

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

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DES SCIENCES**  
**DEPARTEMENT DE CHIMIE**

N° :



**DOMAINE : SCINCES DE LA MATIE**

**FILIERE : CHIMIE**

**OPTION : CHIMIE DES MATERIAUX**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par :**

CHERIFI Safia  
SAADALLAH CHeyma

**Intitulé**

**Étude comparative de l'efficacité inhibitrice**  
**De corrosion des composés inorganiques toxiques et nouveaux**  
**inhibiteurs de source naturelle.**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Ben Nabila Nabila	MCA Université de M'sila	Président
Berarma Khadidja	MCA Université de M'sila	Rapporteur
Yousfi Samia	MAA Université de M'sila	Examinatrice

**Année universitaire : 2023/2024**

# REMERCIEMENTS

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre chère professeure et encadrante BERARMA Khadidja pour son soutien précieux, ses conseils avisés et son encadrement vigilant tout au long de notre cheminement. Nous lui exprimons notre gratitude sincère pour nous avoir accompagnées, orientées, soutenues et conseillées dans la réalisation de cette tâche.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude sincère envers tous les enseignants, intervenants et toutes les personnes qui ont apporté leur contribution à notre réflexion et à notre apprentissage. La valeur inestimable de leurs paroles, écrits, conseils et critiques a été d'enrichir nos connaissances et d'approfondir nos recherches. En raison de leur disponibilité et de leur désir de partager leur expertise, notre parcours académique s'est considérablement simplifié*

*Nous profitons de ce moment pour exprimer notre sincère reconnaissance envers tous les ingénieurs du laboratoire de chimie, dont l'assistance précieuse et les connaissances techniques ont été indispensables pour mener à bien cette tâche. Leur soutien constant et leur implication dans la recherche scientifique ont été une véritable source d'inspiration et ont joué un rôle essentiel dans notre apprentissage.*

*Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers les membres des jurys pour leur investissement, leur expertise et leur évaluation minutieuse de cette tâche. Leur analyse détaillée et leurs commentaires constructifs ont été extrêmement bénéfiques pour notre progression académique.*

## الاهداء

الحمد لله حباً وشكراً وإمتناناً على البدء والختام  
والصلاة والسلام على نبينا المجاهد الشهيد

{وَأَخِرُّ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ}

وبكل حب نهدي هذا النجاح والتخرج :

من دعمنا بلا حدود وأعطانا بلا مقابل من علمنا أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة ..أبائنا  
إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامهم ..إلى من إحتضنونا بدعائهم وسهلوا لنا الشدائد بدعائهم  
..أمهاتنا

إلى من ساندونا بكل حب عند ضعفنا أزاحوا عن طريقنا المتاعب إلى من شد الله بهم عضدنا  
إخوتنا حفظهم الله

إلى من رزقنا الله بهن لنعرف بهم طعم الحياة الجميلة تلك الملائكة التي غيرن مفاهيم الحب  
والصداقة والعطاء أخواتي

إلى رفقاء الطريق رفقاء الروح من هونوا عن تعب الطريق إلى من شجعونا على المثابرة وإكمال  
المسيرة إلى رفقاء السنين ممتنين لكم

إلى إخوتنا في غزة ... إلى من يمشون على أثار الرسول يصنعون لنا الإسلام من جديد.. رجال  
العبور المقدس الأطهار الأبرار ..إلى شهادتنا في غزة العزة راجين من المولى النصر والعزة  
والتمكين

سعدالله شيماء

شريفى صفيه

## المخلص:

على الرغم من ان الكرومات تفضل مثبطات فعالة للتآكل، الى ان المخاوف البيئية والصحية حفزت البحث عن بدائل أكثر أماناً يظهر الأموكسيسيلين والباراسيتامول إمكانات واعدة كـمثبطات تآكل أقل سمية وأكثر صداقة للبيئة. الهدف من هذا العمل هو تقييم الفعالية المثبطة للباراسيتامول والأموكسيسيلين ضد تآكل سبائك الألومنيوم في وسط الكلوريد، مقارنةً بأيونات الكرومات. وتشمل الأساليب التجريبية المستخدمة إمكانات الدائرة المفتوحة، ومنحنيات الاستقطاب الديناميكية والتحليل الطيفي للمقاومة الكهروكيميائية (EIS). أظهرت النتائج أن الباراسيتامول كان له أعلى معدل تثبيط (87%) يليه الكرومات (81%) في حين كان للأموكسيسيلين أقل معدل (74%) بتركيز مماثل قدره 300 جزء في المليون.

الكلمات المفتاحية: تآكل ، مثبطات ، أموكسيسيلين ، باراسيتامول

## **Résumé :**

Bien que les chromates restent des inhibiteurs de corrosion très efficaces, les préoccupations environnementales et sanitaires ont motivé la recherche d'alternatives plus sûres. L'amoxicilline et le paracétamol présentent un potentiel prometteur en tant qu'inhibiteurs de corrosion moins toxiques et plus écologiques. Le but de ce travail est d'évaluer l'efficacité inhibitrice du paracétamol et de l'amoxicilline contre la corrosion de l'alliage d'aluminium en milieu chlorure, comparée à celle des ions chromates. Les méthodes expérimentales utilisées incluent le potentiel de circuit ouvert, les courbes de polarisation potentiodynamiques et la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS). Les résultats montrent le paracétamol avait le taux d'inhibition le plus élevé (87%), suivi des chromates (81%), tandis que l'amoxicilline avait le taux le plus bas (74%) à une concentration similaire de 300ppm.

**Mots clés : Corrosion, Inhibiteurs, Amoxicilline, paracétamol**

## **Abstract**

Although chromates remain highly effective corrosion inhibitors, environmental and health concerns have motivated the search for safer alternatives. Amoxicillin and paracetamol have promising potential as less toxic and more environmentally friendly corrosion inhibitors. The aim of this work is to evaluate the inhibitory efficacy of paracetamol and amoxicillin against corrosion of aluminum alloy in chloride medium, compared to that of chromate ions. The experimental methods used include open circuit potential, potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that paracetamol had the highest inhibition rate (87%), followed by chromates (81%), while amoxicillin had the lowest rate (74%) at a similar concentration of 300ppm.

**Keywords: Corrosion, Inhibitors, Amoxicillin, paracétamol**

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : La corrosion des alliages d'aluminium et la protection par les inhibiteurs</b>	
<b>I.1 Définition de l'aluminium</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2 Les alliages d'aluminium</b> .....	<b>4</b>
I.2.1 .Applications des alliages d'aluminium.....	4
<b>I.3 La Corrosion des alliages d'aluminium</b> .....	<b>5</b>
<b>I.3.1 La corrosion uniforme</b> .....	<b>5</b>
<b>I.3.2 La corrosion caverneuse localisée</b> .....	<b>6</b>
<b>I.3.3 La corrosion sous contrainte</b> .....	<b>7</b>
<b>I.3.4 La corrosion galvanique</b> .....	<b>8</b>
<b>I.3.5 La corrosion par piqûres localisé</b> .....	<b>9</b>
<b>I.4. les Facteurs de corrosion</b> ... ..	<b>10</b>
<b>I.4.1 Nature du métal</b> .....	<b>10</b>
<b>I.4.2 Conditions d'emploi</b> .....	<b>10</b>
<b>I.4.3 Milieu d'attaque</b> .....	<b>11</b>
<b>I.4.4 Indice du temps</b> .....	<b>11</b>
<b>I.5 Protection contre la corrosion</b> .....	<b>11</b>
<b>I.6 Les inhibiteurs de corrosion</b> .....	<b>11</b>
<b>I.6.1 Propriétés d'inhibiteurs</b> .....	<b>11</b>
<b>I.6.2 Les classes d'inhibiteurs</b> ... ..	<b>12</b>
I.6.2.1 Classement par la nature des molécules des inhibiteurs ... ..	<b>12</b>
<b>a) Les inhibiteurs organiques</b> .....	<b>12</b>

b) les inhibiteurs inorganiques .....	12
<b>I.6.2.2 Classement par mécanisme d'action électrochimique .....</b>	<b>13</b>
a) Les inhibiteurs anodiques .....	13
b) Les inhibiteurs cathodiques .....	14
c) Les inhibiteurs mixtes .....	14
<b>I.6.2.3 Classements par mécanisme réactionnel .....</b>	<b>15</b>
a) les inhibiteurs passivant .....	15
b) les inhibiteurs de précipitation .....	16
<b>I.7 Contributions sur l'utilisation des médicaments comme inhibiteurs .....</b>	<b>17</b>
 <b>Chapitre II : Matériels et Méthodes</b>	
II.1 Introduction .....	19
<b>II.2 les Méthodes électrochimiques .....</b>	<b>19</b>
II.2.1 Potentiel en circuit ouvert OCP .....	19
II.2.2 Courbe de polarisation .....	21
<b>II.2.3 La spectroscopie d'impédance électrochimique .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3 Cellule électrochimique .....</b>	<b>23</b>
II.3.1 Electrode de référence .....	23
II.3.2 Electrode de travail .....	23
II.3.3 Electrode auxiliaire (CE) .....	24
<b>II.4 les produits .....</b>	<b>24</b>
II.4.1 Inhibiteurs organiques .....	24
II.4.2 Inhibiteurs inorganiques .....	25
 <b>Chapitre III : Résultats et Discussion</b>	
III.1 Introduction .....	26

<b>III.2.</b> Le potentiel à circuit ouvert .....	<b>26</b>
<b>III.3.</b> Les courbes de polarisation et les droites de Tafel.....	<b>29</b>
III.3. Les diagrammes d'impédance .....	<b>35</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>38</b>
<b>Référence bibliographique</b> .....	<b>39</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Les différents types de la corrosion...	5
<b>Figure I.2</b> : Mécanisme de la corrosion par crevasse.....	7
<b>Figure I.3</b> : Schéma de la fissuration par corrosion sous contraint.....	8
<b>Figure I.4</b> :Comprendre la corrosion galvanique.....	9
<b>Figure I.5</b> : corrosion par piqure d'alliage d'aluminium .....	10
<b>Figure I.6</b> :Représentation en milieu « acide » du rôle d'un inhibiteur anodique : (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur.....	14
<b>Figure I.7</b> :Représentation du rôle d'un inhibiteur cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec Inhibiteur.....	14
<b>Figure I.8</b> : Représentation du rôle d'un inhibiteur mixte... ..	15
<b>Figure I.9</b> :Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique .....	16
<b>Figure II.1</b> Courbes théorique $E_{corr.} = f(T)$ .....	19
<b>Figure II.2</b> courbe de polarisation.....	20
<b>Figure II.3</b> Les droites de Tafel.....	21
<b>Figure II.4</b> : Représentation simplifiée d'une interface électrochimique pour une réaction avec transfert de charges et diffusion, et diagramme d'impédance correspondant. Avec $C_d$ : Capacité, $R_t$ : Résistance de transfert de charge, $R_s$ : Résistance série et $Z_W$ : Impédance de Warburg... ..	22
<b>Figure II.5</b> :Electrode de Référence.....	23
<b>Figure II.6</b> : Schéma de cellule d'électrolyse... ..	24
<b>Figure II.7</b> la formule générale de composé paracétamol.....	25

<b>Figure II.8</b> : la formule générale de composé amoxicilline... ..	<b>25</b>
<b>Figure II.9</b> : la formule générale de chromate... ..	<b>25</b>
<b>Figure III.1(a, b, c)</b> : Effet de la concentration des inhibiteurs (a.chromate, b.amoxicilline , c.paracétamol) sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'aluminium dans NaCl.....	<b>27</b>
<b>Figure III.2(a, b, c)</b> : L'effet de l'ajout des inhibiteurs (a.chromate , ,b.amoxicilline, ,c.paracétamol) à différentes concentrations sur les courbes de polarisations d'une électrode d'aluminium dans NaCl .....	<b>31</b>
<b>Figure III .3(a, b, c)</b> : Diagrammes de Nyquist pour une électrode d'aluminium' dans NaCl en absence et en présence des inhibiteurs (a.chromate ,b.amoxicilline , c.paracétamol).....	<b>36</b>

## Listes des tableaux

<b>Tableau I.1</b> :les propriétés d'aluminium(Al) .....	<b>4</b>
<b>Tableau I.2</b> : l'utilisation de médicaments comme inhibiteurs de corrosion... .....	<b>18</b>
<b>Tableau II.1</b> :Les paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel .....	<b>21</b>
<b>Tableau III.1</b> : valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence des inhibiteurs (chromate , amoxicilline, paracétamole) .....	<b>29</b>
<b>Tableau III .2</b> : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence des inhibiteurs (paracétamol, chromate l'amoxicilline).....	<b>32</b>
<b>Tableau III.2.a</b> : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de chromate.....	<b>32</b>
<b>Tableau III.2.B</b> : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de paracétamol.....	<b>33</b>
<b>Tableau III.2.C</b> : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de l'amoxicilline.....	<b>33</b>
<b>Tableau III.3</b> : Le taux d'inhibition de la corrosion.....	<b>34</b>

# INTRODUCTION

## Introduction

La corrosion des alliages d'aluminium en milieu chloruré est un problème majeur dans de nombreuses industries, notamment l'aéronautique, l'automobile et la construction maritime. L'exposition à des environnements riches en ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) accélère la dégradation des matériaux en aluminium. Les inhibiteurs de corrosion inorganiques, tels que les chromates, ont été utilisés pour protéger les métaux contre la corrosion. Cependant, la toxicité et les impacts environnementaux de ces composés ont incité les chercheurs à explorer des alternatives plus sûres et respectueuses de l'environnement.

Les médicaments, bien connus pour leurs propriétés thérapeutiques, se présentent également comme des inhibiteurs de corrosion prometteurs. Les médicaments contiennent souvent des groupes fonctionnels (tels que des groupes amine, hydroxyle, et carboxyle) qui favorisent l'adsorption sur les surfaces métalliques. Ils présentent l'avantage en ce qui concerne la compatibilité avec l'environnement et la disponibilité.

Dans ce contexte, l'emploi de médicaments comme des inhibiteurs de corrosion non toxiques constitue une opportunité prometteuse. Le paracétamol et l'amoxicilline, par exemple, sont couramment employés en raison de leur biodégradabilité.

L'objectif de ce présent travail est d'évaluer l'efficacité de médicaments non toxiques tels que le paracétamol et l'amoxicilline en tant qu'anticorrosion pour les alliages d'aluminium en milieu chloruré. Des mesures de potentiel de circuit ouvert (OCP), des courbes de polarisation de Tafel et la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) sont réalisées lors des tests.

Notre travail sera consacré à l'étude électrochimique de l'efficacité inhibitrice de deux médicaments, le paracétamol et l'amoxicilline, comparée au chromate de potassium, de la corrosion de l'alliage d'aluminium en milieu chlorure.

Le mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à un aperçu sur les propriétés, les applications ainsi qu'à la corrosion des alliages d'aluminium et à l'inhibition de corrosion.
- ❖ Le deuxième chapitre inclut la présentation du montage électrochimique des différentes techniques utilisées et les conditions expérimentales.
- ❖ Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et leur interprétation.  
L'ensemble du travail a été parachevé par une conclusion générale.

# CHAPITRE 1

*La corrosion des alliages d'aluminium*

*Et la protection par les inhibiteurs*

## I.1. L'aluminium :

L'aluminium est l'élément chimique de numéro atomique 13, de symbole Al. Il appartient au groupe 13(III.A) du tableau périodique ainsi qu'à la famille des métaux valves.

L'aluminium est un métal malléable, argenté, peu altérable à l'air et peu dense. Métal blanc, léger, le plus employé après le fer.

L'aluminium est un matériau largement utilisé dans diverses industries en raison de ses nombreuses propriétés avantageuses. Voici quelques-uns des principaux avantages de l'aluminium :

- Légèreté
- Résistance à la corrosion
- Conduction thermique et électrique
- Malléabilité et formabilité
- Recyclable
- Résistance mécanique
- Durabilité
- Esthétique
- Sécurité alimentaire

En résumé, l'aluminium est un matériau aux propriétés exceptionnelles qui le rendent indispensable dans de nombreuses industries et applications. Sa légèreté, sa résistance à la corrosion, sa recyclabilité et sa polyvalence en font un choix de premier plan pour les ingénieurs et les concepteurs. Le tableau I.1 suivant regroupe les différentes propriétés de l'aluminium (Al).

**Tableau I.1** : les propriétés d'aluminium(Al) :

Propriétés	Caractéristiques
Masse volumique à 25°C	2698.7 kg/m <sup>3</sup>
Point de fusion .	660°C.
Abondance naturelle	Avec 7.5% en masse (5.6% Fe). C'est le métal le plus abondant dans l'écorce terrestre.
Toxicité	D'un point de vue alimentaire, l'aluminium est un métal non toxique.
Capacité thermique massique à 20 °C	$c = 950 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique à 20 °C	$\lambda = 217.6 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$

## II.2. Les alliages de l'aluminium :

Un alliage d'aluminium est un composé métallique formé essentiellement d'aluminium combiné à d'autres éléments afin d'améliorer ses propriétés. Les alliages d'aluminium ont une conductivité plus faible que celle de l'aluminium pur, variant de 30 % à 50 % IACS. A poids égal de cuivre, l'aluminium a une conductivité électrique 2 fois supérieure, d'où les applications de l'aluminium dans le transport d'électricité haute tension sur grande distance.

### I.2.1 .Applications des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans diverses industries en raison de leurs excellentes propriétés, telles que la légèreté, la résistance à la corrosion et la bonne conductivité thermique et électrique. Ces applications démontrent la polyvalence et l'importance des alliages d'aluminium dans de nombreux domaines industriels, parmi ces applications :

- 1- Les alliages d'aluminium sont essentiels dans la construction d'avions et de vaisseaux spatiaux en raison de leur légèreté et de leur résistance élevée.
- 2- Les alliages d'aluminium sont utilisés pour les moteurs, les jantes, les châssis et d'autres composants automobiles pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire le poids total des véhicules.
- 3- Les alliages d'aluminium sont couramment utilisés dans les façades de bâtiments, les fenêtres, les portes, et les toits en raison de leur durabilité et de leur esthétique moderne.

4- Les canettes de boissons, les emballages alimentaires et les feuilles d'aluminium utilisent des alliages d'aluminium pour leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur capacité à préserver le contenu.

5- Les alliages d'aluminium sont utilisés dans les composants électroniques tels que les boîtiers de téléphones, les ordinateurs portables et d'autres gadgets en raison de leur capacité à dissiper la chaleur et leur légèreté.

### I.3. La Corrosion des alliages d'aluminium :

La résistance à la corrosion est un avantage de l'aluminium et de ses alliages, mais ils ne sont pas totalement protégés contre ce phénomène. Les différentes corrosions auxquelles peuvent être exposés l'aluminium et ses alliages

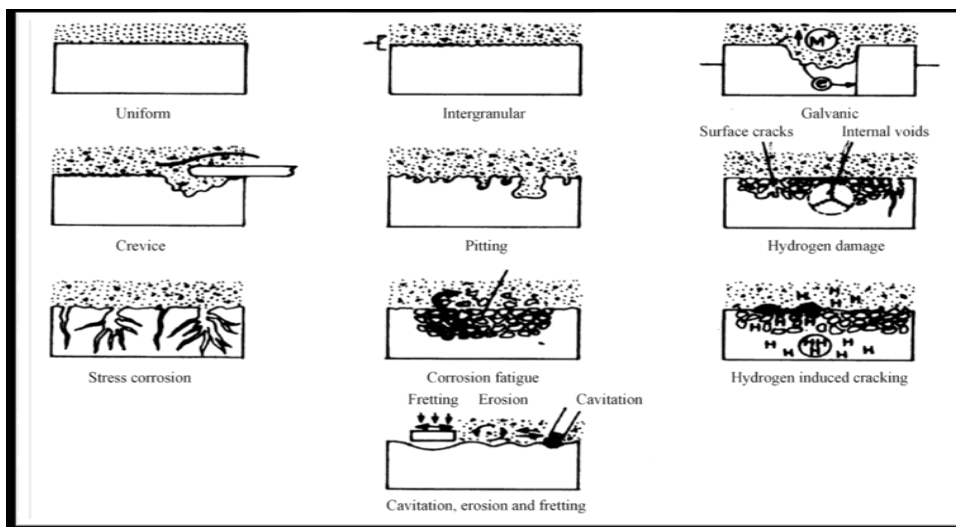


Figure I.1 : Les différents types de la corrosion

#### I.3.1. La Corrosion uniforme :

La corrosion uniforme, provoque une corrosion plus ou moins homogène sur une surface métallique. On peut aussi la décrire comme un type de corrosion qui se produit à la même vitesse dans toute la zone affectée. La principale cause de cette corrosion est l'oxygène. La fonte et l'acier sont les matériaux les plus fréquemment exposés à la corrosion généralisée. Lorsqu'ils sont soumis à une humidité, ils acquièrent une apparence rouillée.

La corrosion uniforme constitue la dissolution quasi uniforme de tous les points constitutifs de la surface d'un matériau qui sont attaqués sensiblement à la même vitesse par le milieu corrosif. La conséquence de la corrosion uniforme est une diminution régulière de l'épaisseur de la pièce métallique corrodée

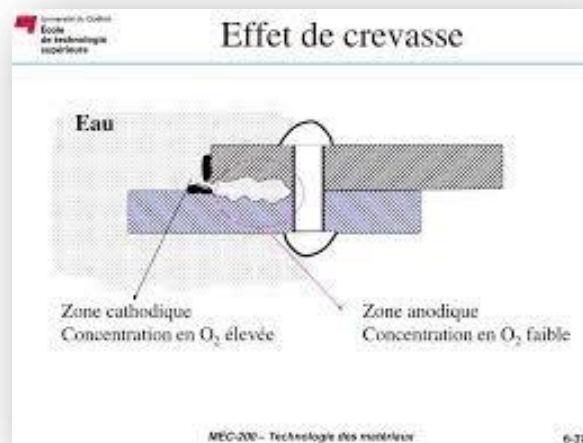
### **I.3.2. La Corrosion caverneuse localisée :**

La corrosion caverneuse fait référence à la corrosion localisée qui se produit au niveau de la crevasse ou de l'espace entre deux ou plusieurs métaux d'assemblage. La corrosion caverneuse est un type de corrosion par piqûres qui se produit spécifiquement dans la région à faible débit d'une crevasse. Ce type d'attaque est généralement associé à de petits volumes de solution stagnante causés par des trous, la surface des joints, des joints à recouvrement, des dépôts de surface et des crevasses sous les têtes de boulons et de rivets. Les dommages ont lieu en raison de la différence de concentration des constituants, principalement l'oxygène, dans les surfaces concernées [1]

La zone de joint a une teneur en oxygène comparativement inférieure à celle de la zone externe, de sorte que la zone de joint agit comme une anode tandis que la zone externe agit comme une cathode. Cette corrosion est déclenchée par des gradients de concentration. Le regroupement des ions chlorures à l'intérieur d'une crevasse la déclenche. La présence de chlorure ajoute plus de difficultés lors de la manipulation avec la corrosion caverneuse [2]

Les facteurs favorisant la corrosion caverneuse sont les suivants :

- Le type de matériau, c'est-à-dire alliage, métal.
- Caractéristiques géométriques des crevasses telles que la rugosité de surface.
- Les conditions environnementales tels que le niveau de pH, température, la présence de Cl<sup>-</sup>, etc..



**Figure I.2 :** Mécanisme de la corrosion par crevasse

### I.3.3. La Corrosion sous contrainte :

La corrosion sous contrainte, appelée également corrosion sous tension, est relative à la formation de fissures dues à certains milieux corrosifs. Après une période d'incubation généralement assez longue, les fissures peuvent se propager rapidement et conduisent à la destruction d'un appareil

La Corrosion Sous Contrainte (CSC) est une combinaison de dégradation chimique localisée d'un matériau et de contrainte mécanique appliquée sur celui-ci (initialement présent en milieu inerte). Cela entraîne l'apparition de fissures en milieu corrosif, qu'elles soient résiduelles ou appliquées, ce qui entraîne l'apparition d'une ou plusieurs fissures fragiles et leur propagation au sein du matériau. On peut accélérer cette opération soit par des contraintes internes résiduelles présentes dans le métal, soit par des contraintes externes. Il se manifeste surtout à des températures élevées. Il se rencontre davantage dans les alliages que dans les métaux. La formation du CSC ne peut avoir lieu que si les trois conditions suivantes sont remplies : (i). Présence de matériaux vulnérables (ii) exposés à un milieu corrosif et (iii) sujets à des contraintes de traction

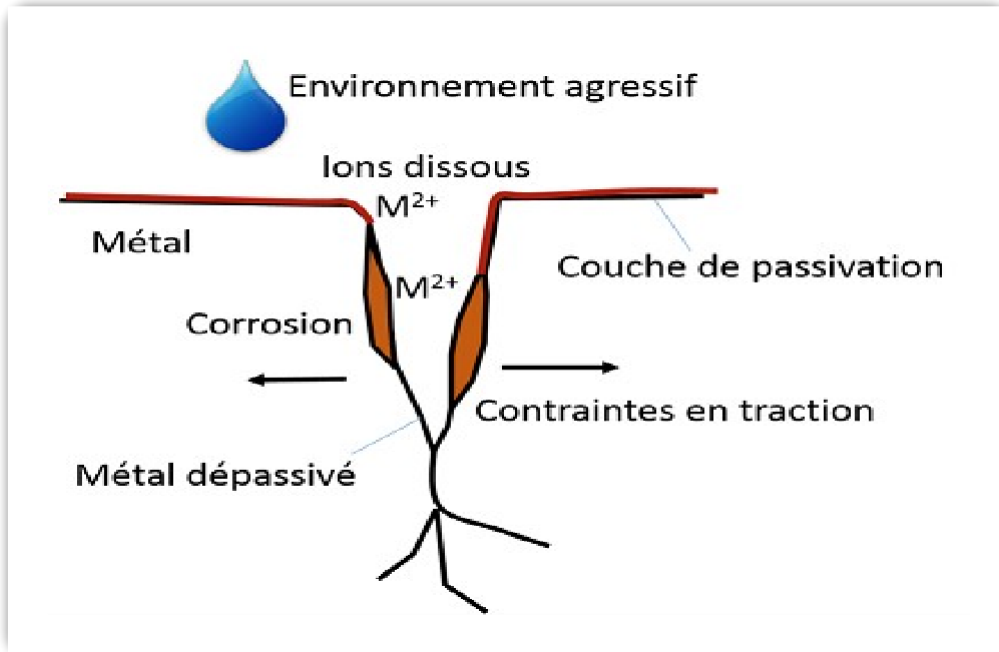


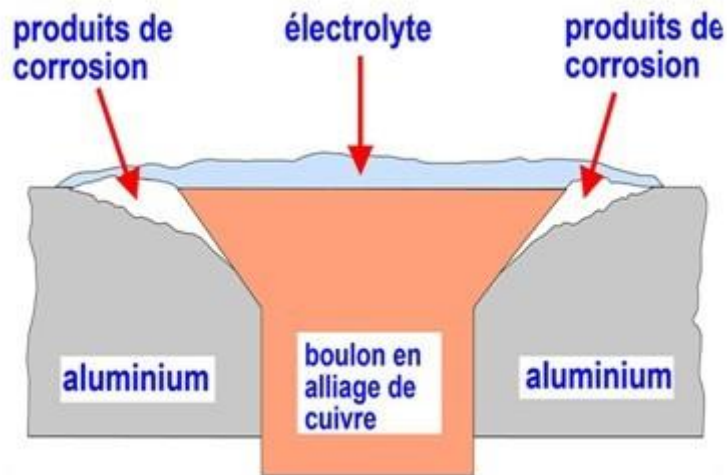
Figure I.3 : Schéma de la fissuration par corrosion sous contrainte

#### I.3.4. La Corrosion galvanique :

La corrosion galvanique, appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Il arrive souvent, dans les installations industrielles, que deux métaux de natures différentes soient en contact. La différence de potentiel entre les deux métaux forme alors un couple galvanique. Celui qui présente un potentiel plus élevé lorsqu'il est isolé devient le siège d'un processus cathodique alors que celui qui a le potentiel le moins élevé devient l'anode

On peut simplement définir la corrosion galvanique comme l'effet produit par le contact de deux métaux ou alliages différents dans un milieu corrosif conducteur.

Lorsque deux métaux ou alliages différents sont couplés, un courant électronique se crée entre eux en raison du court-circuit créé. En général, la corrosion de l'alliage le moins noble augmente et la corrosion de l'alliage le plus noble diminue ou est supprimée. On peut comparer ce principe électrochimique à une pile en court-circuit. Le concept de galvanique fait référence à une circulation électrique entre deux métaux, entraînant le déplacement d'ions métalliques. Le métal le moins réactif agit en tant que cathode et l'autre en tant qu'anode. La corrosion galvanique est directement liée à la disparité de potentiel entre les deux métaux. Elle s'accroît lorsque la différence de potentiel entre les deux métaux augmente.



**Figure I.4 :** Schéma représentant la corrosion galvanique

### **I.3.5. La Corrosion par piqûres localisé :**

La corrosion par piqûres est un problème courant pour les alliages d'aluminium, en particulier lorsqu'ils sont exposés à des environnements contenant des ions chlorure, comme l'eau salée. Voici une description détaillée et des images illustrant la corrosion par piqûres sur les alliages d'aluminium

La corrosion par piqûres se produit sur une zone très restreinte de la surface métallique, le reste de cette surface reste protégé par un film passif (film mince d'oxyde). On observe une rupture locale de la couche passive si aucune autoréparation de cette rupture ne se produit. La présence des chlorures dans de nombreux milieux, comme l'eau de mer, dans les aliments et dans l'industrie chimique, entraîne les problèmes les plus graves. Ce type de corrosion est présent dans de nombreux métaux et leurs alliages (fer, nickel, cuivre, aluminium, aciers). Si la dissolution est limitée à des piqûres à l'intérieur d'une surface métallique passivée importante, qui peut être utilisée comme une grande cathode pour réduire les oxydants tels que l'oxygène dissous, cela entraîne une perforation rapide du métal, ce qui affaiblit la construction et entraîne de grandes pertes économiques et problèmes de sécurité.

Le processus de piqûre sur des surfaces métalliques passivées est complexe et implique une série d'étapes. Il est nécessaire d'analyser les détails de chaque étape du développement et de la croissance d'une piqûre de corrosion pour comprendre le processus dans son ensemble. En règle générale, on distingue les étapes suivantes :

- Mécanisme de rupture de la passivité.
- Phases initiales de développement de la piqure.
- Finales étapes de développement de la piqure.

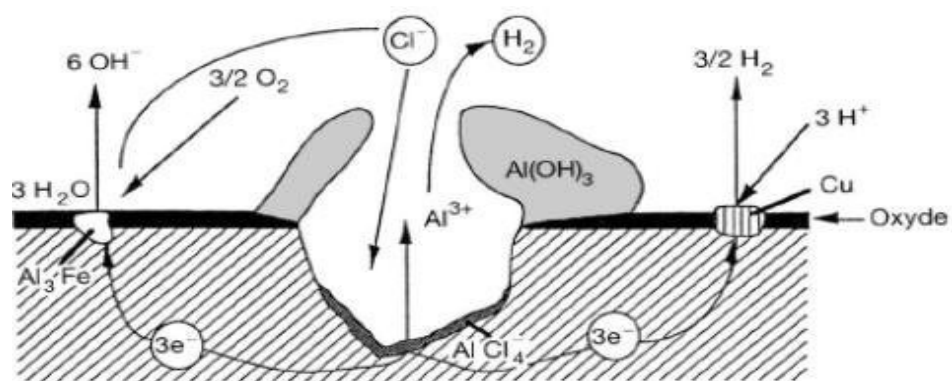


Figure I. 5 : corrosion par piqure d'alliage d'aluminium

#### I.4. Les facteurs de la corrosion

La corrosion des métaux est influencée par divers facteurs [3], parmi lesquels la nature du matériau, les conditions d'emploi et le milieu d'attaque.

##### I.4.1 Nature du métal :

- ✓ Composition du métal ou de l'alliage
- ✓ Procédé d'élaboration
- ✓ Traitements thermiques
- ✓ Additions protectrices
- ✓ Impuretés

##### I.4.2 Conditions d'emploi :

- ✓ Etats de surface
- ✓ Forme des pièces
- ✓ Sollicitations mécaniques

- ✓ Procédés d'assemblage (soudure, brasure, etc.)
- ✓ Conditions d'entretien

#### **I.4.3 Milieu d'attaque :**

- ✓ Concentration du réactif
- ✓ Teneur en oxygène
- ✓ PH du milieu
- ✓ Température
- ✓ Impuretés

### **I.5. Protection contre la corrosion :**

La protection contre la corrosion englobe toutes les actions qui peuvent être entreprises afin de préserver les matériaux métalliques de l'impact destructeur de l'environnement. Il est essentiel de prendre en considération la protection contre la corrosion afin d'éviter de nombreux problèmes et garantir une durée de vie certaine. La résolution efficace doit respecter les règles en matière de protection de l'environnement et permettre le recyclage ou l'élimination de différents éléments à la fin de leur utilisation. La méthode de protection est sélectionnée en fonction du matériau à protéger et de son environnement, ainsi que des considérations économiques.

Pour prévenir la corrosion de l'aluminium et de ses alliages, diverses méthodes sont utilisées, telles que l'anodisation, l'application de revêtements protecteurs, et l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

#### **I.6. Les inhibiteurs de corrosion :**

Les inhibiteurs sont des produits chimiques qui, additionnés en faibles teneurs au milieu corrosif, ralentissent voire stoppent le processus de corrosion d'un métal se trouvant au contact de ce milieu [4].

##### **I.6.1. Propriétés d'inhibiteurs :**

- ❖ Les inhibiteurs de corrosion doivent répondre à plusieurs critères pour être efficaces :

- ❖ Ils doivent réduire la vitesse de corrosion d'un métal sans altérer ses caractéristiques physico-chimiques, notamment sa résistance mécanique (par exemple, en évitant la fragilisation par l'hydrogène dans un milieu acide).
- ❖ Être chimiquement stables, surtout par rapport aux oxydants présents dans le milieu.
- ❖ Être stables thermiquement.
- ❖ Être efficaces à des concentrations faibles.
- ❖ Respecter les normes de non-toxicité.
- ❖ Être économiques.

### **I.6.2. Les classes des inhibiteurs :**

Les inhibiteurs peuvent être classés selon plusieurs critères [5] [6] [7] :

- ✓ La formulation des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux)
- ✓ Les mécanismes d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes),
- ✓ Les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et/ou formation d'un film)

#### **I.6.2.1. Classement par la nature des molécules de l'inhibiteur :**

##### **a) Les inhibiteurs organiques :**

Sont en effet cruciaux dans la protection contre la corrosion, surtout dans des milieux corrosifs comme les environnements acides. Cependant, leur utilisation est de plus en plus répandue même dans des milieux neutres ou alcalins, principalement en raison de préoccupations environnementales liées à leur écotoxicité. Leur efficacité dépend de plusieurs facteurs :

##### **1. Structure chimique :**

Les inhibiteurs organiques possèdent une structure complexe. Ils sont généralement constitués d'une partie hydrophobe, non polaire, qui est souvent composée de chaînes hydrocarbonées, et d'une partie hydrophile, polaire, comprenant divers groupes fonctionnels tels qu'amine (-NH<sub>2</sub>), hydroxyle (-OH), mercapto (-SH), phosphonate (-PO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>), sulfonate (-SO<sub>3</sub>H), carboxyle (-COOH) et leurs dérivés. Ces groupes fonctionnels facilitent l'interaction avec la surface métallique en formant des liaisons chimiques.

##### **2. Concentration:**

L'efficacité de l'inhibiteur est également influencée par sa concentration dans le milieu corrosif. Une concentration optimale est nécessaire pour assurer une protection

efficace contre la corrosion.

**3. Propriétés chimiques de la couche formée:** Lorsque l'inhibiteur se fixe à la surface métallique, il forme une couche protectrice qui empêche le contact direct entre le métal et le milieu corrosif. Les propriétés chimiques de cette couche sont essentielles pour assurer une protection durable contre la corrosion.

**4. Poids moléculaire :**

Le poids moléculaire de l'inhibiteur peut également influencer son efficacité. Des molécules de poids moléculaire approprié sont souvent préférées pour des raisons d'écotoxicité et de facilité d'utilisation.

En agissant sur les processus anodiques et cathodiques, les inhibiteurs organiques ralentissent simultanément les réactions de corrosion, offrant ainsi une protection efficace contre la détérioration des matériaux métalliques

**b) Les inhibiteurs inorganiques (minéraux) :**

Sont utilisés en milieux neutre/alcalin mais rarement en milieu acide. Les molécules minérales se dissocient dans la solution en anions et en cations qui, assurent en fait une inhibition efficace.

1- Les anions inhibiteurs les plus efficaces sont : les chromates, les phosphates, les molybdates, les nitrates, les nitrites, les silicates, etc.,

2- Alors que les cations inhibiteurs on trouve essentiellement les ions  $Ca^{2+}$  et  $Zn^{2+}$ .

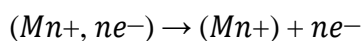
Les inhibiteurs minéraux sont de moins en moins utilisés en raison de leur toxicité. Leur emploi se limite à certains systèmes en circuit fermé

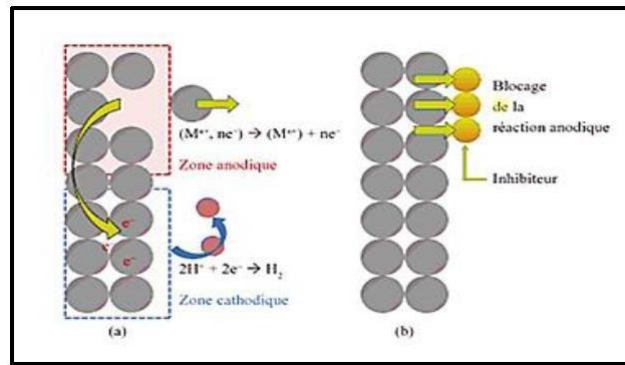
**I.6.2.2. Classement par mécanisme d'action électrochimique :**

L'action de l'inhibiteur de corrosion dépend du système (métal-solution) en présence duquel il se trouvera. Suite à l'adsorption de l'inhibiteur à la surface du métal, les sites réactionnels seront bloqués, ce qui empêche soit les réactions anodiques, soit les réactions cathodiques (ou les deux) et, de ce fait, il en résulte une diminution du courant de corrosion.

**a) Les inhibiteurs anodiques :**

Également appelé inhibiteur de passivation ; si l'inhibiteur s'adsorbe préférentiellement sur les sites anodiques de dissolution du métal où la réaction suivante se déroule, il s'agit d'un inhibiteur anodique (**figure I.5**)



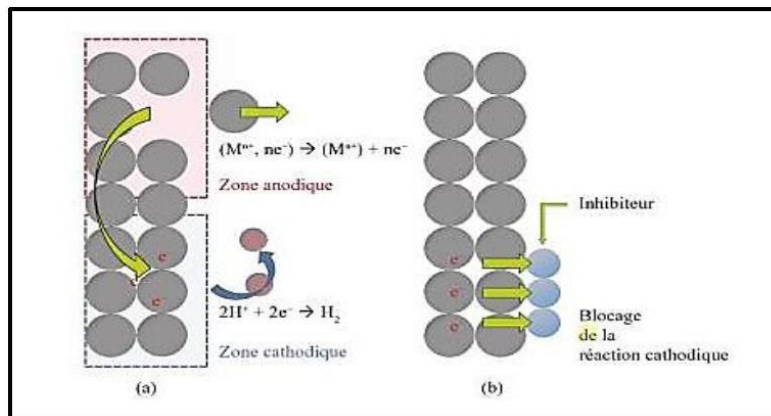


**Figure I.6 :** Représentation en milieu « acide » du rôle d'un inhibiteur anodique : (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur

**b) Inhibiteurs cathodiques :**

L'adsorbe préférentiellement de l'inhibiteur sur les sites cathodiques de réduction d'un oxydant contenu dans la solution, donne lieu à un inhibiteur cathodique (**figure I.8**).

Les inhibiteurs cathodiques forment une barrière de précipités insolubles sur le métal, le couvrant. Ainsi, limite le contact métallique avec l'environnement, même s'il est totalement immergé, ce qui empêche l'apparition de la réaction de corrosion. Pour cette raison, l'inhibiteur cathodique est indépendant de la concentration, ainsi ; il est considérablement plus sûr que l'inhibiteur anodique

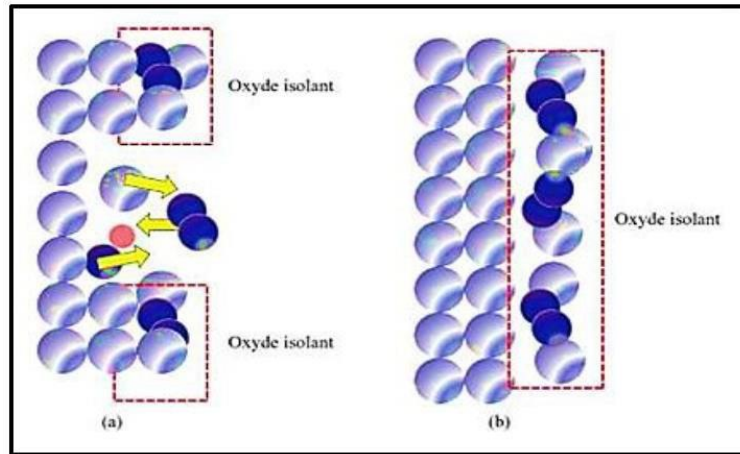


**Figure I.7:** Représentation du rôle d'un inhibiteur cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec Inhibiteur

**c) Inhibiteurs mixtes :**

Agirait sur deux types de sites de réaction, ce qui signifie qu'il peut interférer avec les réactions cathodiques et anodiques impliquées dans le processus de corrosion. En formant des sels insolubles avec les ions métalliques ou les anions présents dans les réactions de surface, l'inhibiteur peut contribuer à former une couche protectrice qui prévient la

corrosion en colmatant les pores de la couche d'oxyde. Ce processus aide à ralentir la corrosion en diminuant la vitesse des réactions cathodiques et anodiques, tout en maintenant le potentiel de corrosion relativement stable (**figure I.9**)



**Figure I.8:** Représentation du rôle d'un inhibiteur mixte (Inhibiteur formant une couche tridimensionnelle)

### I.6.2.3. Classements par mécanisme réactionnel :

Selon leur mode d'action liée au mécanisme réactionnel ; on distingue différents types d'inhibiteurs [8] :

#### a) *Inhibiteurs passivant :*

Les inhibiteurs passivant sont des substances qui forment des films tridimensionnels de passivation entre la surface du métal et les molécules de l'inhibiteur. Ce processus est également appelé inhibition d'interphase. Ces inhibiteurs peuvent être incorporés dans les couches barrières, ce qui conduit à la formation de réseaux homogènes et denses, caractérisés par une faible porosité et une bonne stabilité.

Il existe deux catégories principales d'inhibiteurs passivant :

#### 1. Les ions oxydants :

Ceux-ci comprennent des espèces telles que le dichromate ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ). Ces ions peuvent provoquer la passivation de l'acier même en l'absence d'oxygène.

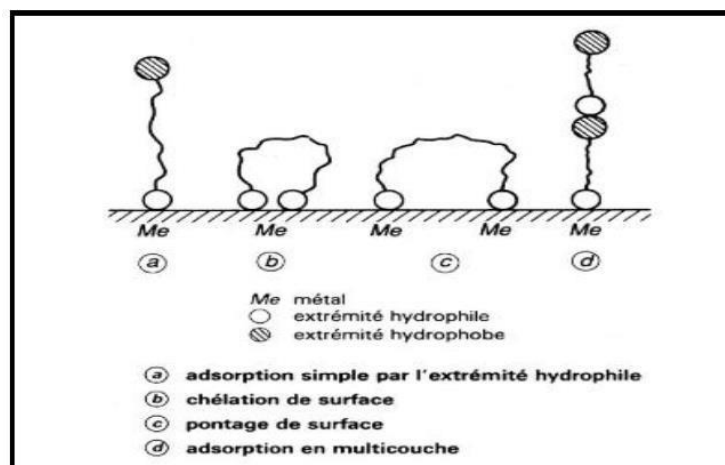
## 2. Les ions non oxydants :

Cette catégorie comprend des ions tels que le molybdate ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ), le tungstate ( $\text{WO}_4^{2-}$ ), le phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), et le borate ( $\text{BO}_3^{2-}$ ). Contrairement aux ions oxydants, ces inhibiteurs nécessitent la présence d'oxygène. Ils agissent en déplaçant la réaction cathodique de réduction de l'oxygène, favorisant ainsi son adsorption à la surface du métal et contribuant à la formation du film de passivation.

### b) Inhibiteurs de précipitation :

Certains inhibiteurs de corrosion réagissant avec les ions ou les composés organiques, contenus dans le milieu corrosif, pour former respectivement des sels ou des complexes organiques.

Ces composés se précipitent sur la surface de métal formant un film protecteur superficiel. Ce film réduit l'accessibilité de la surface de métal vis-à-vis l'agent correctif, en plus il bloque la dissolution anodique [9].



**Figure I.9 :** Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique .

### **I.7. Contributions sur l'utilisation des médicaments comme inhibiteurs**

La toxicité des inhibiteurs de corrosion couramment employés et les réglementations environnementales de plus en plus strictes sur leur utilisation et leur élimination suscitent un intérêt important pour substituer les inhibiteurs à effet négatif qu'ils ont engendrés dans l'environnement [10] par des alternatives non dangereuses. De cette manière, il a été jugé plus important et souhaitable de développer de nouveaux inhibiteurs de corrosion de provenance naturelle et non toxiques [11]. Les médicaments chimiques, en raison de leur provenance naturelle [12-14], de leurs propriétés non toxiques [15] et de leurs impacts négatifs minimes sur l'environnement aquatique [16], semblent être des candidats parfaits pour remplacer les inhibiteurs de corrosion toxiques.

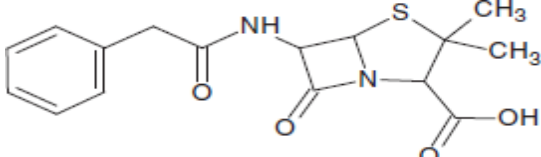
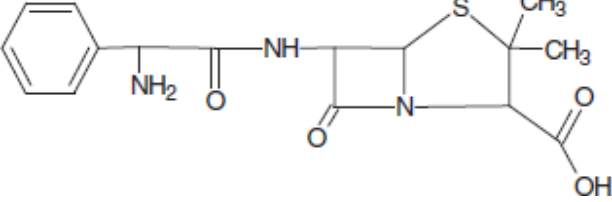
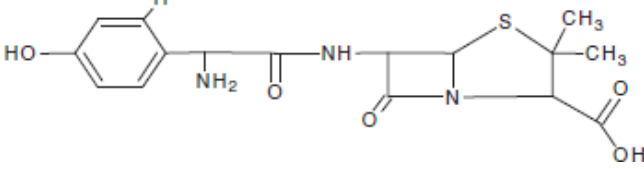
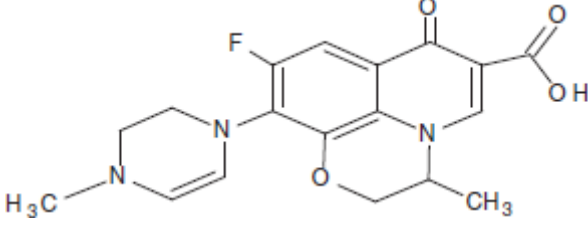
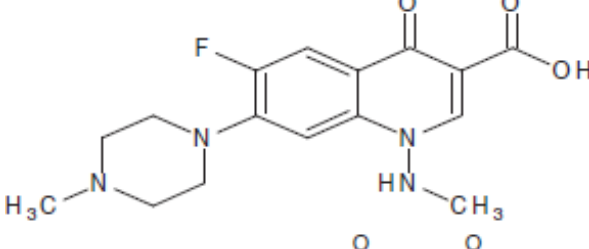
Le domaine de la recherche sur l'utilisation de médicaments tels que les inhibiteurs de corrosion est en plein essor. Ces produits, souvent désignés comme des inhibiteurs de corrosion "écologiques", présentent des bénéfices en ce qui concerne leur compatibilité avec l'environnement et leur disponibilité.

Les raisons de l'utilisation des médicaments comme inhibiteurs de corrosion :

- Les médicaments contiennent souvent des groupes fonctionnels (tels que des groupes amine, hydroxyle, et carboxyle) qui favorisent l'adsorption sur les surfaces métalliques.
- Les médicaments sont généralement biodégradables et moins toxiques comparés aux inhibiteurs de corrosion traditionnels.
- Les médicaments peuvent être dérivés de produits pharmaceutiques excédentaires ou périmés, offrant une solution économique et écologique pour la gestion des déchets.

Dans le tableau I.2 sont présentées l'utilisation de médicaments comme inhibiteurs de corrosion de divers métaux au cours des dernières années :

**Tableau I.2 :** Médicaments comme inhibiteurs de corrosion de divers métaux

Médicament (Corrosion inhibiteur)	Structure moléculaire	Type d'inhibiteur	Milieu de corrosion	Type de métal
Pénicilline G [17]		Adsorption	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acier doux
Ampicillin [18,19]		Adsorption	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HCl	Aluminium Acier doux
Amoxicilline [18,20]		Adsorption	HCl	Alliage Aluminium AA2024-T3
Ofloxacin [21,22]		Mixe	HCl	Acier doux
Amifloxacine [22]		Mixe	NaCl	Acier doux

# CHAPITRE II

## Matériels et Méthodes

## II.1 Introduction :

Différentes méthodes seront utilisées pour évaluer le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'alliage d'aluminium. En milieu chlorure, en présence des inhibiteurs de corrosion qui présente l'avantage de leur potentiel non toxique, surtout comparé à certains inhibiteurs de corrosion traditionnels qui peuvent être nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Ces inhibiteurs sont deux médicaments : Amoxicilline et Paracétamol comparé au chromate de potassium. L'étude du phénomène de corrosion et son inhibition est faite par les méthodes électrochimiques.

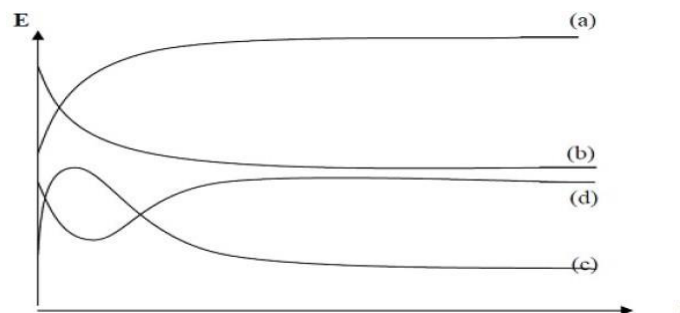
Les méthodes électrochimiques sont des outils puissants pour l'étude de la corrosion, elles permettent une évaluation rapide et précise de l'efficacité des inhibiteurs, contribuant ainsi à l'optimisation des stratégies de protection contre la corrosion. Les méthodes électrochimiques les plus couramment utilisées : La méthode du potentiel de circuit ouvert a été employée, ainsi que l'extrapolation des droites de Tafel à partir du tracé des courbes intensité-potentiel, et enfin les diagrammes d'impédance.

## II.2. Méthodes électrochimiques :

### II.2.1. Potentiel en circuit ouvert OCP :

Le potentiel de circuit ouvert (OCP) est la technique électrochimique la plus facile à utiliser. En général, elle est plus avancée que toutes les autres méthodes. Il donne une indication directe de la tendance d'un métal à se corroder dans un milieu électrolytique donné.

Le pH, la température, la concentration des ions en solution et la présence d'oxygène sont des facteurs qui influencent le potentiel de circuit ouvert. En analysant la variation de OCP en fonction de ces conditions, il est possible d'obtenir des renseignements précieux sur les mécanismes de corrosion et sur les facteurs qui favorisent ou ralentissent la corrosion.



FigurII.1 : Courbes théorique  $E_{corr} = f(t)$  [23]

(a) : Métal actif qui se corrode très rapidement dès l'immersion et se passive par la suite.

(b) : Métal initialement passif parce qu'il est recouvert par une couche protectrice puis il devient actif après dissolution de cette couche.

(c) : Métal qui a tendance à se passiver dans son milieu, mais la couche de passivation est instable et se détruit après un certain temps de croissance.

(d) : Le métal se corrode initialement puis se passive.

### II.2.2 Courbes de polarisation :

La méthode de polarisation potentiodynamique joue un rôle crucial dans la compréhension du comportement à la corrosion d'un matériau dans un électrolyte spécifique. Cette méthode présente les avantages suivants : rapide, précise et reproductible.

Comme son nom l'indique, cette méthode consiste, à appliquer un potentiel à l'électrode de travail et à la déplacer dans l'intervalle de potentiels désiré et la mesure du courant résultant. Cette technique permet de tracer des courbes de polarisation anodique et cathodique, fournissant des informations sur les mécanismes de corrosion et l'efficacité des inhibiteurs

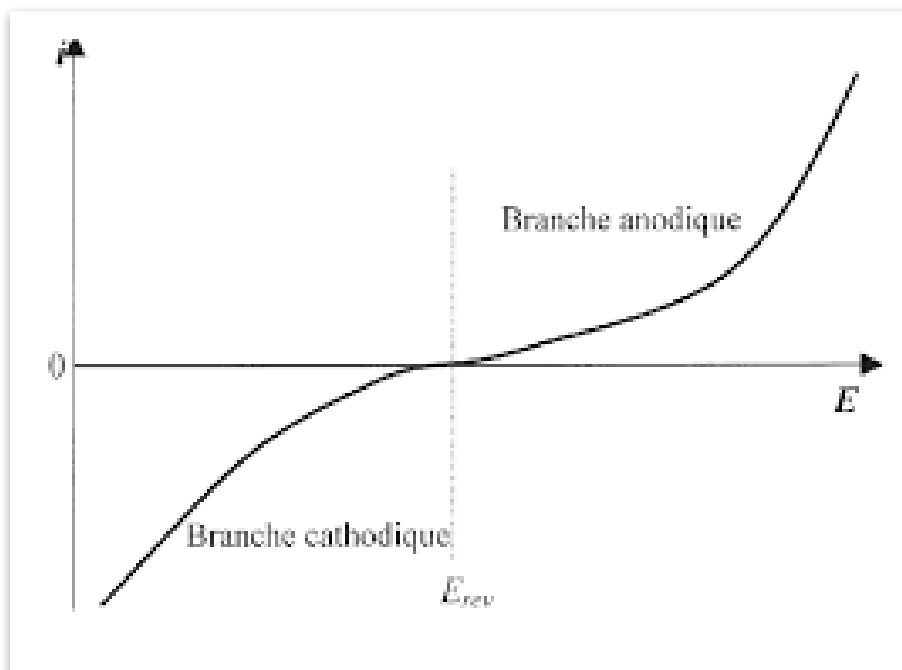
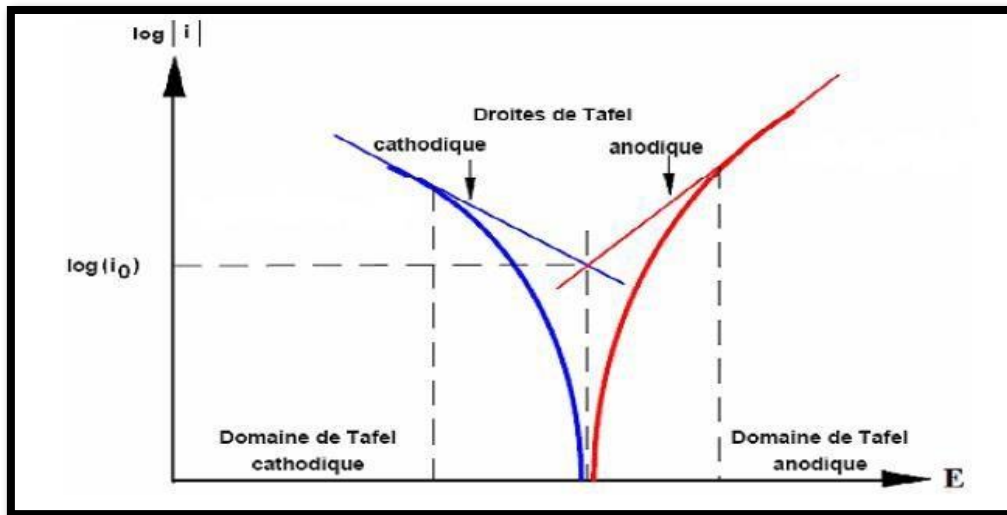


Figure II.2 : courbe de polarisation

L'analyse de la cinétique des réactions électrochimiques, notamment la corrosion et son inhibition, est effectuée par la représentation graphique des droites de Tafel[24]. Les équations de Tafel décrivent la relation entre la densité de courant et la surtension pour une réaction électrochimique, sur une échelle semi-logarithmique.



**Figure II.3:** Les droites de Tafel.

Les valeurs extraites des droites de Tafel sont résumées dans ce tableau II.1.

**Tableau II.1:** Les paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel

La courant de corrosion ( $\mu\text{A}$ )	$(I_{corr})$
le potentiel de corrosion ( $\text{mV/ECS}$ )	$(E_{corr})$
La pente de Tafel cathodique ( $\text{mV}$ )	$B_c$
La pente de Tafel anodique ( $\text{mV}$ )	$B_a$
l'efficacité d'inhibition (%)	$\eta(\%)$

### II.2.3. La spectroscopie d'impédance électrochimique :

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une méthode de caractérisation électrochimique utilisée pour étudier un système.

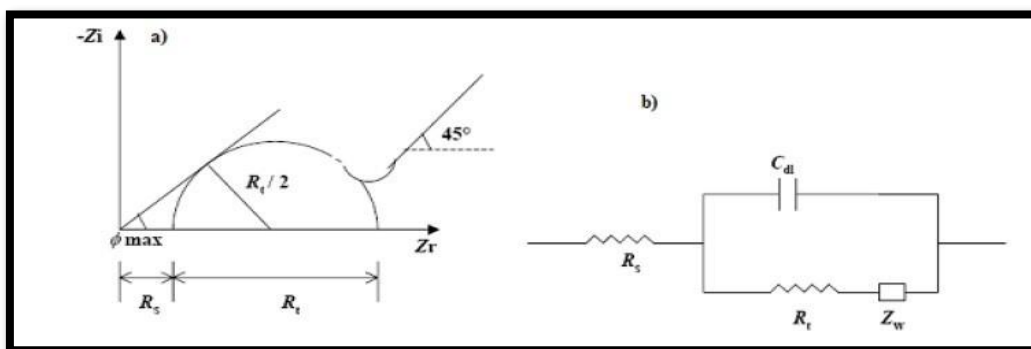
Les propriétés diélectriques des matériaux sont déterminées par la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS). La permittivité est une mesure de l'interaction du champ externe avec le moment dipolaire d'un échantillon spécifique et La spectroscopie d'impédance électrochimique est également connue sous le nom de spectroscopie diélectrique.

L'impédance électrochimique est une technique d'analyse puissante en électrochimie qui permet d'étudier les propriétés des interfaces électrode-électrolyte et de comprendre les mécanismes de réactions électrochimiques, y compris la corrosion, les processus de transfert de charge, et les propriétés des matériaux.

La technique de mesure la plus couramment utilisée dans la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) consiste à appliquer un petit signal de tension sinusoïdale à l'électrode à différentes fréquences. La réponse en courant de l'électrode est mesurée pour chaque fréquence.

L'impédance est calculée en prenant le rapport de la tension appliquée au courant mesuré, et en analysant la relation de phase entre les deux[25].

L'impédance est une grandeur complexe qui comprend à la fois une composante réelle (résistive) et une composante imaginaire (réactive). Les données collectées par spectroscopie d'impédance électrochimique sont généralement présentées sous forme de graphiques dans des tracés de Nyquist et des tracés de Bode.



**Figure II.4** : Représentation simplifiée d'une interface électrochimique pour une réaction avec transfert de charges et diffusion, et diagramme d'impédance correspondant. Avec  $C_d$  : Capacité,  $R_t$  : Résistance de transfert de charge,  $R_s$  : Résistance série et  $Z_W$  : Impédance de Warburg [26]

## II. 3 Cellule électrochimique :

Les mesures stationnaires et l'impédance électrochimique sont réalisées dans une cellule en pyrex, qui est équipée d'un montage traditionnel comprenant trois électrodes, à savoir une électrode de travail (ET), une électrode auxiliaire (CE) et une électrode au calomel Hg / Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> / KCl saturé (ECS) en tant qu'électrode de référence. L'électrolyte est une solution de NaCl (0,1). Les trois électrodes sont connectées directement à un potentiostat de type EC Lab. (SP300)

### II.3.1. Electrode de référence (ER) :

Le potentiel constant et stable de l'électrode de référence idéale est connu avec précision et est totalement indépendant de la composition de la solution électrolytique. En tant qu'électrode de référence, nous avons employé une électrode au calomel saturé (SCE) : Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/KCl(sat), avec une valeur de +0,245 V/ENH. Cette électrode est composée de mercure (Hg) et de calomel (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), qui est difficilement soluble lorsqu'elle est en contact avec une solution saturée de KCl



Figure II .5 : Electrode de Référence Hg/Hg<sub>2</sub> Cl<sub>2</sub>/KCl

### II.3.2. Electrode de travail :

Un substrat en aluminium découpé en forme de cylindre a été employé, puis il a été soudé à un fil conducteur avant d'être inséré dans un cylindre en téflon. Le contact de l'électrode avec l'électrolyte se fait sous la forme d'un disque d'une surface de 0,78cm<sup>2</sup>.

Pour garantir des résultats fiables et reproductibles, il est nécessaire de prétraiter l'électrode de travail avant chaque test. Ce prétraitement consiste à un polissage mécanique aux papiers abrasifs de différentes épaisseurs, puis rinçage à l'eau distillée.

### II.3.3. Electrode auxiliaire (CE) :

La circulation du courant dans un circuit, généralement composé de matériaux électrochimiquement inertes comme le platine ou le carbone, est possible. Il est crucial que le rapport entre la surface cathodique et la surface anodique soit supérieur ou au moins égal à la surface de l'électrode de travail. Nous avons utilisé une électrode en graphite comme électrode auxiliaire.

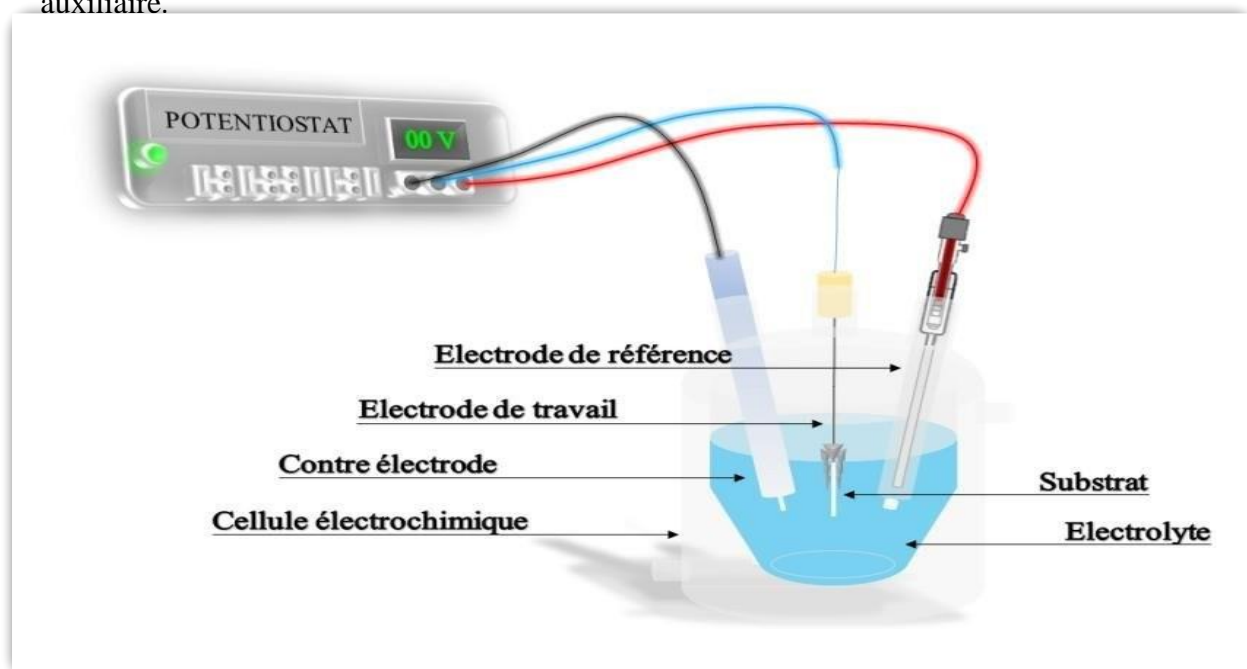


Figure II.6: Schéma du montage de mesure.

## II.4. Produits :

Le milieu corrosif utilisé est une solution de NaCl (0,1)

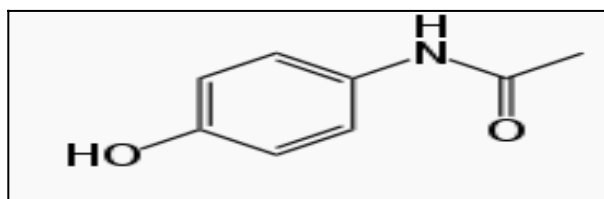
Les inhibiteurs utilisés sont de deux types : organique et inorganique :

### II.4.1 les inhibiteurs organiques :

#### 1- Le paracétamol :

également connu sous le nom d'acétaminophène dans certains pays, est un médicament couramment utilisé pour ses propriétés analgésiques (antidouleur) et antipyrétiques (antifébrile). La solubilité dans l'eau est modérée (14 mg/mL à 25°C).

Formule chimique :  $C_8H_9NO_2$  (N-(4-hydroxyphényl) acétamide)

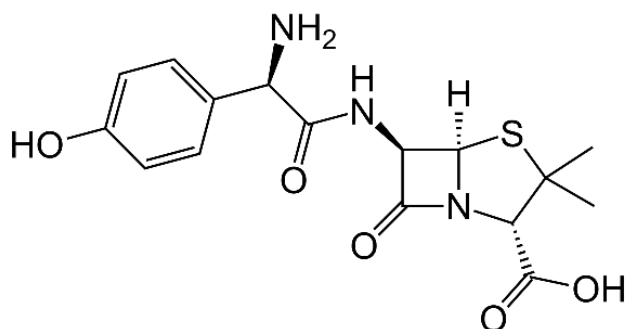


**Figure II.7 :** Formule générale de compose paracétamol

### 2-L'amoxicilline :

Est un antibiotique largement utilisé qui appartient au groupe des pénicillines. Il est couramment prescrit pour traiter diverses infections bactériennes. L'amoxicilline est généralement soluble dans l'eau 3,43g/L à 25 °C.

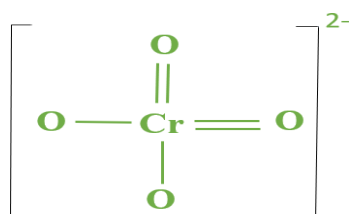
Formule chimique :  $C_{16}H_{19}N_3O_5S$  ,(Acide 7-[2-amino-2-(4-hydroxyphényl) -acétyl]amino-3,3-diméthyl-6-oxo-2-thia-5-azabicyclo[3.2.0]heptane-4-carboxylique).



**Figure II.8:**la structure chimique de l'amoxicilline.

### II.4.2 Inhibiteurs inorganiques :

1)Les chromate de potassium ( $CrO_4^{2-}$ ) , le chrome est au 6<sup>e</sup> état d'oxydation, sa solubilité dans l'eau à 25 °C : 637g/L.



**Figure II.9:**la structure chimique du chromate

# CHAPITRE III

## Résultats et discussion

### III.1. Introduction :

Les techniques utilisées pour étudier les inhibiteurs de corrosion sont celles de la corrosion en général, qu'elle soit électrochimique ou non. Les expériences électrochimiques donnent des informations intéressantes sur le mécanisme d'action de l'inhibiteur et sur la vitesse des processus de corrosion à l'instant de la mesure.

On distingue deux catégories de méthodes : les méthodes stationnaires et les méthodes non- stationnaires appelées transitoires. Ce présent travail ne concerne que les méthodes stationnaires, telles que l'évolution du potentiel libre au fil du temps, la polarisation linéaire et la spectroscopie d'impédance.

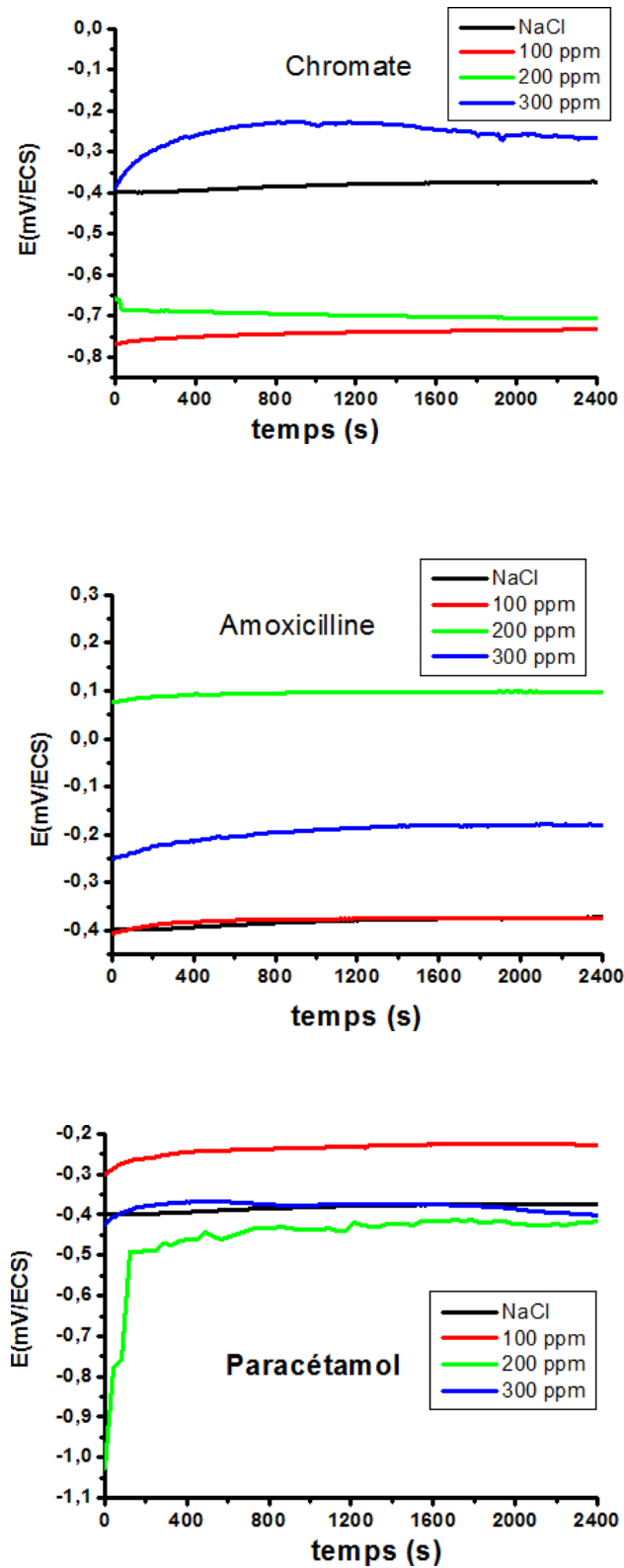
Le milieu corrosif est une solution de chlorure de sodium. Nous présentons ici les résultats relatifs, à l'effet des ions chromates, le paracétamol et l'amoxicilline sur la protection du matériau.

### III.2. Le potentiel à circuit ouvert

Le potentiel à l'abandon ou est le potentiel électrochimique mesuré par rapport à une électrode de référence à circuit ouvert. Le potentiel à abandon mesure la capacité d'une électrode à subir une réaction d'oxydoréduction. Le potentiel à circuit ouvert d'une électrode métallique est un outil indispensable dans l'étude de la corrosion. Il permet de prédire et de prévenir la dégradation des matériaux métalliques dans divers environnements. De plus, c'est une seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié.

L'évolution du potentiel libre en fonction du temps de l'électrode de l'aluminium, à la température ambiante est étudiée pour différentes concentrations de l'amoxicilline, le paracétamol et les ions de chromate, en utilisant différentes concentrations, notamment 100 ppm, 200 ppm et 300 ppm, la solution Na Cl 0.1M est utilisée pour la comparaison.

Les valeurs du potentiel de circuit ouvert (OCP) de l'électrode de l'aluminium, en fonction du temps, a été enregistrées pendant 40 min. Les résultats sont présentés sous forme de courbes dans la **Figure III.1**.



**Figure III.1 :** Effet de la concentration des inhibiteurs ( chromate, Amoxicilline ,paracétamol) sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'aluminium dans NaCl.

L'observation de la courbe (III.1.) montre que l'ajout du chromate à la solution de Na Cl stabilise le potentiel à l'abandon au cours du temps, cela indique que le système a atteint un état d'équilibre dynamique ou les processus anodiques et cathodiques sont équilibrés. La concentration de 300 ppm montre une augmentation significative du potentiel du matériau étudié, en se stabilisant à une valeur plus élevée que les autres concentrations et plus noble que celui dans la solution de Na Cl seul.

La courbe (III.1.) montre l'effet de l'ajout du paracétamol à la solution de Na Cl (0.11M) sur le potentiel à l'abandon de l'électrode de l'aluminium, à différentes concentrations (100ppm, 200ppm et 300ppm). On remarque que le potentiel à l'abandon est stable au cours du temps. On note aussi que les valeurs du potentiel à l'abandon en présence du paracétamol (100ppm et 200ppm) sont plus positif qu'en présence des ions chromates.

L'évolution du potentiel à l'abandon de l'électrode de l'aluminium dans Na Cl en présence de l'amoxicilline à différentes concentrations est présentée sur la figure (III.3.1). La même tendance qu'on a remarquée pour les deux additifs précédents, une stabilité du potentiel à l'abandon au cours du temps avec un déplacement vers les valeurs les plus positives.

La stabilité du potentiel peut être due à plusieurs phénomènes chimique et physique, notamment la formation de complexes avec les ions du métal, l'effet tampon et la stabilisation du pH et l'adsorption à la surface du métal. Chacune de ces interactions peut contribuer à maintenir un équilibre électrochimique stable, ce qui se traduit par un potentiel stable au cours du temps. Les valeurs des potentiels à l'abandon des différents tests sont regroupées dans le Tableau III.1.

**Tableau III.1** : Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de Na Cl en présence ou en absence des inhibiteurs (chromate, amoxicilline, paracétamol).

	<b>concentration</b>	<b>OCP(V /ECS)</b>
<b>Na Cl</b>	<b>0,1M</b>	<b>-0,397</b>
	<b>100ppm</b>	<b>-0,754</b>
<b>Chromate</b>	<b>200ppm</b>	<b>-0,687</b>
	<b>300ppm</b>	<b>-0,286</b>
<b>Amoxicilline</b>	<b>100ppm</b>	<b>-0,372</b>
	<b>200ppm</b>	<b>0,097</b>
	<b>300ppm</b>	<b>-0,180</b>
	<b>100ppm</b>	<b>-0,229</b>
<b>Paracétamol</b>	<b>200ppm</b>	<b>-0,416</b>
	<b>300ppm</b>	<b>-0,400</b>

### III.3. Les courbes de polarisation et les droites de Tafel :

Pour une compréhension plus approfondie, d'autres études expérimentales seraient nécessaires tels que les courbes de polarisation et les droites de Tafel.

Les courbes de polarisation semi-logarithmiques et les droites de Tafel fournissent des informations précieuses sur le phénomène de la corrosion et l'efficacité des inhibiteurs. Ils permettent de quantifier et d'analyser les mécanismes de protection offerts par différents inhibiteurs de corrosion. Les caractéristiques de corrosion d'un métal, notamment le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) et la densité de courant de corrosion ( $i_{corr}$ ) sont déterminées à partir des droites de Tafel.

Les mesures de potentiel et courant de corrosion sont complétées par des tracés intensité - courbe de potentiel. Ces courbes sont obtenues en appliquant un potentiel croissant à l'électrode de travail du domaine cathodique au domaine anodique soit de +/- 200 mV versus une valeur stable du potentiel (OCP) et en mesurant la densité de courant correspondante.

La vitesse de balayage du potentiel doit être suffisamment lente pour assurer la réversibilité des réactions. Les tests sont réalisés dans des conditions de température ambiante

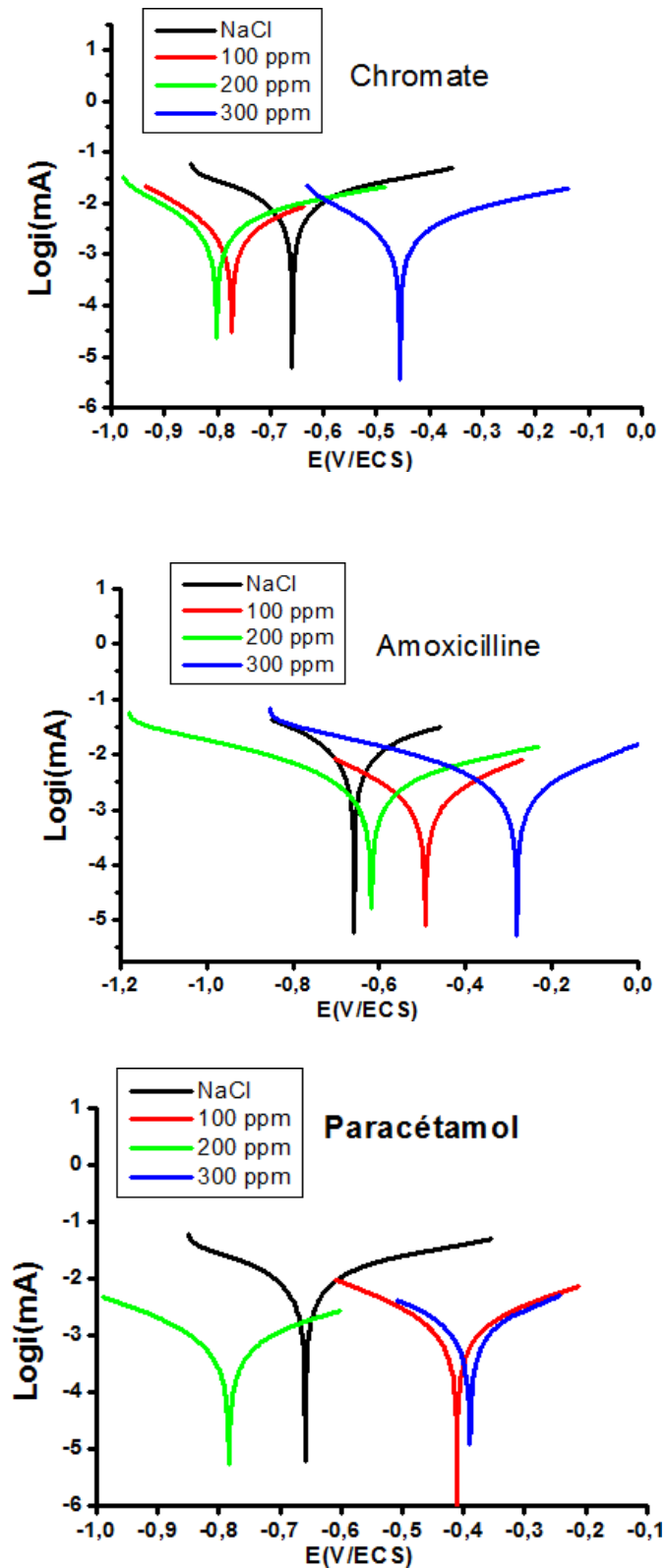
et une vitesse de balayage de  $5 \text{ mV.s}^{-1}$ . Le tracé des courbes de polarisation en échelle logarithmique laisse apparaître, loin de l'équilibre, l'existence de deux branches linéaires, dites droites de Tafel (**Figures.III.2**).

Les paramètres électrochimiques importants dans les différents milieux électrolytiques utilisés, tels que les pentes anodiques et cathodiques de Tafel, le potentiel et la densité de courant de corrosion ( $E_{\text{cor}}$ ,  $i_{\text{cor}}$ ), et qui sont obtenues à partir des droites de Tafel, sont regroupés dans les tableaux (III.2).

La densité de courant de corrosion est un paramètre essentiel qui évalue la rapidité à laquelle un métal se corrode dans une solution électrolytique. De manière générale, une diminution de la densité du courant de corrosion entraîne une corrosion moins intense, ce qui entraîne une meilleure protection du métal.

La densité de courant de corrosion en présence de chromates de  $2.08 \mu\text{A/cm}^2$  ;  $2.18 \mu\text{A/cm}^2$  et  $1.16 \mu\text{A/cm}^2$  pour les concentrations 100ppm, 200ppm et 300ppm respectivement, comparées à  $6.20 \mu\text{A/cm}^2$  sans chromates, montre que l'inhibiteur est très efficace pour réduire la vitesse de corrosion. Une réduction de la densité de courant de corrosion signifie que l'inhibiteur améliore considérablement la résistance du métal à la corrosion métal, prolongeant ainsi sa durée de vie du métal.

L'analyse des résultats obtenus, lorsqu'on ajoute le paracétamol à la solution de chlorure de sodium, avec les mêmes concentrations que les chromates 100ppm, 200ppm et 300ppm, montre une réduction considérable de la densité de courant de corrosion de  $6.2\mu\text{A/cm}^2$  dans NaCl seul à  $0.791\mu\text{A/cm}^2$  en présence de 300ppm de doliprane. Une densité de courant de corrosion plus faible signifie une corrosion moins intense et donc une meilleure protection du métal. Les valeurs de la vitesse de corrosion confirment ce résultat.



**Figure III.2 :** L'effet de l'ajout des inhibiteurs (Chromate , Amoxicilline , paracétamole,) à différentes concentrations sur les courbes des polarisations d'une électrode d'aluminium dans NaCl (0.1M).

L'effet de l'amoxicilline sur la vitesse de corrosion est similaire à ceux observés avec les chromates et le paracétamol. D'après le graphe (III.2.) et le tableau (III.3.), on remarque une diminution considérable de la densité de courant de corrosion de  $6.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  dans NaCl seul à

$1.70 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ;  $1.61 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  et  $1.63 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  en présence de l'amoxicilline de différentes concentrations (100ppm, 200ppm et 300ppm respectivement. Cela indique qu'elle peut aussi être un inhibiteur de corrosion efficace.

**Tableau III.2.a** : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de chromate

	NaCl + ions chromates			NaCl
Concentration (M)	100ppm	200ppm	300ppm	0,1M
Ecorr (mV/ECS)	-772,905	-803,93	-564,5	-658.63
Icorr( $\mu\text{A}$ )	2,084	2,182	1,168	6.2
Ba (mV)	234,6	235,8	210,0	231.2
Bc (mV)	153,7	156,1	207,5	199.5
Vitesse de corrosion (mm/an)	0,0291	0,0305	0,0163	0,0867

L'efficacité de l'amoxicilline est comparable à celle des chromates et du paracétamol, qui ont également montré une réduction significative de la densité de courant de corrosion.

La modification du Potentiel de Corrosion d'après les différentes courbes, n'est pas homogène en présence des différents inhibiteurs, ce qui peut être expliqué par l'influence unique de chaque inhibiteur sur le comportement électrochimique du métal et reflète les mécanismes distincts par lesquels chaque inhibiteur protège le métal.

**Tableau III.2.b** : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence d'Amoxicilline

Concentration (M)	NaCl +Amoxicilline			NaCl
	100ppm	200ppm	300ppm	0,1M
<b>E corr (mV/ECS)</b>	<b>-495,31</b>	<b>-619.228</b>	<b>-278,3</b>	<b>-658.63</b>
<b>I corr (μA)</b>	<b>1,708</b>	<b>1.61</b>	<b>1,636</b>	<b>6.2</b>
<b>Ba (mV)</b>	<b>312,2</b>	<b>324.2</b>	<b>269,0</b>	<b>231.2</b>
<b>Bc (mV)</b>	<b>281,5</b>	<b>279.9</b>	<b>283,6</b>	<b>199.5</b>
<b>Vitesse de corrosion (mm/an)</b>	<b>0,0239</b>	<b>0,0225</b>	<b>0,0228</b>	<b>0,0867</b>

**Tableau III.2.c** Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de paracétamol

Concentration (M)	NaCl+ Paracétamol			NaCl
	100ppm	200ppm	300ppm	0.1
<b>E corr (mv/ECS)</b>	<b>-410,88</b>	<b>-781,789</b>	<b>-390,306</b>	<b>-658.63</b>
<b>I corr(μA)</b>	<b>1,849</b>	<b>1,214</b>	<b>0,791</b>	<b>6.2</b>
<b>Ba (mv)</b>	<b>325,0</b>	<b>453,8</b>	<b>154,5</b>	<b>231.2</b>
<b>Bc (mv)</b>	<b>271,3</b>	<b>330,7</b>	<b>151,7</b>	<b>199.5</b>
<b>Vitesse de corrosion (mm/an)</b>	<b>0,0258</b>	<b>0,0169</b>	<b>0,0110</b>	<b>0,0867</b>

Le taux d'inhibition de la corrosion ( $\eta$ ) est un indicateur de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion. Il est évalué en comparant les densités de courant de corrosion avec et sans la présence de l'inhibiteur. L'expression générale pour le calcul du taux d'inhibition est :

$$\eta = \frac{i_0 - i}{i_0} \%$$

Avec  $\eta$  : le taux d'inhibition.

où  $i_0$  - la densité de corrosion en absence d'inhibiteur.

$i$  - la densité de corrosion en présence d'inhibiteur.

**Tableau III.3** : Le taux d'inhibition de la corrosion des différents inhibiteurs utilisés

	Concentrations	Taux d'inhibition ( $\eta$ %)
<b>Les ions chromates</b>	100 ppm	66,38
	200 ppm	64,80
	300 ppm	81,16
<b>Paracétamol</b>	100 ppm	70,1
	200 ppm	80,41
	300 ppm	87,24
<b>Amoxicilline</b>	100 ppm	72,15
	200 ppm	74,03
	300 ppm	73,61

Les résultats obtenus en comparant les meilleurs taux d'inhibition, indiquent que le paracétamol a l'efficacité inhibitrice la plus élevée (87,24%) contre la corrosion, surpassant même les chromates (81,16%), qui sont utilisés comme inhibiteurs de corrosion très efficaces. L'amoxicilline, bien que modérément efficace (73,61%), est la moins performante des trois composés.

### III.3. Les diagrammes d'impédance

L'impédance électrochimique (EIS) est une technique puissante et largement utilisée pour étudier les propriétés de surface des matériaux et les mécanismes de corrosion, y compris l'effet des inhibiteurs de corrosion. Elle fournit des informations détaillées sur les mécanismes de corrosion et l'action des inhibiteurs.

L'EIS est une méthode non-destructive qui n'endommage pas l'échantillon. Elle est très sensible aux changements de surface dus à la corrosion et à l'action des inhibiteurs.

Nous avons réalisé des mesures d'impédance électrochimique sur l'aluminium avec et sans inhibiteurs de corrosion (les ions de chromates, l'amoxicilline et le paracétamol) de différentes concentrations ((100 ppm, 200ppm et 300ppm), dans la solution de NaCl (0.1M), au potentiel d'abandon (après 40 minutes d'immersion en circuit ouvert) et à température ambiante.

Les résultats sont présentés sous forme de diagrammes de Nyquist (partie imaginaire de l'impédance vs partie réelle) sur la figure (III.3). Pour plus de clarté, le diagramme de Nyquist pour la solution témoin (NaCl) a été présenté.

L'observation de diagrammes d'impédance électrochimique dans la solution de NaCl, présentant une seule boucle, indique qu'il y a un processus dominant à l'interface électrode/solution. Cela peut être associé au transfert de charge de la réaction électrochimique, souvent liée à la corrosion.

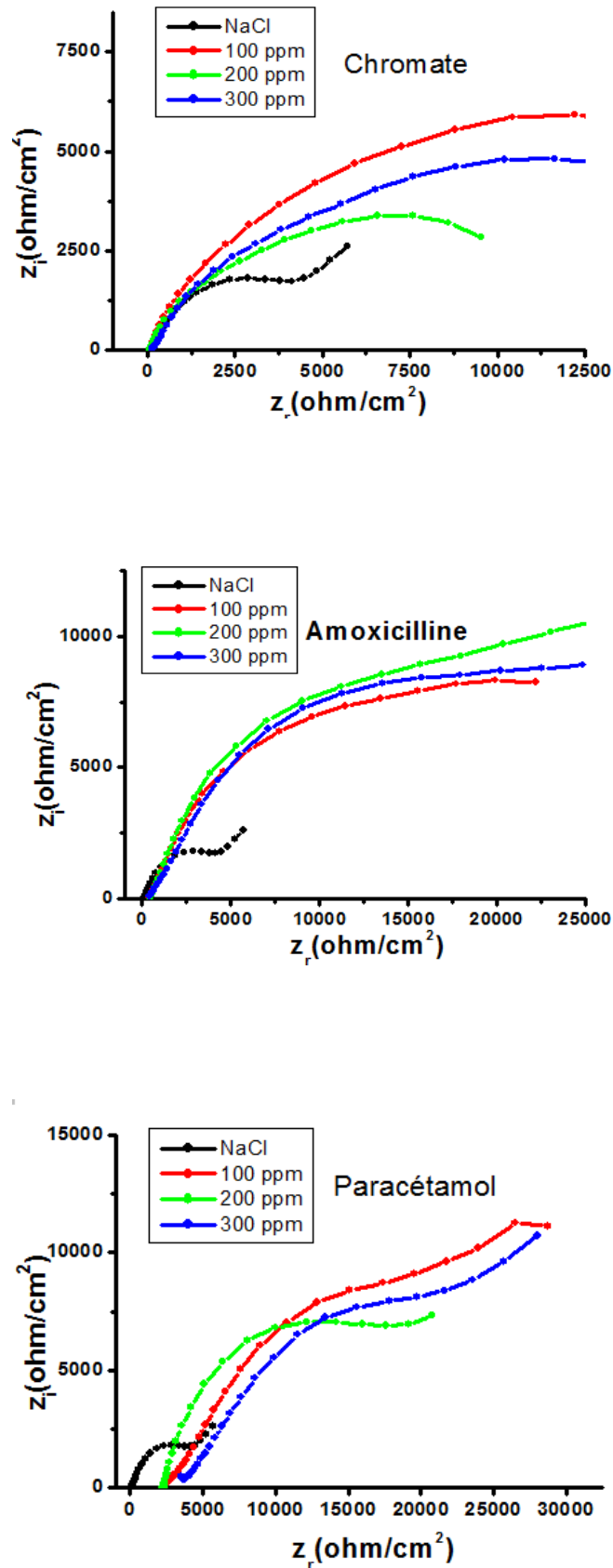


Figure III .3 : Diagrammes de Nyquist pour une électrode d'aluminium' dans NaCl en absence et en présence des inhibiteurs (chromate, Amoxicilline , paracétamole)

La présence d'une branche de Warburg dans le spectre d'impédance électrochimique est un indicateur important des phénomènes de diffusion dans le système électrochimique

En l'absence d'inhibiteur, la surface de l'électrode est plus exposée aux espèces corrosives présentes dans l'électrolyte. Cela permet une diffusion relativement libre des ions vers et depuis la surface de l'électrode, ce qui est souvent reflété par la présence d'une branche de Warburg.

En présence d'inhibiteur, les ions chromate, l'amoxicilline et le paracétamol, La taille des boucles croît avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, est une indication intéressante des processus électrochimiques en cours à la surface de l'électrode.

Une augmentation de la taille de la boucle indique généralement une augmentation de la résistance à la charge de transfert ( $R_{ct}$ ), ce qui suggère une meilleure inhibition de la réaction de corrosion. Plus la boucle est grande, plus la surface est protégée par l'inhibiteur.

Dans le cas de l'inhibiteur paracétamol, d'après la figure (III.3.c), on observe un décalage du début de la boucle à haute fréquence représentant la résistance de la solution, vers des valeurs plus élevées sur l'axe des parties réelles, dans le diagramme de Nyquist. Cela peut être expliqué par l'action significative sur la résistance de solution, suggérant un mécanisme d'action différent de celui des inhibiteurs typiques qui se concentrent principalement sur la résistance de polarisation.

CONCLUSION

# Conclusion

---

## Conclusion

En conclusion, les tests de l'OCP, des droites de Tafel et de l'impédance électrochimique ont démontré que les médicaments paracétamol et l'amoxicilline ainsi que les ion chromates, ajoutés à une solution corrosive (NaCl), offrent une protection inhibitrice significative d'une électrode d'aluminium, en réduisant les densités de courant de corrosion et en augmentant les résistances de polarisation et de solution, ces inhibiteurs montrent leur capacité à ralentir les processus de corrosion de manière efficace.

Dans cette étude comparative sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion, le paracétamol et l'amoxicilline ont été évalués par rapport aux chromates. Les résultats ont montré que le paracétamol avait le taux d'inhibition le plus élevé (87%), suivi des chromates (81%), tandis que l'amoxicilline avait le taux le plus bas (74%)

Ces résultats suggèrent que le paracétamol pourrait être une alternative prometteuse dans la protection contre la corrosion, offrant une efficacité similaire voire supérieure à celle des inhibiteurs classiques. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'action spécifiques de chaque composé et optimiser leur utilisation dans diverses applications industrielles.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

- [1] **William D. Callister, David G. Rethwisch.** Materials science and engineering: an introduction, John Wiley; 9<sup>th</sup> edition, (2014).
- [2] **Prawoto, Y., Ibrahim, K. et Wan Nik, WB (2009).** Effet du pH et de la concentration en chlorure sur la corrosion de l'acier inoxydable duplex. *Journal arabe pour la science et l'ingénierie*, 34 (2), 115.
- [3] **SURFATEC** - Le guide technique et pratique des revêtements de surfaces par projectionthermique - [www.surfatec.org](http://www.surfatec.org).
- [4] **Norman, E. H. (1965).** NACE glossary of corrosion terms. *Materials Protection*, 4(1), 79.
- [5] **Scendo, M. (2007).** Corrosion inhibition of copper by purine or adenine in sulphate solutions. *Corrosion Science*, 49(10), 3953-3968.
- [6] **Desai, MN, Desai, MB, Shah, CB et Desai, SM (1986).** Bases de Schiff comme inhibiteurs de corrosion pour l'acier doux dans des solutions d'acide chlorhydrique. *Science de la corrosion*, 26 (10), 827-837.
- [7] **Normand, B. (2004).** *Prévention et lutte contre la corrosion : Une approche scientifique et technique*. PPUR presses polytechniques.
- [8] **Schweitzer, PA (2006).** Corrosion des revêtements et revêtements : protection cathodique et par inhibiteur et surveillance de la corrosion. Presse CRC.
- [9] **Popov, B. N. (2015).** Corrosion engineering : principles and solved problems. Elsevier.
- [10] **Broussard, G., Bramanti, O., & Marchese, F. M. (1997).** Occupational risk and toxicology evaluations of industrial water conditioning. *Occupational medicine*, 47(6), 337-340.
- [11] **Raja, PB et Sethuraman, MG (2008).** Produits naturels comme inhibiteurs de corrosion pour les métaux dans des milieux corrosifs : une revue. *Lettres sur les matériaux*, 62 (1), 113-116.
- [12] **Newman, DJ, Cragg, directeur général et Snader, KM (2003).** Les produits naturels comme sources de nouveaux médicaments sur la période 1981– 2002. *Journal of natural products*, 66 (7), 1022-1037.

[13] **Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2007).** Natural products as sources of new drugs over the last 25 years. *Journal of natural products*, 70(3), 461-477.

[14] **Harvey, A. L. (2008).** Natural products in drug discovery. *Drug discovery today*, 13(19-20), 894-901.

[15] **Struck, S., Schmidt, U., Gruening, B., Jaeger, IS, Hossbach, J. et Preissner, R. (2008).** Éluclation de la toxicité par rapport à la puissance des propriétés toxiques en discriminant les toxines, les médicaments et les composés naturels. *Informatique du génome*, 20, 231-242.

[16] **Enick, O. V. (2006).** Do pharmaceutically active compounds have an ecological impact.

[17] **Eddy, N. O., & Odoemelam, S. A. (2008).** Inhibition of the corrosion of mild steel in acidic medium by penicillin V potassium. *Adv. Nat. Appl. Sci*, 2(3), 225-232.

[18] **Abdallah, M. (2004).** Antibacterial drugs as corrosion inhibitors for corrosion of aluminium in hydrochloric solution. *Corrosion Science*, 46(8), 1981-1996.

[19] **Eddy, N. O., Ebenso, E. E., & Ibok, U. J. (2010).** Adsorption, synergistic inhibitive effect and quantum chemical studies of ampicillin (AMP) and halides for the corrosion of mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40, 445-456.

[20] **Tamborim, SM, Dias, SLP, Silva, SN, Dick, LFP et Azambuja, DS (2011).** Préparation et caractérisation électrochimique de films d'acétate de cellulose dopés à l'amoxicilline pour les revêtements en alliage d'aluminium AA2024-T3. *Science de la corrosion*, 53 (4), 1571-1580.

[21] **Acharya, S., & Upadhyay, S. N. (2004).** The inhibition of corrosion of mild steel by some fluoroquinolones in sodium chloride solution. *Transactions-Indian Institute of Metals*, 57(3), 297-306.

[22] **Eddy, NO, Stoyanov, SR et Ebenso, EE (2010).** Fluoroquinolones comme inhibiteurs de corrosion des aciers doux en milieu acide ; études expérimentales et théoriques. *Journal international des sciences électrochimiques*, 5 (8), 1127-1150.

[23] **Matsushima, J. T., Trivinho-Strixino, F., & Pereira, E. C. (2006).** Investigation of cobalt deposition using the electrochemical quartz crystal microbalance. *Electrochimica Acta*, 51(10), 1960-1966.

[24] **Lakhdari, D. (2021).** Elaboration et caractérisation d'un matériau à base de nanoparticules magnétique NiF-PANi par électrodéposition: application dans la détection de glucose (Doctoral dissertation, Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou).

**[25] Keddam, M. (1985).** Electrochimie, principes, methodes et applications : AJ Bard et LRFaulkner Masson, Paris, 1983, 781 pp

**[26] Flitt, H. J., & Schweinsberg, D. P. (2005).** Evaluation of corrosion rate from polarisationcurves not exhibiting a Tafel region. *Corrosion Science*, 47(12), 3034-3052.