

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 : SCIENCES DE LA MATIERE

FILIERE : CHIMIE

OPTION : CHIMIE DES MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

Par : BENCHEIKH Ahmed Iheb

ALLAHOUM Zeyneb

**Intitulé**

**Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs de type non toxique**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. Lebid Mahmoud	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Dr. Berarma Khadidja	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. Nessark Faiza	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

# DEDICACE

*Avec l'aide d'Allah le tout-puissant,*

*Par la grâce et sa miséricorde,*

*Je dédie ce modeste travail et remercie ma mère qui a toujours été derrière moi et pour tous ses sacrifices pour nous conférer une meilleure vie.*

*À mes chères sœurs,*

*À mon père,*

*À tous ceux qui ont eu la patience de nous élever et de nous enseigner,*

*Que Dieu les garde, "Que Dieu les protège".*

*Que ce travail soit une humble marque de ma gratitude et de mon amour envers vous tous.*

*A. I. Bencheikh*

# DEDICACE

*En guise de reconnaissance,*

*Et que cela a été réalisé grâce à Allah,*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers et précieux parents, ma mère Nadia et mon père Massaoud, pour leur soutien, leur amour, et leurs sacrifices pour moi, tout au long de mes études.*

*À mes chères sœurs Sabrina et Maria pour leur soutien, leurs conseils, leurs gentillesse et surtout leur disponibilité.*

*À Mes chers frères Mohammed, Badro, et Madjdo pour leur affection, compréhension et patience.*

*À mon fiancé Samir.*

*À Mes Grands Parents et à toutes mes amies.*

*À tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation du présent rapport.*

*Z. Allahoum*

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre chère professeure et encadrante **BERARMA Khadidja** pour son précieux soutien, ses conseils éclairés et son encadrement attentif tout au long de notre parcours. Nous lui sommes profondément reconnaissantes de nous avoir guidées, orientées, aidées et conseillées dans la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui ont contribué à notre réflexion et à notre apprentissage. Leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont été d'une valeur inestimable pour enrichir nos connaissances et approfondir nos recherches. Leur disponibilité et leur volonté de partager leur expertise ont grandement facilité notre cheminement académique.*

*Nous saisissons cette occasion pour exprimer notre profonde gratitude envers tous les ingénieurs de laboratoire de chimie, dont l'aide précieuse et les connaissances techniques ont été indispensables à la réalisation de ce travail. Leur soutien infaillible et leur engagement dans la recherche scientifique ont été une source d'inspiration et ont contribué à notre formation.*

*Enfin, nous tenons à adresser nos vifs remerciements aux membres des jurys pour leur temps, leur expertise et leur évaluation attentive de ce travail. Leur évaluation approfondie et leurs commentaires constructifs ont été d'une grande valeur pour notre développement académique.*

*Nous sommes reconnaissantes envers toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet. Leurs efforts et leur soutien indéfectible ont été essentiels et nous leur en sommes profondément reconnaissantes.*

# Sommaire

**DEDICACE**

**REMERCIEMENTS**

**Sommaire**

**ملخص**

**Abstract**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Listes des tableaux**

Introduction .....	1
<b>Chapitre I. La corrosion .....</b>	<b>2</b>
I.1. Définition de la corrosion .....	2
I.2. Types de Corrosion.....	3
I.2.1. Corrosion générale .....	3
I.2.2. Corrosion Sous Contrainte .....	3
I.2.3. Corrosion localisée .....	4
I.2.4. Corrosion intergranulaire .....	6
I.2.5. Corrosion galvanique .....	7
I.2.6. Érosion .....	9
I.3. Protection contre la corrosion.....	9
I.3.1. Les techniques de protection contre la corrosion .....	9
I.4. L'action d'un inhibiteur.....	15
I.4.1. Inhibiteurs agissant sur les processus électrochimiques de corrosion.....	15
I.4.2. Inhibiteurs organiques agissant par formation de barrière protectrice .....	17
<b>Chapitre II. Matériels et Méthodes .....</b>	<b>20</b>
II.1. Introduction .....	20
II.2. Produits et matériels .....	20

II.2.1. Produits.....	20
II.2.2. Matérielles .....	21
II.3. Méthodes .....	23
II.3.1. Potentiel en circuit ouvert $E_{corr} = f(\text{temps})$ .....	23
II.3.2. Courbe de polarisation $i = f(E)$ .....	24
II.3.3. La spectroscopie d'impédance électrochimique .....	25
<b>Chapitre III. Résultats et Discussion .....</b>	<b>28</b>
III.1. Introduction.....	28
III.2. Comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion .....	28
III.2.1. Potentiel à l'abandon .....	28
III.2.2. La courbe de polarisation .....	30
III.2.3. La Spectroscopie d'impédance électrochimique.....	31
III.3. L'effet de l'Amoxicilline sur le comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion .....	33
III.3.1. Potentiel à l'abandon .....	33
III.3.2. Les courbes de polarisation .....	34
III.3.3. Les diagrammes d'impédance .....	36
III.4. L'effet de Doliprane sur le comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion.....	38
III.4.1. Potentiel à l'abandon .....	38
III.4.2. Les courbes de polarisation .....	39
III.4.3. Les diagrammes d'impédance .....	41
Conclusion.....	43
Références bibliographiques .....	49

## ملخص

التآكل مشكلة عالمية خطيرة تؤثر بشدة على البيئات الطبيعية والصناعية. ونتيجة لذلك ، فإن دراسة ظاهرة التآكل ووسائل الحماية التي على الأقل تخفف من أثارها إن لم تستطع القضاء عليها تمثل مصلحة معينة للصناعيين من وجهة نظر السلامة الصناعية والاقتصادية.

نظرًا لأصلها الطبيعي ، فضلاً عن خصائصها غير السامة والتأثيرات السلبية التي لا تذكر على البيئة ، يبدو أن الأدوية مرشحة مثالية لتحل محل مثبتات التآكل السامة التقليدية.

الهدف من هذا العمل هو تقييم الفعالية التثبيطية لبعض الأدوية ، الباراسيتامول ، الأموكسيسيلين ، فيما يتعلق بتآكل الفولاذ الكربوني في وسط كلوريد الصوديوم.

طرق التوصيف التجريبية المستخدمة في هذا العمل هي: جهد الدائرة المفتوحة ، منحنيات الاستقطاب الديناميكي الفعال ، مطيافية المعاوقة الكهروكيميائي (EIS) .

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها انخفاضاً في معدل تآكل قطب الصلب بإضافة أموكسيسيلين (400 جزء في المليون) إلى محلول كلوريد الصوديوم بمعدل تثبيط 92.5% وبالنسبة إلى الدولبيران يصل إلى 90.5% عند تركيز (300 جزء في المليون).

الكلمات المفتاحية: تآكل ، مثبتات ، أموكسيسيلين ، دولبيران ، فلاد.

## **Abstract**

Corrosion is a critical global problem that strongly affects natural and industrial environments. As a result, the study of corrosion phenomena and the means of protection which at least attenuate its effects if not can eliminate it represent a certain interest for industrialists both from the point of view of industrial and economic safety.

Due to their natural origin, as well as their non-toxic characteristics and negligible negative impacts on the environment, the drugs seem to be ideal candidates to replace traditional toxic corrosion inhibitors.

The evaluation of the inhibitory effectiveness of some drugs, Paracetamol, Amoxicillin, with respect to the corrosion of carbon steel in NaCl 1M medium.

The experimental characterization methods used in the realization of this work are: open circuit potential, potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

The results obtained clearly show a reduction in the rate of corrosion of the steel electrode with the addition of amoxicillin (400ppm) to the NaCl solution with an inhibition rate of 92.975% and for doliprane, it reaches 90.56% at a concentration.

**Keywords: Corrosion, Inhibitors, Amoxicillin, Doliprane, Steel.**



## Résumé

La corrosion est un problème mondial critique qui affecte fortement les environnements naturels et industriels. De ce fait, l'étude des phénomènes de corrosion et les moyens de protection qui au moins atténuent ses effets sinon peuvent les éliminer représentent un intérêt certain pour les industriels tant du point de vue de la sécurité industrielle qu'économique.

En raison de leur origine naturelle, ainsi que de leurs caractéristiques non toxiques et de leurs impacts négatifs négligeables sur l'environnement, les médicaments semblent être des candidats idéaux pour remplacer les inhibiteurs de corrosion toxiques traditionnels.

Le but de ce travail est d'évaluer l'efficacité inhibitrice de certains médicaments, Paracétamol, Amoxicilline, vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone en milieu NaCl 1M

Les méthodes expérimentales de caractérisation utilisées dans la réalisation de ce travail sont : le potentiel de circuit ouvert, les courbes de polarisation potentiodynamiques et la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS).

Les résultats obtenus montrent clairement une diminution du taux de corrosion de l'électrode en acier avec l'ajout d'amoxicilline (400ppm) à la solution de NaCl avec un taux d'inhibition de 92,5% et pour le doliprane, il atteint 90,5% à une concentration

**Mots clés : Corrosion, Inhibiteurs, Amoxicilline, Doliprane, Acier.**

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Cycle affinage-corrosion.....	2
<b>Figure I.2</b> : Les différents types de la corrosion. ....	3
<b>Figure I.3</b> : Schéma de la fissuration par corrosion sous contrainte. ....	4
<b>Figure I.4</b> : Représentation schématique de la microstructure d'un alliage Al-4%Cu [22]. ....	7
<b>Figure I.5</b> : Schéma de principe de la corrosion galvanique.....	8
<b>Figure I.6</b> : Schéma de la protection cathodique au milieu aqueux. ....	11
<b>Figure I.7</b> : Schéma de la protection anodique sacrificielle au milieu aqueux. ....	12
<b>Figure I.8</b> : Schéma d'un revêtement organique.....	12
<b>Figure I.9</b> : Schéma d'une peinture au trempé.....	13
<b>Figure I.10</b> : Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B), en milieu acide [27]. ....	14
<b>Figure I.11</b> Schéma d'inhibiteurs.....	15
<b>Figure II.1</b> : Schéma du montage et d'une cellule d'électrolyse. ....	22
<b>Figure II.2</b> : Variation du potentiel libre à circuit ouvert en fonction du temps [52]. ....	23
<b>Figure II.3</b> : Exemple d'une courbe de polarisation.....	25
<b>Figure II.4</b> : Courbe théorique de l'impédance électrochimique.....	27
<b>Figure III.1</b> : Potentiel libre en fonction du temps d'une électrode d'acier dans NaCl 1M. ....	29
<b>Figure III.2</b> : la courbe de Tafel de l'électrode de carbone dans NaCl 1M en absence d'additifs. ....	31
<b>Figure III.3</b> : Diagramme de Nyquist pour l'électrode d'acier dans NaCl 1M. ....	32
<b>Figure III.4</b> : Effet de la concentration de l'Amoxicilline sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'acier dans NaCl.....	33
<b>Figure III.5</b> : L'effet de l'ajout de l'Amoxicilline à différentes concentrations sur les courbes de polarisations d'une électrode d'acier dans NaCl.....	35
<b>Figure III.6</b> : Taux de corrosion et efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 1M sans et avec différentes concentrations de l'Amoxicilline. ....	36
<b>Figure III.7</b> : Diagrammes expérimental de Nyquist pour une électrode d'acier dans NaCl. ....	37

<b>Figure III.8 :</b> Effet de la concentration de doliprane sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'acier dans NaCl. ....	38
<b>Figure III.9 :</b> L'effet de l'ajout de Doliprane à différentes concentrations sur les courbes de polarisations d'une électrode d'acier dans NaCl. ....	40
<b>Figure III.10 :</b> Taux de corrosion et efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 1M sans et avec différentes concentrations de l'amoxicilline. ....	41
<b>Figure III.11 :</b> Diagrammes de Nyquist pour une électrode d'acier dans NaCl en absence et en présence du doliprane. ....	42

## Listes des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Médicaments comme inhibiteurs de corrosion.....	19
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en absence d'additifs. ....	31
<b>Tableau III.2</b> : Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence de l'Amoxicilline. ....	34
<b>Tableau III.3</b> : Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence Amoxicilline. ....	36

# **Introduction**

## Introduction

La corrosion est un phénomène indésirable qui peut entraîner une détérioration significative des matériaux métalliques, entraînant des coûts élevés de réparation et de remplacement. Pour prévenir la corrosion, diverses méthodes ont été développées, notamment l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion. Les inhibiteurs sont des composés chimiques ajoutés à une solution corrosive pour réduire la réactivité du matériau métallique envers son environnement.

Les inhibiteurs chimiques jouent un rôle important dans les stratégies de protection contre la corrosion. Les inhibiteurs les plus efficaces sont les composés organiques qui ont des liaisons  $\pi$ , des hétéroatomes (P, S, N et O) et des composés inorganiques, tels que le chromate, le dichromate, le nitrite...etc. [1–4] Cependant, l'utilisation de ces composés ont un effet négatif dans l'environnement. Ainsi, le développement de nouveaux inhibiteurs de corrosion de source naturelle et de type non toxique a été considéré comme plus important et souhaitable [5]. Du fait de leur origine naturelle, ainsi que de leurs caractéristiques non toxiques et des impacts négatifs négligeables sur le milieu aquatique, les médicaments semblent être des candidats idéaux pour remplacer les inhibiteurs de corrosion toxiques traditionnels, c'est dans ce contexte que ce travail s'inscrit.

L'objectif de cette étude était d'évaluer de l'efficacité inhibitrice de quelques médicaments, Doliprane et Amoxicilline, vis à vis de la corrosion de l'acier au carbone dans la solution de NaCl (1M). Les méthodes de caractérisation expérimentales utilisées dans la réalisation de ce travail sont : le potentiel à circuit ouvert, les courbes de polarisation potentiodynamique et la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).

Les résultats obtenus ont été analysés et interprétés pour comprendre l'effet des inhibiteurs sur le comportement de l'acier vis-à-vis de la corrosion. Ces données fournissent des informations précieuses pour évaluer l'efficacité des inhibiteurs dans des applications pratiques de protection contre la corrosion.

Dans la suite de cette note, nous présenterons en détail les résultats obtenus et discuterons de leurs implications. Nous mettrons en évidence les variations observées dans les paramètres électrochimiques et fournirons une interprétation des effets des inhibiteurs sur la corrosion de l'acier. Enfin, nous terminerons ce travail par des conclusions.

# Chapitre I

## LA CORROSION

## Chapitre I. La corrosion

### I.1. Définition de la corrosion

La corrosion est le résultat de l'interaction entre un métal et des environnements qui entraîne sa destruction progressive, il s'agit un aspect de la dégradation des matériaux par des agents chimiques ou biologiques. La corrosion est un processus naturel et coûteux de destruction comme les tremblements de terre, les tornades, les inondations et les éruptions volcaniques. Contrairement aux processus de destruction ci-dessus, la corrosion peut être empêchée ou au moins contrôlée.

La corrosion ne se limite pas aux seuls métaux et alliages, elle englobe désormais tous les types de matériaux naturels et artificiels, y compris les biomatériaux et les nanomatériaux. L'ampleur de la corrosion est cohérente avec les changements révolutionnaires dans le développement des matériaux observés ces dernières années [6].

La corrosion est la désintégration de surface des métaux/alliages dans un environnement spécifique. Certains métaux présentent fondamentalement une résistance à la corrosion plus élevée que d'autres et cela peut être attribué à plusieurs facteurs tels que leurs constituants chimiques, la nature des réactions électrochimiques elles-mêmes et d'autres.

La résistance à la corrosion des métaux peut être définie en fonction de sa capacité à résister à des conditions agressives. Cela détermine dans une large mesure la durée de vie opérationnelle des composants en service [7].

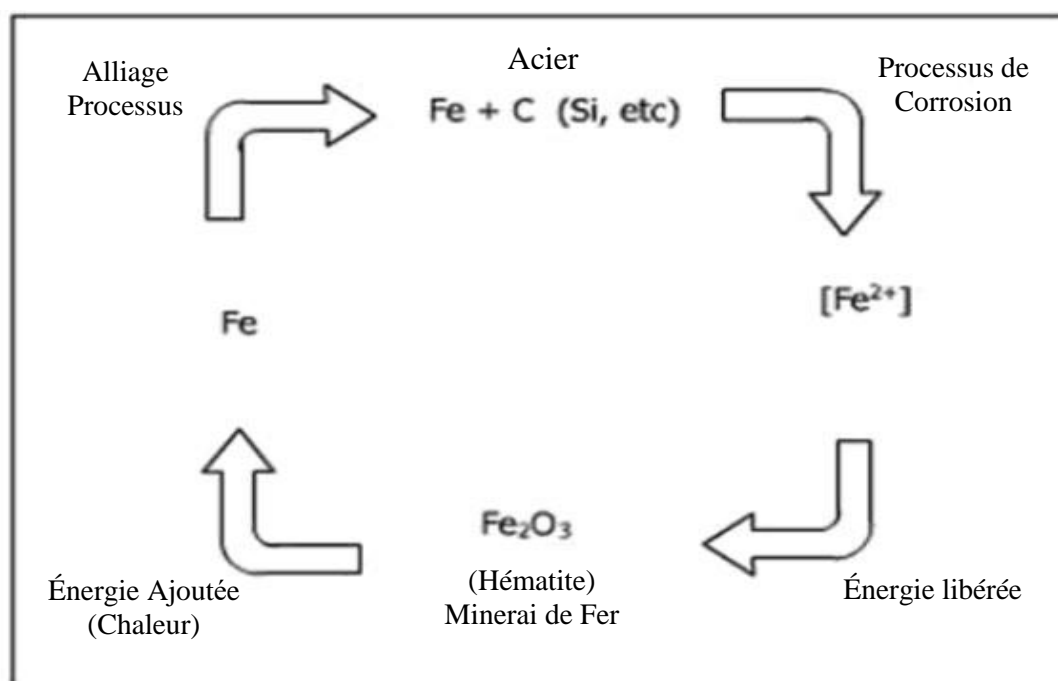


Figure I.1 : Cycle affinage-corrosion



## I.2. Types de Corrosion

Les différents types de corrosion sont classés en catégories suivantes comme le montre le diagramme suivant. (Fig.I.2).

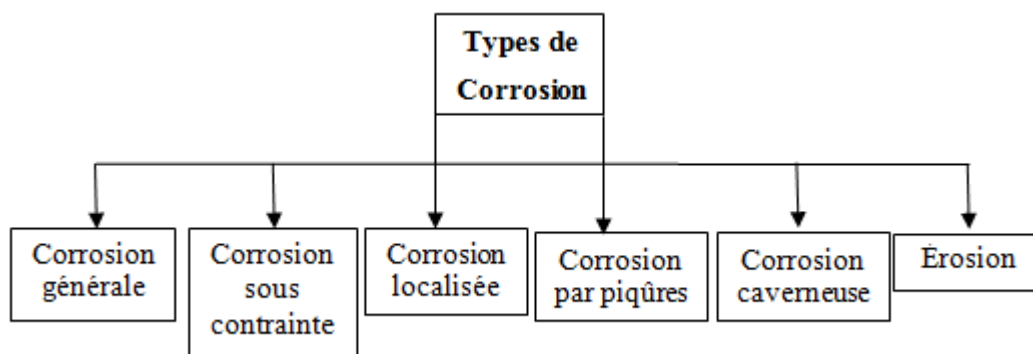
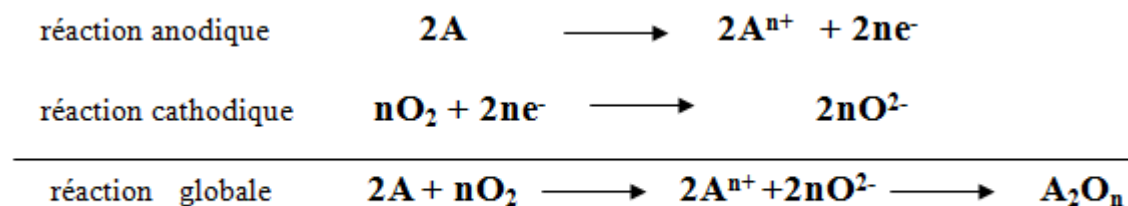


Figure I.2 : Les différents types de la corrosion.

### I.2.1. Corrosion générale

La corrosion généralisée également connu de corrosion uniforme attaque une surface métallique d'une manière plus ou moins uniforme. Elle peut également être définie comme un type de corrosion qui se déroule à la même vitesse sur toute la zone altérée. L'oxygène est la principale cause de cette corrosion. Les matériaux les plus courants qui subissent la corrosion généralisée sont la fonte et l'acier. Quand ils sont exposés à une atmosphère humide, ils donnent un aspect rouillé.

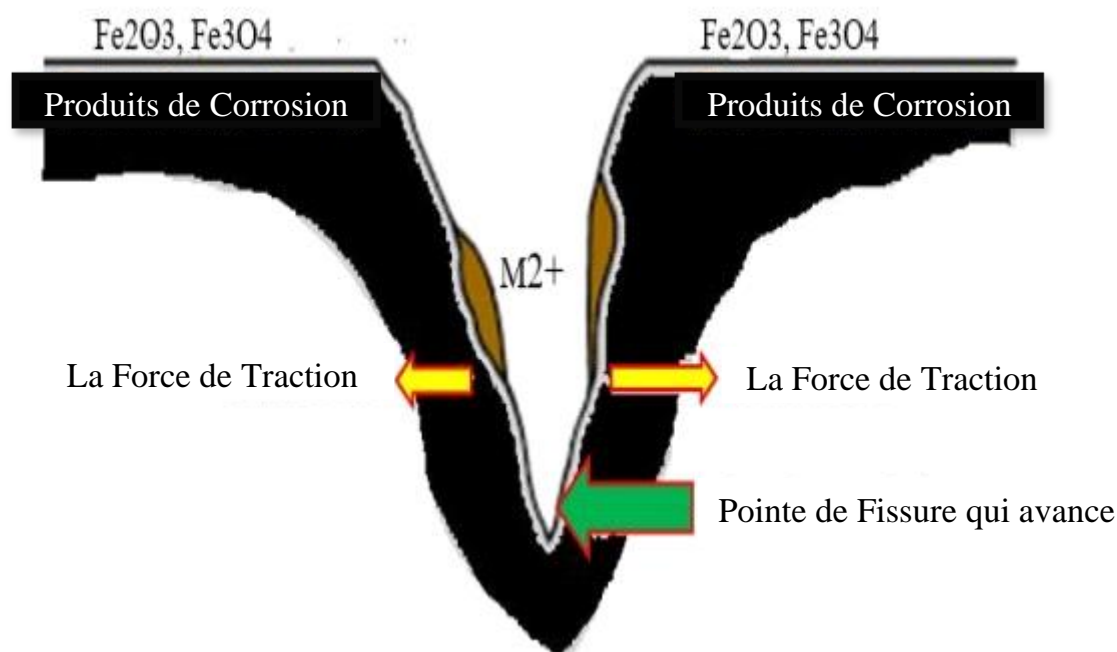


Où, A est n'importe quel métal.

### I.2.2. Corrosion Sous Contrainte

La Corrosion Sous Contrainte (CSC) est un phénomène synergique entre une dégradation chimique d'un matériau par corrosion localisée et l'effet d'une contrainte mécanique appliquée sur le matériau (présent initialement en milieu inerte) et se traduit donc par l'apparition de fissure en

milieu corrosif, résiduelle ou appliquée, conduisant à l'amorçage d'une ou plusieurs fissures fragiles, à leur propagation au sein du matériau. Elle peut être accélérée soit par des contraintes internes résiduelles dans le métal, soit par des contraintes externes [8]. Il se produit principalement à des températures élevées. Il est plus fréquent dans les alliages que dans les métaux. Le CSC ne peut se produire que si les trois facteurs suivants sont remplis : (i). Présence de matériaux sensibles (ii) soumis à un environnement corrosif et (iii) contraintes de traction.



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

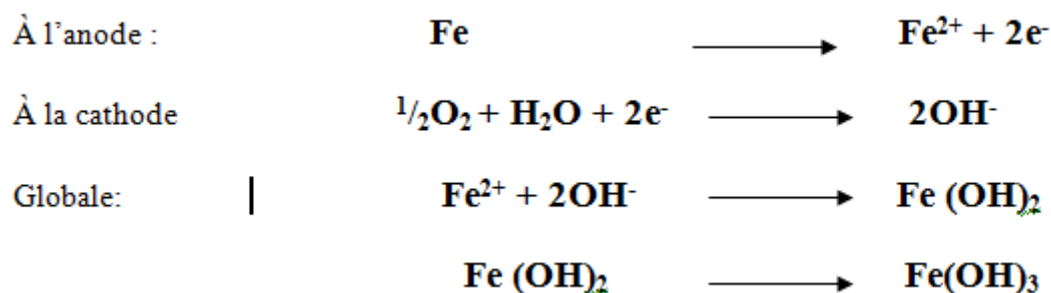
### I.2.3. Corrosion localisée

La corrosion localisée se produit comparativement à la corrosion généralisée, dans une zone plus petite [9]. Cette corrosion se produit lorsque les petites zones d'une surface métallique se corrodent beaucoup plus facilement à un rythme plus rapide que l'ensemble dans un environnement corrosif. La zone avec un apport limité en oxygène devient une anode tandis que l'autre avec un apport complet devient une cathode. Elle est en outre de deux types :

- Corrosion par piqûres.
- Corrosion caverneuse.

#### I.2.3.1. Corrosion par piqûres

Il s'agit d'un type de corrosion très nocif car il est difficile à détecter, à prévoir et à contrer. Il est généralement observé dans les matériaux passifs. La présence de non-uniformités accentue la vitesse de cette corrosion. La réaction peut se dérouler comme suit :



La corrosion par piqûres est l'un des types importants de corrosion localisée. Elle se produit initialement dans une zone relativement petite d'un matériau. Après un certain temps, la zone devient plus grande et plus profonde, ce qui forme des fosses à la surface. Dans ce type de corrosion localisée, des piqûres s'établissent à la surface du matériau. Une zone couverte d'impuretés ou d'eau à une concentration d'oxygène plus faible, elle agit donc comme anode tandis que l'autre agit comme cathode.

Les chlorures causent les problèmes les plus graves en raison de leur présence dans de nombreux environnements tels que l'eau de mer et le sel sur les routes, dans les aliments et dans l'industrie chimique. De nombreux métaux et leurs alliages sont sujets à ce type de corrosion (par exemple, le fer, le nickel, le cuivre, l'aluminium, les aciers). La restriction de la dissolution à des piqûres à l'intérieur d'une grande surface métallique passivée, qui peut servir de grande cathode pour la réduction des oxydants tels que l'oxygène dissous, conduit à une perforation rapide du métal, ce qui affaiblit la construction et entraîne ainsi de grandes pertes économiques et problèmes de sécurité.

La piqûre sur des surfaces métalliques passivées est un processus complexe avec une séquence d'étapes. Pour chaque étape du développement et de la croissance d'une piqûre de corrosion, il faut étudier les détails mécanistiques afin de comprendre le processus dans son ensemble. On distingue généralement les étapes suivantes :

- Processus conduisant à la rupture de la passivité.
- Premiers stades de croissance de la fosse.
- Derniers stades de croissance de la fosse.

Selon Hoar et all [10], un mécanisme électrochimique est supposé responsable de la dissolution du métal. Jusqu'à présent, deux théories sont largement utilisées pour interpréter le mécanisme de la corrosion par piqûre :

La première suppose que, l'augmentation de l'acidité des solutions dans les zones actives provoque l'émergence et la croissance des fosses [11, 12].

La deuxième supposition, une autre est suggérée par les enquêteurs russes. Ils ont lié la formation de piqûres au déplacement de la surface métallique par les anions [13 -19]. Le rapport de la fosse la plus profonde à la pénétration moyenne est appelé facteur de piqûres. Le facteur de piqûres peut être utilisé pour vérifier l'intensité de la corrosion par piqûres.

#### **I.2.3.2. Corrosion caverneuse :**

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 [20]. 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 [21].

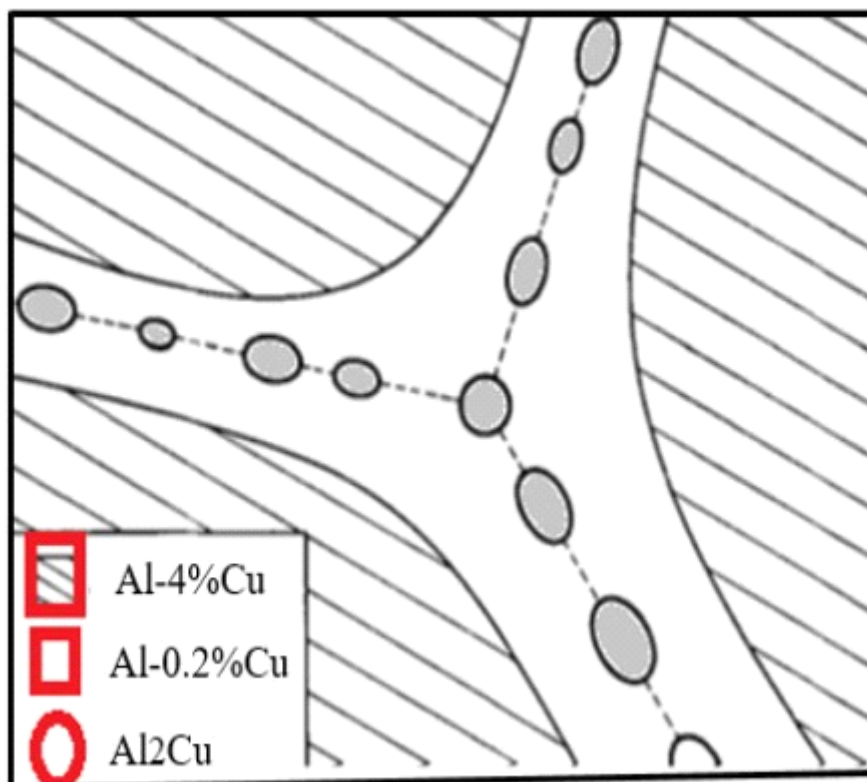
Les divers facteurs favorisant la corrosion caverneuse sont les suivants :

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

#### **I.2.4. Corrosion intergranulaire**

Elle est également appelée attaque intergranulaire (IGA), cette corrosion se produit lorsque les marges de la surface métallique sont plus sujettes à un environnement corrosif qu'au cœur. Cette corrosion contribue à voiler la résistance à la corrosion du matériau dans de nombreuses circonstances. C'est ce qu'on appelle le test IGA. La corrosion intergranulaire des alliages vieilliss Al-4%Cu a fait l'objet de nombreuses investigations. Il est généralement admis que la microstructure de l'alliage Al-Cu vieilli est celle représentée ci-dessous dans la **Fig.I.4** [22].

La corrosion intergranulaire n'est pas affectée par l'ajout d'impuretés telles que C, N, O, Mn et S, tandis que l'ajout de Si et P affecte la corrosion [23].



**Figure I.4 :** Représentation schématique de la microstructure d'un alliage Al-4%Cu [22].

### I.2.5. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique peut se définir simplement par l'effet résultant du contact de deux métaux ou alliages différents dans un environnement corrosif conducteur.

Lors d'un couplage entre deux métaux ou alliages différents, il va s'établir un courant électronique entre eux résultant du court-circuit formé. On observe généralement un accroissement de la corrosion de l'alliage le moins noble et diminution ou suppression de la corrosion de l'alliage le plus noble. Ce principe électrochimique est analogue à une pile en court-circuit. Le terme galvanique désigne un courant électrique circulant entre deux métaux avec déplacement d'ions métalliques.

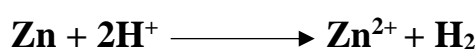
Le métal le moins réactif se comporte comme cathode tandis que l'autre se comporte comme anode. Le taux de corrosion galvanique est directement proportionnel à la différence de potentiel entre les deux métaux. Elle augmente avec l'augmentation de la différence de potentiel entre les deux métaux [24].

Comme, dans la série électrochimique, Zn se situe à une position plus élevée que Cu, Zn agit donc comme anode tandis que Cu agit comme cathode. Cela signifie que Zn subit une perte

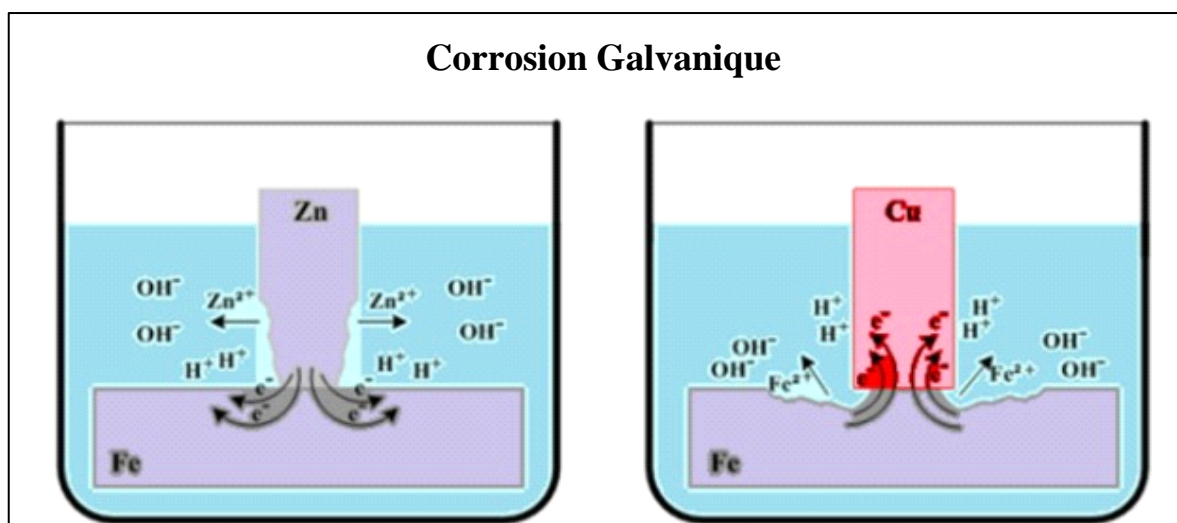
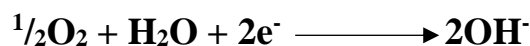
d'électrons alors que Cu accepte des électrons. En raison de la nature moins noble du Zn par rapport au Cu, le Zn subit une corrosion. En solution acide.

En fonction des modifications de l'électrolyte, on peut avoir des inversions dans la série des potentiels. Le zinc, par exemple, recouvert de produits de corrosion, peut devenir plus "noble" que le fer dans certaines eaux chaudes. L'étain peut devenir moins "noble" que le fer dans les solutions d'acide organique (problème des conserves alimentaires).

La corrosion galvanique intervient suite à de nombreux facteurs tels que la mise en contact de deux métaux aux potentiels différents, l'humidité, la température la conduction électrique du milieu etc.



En solution neutre ou légèrement alcaline,



**Figure I.5** : Schéma de principe de la corrosion galvanique.

Les phénomènes de corrosion impactent les activités industrielles à plusieurs niveaux, mettant en jeu la sécurité, mais également la longévité des matériaux et des installations. Une protection efficace contre la corrosion permettra un renouvellement moins fréquent des matériaux, générant ainsi une économie sensible. Plusieurs approches de prévention sont envisageables : inhibiteurs de corrosion, protection cathodique, revêtements anticorrosion, traitements thermomécaniques, etc.

### **I.2.6. Érosion**

En raison du mouvement relatif entre la surface métallique et le fluide corrosif, la surface métallique se corrode.

C'est ce qu'on appelle l'érosion. Lorsque le fluide contient des particules solides plus dures que la surface métallique affectée, l'érosion se produira par l'action combinée de la corrosion et de l'abrasion, tandis que lorsque le fluide contient des particules plus molles que le métal, l'érosion se produira par corrosion et attrition [25]. Le taux d'écoulement relatif donne une idée de l'abrasion. Le mécanisme d'écaillage et de fissuration détermine la cause de l'érosion, qui se produit en raison de la formation et de l'élimination simultanées de tartre de la surface du matériau [26].

La corrosion par cavitation est la forme particulière de l'érosion. Les bulles de vapeur dans les liquides proches de la surface métallique se forment et s'effondrent, provoquant ainsi cette corrosion. Certaines techniques générales pour limiter l'érosion sont : Utiliser des matériaux plus durs (ii) Utiliser une vitesse plus faible du liquide.

## **I.3. Protection contre la corrosion**

La lutte contre la corrosion représente l'ensemble des mesures qui peuvent être prises pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructrice de l'environnement. La protection contre la corrosion doit être prise en compte pour éviter de nombreux problèmes et assurer une certaine durée de vie. Résolution réussie doit être compatible avec la réglementation relative à la protection de l'environnement et permet le recyclage ou l'élimination de divers composants en fin d'utilisation. Le choix de la méthode de protection se fait d'une part, selon le matériau à protéger et son milieu environnant, d'autre part, selon les considérations économiques.

### **I.3.1. Les techniques de protection contre la corrosion**

Il existe plusieurs techniques de protection qui peuvent être classées comme ci-dessous :

- ✓ Prévention par une forme adaptée des pièces.
- ✓ Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- ✓ Protection par revêtements.
- ✓ Protection électrochimique.
- ✓ Protection par inhibiteurs.

**I.3.1.1. Prévention par un choix judicieux des matériaux :**

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du matériau et qui prend en compte les facteurs suivants :

- Domaine d'utilisation ;
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques ;
- Traitements sélectionnés ;
- Prix et disponibilité des matériaux.

**I.3.1.2. Prévention par une forme adaptée des pièces :**

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Les états de surface réguliers, l'absence de replis, de recoins facilitent, quel que soit le type de protection adoptée, sa mise en œuvre, son efficacité en service.

**I.3.1.3. Protection par revêtements :**

La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif en utilisant des revêtements. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques.

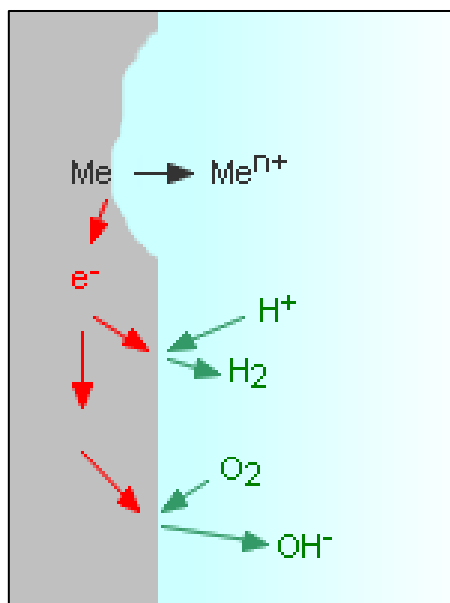
**I.3.1.3.1 Revêtements métalliques :****I.3.1.3.1.1 Revêtements nobles ou cathodiques :**

Les revêtements métalliques sont couramment utilisés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, ils peuvent également être appliqués sur d'autres substrats comme le cuivre et le laiton, en plus de leur effet anti-corrosion, ils remplissent souvent une fonction décorative.

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

Le métal protégé est moins noble que le revêtement. C'est le cas, par exemple, des revêtements de nickel ou de cuivre sur l'acier. Dans le cas de défauts de revêtement, la formation de piles peut conduire à une perforation rapide du métal de base, qui se corrode localement et joue le rôle d'anode.





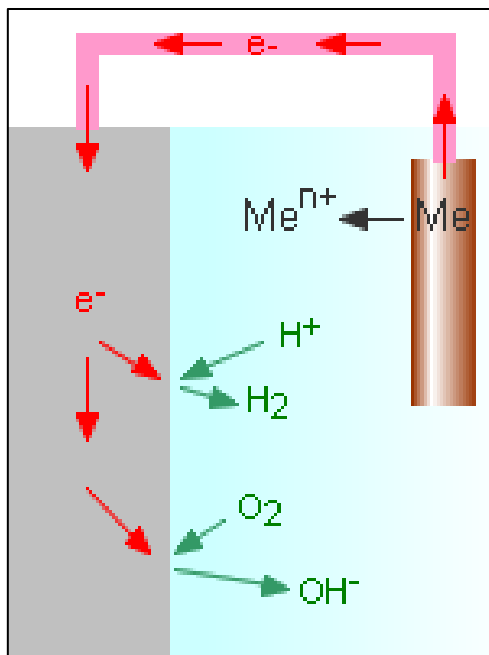
**Figure I.6 :** Schéma de la protection cathodique au milieu aqueux.

Par conséquent, les revêtements au-dessus du substrat ne doivent contenir aucun défaut.

#### **I.3.1.3.1.2 Revêtements anodiques ou sacrificiels :**

Le substrat est plus noble que le revêtement, c'est le cas avec le procédé de galvanisation (galvanisation). Ce phénomène s'inverse, une couche d'un métal susceptible de s'oxyder est ajoutée sur la surface du métal, tandis que le substrat (cathode) reste protégé. Dans ce cas, la durée de vie du revêtement est directement proportionnelle à son épaisseur, qui est généralement liée à l'augmentation de l'épaisseur du revêtement.

Dans cette méthode, une couche d'un métal susceptible de s'oxyder est ajoutée sur la surface du métal que vous souhaitez protéger. Vous pouvez soit utiliser une protection cathodique dans un processus connu sous le nom de galvanisation, soit utiliser une protection anodique.

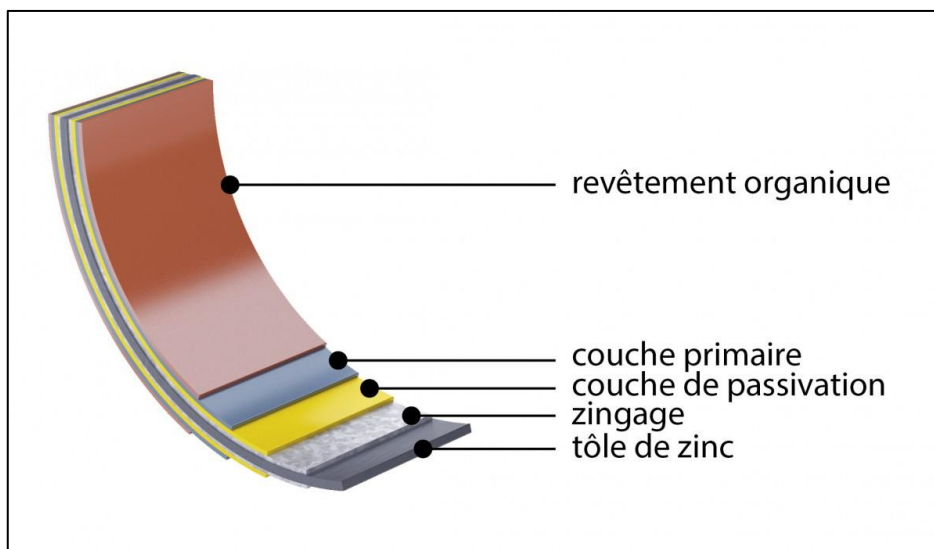


**Figure I.7 :** Schéma de la protection anodique sacrificielle au milieu aqueux.

### I.3.1.3.2 Revêtements non métalliques :

#### I.3.1.3.2.1 Revêtements organiques :

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu.



**Figure I.8 :** Schéma d'un revêtement organique.

### I.3.1.3.2 Les revêtements polymériques :

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

### I.3.1.3.3 Les peintures et les vernis :

Ils sont distingués par des couches très minces ( $<100 \mu\text{m}$ ).

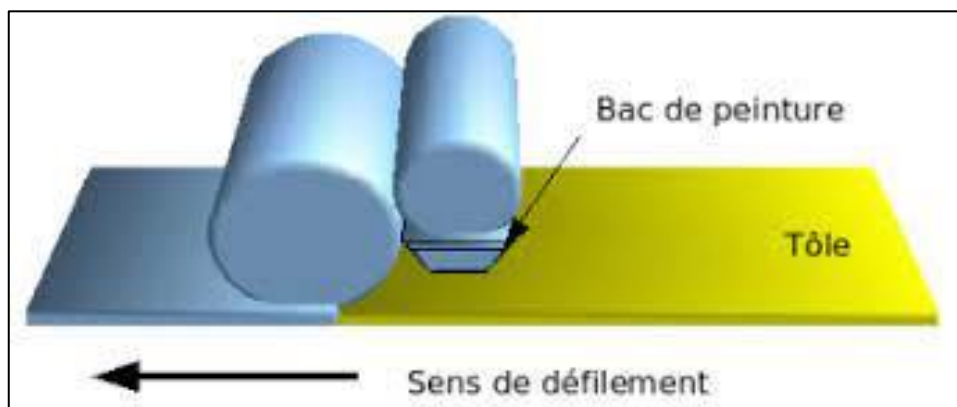


Figure I.9 : Schéma d'une peinture au trempé.

### I.3.1.3.3 Revêtements inorganiques :

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques :

#### I.3.1.3.3.1 Les couches de conversion :

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

- L'anodisation ;
- La phosphatation ;
- La chromatisation.

### I.3.1.4. Protection électrochimique :

La protection électrochimique consiste à agir de manière contrôlée contre les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors de la corrosion. Cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur latente où le taux d'attaque devient très faible, voire nul. Nous distinguons

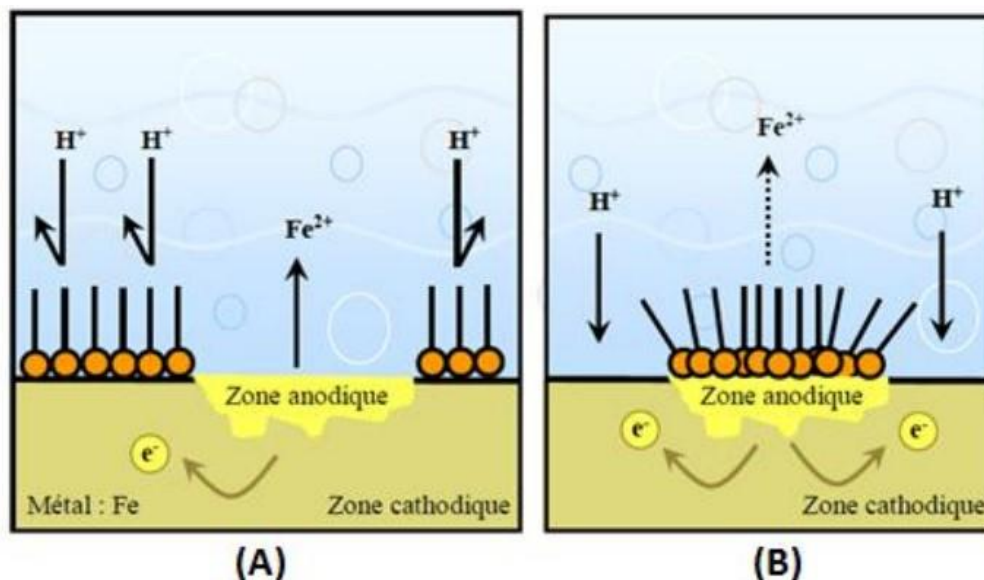
La protection cathodique comprend l'abaissement du potentiel d'électrode du métal.

La protection anodique, d'origine plus récente, repose sur la capacité d'un matériau à passer dans l'environnement considéré.

Elle est généralement peu coûteuse et efficace sur le long terme : lorsque la technique est maîtrisée et accompagnée d'une bonne connaissance des conditions environnantes.

### I.3.1.5. Protection par inhibiteur de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques appliqués à la surface du métal qui réagissent avec le métal ou les gaz environnants pour inhiber ou supprimer les processus électrochimiques qui conduisent à la corrosion.



**Figure I.10** : Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B), en milieu acide [27].

Selon la définition donnée par « National Association of Corrosion Engineers (NACE), un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, ajoutée à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu, sans modifier la nature de ce dernier [28].

D'une manière générale un inhibiteur doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide) ;
- Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants ;
- Être stable aux températures d'utilisation ;
- Être efficace à faible concentration ;

## I.4. L'action d'un inhibiteur

L'action d'un inhibiteur sera donc :

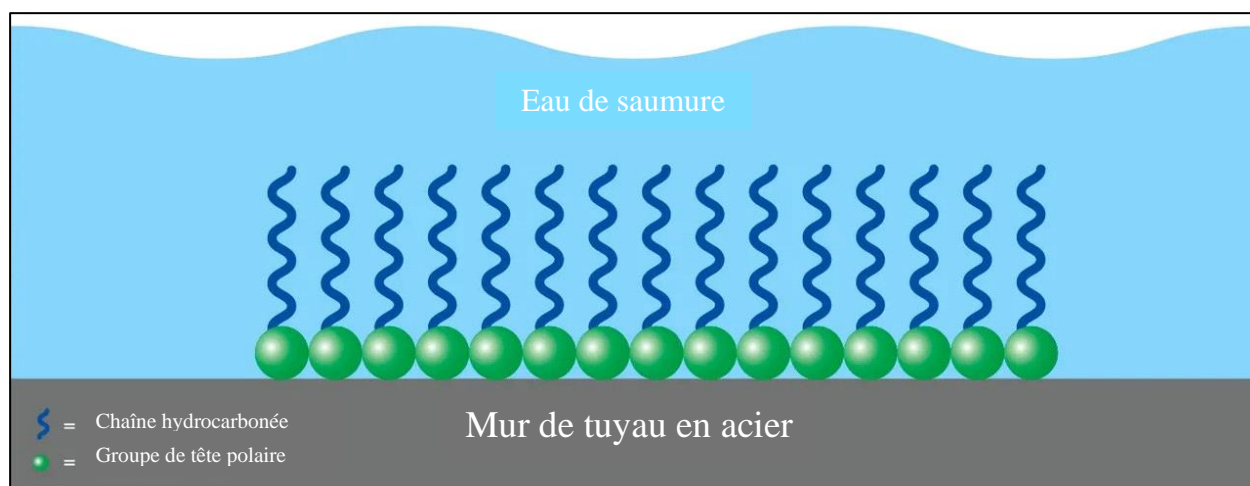
- Soit dépendante directement des processus électrochimiques de corrosion ; on parlera alors « d'inhibiteurs anodiques » et/ou d'inhibiteurs cathodiques, certains inhibiteurs pouvant avoir une action mixte ;
- Soit indépendante des phénomènes de corrosion ; l'inhibiteur agit alors par adsorption sur les surfaces métalliques et forme une « barrière » entre le métal et le milieu corrosif.

Certains additifs peuvent également être ajoutés au milieu pour diminuer sa corrosivité en agissant directement sur l'alcalinité du milieu (pH) et/ou sur l'espèce électro-active (réduction de l'oxygène dissous).

### I.4.1. Inhibiteurs agissant sur les processus électrochimiques de corrosion

#### I.4.1.1. Inhibiteurs anodiques

Ce sont des composés oxydants qui, par élévation du potentiel de corrosion, contribuent à protéger les matériaux considérés par formation d'une couche passive. Pour cela, les matériaux doivent être passivables. Longtemps, les produits les plus utilisés ont été les anions nitrite et chromate. Ils sont introduits dans les eaux à traiter sous forme de sels, généralement de sodium ou de potassium.



**Figure I.11** Schéma d'inhibiteurs.

Ces inhibiteurs anodiques sont dits « passivants », la formation de la couche passive ne nécessitant pas la présence d'oxygène dissous. Mais il existe aussi d'autres inhibiteurs anodiques

dont le mode d'action pour former des films passifs nécessite souvent la présence d'oxygène dissous, contrairement aux nitrites et aux chromates.

Les chromates sont efficaces dans une large gamme de pH (5 à 10). Les nitrites sont plus efficaces à pH compris entre 8 et 9.

La limitation de la teneur en chrome VI par l'arrêté relatif aux installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air soumises à autorisation au titre de la rubrique 2921, ainsi que par l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, a impliqué l'arrêt total de l'utilisation des chromates dans les circuits de refroidissement semi-ouverts.

Ces inhibiteurs donnent d'excellents résultats pour la protection du fer et de ses alliages : acier, fonte. Leur efficacité pour la protection des alliages de cuivre ou d'aluminium est pratiquement nulle. Il faudra donc ajouter des inhibiteurs spécifiques (notamment organiques) en cas de présence de ces matériaux dans le système à protéger.

#### **I.4.1.2. Autres inhibiteurs anodiques :**

Ils réagissent également à l'anode pour former des films protecteurs :

- Les silicates ;
- Les phosphates ;
- Les tannates ;
- Les borates ;
- Les molybdates, etc.

#### **I.4.1.3. Inhibiteurs cathodiques :**

La plupart du temps, le mode d'action des inhibiteurs cathodiques est basé sur une précipitation à la surface cathodique d'un composé minéral, sous l'action des ions  $\text{OH}^-$  produits par réduction de l'oxygène dissous lors de la réaction cathodique de corrosion.

Cette précipitation a pour effet de freiner la réaction cathodique et donc la corrosion.

Par ailleurs, les ions hydrogencarbonates présents dans l'eau peuvent être considérés comme des inhibiteurs cathodiques si l'alcalinisation au voisinage de la cathode par production d'ions  $\text{OH}^-$  permet la précipitation de carbonate de calcium et la formation d'une couche protectrice fine et bien cristallisée selon les réactions :

Cependant, en pratique, cette réaction est difficile à contrôler et on préfère ajouter un inhibiteur cathodique. Le plus utilisé est l'ion zinc, introduit généralement sous forme de chlorure ou de sulfate de zinc. La précipitation cathodique se fait sous forme d'un hydroxyde plus ou moins complexe. Les inhibiteurs cathodiques, du fait de leur mode d'action, sont plus sûrs que les inhibiteurs anodiques, car ils ne risquent pas de favoriser de corrosion localisée, même en cas de sous-dosage.

#### **I.4.1.4. Inhibiteurs mixtes :**

Ces types d'inhibiteurs de corrosion forment également un film à la surface du métal. Ils agissent pour réduire les réactions cationiques ainsi que les réactions anioniques. Cela se fait via la formation d'un précipité à la surface du métal.

Des exemples d'inhibiteurs mixtes incluent les silicates et les phosphates qui sont utilisés comme adoucisseurs d'eau pour arrêter la rouille de l'eau.

#### **I.4.2. Inhibiteurs organiques agissant par formation de barrière protectrice**

L'action inhibitrice des composés organiques est généralement indépendante des processus anodiques et cathodiques de corrosion.

Elle est liée à la formation d'une barrière plus ou moins continue, mais d'épaisseur finie, qui empêche l'accès de la solution au métal. Ce film doit être formé par l'adsorption de substances organiques polaires sur la surface du métal.

Les espèces adsorbées physiquement, c'est-à-dire par des forces électrostatiques ou de Van der Waals, se condensent rapidement sur le métal. Mais elles sont facilement enlevées de la surface, par exemple, par immersion dans une solution sans inhibiteurs.

Celles qui sont chimisorbées, donc avec répartition ou transfert de charges entre la molécule organique et les atomes du métal, se condensent plus lentement en dégageant une forte chaleur d'adsorption. Dans ce cas, l'adsorption est spécifique pour certains métaux et n'est pas tout à fait réversible. C'est aussi le cas le plus favorable pour l'inhibition.

En général, les composés organiques qui montrent des propriétés inhibitrices contiennent des atomes d'azote (N), de soufre (S) ou d'oxygène (O). Les électrons libres de ces atomes permettent la chimisorption et donc la formation d'une liaison chimique entre le métal et la molécule considérée.

Il a été observé également que les produits de la corrosion (oxydes), au cours de leur création, intervenaient dans l'élaboration du film protecteur (formation de complexes ou quasi-complexes)

et renforçaient son pouvoir inhibiteur dans le temps. Cela est le cas, particulièrement, des inhibiteurs contenant des polyamines filmantes.

Enfin, les inhibiteurs organiques sont souvent efficaces en milieu alcalin et leur emploi ne nécessite pas de régulation du pH. Cette régulation n'est, en fait, nécessaire que pour réduire le pouvoir entartrant de l'eau et permettre la présence de sels de calcium entartrants à des concentrations plus élevées.

#### **I.4. Contributions sur l'utilisation des médicaments comme inhibiteurs de corrosion apportées à la littérature :**

En raison de la toxicité des inhibiteurs de corrosion largement utilisés et des réglementations environnementales de plus en plus strictes autour de leur utilisation et de leur élimination, il existe un grand intérêt à remplacer les inhibiteurs nocifs par des alternatives non dangereuses. Au cours des deux dernières décennies, une recherche et un développement approfondis ont conduit à la découverte de nouvelles classes d'inhibiteurs de corrosion, et l'importance de l'utilisation de plusieurs médicaments comme inhibiteurs de corrosion a augmenté.

Les inhibiteurs chimiques jouent un rôle important dans la protection et stratégies d'atténuation pour retarder la corrosion [29].

Les inhibiteurs les plus efficaces sont les composés organiques qui ont p des liaisons, des hétéroatomes (P, S, N et O) et des composés inorganiques, comme le chromate, le dichromate, le nitrite, etc. [30–35]. Cependant, l'utilisation de ces composés a été remise en question ces derniers temps, en raison de nombreux effets négatifs qu'ils ont causés dans l'environnement

[36]. Ainsi, le développement des nouveaux inhibiteurs de corrosion de source naturelle et de type non toxique, a été considérée comme plus important et souhaitable [37]. En raison de leur origine naturelle [38–40], ainsi que leurs caractéristiques non toxiques [41] et négligeables impacts négatifs sur le milieu aquatique [42], les médicaments chimiques semblent être des candidats idéaux pour remplacer les inhibiteurs de corrosion toxiques.

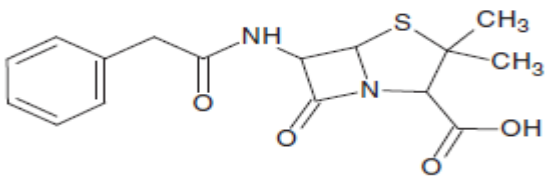
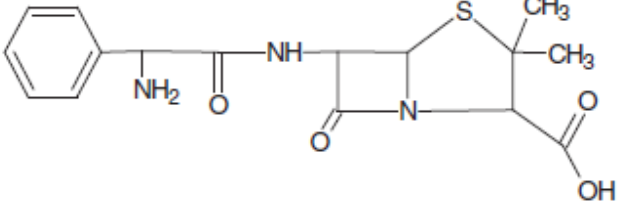
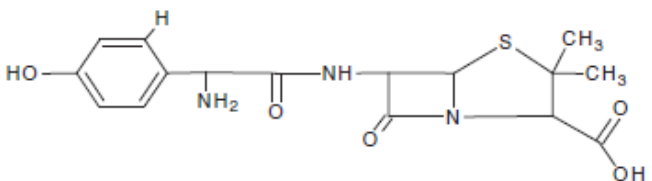
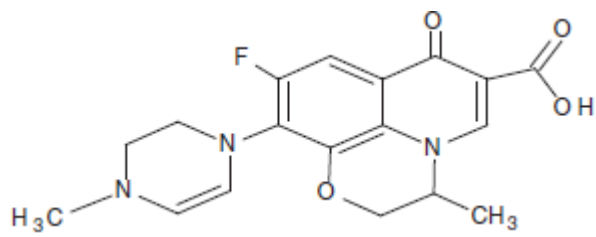
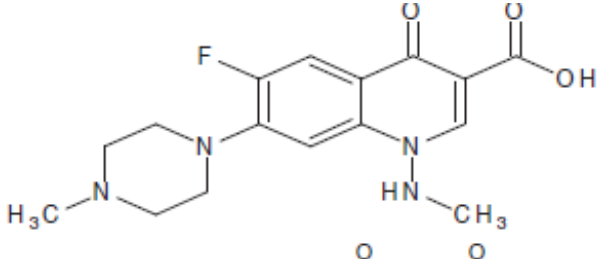
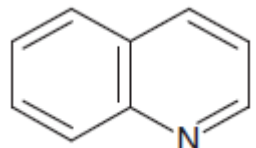
L'inclinaison vers le développement d'inhibiteurs de corrosion respectueux de l'environnement recoupe plusieurs objectifs de la recherche pharmaceutique, dont l'un est de découvrir ou de développer des molécules avec des propriétés biologiques activité.

Les efforts pour atteindre cet objectif sont fortement motivés par la notion de similarité moléculaire car en général des molécules similaires ont tendance à se comporter de la même manière [43,44].



Dans le **tableau I.1** sont présentées l'utilisation de médicaments comme inhibiteurs de corrosion de divers métaux au cours des dernières années.

**Tableau I.1** : Médicaments comme inhibiteurs de corrosion.

Médicament (Corrosion inhibiteur)	Structure moléculaire	Type d'inhibiteur	Milieu de corrosion	Type de métal
Penicillin G [45]		Adsorption	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acier doux
Ampicillin [46,47]		Adsorption	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HCl	Aluminium Acier doux
Amoxicillin [46,48]		Adsorption	HCl	Alliage Aluminium AA2024-T3
Ofloxacin [49,50]		Mixe	HCl	Acier doux
Amifloxacin [49]		Mixe	NaCl	Acier doux
Quinoline [51]		Mixe	HCl	Acier doux

# Chapitre II

## MATERIEL ET METHODES

## Chapitre II. Matériels et Méthodes

### II.1. Introduction

Le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'acier en milieu acide sans et avec addition des médicaments (Amoxicilline et Doliprane) sera évalué en utilisant différentes techniques et différentes masses (100, 200, 300, et 400 ppm).

Lors de cette étude expérimentale, le système électrochimique métal / solution considérée est composé par : - une électrode d'acier, - un milieu acide.

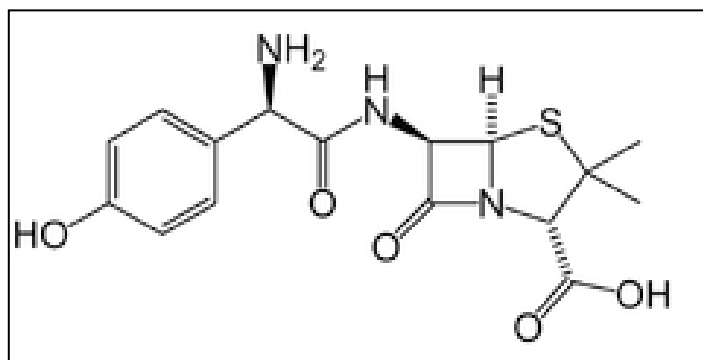
Nous avons étudié l'effet de deux médicaments substitués sur le taux d'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu NaCl 1M. La détermination de la vitesse de corrosion d'un système électrochimique métal / solution peut être obtenue par plusieurs méthodes classiquement utilisées par les expérimentateurs.

Nous avons utilisé, la technique du potentiel de circuit ouvert, l'extrapolation des droites de Tafel à partir du tracé des courbes intensité- potentiel et enfin les diagrammes d'impédance de type Nyquist.

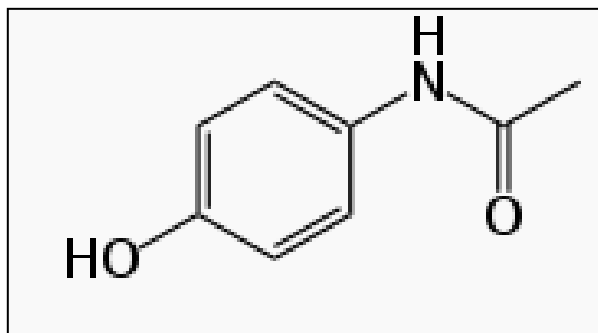
### II.2. Produits et matériels

#### II.2.1. Produits

- Chlorure de sodium NaCl 1M ; solubilité dans l'eau à 20 °C : 358.5 g/l.
- Amoxicilline ( $C_{16}H_{19}N_3O_5S$ ) (Acide 7-[2-amino-2-(4-hydroxyphényl)-acétyl]amino-3,3-diméthyl-6-oxo-2-thia-5-azabicyclo[3.2.0]heptane-4-carboxylique) ; solubilité dans l'eau à 25 °C : 3,43 g/L.



- Doliprane (Paracétamol) ( $C_8H_9NO_2$ ) (N-(4-hydroxyphényl) acétamide) ; solubilité dans l'eau à 20 °C : 14 g/L.



- Oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ).
- Acétone.
- Chlorure de Potassium (KCl) ; solubilité dans l'eau à 20 °C : 6,34 g/l.

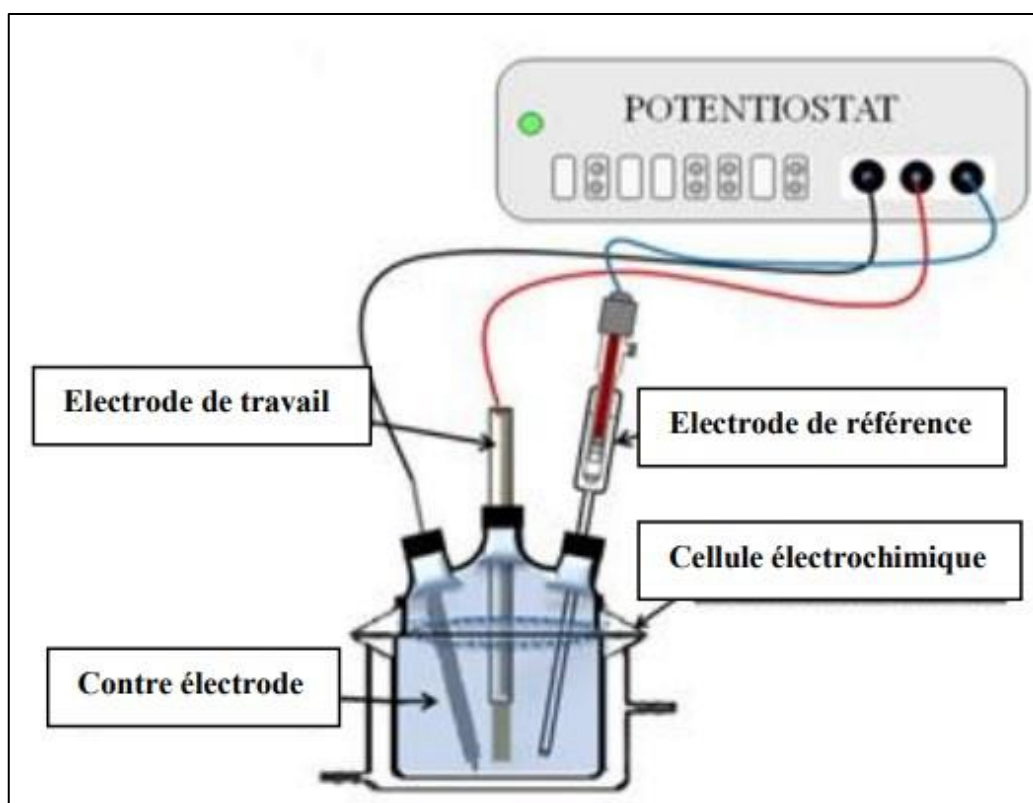
## II.2.2. Matérielles

### II.2.2.1. Cellule électrochimique

Une cellule électrochimique est un dispositif qui peut générer de l'énergie électrique à partir des réactions chimiques qui s'y produisent, ou utiliser l'énergie électrique qui lui est fournie pour faciliter les réactions chimiques. Ces dispositifs sont capables de convertir l'énergie chimique en énergie électrique, ou vice versa.

Les expériences électrochimiques sont effectuées dans une cellule en pyrex pour les mesures stationnaires et pour l'impédance électrochimique, équipée d'un montage conventionnel à trois électrodes, électrode de travail (ET), électrode auxiliaire (CE) et une électrode au calomel Hg / Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> / KCl saturé (ECS) comme électrode de référence. L'électrolyte est une solution saline maintenue à 20°C.

Électrode de travail, en forme de disque. Trois électrodes sont connectées directement à un potentiostat - un galvanostat de type **VOLTALAB PGZ402** contrôlé par un ordinateur (VoltaLab) qui enregistre les données.



**Figure II.1 :** Schéma du montage et d'une cellule d'électrolyse.

### II.2.2.2. Electrode de travail (ET) :

Nous avons utilisé un substrat en acier découpé en forme cylindrique, qui a ensuite été soudé à un fil conducteur puis inséré dans un cylindre en téflon. La partie de l'électrode qui entre en contact avec l'électrolyte se présente sous la forme d'un disque d'une surface de  $0,745 \text{ cm}^2$ .

Afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles, l'électrode de travail est prétraitée avant chaque test. Avant chaque test, l'électrode de travail est prétraitée, consistant en :

- ✓ Polissage mécanique avec des papiers abrasifs P1200 et P2000 de différentes épaisseurs, suivi d'un rinçage à l'eau distillée.
- ✓ Polissage à la pâte d'aluminium après rinçage à l'eau distillée
- ✓ Dégraisser à l'acétone pendant quelques minutes.

### II.2.2.3. Electrode auxiliaire (CE) :

Permet au courant de circuler dans un circuit, souvent constitué de matériaux électrochimiquement inertes tels que le platine ou le carbone. Le rapport de la surface cathodique à la surface anodique est d'une grande importance, il doit être supérieur ou au moins égal à  $1 \text{ cm}^2$ . L'électrode utilisée dans notre travail est une électrode en graphite.

#### II.2.2.4. Electrode de référence (ER) :

L'électrode de référence idéale a un potentiel constant et stable dans le temps, connu avec précision et totalement indépendant de la composition de la solution électrolytique. Nous avons utilisé une électrode au calomel saturé (SCE) comme électrode de référence :  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}(\text{sat})$ ,  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl} = +0,245 \text{ V}/\text{ENH}$ . Il s'agit d'une électrode au mercure (Hg) recouverte de calomel ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), difficilement soluble au contact d'une solution saturée de KCl.

### II.3. Méthodes

#### II.3.1. Potentiel en circuit ouvert $E_{\text{corr}} = f(\text{temps})$

La technique électrochimique la plus simple est le potentiel de circuit ouvert. Elle précède généralement toutes les autres techniques. Il est utilisé pour atteindre l'équilibre électrochimique d'un système donné. La différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence est mesurée jusqu'à ce qu'un état stable soit atteint. Le potentiel stationnaire d'un système électrochimique est appelé potentiel de corrosion. Le potentiel de corrosion est le potentiel que l'électrode prend spontanément et se corrode lorsque la vitesse de réaction cathodique devient égale à la vitesse de réaction anodique. Cette technique est utilisée pour étudier la formation de couches d'oxydes stables.

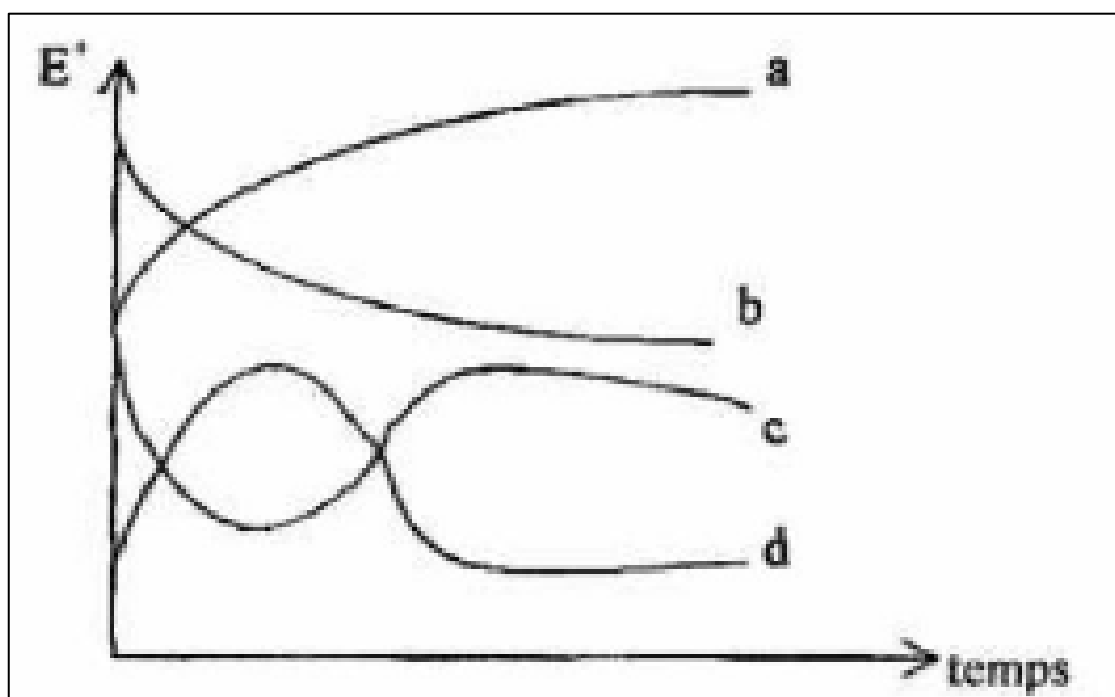


Figure II.2 : Variation du potentiel libre à circuit ouvert en fonction du temps [52].

### II.3.2. Courbe de polarisation $i = f(E)$

La technique de polarisation potentiodynamique est l'une des techniques électrochimiques les plus importantes pour comprendre le comportement à la corrosion d'un matériau dans un électrolyte spécifique. Cette technique est rapide, précise et reproductible. Comme son nom l'indique, cette technique est réalisée en appliquant un potentiel à l'électrode de travail et en la déplaçant dans l'intervalle de potentiels souhaitée. L'intervalle de potentiel est choisi en fonction de l'information que l'on cherche à extraire. Il existe deux méthodes expérimentales pour la détermination de la vitesse de corrosion [53-54] :

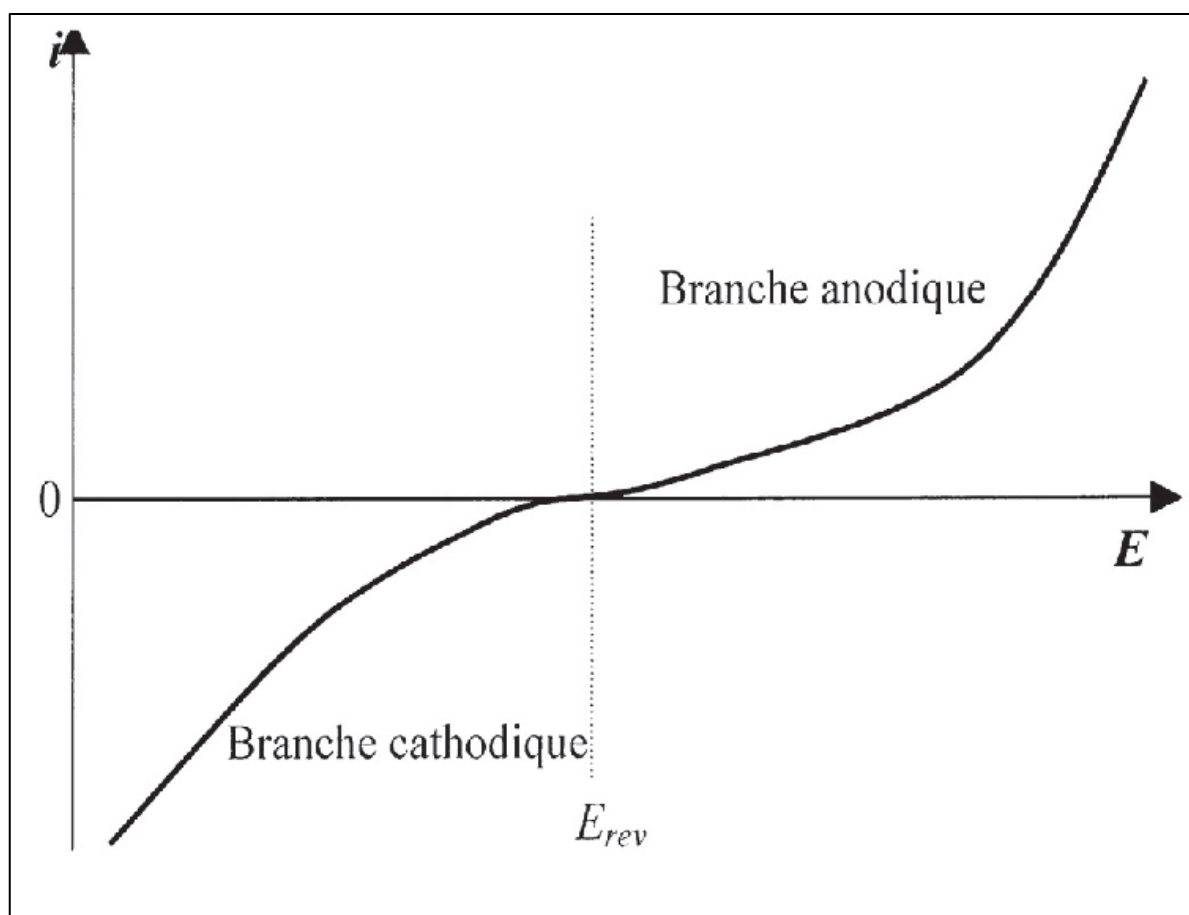
1. La mesure de la résistance de polarisation en faisant un balayage de  $\pm 20$  mV par rapport au potentiel de corrosion, et
2. L'extrapolation des droites de Tafel qui elle nécessite un balayage de quelques centaines de mV par rapport au potentiel de corrosion.

L'extrapolation des droites de Tafel vers le potentiel de corrosion donne la valeur du courant de corrosion  $i_{corr}$  [55]. Son extrapolation ainsi que toutes les valeurs extraites pendant l'analyse. Une fois le balayage terminé, les pentes des deux parties linéaires de la courbe sont tracées. Le point de croisement de ces deux courbes est associé à deux valeurs importantes ; le potentiel de corrosion, c'est-à-dire la même valeur qui est obtenue pendant la technique de potentiel à circuit ouvert, et le courant de corrosion.

Les valeurs de densité de courant de corrosion ( $i_{corr}$ ), le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ), les pentes de Tafel cathodique et anodique ( $b_c$  et  $b_a$ ) et l'efficacité d'inhibition  $\eta(\%)$  pour différentes concentrations en milieu NaCl sont reportées. L'efficacité inhibitrice est définie comme suit :

$$\eta(\%) = \frac{i_{corr} - i_{corr(inh)}}{i_{corr}} \times 100$$

Où  $i_{corr}$  et  $i_{corr(inh)}$  sont les valeurs de densité du courant de corrosion de l'acier déterminées par extrapolation des droites cathodiques de Tafel, après immersion en milieu **acide** respectivement sans et avec addition de l'inhibiteur.



**Figure II.3 :** Exemple d'une courbe de polarisation

### II.3.3. La spectroscopie d'impédance électrochimique

La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) détermine les propriétés diélectriques des matériaux. Ceci est mesuré par l'interaction du champ externe avec le moment dipolaire d'un échantillon particulier, généralement indiqué par la permittivité.

Il est également considéré comme une technique expérimentale qui décrit les systèmes électrochimiques. Cette méthode mesure l'impédance du système sur une série de fréquences. Ainsi, une réponse en fréquence impliquant des propriétés de dissipation et un stockage d'énergie est décrite. La plupart du temps, les données recueillies par spectroscopie d'impédance électrochimique sont transmises graphiquement dans des tracés de Nyquist et des tracés de Bode.

La spectroscopie d'impédance électrochimique est également connue sous le nom de spectroscopie diélectrique.

Son principe consiste à superposer au potentiel de l'électrode une modulation de potentiel sinusoïdale de faible amplitude et à suivre la réponse en courant pour différentes fréquences du signal perturbateur. La réponse en courant est également sinusoïdale, superposée à un courant



stationnaire mais déphasée d'un angle  $\emptyset$  par rapport au potentiel [56]. Inversement, un courant peut être imposé et le potentiel enregistré.

L'impédance  $Z(\omega)$  est définie comme étant le rapport entre le signal de perturbation et la réponse associée :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} = \frac{|\Delta E|e^{j\omega t}}{|\Delta I|e^{j(\omega t - \emptyset)}} = |Z|e^{j\emptyset}$$

L'impédance  $Z(\omega)$  est un nombre complexe caractérisé par son module  $|Z|$  et sa phase  $\emptyset$ . Il peut être écrit sous la forme :

$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j \emptyset(\omega)}$$

$$\text{Ou } Z(\omega) = Z_{\text{re}}(\omega) + jZ_{\text{im}}(\omega)$$

$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j \emptyset(\omega)}$$

$$Z(\omega) = Z_{\text{re}}(\omega) + jZ_{\text{im}}(\omega)$$

Avec :  $j = \sqrt{-1}$

$|Z|$  étant le module de l'impédance,

$\emptyset$  L'angle de déphasage,

$Z_{\text{re}}$  Partie réelle de l'impédance,

$Z_{\text{im}}$  Partie imaginaire de l'impédance

Plusieurs types de diagrammes sont utilisés pour représenter l'impédance électrochimique  $Z(\omega)$ . Le diagramme de Nyquist est obtenu en traçant dans le plan complexe l'impédance graduée en pulsation  $\omega$  ou en fréquence. Les électrochimistes, à la différence des électriciens, portent l'opposé de la partie imaginaire de l'impédance  $-Z_{\text{im}}(\omega)$  en fonction de sa partie réelle  $Z_{\text{re}}(\omega)$ . Les diagrammes de Bode (module et phase) sont eux obtenus en traçant respectivement  $\log |Z(\omega)|$  et la phase en fonction de  $\log(\omega)$  ou  $\log(f)$ . Ces deux modes de représentation de l'impédance donnent des visualisations des résultats différentes mais restent complémentaires. L'identification de certains phénomènes caractéristiques se déroulant à l'interface électrode de travail / électrolyte

sera facilitée par la représentation de Nyquist, qui consiste à représenter la partie imaginaire de l'impédance  $-Z_{im}(\omega)$  en fonction de sa partie réelle  $Z_{re}(\omega)$  et qui permet de déterminer des paramètres tels que la résistance de l'électrolyte ( $R_e$ ), la résistance de transfert de charge ( $R_t$ ) et la capacité de double couche ( $C_{dc}$ ) [57-58].

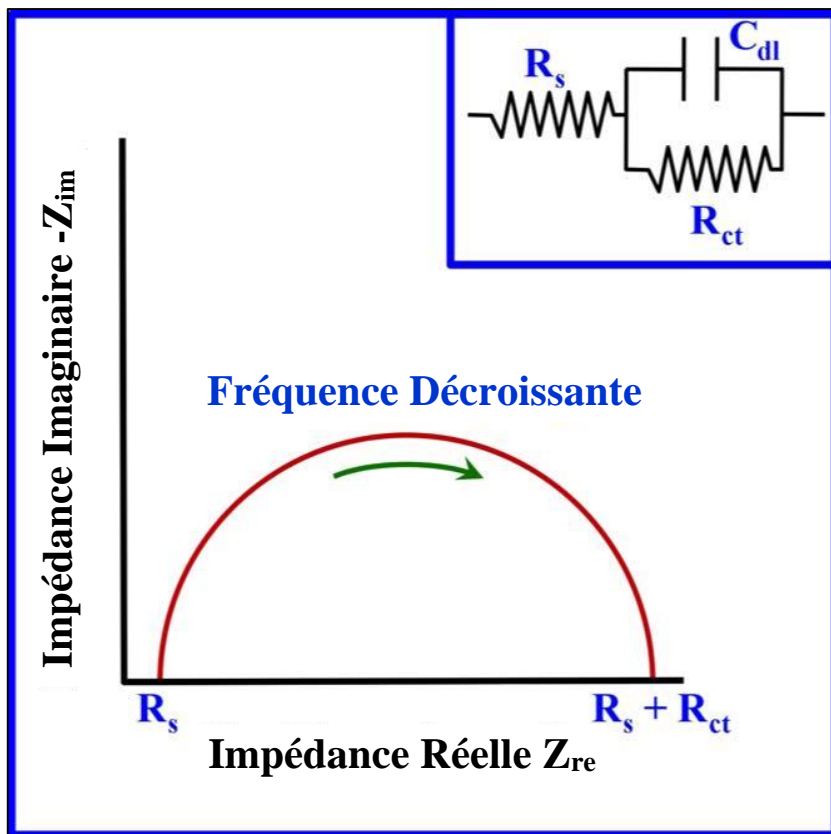


Figure II.4: Courbe théorique de l'impédance électrochimique.

Chapitre III

RÉSULTATS ET  
DISCUSSION

## Chapitre III. Résultats et Discussion

### III.1. Introduction

Les méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion englobent à la fois des approches électrochimiques et non électrochimiques. Les tests électrochimiques fournissent des informations précieuses sur le mécanisme d'action de l'inhibiteur et, lorsqu'ils sont correctement interprétés, permettent d'évaluer la vitesse des processus de corrosion au moment de la mesure. Ces méthodes peuvent être catégorisées en deux groupes distincts : les méthodes stationnaires et les méthodes transitoires non stationnaires. La présente recherche se concentre exclusivement sur les méthodes stationnaires, telles que le suivi du potentiel libre au fil du temps, la polarisation linéaire et la spectroscopie d'impédance.

Notre objectif était d'évaluer l'efficacité inhibitrice des composés non toxiques en utilisant des méthodes électrochimiques stationnaires, telles que les courbes de polarisation, ainsi que des méthodes transitoires, notamment les mesures d'impédance électrochimique.

Le milieu corrosif utilisé dans cette étude était une solution de chlorure de sodium. Nous présentons ici les résultats pertinents concernant l'impact de la solution de chlorure et les effets des médicaments Amoxicilline et Doliprane sur la protection du matériau.

### III.2. Comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion

#### III.2.1. Potentiel à l'abandon

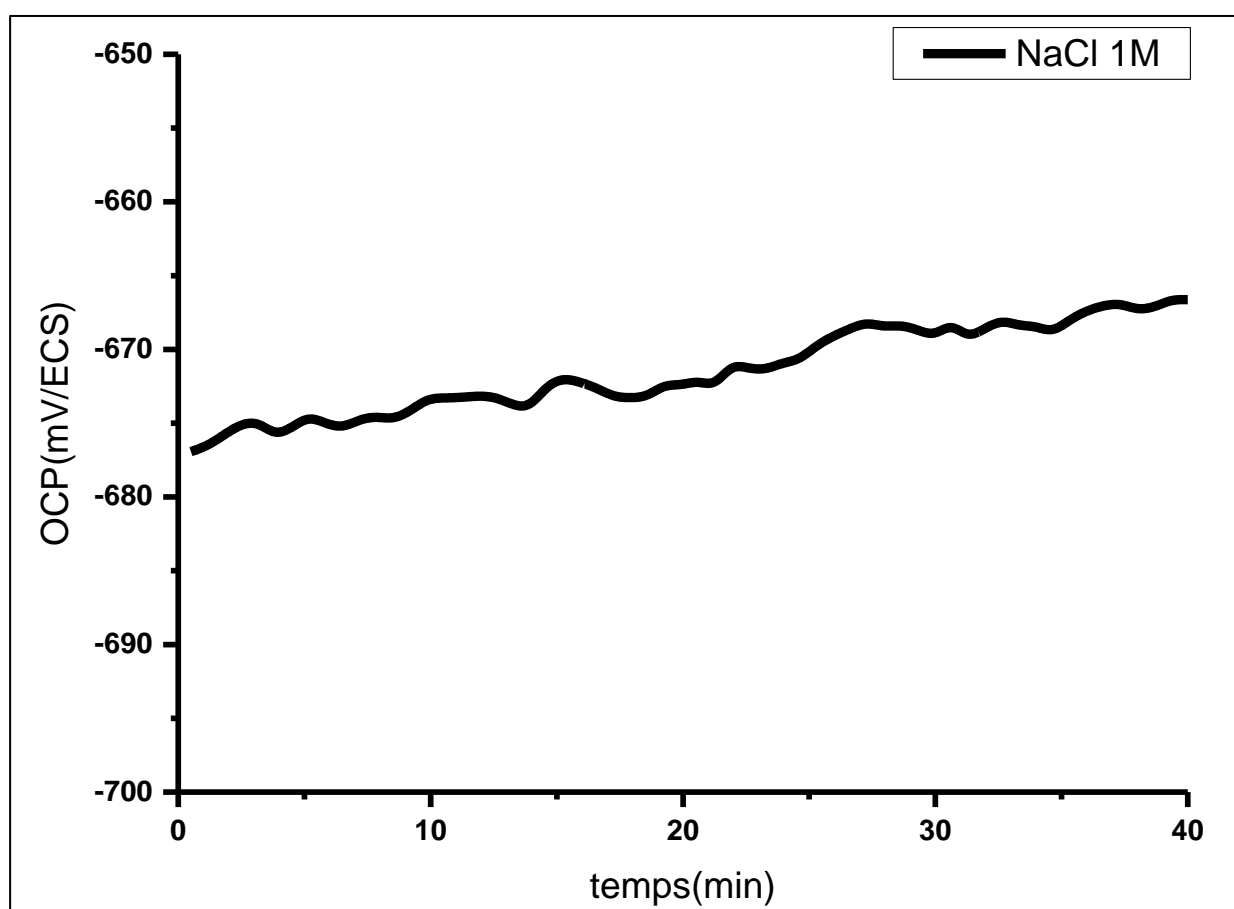
L'évolution temporelle des potentiels de circuit ouvert (OCP) offre une première indication du comportement de la surface dans un environnement corrosif, que ce soit la corrosion, la formation d'une couche passive, etc. De plus, elle permet de déterminer le temps nécessaire pour atteindre un état stable, ce qui est essentiel pour les tracés potentiodynamiques et les spectres d'impédance [59]. Cette mesure est effectuée en enregistrant la différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence.

De plus, c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié. Il s'agit d'informations issues de la thermodynamique qui ne donnent donc aucune indication sur la vitesse effective de dissolution dans les domaines de la corrosion ou de la passivation [60].

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

Au début de l'expérience, à  $t = 0$  min, le potentiel mesuré pour l'électrode en acier immergée dans la solution de NaCl était d'environ  $-677$  mV/ECS. Au fur et à mesure de l'avancement de l'expérience, nous avons observé une légère augmentation du potentiel, après 40 minutes, le potentiel s'est stabilisé autour de  $-668$  mV/ECS.

D'après cette courbe, la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire pour le type du métal sous étude est à peu près 40min.



**Figure III.1** : Potentiel libre en fonction du temps d'une électrode d'acier dans NaCl 1M.

### III.2.2. La courbe de polarisation

Les mesures de potentiel et courant de corrosion sont complétées par des tracés intensité - courbe de potentiel. Ces courbes sont obtenues en faisant varier en continu le potentiel appliqué à l'électrode de travail du domaine cathodique au domaine anodique soit de +/- 200 mV versus une valeur stable du potentiel (OCP). La vitesse de balayage du potentiel doit impérativement 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  $5 \text{ mV.s}^{-1}$

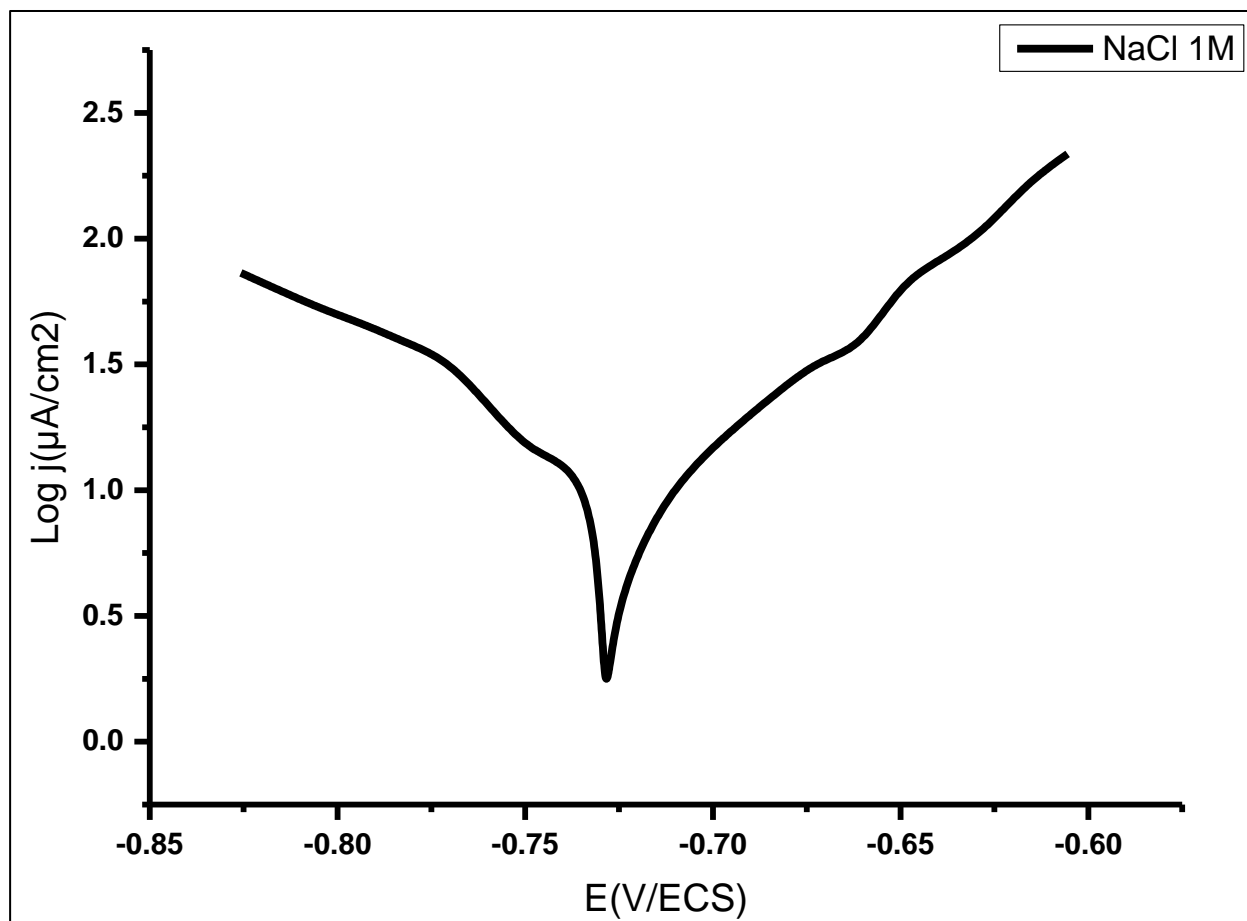
Le tracé des courbes de polarisation en échelle logarithmique laisse apparaître, loin de l'équilibre, l'existence de deux branches linéaires, dites droites de Tafel (**Figure.III.3**).

Les courbes de polarisation de Tafel sont utilisées pour analyser le comportement électrochimique de l'acier dans une solution corrosive. Les paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel de l'acier dans une solution de NaCl 1M sont regroupés dans le **Tableau III.1**.

D'après ce tableau, le potentiel de corrosion est  $-721.6 \text{ mV}$  par rapport à l'électrode de référence. Ce potentiel indique la réactivité de l'acier dans la solution de NaCl. Le courant de corrosion vaut  $14.1 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$

Les pentes de Tafel anodique ( $B_a$ ) et cathodique ( $B_c$ ) indiquent respectivement des taux de corrosion anodique et cathodique pour l'acier. Une valeur positive de  $B_a$  indique une tendance à la corrosion anodique, tandis qu'une valeur négative de  $B_c$  indique une tendance à la corrosion cathodique.

Globalement, les résultats montrent que l'acier présente une résistance à la corrosion acceptable dans la solution de NaCl. Cependant, il est important de noter que ces conclusions sont basées sur les données fournies, et des études plus approfondies peuvent être nécessaires pour une évaluation plus précise de la corrosion de l'acier dans différentes conditions expérimentales.



**Figure III.2 :** la courbe de Tafel de l'électrode de carbone dans NaCl 1M en absence d'additifs.

**Tableau III.1 :** Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en absence d'additifs.

	E(corr.) (mV/ECS)	j (corr.) (μA/cm <sup>2</sup> )	Ba (mV)	Bc (mV)	Corrosion (μA/ans)
NaCl 1M	-721.6	14.1	106.1	-159.7	164.6

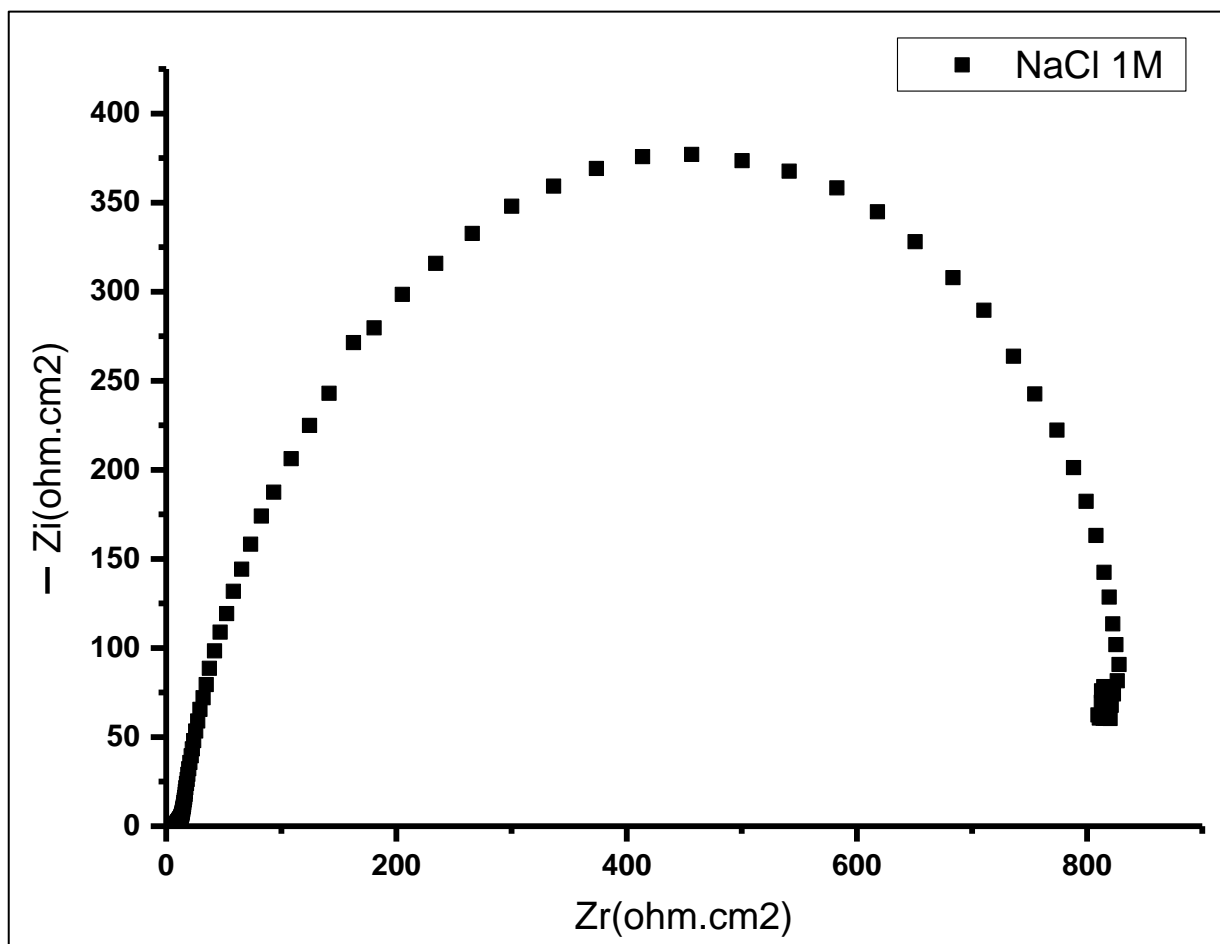
### III.2.3. La Spectroscopie d'impédance électrochimique

La spectroscopie d'impédance électrochimique permet d'analyser le comportement électrochimique d'un système en mesurant l'impédance à différentes fréquences. Les résultats des mesures SIE sont représentés par la composante réelle ( $Z_r$ ) sur l'axe des abscisses et la composante

imaginaire ( $Z_i$ ) sur l'axe des ordonnées donnés par la représentation de Nyquist après 40 min d'immersion, dans la solution de NaCl 1M (**Figure III.3**). Les valeurs d'impédance sont représentées sur la figure (**Figure III.3**).

Le demi-cercle observé sur le diagramme de Nyquist indique la présence d'une interface électrochimique réactive entre l'acier et la solution de NaCl. Le demi-cercle observé pour les hautes fréquences, le demi-cercle reflète la capacité  $I$  ( $C_{dc}$ ) de la double couche électrique en parallèle avec une résistance de transfert de charge  $R_t$ . Notons que les diamètres de la boucle capacitive représentent la résistance de transfert de charge ( $R_{tc}$ ).

Dans l'ensemble, les données de la SIE indiquent la présence d'éléments à la fois résistifs et capacitifs dans le système électrochimique. La forme du demi-cercle observée suggère un comportement complexe de l'interface, impliquant des processus de transfert de charge des effets capacitifs.



**Figure III.3** : Diagramme de Nyquist pour l'électrode d'acier dans NaCl 1M.



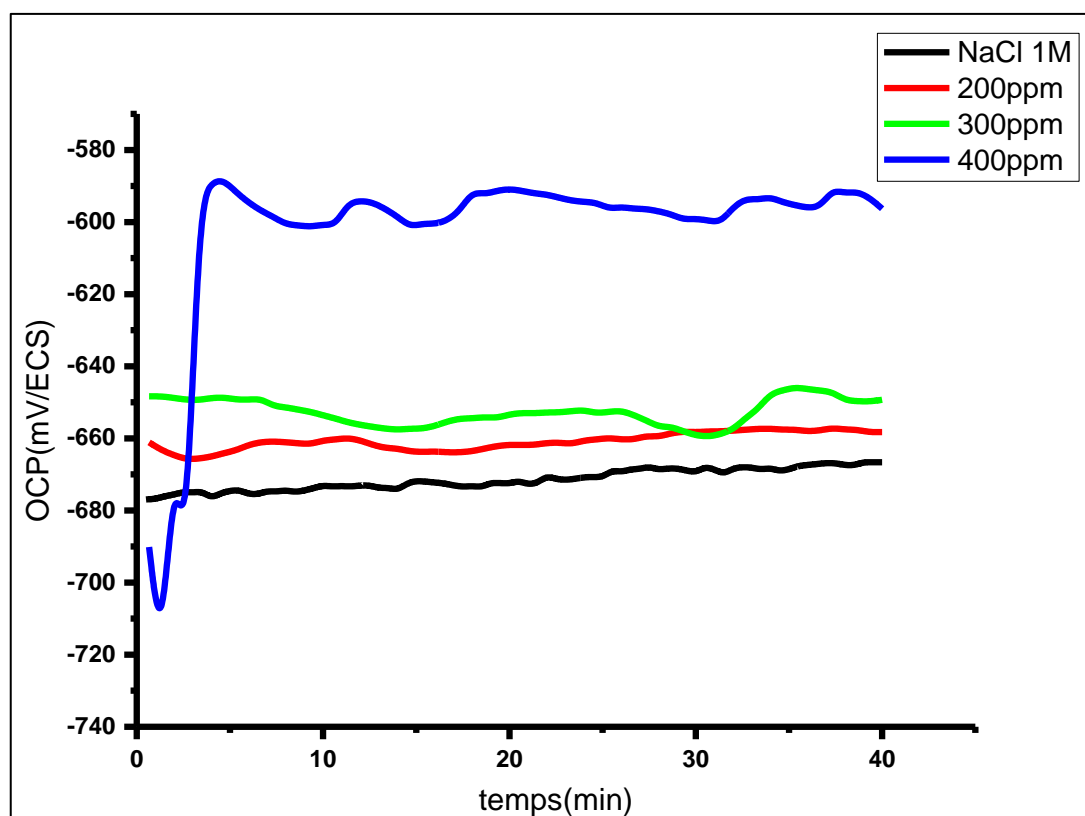
### III.3. L'effet de l'Amoxicilline sur le comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion

#### III.3.1. Potentiel à l'abandon

L'évolution du potentiel libre en fonction du temps (40 min d'immersion) de l'électrode de carbone, à la température ambiante pour différentes concentrations de l'amoxicilline. En utilisant différentes concentrations de l'amoxicilline, notamment 200 ppm, 300 ppm et 400 ppm, la solution NaCl 1M est utilisée pour la comparaison (**Figure III.4**).

L'observation de la courbe montre que l'ajout d'amoxicilline à la solution de NaCl peut affecter le comportement de l'acier vis-à-vis de la corrosion. Les concentrations de 200 ppm et 300 ppm semblent avoir un effet négligeable sur le potentiel d'abandon de l'acier, car ils restent stables et proches des valeurs initiales. En revanche, la concentration de 400 ppm montre une augmentation significative du potentiel, en se stabilisant à une valeur plus élevée que les autres concentrations. Les valeurs des potentiels à l'abandon des différents tests sont regroupées dans le Tableau III.2.

Ces résultats suggèrent que l'amoxicilline peut jouer un rôle d'inhibiteur de corrosion à des concentrations plus élevées, réduisant ainsi la tendance de l'acier à corroder dans la solution de NaCl.



**Figure III.4** : Effet de la concentration de l'Amoxicilline sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'acier dans NaCl.

**Tableau III.2 :** Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence de l'Amoxicilline.

	Concentration	OCP (mV/ECS)
NaCl	1M	-666.62
Amoxicilline.	200ppm	-658.20
	300ppm	-649.18
	400ppm	-596.56

### III.3.2. Les courbes de polarisation

La Figure III.5 regroupe les courbes de Tafel d'une électrode d'acier, dans NaCl en absence et en présence de différentes concentrations d'amoxicilline.

D'après ces courbes, l'ajout de l'amoxicilline et à la solution de NaCl 1M, a causé un fort décalage des branches cathodiques et anodiques vers le bas, entraînant ainsi, une forte diminution des densités des courants anodique et cathodique; cela peut être attribué à l'adsorption des composants organiques présents dans l'amoxicilline sur les sites actifs de la surface de l'échantillon, ce qui retarde à la fois la dissolution anodique du métal et le déchargement cathodique, par conséquent le processus de corrosion est ralenti.

L'interprétation des courbes de polarisation dans la forme logarithmique par régression non-linéaire nous a permis d'obtenir les paramètres cinétiques du processus de corrosion et les valeurs sont présentées dans le **Tableau III.3**.

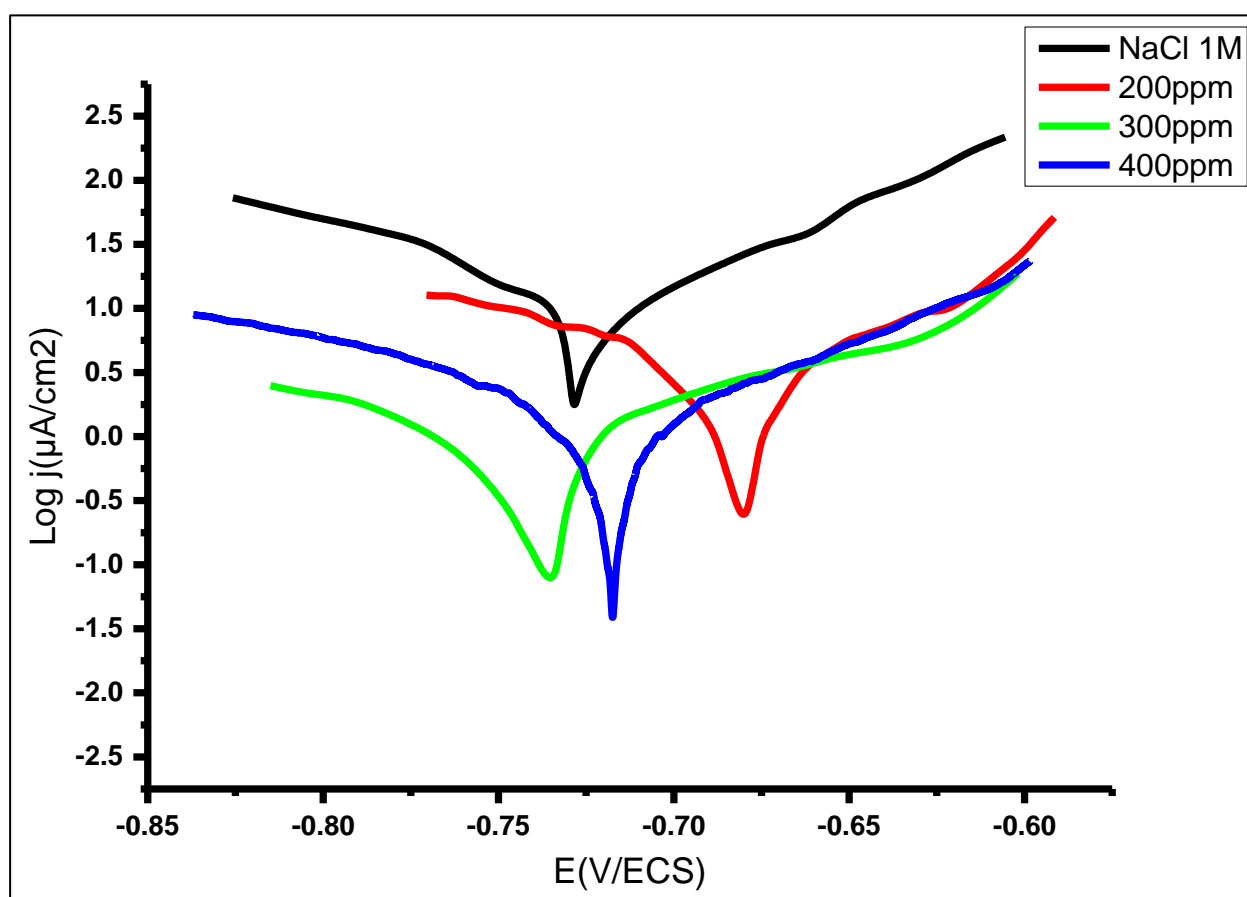
L'interprétation de ces données suggère que l'ajout d'inhibiteurs à différentes concentrations a un effet sur les courbes de polarisation de Tafel, indiquant une modification du comportement de l'acier vis-à-vis de la corrosion.

Sans inhibiteur, la courbe montre un courant de corrosion relativement élevé, ce qui indique une tendance à la corrosion plus importante. En revanche, avec l'inhibiteur à 200 ppm, 300 ppm et 400 ppm, on observe une réduction significative du courant de corrosion, indiquant une amélioration de la résistance à la corrosion de l'acier et une résistance de polarisation est également plus élevée avec les inhibiteurs, ce qui confirme leur efficacité pour ralentir les réactions de corrosion.

Les pentes anodiques (Ba) et cathodiques (Bc) indiquent les cinétiques de réaction respectives aux électrodes. Les valeurs observées avec les inhibiteurs suggèrent une variation de la cinétique des réactions cathodiques et anodiques.

Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique des inhibiteurs d'amoxicilline sur la résistance à la corrosion de l'acier dans la solution de NaCl. Les concentrations plus élevées d'inhibiteurs semblent offrir une meilleure protection contre la corrosion, avec des courants de corrosion plus faibles.

Le potentiel de corrosion n'a pas été modifié considérablement, il est rapporté dans la littérature que, lorsque la différence entre le potentiel de corrosion et celui de la solution témoin, est moins de 85mV, l'inhibiteur peut être classé comme inhibiteur mixte [61,62], ce qui suggère que l'amoxicilline, agit comme un inhibiteur de type mixte.



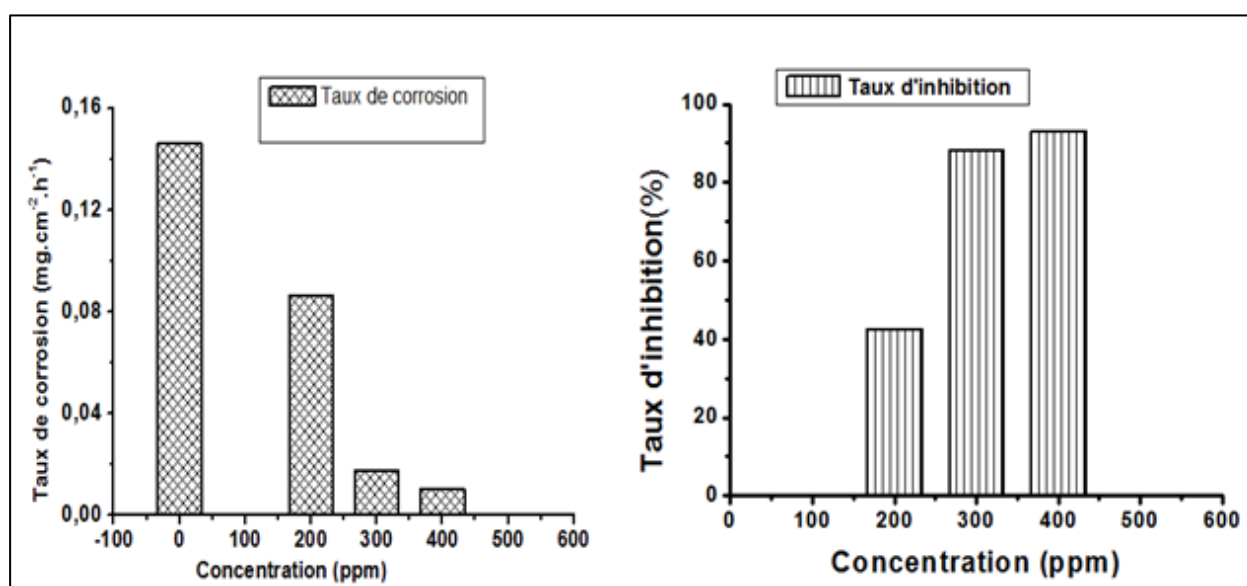
**Figure III.5:** L'effet de l'ajout de l'Amoxicilline à différentes concentrations sur les courbes de polarisations d'une électrode d'acier dans NaCl.

Le **Tableau III.3** et la **Figure III.6**, montrent que la vitesse de corrosion de l'échantillon a été significativement réduite avec l'addition de l'Amoxicilline et que l'efficacité inhibitrice augmente

avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur. La concentration de 400 ppm a été prise comme meilleure concentration avec une efficacité de 92.97%, et au-delà de cette concentration.

**Tableau III.3 :** Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence Amoxicilline.

	Concentration	$E_{(corr)}$ (mV/ECS)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Ba (mV)	Bc (mV)	Vitesse de Corrosion ( $\mu\text{m}/\text{an}$ )	Taux d'inhibition ( $\eta$ %)
NaCl	1M	-721.6	14.1	106.1	-159.7	164.6	/
Amoxicilline	200ppm	-654.7	8.1	36.5	-343.9	97.42	42.53
	300ppm	-749.1	1.67	174.8	-284.4	19.60	88.15
	400ppm	-717.3	0.99	94.3	-100.9	11.68	92.97



**Figure III.6 :** Taux de corrosion et efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 1M sans et avec différentes concentrations de l'Amoxicilline.

### III.3.3. Les diagrammes d'impédance

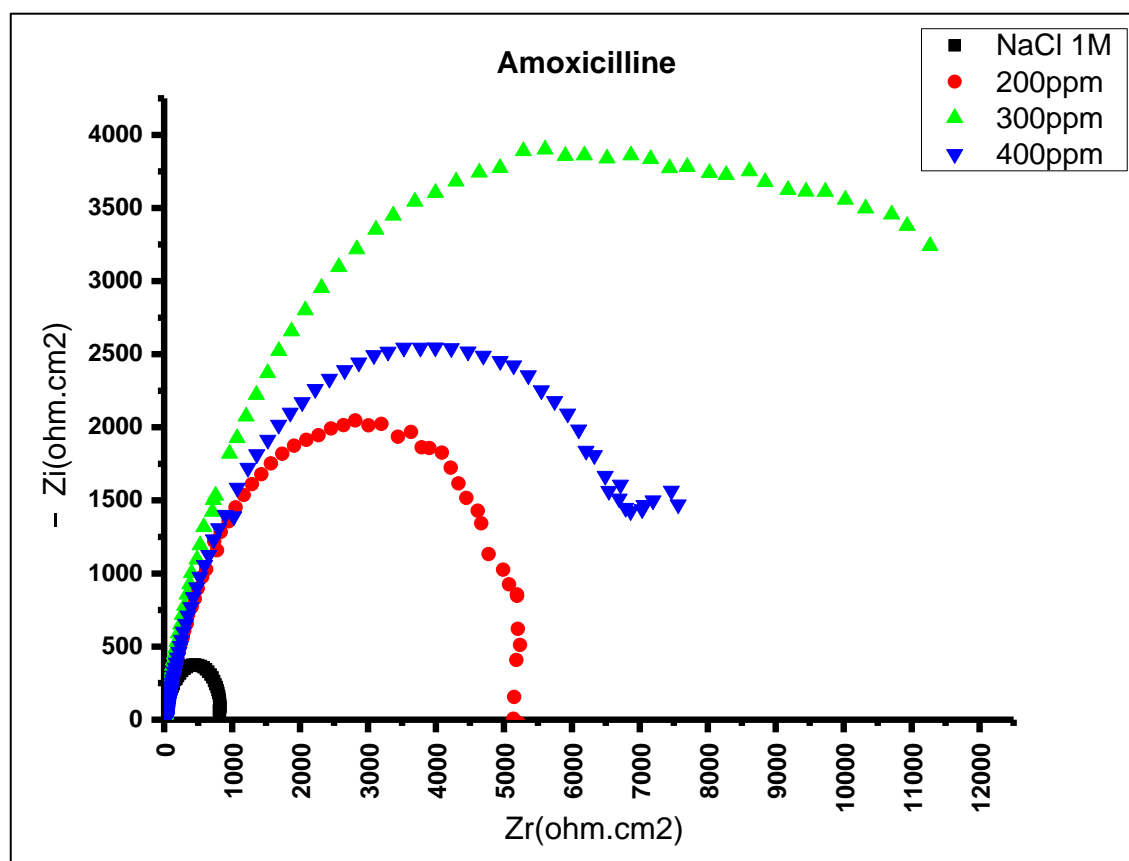
L'interprétation des diagrammes d'impédance et la comparaison entre la présence et l'absence de l'inhibiteur amoxicilline avec différentes concentrations sont les suivantes :

Les spectres d'impédance électrochimique effectuées sur l'acier au carbone en milieu NaCl 1M en présence des différentes concentrations de l'amoxicilline (200 ppm, 300ppm et 400ppm), au potentiel d'abandon (après 40 minutes d'immersion en circuit ouvert) et à température ambiante, sont présentés dans la **Figure III.7**. Pour plus de clarté, le diagramme de Nyquist pour la solution témoin a été présenté.

Les spectres obtenus indiquent que l'ajout d'amoxicilline à différentes concentrations modifie la réponse d'impédance de l'acier dans la solution de NaCl. Les inhibiteurs d'amoxicilline semblent augmenter les valeurs de résistance en série ( $Z_r$ ) et de partie imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ), ce qui suggère une amélioration de la protection contre la corrosion.

Les résultats sont représentatifs de l'efficacité inhibitrice de l'amoxicilline des déjà observée sur les courbes de polarisation. La résistance de polarisation, vue sur le diagramme de l'impédance aux basses fréquences, est la plus élevée en présence d'additifs par rapport à celle obtenue sans inhibiteur pour les trois concentrations. L'augmentation de la résistance  $R_t$  montre des surfaces de moins en moins actives et un transfert de charge à l'interface métal-solution de plus en plus difficile, indiquant l'augmentation de la résistance à la corrosion.

On note aussi qu'en présence de l'amoxicilline, la taille des boucles atteignant un maximum avec une concentration de 300ppm.



**Figure III.7** : Diagrammes expérimental de Nyquist pour une électrode d'acier dans NaCl.

### III.4. L'effet de Doliprane sur le comportement de l'acier dans NaCl (1M) vis-à-vis de la corrosion

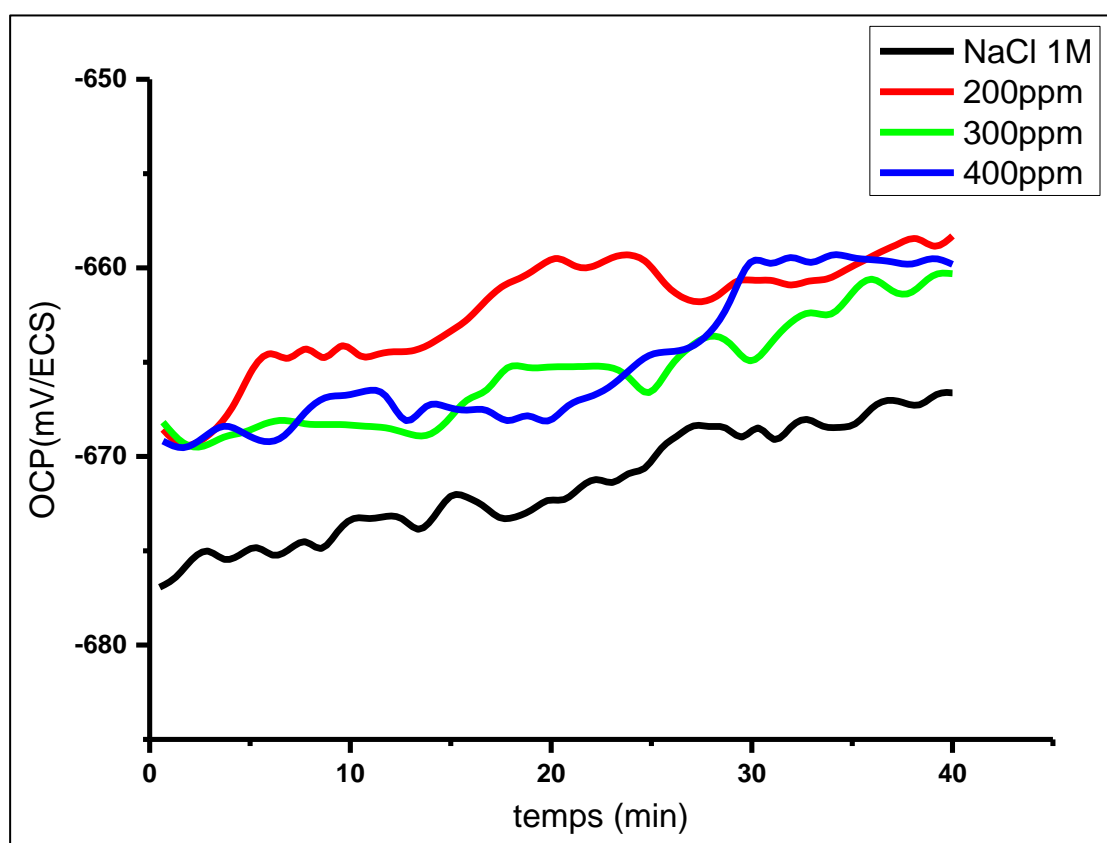
#### III.4.1. Potentiel à l'abandon

L'effet du Doliprane (Panadol) sur le potentiel à l'abandon de l'acier dans la solution de NaCl (1M), ainsi que la comparaison des résultats, est présenté sur la **Figure III.8**.

L'ajout de la Doliprane a un comportement satisfaisant : le potentiel d'abandon se déplace vers des valeurs plus positives (nobles) par rapport à la solution témoin en fonction du temps.

Ces résultats suggèrent que l'ajout de Doliprane à différentes concentrations peut avoir un effet inhibiteur sur la corrosion de l'acier dans la solution de NaCl. Les concentrations de doliprane testées ont montré une tendance à stabiliser le potentiel de corrosion au cours du temps.

Le Tableau III.4 regroupe les valeurs des potentiels à l'abandon des différents tests sont après 40 minutes d'immersion.



**Figure III.8** : Effet de la concentration de doliprane sur l'évolution du potentiel libre en fonction de temps d'une électrode d'acier dans NaCl.

**Tableau III.4 :** Valeurs du potentiel à l'abandon dans une solution de NaCl en présence ou en absence de doliprane.

	Concentration	OCP (mV/ECS)
NaCl	1M	-666.62
Doliprane	200ppm	-658.31
	300ppm	-660.31
	400ppm	-659.81

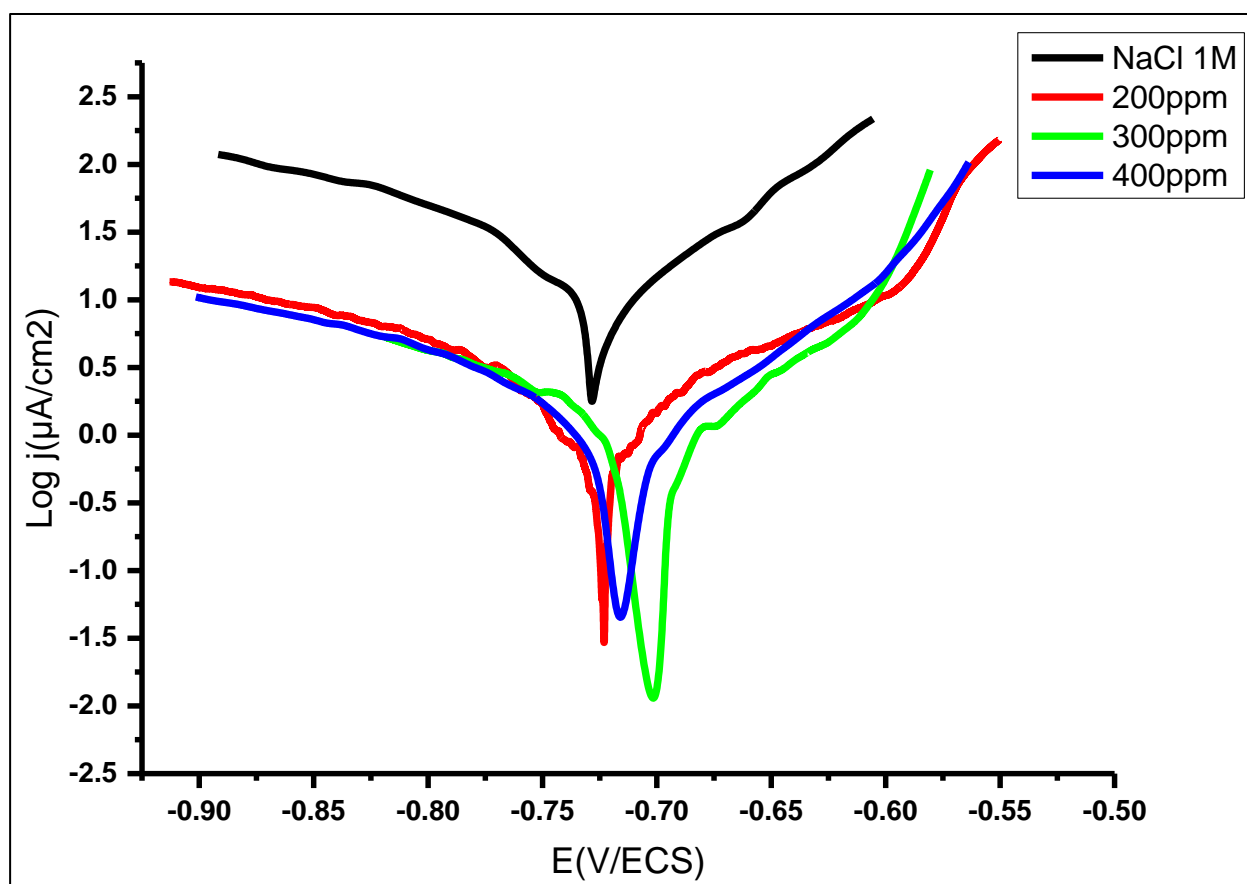
### III.4.2. Les courbes de polarisation

Les courbes de polarisation de Tafel, en présence et en l'absence des inhibiteurs de Doliprane, sont présentées sur la **Figure. III.8**

D'après la **Figure**, l'allure des courbes présente l'effet inhibiteur du doliprane vis à vis de la corrosion de l'acier dans la solution de NaCl.

Les paramètres cinétiques du processus de corrosion déduites de courbe de Tafel sont présentés dans le (**Tableau III.5**).

Ces données indiquent que l'ajout de Doliprane en différentes concentrations a un effet inhibiteur sur la corrosion de l'acier dans la solution de NaCl. Les valeurs plus faibles des courants de corrosion réduits indiquent une amélioration de la résistance à la corrosion de l'acier en présence des inhibiteurs de Doliprane. Cela suggère que le Doliprane peut être efficace pour réduire la corrosion de l'acier dans des environnements contenant du NaCl.

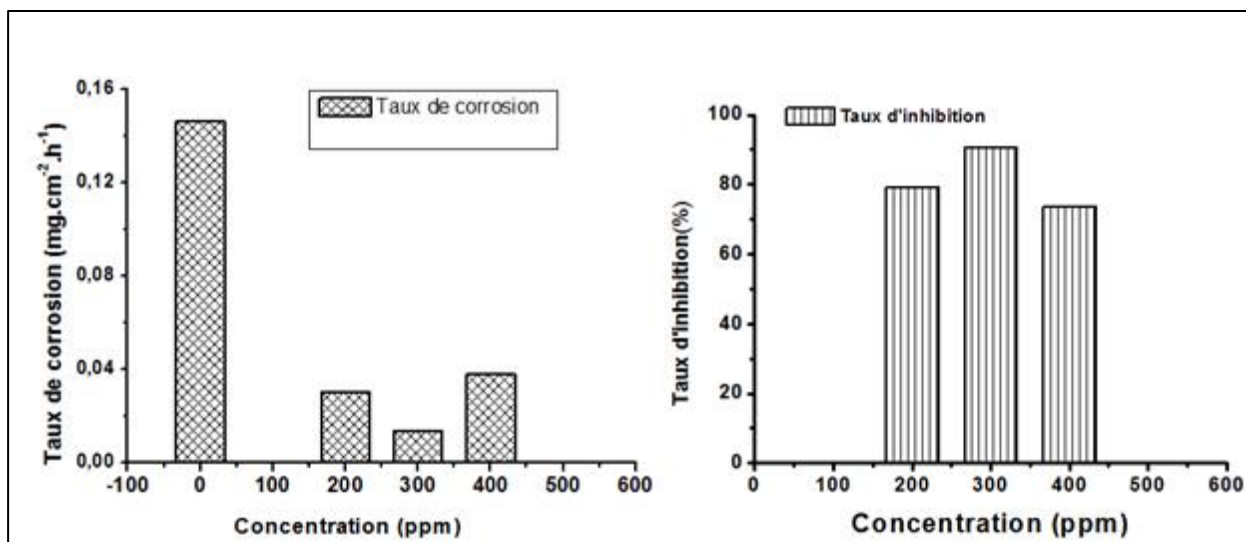


**Figure III.9 :** L'effet de l'ajout de Doliprane à différentes concentrations sur les courbes de polarisations d'une électrode d'acier dans NaCl.

**Tableau III.5 :** Paramètres cinétiques déduits des droites de Tafel dans une solution de NaCl en présence ou en absence de doliprane.

	E(i=0) (mV)	i corr. (mA/cm <sup>2</sup> )	Ba (mV)	Bc (mV)	Corrosion (μA/an)	Taux d'inhibition (η %)
NaCl 1M	-721.6	0.0141	106.1	-159.7	164.6	00
200 ppm	-723	2.9436	218.7	-294	34.42	79.14%
300 ppm	-698.3	1.333	81.5	-203.5	15.59	90.56%
400 ppm	-715.6	0.0037	72.2	-395.2	42.73	73.57%





**Figure III.10 :** Taux de corrosion et efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 1M sans et avec différentes concentrations de l'amoxicilline.

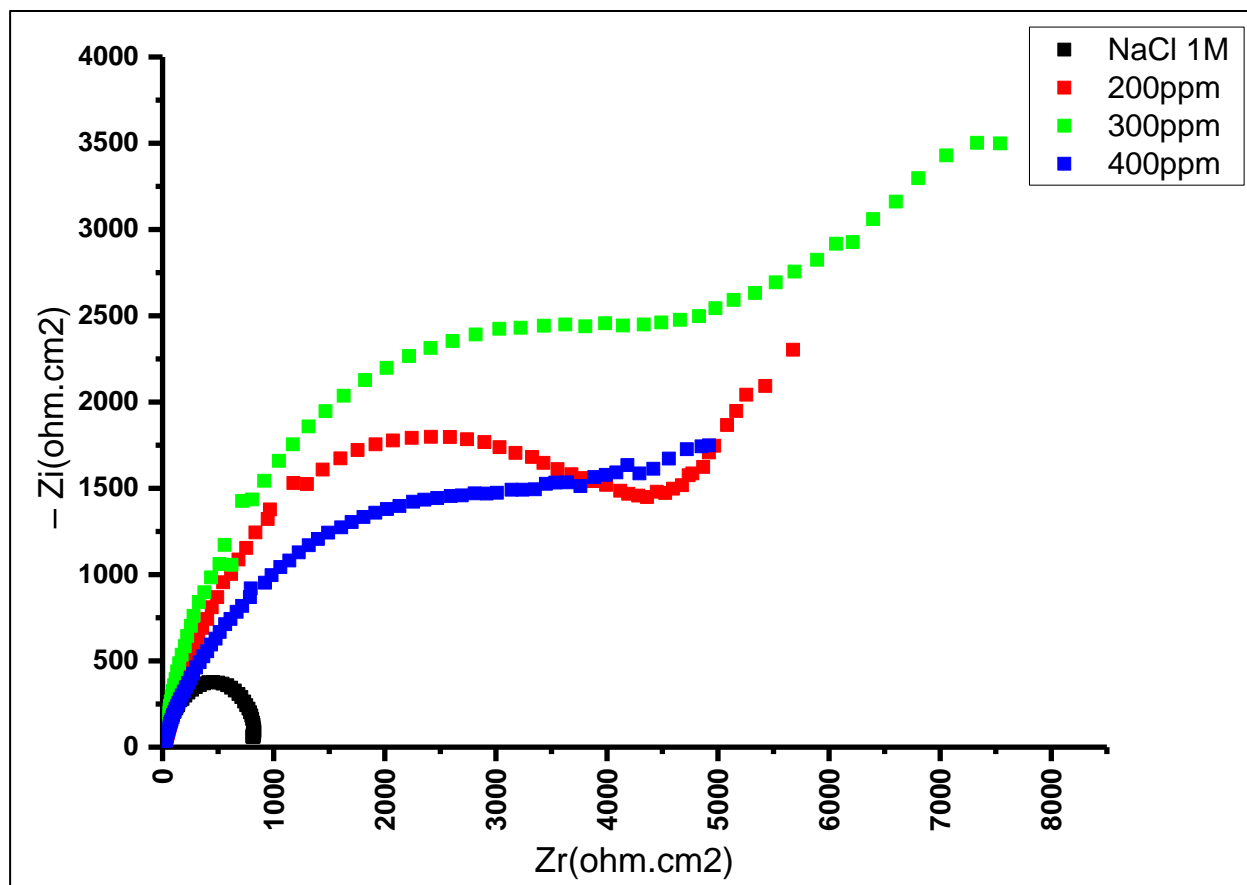
Le Tableau III.5 et la Figure III. 9, montrent que la vitesse de corrosion de l'échantillon a été significativement réduite avec l'addition de doliprane et que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur.

La concentration de 300 ppm a été prise comme meilleure concentration avec une efficacité de 90.56%, et au-delà de cette concentration et précisément à 400ppm, le gain en efficacité inhibitrice devient moindre 73.57%.

### III.4.3. Les diagrammes d'impédance

Les spectres d'impédance en milieu chlorure de sodium NaCl (1M) en présences de différentes concentration de doliprane sont présentés sur la figure III.10.

L'interprétation et la comparaison des données des diagrammes d'impédance avec et sans la présence de doliprane montre que, l'impédance augmente avec la concentration de l'inhibiteur, ce qui démontre les propriétés inhibitrices de cet inhibiteur relatif à la corrosion de l'acier dans ce même milieu.



**Figure III.11** : Diagrammes de Nyquist pour une électrode d'acier dans NaCl en absence et en présence du doliprane.

On remarque sur le spectre de la doliprane la présence de la branche de Warburg à des faibles fréquences. L'apparition d'une branche de Warburg pour les faibles fréquences indique la contribution d'un processus de diffusion [63].

En résumé, l'ajout de doliprane à la solution de NaCl a un effet sur la résistance à la corrosion, avec une augmentation de la résistance observée aux concentrations d'inhibiteur plus élevées. Cependant, il est important de noter que des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer l'efficacité de doliprane en tant qu'inhibiteur de corrosion et pour comprendre les mécanismes spécifiques impliqués dans cette protection contre la corrosion.

# **CONCLUSION**

## **Conclusion**

En conclusion, les données présentées suggèrent que l'ajout d'amoxicilline et de doliprane à la solution de NaCl peut avoir un effet positif sur le comportement de l'acier vis-à-vis de la corrosion.

Les études ont montré que les concentrations plus élevées des inhibiteurs ont généralement conduit à une augmentation de la résistance à la corrosion et à une diminution de l'activité de corrosion de l'acier. Cependant, il est important de noter que ces résultats sont spécifiques aux conditions expérimentales et aux concentrations d'inhibiteurs utilisées.

Il est nécessaire de mener des recherches supplémentaires pour évaluer plus en détail l'efficacité des inhibiteurs de corrosion, tels que l'amoxicilline et le doliprane, ainsi que pour comprendre les mécanismes d'inhibition spécifiques impliqués. Des études complémentaires pourraient inclure des analyses de surface, des essais à long terme et des investigations des effets synergiques potentiels de ces inhibiteurs avec d'autres composés chimiques.

Ces résultats soulignent l'importance de l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion pour la protection des matériaux métalliques exposés à des environnements corrosifs tels que les solutions de NaCl. Cependant, il est essentiel de continuer à améliorer notre compréhension des inhibiteurs et de développer des stratégies plus efficaces pour la prévention de la corrosion dans diverses applications industrielles.

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

- [1] Lece, H. D., Emregül, K. C., & Atakol, O. (2008). Difference in the inhibitive effect of some Schiff base compounds containing oxygen, nitrogen and sulfur donors. *Corrosion science*, 50(5), 1460-1468
- [2] Mu, G., Li, X., Qu, Q., & Zhou, J. (2006). Molybdate and tungstate as corrosion inhibitors for cold rolling steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 48(2), 445-459.
- [3] Samiento-Bustos, E., Rodriguez, J. G., Uruchurtu, J., Dominguez-Patiño, G., & Salinas-Bravo, V. M. (2008). Effect of inorganic inhibitors on the corrosion behavior of 1018 carbon steel in the LiBr+ ethylene glycol+ H<sub>2</sub>O mixture. *Corrosion Science*, 50(8), 2296-230
- [4] Şahin, M., Gece, G., Karcı, F., & Bilgiç, S. J. J. A. E. (2008). Experimental and theoretical study of the effect of some heterocyclic compounds on the corrosion of low carbon steel in 3.5% NaCl medium. *Journal of Applied Electrochemistry*, 38, 809-815.
- [5] Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- [6] Ahmad, Z. (2006). Introduction to corrosion. *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1, 1-8.
- [7] Mendala, J., & Kozuba, J. (2019, September). Corrosion Resistance of Steel Sheets with Zn Protective Coatings. In *2019 New Trends in Aviation Development (NTAD)* (pp. 125-129). IEEE.
- [8] Eliaz, N. (2019). Corrosion of metallic biomaterials: A review. *Materials*, 12(3), 407
- [9] Lyons, W. C., & Plisga, G. J. (2011). *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. Elsevier.
- [10] Hoar, T. P., & Agar, J. N. (1947). Factors in throwing power illustrated by potential-current diagrams. *Discussions of the Faraday Society*, 1, 162-168.
- [11] Hoar, T. P. (1949). The breakdown and repair of oxide films on iron. *Transactions of the Faraday Society*, 45, 683-693.
- [12] Vaniukova, L. V., & Kabanov, B. N. (1948). Pitting corrosion of metal. In *Proc. Acad. Sci. USSR* (Vol. 59, pp. 917-922
- [13] Kabanov, B. U. R. S. T. E. I. N., Burstein, R., & Frumkin, A. (1947). Kinetics of electrode processes on the iron electrode. *Discussions of the Faraday Society*, 1, 259-269
- [14] Altenpohl, D., Altenpohl, D., & Zeiger, H. (1965). Korrosion. *Aluminium und Aluminiumlegierungen*, 840-890.

- [15] Kolotyrkin, J. M. (1963). Pitting corrosion of metals. *Corrosion*, 19(8), 261t-268t.
- [16] Curley-Fiorino, M. E., & Schmid, G. M. (1980). The effect of the Cl<sup>-</sup> ion on the passive film on anodically polarized 304 stainless steel. *Corrosion Science*, 20(3), 313-329
- [17] Akpanyung, K. V., & Loto, R. T. (2019, December). Pitting corrosion evaluation: a review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1378, No. 2, p. 022088). IOP Publishing.
- [18] Popova, T. I., Bagotskii, V. S., & Kabanov, B. N. (1960). Anode passivation of zinc in alkaline solutions. In *Doklady Akademii Nauk* (Vol. 132, No. 3, pp. 639-642). Russian Academy of Sciences
- [19] Kolotyrkin, Y. M., Golovina, G. V., & Florianovich, G. M. (1963). Depassivating action of halogen ions on iron-base alloys. In *Doklady Akademii Nauk* (Vol. 148, No. 5, pp. 1106-1109). Russian Academy of Sciences.
- [20] Callister Jr, W. D. (2007). *Materials science and engineering an introduction*.
- [21] Prawoto, Y., Ibrahim, K., & Wan Nik, W. B. (2009). Effect of pH and chloride concentration on the corrosion of duplex stainless steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(2), 115
- [22] Loto, R. T. (2015). Pitting corrosion evaluation and inhibition of stainless steels: A review. *J. Mater. Environ. Sci*, 6(10), 2750-2762.
- [23] Zhang, W., & Frankel, G. S. (2003). Transitions between pitting and intergranular corrosion in AA2024. *Electrochimica Acta*, 48(9), 1193-1210.
- [24] Kadhim, M. G., & Ali, M. T. (2017). A critical review on corrosion and its prevention in the oilfield equipment. *Journal of petroleum research and studies*, 7(2), 162-189.
- [25] Kumar, R., Kumar, R., & Kumar, S. (2018). Erosion corrosion study of HVOF sprayed thermal sprayed coating on boiler tubes: a review. *IJSMS*, 1(3), 1-6.
- [26] Prutton, C. F., Frey, D. R., Turnbull, D., & Dlouhy, G. (1945). Corrosion of metals by organic acids in hydrocarbon solvents. *Industrial & Engineering Chemistry*, 37(1), 90-100
- [27] Schaschl, E. (1973). Methods for evaluation and testing of corrosion inhibitors. *CC Nathan (Houston, TX: NACE, 1981)*, 28.
- [28] Norman, E. H. (1965). NACE glossary of corrosion terms. *Materials Protection*, 4(1), 79
- [29] Brubaker, G. R., & PBP, P. (1979). *Corrosion chemistry*.

- [30] Lece, H. D., Emregül, K. C., & Atakol, O. (2008). Difference in the inhibitive effect of some Schiff base compounds containing oxygen, nitrogen and sulfur donors. *Corrosion science*, 50(5), 1460-1468.
- [31] Lece, H. D., Emregül, K. C., & Atakol, O. (2008). Difference in the inhibitive effect of some Schiff base compounds containing oxygen, nitrogen and sulfur donors. *Corrosion science*, 50(5), 1460-1468.
- [32] Samiento-Bustos, E., Rodriguez, J. G., Uruchurtu, J., Dominguez-Patiño, G., & Salinas-Bravo, V. M. (2008). Effect of inorganic inhibitors on the corrosion behavior of 1018 carbon steel in the LiBr+ ethylene glycol+ H<sub>2</sub>O mixture. *Corrosion Science*, 50(8), 2296-2303
- [33] Bastos, A. C., Ferreira, M. G., & Simões, A. M. (2006). Corrosion inhibition by chromate and phosphate extracts for iron substrates studied by EIS and SVET. *Corrosion Science*, 48(6), 1500-1512
- [34] Şahin, M., Gece, G., Karcı, F., & Bilgiç, S. J. J. A. E. (2008). Experimental and theoretical study of the effect of some heterocyclic compounds on the corrosion of low carbon steel in 3.5% NaCl medium. *Journal of Applied Electrochemistry*, 38, 809-815
- [35] G. Gece, The use of quantum chemical methods in corrosion inhibitor studies, *Corros. Sci.* 50 (2008) 2981–2992.
- [36] Broussard, G., Bramanti, O., & Marchese, F. M. (1997). Occupational risk and toxicology evaluations of industrial water conditioning. *Occupational medicine*, 47(6), 337-340.
- [37] Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- [38] Newman, D. J., Cragg, G. M., & Snader, K. M. (2003). Natural products as sources of new drugs over the period 1981– 2002. *Journal of natural products*, 66(7), 1022-1037.
- [39] 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.
- [40] Harvey, A. L. (2008). Natural products in drug discovery. *Drug discovery today*, 13(19-20), 894-901.
- [41] Struck, S., Schmidt, U., Gruening, B., Jaeger, I. S., Hossbach, J., & Preissner, R. (2008). TOXICITY VERSUS POTENCY ELUCIDATION OF TOXICITY PROPERTIES DISCRIMINATING BETWEEN TOXINS, DRUGS, AND NATURAL COMPOUNDS. *Genome informatics*, 20, 231-242.
- [42] Enick, O. V. (2006). Do pharmaceutically active compounds have an ecological impact?



- [43] Eglén, R. M., Schneider, G., & Böhm, H. J. (2000). *Virtual screening for bioactive molecules*. Wiley-VCH. Weinheim, Alemania.
- [44] Cramer, R. D., Poss, M. A., Hermsmeier, M. A., Caulfield, T. J., Kowala, M. C., & Valentine, M. T. (1999). Prospective identification of biologically active structures by topomer shape similarity searching. *Journal of medicinal chemistry*, 42(19), 3919-3933.
- [45] 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.
- [46] Abdallah, M. (2004). Antibacterial drugs as corrosion inhibitors for corrosion of aluminium in hydrochloric solution. *Corrosion Science*, 46(8), 1981-1996.
- [47] 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.
- [48] Tamborim, S. M., Dias, S. L. P., Silva, S. N., Dick, L. F. P., & Azambuja, D. S. (2011). Preparation and electrochemical characterization of amoxicillin-doped cellulose acetate films for AA2024-T3 aluminum alloy coatings. *Corrosion science*, 53(4), 1571-1580
- [49] 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.
- [50] Eddy, N. O., Stoyanov, S. R., & Ebenso, E. E. (2010). Fluoroquinolones as corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium; experimental and theoretical studies. *Int. J. Electrochem. Sci*, 5, 1127-1150.
- [51] Ebenso, E. E., Obot, I. B., & Murulana, L. C. (2010). Quinoline and its derivatives as effective corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium. *Int. J. Electrochem. Sci*, 5, 1574-1586.
- [52] 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.
- [53] Flitt, H. J., & Schweinsberg, D. P. (2005). Evaluation of corrosion rate from polarisation curves not exhibiting a Tafel region. *Corrosion Science*, 47(12), 3034-3052.
- [54] Stern, M. (1958). A method for determining corrosion rates from linear polarization data. *Corrosion*, 14(9), 60-64.

- [55] Haycock, E. W. (1957). Discussion of “Electrochemical Polarization, 1. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves”[M. Stern and AL Geary (pp. 56–63, Vol. 104)]. *Journal of The Electrochemical Society*, 104(12), 751.
- [56] Keddam, M. (1985). *Electrochimie, principes, methodes et applications* : AJ Bard et LR Faulkner Masson, Paris, 1983, 781 pp.
- [57] Brett, C., & Oliveira Brett, A. M. (1993). *Electrochemistry: principles, methods, and applications* (No. 544.6 BRE
- [58] Wang, J. (2023). *Analytical electrochemistry*. John Wiley & Sons.
- [59] Din-Stirbu, E. L. (2005). *Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA)
- [60] Béranger, G., & Mazille, H. (2002). Corrosion des métaux et alliages : mécanismes et phénomènes. *Hermes (éd.), Traité MIM*, 365
- [61] LACHACHI, S. *ETUDE DE L'EFFICACITE INHIBITRICE DE CORROSION DANS L'ACIDE SULFIRIQUE PAR LA POVIDONE IODEE* (Doctoral dissertation, 19-04-2021).
- [62] Abrudeanu, M., & GAVRILĂ, M. (1997). Durabilitate și corozivitate–tehnici de laborator. *Pygmalion, ISBN ISBN*, 973-96591.
- [63] Perez, N. (Ed.). (2004). *Electrochemistry and corrosion science*. Boston, MA: Springer Us.

