



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
Université Chadli Bendjedid – El Tarf
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الكيمياء
Département de Chimie

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences de la matière
Filière : Chimie
Spécialité: Chimie Analytique
Thème

**Etude de l'effet inhibiteur d'un composé
organique contre la corrosion de l'acier A9M**

Présenté par:

Benayad Aya

Devant le Jury :

Président	: BELAID Soraya	MAA	Univ Chadli Bendjedid El Tarf
Rapporteur	: BOUASLA Nabila	MCB	Univ Chadli Bendjedid El Tarf
Co-encadreur	: ATHMANI Sameh	MCB	CRAPC-Annaba
Examinatrice	: ZERNIZ Nawal	MCB	Univ Chadli Bendjedid El Tarf

Année Universitaire 2022-2023

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux, offre du dieu, qui tient ma vie, ma réussite et tout mon respect :
mon cher père : **Mon cher père FOUJIL***

*Je suis très fière d'être votre fille et de pouvoir enfin réaliser ce que vous avez tant espéré et attendu de moi. Vous n'avez jamais cessé de déployer tous vos efforts afin de subvenir à nos besoins, nous encourager et nous aider à choisir le chemin de la Réussite. Votre patience, votre bonne volonté, vos conseils précieux ainsi que votre confiance en moi ont été pour beaucoup dans ma réussite. Que **DIEU** vous protège et vous garde*

À Ma Chère Maman

*Si **DIEU** a mis le paradis sous les pieds des mères, ce n'est pas pour rien.*

*Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Puisse **DIEU**, le Tout-puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*À ma chère sœur **JOUHAINA** et Mon cher frère **ADEM**, qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que **DIEU** les protège et leur offre la chance et le bonheur.*

À Mon cher grand-père et Ma chère grand-mère.

*Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que **DIEU** vous préserve en santé et vous accorde une longue vie.*

Dédicace

À mes oncles et tantes,

Que **DIEU** leur a donné une vie longue et heureuse.

À mes cousines,

Merci pour vos amours et vos encouragements.

À Mes chères copines **RAOUNEK** et **KHADIDJA**

À familles **BENAYAD** et **CHIBANI**, votre soutien, votre amour m'ont toujours touché et m'ont donné force et énergie.

Mlle. **BENAYAD** Aya

Remerciements

Ecrire cette première page c'est le moment que tout étudiant attend.

*Je commence tout d'abord par remercier vivement mon **DIEU** le tout-puissant pour m'avoir donné le courage et la volonté de réussir et de terminer ce modeste travail.*

Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire d'Ingénierie des Surfaces (L.I.S) à l'Université Badji Mokhtar-ANNABA.

*Je tiens à remercier la directrice du laboratoire d'Ingénierie des Surfaces (L.I.S), Madame **ABDERRAHMANE Sihem**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-ANNABA, d'avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire. Je la remercie également pour ses conseils tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens tout particulièrement avec mes profonds respects à remercier ma directrice de ce mémoire, **Dr. BOUASLA Nabila**, d'avoir accepté de m'encadrer durant cette année. Je la remercie beaucoup pour ses encouragements, sa qualité d'encadrement et ses conseils qui ont largement contribué à la réussite de ce travail.*

*Je remercie également mon Co-encadreur **Dr. ATHMANI Sameh** du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimiques (CRAPC) pour son aide, ses conseils et sa disponibilité.*

*Je remercie madame **BELAID Soraya** d'avoir accepté de présider ce jury et je lui exprime mes plus sincères remerciements.*

*Je tiens également à remercier madame **ZERNIZ Nawal** pour avoir consacré son temps et ses compétences à l'examen et à l'évaluation de ce travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements aux doctorantes **ASMA, SARAH** et **KAMILYA** du Laboratoire d'Ingénierie de Surfaces (L.I.S).*

J'adresse un vif remerciement à l'ensemble des enseignants et des enseignantes qui ont assuré notre formation tout au long de toutes ces années d'études.

Remerciements

Tout au long de ce travail, il y a des personnes qui étaient toujours à côté de moi, mes parents. Je les remercie très chaleureusement ici pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, pour leur soutien et leurs encouragements. J'espère qu'ils seront fiers de ma réussite et que DIEU les protège et les garde.

في هذا العمل، درسنا التأثير المثبط للبنزوثيريازولينون على تآكل الفولاذ العادي A9M في محلول H_2SO_4 0.5 مول/ل. أجريت هذه الدراسة باستخدام تقنيات مختلفة مثل طريقة فقدان الكتلة، مطيافية المعاوقة الكهروكيميائية والاستقطاب الديناميكي الفعال. تم تنفيذ توصيف الفيلم المثبط الذي تم الحصول عليه باستخدام المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح. تمت دراسة تأثير التركيز على الفعالية المثبطة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن البنزوثيريازولينون يعمل كمثبط مختلط، حيث بلغت الكفاءة القصوى 80.68%، 77.05% و 80.58% عند تركيز 10^{-2} مول/ل، تم الحصول عليها على التوالي بفقدان الكتلة، مطيافية المعاوقة الكهروكيميائية والاستقطاب الديناميكي الفعال. تؤكد ملاحظات المجهر الضوئي ومجهر المسح الإلكتروني النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الفولاذ العادي، المثبط، البنزوثيريازولينون، حمض الكبريتيك.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet inhibiteur du Benzothiazolinone sur la corrosion de l'acier ordinaire A9M dans une solution d' H_2SO_4 à 0,5M. Cette étude a été réalisée en utilisant différentes techniques telles que la méthode de perte de masse, la spectroscopie d'impédance électrochimique et la polarisation potentiodynamique. Le film inhibiteur obtenu a été caractérisé à l'aide du microscope optique et le microscope électronique balayage. L'influence de la concentration sur l'efficacité inhibitrice a été étudiée. Les résultats obtenus mettent en évidence que le Benzothiazolinone fonctionne comme inhibiteur mixte, atteignant des efficacités maximales de 80,68%, 77,05% et 80,58% à une concentration de 10^{-2} M, obtenues respectivement par perte de masse, spectroscopie d'impédance électrochimique et polarisation potentiodynamique. Les observations du microscope optique et du microscope électronique balayage confirment les résultats obtenus.

Mots clés : corrosion, acier ordinaire, inhibiteur, Benzothiazolinone, acide sulfurique.

Abstract

In this work, we studied the inhibiting effect of Benzothiazolinone on the corrosion of A9M ordinary steel in a 0.5M H_2SO_4 solution. This study was carried out using various techniques such as the mass loss method, electrochemical impedance spectroscopy and potentiodynamic polarization. The resulting inhibitor film was characterized using an optical microscope and scanning electron microscope. The influence of concentration on inhibitory efficacy has been studied. The results show that Benzothiazolinone functions as a mixed inhibitor, achieving maximum efficiencies of 80.68%, 77.05% and 80.58% at a concentration of 10^{-2} M, obtained by mass loss, electrochemical impedance spectroscopy and potentiodynamic polarization respectively. Optical and scanning electron microscope observations confirm the results obtained.

Key words: corrosion, mild steel, inhibitor, Benzothiazolinone, sulfuric acid.

Abréviations

IUPAC	Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
pH	Potentiel d'Hydrogène
NACE	Association Nationale des Ingénieurs en Corrosion
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
LPOCI	Inhibiteurs de Corrosion Organique en Phase Liquide
VOCI	Inhibiteurs de Corrosion Organique Volatils
ICV	Inhibiteur de Corrosion Volatile
BTZ	Benzothiazolinone
OCP	Potentiel à Circuit Ouvert
PPD	Polarisation potentiodynamique
PM	Perte de masse
SIE	Spectroscopie d'impédance Electrochimique
ECS	Electrode de Calomel Saturée
CEE	Circuit Electrique Equivalent
MO	Microscope électronique
MEB	Microscope électronique à balayage
EDX	Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Phénomène de corrosion	3
Figure I.2	La corrosion uniforme	4
Figure I.3	La corrosion localisée	5
Figure I.4	Corrosion par piqûres	5
Figure I.5	Corrosion inter granulaire	6
Figure I.6	Classement des inhibiteurs de corrosion	10
Figure II.1	Le benzothiazolinone	15
Figure II.2	Structure du benzothiazolinone	15
Figure II.3	Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.	18
Figure II.4	Acier A9M	19
Figure II.5	Solution d' H_2SO_4 (A) et inhibiteur (B)	20
Figure II.6	Machine de découpage	20
Figure II.7	Polisseuse	21
Figure II.8.	Papier abrasif	21
Figure II.9	Acier A9M avant (A) et après (B) le polissage	21
Figure II.10	Balance analytique	22
Figure II.11	Essai de la perte de mase	22
Figure II.12	Chaine de corrosion	22
Figure II.13	Electrode de travail	23
Figure II.14	Microscope optique	24
Figure II.15	Microscope électronique à balayage	24
Figure III.1	Évaluation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire A9M après 24h d'immersion dans H_2SO_4 à 0,5M en fonction de différentes concentrations de BTZ	26
Figure III.2	Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire A9M après 24h d'immersion dans H_2SO_4 à 0,5M en fonction de différentes concentrations de BTZ	26
Figure III.3	Suivi du potentiel à circuit ouvert de l'acier ordinaire A9M dans H_2SO_4 à 0.5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations	27

Liste des figures

Figure III.4	Diagramme d'impédance électrochimique de l'acier ordinaire A9M dans H ₂ SO ₄ à 0,5M en absence et en présence de différentes concentrations de BTZ	28
Figure III.5	Circuit électrique équivalent de l'acier ordinaire A9M dans 0,5M H ₂ SO ₄ en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations	29
Figure III.6	Courbes de polarisation de l'acier ordinaire A9M dans H ₂ SO ₄ à 0,5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations	31
Figure III.7	Micrographies de l'acier ordinaire A9M à différents grossissement en absence d'inhibiteur après immersion de 2h.	33
Figure III.8	Micrographies de l'acier ordinaire A9M à différents grossissement en présence de 10 ⁻² M de BTZ après immersion de 2h.	33
Figure III.9	Micrographies MEB- EDX de l'acier ordinaire A9M dans H ₂ SO ₄ à 0.5M après 2h d'immersion en absence de BTZ (a) et en présence de 10 ⁻² M BTZ (b)	34

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Principaux facteurs de corrosion	7
Tableau I.2	Acier ordinaire	8
Tableau I.3	Composés organiques utilisés comme inhibiteurs de corrosion des aciers dans différents milieux électrolytiques	12
Tableau II.1	La composition chimique de l'acier A9M	19
Tableau III.1	Vitesse de corrosion de l'acier ordinaire A9M dans H ₂ SO ₄ à 0,5M après 24h d'immersion en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacité inhibitrices calculées	25
Tableau III.2	Paramètres électrochimiques déduits des Nyquists de l'acier A9M dans H ₂ SO ₄ à 0.5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées	30
Tableau III.3	Paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'acier A9M dans H ₂ SO ₄ à 0,5 M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées	32

Sommaire

Dédicace.....	II
Remerciements.....	IV
Résumé	VI
ملخص.....	VI
Abstract.....	VI
Abréviations	VII
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
Sommaire	XI
Introduction	1

Chapitre I : Aperçu Bibliographique

I.1. La corrosion	3
I.1.1. Définition de la corrosion	3
I.1.2. Les type de corrosion	3
I.1.2.1. La corrosion chimique	3
I.1.2.2. La corrosion électrochimique	4
I.1.2.3. La corrosion biochimique	4
I.1.3. Morphologie de la corrosion	4
I.1.3.1. la corrosion uniforme	4
I.1.3.2. la corrosion localisée	4
A. La corrosion par piqures	5
B. La corrosion par érosion.....	5
C. La corrosion inter granulaire	6
D. La corrosion galvanique.....	6
E. La corrosion cavernuse	6
I.1.4. Facteurs de corrosion	6
I.2. Corrosion des aciers	7
I.2.1. Définition des aciers	7
I.2.2. Les différents types des aciers	7
I.2.3. Les aciers ordinaires	7
I.3. La protection contre la corrosion	8
I.3.1. Protection par inhibiteurs.....	8

Sommaire

I.3.1.1. Définition d'inhibiteur	8
I.3.1.2. Propriétés des inhibiteurs	9
I.3.1.3. Utilisation des inhibiteurs	9
I.3.1.4. Classification des inhibiteurs	9
I.3.2. Les inhibiteurs organiques de corrosion	10
I.3.3. Inhibiteurs de corrosion organiques synthétiques	11
I.3.3.1. Inhibiteurs organiques en phase liquide	11
A. Molécules organiques simples	11
B. Polymères organiques synthétiques	11
C. Molécules de surfactants	11
I.3.3.2. Inhibiteur de corrosion volatile	12

Chapitre II : Partie Expérimentale

II.1. Introduction	15
II.2. Inhibiteur d'étude	15
II.2.1. Structure du benzothiazolinone.....	15
II.3. Méthodes d'étude	16
II.3.1. La perte de masse	16
II.3.2. Méthodes électrochimiques	17
II.3.2.1. Techniques stationnaires.....	17
A.Potentiel à circuit ouvert (OCP)	17
B.Courbes de polarisation potentiodynamique (Tafel)	17
II.3.2.2. Techniques non stationnaires (transitoires)	18
A.La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	18
II.4. Produits chimiques	18
II.5. Procédures Expérimentales	19
II.5.1. Conditions expérimentales	19
II.5.1.1. Matériau d'étude	19
II.5.1.2. Milieu corrosif.....	19
II.5.1.3. Préparation de la surface.....	20
II.5.1.4. Essais de perte de masse	21
II.5.1.5. Essais électrochimiques	22
II.6. Méthodes de Caractérisations	23

II.6.1. Microscope optique (MO)	23
II.6.2. Le microscope électronique à balayage (MEB).....	24

Chapitre III : Résultats et Discussion

III.1. Introduction	25
III.2. Etude de l'effet inhibiteur de BTZ par la méthode de la perte de masse	25
III.3. Etudes électrochimiques	27
III.3.1. Suivi du potentiel à circuit ouvert (OCP).....	27
III.3.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	28
III.3.3. Courbes de polarisation potentiodynamique	30
III.4. Caractérisations	32
III.4.1. Caractérisation de l'acier A9M par microscope optique.....	32
III.4.2. Microscopie électronique à balayage et analyse par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (MEB-EDX)	34
Conclusion	36
Références Bibliographiques	37

Introduction générale

Actuellement, malgré les défis posés par les alliages avancés tels que l'aluminium et les matériaux composites, l'acier ordinaire demeure l'un des matériaux les plus largement utilisés dans divers environnements acides et de nombreuses applications industrielles telles que le décapage, le détartrage et le nettoyage de chaudières. Ceci s'explique par ses excellentes propriétés physiques et mécaniques, ainsi que par sa rentabilité et son coût de production. Cependant, la principale problématique de l'acier réside dans la corrosion, qui cause d'énormes pertes pour l'industrie [1]. On estime qu'elle détruit environ un quart de la production annuelle mondiale d'acier, soit environ 150 millions de tonnes par an, équivalent à 5 tonnes par seconde [2].

Le mot corrosion tire son origine du latin "corrodere" et décrit le processus de rongement et d'attaque. Il s'agit d'une détérioration involontaire des métaux causés par des environnements corrosifs. Par conséquent, la corrosion est un problème lié à la surface plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif [3].

Dans l'industrie, les solutions acides sont largement employées dans divers domaines, notamment pour le décapage, le nettoyage à l'acide et l'élimination des dépôts localisés. En raison de leur nature agressive, ces solutions acides requièrent l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion afin de prévenir l'érosion des surfaces métalliques [4]. Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ajoutées en faibles quantités dans le milieu, ayant pour fonction de ralentir la vitesse de corrosion des matériaux.

Il existe de nombreux agents de protection contre la corrosion, parmi lesquels se trouvent les inhibiteurs organiques qui jouent un rôle crucial dans la prévention de la corrosion. Les inhibiteurs organiques sont généralement composés de sous-produits de l'industrie pétrolière et contiennent un ou plusieurs groupes fonctionnels qui leur permettent de se fixer à la surface du métal, tels que : (-NH₂), (-OH), (-SH), (-PO₃H₂), (-SO₃H), (-COOH). Actuellement, l'utilisation de composés organiques est privilégiée par rapport aux inhibiteurs inorganiques, principalement en raison de considérations environnementales liées à l'écotoxicité [5].

Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'évaluation de l'efficacité inhibitrice d'une molécule organique (benzothiazolinone) pour prévenir la corrosion d'un acier ordinaire A9M dans une solution de H₂SO₄ à 0,5M en utilisant des méthodes électrochimiques et la méthode de perte de masse.

Ce mémoire se compose de trois chapitres, en plus d'une introduction et d'une conclusion.

Le premier chapitre aborde les principes fondamentaux de la corrosion et les différentes méthodes de protection.

Le deuxième chapitre présente en détail les méthodes d'études utilisées permettant de suivre le phénomène de corrosion, notamment la méthode gravimétrique et les méthodes électrochimiques, ainsi que les conditions expérimentales adoptées. Ainsi il aborde les méthodes de caractérisation utilisées.

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus et propose les discussions appropriées.

Chapitre I. Aperçu Bibliographique

I.1. La corrosion

I.1.1. Définition de la corrosion

La corrosion est la dégradation des matériaux par interaction physico-chimique sous l'influence de leur environnement, entraînant des altérations de ses propriétés (mécanique, électrique, etc) (**Figure I.1**) [6].

Selon IUPAC la corrosion est une réaction interfacial irréversible d'un matériau (métal, céramique, polymère) avec son environnement qui entraîne la consommation du matériau ou la dissolution dans le matériau d'un composant de l'environnement [7].



Figure I.1. Phénomène de corrosion

I.1.2. Les type de corrosion

Les processus de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs qui est en relation les uns avec les autres : la nature et la structure du matériau, l'environnement et ses caractéristiques chimiques, sa température, etc.

La corrosion peut être classée en trois grandes classes, dans ce qui suit, on va rappeler certaines définitions à chaque type de corrosion : la corrosion chimique, électrochimique, biochimique [8].

I.1.2.1. La corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à des températures élevées, on l'appelle "corrosion sèche" ou corrosion à haute température. Dans ce cas l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se produisent en une seule action, c'est-à-dire que les atomes métalliques forment des liaisons chimiques directement avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [8].

I.1.2.2. La corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité dans le métal ou dans le réactif. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anode et cathode dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) [9].

I.1.2.3. La corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux, les microorganismes agissent sur le procédé de corrosion, d'une ou de plusieurs façons [10].

- Par action directe sur le taux de réaction anodique ou cathodique.
- Par création des milieux corrosifs.
- Par croissance et multiplication des micro-organismes, qui favorisent la création des cellules électrolytiques à la surface.

I.1.3. Morphologie de la corrosion

Selon la nature du matériau et des caractéristiques de son environnement, la corrosion peut être classée en deux grandes classes : la corrosion uniforme et la corrosion localisée [11].

I.1.3.1. La Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Dans ce cas, le métal est à l'état actif. Elle peut être contrôlée par des mesures de perte de poids ou la diminution de l'épaisseur du métal (**Figure I.2**) [12].



Figure I.2. La corrosion uniforme

I.1.3.2. La corrosion localisée

La corrosion localisée est la forme la plus insidieuse. Elle se produit sur une partie du métal qui représente un lieu spécifiquement anodique, clairement distingué, dont la surface est très réduite par rapport au reste de la structure métallique qui constitue la zone cathodique. En

effet, pour une perte de poids minime, ce type de corrosion peut être catastrophique (**Figure I.3**) [13].

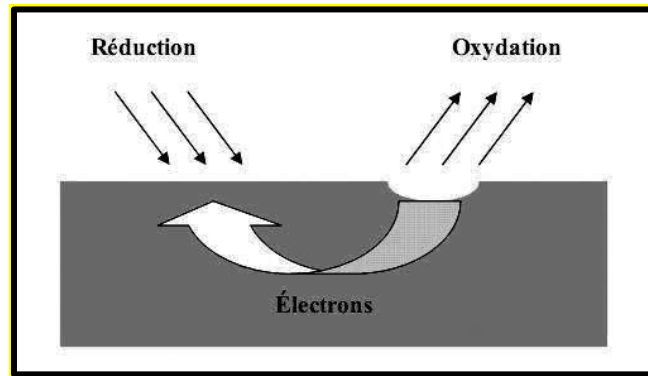


Figure I.3. La corrosion localisée

On en distingue les différents types cités ci-dessous :

A. La corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres a un caractère complètement différent. Seuls certains points du métal sont attaqués et la corrosion progresse en profondeur. Bien que la quantité de métal attaquée soit faible, cette forme de corrosion est très dangereuse car elle peut conduire à la formation de trous profonds et même à la perforation. L'intensité de la corrosion est exprimée par la densité, la profondeur et le diamètre des piqûres. Il est important de noter que la perte de poids et la réduction de l'épaisseur ne sont pas significatives dans la mesure de cette corrosion (**Figure I.4**) [14].



Figure I.4. Corrosion par piqûres

B. La corrosion par érosion

La corrosion par érosion se produit aux interfaces entre les fluides en mouvement et les matériaux. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse d'écoulement du fluide et se

caractérisé par la formation de rayures, de ravinements et d'ondulations dues à la dégradation locale du métal dans le sens de l'écoulement du fluide [15].

C. La Corrosion inter granulaire

La Corrosion inter granulaire se produit à la surface et se propage en profondeur en suivant les régions inter cristallines. Cette forme de corrosion provoque le déchaussement des grains et entraîne des pertes en poids importantes accompagnées d'une perte de résistance mécanique du matériau (**Figure I.5**) [16, 17].

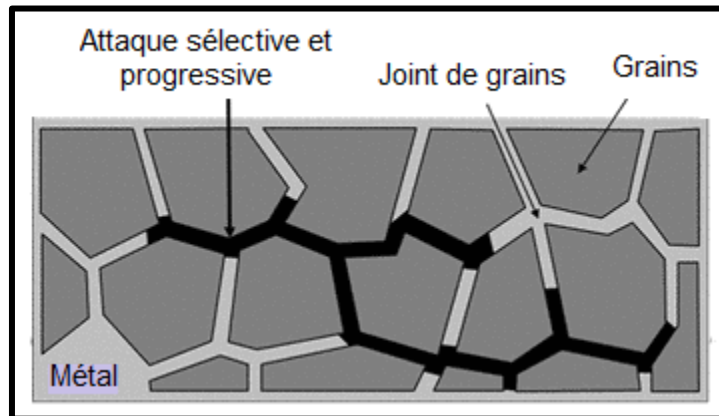


Figure I.5. Corrosion inter granulaire

D. La corrosion galvanique

La corrosion galvanique est due à la formation d'une cellule électrochimique entre deux métaux. L'un des métaux est oxydé (sites anodiques) tandis que l'autre est réduit (sites cathodiques). C'est le premier (le moins noble des deux) qui sera corrodé [18].

E. La corrosion caverneuse

Attaque sélective due à la différence d'accessibilité d'oxygène entre deux parties d'une structure créant une pile électrochimique, elle est observée dans les endroits peu accessibles à l'oxygène [19].

I.1.4. Facteurs de corrosion :

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux (**Tableau I.1**) [20].

Tableau I.1. Principaux facteurs de corrosion

Facteurs définissant les modes d'attaque	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -Acidité (pH) du milieu -Température, pression -Présence de bactéries	-Composition de l'alliage -Procédés d'élaboration -Impuretés dans l'alliage -Traitements thermiques, mécaniques	-Etat de surface -Défauts de fabrication -Forme de pièces -Emploi d'inhibiteurs -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Température - modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous -Modification des revêtements protecteurs

I.2. Corrosion des aciers

Les métaux et les alliages métalliques ne sont pas stables chimiquement et subissent des phénomènes de corrosion, liés dans la majorité des cas à un processus électrochimique (réactions d'oxydoréduction) [19]. Le phénomène de corrosion des aciers est un phénomène naturel et artificiel déclaré par leur utilisation et l'exploitation de ces métaux [21].

I.2.1. Définition des aciers

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et ayant un certain pourcentage de carbone. Il peut encore contenir d'autres éléments, mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier.

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou à une combinaison des deux [22, 23].

I.2.2. Les différents types des aciers

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation [24].

- Les aciers au carbone ou ordinaires
- Les aciers de traitements thermiques alliés ou non
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

I.2.3. Les aciers ordinaires

L'acier ordinaire est l'un des alliages métalliques les plus utilisés dans le monde. Il est couramment utilisé dans des conditions industrielles difficiles, notamment dans l'extraction et

le traitement du pétrole et du gaz, ce qui le rend très sensible à la corrosion [25]. Il constitue environ 80% de la production des aciers. Il se divise en plusieurs sous-familles (Tableau I.2) [26].

Tableau I.2. Acier ordinaire

Nuance	Extra-doux	doux	Demi-doux	Demi-dur	dur	Extra-dur
Pourcentage de carbone	$C < 0,15$	$0,15 < C < 0,20$	$0,20 < C < 0,30$	$0,30 < C < 0,40$	$0,40 < C < 0,60$	$0,60 < C$

I.3. La protection contre la corrosion

La protection contre la corrosion doit être considérée pour éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie [27]. Généralement, le choix de la technique implique une combinaison de nombreux processus qui prennent en compte les caractéristiques du matériau, celles de l'environnement et le coût de l'opération [28].

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

- prévention par une forme adaptée des pièces
- prévention par un choix judicieux des matériaux
- protection par revêtements
- protection par inhibiteurs
- protection électrochimique [29].

I.3.1. Protection par inhibiteurs :

I.3.1.1. Définition d'inhibiteur

Selon le National Association of Corrosion Engineers (NACE) un inhibiteur de corrosion est « une substance chimique qui ajoutée à faible concentration au milieu corrosif, retarde ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu » [30].

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une « substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif » [31].

I.3.1.2. Propriétés des inhibiteurs

Un inhibiteur de corrosion est efficace s'il satisfait un certain nombre de propriétés [32], pour cela il doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans affecter les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier.
- Etre stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants.
- Etre stable aux températures d'utilisation.
- Etre efficace à faible concentration.
- Etre compatible avec les normes de non-toxicité.

I.3.1.3. Utilisation des inhibiteurs

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application [33] :

- Le traitement des eaux
- L'industrie du pétrole
- La protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère
- L'industrie des peintures sur métaux où les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosive des métaux.

I.3.1.4. Classification des inhibiteurs

Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières (**Figure I.6**) [34] :

- la formulation des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux).
- leur mécanisme d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes).
- leurs mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption à la surface du métal et/ou formation d'un film protecteur).

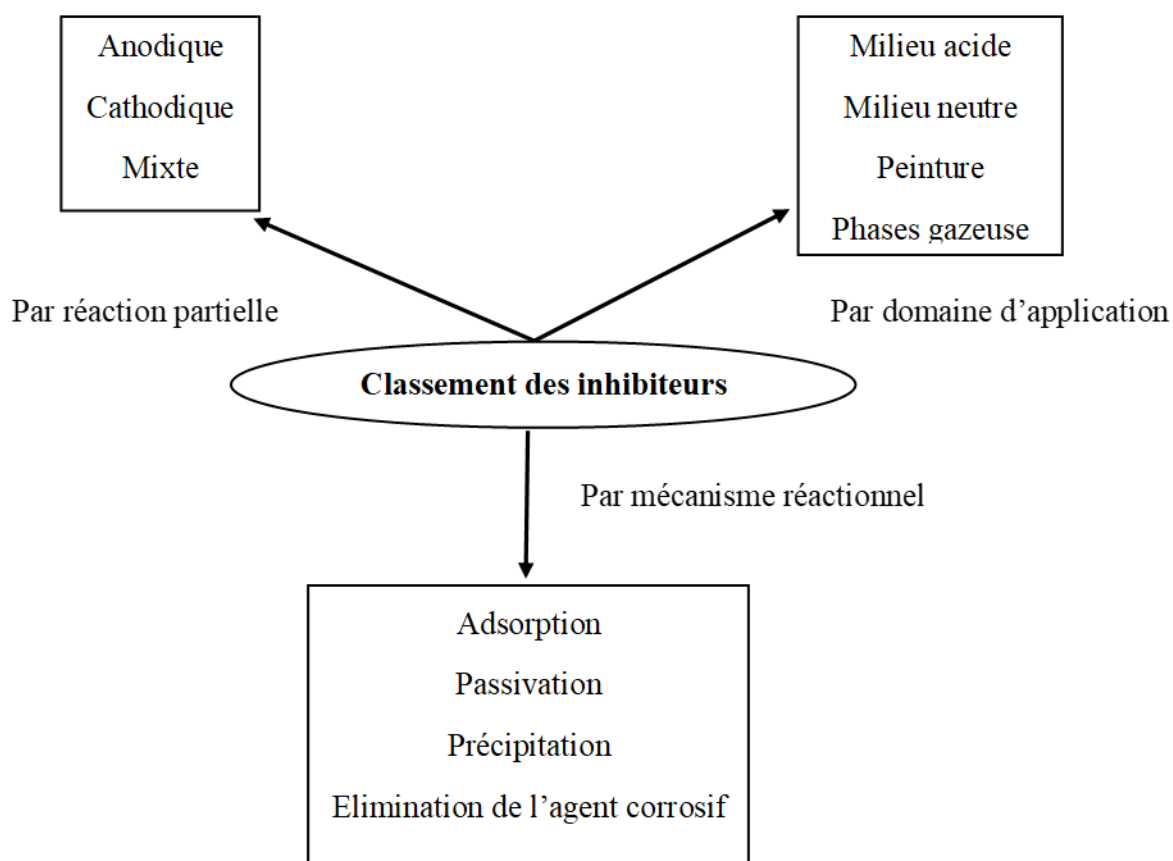


Figure I.6. Classement des inhibiteurs de corrosion

I.3.2. Les inhibiteurs organique de corrosion

Actuellement l'utilisation des inhibiteurs organiques est préférable à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Ils sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière [35]. Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre [36].

Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

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

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs peuvent bloquer les sites anodiques ou cathodiques ou les deux, empêchant ainsi le substrat métallique de subir des réactions de

dissolution du métal ou de dégagement d'hydrogène avec une prédominance de l'adsorption de surface formant un film. Le potentiel d'inhibition des inhibiteurs organiques se caractérise par une forte affinité pour les composés des surfaces métalliques, avec un faible impact sur l'environnement [37]. Ils forment un film hydrophobe protecteur de molécules adsorbées à la surface du substrat métallique, constituant ainsi une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte.

I.3.3. Inhibiteurs de corrosion organiques synthétiques

Ils peuvent être subdivisés en inhibiteurs de corrosion organiques en phase liquide (LPOCI) et en inhibiteurs de corrosion organiques volatils (VOCI).

I.3.3.1. Inhibiteurs organiques en phase liquide

L'efficacité inhibitrice de ces composés organiques est liée à la nature hétérocyclique des composés avec des hétéroatomes N, S, O et P dans leurs molécules, qui servent de centres de réaction pour l'adsorption sur la surface du métal [38].

A. Molécules organiques simples

Les composés organiques simples tels que les azoles (imidazole, benzimidazole, benzotriazole, triazole, tétrazole), les amines, l'urée, le mercaptobenzothiazole (MBT), les aldéhydes, les composés azotés hétérocycliques, les composés contenant du soufre, les composés acétyléniques ainsi que l'acide ascorbique, l'acide succinique et la tryptamine ont été signalés comme étant des inhibiteurs de corrosion organiques efficaces [39, 37, 40, 41]. De nombreuses études ont été menées sur les performances d'inhibition de la corrosion de divers composés organiques simples synthétisés sur des substrats métalliques. [42, 43, 44, 45].

B. Polymères organiques synthétiques

Les matériaux polymères organiques peuvent également être des inhibiteurs de corrosion efficaces car ils contiennent des groupes fonctionnels hétéroatomiques puissants qui forment des complexes inhibiteurs (polymères)-ions métalliques, qui peuvent occuper une large zone sur la surface métallique et la protéger des milieux corrosifs [46, 47, 48].

C. Molécules de surfactants

Les surfactants (agents actifs de surface) constituent une autre classe d'inhibiteurs organiques synthétiques, qui ont également été largement utilisés comme inhibiteurs de corrosion commerciaux et leur efficacité d'inhibition peut être attribuée à leur capacité à affecter la nature des surfaces métalliques et des interfaces de solution. On suppose généralement que l'adsorption des molécules de surfactant sur la surface du métal est la première étape du mécanisme des surfactants en tant qu'inhibiteurs de corrosion dans les milieux agressifs. Le

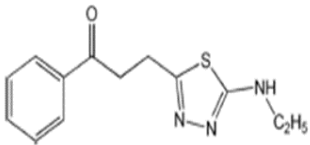
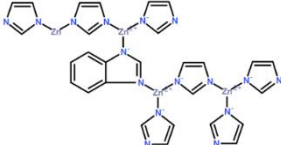
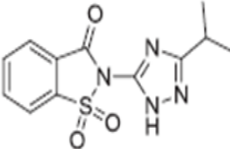
processus d'adsorption est influencé par la nature et la charge de surface du métal, la structure chimique de l'agent de surface et la nature de l'électrolyte agressif [49].

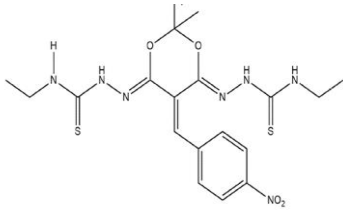
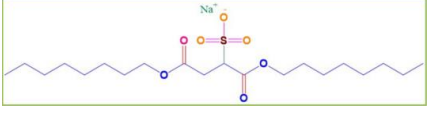
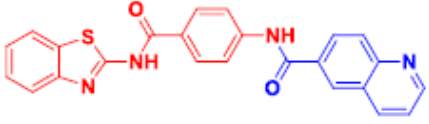
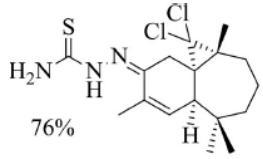
I.3.3.2. Inhibiteur de corrosion volatile (ICV)

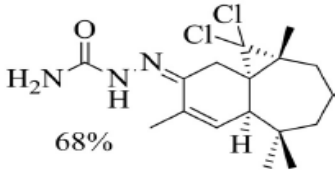
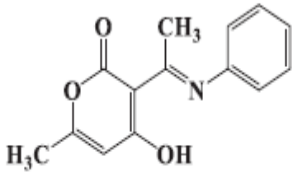
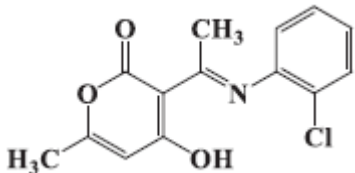
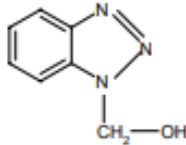
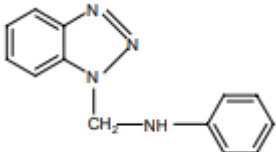
Les inhibiteurs de corrosion volatils (ICV) sont des composés organiques qui protègent les surfaces métalliques en émettant une vapeur, comme un composé à base d'amine. L'azote de l'amine possède deux électrons qui sont attirés par la surface polaire du métal. Une fois qu'il est attiré par le métal, le reste de la molécule est très hydrophobe et repousse l'eau, ce qui retarde considérablement la corrosion.

Plusieurs autres composés organiques ont été étudiés comme inhibiteurs de corrosion, dont certains les énumérer dans le (Tableau I.3)

Tableau I.3. Composés organiques utilisés comme inhibiteurs de corrosion des aciers dans différents milieux électrolytiques.

Nom d'inhibiteur	La formule	Le milieu	L'efficacité	Réf
1-(2-éthylamino-1,3,4-thiadiazol-5-yl)-3-phényl-3-oxopropan		HCl 1M	Une efficacité de 98,4% obtenue à une concentration de 500ppm	[50]
ZIF-62		NaCl 3,5 wt%	Une efficacité de 83,6% obtenue à une concentration de 0,20M	[51]
2-(3-isopropyl-1H-1,2,4-triazol-5-yl)benzo[d]isothiazol-3(2H)-one 1,1-dioxyde		HCl 0,5 M	Une efficacité de 96% obtenue à une concentration de 0,8 mM	[52]

<p>2,2-diméthyl-5-(4-nitrobenzylidène)-1,3-dioxane-4,6-dione bis(4-éthyl-3-thiosémicarbazone)</p>		<p>HCl 1M</p>	<p>Une efficacité de 68,88% à une concentration de 5ppm</p>	<p>[53]</p>
<p>Sel de dioctylsulfosuccinate de sodium</p>		<p>HCl 1M</p>	<p>Une efficacité de 93.32% à une concentration de 0.67 mM</p>	<p>[54]</p>
<p>{[Cd (pydc) (H₂O)₃]. pydcH₂}</p>	<p>C₁₄H₁₄N₂O₁₁Cd</p>	<p>HCl 1M</p>	<p>Une efficacité de 91.42% à une concentration de 10⁻⁴ M.</p>	<p>[55]</p>
<p>{[Mn (pydc) (H₂O)₃]. pydcH₂}</p>	<p>C₁₄H₁₄N₂O₁₁Mn</p>	<p>HCl 1M</p>	<p>Une efficacité de 85.98% à une concentration de 10⁻⁴ M.</p>	<p>[55]</p>
<p>N-[4-(1,3-benzo[d]thiazol-2-ylcarbamoyl)phényl]quinoléine-6-carboxamide</p>		<p>HCl 1N</p>	<p>Une efficacité de 90% à une concentration de 100ppm</p>	<p>[56]</p>
<p>thiosémicarbazone</p>	 <p>76%</p>	<p>H₂SO₄ 1 M</p>	<p>Une efficacité de 62,12% à une concentration de 10⁻³ M</p>	<p>[57]</p>

semicarbazone		H ₂ SO ₄ 1 M	Une efficacité de 68% à une concentration de 10 ⁻³ M	[57]
(E)-4-hydroxy-6-méthyl-3-(1-(phénylimino)éthyl)-2H-pyran-2-one		HCl 1M	Une efficacité de 90% à une concentration de 10 ⁻³ M	[58]
(E)-3-(1-((2-chlorophényl)imino)éthyl)-4-hydroxy-6-méthyl-2H-pyran-2-one		HCl 1M	Une efficacité de 81% à une concentration de 10 ⁻³ M	[58]
N-[1-(benzotriazol-1-yl)méthyl]aniline		NaCl 3 wt%	Une efficacité de 87.13% à une concentration de 150 ppm	[59]
1-hydroxy méthyl benzotriazole (HBTA)		NaCl 3 wt %	Une efficacité de 93.35% à une concentration de 150 ppm	[59]

Chapitre II. Partie Expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre présente le matériel, les paramètres et les techniques expérimentales utilisés telle que la méthode gravimétrique et les techniques électrochimiques pour étudier le phénomène de corrosion de l'acier ordinaire A9M en milieu acide.

II.2. Inhibiteur d'étude

Le benzothiazolinone (BTZ) (**Figure II.1**) est un composé de formule chimique C_7H_5NOS . C'est un conservateur, mais c'est aussi un désinfectant utilisé dans les industries du film, de la fibre, du cuir, de la maçonnerie, de la métallurgie et de l'embaumement [60].



Figure II.1. Le benzothiazolinone

II.2.1. Structure du benzothiazolinone

Il s'agit d'un composé formé par le couplage d'un anneau benzénique et d'un anneau hétérocyclique thiazolinone à cinq chaînons. La molécule de benzothiazolinone, qui peut également être appelée 2(3H)-benzothiazolinone, et qui répond à la structure générale suivante (**Figure II.2**) [61].

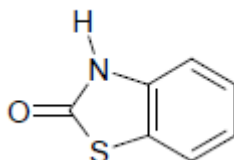


Figure II.2. Structure du benzothiazolinone

II.3. Méthodes d'étude

Pour étudier la corrosion de l'acier ordinaire A9M dans une solution H₂SO₄ à 0,5M en absence et en présence de benzothiazolinone, nous avons utilisé la perte de masse et des méthodes électrochimiques

II.3.1. La perte de masse

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple, non coûteuse et ne nécessite pas d'un instrument important. Elle nécessite seulement une balance analytique, mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Son principe repose sur la mesure de la perte de masse Δm subie par un échantillon de surface S , pendant un temps d'immersion t , dans une solution corrosive en absence et en présence de l'inhibiteur maintenue à une température constante.

Les échantillons d'acier poli, rincés, pesés avec précision et notés (m_1), ont été immergés dans la solution d'essai corrosive contenant différentes concentrations de l'inhibiteur utilisé pour étudier la perte de masse. Après un certain temps, les coupons sont retirés du milieu corrosif, lavés, séchés, repesés et notés (m_2). En soustrayant le poids de l'échantillon avant et après l'immersion, la perte de masse est calculée [62].

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

À partir de la perte de masse la vitesse de corrosion est donnée par la relation suivante :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{St} \quad (2)$$

V_{corr} : la vitesse de corrosion en g/h.m².

Δm : représente la différence entre la masse initiale m_1 et la masse finale m_2 .

S : la surface de la pièce en m².

t : le temps d'immersion en heures.

L'efficacité de l'inhibiteur s'exprime par la relation suivante :

$$E(\%) = \frac{V_{SI} - V_{AI}}{V_{SI}} \quad (3)$$

Avec ;

E : l'efficacité inhibitrice.

V_{AI} : la vitesse de corrosion avec inhibiteur.

V_{SI} : la vitesse de corrosion sans inhibiteur.

II.3.2. Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées permettant l'étude de phénomène de corrosion peuvent être divisées en deux groupes : les techniques stationnaires et les techniques non-stationnaires ou transitoires

II.3.2.1. Techniques stationnaires

A. Potentiel à circuit ouvert (OCP)

Également appelé potentiel de circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel de coupure, potentiel de repos ou potentiel libre [63]. Il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable [27]. Le suivi du potentiel libre en fonction du temps est parfois une information utile pour comprendre le comportement des matériaux en contact avec des milieux humides et corrosifs [64].

B. Courbes de polarisation potentiodynamique (Tafel)

Les courbes de polarisation à l'interface métal-électrolyte sont un aspect important de la cinétique électrochimique. Un potentiostat est utilisé pour appliquer différents potentiels entre les électrodes de travail et de référence afin de déterminer les courbes de polarisation potentiodynamique. Le courant stationnaire établi dans le circuit entre l'électrode de travail et la contre-électrode après un certain temps est mesuré. Cette méthode permet de déterminer avec précision les paramètres électrochimiques d'un métal en contact avec un électrolyte, à savoir : la vitesse de corrosion instantanée (i_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation (R_p). La représentation logarithmique de la densité de courant est généralement préférée pour la détermination expérimentale de ces paramètres électrochimiques, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel. (Figure II.3) [4].

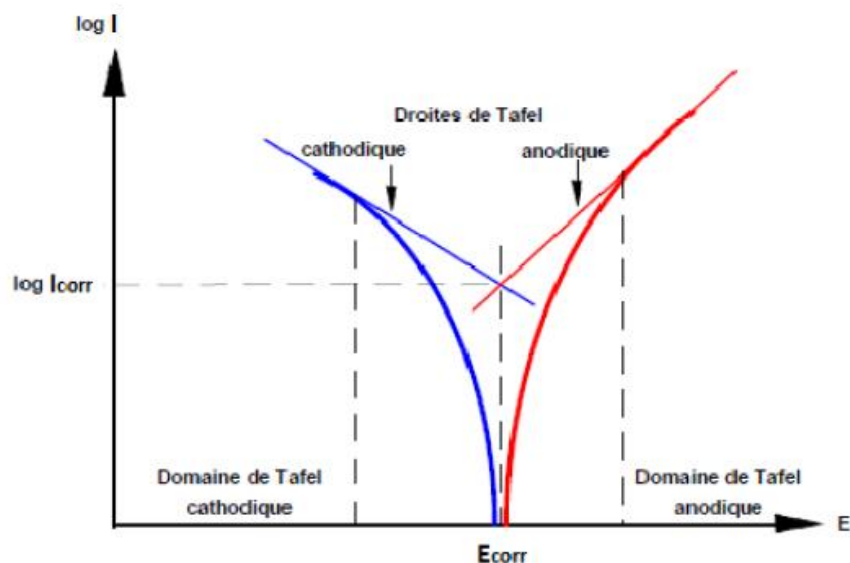


Figure II.3. Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

II.3.2.2. Techniques non stationnaires (transitoires)

A. La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) est une technique qui permet de distinguer divers phénomènes pouvant se produire dans une cellule électrochimique en fonction de la fréquence. Les phénomènes rapides se produisent à hautes fréquences, tandis que les phénomènes lents ont lieu à basses fréquences [65]. Différents processus électrochimiques sont observés à l'interface métal/électrolyte : le transfert de charge se produisant entre l'interface et le métal est défini comme un phénomène rapide, tandis que le transport de matière se produisant entre l'interface et l'électrolyte est défini comme un phénomène plutôt lent. La mesure de l'impédance électrochimique consiste à étudier la réponse du système électrochimique, suite à une perturbation qui est, le plus souvent, un signal alternatif de faible amplitude [4].

II.4. Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans cette étude proviennent des sociétés, VWR CHEMICALS et Rankem.

II.5. Procédures Expérimentales

II.5.1. Conditions expérimentales

II.5.1.1. Matériau d'étude

Le matériau utilisé dans cette étude est l'acier ordinaire A9M (**Figure II.4**), provenant du complexe El hajar-Annaba, de composition représentée dans le **Tableau II.1**

Tableau II.1. La composition chimique de l'acier A9M

C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ti
0,06	0,21	0,02	0,006	0,009	0,030	0,095	0,001
Nb	Ni	Cr	Mo	V	Sn	Fe	
0,001	0,009	0,008	0,003	0,001	0,002	99,54	



Figure II.4. Acier A9M

II.5.1.2. Milieu corrosif

Dans ce travail nous avons utilisé un milieu corrosif d'acide sulfurique de concentration 0.5 M, obtenu par dilution $V=27$ ml de l'acide concentré commerciale (H_2SO_4 98 %) avec l'eau distillée (**Figure II.5**). Les essais ont été effectués dans un milieu aéré normal, sans agitation, en présence et absence de l'inhibiteur à différentes concentrations. La gamme de concentration utilisée dans cette étude est comme suit : $5 \cdot 10^{-5}, 10^{-4}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}$ mol/l

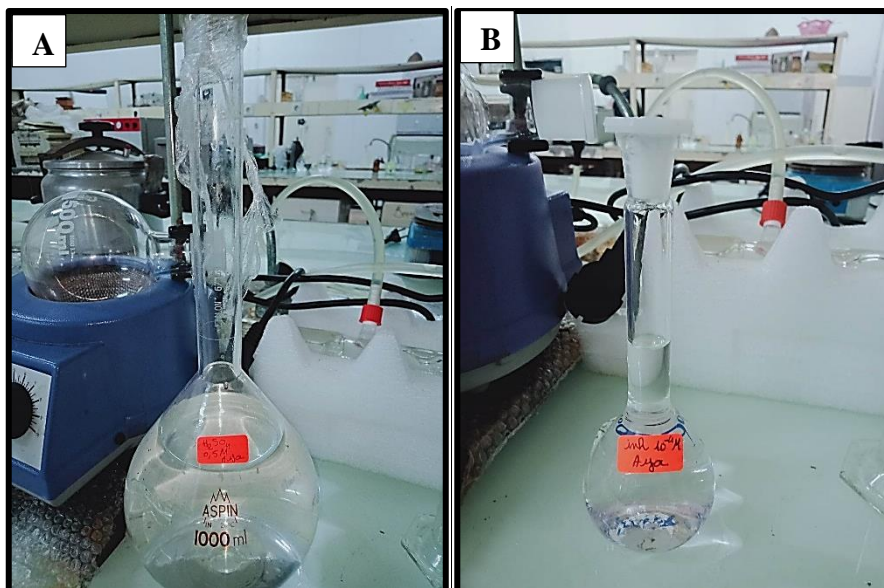


Figure II.5. Solution d' H_2SO_4 (A) et inhibiteur (B)

II.5.1.3. Préparation de la surface

La préparation des surfaces d'échantillon a été effectuée en Utilisant le matériel suivant : Une polisseuse mécanique du papier abrasif et l'eau.

L'acier de cette a été découpé en morceau à l'aide d'une machine de découpe d'acier de type SERVOCUT 301- MM (Abrasive cutter) (Figure II.6), ensuite il a été poli à l'aide d'une polisseuse de marque metkon FORCIPOL 1V (Figure II.7) au papier abrasif de différents tailles (120,180, 320, 600, 800, 1000, 1200, 2400) (Figure II.8). Après le polissage (Figure II.9), il a été lavé avec de l'eau distillé et l'acétone, rincés à nouveau avec de l'eau distillée et séché avec un séchoir à froid avant d'être immergé dans 50mL d' H_2SO_4 à 0,5M en absence et en présence des différentes concentrations de BTZ.



Figure II.6. Machine de découpage



Figure II.7. Polisseuse



Figure II.8. Papier abrasif

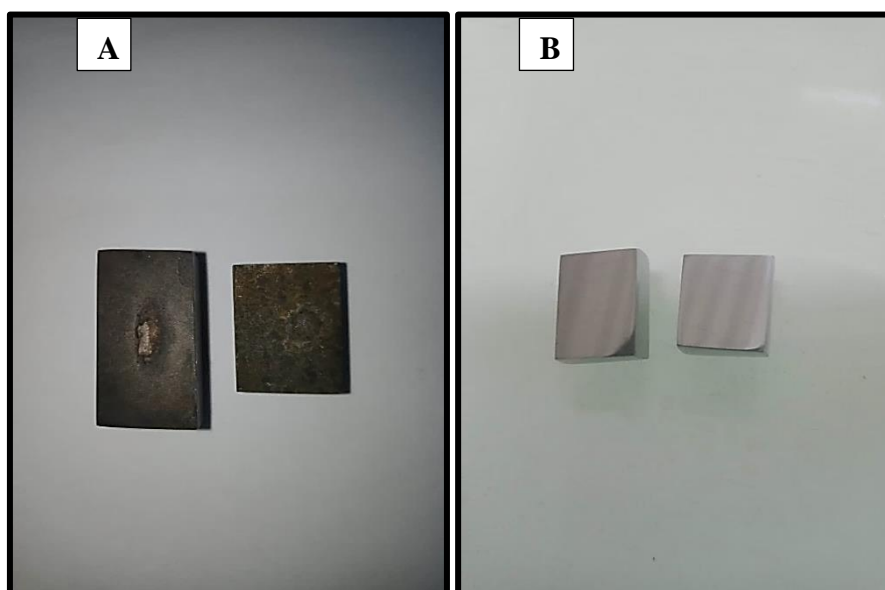


Figure II.9. Acier A9M avant (A) et après (B) le polissage

II.5.1.4. Essais de perte de masse

Les tests de perte de masse ont été réalisés dans une solution corrosive de H_2SO_4 0,5M après 24 heures d'immersion en l'absence et en présence de différentes concentrations d'inhibiteurs, en utilisant des pièces d'acier ordinaire A9M avec différentes surfaces. Après la préparation de leurs surfaces, ces pièces sont pesées à l'aide d'une balance analytique (**Figure II.10**) à quatre décimales chiffres et immergées dans le milieu corrosif (**Figure II.11**). Les pièces ont

été récupérées après 24 heures d'immersion, rincées à l'eau distillée pour éliminer les produits de corrosion de la surface de l'acier, puis séchées et repesées.



Figure II.10. Balance analytique **Figure II.11.** Essai de la perte de masse

II.5.1.5. Essais électrochimiques

Les tests électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un Potentiostat/Galvanostat de type biologique SP-150 (**Figure II.12**), associé au logiciel EC-LAB et connecté à une cellule électrochimique composée de trois électrodes : une électrode de travail en acier ordinaire A9M avec une surface de contact de $0,7\text{cm}^2$, enrobée de résine, une électrode de référence saturée en calomel et une électrode auxiliaire en platine avec fil. Les concentrations utilisées sont $5 \cdot 10^{-5}$, 10^{-4} , $5 \cdot 10^{-3}$, 10^{-2} mol/l. Toutes les expériences ont été réalisées dans un volume de 50mL de la solution corrosive à une température ordinaire.



Figure II.12. Chaîne de corrosion

Avant chaque essai, l'électrode de travail (**Figure II.13**) est poli avec du papier abrasif de différentes granulométries : 120, 320, 600, 800, 1000, 1200 et 2400, puis rincée à l'eau distillée et à l'acétone, et enfin séchée à l'aide d'un séchoir à froid.



Figure II.13. Electrode de travail

Les courbes de l'évolution du potentiel de corrosion : le potentiel de corrosion (E_{ocp}) tend à se stabiliser après trente minutes d'immersion de l'acier A9M.

Pour les mesures d'impédance électrochimique, le balayage a été réalisé, des hautes fréquences (HF) (100kHz) aux basses fréquences (BF) (10mHz) avec une perturbation sinusoïdale de 5mV par décade.

Un intervalle de potentiel de $\pm 0,250V$ avec une vitesse de balayage de 0,5mV/s a été choisi pour les mesures potentiodynamiques.

II.6. Méthodes de Caractérisations

II.6.1. Microscope optique (MO)

Le microscope optique est un dispositif optique constitué de multiples lentilles superposées qui amplifient la capacité de grossissement [66].

L'utilisation principale du microscope optique a été de caractériser la microstructure de l'acier et de faciliter la compréhension des phénomènes se produisant à l'interface entre le métal et la solution. Dans notre travail les observations du MO ont été réalisées à l'aide d'un microscope de marque Primotech ZEISS (**Figure II.14**).



Figure II.14. Microscope optique

II.6.2. Le microscope électronique à balayage (MEB)

La méthode privilégiée pour examiner la topographie d'une surface est la microscopie électronique à balayage. Elle permet d'obtenir des images à haute résolution de la surface d'un échantillon en se fondant sur les interactions entre les électrons et la matière. Un faisceau d'électrons balaye la surface de l'échantillon, provoquant une interaction avec la matière. Cette interaction génère l'émission de particules et de rayonnement. Ces particules sont ensuite analysées à l'aide de divers détecteurs pour étudier la topographie, la microstructure et la composition chimique de la surface [67].

Dans notre travail l'examen de la micrographie de la surface de l'acier ordinaire A9M après 2 heures d'immersion dans H_2SO_4 à 0,5M en absence et en présence de BTZ, a été réalisé à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de marque QUANTA 250 (**Figure II.15**)



Figure II.15. Microscope électronique à balayage

Chapitre III. Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'effet inhibiteur du Benzothiazolinone (BTZ), sur la corrosion de l'acier A9M en milieu acide (H_2SO_4 à 0,5M) à différentes concentrations.

Afin d'approfondir cette étude, nous avons utilisé les méthodes suivantes :

La perte de masse (PM) ;

La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E) ;

La polarisation potentiodynamique (PPD).

III.2. Etude de l'effet inhibiteur de BTZ par la méthode de perte de masse

Le **tableau III.1** présente les résultats obtenus à partir de l'utilisation de la méthode de PM pour étudier l'effet de corrosion de l'acier A9M dans une solution de H_2SO_4 à 0,5M. Les expériences ont été menées pendant 24 heures en absence et en présence de BTZ.

Tableau III.1. Vitesse de corrosion de l'acier ordinaire A9M dans H_2SO_4 à 0,5M après 24h d'immersion en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacité inhibitrices calculées.

<i>Paramètres</i> <i>Concentrations</i>	<i>Δm</i> <i>(g)</i>	<i>V_{corr}</i> <i>(g/m². h)</i>	<i>Efficacités</i> <i>(%)</i>
Sans inhibiteur	0,0279	6,4583	/
5.10^{-5}	0,0099	2,5781	60,08
10^{-4}	0,0237	2,2042	63,05
5.10^{-3}	0,0264	2,2916	72,80
10^{-2}	0,0143	1,1524	80,68

La figure III.1 et le tableau III.1 illustrent la relation entre la concentration de BTZ et la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire A9M lors d'une immersion de 24 heures. Les résultats démontrent qu'en absence de BTZ, la vitesse de corrosion atteint son niveau maximal. Cependant, en présence de différentes concentrations de BTZ, à savoir 5.10^{-5} , 10^{-4} , 5.10^{-3} , et 10^{-2} M, la vitesse de corrosion diminue de manière significative. Cette diminution est attribuée à la formation d'un film inhibiteur relativement stable qui recouvre la surface de l'acier, ce film inhibiteur agit comme une barrière protectrice, limitant l'interaction entre l'acier et le milieu corrosif et ralentissant ainsi le processus de corrosion.

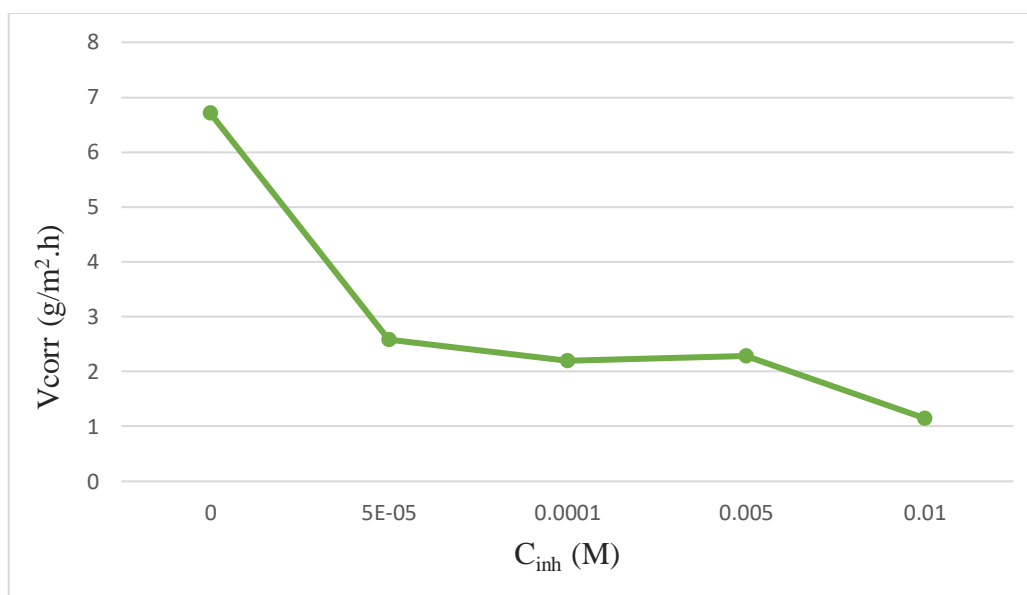


Figure III.1. Évaluation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire A9M après 24h d'immersion dans H_2SO_4 à 0,5M en fonction de différentes concentrations de BTZ.

Les **Figure III.2** présente l'effet de la concentration de l'inhibiteur BTZ, sur l'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire A9M dans H_2SO_4 à 0.5M.

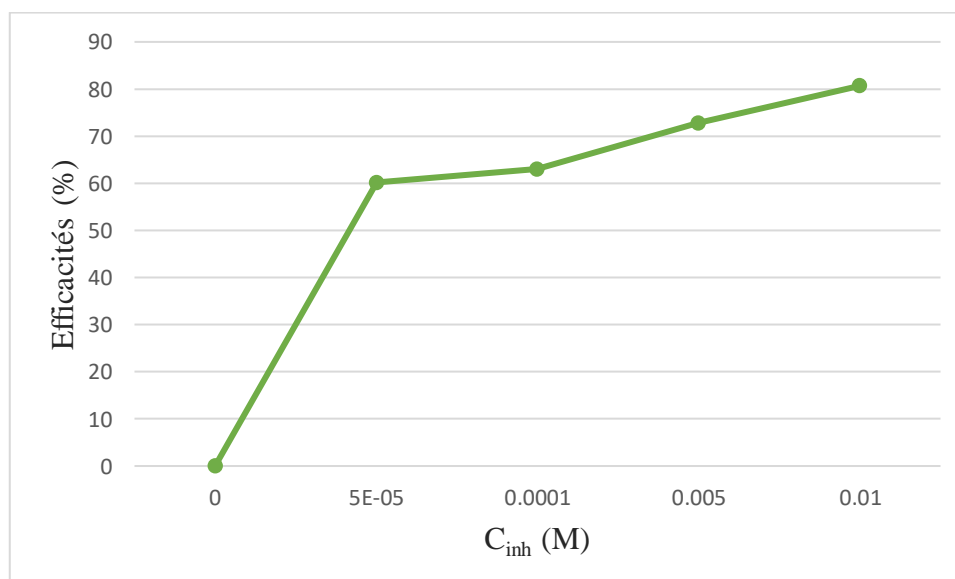


Figure III.2. Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire A9M après 24h d'immersion dans H_2SO_4 à 0,5M en fonction de différentes concentrations de BTZ.

D'après le **tableau III.1** et la **figure III.2**, il est clairement démontré que l'efficacité inhibitrice augmente proportionnellement à la concentration de BTZ. Lorsque la concentration atteint $10^{-2}M$ une efficacité inhibitrice de 80,86% est attribuée. Cela suggère que les molécules de BTZ s'adsorbent à la surface de l'acier. La formation d'une couche à partir de ces

molécules adsorbées isole la surface métallique du milieu corrosif, ce qui réduit le taux de corrosion et améliore l'efficacité inhibitrice.

III.3. Etudes électrochimiques

III.3.1. Suivi du potentiel à circuit ouvert (OCP)

Les expériences de la S.I.E et la PPD ne peuvent pas être réalisées tant qu'un suivi du potentiel à circuit ouvert (OCP) n'a pas été établi. Afin de préparer l'électrode de travail pour le test, elle a été immergée dans la solution de test pendant 30 minutes. Durant cette période, les valeurs du potentiel sont mesurées à chaque instant. Les courbes de la **Figure III.3** traduisent l'évolution de l'OCP en fonction du temps. Ce potentiel est mesuré par rapport à un potentiel de référence (électrode au calomel saturée (ECS)).

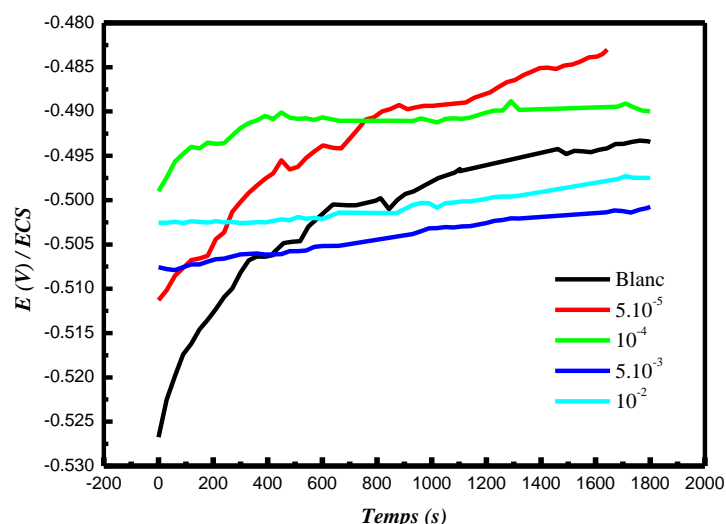


Figure III.3. Suivi du potentiel à circuit ouvert de l'acier ordinaire A9M dans H₂SO₄ à 0.5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations

La **figure III.3** présente l'évolution du potentiel de corrosion de l'acier ordinaire à circuit ouvert dans H₂SO₄ à 0.5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations.

Nous remarquons que la stabilité de potentiel est atteinte après 30 minutes d'immersion pour toutes les concentrations.

En absence d'inhibiteur, le potentiel devient de plus en plus noble, il y a passivation du métal par formation à la surface d'un produit de corrosion, lors de la dégradation de l'acier dans le milieu acide, différents produits de corrosion sont susceptibles de se former. Les dépôts de produits de corrosion formés peuvent jouer un rôle actif de barrière plus ou moins efficace

selon leur nature. Lorsque les essais sont conduits en présence d'inhibiteur, nous avons observé un anoblissement du potentiel par rapport à celui de la solution non inhibée, indiquant la présence d'une couche protectrice de l'inhibiteur sur la surface de l'acier.

III.3.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

La spectroscopie d'impédance électrochimique permet l'évaluation du taux d'inhibition et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique.

Les diagrammes d'impédance électrochimique de l'acier ordinaire immergé dans H_2SO_4 à 0.5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations sont représentés sur la **figure III.4**.

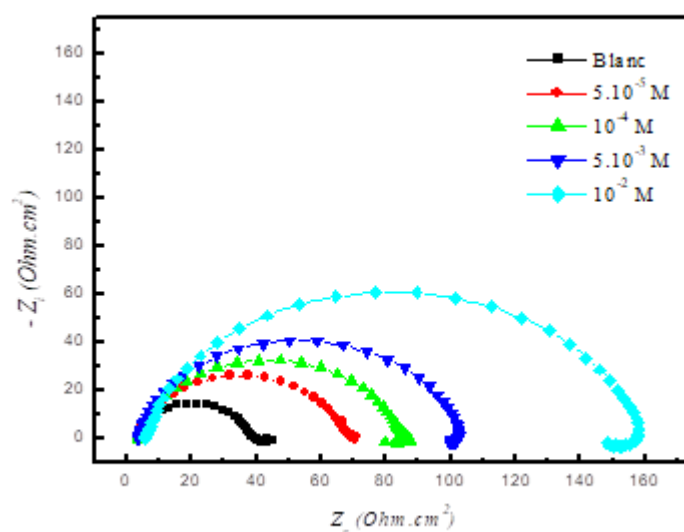


Figure III.4. Diagramme d'impédance électrochimique de l'acier ordinaire A9M dans H_2SO_4 à 0,5M en absence et en présence de différentes concentrations de BTZ.

D'après la **figure III.4**, nous remarquons la présence d'une seule boucle capacitive dont la taille augmente avec l'ajout de la concentration de BTZ. La boucle capacitive pourrait être attribuée à la capacité de la double couche (C_{dl}) en parallèle avec la résistance de transfert de charge (R_{ct}), et qui est due à la formation progressive d'un film protecteur sur la surface du métal, indiquant ainsi l'inhibition du processus de corrosion, ce dernier est contrôlé par le phénomène de transfert de charge.

On peut considérer l'impédance d'un système électrochimique comme une impédance électrique. Les processus se produisant à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte peuvent être représentés par un circuit électrique équivalent (CEE). Chaque composant utilisé, qu'il soit

connecté en série ou en parallèle, représente un paramètre physique spécifique. Ces modèles sont ajustés progressivement en fonction des diagrammes expérimentaux afin d'obtenir les paramètres nécessaires à la compréhension du système étudié.

Le CEE, obtenu à l'aide du logiciel de simulation EC-lab, est représenté sur la **figure III.5**.

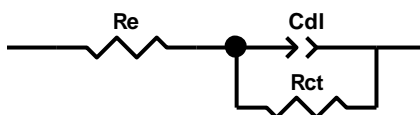


Figure III.5. Circuit électrique équivalent de l'acier ordinaire A9M dans 0,5M H₂SO₄ en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations

Re : Résistance de l'électrolyte ;

Rct : Résistance de transfert de charge ;

Cdl : Capacité de la double couche.

La **figure III.5** présente le circuit électrique équivalent du système électrochimique étudié. Ce circuit est composé d'une résistance d'électrolyte (Re) en série avec une capacité de la double couche (Cdl) et en parallèle avec une résistance de transfert de charge (Rtc). L'utilisation de l'élément Cdl permet d'expliquer la présence du demi-cercle capacitif, qui est lié à l'hétérogénéité de la surface due à différents facteurs tels que la rugosité, les impuretés, les joints de grains et l'adsorption de l'inhibiteur. Ce modèle électrique permet de caractériser et d'analyser les processus électrochimiques complexes se déroulant à la surface de l'acier et d'apporter des informations précieuses sur la cinétique de la corrosion et l'effet de l'inhibiteur. Les paramètres électrochimiques déduits des diagrammes de Nyquist sont regroupés dans le **tableau III.2**.

L'efficacité inhibitrice a été calculée selon l'équation suivante :

$$E(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct_0}}{R_{ct}} * 100 \quad (1)$$

Où : R_{ct0} et R_{ct} sont respectivement, la résistance de transfert de charge en absence et en présence d'inhibiteur.

Tableau III.2. Paramètres électrochimiques déduits des Nyquists de l'acier A9M dans H₂SO₄ à 0,5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.

<i>Paramètres</i> <i>C(M)</i>	<i>Re</i> <i>(Ω.cm²)</i>	<i>Cdl</i> <i>(F.cm²).10⁻³</i>	<i>n</i>	<i>Rct</i> <i>(Ω.cm²)</i>	<i>E</i> <i>(%)</i>
Blanc	3,25	0,28	0,88	35,26	/
5.10 ⁻⁵	3,30	0,18	0,85	65,42	46,10
10 ⁻⁴	3,68	0,16	0,86	81,13	56,53
5.10 ⁻³	3,55	0,12	0,87	98,68	64,26
10 ⁻²	5,65	0,10	0,85	153,7	77,05

D'après le **tableau III.2**, nous remarquons que l'addition de BTZ fait augmenter les valeurs de la R_{ct} jusqu'à 153,7 Ω.cm² à la concentration 10⁻²M et diminuer les valeurs des capacités de la double couche jusqu'à 0,10.10⁻³ F.cm². La diminution de C_{dl} est due à l'adsorption de l'inhibiteur à la surface de l'acier qui a pour effet de réduire la surface active de l'électrode. [68]. L'efficacité maximale calculée en fonction des résistances de transfert de charge est de 77,05% à 10⁻²M.

III.3.3. Courbes de polarisation potentiodynamique

Les courbes de polarisation potentiodynamiques permettent de déterminer de manière précise les paramètres électrochimiques des métaux en contact avec l'électrolyte, à savoir : la densité de courant de corrosion (*i_{corr}*), le potentiel de corrosion (*E_{corr}*) et l'efficacité inhibitrice *E*(%).

Les courbes de polarisation potentiodynamiques de Tafel de l'acier A9M dans H₂SO₄ à 0,5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations sont présentées dans la **figure III.6**.

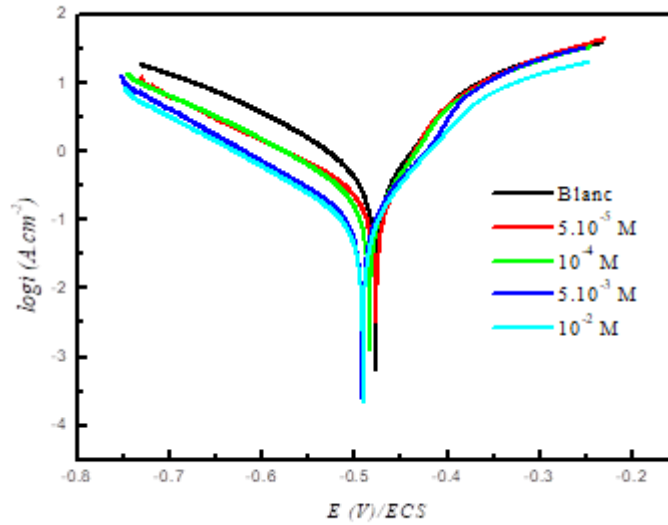
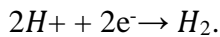


Figure III.6. Courbes de polarisation de l'acier ordinaire A9M dans H₂SO₄ à 0,5M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations.

D'après la **Figure III.6**, nous remarquons que l'ajout de l'inhibiteur affecte à la fois les branches anodiques et cathodiques. L'introduction de l'inhibiteur entraîne une diminution du courant partiel anodique, qui correspond à la dissolution du métal décrite par la réaction d'oxydation : $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$.

Et une diminution du courant partiel cathodique correspond à la réduction des protons :



Nous remarquons aussi que le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs négatives cela se traduit par la formation d'une couche protectrice.

Les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}) obtenus par extrapolation des droites de Tafel, le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel cathodique et anodique (b_c et b_a), et l'efficacité d'inhibition pour différentes concentrations de BTZ dans H₂SO₄ à 0,5 M sont reportées dans le **tableau III.3**.

L'efficacité inhibitrice a été calculée selon l'équation suivante :

$$E(\%) = \frac{i_0 - i}{i_0} * 100 \quad (2)$$

Où : i_0 et i sont les densités de courant sans et avec inhibiteur respectivement.

Tableau III.3. Paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'acier A9M dans H₂SO₄ à 0,5 M en absence et en présence de BTZ à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.

<i>Paramètres</i> <i>C (M)</i>	<i>- E_{corr}</i> <i>(mV/ECS)</i>	<i>i_{corr}</i> <i>(μA.cm⁻²)</i>	<i>b_a</i> <i>(mV.dec⁻¹)</i>	<i>- b_c</i> <i>(mV.dec⁻¹)</i>	<i>E</i> <i>(%)</i>
Blanc	476,451	533,88	79,7	149,6	/
5.10 ⁻⁵	476,425	225,29	76,3	152,5	57,80
10 ⁻⁴	483,237	209,11	72,0	144,0	60,83
5.10 ⁻³	486,551	142,09	73,9	141,14	72,38
10 ⁻²	491,001	103,64	75,0	139,9	80,58

D'après les résultats obtenus, nous pouvons observer que l'augmentation de la concentration de BTZ induit la diminution de la densité de courant de corrosion (i_{corr}), de 533.88 $\mu A.cm^{-2}$ en absence d'inhibiteur à 103.64 $\mu A.cm^{-2}$ pour 10⁻² M de BTZ. L'augmentation de la concentration de BTZ conduit à l'augmentation de l'efficacité inhibitrice qui atteint une valeur maximale de 80,58% pour 10⁻²M de BTZ, ceci nous permet de conclure que, l'ajout de BTZ protège bien l'acier de la corrosion dans de H₂SO₄ à 0,5M.

III.4. Caractérisations

III.4.1. Caractérisation de l'acier A9M par microscope optique

Le microscope optique est employé afin d'observer les surfaces des électrodes à une échelle macroscopique après les avoir immergées dans une solution corrosive, tant en l'absence qu'en présence d'un inhibiteur.

Les surfaces des électrodes ont été examinées après 2 heures d'immersion dans une solution corrosive de H₂SO₄ à 0,5M, en absence et en présence de BTZ à une concentration optimale de 10⁻²M (**Figure III.7** et **Figure III.8**).

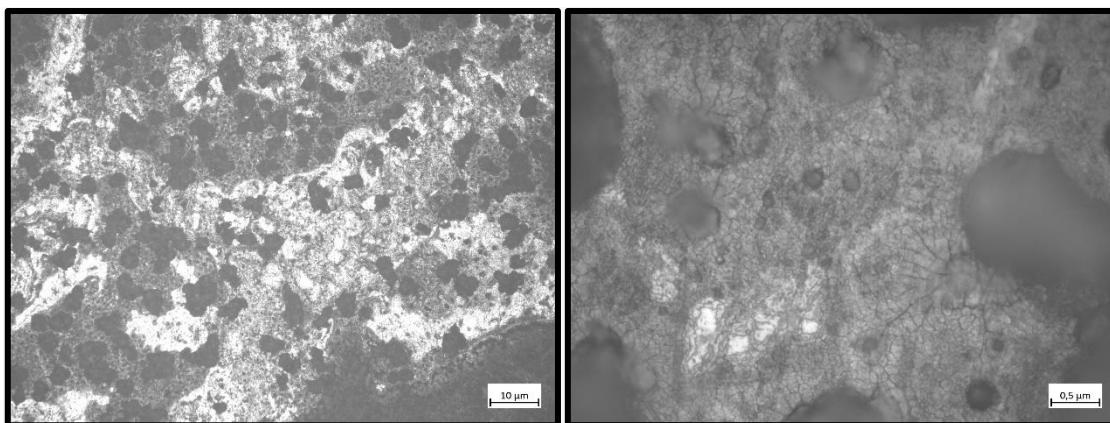


Figure III.7. Micrographies de l'acier ordinaire A9M à différents grossissements en absence d'inhibiteur après immersion de 2h.

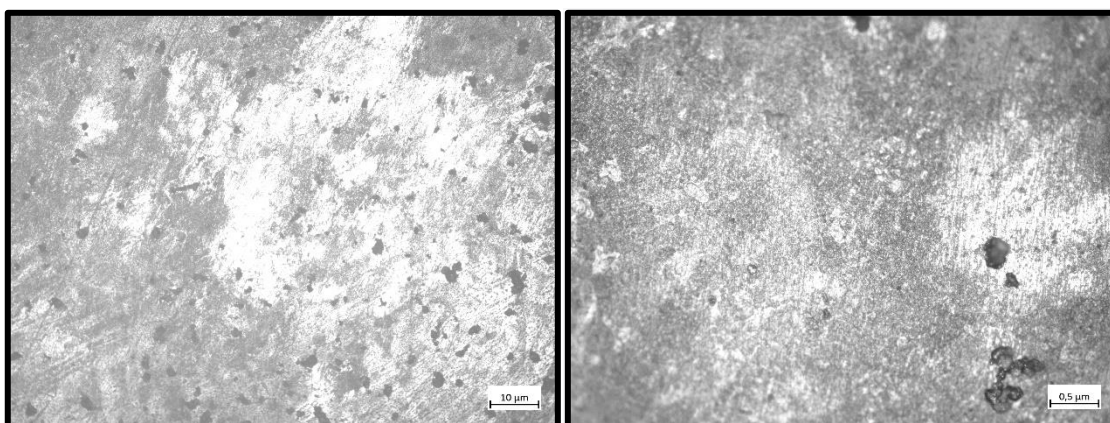


Figure III.8. Micrographies de l'acier ordinaire A9M à différents grossissements en présence de 10^{-2} M de BTZ après immersion de 2h.

En absence de BTZ, nous constatons que la corrosion affecte la surface de l'acier sous forme de fissures, indiquant la présence d'une corrosion par fissuration quasi généralisée sur toute la surface. Cette corrosion est causée par une dépassement locale, ou la couche protectrice est rompue suite à l'adsorption d'ions SO_4^{2-} dans la couche de passivation.

Lorsque le BTZ est présent, nous observons l'absence de fissures à la surface de l'échantillon, ce qui suggère la présence d'un film protecteur. En comparant avec la micrographie optique obtenue en l'absence d'inhibiteur, nous pouvons conclure que le BTZ protège l'acier contre la corrosion en formant une couche adsorbée à sa surface.

III.4.2. Microscopie électronique à balayage et analyse par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (MEB-EDX)

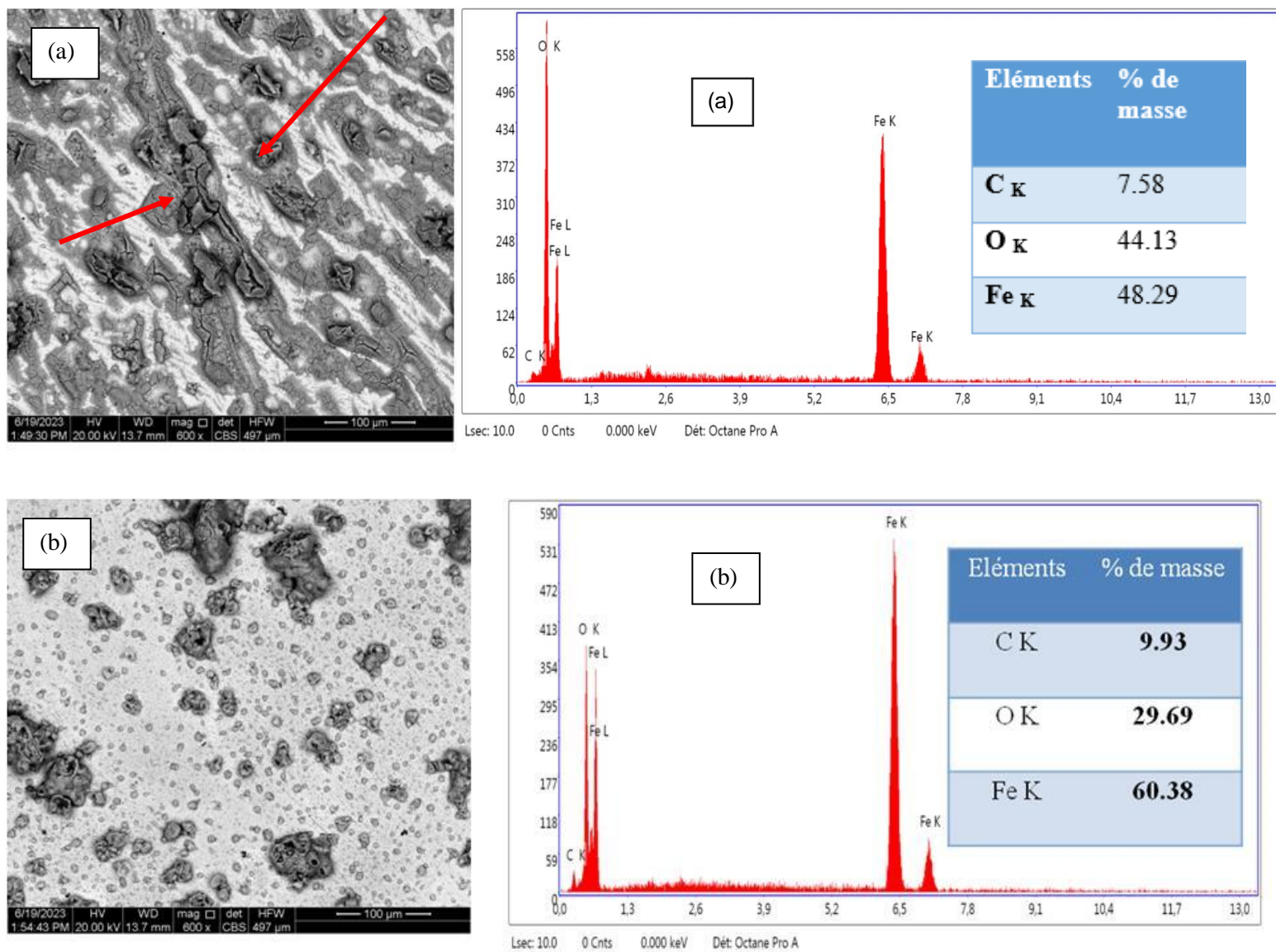


Figure III.9. Micrographies MEB- EDX de l'acier ordinaire A9M dans H_2SO_4 à 0.5M après 2h d'immersion en absence de BTZ (a) et en présence de 10^{-2} M de BTZ (b)

Nous remarquons sur la micrographie de la surface de l'acier après 2 h d'immersion dans H_2SO_4 à 0.5M (**figure a**) que cette dernière est fortement endommagée par l'attaque corrosive de la solution par l'apparition de fissures, ceci montre clairement que l'acier subit une corrosion par fissuration quasi généralisée sur toute la surface. En présence de 10^{-2} M de BTZ

(**figure b**), nous observons une surface lisse comparée à celle de l'acier attaqué dans H_2SO_4 à 0.5 M ce qui confirme la présence d'un film inhibiteur adsorbé sur la surface de l'acier.

La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) a été utilisée pour étudier la surface de l'acier ordinaire A9M en présence de 10^{-2} M de BTZ. Les spectres EDX correspondants de l'acier A9M au contact d'un milieu agressif (**figure a**) révèlent la présence de pics caractéristiques pour le fer et l'oxygène, indiquant la formation d'oxydes/hydroxydes de fer (Fe_2O_3). Lorsqu'on compare le spectre obtenu sans inhibiteur à celui en présence de 10^{-2} M de BTZ (**figure b**), on observe une réduction du pourcentage massique de l'oxygène. Cette diminution est attribuée à la présence de molécules inhibitrices de BTZ, qui gênent le développement d'oxyde de fer, ainsi la présence d'une quantité inférieure d'oxygène à la surface de l'acier A9M montre que les molécules de BTZ agissent efficacement comme inhibiteur de corrosion pour cet acier.

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette étude consistait à évaluer l'effet inhibiteur de la benzothiazolinone (BTZ) en tant qu'inhibiteur organique dans la lutte contre la corrosion de l'acier ordinaire A9M dans un milieu acide (H_2SO_4 à 0,5). Pour atteindre cet objectif nous avons utilisés la méthode de perte de masse et des méthodes électrochimiques telles que le potentiel à circuit ouvert, la spectroscopie d'impédance électrochimique et la polarisation potentiodynamique.

Les résultats de l'inhibition de la corrosion de l'acier A9M dans H_2SO_4 à 0,5M, sont les suivants :

Par la méthode de perte de masse

- ✓ La vitesse de corrosion diminue en fonction de la concentration de BTZ.
- ✓ L'efficacité inhibitrice augmente à mesure que la concentration augmente, atteignant son maximum à 80,68% à une concentration de $10^{-2}M$. Cette augmentation de l'efficacité est due à l'absorption des molécules de l'inhibiteur sur la surface de l'acier, créant ainsi un film protecteur qui prévient la dissolution de l'acier

Par la spectroscopie d'impédance électrochimique

- ✓ La présence d'une seule boucle capacitive, en présence de différentes concentrations d'inhibiteur dans le diagramme de Nyquist, indique que les phénomènes de transfert de charge contrôlent le mécanisme de corrosion.
- ✓ L'efficacité inhibitrice maximale obtenue est de 77,05% correspondant à la concentration $10^{-2}M$.

Par les courbes de polarisation potentiodynamique

- ✓ La présence de BTZ induit une diminution de la densité de courant cathodique et anodique, ce qui indique que BTZ à un caractère mixte.
- ✓ L'ajout de $10^{-2}M$ a amélioré l'efficacité inhibitrice de 57,80% à 80,58% dans H_2SO_4 à 0,5M.

Les micrographies MO, obtenues en présence de BTZ ont montré que ce dernier protège l'acier contre la corrosion en formant un film adsorbé à sa surface.

Les micrographies MEB ont confirmé les résultats obtenus par MO.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **S. ATHMANI**, (2019). Etude de l'efficacité inhibitrice de l'agave americana sur la corrosion d'un acier ordinaire dans 0,5 M H₂SO₄ par des techniques électrochimiques, (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba).
- [2] **AL-NOAIMI, Mousa Z, SAADEH, Haytham, HADDAD, Salim F., et al.** Syntheses, crystallography and spectroelectrochemical studies of ruthenium azomethine complexes. *Polyhedron*, **2007**, vol. 26, no 14, p. 3675-3685.
- [3] **S. Bensaada**. All content following this page was uploaded. On 07 November **2019**.
- [4] **H. HAMANI**, (2015). Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff, (Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas–Setif-1).
- [5] **S. MESSIKH**, (2022). Etude de l'inhibition de la corrosion d'acier doux par des composés organiques en milieu acide, (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri–Constantine 1).
- [6] **SHORT, A.** Introduction to corrosion and its control, corrosion in the metals and its prevention. National Corrosion Service, NPL, **2003**, p. 1-9.
- [7] **HEUSLER, K. E., LANDOLT, D. et TRASATTI, S.** Electrochemical corrosion nomenclature (Recommendations **1988**). *Pure and applied chemistry*, 1989, vol. 61, no 1, p. 19-22.
- [8] **L. GHELANI**, (2018). Tenue à la corrosion des revêtements composites Ni/SiC électrodéposés sur le substrat en acier, (Thèse de doctorat, Université Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2).
- [9] **S. Bensaada**. All content following this page was uploaded, on 11 October **2016**.
- [10] **LAMOUREUX, J. J.** Précis de Corrosion, **1994**. Editions Beau Chemin Itée, Paris.
- [11] **N. Le Bozec**, (2000). Réaction de Réduction de l'Oxygène sur les Aciers Inoxydables en Eau de Mer Naturelle, (Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale).
- [12] **ALDYKEWICZ, A. J., ISAACS, H. S., et DAVENPORT, A. J.** The investigation of cerium as a cathodic inhibitor for aluminum-copper alloys. *Journal of the Electrochemical Society*, **1995**, vol. 142, no 10, p. 3342.
- [13] **PRASANNA K.M.N., KHANA A.S., RAMESH CHANDRA, QUADDAKERS W.J.** The formation of aluminium oxide scale on high temperature alloys. *Oxidation Of Metals*, 46 (5/6), p. 465-480.
- [14] **DAUFIN, Georges et TALBOT, Jean.** Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. *Le Lait*, **1971**, vol. 51, no 507, p. 375-398.

Références Bibliographiques

- [15] **M. YAKOUBI**, (2015). Effet des petites déformations par compression Sur le comportement à la corrosion de l'alliage d'aluminium de fonderie Al 4%Cu, (Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou).
- [16] **PERRIN, Robert et SCHARFF, Jean-Pierre**. Chimie industrielle. Masson, **1993**.
- [17] **FUVELLE, Christian**. Introduction à la corrosion : formes et prévention. Centre technique des industries mécaniques, **1988**.
- [18] **RA. RIKOUH**, (2020). Synthèse et étude de l'effet anti corrosif d'une série de bases de Schiff symétrique sur acier doux, (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas – Setif1).
- [19] **N. MAHIEDDINE**, (2014). Influence du Peroxyde d'hydrogène sur La susceptibilité à la Corrosion des aciers Inoxydables en milieu salin, (Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar – Batna).
- [20] **ORLOWSKI, Pierre**. Comment vaincre la corrosion métallique. Paris : Eyrolles, **1973**.
- [21] **BACHIR. KERBOUA**. Analyse de la corrosion des aciers et leur protection. Editions universitaires e, **2021**.
- [22] **TORRES, V. V., RAYOL, V. A., MAGALHÃES, M., et al**. Study of thioureas derivatives synthesized from a green route as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. Corrosion Science, **2014**, vol. 79, p. 108-118.
- [23] **ZAKARIA, K., NEGM, N. A., KHAMIS, E. A., et al**. Electrochemical and quantum chemical studies on carbon steel corrosion protection in 1 M H₂SO₄ using new eco-friendly Schiff base metal complexes. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, **2016**, vol. 61, p. 316-326.
- [24] **H. MARMI**, (2017). Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs, (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra).
- [25] **SOUZA, Lucas, PEREIRA, Elaine, MATLAKHOVA, Lioudmila, et al**. Ionic Liquids as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel Protection in Hydrochloric Acid Solution: A First Review. Journal of Materials Research and Technology, **2022**.
- [26] **H. MAROUF**, (2012). Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique acier ordinaire E36/ Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation, (Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou).
- [27] **F. Constantin**, (2011). Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement. (Thèse de doctorat, Université De Pitești – Roumanie).

Références Bibliographiques

- [28] **N. AIMEUR**, (2019). Contribution à l'étude de la biocorrosion de l'acier au carbone en eau de mer naturelle, Influence de certaines bactéries genre Bacillus sur l'inhibition de cette corrosion. (Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou).
- [29] **LANDOLT, D., et al.** " Corrosion et Chimie de Surface des Métaux", Traité des Matériaux. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, **1993**, vol. 12.
- [30] **NORMAN, E. H.** NACE glossary of corrosion terms. Materials Protection, **1965**, vol. 4, no 1, p. 79.
- [31] **FIAUD, C., LEMAITRE, C., et PÉBÈRE, N.** Corrosion et anticorrosion, chapitre 13. Lavoisier, Paris, **2002**.
- [32] **V. Thouard, J. Rochett**, Edit. Moniteur Paris, (2000).
- [33] **GOUGH, Mark et BARTOS, Milan.** Developments in High Performance, Environmentally Friendly Corrosion Inhibitors for the Oilfield. In : CORROSION 99. OnePetro, **1999**.
- [34] **UHLIG, Herbert et VOELTZEL, Jacques.** Corrosion et protection. Paris : Dunod, **1970**.
- [35] **FIAUD, C., LEMAITRE, C., et PÉBÈRE, N.** Corrosion et anticorrosion, chapitre 13. Lavoisier, Paris, **2002**.
- [36] **R. MEHIBEL**, (2008). Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium, (Mémoire de Magister, Université 20 Aout – Skikda).
- [37] **YARO, Aprael S., KHADOM, Anees A., et WAEL, Rafal K.** Apricot juice as green corrosion inhibitor of mild steel in phosphoric acid. Alexandria Engineering Journal, **2013**, vol. 52, no 1, p. 129-135.
- [38] **XHANARI, Klodian et FINŠGAR, Matjaž.** Organic corrosion inhibitors for aluminium and its alloys in acid solutions : a review. RSC advances, **2016**, vol. 6, no 67, p. 62833-62857.
- [39] **V. Gentil, Corrosão**, 4th ed., LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, (2003).
- [40] **KUZNETSOV, Yu I. et KAZANSKY, L. P.** Physicochemical aspects of metal protection by azoles as corrosion inhibitors. Russian Chemical Reviews, **2008**, vol. 77, no 3, p. 219.
- [41] **DUTRA, Aldo Cordeiro et DE PAULA NUNES, Laerce.** Proteção catódica: técnica de combate à corrosão. Interciência, **2011**.

- [42] LI, Xianghong, DENG, Shuduan, FU, Hui, et al. Adsorption and inhibition effect of 6-benzylaminopurine on cold rolled steel in 1.0 M HCl. *Electrochimica Acta*, **2009**, vol. 54, no 16, p. 4089-4098.
- [43] VERMA, Chandrabhan, SINGH, P., BAHADUR, I., et al. Electrochemical, thermodynamic, surface and theoretical investigation of 2-aminobenzene-1, 3-dicarbonitriles as green corrosion inhibitor for aluminum in 0.5 M NaOH. *Journal of Molecular Liquids*, **2015**, vol. 209, p. 767-778.
- [44] QIANG, Yujie, GUO, Lei, ZHANG, Shengtao, et al. Synergistic effect of tartaric acid with 2, 6-diaminopyridine on the corrosion inhibition of mild steel in 0.5 M HCl. *Scientific reports*, **2016**, vol. 6, no 1, p. 33305.
- [45] KELEŞ, Hülya et KELEŞ, Mustafa. Adsorption and anticorrosion behaviour of an imine compound on low carbon steel in HCl solution at different potentials. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **2018**, vol. 32, no 5, p. 473-495.
- [46] ATTA, Ayman M., EL-MAHDY, Gamal A., AL-LOHEDAN, Hamad A., et al. Synthesis and application of hybrid polymer composites based on silver nanoparticles as corrosion protection for line pipe steel. *Molecules*, **2014**, vol. 19, no 5, p. 6246-6262.
- [47] ANSARI, K. R. et QURAISHI, M. A. Effect of three component (aniline–formaldehyde and piperazine) polymer on mild steel corrosion in hydrochloric acid medium. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, **2015**, vol. 18, p. 12-18.
- [48] HAFEEZ, M., FAHEEM, M., ABDIN, Z. Ul, et al. Synthesis and characterization of polyaniline-based conducting polymer and its anti-corrosion application. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, **2017**, vol. 12, no 3, p. 707-717.
- [49] OLAJIRE, Abass A. Corrosion inhibition of off shore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors-A review. *Journal of Molecular Liquids*, **2017**, vol. 248, p. 775-808.
- [50] ANNON, Iman A., ABBAS, Ahmed S., AL-AZZAWI, Waleed K., et al. Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid environment using thiadiazole derivative: Weight loss, thermodynamics, adsorption and computational investigations. *South African Journal of Chemical Engineering*, **2022**, vol. 41, no 1, p. 244-252.
- [51] ZHANG, Yuhao, CUI, Hongzhi, HU, Xiaoping, et al. The non-crystalline metal-organic framework for corrosion inhibitor behavior in sodium chloride solution. *Materials Today Communications*, **2022**, vol. 33, p. 104519.

Références Bibliographiques

- [52] **YOUSEF, Tarek A., ALHAMZANI, Abdulrahman G., ABOU-KRISHA, Mortaga M., et al.** Experimental and theoretical examinations of triazole linked saccharin derivatives as organic corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid. *Journal of Molecular Structure*, **2023**, vol. 1275, p. 134603.
- [53] **IDELFITRI, Nur Iffah Fitri, DZULKIFLI, Nur Nadia, ASH'ARI, Nur Ain Nabilah, et al.** Synthesis, characterisation and corrosion inhibitory study of Meldrum's acid Thiosemicarbazone: Weight Loss, SEM-EDX and DFT. *Inorganic Chemistry Communications*, **2023**, vol. 150, p. 110485.
- [54] **GANJOO, Richika, SHARMA, Shveta, THAKUR, Abhinay, et al.** Thermodynamic study of corrosion inhibition of Dioctylsulfosuccinate Sodium Salt as corrosion inhibitor against mild steel in 1 M HCl. *Materials Today: Proceedings*, **2022**, vol. 66, p. 529-533.
- [55] **ABD EL AZIZ, S. Fouda, ETAIW, Safaa Eldin H., et SOBHY, Sally.** Metal-organic frameworks based on heterocyclic ligands and some transition metals as effective carbon steel corrosion inhibitors in aqueous environment. *Journal of Molecular Liquids*, **2022**, vol. 348, p. 118402.
- [56] **SENTHILKUMAR, Gopal, UMARANI, Chinnusamy, et RAMACHANDRAN, Arumugam.** Investigation on corrosion inhibition effect of N-[4-(1, 3-benzo [d] thiazol-2-ylcarbamoyl) phenyl] quinoline-6-carboxamide as a novel organic inhibitor on mild steel in 1N HCl at different temperatures : experimental and theoretical study. *Journal of the Indian Chemical Society*, **2021**, vol. 98, no 6, p. 100079.
- [57] **BIMOUSSA, Abdoullah, KOUMYA, Yassine, OUBELLA, Ali, et al.** Synthesis, experimental and theoretical studies of sesquiterpenic thiosemicarbazone and semicarbazone as organic corrosion inhibitors for stainless steel 321 in H₂SO₄ 1M. *Journal of Molecular Structure*, **2022**, vol. 1253, p. 132276.
- [58] **EL HATTAK, A., IZZAOUIHDA, S., ROUIFI, Z., et al.** Anti-corrosion performance of pyran-2-one derivatives for mild steel in acidic medium : electrochemical and theoretical study. *Chemical Data Collections*, **2021**, vol. 32, p. 100655.
- [59] **RAVICHANDRAN, R., NANJUNDAN, S., et RAJENDRAN, N.** Effect of benzotriazole derivatives on the corrosion of brass in NaCl solutions. *Applied Surface Science*, **2004**, vol. 236, no 1-4, p. 241-250.
- [60] https://www.atamanchemicals.com/benzisothiazolinone_u26331/?lang=FR
- [61] **H. CHABANE, (2011).** Nouveaux derives de la benzothiazolinone synthese et etude pharmacologique, (Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar – Annaba).

Références Bibliographiques

- [62] SHAMSHEERA, K. O., PRASAD, Anupama R., ARSHAD, Muhammed, et al. A sustainable method of mitigating acid corrosion of mild steel using jackfruit pectin (JP) as green inhibitor: Theoretical and electrochemical studies. *Journal of the Indian Chemical Society*, **2022**, vol. 99, no 1, p. 100271.
- [63] AUDISIO, S., MAZILLE, H., et SINICKI, C. Corrosion des métaux et alliages : corrosion et génie industriel, cours, [Lyon, 10-14 septembre et 17-21 septembre **1984**].
- [64] MAZILLE, H. et BERRAGER, G. Corrosion des métaux et alliages. Mécanismes et Phénomènes. **2002**.
- [65] C. RIBAUT, (2008). Elaboration d'un biocapteur cellulaire impédance métrique pour la mesure des changements physiologiques affectant la cellule parasitée, (Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- [66] <https://www.maxicours.com/se/cours/utilisation-du-microscope-optique/>
- [67] Milcard FAUSTIN, (2013). Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M : Application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* (Apocynacées), (Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane).
- [68] HADJADJ, Mohamed, MEDDOURA, Noura, DAKMOUCHE, Messaouda, et al. L'inhibition de corrosion de l'acier xc52 à 20% H₂SO₄ par 3-methylthio-4-tolyl-1, 2-dithiolylium contre anion I. **2011**.