallique. Ils sont souvent désignés sous les termes d'inhibiteurs d'adsorption ou d'interface, également connus sous le nom d'inhibiteurs d'interphase. Les premiers sont généralement observés dans des environnements acides, où ils agissent en formant des films mono- ou bidimensionnels de molécules par adsorption à la surface du métal, tandis que les seconds sont spécifiques aux milieux neutres ou alcalins et produisent des films tridimensionnels qui incorporent les produits de dissolution du substrat.

- **L'adsorption**

L'adsorption des composés organiques peut être expliquée à travers deux interactions principales : l'adsorption physique, également appelée physisorption, et l'adsorption chimique, ou chimisorption. Ces deux formes d'adsorption sont influencées par des facteurs tels que la nature et la charge du métal, la structure chimique du produit organique, ainsi que le type d'électrolyte présent dans le milieu [24]. L'ensemble des modes d'adsorption possibles (figure I.9).

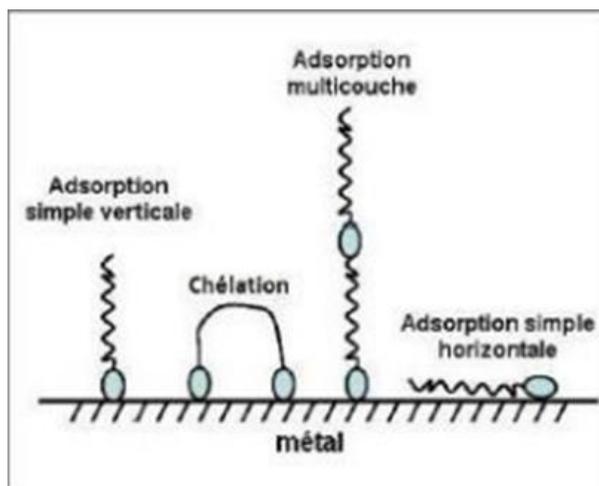


Figure I.9: Représentation schématique des modes d'adsorption des molécules organiques inhibitrices

- **L'adsorption physique**

L'adsorption physique découle de l'interaction électrostatique entre les ions ou les dipôles des molécules organiques et la surface du métal, qui est électriquement chargée. La charge du métal est déterminée par la position de son potentiel de corrosion par rapport à son potentiel de charge nulle (E_0) [25]. Lorsque le potentiel de corrosion du métal est inférieur à E_0 , l'adsorption des cations est favorisée. Les anions sont plus facilement adsorbés lorsque le potentiel de corrosion du métal se situe dans la région de potentiel positif par rapport à E_0 .

Il existe trois types de forces à distinguer :

- Les forces de dispersion (Van der Waals, London), toujours présentes.
- Les forces polaires, résultant de la présence de champ électrique.
- Les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou amine.

- **L'adsorption chimique**

La chimisorption est un processus plus courant que la physisorption et conduit à une efficacité plus élevée de l'inhibiteur. Elle implique un transfert électronique entre les orbitales du métal et la molécule inhibitrice, entraînant la formation de liaisons chimiques beaucoup plus stables en raison de l'énergie de liaison plus élevée. On observe généralement un transfert d'électrons de la molécule vers le métal ; cependant, il existe également des cas où le métal agit comme donneur d'électrons et la molécule comme accepteur [26].

- **Formation d'un film**

Cette forme d'inhibition, également connue sous le nom d'inhibition d'interphase, se manifeste par la formation d'un film tridimensionnel entre le substrat corrodé et les molécules d'inhibiteur. Les inhibiteurs d'interphase ne se limitent pas à être adsorbés aux interfaces métal/oxyde et oxyde/électrolyte, mais sont également intégrés dans les couches barrières, par exemple en formant des complexes. Ainsi, ces molécules inhibitrices d'interphase contribuent à la création de réseaux homogènes et denses, présentant une faible porosité et une bonne stabilité [27 ; 28].

I.C.3.4. Domaines d'application

Les inhibiteurs de corrosion sont souvent regroupés selon leur domaine d'application [29] : Dans les environnements aqueux, les inhibiteurs pour milieu acide sont employés pour prévenir l'attaque électrochimique de l'acier lors du décapage. Dans l'industrie pétrolière, ils sont ajoutés aux fluides de forage. Les inhibiteurs pour milieux neutres sont principalement utilisés pour protéger les circuits de refroidissement.

Dans les milieux organiques, une quantité significative d'inhibiteurs de corrosion est utilisée dans les lubrifiants pour moteurs et dans l'essence, car ces liquides contiennent souvent des traces d'eau et des espèces ioniques qui peuvent causer la corrosion. Les inhibiteurs utilisés dans les peintures sont principalement des pigments inorganiques ou des tannins.

Enfin, les inhibiteurs destinés aux phases gazeuses sont généralement utilisés pour protéger temporairement les objets emballés pendant le transport et le stockage, tels que les instruments de précision, les composants électroniques, les machines, etc. Ces inhibiteurs sont le plus souvent des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée, notamment certaines amines.

Références bibliographiques

- [1] D. Landolt, (1993). « Corrosion et chimie de surface des métaux » presse polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne.
- [2] H. Bensabra, (2016) Corrosion chimique, Cours de corrosion et protection des métaux.
- [3] J. Paul Bailon. J. Marie Dolt, (2000). Presses internationales Polytechnique
- [4] J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, Masson, Paris (1969). Métallurgie générale, partie corrosion, Éd.
- [5] J.J Benard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot. Masson, Paris, (1991) Métallurgie générale.
- [6] N. Soltani, M. Khayatkashani (2015). Chemistry of Surfaces, 51, 1102.
- [7] A. Beauchemin, Canada (1994) Protection of Metals and Physical. Précis de corrosion.
- [8] L. Hilti (2015) Manuel Corrosion.
- [9] A.A.Bekhit, Ashour, H.M.A., Abdel-Ghany, Y.S., Baraka, A, (2008). Eur. J. Med. Chem., 43, 456.
- [10] K. Zheng, J. He, J. Zhang, (2008). Chinese Chem. Lett., 19,1281.
- [11] K. EL Guermai(1996) La corrosion. Université HASSANI II-Ain Chok.
- [12] H.Litem,(2012). Université KasdiMerbah Ouargla, « Caractérisation avec rayonnement X des revêtements durs sur des substrats en acier », mémoire de master, spécialité : rayonnement, spectroscopie et Optoélectronique.
- [13] G. Murry(2010). Délimitations entre aciers non alliés et aciers alliés, « Aide-mémoire Métallurgie 2e édition Métaux • Alliages • Propriétés, Dunod»Paris,
- [14] G. Murry Dunod, Paris (2004). Aide-mémoire Métallurgie-métaux, alliages.
- [15] NACE, (1965). Glossary of corrosion Terms, Materials Protection, 4, 1, 79.
- [16] M. Hosseini, S. F.L. Mertens, M. Ghorbani, M.R. Arshadi, (2003).Asymmetrical Schiff bases as inhibitors of mildsteel corrosion in sulphuricacid media, Materials Chemistry and Physics, 78, 800.
- [17] Y.K. Agrawal, J.D. Talati, M.D. Shah, M.N. Dessai, N.K. Shah,(2004). Schiff Bases of Éthylendiamine as corrosion inhibitor of zinc in sulphuricacid, Corrosion Science, 46, 633.
- [18] G.M. Schmid, H.J. Huang, (1980). Spectro-electrochemicalstudies of the inhibition effect of 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline on the corrosion of 304 stainlesssteel, Corrosion Science, 20, 1041.
- [19] M.Hamani. (2016) Mémoire de master Étude de l'efficacité de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone dans HCl 1 M. Université de Bejaia

- [20] C. Fiaud, C. Lemaitre et N. Pébère, (2002). Corrosion et anticorrosion, Chapitre 13. Lavoisier paris
- [21] K. Kenniche (2014). Étude de l'efficacité de deux inhibiteurs bio sur l'acier API 5 L X52. Mémoire de Master, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [22] D. Landolt, (1993). Traité des matériaux, Presses polytechniques, universitaires romandes.
- [23] J. Benard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbort, (1969), Métallurgie générale, Édition Masson.
- [24] J.G.N. Thomas, (1980). 5th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ. Ferrara, Italy, 453, 15.
- [25] L.I. Antropov (1962). 1st International Congress on Metallic Corrosion, Butterworths London. 147.
- [26] N. Hackerman, A.C. Makrides (1954). Action of Polar Organic Inhibitors in Acid Dissolution of Metals, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 46, 523.
- [27] R.P. Bommersbach (2005). Évolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques. Thèse de doctorat, Institut national des Sciences Appliquées de Lyon.
- [28] C. Fiaud (1990). Inhibiteurs de corrosion, Corrosion-Vieillessement, COR1005, 14 p. disponible sur www.techniques-ingenieur.fr.
- [39] D. Landolt (1993). Corrosion et chimie de surface des métaux, 1e édition, Alden Press, Oxford, p.488.

Chapitre II
Méthodes et conditions
expérimentales

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales**II.1. Introduction**

Dans ce chapitre, on présente le matériau et méthodes utilisées pour l'étude de la corrosion de l'acier doux dans un milieu acide 0,5 M (HCl) sans (à blanc) et avec inhibiteur à différentes concentrations et à des conditions expérimentales spécifiques telles que la température, le temps d'immersion.

II.2. Préparation de l'échantillon en acier

La qualité de la surface des pièces exerce une influence significative sur la réaction du métal à la corrosion. Celle-ci résulte de l'interaction entre le métal et un liquide ou un gaz à sa surface. Le niveau de polissage, la présence de trous ou de rayures agissent souvent comme des points d'attaque favorisant le développement de la corrosion. De plus, l'orientation de la surface dans le milieu corrosif ainsi que le rayon de courbure des pièces semblent également jouer un rôle crucial.

Des plaques en aciers doux sont polies manuellement ou mécaniquement à l'aide d'une polisseuse (Figure II.1) à jet d'eau et de papiers abrasifs de grade 400, 600, 800; un dernier polissage a été effectué avec un papier de grade 1200 pour éliminer les rayures et avoir une surface à l'état miroir (Figure II.2).



Figure II.1 : Polisseuse



Figure II.2 : Surface de l'électrode avant et après polissage

II.3. Préparation des solutions**II.3.1. Préparation de la solution acide chlorhydrique**

Dans notre étude, nous avons utilisé l'acide chlorhydrique de concentration 0,5 M. Cette solution a été préparée par dilution de la solution commerciale (acide chlorhydrique 35%-38%) en utilisant de l'eau distillée sans agitation.

II.3.2. Préparation des solutions inhibitrices

Elle est constituée d'une molécule inhibitrice organique nommé CYN3. Ce composé est rajouté à la solution corrosive à des concentrations allant 10^{-6} M à 10^{-3} M.

II.4. Montage expérimental et méthodes utilisées

II.4.1. Cellule électrochimique

Une cellule électrochimique à trois électrodes (Figure. II.3) est un dispositif qui permet des mesures électrochimiques précises en contrôlant le potentiel électrique à une électrode de référence. Contrairement à une cellule à deux électrodes où les électrodes de travail et de contre-électrode sont combinées, la cellule comporte trois électrodes distinctes :

Électrode de travail : L'électrode de travail utilisée est une plaque rectangulaire en acier doux. La surface d'étude est la surface exposée à la solution électrolytique ($2,3\text{cm}^2$).

Électrode de référence): Cette électrode maintient un potentiel électrochimique constant par rapport à une solution électrolytique de référence. Cela permet de contrôler avec précision le potentiel de l'électrode de travail. L'électrode de référence la plus courante est l'électrode au calomel saturé (SCE) avec KCl.

Électrode auxiliaire (contre-électrode) : aussi appelée électrode de comptage, elle fournit un chemin facile pour le passage du courant électrique à l'électrode de travail.

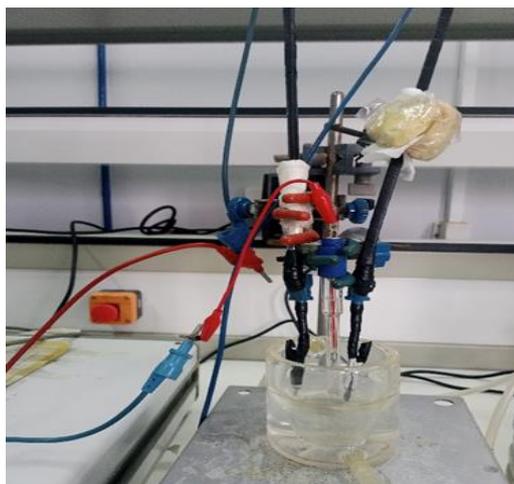


Figure II.3. : Cellule électrochimique à trois électrodes

II.4.2. Méthodes d'étude de l'inhibition de la corrosion

II.4.2.1. Méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique (Fig. II.4) est l'une des techniques les plus anciennes et les plus simples pour étudier l'inhibition de la corrosion. Elle repose sur la mesure de la perte de masse des échantillons métalliques exposés à un environnement corrosif, avec et sans l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion. Voici les étapes typiques de cette méthode :

Préparation des échantillons : les échantillons en acier de taille et de forme définie pour évaluer la surface de la plaque ($2,3\text{cm}^2$). Ils sont soigneusement nettoyés et pesés avec précision dans une balance pour déterminer leur masse initiale.

Exposition à l'environnement corrosif : les échantillons sont ensuite immergés dans des solutions de différentes concentrations avec et sans inhibiteur dans lesquelles la corrosion doit être étudiée.

Exposition prolongée : les échantillons sont laissés dans les solutions pendant une période de 24 h et à différentes températures.



Figure II.4 : Montage utilisé pour les mesures gravimétriques

Retrait des échantillons: Après la période d'exposition, les échantillons sont retirés puis laissés sécher.

Mesure de la perte de poids : Les échantillons sont à nouveau pesés avec précision pour déterminer leur masse finale. La différence entre la masse initiale et la masse finale représente la perte de masse due à la corrosion.

Calcul de la vitesse de corrosion (V_{corr}): Elle est déterminée par l'équation suivante.

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \times t} \text{ (mg/cm}^2 \cdot \text{h)} \quad (II.1)$$

Δm : la perte de masse en mg déterminée par la formule suivante :

$$\Delta m = m_i - m_f$$

m_i : la masse de l'échantillon avant l'essai en mg

m_f : la 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 cm^2

L'efficacité inhibitrice (EI_{grav}) : elle est donnée par la relation suivante :

$$EI_{grav}(\%) = \frac{V_{corr0} - V_{corr}^{inh}}{V_{corr0}} \times 100 \quad (II.2)$$

V_{corr0} : vitesse de corrosion de l'échantillon sans inhibiteur

$V_{inh\ corr}$: vitesse de corrosion de l'échantillon avec inhibiteur

Taux de recouvrement (θ) : est donné par la relation suivante :

$$\theta = \frac{EI}{100} \quad (II.3)$$

II.4.2.2. Méthodes électrochimiques

L'étude électrochimique du comportement des aciers dans des environnements corrosifs, qu'ils soient exposés à des inhibiteurs ou non, repose principalement sur l'analyse des courbes de polarisation $I = f(E)$ et des droites de Tafel. Ces approches électrochimiques offrent l'avantage d'être relativement rapides en termes de durée de mesure, et elles permettent de recueillir non seulement des informations sur la résistance à la corrosion, mais aussi d'autres données mécaniques précieuses qui peuvent contribuer à la conception d'inhibiteurs de corrosion et de stratégies appropriées. Les méthodes électrochimiques peuvent être catégorisées en deux groupes principaux : les méthodes stationnaires et les méthodes transitoires, également appelées non stationnaires [1].

II.4.2.2.1. Méthode stationnaire (Polarisation potentiodynamique)

Les méthodes stationnaires sont utilisées pour examiner un système qui se trouve dans un état proche de l'équilibre thermodynamique ; elles prennent en considération tous les couples redox présents dans la solution [2].

Les mesures électrochimiques ont été effectuées avec un montage comprenant un potentiostat-galvanostat de type Radiomètre PGP201, piloté par le logiciel Volta Master (voir figure II.5). Les courbes de polarisation $i=f(E)$ de l'interface métal/électrolyte ont été obtenues en mode potentiodynamique. Le potentiel imposé à l'électrode de travail varie de -800 à +200 mV par rapport au potentiel d'équilibre, à une vitesse de balayage de 60 mV/min après chaque période de 30 min d'immersion dans la solution.

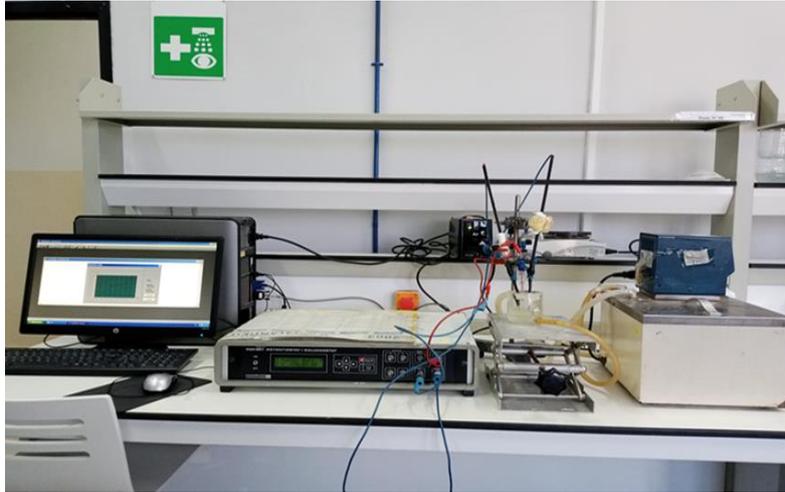


Figure II.5 : Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique

a) Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP)

Le potentiel de l'électrode de travail, aussi appelé potentiel circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon ou potentiel de repos, est une mesure importante en électrochimie. Il doit être mesuré par rapport à une électrode de référence. Cette mesure est unique, car elle ne perturbe pas l'état du système étudié.

En suivant le potentiel libre en fonction du temps, on peut observer la tendance à la corrosion, ce qui permet d'évaluer la noblesse des métaux. De plus, cette mesure fournit des informations sur les transitions préliminaires à l'interface métal/électrolyte, révélant ainsi la nature des processus en cours [3].

Les différences d'allures des courbes $E/\text{ref}=f(t)$

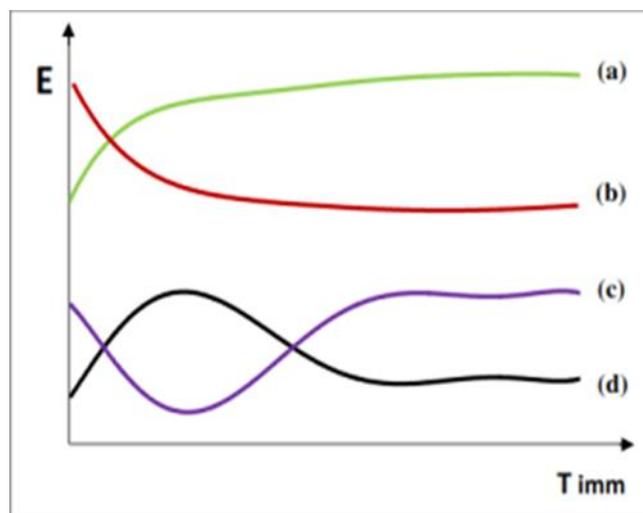


Figure II.6: Evaluation du potentiel en fonction du temps d'immersion

- La courbe (a) : La passivation du métal, qui entraîne la formation d'une couche protectrice, se traduit par un potentiel de plus en plus noble.
- La courbe (b) : La dissolution du métal est associée à un potentiel lié à l'oxydation qui devient de moins en moins noble ou plus négatif.
- La courbe (C) : La corrosion se divise en deux phases distinctes : d'abord, le potentiel devient plus négatif, puis il tend vers des valeurs plus positives. Cette séquence comprend une phase d'attaque initiale suivie d'une passivation. La première phase correspond au début de l'oxydation du métal, qui n'est pas durable, tandis que la seconde phase correspond à la passivation du métal, où il forme des complexes protecteurs.
- La courbe(d): La corrosion se compose de deux phases distinctes : tout d'abord, le potentiel du métal devient plus noble, puis il se déplace vers des valeurs plus négatives. Ce phénomène se produit lorsque, lors de son immersion, le métal est recouvert d'une couche protectrice. Cette couche se développe sur une période plus ou moins longue, puis elle est détruite, exposant ainsi le métal à nouveau.

b) Courbes de polarisation

L'établissement de la courbe de résistance potentielle des matériaux en milieu corrosif constitue un élément essentiel pour l'analyse des phénomènes de corrosion. Cette courbe permet de déterminer le changement d'intensité du courant circulant entre l'électrode étudiée et l'électrode de platine en fonction du potentiel appliqué à l'électrode étudiée, ce qui est évalué par rapport à une électrode de référence [4].

Les courbes de polarisation constituent les courbes d'intensités potentielles $E=f(I)$ ou $I=f(E)$ (figure II.7).

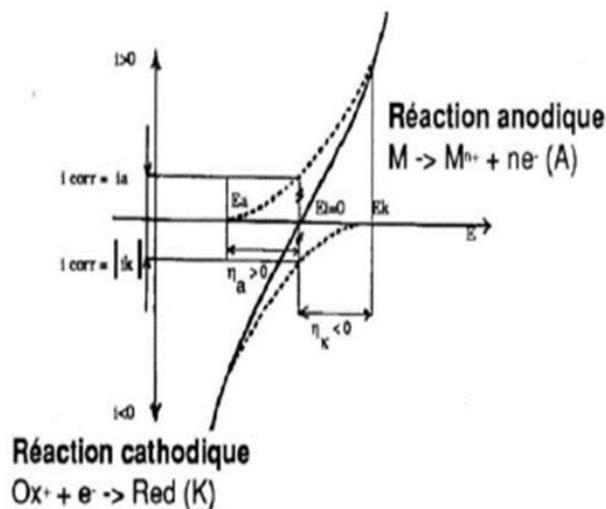


Figure II.7: Courbe de polarisation $E=f(i)$

L'analyse de ces courbes offre de précieuses informations sur le comportement d'un métal immergé dans un électrolyte, notamment en ce qui concerne sa capacité à se passiver ou à se corroder. Elle permet également de déterminer le mécanisme de corrosion, incluant la cinétique du transfert de charge, le transfert de matière et l'adsorption des espèces sur l'électrode. De plus, elle permet de différencier l'impact de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires, à savoir l'anodique et la cathodique, sur l'électrode de travail.

Il convient cependant de noter que la forme des courbes et les potentiels qui les caractérisent sont très sensibles à divers facteurs, tels que l'état de surface du matériau, la composition de l'électrolyte et la présence éventuelle de traces d'impuretés dans le réactif.

La ligne de Tafel (Figure. II.8) est obtenue à partir de balayages anodiques et cathodiques du potentiel de décrochage, représentant $\log(i)$ en fonction de E [5]. Ces courbes permettent de déterminer le potentiel de corrosion et le courant de corrosion, ainsi que, à partir de la pente, le coefficient de transfert d'électrons en oxydation (α) et en réduction (β). Lorsque la concentration des réactifs et des produits est uniforme dans l'électrolyte, la relation de Butler-Volmer peut être exprimée comme suit :

$$i = i_0 \exp\left(\frac{EI}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\frac{EI}{\beta_c}\right) \quad (II.4)$$

Avec :

β_a (mV/dec): Pente anodique de tafel

β_c (mV/dec): Pente cathodique de tafel

Pour déterminer expérimentalement les paramètres cinétiques I_{corr} , β_a et β_c , les densités de courant logarithmiques sont généralement préférées. Cela est dû au fait qu'elles mettent en évidence la relation linéaire du logarithme de I avec la surtension, surtout lorsque la valeur absolue de celle-ci est élevée [6].

En extrapolant ces droites, on obtient un point d'intersection correspondant à la valeur du potentiel de corrosion (E_{corr}) et du courant de corrosion (I_{corr}).

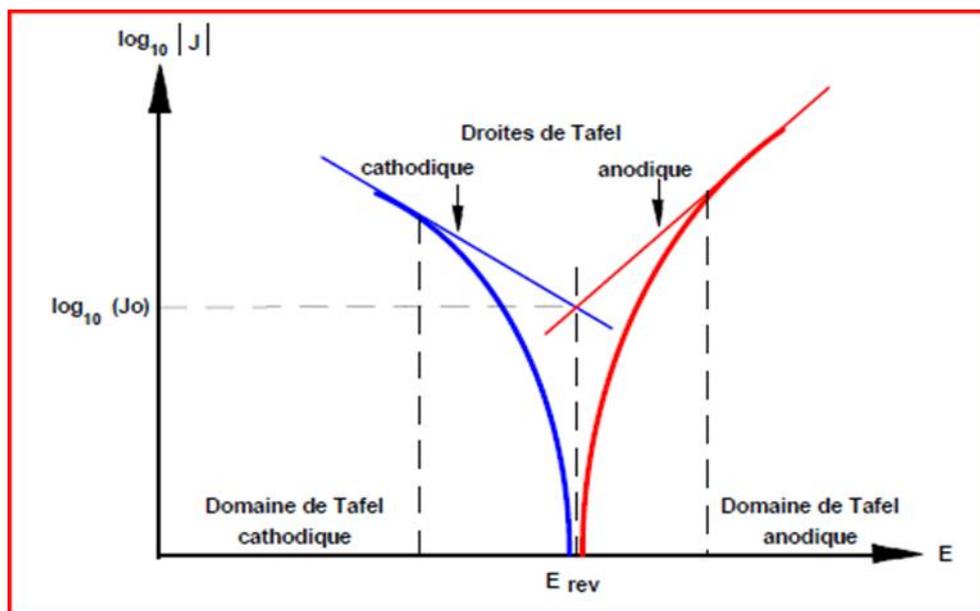


Figure II.8 : détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel.

II.4.2.2.2. Méthode stationnaire : La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

Des travaux antérieurs [7, 8] ont montré que la spectroscopie d'impédance électrochimique peut identifier les étapes fondamentales impliquées dans les processus globaux se produisant à l'interface de la solution métallique, avec diverses constantes de temps. Les mesures d'impédance électrochimique (Figure II.9) sont effectuées après une immersion de 30 minutes à un potentiel de corrosion, avec une faible amplitude (10 mV) et dans une gamme de fréquences allant de 100 kHz à 10 MHz. Pour tracer les diagrammes d'impédance, le même montage à trois électrodes utilisées dans les mesures de polarisation est relié à un Autolab qui permet de choisir le mode de travail, contrôlé par un micro-ordinateur équipé d'un logiciel FRA.

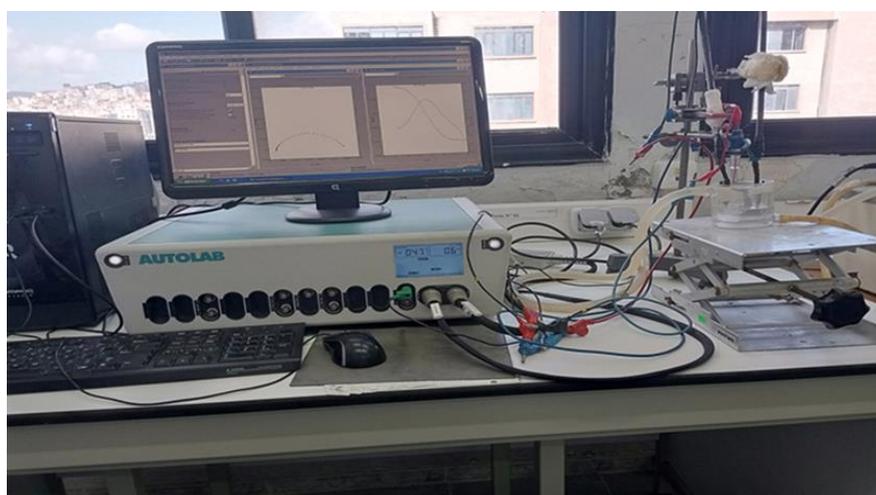


Figure II.9 : Dispositif expérimental AUTOLAB de mesure d'impédance électrochimique.

Dans le domaine de la corrosion, la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) présente plusieurs avantages. Elle permet d'évaluer les taux d'inhibition, de caractériser différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûre) et les mécanismes de réaction à l'interface électrochimique [8]. Cependant, elle nécessite un équipement spécifique (analyseur de fonction de transfert) et son exploitation est souvent plus complexe que les autres méthodes. Il existe deux modes de représentation graphique des diagrammes d'impédance :

Le diagramme de Nyquist (Figure. II.10. B), nommé d'après Harry Nyquist, est un outil graphique utilisé en électrochimie pour représenter les données obtenues à partir de la spectroscopie d'impédance électrochimique. Il affiche la partie imaginaire de l'impédance en fonction de sa partie réelle sur un plan complexe. Les données expérimentales sont représentées par des points qui peuvent former des arcs ou des lignes diagonales. La forme et la position de ces arcs fournissent des informations sur les propriétés électrochimiques du système, telles que la résistance de solution et la résistance de transfert de charge. Le diagramme de Nyquist est un outil précieux pour l'analyse des réactions électrochimiques et la caractérisation des interfaces électrode-électrolyte [9].

À partir des diagrammes d'impédance réalisés au potentiel de corrosion E_{corr} , on peut accéder à R_t , à C_{dl} et donc au taux d'inhibition dans les conditions opératoires utilisées.

Les résistances de transfert de charge (R_t) sont calculées à partir de la différence d'impédance aux hautes et basses fréquences sur l'axe des réels, comme suggéré par Tsuru et Haruyama [10].

L'efficacité inhibitrice de corrosion est calculée à partir de la résistance de transfert de charges selon la relation :

$$EI_{\text{imp}}(\%) = \frac{R_{t0} - R_t}{R_{t0}} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

Où R_{t0} et R_t sont respectivement les valeurs des résistances de transfert de charges sans et avec l'addition de l'inhibiteur.

Le diagramme de Bode des impédances (Figure II.10. A) est une représentation graphique utilisée en électrochimie pour analyser la variation de l'impédance d'un système en fonction de la fréquence. Il présente le module de l'impédance en fonction de la fréquence sur une échelle logarithmique. Parfois, il inclut également le déphasage de l'impédance en fonction de

la fréquence. Ce diagramme est précieux pour comprendre la réponse d'un système électrochimique à différentes fréquences, ce qui est crucial dans la compréhension des réactions électrochimiques [11].

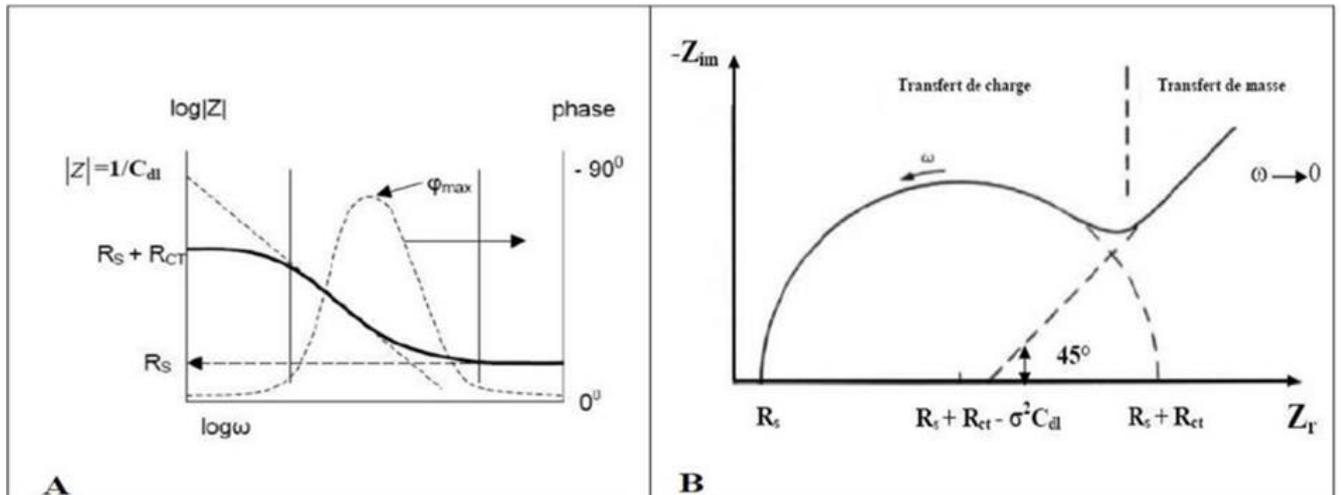


Figure II.10: Représentation de l'impédance électrochimique dans le plan complexe (A) de Bode et (B) de Nyquist pour un système faradique

II.5. Les isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont des relations qui décrivent la quantité d'adsorbé (gaz, liquide ou soluté) adsorbé à une interface adsorbé/adsorbant en fonction de la pression (pour les gaz) ou de la concentration (pour les liquides). Voici les isothermes d'adsorption les plus couramment rencontrées :

II.5.1. Isotherme de Langmuir :

Cette isotherme suppose une couche mono-moléculaire d'adsorbé sur la surface de l'adsorbant, avec une adsorption réversible et aucun recouvrement des sites adsorbants. Elle est souvent utilisée pour décrire l'adsorption de gaz sur des surfaces solides homogènes [12].

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \tag{II.6}$$

Avec :

K_{ads} : désigne le coefficient d'adsorption.

C_{inh} : la concentration de l'inhibiteur dans l'électrolyte.

II.5.2. Isotherme de Temkin

Cette isotherme suppose une diminution linéaire de l'énergie d'adsorption avec la couverture de surface. Elle prend également en compte les interactions entre les molécules adsorbées. Elle est souvent utilisée pour les adsorbats qui subissent une adsorption chimique plutôt que physique [13].

$$\exp(-2a\theta) = KC_{inh} \quad (II.7)$$

Avec :

a: constante d'interaction entre particule adsorbées. **C_{inh}** : la concentration de l'inhibiteur dans l'électrolyte et **θ** : le recouvrement de la surface.

II.5.3. Isotherme de Frumkin

L'isotherme de Frumkin est représentée après réarrangement par l'expression suivante :

$$\ln\left[\frac{\theta}{c(\theta - 1)}\right] = \ln K + 2a\theta \quad (II.8)$$

Le paramètre « a » possède les dimensions suivantes : J/mol par mol/ cm³, il exprime la manière dont un recouvrement accru modifie l'énergie d'adsorption de l'espèce. Si « a » est positif, les interactions entre deux espèces à la surface sont attractives, si a est négatif, les interactions sont répulsives, si a = 0, l'isotherme de Frumkin se rapproche de l'isotherme de Langmuir [14].

II.5.4. Isotherme de Freundlich :

Cette isotherme suppose une adsorption multi-couches, avec une énergie d'adsorption décroissante avec la couverture de surface. Elle est souvent utilisée pour décrire l'adsorption sur des surfaces hétérogènes ou lorsque des interactions entre les adsorbats sont importantes [15].

$$\log\theta = n\log C_{inh} + \log K_{ads} \quad (II.9)$$

n est un paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaires dans la couche adsorbée et K_{ads} représente la constante d'équilibre du processus d'adsorption.

II.5.5. Isotherme de El-Awady :

L'isotherme d'El-Awady est utilisée dans le domaine de l'ingénierie environnementale. Contrairement à l'isotherme de Langmuir qui suppose une adsorption monocouche sur une surface homogène, l'isotherme de El-Awady prend en compte la possibilité d'adsorption multicouches et la présence de sites actifs de nature hétérogène. Ainsi, tandis que l'isotherme de Langmuir est plus adaptée aux systèmes où l'adsorption est uniforme et la surface est homogène, l'isotherme de El-Awady est mieux adaptée pour des systèmes où les conditions d'adsorption sont plus complexes, par exemple en présence de sites d'adsorption variés ou lorsque des multicouches adsorbées sont formées. Son expression est décrite comme suite :

$$\ln \frac{\theta}{1-\theta} = \ln K + y \ln C_{inh} \quad (II. 10)$$

$K_{ads} = K^{1/y}$, K_{ads} : est la constante d'équilibre du processus d'adsorption, et $1/y$: représente le nombre de sites actifs de la surface métallique occupés par une molécule.

Références bibliographiques

- [1] S. Athmani, (2013) Étude des couches minces à base de terre rare destinées à la protection des matériaux contre la corrosion, Thèse de Magistère, université de Souk Ahres.
- [2] P. Boummersbach, (2005). Évolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques, Thèse de doctorat, université de Lyon.
- [3] A. Corrigan, (1987) «The catalysis of the Oxygen Evolution Reaction by Iron Impurities in Thin Film Nickel Oxide Electrodes ». J. Electrochem, Soc. 337.
- [4] C. Fiaud, (1990). Inhibiteur de corrosion, Technique de l'ingénieur, Méthodes de prévention et de lutte contre la corrosion.
- [5] V. Ghetta, J. Fouletier, (2009). « Sels fondus à haute température », PPUR Presses polytechniques 348.
- [6] D. Landolt, (1993) « Corrosion et chimie de surfaces métaux, réimprimée Éditeur PPUR « Presses polytechniques » 552.
- [7] C. Grabielli, M. Keddam, (1974). Elctrochim Acta. 335.
- [8] L. Jaubert, (2004). « Étude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques » Thèse de doctorat, Lyon, France.
- [9] H. Nyquist, (1924). Certain factors affecting telegraph speed, Bell System Technical Journal, 3. 324.
- [10] T. Tsuru, S. Haruyama, B. Gijustu, (1978) J. Japan Soc, 27. 573.
- [11] J. R. Macdonald. (2005). Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications (2nd ed.). Wiley Inter science
- [12] I. Langmuir (1918). «The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. » Journal of the American Chemical Society, 40, 1361.
- [13] M. J. Temkin, V. Pyzhev (1940). "Recent modifications to Langmuir Isotherms." Acta Physicochimica URSS, 12, 217.
- [14] H. Hamani, (2015). « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff », Thèse de doctorat. Université FerhatAbbas – Setif-1
- [15] H. Freundlich (1906). «Over the adsorption in solution» Journal of Physical Chemistry, 57, 385.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la concentration et de la température sur le processus de corrosion de l'acier dans 0,5M HCl en absence et en présence d'une nouvelle molécule nommé CYN3. Pour réaliser cette étude nous avons utilisé la méthode gravimétrique et les méthodes électrochimiques (potentiodynamique et spectroscopie d'impédance)

Les résultats tirés de la méthode gravimétrique montrent que la vitesse de corrosion diminue tandis que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'accroissement de la concentration en inhibiteur pour chaque température, ce qui provoque la formation d'une couche barrière qui réduit la réactivité du métal. L'effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de la molécule a été étudié dans l'intervalle de 25 à 45 °C. Le pouvoir inhibiteur de cette molécule reste quasiment constant avec l'augmentation de la température.

L'étude par polarisation potention-dynamique et l'exploitation des droites de Tafel pour chaque température révèlent que dans le domaine anodique et cathodique, l'addition d'inhibiteur se traduit par une diminution des densités du courant. Par conséquent le composé comporte comme un inhibiteur de type mixte.

Les résultats obtenus par la spectroscopie d'impédance montrent aussi que le dépôt des molécules de l'inhibiteur CYN3 sur la surface de l'acier conduit à la formation d'un film protecteur qui entraîne l'augmentation de la résistance de polarisation ou bien de transfert de charge et la diminution de la capacité de la double couche. L'adsorption de l'inhibiteur se fait selon l'isotherme de Langmuir.

La valeur négative de ΔG_{ads} indique la spontanéité du processus d'adsorption ainsi que la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique. L'augmentation de l'énergie d'activation par rapport à la solution témoin, est attribuée à la chimisorption (forte adsorption).

Il y a un bon accord entre les valeurs d'efficacité inhibitrice déterminées par les trois méthodes: gravimétrie, polarisationpotention-dynamique et spectroscopie d'impédance électrochimique. Sur la base de ses résultats, on peut dire que la molécule CYN3 est un bon inhibiteur de la corrosion de l'acier dans le milieu 0.5M HCl.

Perspectives

Les perspectives que l'on peut envisager pour des travaux futurs sont :

- ✓ L'influence des conditions hydrodynamiques sur le pouvoir filmant et l'efficacité inhibitrice de cette molécule.
- ✓ Approfondir la présente étude par des caractérisations complémentaires telles que la diffraction des rayons X (DRX) et microscopie électronique à balayage (MEB).
- ✓ Etudier l'effet de synergie par l'association avec des cations métalliques ou d'autres composés organiques afin d'améliorer l'action inhibitrice du composé (Zn^{2+} , Mg^{2+} ...).

Résumé

Dans cette étude, nous nous sommes penchés sur la protection de l'acier contre la corrosion en utilisant des inhibiteurs organiques synthétisés, appelés CYN3. Nous avons examiné l'efficacité anti-corrosion en faisant varier la concentration de ces composés ainsi que la température dans un milieu acide. Nous avons utilisé plusieurs techniques, notamment la perte de poids, la polarisation potentiodynamique et la spectroscopie d'impédance électrochimique. Les résultats des courbes de polarisation potentiodynamique ont révélé que la molécule organique agit comme un inhibiteur de type mixte dans un environnement acide. Les données d'impédance suggèrent que le processus de corrosion est principalement contrôlé par l'activation. De plus, nous avons observé une efficacité d'inhibition plus élevée dans l'acide chlorhydrique (85 % à une concentration de 10^{-3} M). Les valeurs de ΔG_{ads} , ΔH_{ads} , E_a et ΔS_{ads} , dans une plage de température de 293 à 308 K, indiquent que cette nouvelle molécule retarde considérablement la corrosion de l'acier dans les solutions acides grâce à un effet d'entraînement par chimisorption. L'adsorption de la molécule organique sur la surface de l'acier suit le modèle de Langmuir.

Abstract

In this study, we focused on protecting steel against corrosion using synthesized organic inhibitors called CYN3. We examined the anti-corrosion efficacy by varying the concentration of these compounds and the temperature in an acidic medium. Several techniques were employed, including weight loss measurements, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy. The results from the potentiodynamic polarization curves revealed that the organic molecule acts as a mixed-type inhibitor in an acidic environment. Impedance data suggest that the corrosion process is primarily controlled by activation. Additionally, we observed higher inhibition efficiency in hydrochloric acid (85% at concentration of 10^{-3} M). The values of ΔG_{ads} , ΔH_{ads} , E_a , and ΔS_{ads} , in the temperature range of 293 to 308 K, indicate that this new molecule significantly retards steel corrosion in acidic solutions through a chemisorption-driven effect. The adsorption of the organic molecule on the steel surface follows the Langmuir model.

ملخص

في هذه الدراسة، ركزنا على حماية الفولاذ من التآكل باستخدام مثبطات عضوية مصنّعة تسمى CYN3. قمنا بفحص فعالية مقاومة التآكل من خلال تغيير تركيز هذه المركبات ودرجة الحرارة في وسط حمضي. استخدمنا عدة تقنيات، بما في ذلك قياسات فقدان الوزن، الاستقطاب الجهد الديناميكي، وقياس الطيف الكهربائي للممانعة. كشفت نتائج منحنيات الاستقطاب الجهد الديناميكي أن الجزيء العضوي يعمل كمثبط من النوع المختلط في بيئة حمضية. تشير بيانات الممانعة إلى أن عملية التآكل تتحكم بها بشكل أساسي التفعيل. بالإضافة إلى ذلك، لاحظنا كفاءة تثبيط أعلى في حمض الهيدروكلوريك (85% عند تركيز 10^{-3} م). تشير قيم ΔG_{ads} و ΔH_{ads} و E_a و ΔS_{ads} في نطاق درجة الحرارة من 293 إلى 308 كلفن إلى أن هذا الجزيء الجديد يؤخر بشكل كبير تآكل الفولاذ في المحاليل الحمضية من خلال تأثير يعتمد على الامتزاز الكيميائي. يتبع امتزاز الجزيء العضوي على سطح الفولاذ نموذج لانجموير.